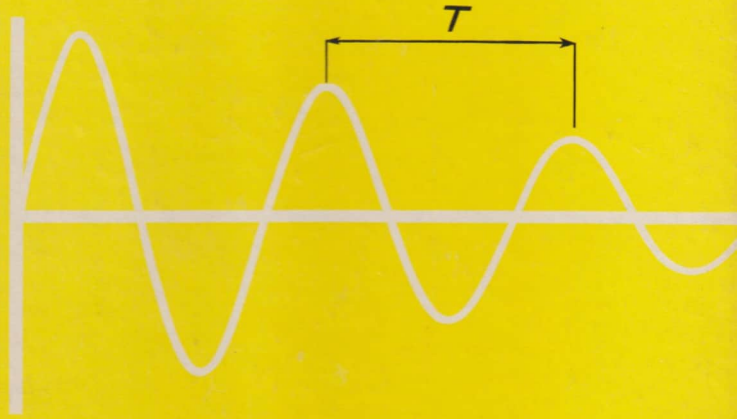
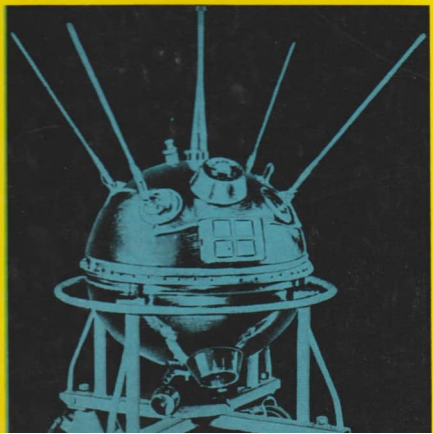
PHYSIK 12

Erweiterte Oberschule B-Zweig





10^0 10^2 10^4 10^6 10^8 10^{10} 1

Frequenz f

Langwellen

Mittelwellen

Kurzwellen

Ultrakurzwellen

Mikrowellen

Technische Wechselströme

Telefonströme

Hertzsche Wellen

Wellenlänge λ

1000 km 1 km 1 m 1 mm

10^{14} 10^{16} 10^{18} 10^{20} 10^{22} 10^{24}

Ultrarotes Licht

Sichtbares Licht

Ultraviolettes Licht

Röntgenwellen

Gammastrahlen

Kosmische Strahlen

10^{-3} mm 10^{-6} mm 10^{-9} mm 10^{-12} mm

Physik

Lehrbuch für die erweiterte Oberschule

Klasse 12 (B)

VOLK UND WISSEN

VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1966

Die Manuskripte wurden verfaßt von
Dr. Helmut Mucke, Dresden (3. Lichtwellen, 4. Röntgenwellen),
Dipl.-Physiker Wolfgang Scholz, Potsdam (Elektromagnetische Wellen, außer 3. und 4.) und
Prof. Dr. Karl Werner, Leipzig (Die atomistische Struktur der stofflichen Materie)
in Zusammenarbeit mit der Redaktion Physik des Verlages
Bei der Bearbeitung einzelner Textstellen wurden die bisher erschienenen Lehrbücher des Verlages zum gleichen Thema berücksichtigt.

Redaktion: Heinz Graff · Werner Golm

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik
als Schulbuch bestätigt

Ausgabe 1964

Einband und Vorsatz: Werner Fahr
Typografische Gestaltung: Günter Runschke · Günter Wolff

ES 11 H · Bestell-Nr. 021251-3 · Preis: 4,50 · Lizenz-Nr. 203 · 1000/65(DN)
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer" Bad Langensalza
Vervielfältigungsgenehmigung: Nr. 1/94/65

Elektromagnetische Wellen

1. Hertzsche Wellen

1.1. *Freie elektromagnetische Schwingungen* 8
1.1.1. Die Erzeugung freier elektromagnetischer Schwingungen 8
1.1.2. Vorgänge im elektrischen Schwingkreis 10
1.1.3. Energieumwandlungen 10
1.1.4. Vergleich mechanischer und elektromagnetischer Schwingungen 10
Fragen, Aufgaben 11
1.2. *Erzwungene elektromagnetische Schwingungen* 12
1.2.1. Wechselstrom und elektromagnetische Schwingung 12
1.2.2. Kopplung von Schwingkreisen 15
Fragen, Aufgaben 15
1.3. *Selbsterregte elektromagnetische Schwingungen* 16
1.3.1. Das Prinzip der Selbsterregung 17
1.3.2. Die Meißnersche Rückkopplungsschaltung 17
1.3.3. Die Dreipunktschaltung 19
Fragen, Aufgaben 19
1.4. *Die Entdeckung elektromagnetischer Wellen* 20
1.4.1. Die Voraussage elektromagnetischer Wellen 20
1.4.2. Der Nachweis elektromagnetischer Wellen 21
1.5. *Die Erzeugung elektromagnetischer Wellen* 22
1.5.1. Der offene Schwingkreis 22
1.5.2. Der Schwingungsvorgang am Dipol 23
Fragen, Aufgaben 24
1.5.3. Die Entstehung elektromagnetischer Wellen 24
1.5.4. Feldausbreitung und Energietransport 28
1.6. *Der Empfang elektromagnetischer Wellen* 29
1.6.1. Der Dipol als Empfänger 29
1.6.2. Antennen 30
Fragen, Aufgaben 32
1.7. *Die Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen* 32
1.7.1. Ausbreitungsgeschwindigkeit 34
1.8. *Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen* 34
1.8.1. Die Bodenwelle 35
1.8.2. Die Raumwelle 36
1.8.3. Die direkte Welle 36

2. Die drahtlose Nachrichtentechnik — Hochfrequenztechnik

2.1. *Die Modulation* 37
2.1.1. Die Amplitudenmodulation 38
2.1.2. Die Seitenfrequenzen 39
2.1.3. Die Frequenzmodulation 39
Fragen, Aufgaben 40
2.2. *Der Rundfunksender* 40
2.2.1. Der Aufbau des Senders 40
2.3. *Der Telegrafiesender* 43
Fragen, Aufgaben 43
2.4. *Der Rundfunkempfänger* 44
2.4.1. Die Demodulation 44
2.4.2. Der Detektorempfang 44
2.4.3. Der Geradeausempfänger 46
2.4.4. Der Überlagerungsempfänger 48
2.4.5. Der Ultrakurzwellen-Rundfunk 49
Fragen, Aufgaben 50
2.5. *Funkdienste für Verkehr, Wirtschaft und Armee* 51
2.5.1. UKW-Sprechfunk 51
2.5.2. Richtfunk 52

2.5.3. Funkortung 53
2.5.4. Amateurfunk 54
2.6. *Das Funkmeßverfahren* 54
2.6.1. Das Impuls-Echo-Prinzip 54
2.6.2. Die Radar-Anlage 56
2.6.3. Das Panorama-Gerät 57
2.6.4. Anwendungen des Radar-Verfahrens 59
Fragen, Aufgaben 60
2.7. *Der Fernsehfunk* 61
2.7.1. Das Prinzip der Bildübertragung 61
2.7.2. Die Fernsehsendung 63
2.8. *Der Fernsehempfang* 68
2.9. *Das industrielle Fernsehen* 68
Fragen, Aufgaben 69
2.10. *Anwendungen hochfrequenter elektromagnetischer Schwingungen* 70
2.10.1. Die induktive HF-Erwärmung 70
2.10.2. Die kapazitive HF-Erwärmung 71
Fragen, Aufgaben 72
2.11. *Stand und Perspektiven der Hochfrequenztechnik* 72

3. Lichtwellen

3.1. *Interferenz durch Beugung* 73
3.1.1. Interferenz zweier Wasserwellen 73
3.1.2. Interferenzen am Doppelspalt 77
3.1.3. Beugung und Interferenz am optischen Gitter 80
Versuche, Fragen, Aufgaben 85
3.2. *Interferenz durch Brechung oder Reflexion* 86
3.2.1. Das Fresnelsche Biprisma 86
3.2.2. Interferenzen an dünnen Schichten 88
3.3. *Optische Geräte* 96
3.3.1. Interferometer 96
3.3.2. Interferenzmikroskop 97
3.3.3. Gitterspektrograf 97
3.3.4. Interferenzfilter 97
Versuche, Fragen, Aufgaben 99
3.4. *Polarisation des Lichts* 99
3.4.1. Linear polarisiertes Licht 99
3.4.2. Polarisatoren 100
3.4.3. Anwendungen linear polarisierten Lichts 102
Versuche, Fragen, Aufgaben 103

4. Röntgenwellen

4.1. *Röntgenröhren* 104
4.1.1. Ionenröntgenröhren 104
4.1.2. Weiterentwicklung der Röntgenröhren 105
4.2. *Eigenschaften der Röntgenstrahlen* 106
4.3. *Medizinische Anwendungen* 108
4.3.1. Röntgendiagnostik 108
4.3.2. Strahlenschutz 108
4.3.3. Röntgentherapie 109
4.4. *Technische Anwendungen* 109
4.5. *Die Wellennatur der Röntgenstrahlung* 111
4.5.1. Arten und Entstehung der Röntgenstrahlung 111
4.5.2. Die Beugung von Röntgenwellen in Kristallen 113
4.5.3. Zur Geschichte der Röntgenstrahlen 115

5. Das elektromagnetische Spektrum

5.1. *Die elektromagnetische Natur der Lichtwellen* 117
5.2. *Die ultrarote Strahlung* 119
5.3. *Die ultraviolette Strahlung* 121
5.4. *Das elektromagnetische Spektrum* 122
Fragen, Aufgaben 124

Die atomistische Struktur der stofflichen Materie

1. Die Atomhülle

1.1. *Erste Hinweise auf die Existenz von Molekülen und Atomen* 126
1.1.1. Der Atombegriff im Altertum und Mittelalter 126
1.1.2. Der Daltonsche Atombegriff 127
1.1.3. Hinweise aus den Gesetzen der Elektrolyse — Die Elementarladung 128
1.1.4. Hinweise aus der kinetischen Wärmetheorie 130

1.1.5. Hinweise aus dem Aufbau der Kristalle 132
1.2. *Erste Erforschung des Atombaus* 133
1.2.1. Forschungen mit Katodenstrahlen 133
1.2.2. Rutherfords Streuversuche mit α-Teilchen — Das Rutherfordsche Atommodell 134
1.3. *Die Grundlagen der Quantentheorie der Atome* 136
1.3.1. Temperaturstrahlung 136
1.3.2. Einsteins Lichtquantenlehre 139
1.4. *Das Bohrsche Atommodell* 140
1.4.1. Die Bohrschen Postulate 140
1.4.2. Das Bohrsche Modell des Wasserstoffatoms 141
1.4.3. Die Elektronenstoßversuche von Franck und Hertz 142
1.4.4. Atombau und Periodensystem 143
1.5. *Die Doppelnatur des Lichts* 144
1.5.1. Die Welleneigenschaften des Elektrons 145
1.5.2. Ausblick auf die Wellenmechanik 147
Fragen, Aufgaben 148

2. Der Atomkern

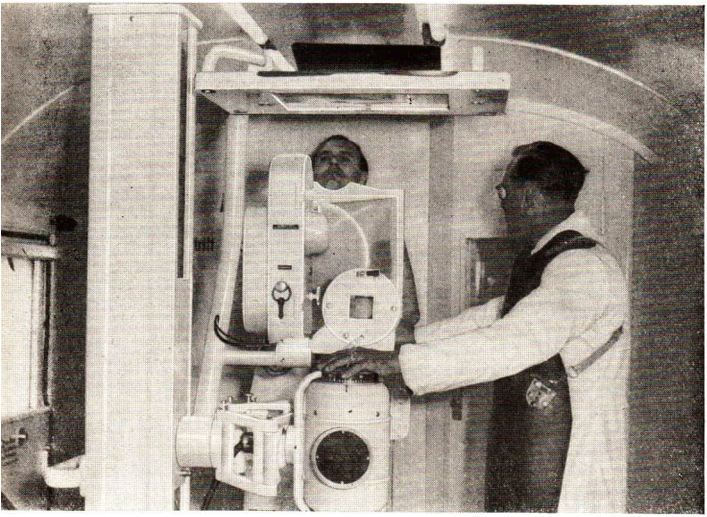
2.1. *Der Bau der Atomkerne — Die Isotope* 149
2.1.1. Die Protonen 149
2.1.2. Die Entdeckung des Neutrons 150
2.1.3. Neutronen als Kernbausteine 151
2.1.4. Die Isotope 152
Fragen, Aufgaben 155
2.2. *Die Radioaktivität* 155
2.2.1. Die Entdeckung der Radioaktivität 156
2.2.2. Eigenschaften der radioaktiven Strahlung 157
2.2.3. Die Natur der Strahlung 157
2.2.4. Die Ursachen der Radioaktivität 158
2.3. *Nachweismethoden der radioaktiven Strahlung* 161
2.3.1. Ionisationskammern 161
2.3.2. Zählrohre 162
2.3.3. Nebelkammern 162
2.3.4. Szintillationszähler 163
2.3.5. Kernspurenplatten 164
2.3.6. Beschleuniger 164
2.4. *Künstliche Kernumwandlungen* 166
2.4.1. Die Versuche von Rutherford und Blackett 166
2.4.2. Kernumwandlungen durch Neutronen 167
2.4.3. Künstliche Radioaktivität 168
2.4.4. Transurane 168
Fragen, Aufgaben 169
2.5. *Massendefekte und Bindungsenergien* 170
2.5.1. Der Massendefekt 170
2.5.2. Die Bindungsenergie 171
2.6. *Die Kernspaltung* 173
2.6.1. Vorgang der Kernspaltung 173
2.7. *Die Kernfusion* 174
2.8. *Die Kettenreaktion* 177
2.9. *Die Ausnutzung der Kernenergie* 177
2.9.1. Der Reaktor 177
2.9.2. Reaktortypen 179
2.9.3. Kernenergie zum Antrieb von Fahrzeugen 180
2.9.4. Kernwaffen 182
2.10. *Erzeugung und Anwendung radioaktiver Isotope* 185
2.10.1. Bestrahlungsverfahren 185
2.10.2. Durchstrahlungsverfahren 186
2.10.3. Markierungsverfahren 188
2.11. *Dosimetrie und Strahlenschutz* 188
Fragen, Aufgaben 189

Anhang

1. Formeln 191

2. Lösungen 192

Sachwortverzeichnis 195

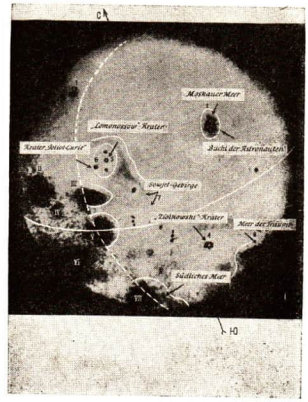


Elektromagnetische Wellen

Seit Jahrhunderten stellten die Forscher die Frage nach der Natur des Lichts. Immer neue Generationen beschäftigten sich mit diesem Problem, und es wurde erkannt, daß Licht Wellencharakter besitzt.

Am Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Hertzschen Wellen und die Röntgenwellen entdeckt. Hertzsche Wellen, Licht- und Röntgen-Wellen sind sämtlich elektromagnetische Wellen. Sie unterscheiden sich durch ihre Wellenlängen. Die elektromagnetischen Wellen werden in der Technik und Forschung vielseitig angewendet. Unser Bild zeigt die Schirmbildaufnahme in einem Ambulanz- und Röntgenzug des „Deutschen Roten Kreuz". Diese Röntgeneinrichtung ist ein unentbehrlicher Helfer im Kampf gegen die Lungentuberkulose. Hertzsche Wellen sind die Grundlage für den Rundfunk und für das Fernsehen. In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Grundlagen der elektromagnetischen Wellen entwickelt und ihre Gesetzmäßigkeiten untersucht.

1. Hertzsche Wellen



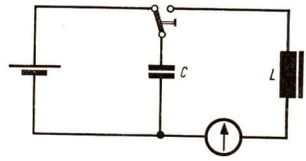
Im Oktober 1959 konnte die Sowjetunion eine interplanetarische Station starten, die erstmalig den Mond umkreiste, seine Rückseite fotografierte und diese Bilder durch Funkwellen zur Erde übermittelte. Ohne eine mühevolle Forschungsarbeit u. a. auf dem Gebiet der Funkwellen, auch Hertzsche Wellen genannt, wäre eine solche Leistung nicht möglich gewesen. Im folgenden lernen Sie Wesen und Anwendungen elektromagnetischer Schwingungen und Wellen kennen.

1.1. Freie elektromagnetische Schwingungen

1.1.1. Die Erzeugung freier elektromagnetischer Schwingungen

Wird ein Kondensator über einen Ohmschen Widerstand entladen, so fließt kurzzeitig ein Gleichstrom. Die Stromstärke nimmt um so rascher ab, je kleiner der Widerstand ist. Die im Kondensator gespeicherte elektrische Energie wird beim Entladen im Widerstand vollständig in Wärmeenergie umgewandelt.
Völlig anders verläuft die Entladung eines Kondensators über eine Spule.

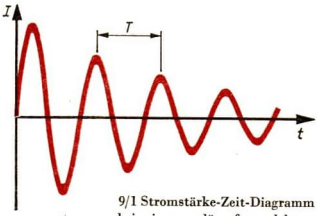
Beim Versuch nach Bild 8/1 werden ein Kondensator mit großer Kapazität (etwa 100 μF) sowie eine Spule mit 15 000 Windungen und geschlossenem Eisenkern verwendet. Das Stromstärkemeßgerät muß seinen Nullpunkt in der Mitte der Skale haben (Meßgerät mit beiderseitigem Ausschlag). Der Kondensator wird zunächst durch Schließen des Batteriestromkreises aufgeladen; durch Umschalten wird die Entladung eingeleitet.



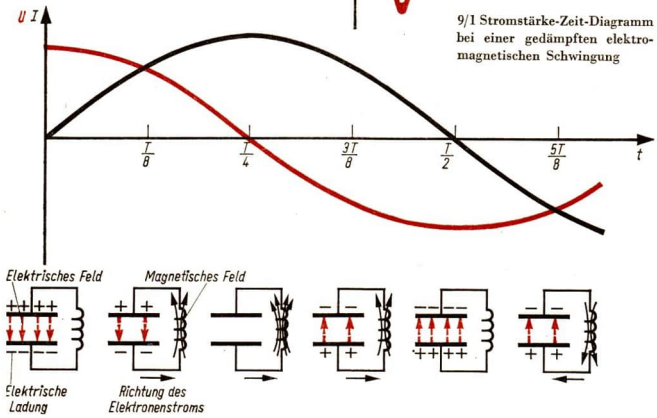
8/1 Entladung eines Kondensators über eine Spule

Der Zeiger des Meßgerätes pendelt mehrmals mit immer kleineren Ausschlägen um die Mittellage, ehe er zur Ruhe kommt. Das Gerät zeigt einen Wechselstrom mit niedriger Frequenz und abnehmender Amplitude an.

Der beobachtete Vorgang ist eine *freie gedämpfte elektromagnetische* Schwingung (Bild 9/1). Der aus Spule und Kondensator bestehende Stromkreis wird *elektrischer Schwingkreis* genannt.



9/1 Stromstärke-Zeit-Diagramm bei einer gedämpften elektromagnetischen Schwingung



9/2 Der Ablauf einer elektromagnetischen Schwingung:

$t = 0$ Der Kondensator ist aufgeladen, die Spannung am Kondensator hat ihren höchsten Wert.

$0 < t < \frac{T}{4}$ Die Kondensatorspannung treibt einen Strom durch die Spule. Ladung und Spannung des Kondensators nehmen dadurch ab. Die Stromstärke wächst nur langsam an, da beim Aufbau des Magnetfeldes der Spule eine Gegenspannung induziert wird.

$t = \frac{T}{4}$ Die Stromstärke im Schwingkreis hat den Maximalwert erreicht, wenn der Kondensator entladen ist.

$\frac{T}{4} < t < \frac{T}{2}$ Beim Zerfall des in der Spule aufgebauten Magnetfeldes wird eine Spannung induziert, die der Änderung der Stromstärke entgegenwirkt. Der Strom fließt daher mit abnehmender Stärke weiterhin in gleicher Richtung. Der Kondensator wird allmählich gegenpolig aufgeladen.

$t = \frac{T}{2}$ Die Kondensatorspannung erreicht wieder den höchsten Wert, doch hat sich die Richtung des elektrischen Feldes umgekehrt.

$t > \frac{T}{2}$ Die Vorgänge folgen jetzt in gleicher Art, jedoch in umgekehrter Richtung weiter aufeinander, bis wieder der Anfangszustand erreicht ist

Der Zeitabstand zwischen zwei phasengleichen Maxima der Stromstärke wird *Schwingungsdauer T* genannt. Ihr Reziprokwert ist die *Frequenz f.*
Die Bezeichnung „freie Schwingung" soll darauf hinweisen, daß der Schwingungsvorgang nach einmaliger Energiezufuhr ohne weitere äußere Beeinflussung abläuft.
Die *Dämpfung* äußert sich im allmählichen Verkleinern der Stromamplituden. Ursache dieser Dämpfung ist in erster Linie der Ohmsche Widerstand des Stromkreises. Dieser Widerstand, der im Bild 9/1 nicht eingezeichnet ist, wird bei dem obigen Versuch durch den Spulendraht und die Verbindungsleitungen zwischen Spule und Kondensator gebildet. Die dem Kondensator zugeführte *elektrische Energie* wird durch den Widerstand in *Wärmeenergie* umgewandelt.

1.1.2. Vorgänge im elektrischen Schwingkreis

Nach Bild 9/2 sollen diese Zusammenhänge analysiert werden. Von der Dämpfung wird dabei abgesehen.

- *Beschreiben Sie die beim Schwingungsvorgang ablaufenden Veränderungen des elektrischen und des magnetischen Feldes!*

Die Schwingungsdauer der elektromagnetischen Schwingung ist, wie die Analyse zeigt, durch jene Zeiten bestimmt, die der Aufbau bzw. Zerfall des elektrischen und des magnetischen Feldes erfordert. Daher ist zu vermuten, daß man bei kleinerer Kapazität und Induktivität höhere Frequenzen erhält.
Diese Vermutung läßt sich durch Versuche bestätigen. Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen im Bereich der Hörfrequenzen werden auf einen Lautsprecher übertragen. Man hört dabei gongartige Töne. Die Tonhöhe nimmt zu, wenn Induktivität und Kapazität des Schwingkreises einzeln oder gemeinsam verkleinert werden.

1.1.3. Energieumwandlungen

Mit dem Ladestrom des Kondensators wird dem Schwingkreis Energie zugeführt. Diese wird zunächst im elektrischen Feld des Kondensators gespeichert. Beim Entladen dient die Energie zum Aufbau des magnetischen Feldes der Spule. Schließlich ist die Energie des Schwingkreises vollständig in Form magnetischer Feldenergie gespeichert. Beim nachfolgenden Verschwinden des Magnetfeldes wechselt die Energie wieder in das elektrische Feld des Kondensators über.

Die dem Schwingkreis zugeführte elektrische Energie pendelt bei der elektromagnetischen Schwingung ständig zwischen elektrischem Feld und magnetischem Feld.

1.1.4. Vergleich mechanischer und elektromagnetischer Schwingungen

Federschwinger	*Elektrischer Schwingkreis*
Die gespannte Feder enthält *potentielle Energie*	Der Kondensator enthält nach dem Anlegen einer Spannung *elektrische Feldenergie.*

Federschwinger

Die bewegte Masse besitzt *kinetische Energie.*

Die Spannkraft der Feder treibt die Masse in die Gleichgewichtslage.

Infolge seiner *trägen Masse* bewegt sich der Schwinger über die Gleichgewichtslage hinaus.

Durch den *Reibungswiderstand* wird die Schwingung gedämpft.

Elektrischer Schwingkreis

Die stromdurchflossene Spule besitzt *magnetische Feldenergie.*

Die *Spannung* am Kondensator verursacht einen Ladungsausgleich.

Infolge der *Induktivität* der Spule fließt der Strom nach Entladung des Kondensators weiter.

Durch den *Ohmschen Widerstand* des Schwingkreises wird die Schwingung gedämpft.

Diese Analogiebeziehungen können auch mathematisch erfaßt werden:

Die Federkraft verursacht eine Beschleunigung der Schwingermasse:

$$F = m \frac{dv}{dt}.$$

Die Federkraft ist der Auslenkung proportional:

$$F = k\,s\,.$$

Die Kondensatorspannung verursacht eine Veränderung der Stromstärke in der Spule:

$$U = L \frac{dI}{dt}.$$

Die Kondensatorspannung ist der Ladung proportional:

$$U = \frac{1}{C} Q\,.$$

Es bestehen somit zwischen den folgenden mechanischen und elektrischen Größen gleichartige mathematische Beziehungen:

$$F \mathrel{\hat{=}} U, \quad m \mathrel{\hat{=}} L, \quad k \mathrel{\hat{=}} \frac{1}{C}, \quad s \mathrel{\hat{=}} Q\,.$$

Mit diesem Rüstzeug kann von der bekannten Schwingungsdauer der mechanischen Schwingung auf die der freien elektromagnetischen Schwingung geschlossen werden:

Federschwingung

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

Elektromagnetische Schwingung

$$T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}\,.$$

Analogiebeziehungen der soeben dargestellten Art werden in der Physik recht häufig ausgenutzt. Es muß aber in jedem Falle kritisch überprüft werden, ob der Analogieschluß zum richtigen Ergebnis führte. Die oben entwickelte Gleichung für die Dauer der elektromagnetischen Schwingung wird auf Seite 14 bestätigt.

Fragen, Aufgaben

1. Skizzieren Sie nebeneinander einen Federschwinger und einen elektrischen Schwingkreis für Zeitabstände $\frac{T}{8}$!

Markieren Sie durch farbige Pfeile geeigneter Länge und Richtung, Kraft, Geschwindigkeit, elektrische und magnetische Feldstärke sowie Stromstärke !

2. Bei höheren Frequenzen kann ein Strommeßgerät den elektromagnetischen Schwingungen nicht mehr folgen.
   Wie kann in solchen Fällen die Schwingung nachgewiesen werden?

3. Begründen Sie die zum Versuch auf S. 8 gegebenen Hinweise zur Größe von Induktivität und Kapazität!

4. Skizzieren Sie das I-t-Diagramm für zwei Schwingungen mit gleicher Frequenz $f = 2$ Hz, aber unterschiedlicher Dämpfung. Beachten Sie, daß die Amplituden sich nach jeder vollen Schwingung um den gleichen Faktor $\left(\text{z. B. } \frac{3}{4}\right)$ verändern, die Amplituden also gemäß einer geometrischen Folge abnehmen.

5. Wie verändert sich der Schwingungsvorgang, wenn ein sehr großer Ohmscher Widerstand im Schwingkreis liegt?
   (Wenden Sie hierbei Ihre Kenntnisse über gedämpfte Federschwingungen an!)

6. Ergänzen Sie die Gegenüberstellung von mechanischen und elektromagnetischen Schwingungen durch die Gleichungen für die potentielle Energie der gespannten Feder und die Energie des geladenen Kondensators. Kontrollieren Sie, ob auch hier die Analogiebeziehungen zutreffen!

Zusammenfassung

1. **Ein Stromkreis, der eine Induktivität und eine Kapazität enthält, wird elektromagnetischer Schwingkreis genannt.**
   Welche Arten von Spulen und Kondensatoren haben Sie kennengelernt?

2. **Nach einmaligem Anstoß, z. B. durch Laden des Kondensators, findet eine freie gedämpfte elektromagnetische Schwingung statt.**
   Beschreiben Sie den zeitlichen Ablauf einer freien gedämpften elektromagnetischen Schwingung!

3. **Bei der Schwingung findet ein fortwährender Energieaustausch zwischen elektrischem und magnetischem Feld statt.**
   Welche Energiearten treten bei diesem Ablauf auf?

4. **Die Dämpfung wird durch den Ohmschen Widerstand des Schwingkreises verursacht.**
   Erklären Sie die Dämpfung vom Standpunkt der Energieumwandlung aus!

1.2. Erzwungene elektromagnetische Schwingungen

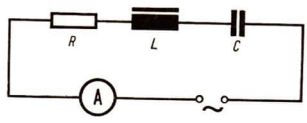
1.2.1. Wechselstrom und elektromagnetische Schwingung

Die bei freien elektromagnetischen Schwingungen auftretenden Ströme und Spannungen unterscheiden sich, wenn von der Dämpfung abgesehen wird, nicht von den bereits bekannten Wechselströmen und -spannungen. Aus diesem Grunde können die Vor-

gänge in Wechselstromkreisen auch als Schwingung bezeichnet werden. Ein Wechselstromgenerator erzeugt jedoch *erzwungene ungedämpfte Schwingungen*, deren Frequenz durch die Drehzahl des Rotors bestimmt ist.

- *Welche Begriffe haben Sie bei der Behandlung der Erzeugung des Wechselstroms in der Klasse 11 kennengelernt?*

Im folgenden wird untersucht, welches Verhalten ein elektrischer Schwingkreis zeigt, der durch eine Wechselspannung zu erzwungenen Schwingungen angeregt wird (Bild 13/1).



13/1 Anregung eines Schwingkreises durch eine Wechselspannung:
Der Schwingkreis wird an einer Stelle unterbrochen und dort die Spannungsquelle eingeschaltet

Die *Reihenschaltung* von induktivem, kapazitivem und Ohmschem Widerstand wurde bereits in Klasse 11 behandelt. Der *Scheinwiderstand* der Reihenschaltung beträgt

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2},$$

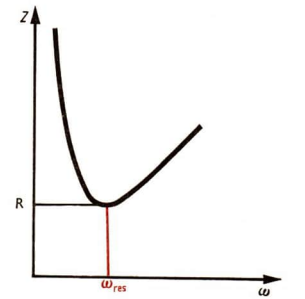
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

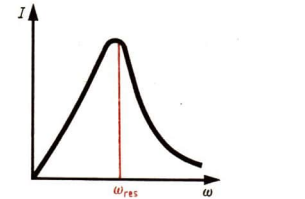
In den Bildern 13/2 und 13/3 ist dargestellt, wie sich dieser Widerstand und daraus folgend die Effektivstromstärke bei konstanter Effektivspannung mit der Kreisfrequenz verändert.
Für sehr kleine Frequenzen überwiegt der kapazitive Widerstand; ωL und R können gegenüber $\frac{1}{\omega C}$ vernachlässigt werden. Das Widerstandsdiagramm verläuft anfangs etwa wie eine Hyperbel. Für sehr große Frequenzen überwiegt dagegen der induktive Widerstand. Die Kurve nähert sich immer mehr der Geraden $Z = \omega L$. Bei einer bestimmten Kreisfrequenz ω_r erreicht der Scheinwiderstand sein Minimum $Z = R$; der Blindwiderstand hat dann den Wert Null:

$$\omega_r L - \frac{1}{\omega_r C} = 0;$$

aus dieser Gleichung wird die Kreisfrequenz ω_r ermittelt zu:



13/2 Frequenzabhängigkeit des Scheinwiderstandes des Schwingkreises



13/3 Frequenzabhängigkeit der Effektivstromstärke im Schwingkreis

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Die effektive Stromstärke ändert sich umgekehrt proportional zum Widerstand und besitzt bei dieser Kreisfrequenz ω_r ihr Maximum. Es handelt sich hier um eine *Resonanzerscheinung*, wie sie auch bei erzwungenen mechanischen Schwingungen auftrat. An Stelle der *maximalen Amplitude* des *mechanischen Schwingers* bei Resonanz tritt im *elektromagnetischen Schwingkreis* ein *Maximum* der *Stromamplitude* auf. Aus den Ergebnissen der entsprechenden mechanischen Versuche ist zu schließen:

Im Resonanzfall stimmen die Frequenzen der erregenden Wechselspannung und die Eigenfrequenz des Schwingkreises überein.

Als Eigenfrequenz wird die Frequenz der freien Schwingung dieses Kreises bezeichnet. Die oben ermittelte Kreisfrequenz ω_r ist also gleich der Kreisfrequenz der freien Schwingung des Schwingkreises. Daraus kann eine Gleichung für die Schwingungsdauer der freien elektromagnetischen Schwingungen gewonnen werden. Diese Gleichung nennt man

Thomsonsche Schwingungsformel:

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{LC}} \qquad (1)$$

Dieselbe Gleichung war auch aus dem Vergleich mechanischer und elektromagnetischer Schwingungen hervorgegangen. Hier zeigt sich einmal mehr die Tatsache, daß sich in der Natur für verschiedenartige Erscheinungen gemeinsame Gesetze auffinden lassen.

Versuch zur Bestätigung der Thomsonschen Schwingungsformel

Die Schaltung wird nach Bild 13/1 aufgebaut. Zur Erregung des Schwingkreises dient eine Wechselspannung 50 Hz, 20 V. Es werden folgende Schaltelemente benutzt:

Ohmscher Widerstand $R = 20\ \Omega$.

Zwei Spulen 750 Windungen in Reihe mit geschlossenem, geblättertem Eisenkern.

Kondensator $C = 16\ \mu\text{F}$.

Der Schwingkreis ist derart bemessen, daß seine Eigenfrequenz zunächst größer als 50 Hz ist.

Um den Resonanzfall zu erreichen, muß man den Schwingkreis „abstimmen": Das Joch des Eisenkerns wird langsam verschoben. Dadurch verkleinert sich die Induktivität, während die Eigenfrequenz des Schwingkreises wächst. Der Resonanzfall ist am Höchstwert der Stromstärke erkennbar. Nunmehr kann die Spule aus dem Schwingkreis genommen und durch eine gesonderte Messung ihre Induktivität bestimmt werden. Die Werte für L und C werden in die Thomsonsche Gleichung eingesetzt; die errechnete Frequenz wird mit der Netzfrequenz verglichen.

Beispiel:

Die Induktivität einer Spule soll durch Stromstärkemessung bei einer angelegten Spannung von 20 V und einer Frequenz von 50 Hz bestimmt werden. Gemessen wurden 6,9 mA.

Gegeben:

Spannung $U = 20\ \text{V}$

Frequenz $f = 50\ \text{Hz}$

Stromstärke $I = 6{,}9\ \text{mA}$

Gesucht:

Induktivität L (in H)

Lösung:

$$L = \frac{U}{2\pi \cdot f \cdot I}$$

$$L = \frac{20\ \text{V}}{6{,}28 \cdot 50\ \frac{1}{\text{s}} \cdot 6{,}9 \cdot 10^{-3}\ \text{A}}$$

$$L = \frac{20\ \text{Vs}}{2{,}17\ \text{A}}$$

$$L = 9{,}2\ \text{H}.$$

Die Induktivität der Spule wurde bei der verwendeten Frequenz und Spannung zu 9,2 H bestimmt. Es zeigt sich allerdings, daß die Induktivität infolge gewisser Eigenschaften des Eisenkerns noch von den Betriebswerten abhängt. Außerdem haben wir den Ohmschen Widerstand der Spulenwicklung vernachlässigt.

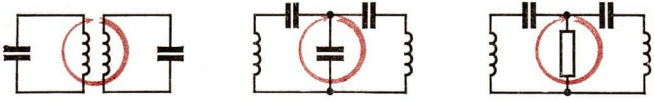
1.2.2. Kopplung von Schwingkreisen

Elektromagnetische Schwingungen können von einem Schwingkreis auf einen anderen übertragen werden. Dazu müssen die Schwingkreise miteinander *gekoppelt* werden; d. h., zwischen den Schwingkreisen muß ein Energieaustausch möglich sein.

Gekoppelte Schwingkreise spielen bei der drahtlosen Nachrichtenübermittlung eine wesentliche Rolle.

Man spricht von loser und fester Kopplung, je nach der Stärke der Wechselwirkung zwischen den Schwingkreisen.

Für die Kopplung der Schwingkreise gibt es mehrere Möglichkeiten (Bilder 15/1a, b, c):



15/1 a) Bei *induktiver Kopplung* erfolgt die Energieübertragung durch das magnetische Feld. (Bei niedrigen Frequenzen können die Spulen einen gemeinsamen Eisenkern erhalten. Dadurch wird die Kopplung fester).

b) Bei *kapazitiver Kopplung* erfolgt die Energieübertragung durch das elektrische Feld eines Kondensators, der beiden Schwingkreisen gemeinsam ist.

c) Bei *galvanischer Kopplung* besitzen beide Schwingkreise einen gemeinsamen Ohmschen Widerstand

Welche gegenseitige Lage im Falle der induktiven Kopplung kann man den beiden Spulen geben, wenn ohne Eisenkern eine möglichst feste Kopplung erzielt werden soll?

Verschiedene Kopplungsarten können auch miteinander kombiniert werden.

Fragen, Aufgaben

1. Entwerfen Sie ein Experiment für die erzwungene Schwingung eines Federschwingers!

2. Weshalb würde beim Versuch nach Bild 13/1 eine zu L oder C parallel geschaltete Glimmlampe im Resonanzfall zünden, obwohl die angelegte Wechselspannung kleiner als die Zündspannung ist?
3. In welcher Weise kann man die Resonanz bei erzwungenen elektromagnetischen Schwingungen zur Messung von Induktivitäten nutzen?
4. Welche Bedingung muß erfüllt sein, wenn zwei Schwingkreise die gleiche Eigenfrequenz besitzen sollen?
5. Berechnen Sie die Schwingungsdauer einer elektromagnetischen Schwingung in einem Schwingkreis mit der Induktivität 0,6 H und der Kapazität 6,5 μF!
6. Wie groß ist die Induktivität eines Schwingkreises, wenn die Schwingungsdauer $T = 1$ s bei $C = 30\ \mu$F beobachtet wurde?
7. Warum wird durch einen gemeinsamen Eisenkern der Spulen zweier Schwingkreise eine festere Kopplung erzielt als ohne Eisenkern?

Zusammenfassung

1. **Ein elektromagnetischer Schwingkreis kann durch eine Wechselspannung zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden.**

   Nennen Sie Wechselspannungsquellen!
   Welche Angaben über die Wechselspannungsquelle sind für die Durchführung von Versuchen und Messungen wichtig?

2. **Im Resonanzfall stimmen Erregerfrequenz und Eigenfrequenz des Schwingkreises überein.**

   Erklären Sie den Unterschied zwischen Eigenfrequenz und Erregerfrequenz!

3. **Mit Hilfe der Thomsonschen Schwingungsformel kann aus der Kapazität und der Induktivität eines Schwingkreises die Schwingungsdauer errechnet werden.**

   Welche Beziehungen bestehen zwischen Ohmschem, kapazitivem und induktivem Widerstand und dem Scheinwiderstand?

4. **Durch Kopplung kann Schwingungsenergie von einem Schwingkreis auf einen anderen übertragen werden.**

   Welche Arten der Kopplung haben Sie kennengelernt?

1.3. Selbsterregte elektromagnetische Schwingungen

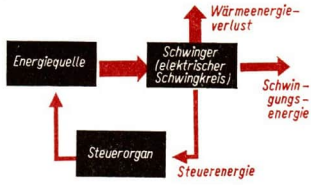
Mit Wechselstromgeneratoren (ähnlich wie sie in der Klasse 11 behandelt wurden) gelang es bereits im Jahre 1908, hochfrequente elektromagnetische Schwingungen mit Frequenzen bis zu 70 kHz zu erzeugen. Höhere Frequenzen konnten aus bau- und isolationstechnischen Gründen auf diese Weise nicht erreicht werden.
Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen mit weit höheren Frequenzen erhält man durch *Selbsterregung* elektromagnetischer Schwingungen. Man nennt dieses Verfahren häufig „Selbststeuerung elektromagnetischer Schwingungen".

1.3.1. Das Prinzip der Selbsterregung

Der Selbsterregung (Selbststeuerung) liegt folgendes Prinzip zugrunde:

Eine Energiequelle wird mit Hilfe der einmal erzeugten Schwingung eines Schwingkreises so gesteuert, daß eine periodische Energiezufuhr an diesen Schwingkreis stattfindet.

Auf diese Art entstehen *ungedämpfte* elektromagnetische Schwingungen mit der *Eigenfrequenz* des Schwingkreises (Bild 17/1). Als Steuerorgane für die Selbststeuerung elektromagnetischer Schwingungen eignen sich besonders gut Elektronenröhren oder Transistoren, da sie für große Frequenzbereiche praktisch trägheitslos arbeiten und nur geringe Steuerleistungen erfordern.

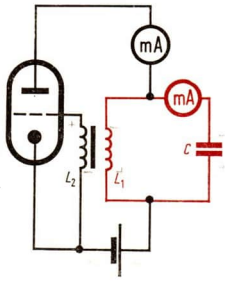


17/1 Blockschaltbild zum Vorgang der Selbsterregung

- *Beschreiben Sie, wie beim Wagnerschen Hammer ungedämpfte mechanische Schwingungen durch Selbststeuerung entstehen!*

1.3.2. Die Meißnersche Rückkopplungsschaltung

Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen lassen sich mit der im Jahre 1913 von ALEXANDER MEISSNER angegebenen *Rückkopplungsschaltung* von Elektronenröhren erzeugen (Bild 17/2).



17/2 Rückkopplungsschaltung nach ALEXANDER MEISSNER

Versuch zur Rückkopplungsschaltung

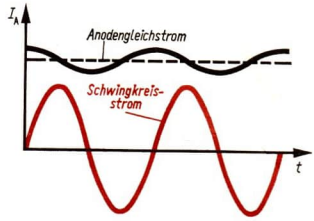
Der auf Seite 8 beschriebene Schwingkreis wird in Reihe mit einem Stromstärkemeßgerät in den Anodenkreis einer Triode geschaltet. Der Schwingkreis enthält wieder das Meßgerät mit beiderseitigem Ausschlag. Auf dem zweiten Schenkel des geschlossenen Eisenkerns der Schwingkreisspule L_1 befindet sich eine zweite Spule, die Rückkopplungsspule L_2, deren Enden mit Gitter und Katode der Röhre verbunden werden. Wird die Versuchsanordnung in Betrieb genommen, so beobachtet man ein periodisches Schwanken des Anodengleichstromes um einen Mittelwert. Das im Schwingkreis liegende Meßinstrument läßt erkennen, daß eine ungedämpfte elektromagnetische Schwingung stattfindet.

Bei dem Versuch finden folgende miteinander verknüpfte Einzelvorgänge statt:

1. Beim Anlegen der Anodenspannung wird der Kondensator C aufgeladen. Im Schwingkreis setzt daraufhin eine Schwingung ein, die ohne weitere Beeinflussung infolge des Ohmschen Widerstandes der Spule schnell abklingen würde.

2. Durch das Magnetfeld der Schwingkreisspule L_1 wird in der Rückkopplungsspule L_2 eine Wechselspannung induziert. Diese wird dem Gitter zugeführt und bewirkt, daß der Anodenstrom mit der Eigenfrequenz des Schwingkreises um einen Mittelwert schwankt: Dem Anodengleichstrom wird ein Anodenwechselstrom überlagert (Bild 18/1).

   ● *Begründen Sie, daß die in der Rückkopplungsspule induzierte Wechselspannung eine Phasenverschiebung von 90° gegenüber dem Schwingkreisstrom aufweist!*



18/1 Der Anodengleichstrom pulsiert im Rhythmus des Schwingkreisstromes

3. Der Anodengleichstrom fließt ausschließlich über die Schwingkreisspule. Der Anodenwechselstrom fließt durch die im Anodenkreis parallelgeschalteten Wechselstromwiderstände von Schwingkreisspule und Kondensator.
   Der Spulenwechselstrom bleibt (bei kleinem Ohmschen Widerstand der Spule) in der Phase um nahezu 90° gegenüber dem Anodenwechselstrom zurück; der Kondensatorwechselstrom eilt in der Phase um nahezu 90° voraus.

   ● *Fertigen Sie ein Zeigerdiagramm für die drei Ströme an!*



18/2 „Aufschaukeln" einer selbsterregten elektromagnetischen Schwingung

4. Der Anodenwechselstrom verstärkt sowohl in der Schwingkreisspule als auch im Kondensator den ursprünglichen Schwingungsvorgang; die Stromamplitude der elektromagnetischen Schwingung steigt an. Diesen Vorgang nennt man „Aufschaukeln" (Bild 18/2).
5. Der Scheitelwert des im Schwingkreis fließenden Wechselstromes steigt schließlich so weit an, daß die durch Stromwärme im Ohmschen Widerstand des Schwingkreises entstehenden Energieverluste durch die Energiezufuhr aus der Anodenspannungsquelle ausgeglichen werden.
   Es findet eine ungedämpfte elektromagnetische Schwingung statt.

   ● *Weshalb setzt die Schwingung aus, wenn die Anschlüsse der Rückkopplungsspule miteinander vertauscht werden?*

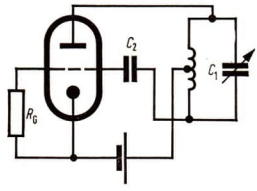
Die Versuchsanordnung zur Meißnerschen Rückkopplungsschaltung kann als Wechselspannungsquelle verwendet werden. Die Schwingungen müssen zu diesem Zweck meistens vom Anodenkreis auf einen anderen Stromkreis, z. B. einen angekoppelten zweiten Schwingkreis, übertragen werden. Zur Unterscheidung von den Wechselspannungsquellen, die auf der elektromagnetischen Induktion beruhen, bezeichnet man eine solche Anordnung als Röhrengenerator. Die Röhrengeneratoren werden nach ihrem Frequenzbereich eingeteilt in

	Frequenzbereich
Tonfrequenzgeneratoren	bis 20 kHz,
Hochfrequenzgeneratoren	über 20 kHz.

1.3.3. Die Dreipunktschaltung

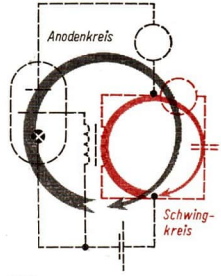
Die Meißnersche Rückkopplungsschaltung läßt sich vereinfachen, indem ein Teil der *Schwingkreisspule* gleichzeitig als Rückkopplungsspule verwendet wird (Bild 19/1).

Der Teil der Schwingkreisspule, der die Funktion der Rückkopplungsspule übernommen hat, liegt im *Gitterkreis* der Triode. Man nennt diesen Teil der Schwingkreisspule daher häufig *Gitterspule*.



19/1 Dreipunktschaltung:
Die Schwingkreisspule besitzt drei Anschlüsse, die Verbindung mit den drei Elektroden der Triode haben. Entsprechend der Kopplung nennt man diese Schaltung induktiv gekoppelte Dreipunktschaltung

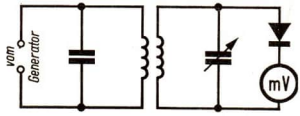
Die Dreipunktschaltung wird häufig auch als *Spannungsteilerschaltung* bezeichnet, da für das Gitter ein Teil der Wechselspannung abgegriffen wird, die an der Schwingkreisspule abfällt. Der Kondensator C_2 verhindert, daß die Anodengleichspannung an das Gitter der Röhre gelangt. Mit Hilfe des Kondensators C_1 kann die Eigenfrequenz des Schwingkreises verändert werden. Der Vorgang der Selbststeuerung läuft bei der Dreipunktschaltung in gleicher Weise wie bei der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung ab.



19/2

Fragen, Aufgaben

1. Kennzeichnen Sie in Bild 19/2 für einen bestimmten Zeitpunkt:
   1.1. Die Polarität der Ladung des Kondensators (+ oder −).
   1.2. Die Richtung des Schwingkreisstromes (Pfeil).
   1.3. Die Richtung des Anodengleichstromes (Pfeil).
   1.4. Die Polarität der Gitterspannung (+ oder −).
2. Weshalb wird die Dreipunktschaltung auch Spannungsteilerschaltung genannt?
3. Bild 19/3 zeigt zwei induktiv gekoppelte Schwingkreise, die mit gleichen Spulen ausgestattet sind. Die Kapazität des Generatorschwingkreises beträgt 250 pF. Der angekoppelte Kreis hat einen Drehkondensator mit veränderbarer Kapazität zwischen 50 und 500 pF. Parallel zum Drehkondensator liegt ein Spannungsmeßgerät mit Gleichrichter.
   Skizzieren Sie ein Diagramm, das schematisch die Abhängigkeit der Spannung von der Kapazität des Drehkondensators zeigt!



19/3 Zwei induktiv gekoppelte Schwingkreise

Zusammenfassung

1. **Mit der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung werden in einem schwingungsfähigen System ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen nach dem Prinzip der Selbsterregung (Selbststeuerung) erzeugt.**

   Erklären Sie das Aufschaukeln einer ungedämpften elektromagnetischen Schwingung!

2. **Ein Teil der Schwingungsenergie wird zur Steuerung der Energiezufuhr an den Schwingkreis benutzt.**

   Schätzen Sie den Energieanteil der Steuerungsenergie an der Gesamtenergie ein! (Vergleichen Sie dazu Bild 17/1!)
   Warum sind Elektronenröhren und Transistoren als Steuerungsorgane gut geeignet?

3. **Bei Hochfrequenzgeneratoren wird häufig die Dreipunktschaltung verwendet.**

   Erläutern Sie die Unterschiede zwischen der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung und der Dreipunktschaltung!
   Welche Wirkung wird mit einem Drehkondensator an Stelle eines Kondensators mit unveränderlicher Kapazität erzielt?
   Wie läßt sich die Frequenz eines Schwingkreises stetig verändern, ohne daß die Kapazität verändert wird?

1.4. Die Entdeckung elektromagnetischer Wellen

1.4.1. Die Voraussage elektromagnetischer Wellen

Die großartige Bewährung des Newtonschen Gravitationsgesetzes in der *astronomischen Forschung* hatte zur Folge, daß in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts auch die Gesetze der *Elektrizität* und des *Magnetismus* auf der Grundlage der *Fernwirkung* formuliert wurden. Man untersuchte die Kraftwirkungen zwischen Ladungen, Magnetpolen und Strömen, ließ aber die Frage offen, auf welche Art und in welcher Zeit diese Kräfte durch den Raum übertragen werden. FARADAY (Bild 20/1) begründete demgegenüber die Vorstellung einer **Nahwirkung.** Er führte die elektrischen und magnetischen Kräfte auf die Anwesenheit von *Kraftfeldern* zurück. Der Begriff des Kraftfeldes führte dann zu einer wesentlichen Weiterentwicklung physikalischer Erkenntnisse.



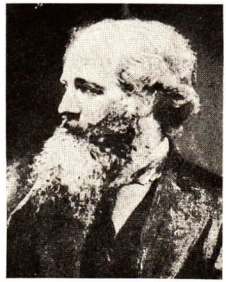
20/1 MICHAEL FARADAY

Faradays Erkenntnisse setzten sich aber nur langsam durch. Erst sein Landsmann JAMES CLERK MAXWELL (Bild 21/1) schuf in den Jahren 1855 bis 1873 eine umfassende Theorie des elektrischen und magnetischen Feldes.

MAXWELL verallgemeinerte die zu seiner Zeit bekannten Gesetze des Elektromagnetismus:

1. Magnetische Felder werden nicht nur von elektrischen Strömen, sondern auch durch Veränderungen elektrischer Felder erzeugt (Bild 21/2).
2. Die Leiterschleife spielt beim Induktionsvorgang nur eine Mittlerrolle. Der Induktionsstrom wird durch ein elektrisches Feld hervorgerufen, das auch ohne den Leiter besteht. Im Gegensatz zum elektrischen Feld ruhender Ladungen sind die Linien dieses induzierten elektrischen Feldes in sich geschlossen, man bezeichnet es darum als Wirbelfeld (Bild 21/3).

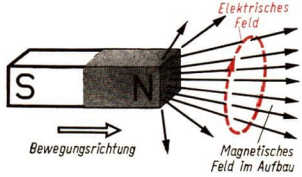
Das wichtigste Ergebnis der hierauf gegründeten Theorie war die Voraussage elektromagnetischer Wellen.



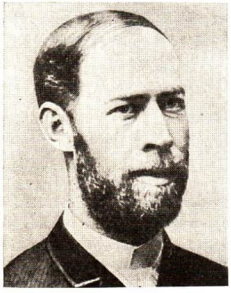
21/1 James Clerk Maxwell



21/2 Während der Ladestrom fließt, wird das elektrische Feld des Kondensators aufgebaut. Strom und Feld sind dabei vom Magnetfeld umgeben



21/3 Die Veränderung eines Magnetfeldes erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld



21/4 Heinrich Hertz

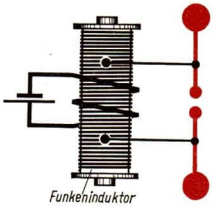
Maxwell erkannte:

Zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder sind untrennbar miteinander verknüpft. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum aus.

1.4.2. Der Nachweis elektromagnetischer Wellen

Der deutsche Physiker Heinrich Hertz (Bild 21/4) bestätigte in den Jahren 1883 bis 1885 mit einer Reihe genialer Experimente die Voraussagen Maxwells.

Hertz konnte mit diesen sehr einfachen Mitteln (Bild 22/1) zuerst die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen an Drähten nachweisen und später auch die



22/1 Prinzip der Hertzschen Versuchsanordnung:
Zur Erzeugung elektromagnetischer Wellen benutzte HERTZ einen Metallstab, der an den Enden Metallkugeln trug und in der Mitte durch eine Funkenstrecke unterbrochen war. Mit einem Funkeninduktor als Hochspannungsquelle wurden Funkenentladungen zwischen den Stabhälften hervorgerufen. Während jedes einzelnen Funkenüberschlags setzt im Stab eine Folge elektromagnetischer Schwingungen sehr hoher Frequenz ein. Der Funke selbst wirkt dabei als Schalter, der beim Erreichen einer bestimmten Spannung die leitende Verbindung zwischen den Stabhälften herstellt.
Zum Nachweis der ausgesandten elektromagnetischen Wellen diente eine Leiterschleife, die gleichfalls eine Funkenstrecke mit sehr kleinem Elektrodenabstand enthielt. Unter dem Einfluß der elektromagnetischen Wellen wurden in der Leiterschleife Schwingungen angeregt, die am Überspringen feinster Funken erkennbar waren

Wellen im Raum. Diese Anordnung stellt eine erste Sende- und Empfangseinrichtung dar, aus der sich später die uns heute bekannten Rundfunksender und -empfänger entwickelt haben. Bei der Untersuchung der Eigenschaften der Wellen fand HERTZ die von MAXWELL vorausgesagte Ausbreitungsgeschwindigkeit.
Die Geschichte der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen ist ein hervorragendes Beispiel für das ständige Zusammenwirken von Theorie und experimenteller Praxis in der Naturwissenschaft.

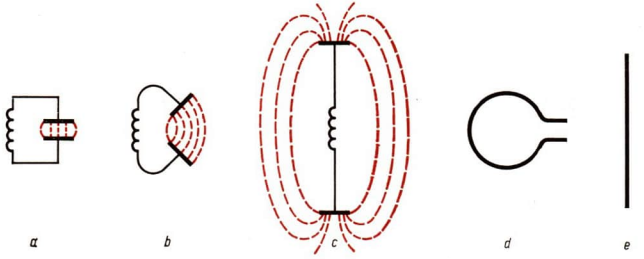
HEINRICH HERTZ wurde am 22. Februar 1857 in Hamburg geboren. Schon in seiner Schulzeit zeigte sich seine außerordentliche Begabung sowohl für die mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächer als auch für die Sprachwissenschaften. HERTZ studierte an den Universitäten München und Berlin Mathematik und Physik. Bereits vier Jahre nach seiner Promotion wurde er als Professor der Physik an die Technische Hochschule Karlsruhe berufen. Dort gelangen ihm seine bedeutenden Entdeckungen.
Nach weiterer Lehrtätigkeit an der Universität Bonn starb HERTZ im Alter von 37 Jahren.
Trotz seiner außerordentlichen wissenschaftlichen Erfolge zeichnete sich HEINRICH HERTZ durch größte Bescheidenheit aus.
Er wies erstmalig die elektromagnetischen Wellen nach, und er entwickelte auch die Maxwellsche Theorie weiter. Andere seiner Arbeiten erlangten bei der Begründung der modernen Atomphysik große Bedeutung.

1.5. Die Erzeugung elektromagnetischer Wellen

1.5.1. Der offene Schwingkreis

Bisher wurden *geschlossene* elektromagnetische Schwingkreise untersucht. Das elektrische Feld ist bei diesen Kreisen auf den Raum zwischen den Belegungen des Kondensators zusammengedrängt. Auch das magnetische Feld zeigt nur geringe Streuung und verläuft bei Spulen mit geschlossenem Kern fast vollständig im Eisen.
Ein **offener Schwingkreis** entsteht, wenn die Platten des Kondensators immer weiter voneinander entfernt werden. Das elektrische Feld erstreckt sich dadurch viel weiter

in den Raum hinaus. Beim Vergrößern des Plattenabstandes wird die Kapazität im Schwingkreis verkleinert und seine Eigenfrequenz erhöht. Die Platten können schließlich auch ganz weggelassen und durch Leiterstücke ersetzt werden. Ebenso kann die Induktivität des Schwingkreises verkleinert werden, indem die Spule immer weniger Windungen erhält. Auf diese Weise gelangt man schließlich zu offenen Schwingkreisen, die aus einem Leiterstück bestehen und sehr hohe Eigenfrequenzen aufweisen (Bild 23/1).



23/1 Übergang vom geschlossenen Schwingkreis zum Dipol. Induktivität und Kapazität werden nicht mehr durch einzelne Schaltelemente hervorgerufen, sondern verteilen sich über den Leiter

Ein besonders übersichtlicher Spezialfall ist der *Stabdipol*, kurz *Dipol* genannt, ein einfacher stabförmiger Leiter. Die Eigenfrequenz eines solchen Dipols ist durch seine Länge bestimmt.

HERTZ benutzte bei seinen Versuchen einen Stabdipol, dessen Kapazität durch die aufgesetzten Kugeln etwas vergrößert wurde.

1.5.2. Der Schwingungsvorgang am Dipol

Zur Erregung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen im Dipol wird ein Röhrengenerator für ultrahochfrequente Schwingungen herangezogen (Bilder 25/1 a und b). In der Nähe des Generators wird ein Dipol aufgestellt. Der Dipol befindet sich im magnetischen Feld des Generatorschwingkreises und ist dadurch induktiv mit ihm gekoppelt. Damit der Dipol auf die Frequenz des Generatorschwingkreises abgestimmt werden kann, wird jede Dipolhälfte aus zwei ineinander verschiebbaren Röhren hergestellt.
Um den bei der Dipolschwingung fließenden hochfrequenten Wechselstrom nachzuweisen, werden drei Glühlämpchen in den Stab eingeschaltet (Bild 25/2).
Die Verteilung der Stromstärke im Dipol ist mit der Elongation bei der Grundschwingung einer Saite zu vergleichen:

Im Mittelpunkt der Saite tritt ein *Schwingungsbauch* auf, an den Enden befinden sich *Schwingungsknoten*. Entsprechend bezeichnet man auch die Mitte des Dipols als *Stromstärkebauch*, die Endpunkte als *Stromstärkeknoten*.

Ebenso wie die Saitenschwingung kann auch die Dipolschwingung als stehende Welle betrachtet werden. Die Länge des Dipols ist im Fall der Resonanz gleich der halben Wellenlänge einer längs des Leiters fortwandernden Welle.

Um die *Spannungsverteilung* am Dipol festzustellen, wird eine Glimmlampe als Spannungsanzeiger benutzt (Bild 25/3).
Wird der Dipol in der Mitte durchgetrennt und die eine Hälfte senkrecht auf eine große geerdete Metallplatte gesetzt, so zeigt sich das gleiche Schwingungsbild wie vorher beim vollständigen Dipol (Bild 25/4).

Fragen, Aufgaben

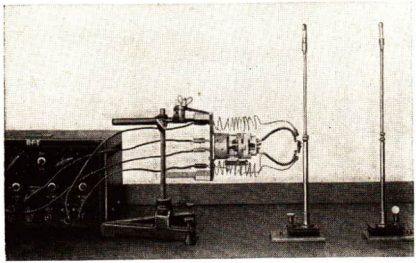
1. Weshalb nimmt beim Entfernen der Platten des Schwingkreiskondensators die Eigenfrequenz des Schwingkreises ab?
2. Eine Saite kann auch zu Oberschwingungen angeregt werden. Bei der 1. Oberschwingung befindet sich in der Mitte ein zusätzlicher Schwingungsknoten.
   Skizzieren Sie hiernach den Stromstärke- und Spannungsverlauf bei der 1. Oberschwingung des Dipols!
3. Skizzieren Sie schematisch die Ladungsverteilung auf dem Dipol in Zeitabständen $\frac{T}{4}$!

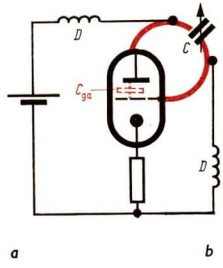
1.5.3. Die Entstehung elektromagnetischer Wellen

In der Klasse 10 lernten Sie die **mechanische Welle** als *zeitlich* und *örtlich* periodischen Bewegungsvorgang kennen. Voraussetzung für das Entstehen einer mechanischen Welle ist ein Medium, dessen Teilchen zu Schwingungen befähigt und miteinander gekoppelt sind. Die Welle geht von einem mechanischen Schwinger, dem Erreger, aus und läuft durch die Reihe der gekoppelten Teilchen. Diese werden dabei nacheinander zu gleichartigen Schwingungen veranlaßt.

Nachdem durch die Versuche von HEINRICH HERTZ das Vorhandensein elektromagnetischer Wellen nachgewiesen worden war, versuchte man lange Zeit auch die Ausbreitung dieser Wellen auf die Schwingungen eines Mediums zurückzuführen, das *Äther* genannt wurde. Die darauf aufgebaute Ätherhypothese führt jedoch zu schwerwiegenden Widersprüchen. Durch die im Jahre 1905 formulierte spezielle Relativitätstheorie von ALBERT EINSTEIN wurde die Ätherhypothese widerlegt. Heute sind die Versuche, elektromagnetische Wellen auf mechanische Vorgänge zurückzuführen, längst überwunden.

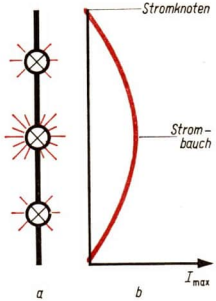
An die Stelle des schwingenden Teilchens der mechanischen Welle treten bei der elektromagnetischen Welle periodische Veränderungen der elektrischen und magnetischen Feldstärke an dem betreffenden Ort auf. Aus diesem Grunde wird die elektromagnetische Welle häufig auch als elektromagnetisches Wellenfeld oder kurz elektromagnetisches Feld bezeichnet.
Aus dem Vergleich mechanischer und elektromagnetischer Wellen geht hervor, das der Begriff „Welle" eine Abstraktion für Erscheinungen gleicher Struktur ist.



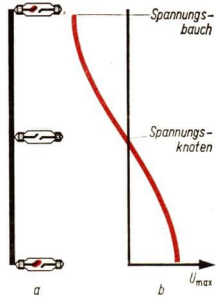


25/1 a, b: Ultrahochfrequenzgenerator

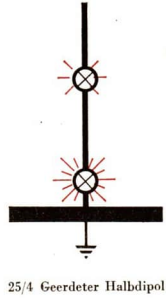
Die Schaltung ist in Bild 25/1b dargestellt. Die Schwingkreisspule ist ein Bügel aus dickem Kupferdraht, dessen Enden direkt mit Gitter und Anode der Röhren verbunden sind. Als Schwingkreiskondensator wirkt die zwischen Gitter und Anode der Röhre bestehende Kapazität C_{ga}. Ein Kondensator C, der aus zwei Kupferplatten mit dazwischengelegter Glimmerplatte als Dielektrikum besteht, riegelt die Anodengleichspannung vom Gitter ab. Die Anodenspannungsquelle wird über zwei Drosselspulen an die Katode und den Kupferbügel angeschlossen. Die selbsterregten Schwingungen haben eine Frequenz in der Größenordnung von etwa 100 MHz



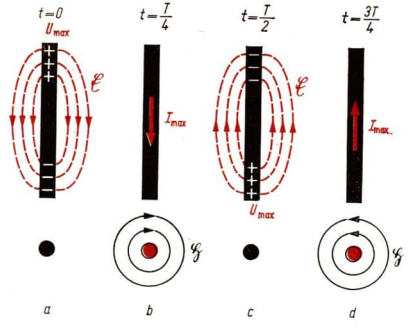
25/2 Stromstärkeverteilung im schwingenden Dipol. Nachdem der Resonanzfall eingestellt ist, leuchtet das mittlere Lämpchen sehr hell, die beiden anderen leuchten wesentlich schwächer. Daraus folgt, daß der Scheitelwert des im Dipol fließenden Wechselstromes von der Mitte aus nach den Enden hin abnimmt



25/3 Spannungsverteilung beim schwingenden Dipol. Wird die Glimmlampe am Dipol so entlanggeführt, daß sie diesen mit einer Elektrode berührt, so leuchtet sie an den Enden des Dipols auf, während sie in der Mitte dunkel bleibt: Der Wert der Dipolspannung nimmt von der Mitte nach den Enden hin zu. Die Spannungsbäuche befinden sich also an den Stellen der Stromstärkeknoten, die Spannungsknoten an den Stellen der Stromstärkebäuche



25/4 Geerdeter Halbdipol



26/1 Der Schwingungsvorgang beim Dipol
a) Das elektrische Feld ist aufgebaut. Die Spannung zwischen den Dipolhälften erreicht den Maximalwert, es fließt noch kein Strom.
b) Das elektrische Feld ist zerfallen. Der hierbei fließende Strom hat ein magnetisches Feld aufgebaut.
c) Beim Zerfall des magnetischen Feldes ist durch Induktion ein elektrisches Feld mit entgegengesetzter Richtung gegenüber a) entstanden.
d) Durch den Ladungsausgleich zwischen den Dipolhälften kommt ein magnetisches Feld mit entgegengesetzter Richtung gegenüber b) zustande

Elektrische und magnetische Felder des Dipols

Die Untersuchung der Felder in der Umgebung eines Stabdipols bietet einen besonders einfachen Zugang zum Verständnis der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen. Die zeitliche Veränderung von Stromstärke und Spannung bei der Dipolschwingung ist in dem Bild 26/1 a bis d schematisch dargestellt. Zugleich wurden das elektrische und magnetische Feld eingezeichnet.
Das Bild läßt zugleich eine tiefere Einsicht in die Verteilung von Spannung und Stromstärke am Dipol zu, wie sie auf Seite 23 untersucht wurde.
Diese Darstellung des elektrischen und magnetischen Feldes gilt aber nur für einen sehr eng begrenzten Nahbereich des Dipols. Für größere Entfernungen vom Dipol muß berücksichtigt werden, daß sich die Felder gemäß den Maxwellschen Voraussagen mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten. Eine unbegrenzt große Ausbreitungsgeschwindigkeit würde demgegenüber bedeuten, daß bei einer Schwingungsdauer des Dipols von z. B. 10^{-7} s während dieser überaus kurzen Zeit die in Bild 26/1 dargestellten Veränderungen der Felder im ganzen Raum wirksam werden.

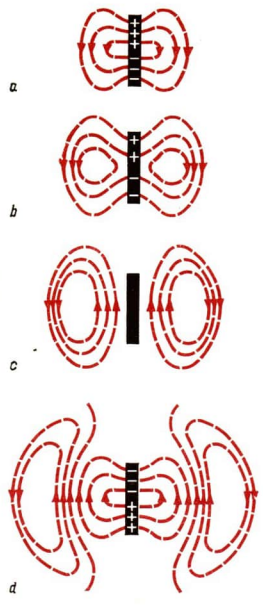
Die Ausbreitung eines elektrischen Feldes

Die Veränderung des elektrischen Feldes in größerer Entfernung vom Dipol soll nun an Hand der Bilder 27/1 a bis d verfolgt werden. Das Feld ist räumlich rings um den Dipol angeordnet. Das Bild zeigt nur Längsschnitte durch dieses Feld.
Bild 27/2 zeigt das elektrische Feld, wie es sich schließlich in größerer Entfernung vom Dipol ausbildet.

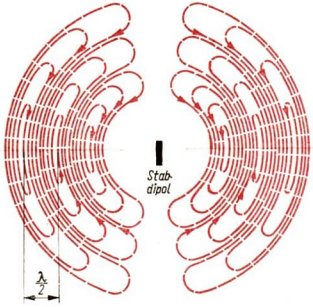
Die elektromagnetische Welle

Gleichzeitig mit diesem elektrischen Feld breitet sich auch das magnetische Feld des Dipols aus. Die magnetischen Feldlinien sind auch im Fernbereich des Dipols konzentrische Kreise mit dem Mittelpunkt auf der Dipolachse.

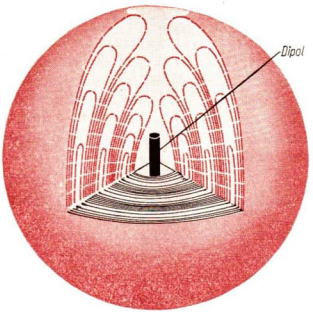
27/1 Zur Ausbreitung des elektrischen Feldes eines Dipols
a) Als Ausgangssituation wird wieder der Zustand maximaler Spannung zwischen den Dipolhälften gewählt. Das elektrische Feld in der Nähe des Dipols hat in diesem Moment seine größte Stärke erreicht.
b) Während sich das elektrische Feld weiter in die Umgebung des Dipols ausbreitet, vereinigen sich allmählich die elektrischen Ladungen, an welchen die elektrischen Feldlinien entspringen bzw. münden. Die Folge ist das „Abschnüren" der Feldlinien. Es entstehen in sich geschlossene Feldlinien.
c) Die Abschnürung des elektrischen Feldes ist beendet. Das elektrische **Wirbelfeld** wandert nunmehr unabhängig vom Dipol weiter in den Raum hinaus.
d) In der Umgebung des Dipols wird nun ein elektrisches Feld mit umgekehrter Richtung gegenüber a) aufgebaut. Dieses breitet sich wiederum in der soeben beschriebenen Weise aus. Zwischen a) und d) liegt eine halbe Schwingung des Dipols



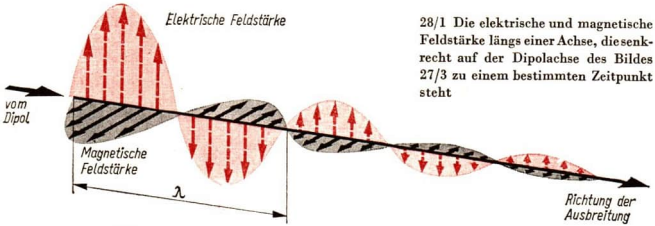
Elektrisches und magnetisches Feld bilden die vom Dipol ausgehende **elektromagnetische Welle.** Bild 27/3 ist als „Momentaufnahme" einer solchen Welle zu betrachten. Als Wellenlänge wird wie bei mechanischen Wellen der Abstand zweier Punkte mit gleicher Schwingungsphase bezeichnet. Z. B. können jene Stellen herausgegriffen werden, an denen Maximalwerte der elektrischen und zugleich magnetischen Feldstärke auftreten. Diese sind an der größten Dichte der Feldlinien zu erkennen.
Während einer Schwingung des Dipols wandert die Welle



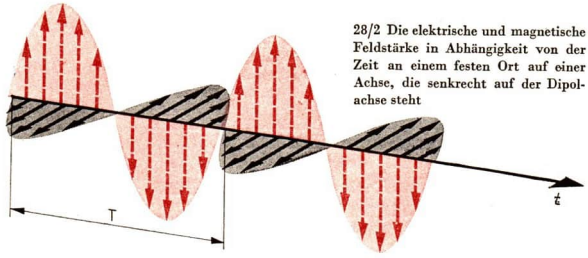
27/2 Das elektrische Feld des schwingenden Dipols (Längsschnitt)



27/3 Ausschnitt aus dem elektrischen und magnetischen Feld des schwingenden Dipols



28/1 Die elektrische und magnetische Feldstärke längs einer Achse, die senkrecht auf der Dipolachse des Bildes 27/3 zu einem bestimmten Zeitpunkt steht



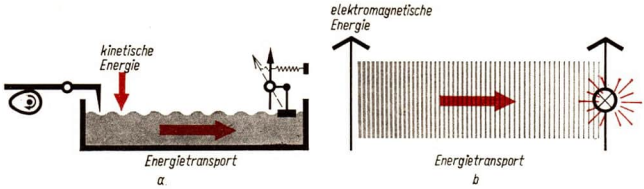
28/2 Die elektrische und magnetische Feldstärke in Abhängigkeit von der Zeit an einem festen Ort auf einer Achse, die senkrecht auf der Dipolachse steht

um eine Wellenlänge weiter. Die Bilder 28/1 und 28/2 zeigen, daß auch die vom schwingenden Dipol hervorgerufene Welle ein räumlich und zeitlich periodischer Vorgang ist. Die magnetische Feldstärke ändert sich in der elektromagnetischen Welle gleichphasig mit der elektrischen Feldstärke, d. h., elektrische und magnetische Feldstärke erreichen ihre Maximalwerte am selben Ort gleichzeitig.

Dies scheint in Widerspruch zu der Darstellung in Bild 28/2 zu stehen. Eine Erklärung hierfür ist nur mit Hilfe der Grundgedanken der Maxwellschen Theorie möglich:
Das elektrische Wirbelfeld muß durch die Veränderungen des Magnetfeldes hervorgerufen werden. Wenn sich die Felder in gleicher Phase verändern, so weist die magnetische Feldstärke inmitten des Ringes der elektrischen Feldlinien die größte Änderungsgeschwindigkeit auf. Eine ähnliche Situation lag auch bei der im Magnetfeld des einfachsten Wechselstromgenerators rotierenden Leiterschleife vor.

1.5.4. Feldausbreitung und Energietransport

Betrachten wir einen geschlossenen und einen offenen Schwingkreis vom energetischen Standpunkt, dann kommen wir zu folgender Feststellung: In einem Schwingkreis (offen oder geschlossen) entspricht der Auf- und Abbau elektrischer und magnetischer Felder einem *Pendeln* der Energie. Bei einem offenen Schwingkreis verursacht die Abstrahlung elektrischer und magnetischer Felder in Form einer elektromagnetischen Welle zusätzlich einen *Energietransport*, der eine starke Dämpfung hervorruft.



29/1 Vergleich zwischen Energietransport verschiedener Energiearten
a) Auf das Wasser übertragene kinetische Energie wird in der Wellenwanne zum Meßgerät transportiert
b) Vom Dipol ausgestrahlte elektromagnetische Energie wird durch den Raum zum Empfangsdipol transportiert

Einen Vergleich zwischen einem Energietransport von kinetischer und elektromagnetischer Energie zeigt Bild 29/1.

Die von einem Dipol abgestrahlte elektromagnetische Welle überträgt Energie.

Der Dipol strahlt die Energie nicht gleichmäßig in alle Richtungen. Aus der Dichte der Feldlinien (Bild 27/1) ist zu erkennen, daß die Feldstärke in der Mittelebene des Dipols die größten Scheitelwerte erreicht; je mehr man sich der Achse des Dipols nähert, um so kleiner werden diese Werte. Das Gleiche gilt auch für die magnetische Feldstärke. Daraus ist zu schließen, daß der größte Teil der Energie auf den Raum nahe der Mittelebene entfällt, während in Richtung der Dipolachse keine Energie abgestrahlt wird.

Zusammenfassung

1. **Ein offener Schwingkreis sendet elektromagnetische Wellen aus.**
   Welcher Unterschied besteht zwischen Schwingung und Welle?
2. **Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ist besonders übersichtlich beim stabförmigen Dipol zu verfolgen.**
   Erklären Sie den Vorgang der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen!
   Welche Richtungen nehmen elektrische und magnetische Feldstärken zum Dipol ein?
3. **Elektromagnetische Wellen bestehen aus miteinander verknüpften elektrischen und magnetischen Feldern wechselnder Feldlinienrichtung (Wechselfelder); sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.**
   Erklären Sie die wechselnde Feldlinienrichtung!
4. **Die elektromagnetische Welle transportiert elektromagnetische Energie.**
   Wie läßt sich ein Energietransport nachweisen?

1.6. Der Empfang elektromagnetischer Wellen

1.6.1. Der Dipol als Empfänger

Im folgenden soll untersucht werden, welche Vorgänge im Empfänger ablaufen, wenn elektromagnetische Wellen auf ihn treffen. Dazu wird als Sender eine grundsätzlich

gleiche Anordnung benutzt, wie sie uns von Bild 25/1 bekannt ist; hinzu kommt als Empfänger ein Empfangsdipol.
Ist der Sender in Betrieb, dann treffen elektrische Felder auf den Empfangsdipol.

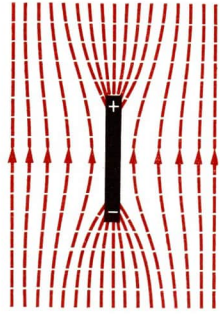
Diese elektrischen Felder verursachen im Empfangsdipol eine Ladungstrennung, wie sie uns aus der Klasse 9 als Influenz bekannt ist.

Unter dem Einfluß der elektrischen Felder wechselnder Feldlinienrichtung, kurz Wechselfeld genannt, pendeln die getrennten (influenzierten) Ladungen zwischen den Hälften des Empfangsdipols.
Statt vom Vorgang der Influenz, also vom elektrischen Anteil des Wellenfeldes auszugehen, kann man auch ebensogut vom magnetischen Feld der Strahlung ausgehen, das im Dipol nach dem Induktionsgesetz eine Wechselspannung hervorruft.

Im Empfangsdipol werden durch die ankommende Welle elektromagnetische Schwingungen hervorgerufen.

- *Begründen Sie das obige Versuchsergebnis (vgl. Bilder 25/2 und 25/3)!*
  Weshalb werden bei diesem Versuch die Lämpchen des Sendedipols kurzgeschlossen?

Um den Empfangsdipol zum Schwingen zu bringen, wird elektromagnetische Energie benötigt. Diese Energie wird, wie bereits auf Seite 26 beschrieben wurde, vom Sender ausgestrahlt und in der elektromagnetischen Welle transportiert. Die auf den Empfangsdipol auftreffenden Wellen geben einen Teil ihrer Energie an ihn ab. Das bedeutet eine Verringerung ihrer Feldstärken; man spricht in diesem Zusammenhang von einer *Schwächung* der erregenden Felder (Bild 30/1).



30/1 Das elektrische Feld in der Nähe des Empfangsdipols

Für genaue Messungen wird an Stelle des Lämpchens im Empfangsdipol eine Germaniumdiode und parallel dazu ein Drehspulgerät eingeschaltet. Mit diesem Empfänger kann die Feldverteilung gemäß Bild 27/2 bestätigt werden.

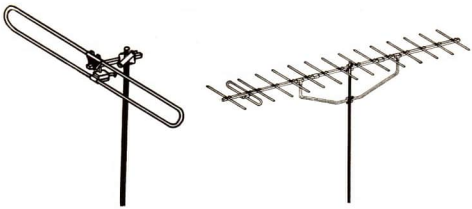
- *Entwerfen Sie ein Versuchsprogramm hierzu!*
  Erläutern Sie die Wirkungsweise der Empfangseinrichtung!
- *Wie kann mit dem Empfangsdipol die Richtung der elektrischen Feldstärke in der empfangenen Welle bestimmt werden?*

1.6.2. Antennen

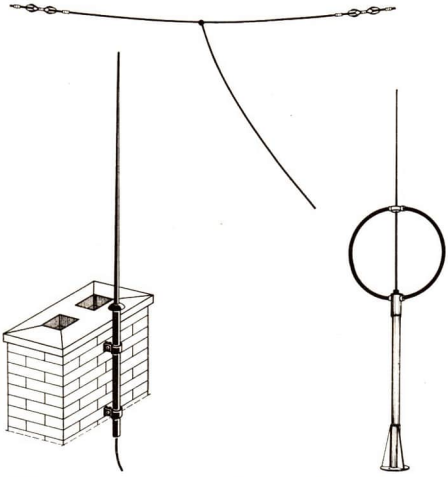
Aus unseren bisherigen Versuchen kann gefolgert werden:

Jeder offene Schwingkreis, der zum Senden oder Empfangen elektromagnetischer Wellen dient, ist eine Antenne.

Der Erfinder der Antenne ist der russische Physiker Alexander Popow (1859 bis 1905). Ihm gelang bereits 1895 unter Benutzung eines „Luftdrahtes", die erste drahtlose Nachricht über eine Entfernung von 250 m und bald darauf über 4 km zu senden. Die Worte dieser Nachricht waren

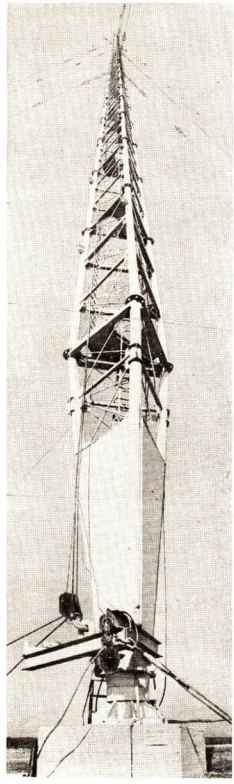


31/1a, b: Faltdipol, Yagi-Antenne. Diese Antennen sind besonders für den Empfang kurzer und ultrakurzer Wellen geeignet. Mehrere Stabdipole in einer Ebene angeordnet, wie es bei der Yagi-Antenne der Fall ist, dienen zur Verbesserung der Richtwirkung. Elektromagnetische Energie wird bevorzugt in Richtung der gemeinsamen Ebene der Dipole ausgestrahlt bzw. empfangen



31/3 oben: L-Antenne, unten links: Stabantenne. Diese Antennen sind typische Vertreter von Empfangsantennen für den gesamten Hörrundfunk. Sie sind ebenfalls offene Schwingkreise, die jedoch nicht auf eine bestimmte Sendefrequenz abgestimmt sind

31/4 Rahmenantenne. Diese Antenne zeigt auch für den Bereich mittlerer und langer Wellen eine ausgesprochene Richtwirkung. Rahmenantennen werden z. B. für den Empfang von Tonzeichen (tonmodulierte Hochfrequenzwellen) bei Flugleiteinrichtungen und in der Seefahrt verwendet



31/2 Sendeantenne des Deutschlandsenders bei Oranienburg. Dieses z. Zt. höchste Bauwerk Europas dient zum Senden längerer Wellen. Solche Antennen lassen sich auf den einfachen Dipol zurückführen: sie werden vertikal aufgestellt und ihr Fußpunkt wird geerdet

„Heinrich Hertz". Bald darauf schuf der Italiener GUGLIELMO MARCONI auf der Grundlage der Arbeiten Popows und anderer Forscher die erste technisch befriedigende Funkanlage. Damit setzte jene stürmische Entwicklung der drahtlosen Nachrichtentechnik ein, die bis in unsere Tage andauert.

In der drahtlosen Nachrichtentechnik haben sich viele Formen von Antennen entwickelt, die den jeweiligen Empfangs- und Sendebedingungen angepaßt wurden. Auf Seite 31 gaben wir einen Überblick über häufig anzutreffende Antennenformen.

Die neuerdings in vielen Empfängern eingebauten Ferritantennen sind als Rahmenantennen zu betrachten. Infolge der großen Permeabilität des stabförmigen Kerns reichen schon kleine Spulenquerschnitte aus.

Fragen, Aufgaben

1. Untersuchen Sie mit dem im UKW-Empfänger eingebauten Dipol die Richtwirkung dieser Empfangsantenne!
2. Weshalb ergibt eine Außenantenne besseren Empfang als eine Zimmerantenne?
3. Was für eine Empfangsantenne verwendete HEINRICH HERTZ bei seinen Versuchen?

Zusammenfassung

1. **Antennen sind offene Schwingkreise, die zum Senden oder Empfangen elektromagnetischer Wellen dienen.**

   Beschreiben Sie die Schwingungsvorgänge bei Antennen!
   Was versteht man unter der Richtwirkung einer Antenne?

2. **Viele Antennenformen lassen sich auf den Stabdipol zurückführen.**

   Welche aus dem Stabdipol entwickelten Antennen haben Sie kennengelernt?

1.7. Die Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen

Bereits HEINRICH HERTZ führte eine Reihe von Versuchen durch, um Eigenschaften der von ihm entdeckten Wellen zu ergründen. Diese Versuche können mit Hilfe der auf Seite 22 beschriebenen Sende- und Empfangseinrichtung wiederholt werden.

1. Abschirmung

Zwischen Sender und Empfänger werden Platten aus verschiedenen Stoffen gestellt (Bild 32/1): Isolierstoffe absorbieren Hertzsche Wellen nur unwesentlich. Metallbleche oder -drahtnetze unterbrechen den Empfang.



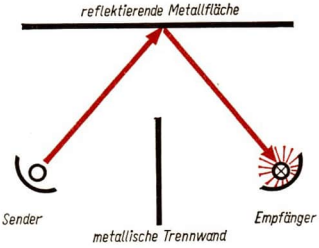
32/1 Abschirmung Hertzscher Wellen

Hertzsche Wellen durchdringen Isolatoren und werden von Leitern abgeschirmt.

Durch eine Abschirmung kann der Einfluß unerwünschter Hertzscher Wellen auf eine Empfangseinrichtung vermieden werden.

2. Reflexion

Wurde der direkte Weg zwischen Sender und Empfänger durch ein Metallblech unterbrochen, setzt der Empfang wieder ein, wenn seitlich von Sender und Empfänger ein Metallblech oder -drahtnetz aufgestellt wird (Bild 33/1).



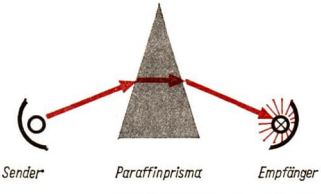
33/1 Reflexion Hertzscher Wellen

Hertzsche Wellen werden von leitenden Flächen gemäß dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen.

Mit Hilfe der Reflexion werden z. B. Wellen für den Fernsehfunk so gelenkt, daß sie im Bereich der Erdoberfläche bleiben.

3. Brechung

Lenkt man Hertzsche Wellen durch ein Prisma aus Paraffin, dann ist eine Brechung nachweisbar (Bild 33/2).

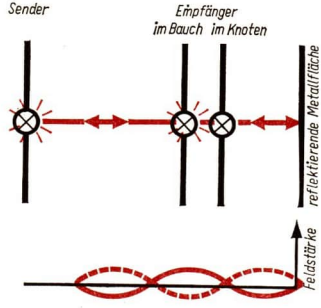


33/2 Brechung Hertzscher Wellen

Die Brechzahl für Hertzsche Wellen ist proportional der Wurzel aus der Dielektrizitätskonstanten des Isolators.

4. Stehende Wellen

Überlagert man die vom Sender abgestrahlten mit den von einer Metallwand reflektierten Wellen, dann zeigt ein zwischen Sender und Reflexionswand bewegter Empfangsdipol je nach seiner Stellung Bäuche und Knoten der elektrischen Feldstärke an (Bild 33/3). Hier liegt eine Interferenzerscheinung vor.



33/3 Stehende elektromagnetische Welle

Helligkeitsmaxima und -minima der Glühlampen am Empfangsdipol zeigen Wellenbäuche und -knoten an.

1.7.1. Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Hertzschen Wellen kann ermittelt werden, wenn Frequenz und Wellenlänge bekannt sind. Auch für Hertzsche Wellen gilt die Grundgleichung

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

Die Frequenz f kann mit Hilfe der Thomsonschen Schwingungsformel berechnet werden, die Wellenlänge λ erhält man aus Messungen an stehenden Wellen.
Für das Vakuum und nahezu auch für Luft erhält man

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

Zusammenfassung

1. **Bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen treten gleiche Erscheinungen wie bei anderen Wellenvorgängen auf: Reflexion, Brechung, stehende Wellen.**

   Welche Aufgaben haben parabolisch gekrümmte Metallbleche bei Sende- und Empfangsdipolen?

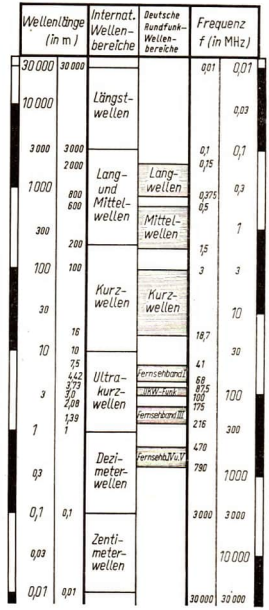
2. **Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen ist gleich der Lichtgeschwindigkeit.**

   Welche Meßmethode für die Lichtgeschwindigkeit haben Sie kennengelernt?

1.8. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Der gesamte Bereich der Hertzschen Wellen wird in eine Folge von Wellenbereichen unterteilt (Bild 34/1).

Für den drahtlosen Nachrichtenverkehr ist von Interesse, welchen Einfluß die Erde und ihre Lufthülle auf die Ausbreitung der Hertzschen Wellen hat. Dies soll im folgenden untersucht werden.



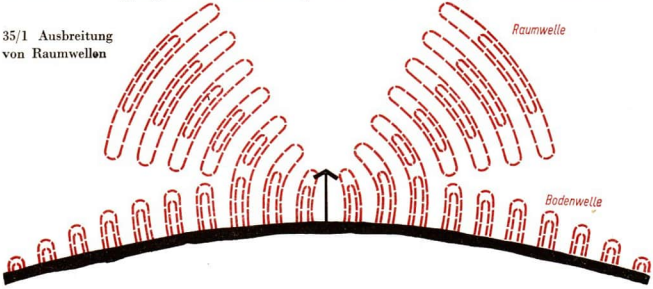
34/1 Wellenbereiche. Die Wellen der einzelnen Bereiche unterscheiden sich in der Art der Ausbreitung, der Erzeugung und des Empfanges. Die Eigenschaften der Wellen ändern sich aber beim Übergang zwischen benachbarten Bereichen nicht sprunghaft

1.8.1. Die Bodenwelle

Im Erdboden, der als elektrischer Leiter zu betrachten ist, kann kein elektrisches Feld bestehen. Eine elektromagnetische Welle dringt daher nicht in den Boden ein. Von geerdeten Antennen, die im Lang- und Mittelwellenbereich eingesetzt werden, gehen elektromagnetische Wellen aus, deren elektrische Feldlinien senkrecht in die Erdoberfläche münden. Sie entspringen und enden in Influenzladungen auf der Erdoberfläche.

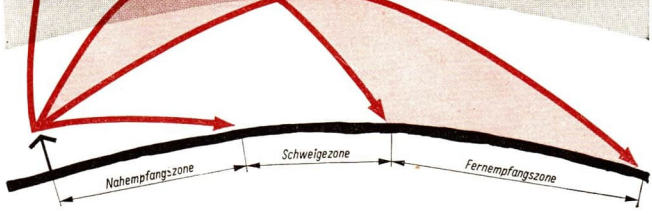
Der in Bodennähe verlaufende Teil der Welle folgt bei der weiteren Ausbreitung der Erdkrümmung, man spricht von einer *Führung* durch die Erdoberfläche.

Dieser Anteil wird *Bodenwelle* genannt. Bodenwellen haben eine begrenzte Reichweite, da bei der Bewegung der Influenzladungen in der Erde Energieverluste auftreten.



35/1 Ausbreitung von Raumwellen

35/2 Wellenreflexion in der Ionosphäre. In der Ionosphäre wird unter Einwirkung vor allem des Ultraviolettanteils der Sonnenstrahlung ein Teil der Gasatome ionisiert. Elektromagnetische Wellen bestimmter Bereiche werden beim Eindringen in eine solche ionisierte Schicht vom Einfallslot weggebrochen und könnnen dadurch wieder bis zur Erde zurückgelenkt werden. Die Raumwelle wird nach ihrer Rückkehr zur Erde erneut an der Erdoberfläche reflektiert. Kurzwellen können auf diese Weise, zwischen Erde und Ionosphäre hin- und herlaufend, sehr große Entfernungen zurücklegen



1.8.2. Die Raumwelle

Der unter größeren Erhebungswinkeln abgestrahlte Teil der Welle trennt sich in einigem Abstand vom Sender von der Bodenwelle und breitet sich dann unbeeinflußt von der Erdoberfläche geradlinig aus. Dieser Anteil wird *Raumwelle* genannt (Bild 35/1).
Die Raumwelle gelangt auf ihrem weiteren Weg in die Ionosphäre, eine Schicht der Lufthülle unserer Erde, die in etwa 200 km Höhe beginnt (Bild 35/2).

Die Ionosphäre besteht aus mehreren Schichten, die sich im Wechsel der Tages- und Jahreszeit verändern. Diese Vorgänge werden durch das Studium der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen untersucht. In letzter Zeit haben künstliche Erdsatelliten wertvolle Informationen über die elektrische Natur hoher Schichten der Atmosphäre geliefert.

1.8.3. Die direkte Welle

Im UKW-Bereich kommt durch die Art der Abstrahlung keine Bodenwelle zustande. Diese hätte wegen starker Dämpfung ohnehin nur eine sehr geringe Reichweite. In diesem Wellenbereich wird für den Nachrichtenverkehr die direkte Welle ausgenutzt. Deren Reichweite ist im wesentlichen durch die *optische Sichtweite* begrenzt.
Ultrakurze Raumwellen werden von der Ionosphäre nur in Ausnahmefällen reflektiert. Sie haben deshalb große Bedeutung für den Nachrichtenverkehr mit künstlichen Satelliten und Raumschiffen.
In der folgenden Tabelle ist zusammengestellt, welche Arten der Ausbreitung in den einzelnen Wellenbereichen auftreten.

Tabelle 1: Arten der Ausbreitung in den Wellenbereichen

Längstwellen:

Sehr gleichmäßige Ausbreitung durch Boden- und Raumwellen; sicherste Nachrichtenverbindung; große Reichweite, jedoch hohe Senderleistung erforderlich.

Lang- und Mittelwellen:

Bei Tageslicht: Bodenwelle; in der Dunkelheit: Boden- und Raumwelle; Dadurch abends Erhöhung der Reichweite, jedoch kann es durch Überlagerung beider Wellen zu einem starken Schwund der Feldstärke kommen: große Reichweite; Empfang sehr störanfällig.

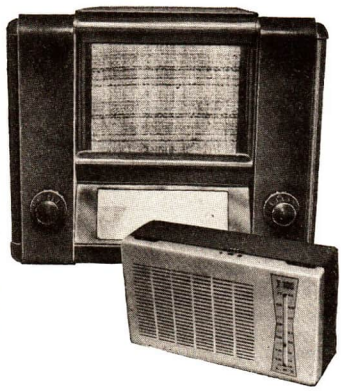
Kurzwellen:

Bodenwelle nur bis höchstens 100 km; Fernempfang nur durch Raumwelle möglich; große Reichweite bei kleiner Senderleistung; große Empfangsunterschiede zwischen Tag und Nacht.

Ultrakurzwellen:

Ausbreitung durch direkte Wellen; können an Hindernissen reflektiert werden, beispielsweise an der Erdoberfläche, an Bergen, an Gebäuden; Reichweite etwas über Sichtweite hinausgehend; wenig Schwankungen des Empfangs; durch Brechung und Beugung in der Ionosphäre können gelegentlich Überreichweiten erzielt werden; nur kleine Senderleistungen erforderlich; mit kürzer werdender Wellenlänge treten die lichtähnlichen Eigenschaften noch stärker hervor; insbesondere Dezi- und Zentimeterwellen lassen sich durch scheinwerferartige Antennen bündeln; kleinste Senderleistungen erforderlich.

2. Die drahtlose Nachrichtentechnik — Hochfrequenztechnik



Die Gegenüberstellung dieser beiden Geräte läßt erkennen, welche Entwicklung der seit 40 Jahren bestehende Rundfunk zurückgelegt hat. Bereits 1957 gab es auf der Welt etwa 300 Millionen Rundfunkempfänger.
Der Rundfunk in der Deutschen Demokratischen Republik erfüllt politische und kulturelle Aufgaben beim umfassenden Aufbau des Sozialismus. Darüber hinaus weist er der westdeutschen Bevölkerung den Weg in eine friedliche Zukunft.

2.1. Die Modulation

Eine elektromagnetische Welle mit gleichbleibender Amplitude und Frequenz enthält noch keine Nachricht, ebensowenig wie ein konstanter Gleichstrom. Die einfachste Möglichkeit, eine Nachricht zu geben, besteht darin, den Sender ein- und auszuschalten, d. h. die Ausstrahlung der Welle zu unterbrechen.
Das ist beim

Telegrafiesender

der Fall. Mit ihm kann man beispielsweise Morsezeichen durch Wellenzüge unterschiedlicher Zeitdauer verbreiten.

Telefoniesender

oder Rundfunksender übermitteln Sprache und Musik. Diese Aufgabe läßt sich nicht erfüllen, indem man die Schallwellen auf dem Wege über ein Mikrofon, einen Verstärker und eine Antenne in elektromagnetische Wellen gleicher Frequenz umwandelt; Antennen strahlen in diesem Bereich der Tonfrequenzen nur einen äußerst geringen Teil der Schwingungsenergie als elektromagnetische Welle ab. Aus diesem Grunde wird im Telefoniesender eine hochfrequente elektromagnetische Schwingung durch die vom Mikrofon abgegebene niederfrequente Wechselspannung beeinflußt und erst dann der Antenne zugeführt. Dieser Vorgang wird **Modulation** genannt. Im allgemeinen wird bei der Modulation durch die niederfrequente Schwingung entweder die Amplitude oder die Frequenz der hochfrequenten Schwingung verändert. Demgemäß unterscheidet man *Amplitudenmodulation* und *Frequenzmodulation*. Die hochfrequente Schwin-

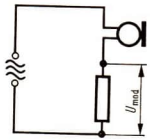
gung wird in diesem Zusammenhang oft als *Trägerschwingung*, ihre Frequenz als *Trägerfrequenz* bezeichnet.

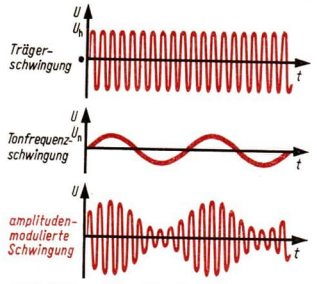
2.1.1. Die Amplitudenmodulation

Die Amplitudenmodulation wird beim Rundfunk im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich angewendet, ebenso auch bei der Bildübertragung des Fernsehens.
Eine sehr einfache Schaltung zur Amplitudenmodulation läßt sich mit Hilfe eines Kohlekörnermikrofons aufbauen (Bild 38/1).

Das Mikrofon und der Widerstand R wirken als Spannungsteiler für die hochfrequente Wechselspannung. Der Widerstand des Mikrofons wird durch die auftreffende Schallwelle verändert. Darauf hin schwankt der Scheitelwert der am Widerstand R abgenommenen Teilspannung entsprechend Frequenz und Amplitude der Schallwelle. Das Ergebnis ist die in Bild 38/2 dargestellte amplitudenmodulierte Schwingung.

38/1
Einfache Schaltung zur Amplitudenmodulation





38/2 Amplitudenmodulierte Schwingung

Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude der hochfrequenten Schwingung im Takt der tonfrequenten Schwingung verändert.

Mathematische Behandlung der Amplitudenmodulation

Die ungestörte hochfrequente Schwingung wird durch die Gleichung

$$U = U_h \cos \omega_h t$$

beschrieben.
Um die in Bild 38/2 dargestellte Schwankung der Amplitude zu erfassen, muß zu dem Scheitelwert U_h die niederfrequente Wechselspannung $U_n \cos \omega_n t$ addiert werden. Damit erhält man für den Momentwert der Spannung bei einer modulierten Schwingung die Gleichung

$$U_{mod} = (U_h + U_n \cos \omega_n t) \cos \omega_h t$$

und nach Auflösung der Klammer

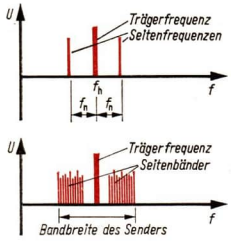
$$U_{mod} = U_h \cos \omega_h t + U_n \cos \omega_h t \cdot \cos \omega_n t .$$

Der zweite Summand wird mit Hilfe des Additionstheorems

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cos (\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos (\alpha - \beta)$$

umgeformt:

$$U_{mod} = U_h \cos \omega_n t + \frac{1}{2} U_n \cos (\omega_h + \omega_n) t + \frac{1}{2} U_n \cos (\omega_h - \omega_n) t .$$



39/1 Seitenfrequenzen und Seitenbänder.

Zur Übertragung von Musik oder Sprache müssen bei der Modulation eine Vielfalt niederfrequenter Schwingungen aufgeprägt werden, in der alle Frequenzen des Hörbereichs vertreten sein können. Demgemäß gibt es auch eine große Zahl von Seitenfrequenzen. Diese erstrecken sich über bestimmte Bereiche neben der Trägerfrequenz, die *Seitenbänder* genannt werden. Damit ist verständlich, daß ein Sender nicht nur eine einzelne Frequenz beansprucht, sondern ein *Frequenzband*, das sich von der kleinsten bis zur größten Seitenfrequenz erstreckt. Für den Mittelwellenbereich wird die Bandbreite eines Senders auf 9 kHz beschränkt. Dadurch werden Tonfrequenzen über 4,5 kHz nicht mehr übermittelt

2.1.2. Die Seitenfrequenzen

Die mathematische Behandlung ergibt, daß die amplitudenmodulierte Schwingung auf die Überlagerung von drei Schwingungen zurückzuführen ist (Bild 39/1):

Trägerschwingung	Trägerfrequenz
$U_h \cos \omega_h t$	f_h
Obere Seitenschwingung	Obere Seitenfrequenz
$1/2\ U_n \cos (\omega_h + \omega_n) t$	$f_h + f_n$
Untere Seitenschwingung	Untere Seitenfrequenz
$1/2\ U_n \cos (\omega_h - \omega_n) t$	$f_h - f_n$.

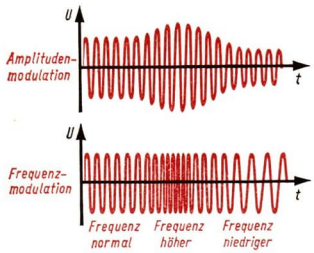
Versuch zum Nachweis der Seitenfrequenzen

Die Seitenschwingungen lassen sich mit einem Zungenfrequenzmesser nachweisen. Man legt an den Frequenzmesser eine Wechselspannung von 50 Hz und unterbricht diese kurzseitig nach jeweils 0,5 Sekunden. Es ist zu beobachten, daß außer der Frequenz 50 Hz auch noch die Frequenzen 48 Hz und 52 Hz angezeigt werden. Die regelmäßig unterbrochene Wechselspannung ist annähernd als modulierte elektromagnetische Schwingung mit der Trägerfrequenz 50 Hz und der Niederfrequenz 2 Hz anzusehen. Daraus ergeben sich die festgestellten Seitenfrequenzen.

2.1.3. Die Frequenzmodulation

Die Frequenzmodulation wird bei Rundfunksendern im Ultrakurzwellenbereich angewendet. Bei der frequenzmodulierten Schwingung schwankt die Frequenz der Trägerschwingung im Takte der niederfrequenten Schwingung, während die Amplitude unverändert bleibt.

In Bild 39/2 sind Amplituden- und Frequenzmodulation gegenübergestellt.



39/2 Gegenüberstellung amplituden- und frequenzmodulierter Schwingungen

Bei der Frequenzmodulation entstehen durch eine niederfrequente Schwingung mehr als zwei Seitenfrequenzen. Aus diesem Grunde beansprucht der Sender bei Frequenzmodulation eine größere Bandbreite.

Fragen, Aufgaben

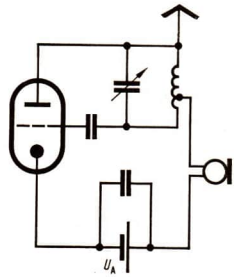
1. Auf welche Weise muß man den Buchstaben des Alphabets Morsezeichen zuordnen, damit eine Nachricht in möglichst kurzer Zeit übertragen werden kann?
2. Wieviel verschiedene Morsezeichen gibt es, wenn höchstens Vierergruppen gebildet werden?
3. Wieviel Sender lassen sich im Mittelwellenbereich des Rundfunks unterbringen, wenn eine Bandbreite von 9 kHz zugelassen wird?
4. Beantworten Sie Frage 3 sinngemäß für den UKW-Bereich, wenn dort (wegen der Frequenzmodulation) die Bandbreite 300 kHz beträgt!
5. Wie wirkt sich die Beschränkung der Bandbreite im Mittelwellenbereich auf die Klangqualität bei der Wiedergabe aus?
6. Skizzieren Sie den Spannungsverlauf bei einer hochfrequenten Schwingung, die mit einer niederfrequenten sinusförmigen Schwingung amplitudenmoduliert wurde.

2.2. Der Rundfunksender

2.2.1. Der Aufbau des Senders

Die im Bild 38/1 dargestellte Modulationsschaltung kann auch für den Bau eines einfachen Telefoniesenders benutzt werden.
Die amplitudenmodulierten Schwingungen müssen zu diesem Zweck einem Antennenkreis zugeführt werden (Bild 40/1).

- *Welche Schaltung wurde für den Röhrengenerator gewählt?*

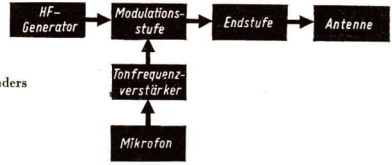


40/1 Einfache Sendeschaltung. Das Mikrofon ist direkt in den Anodenkreis des Röhrengenerators gelegt. Als Antenne dient ein Draht, der mit der Schwingkreisspule verbunden wird

An einen modernen Rundfunksender werden jedoch Anforderungen gestellt, die mit einer so einfachen Schaltung nicht erfüllbar sind:

1. Die Trägerfrequenz muß mit großer Genauigkeit eingehalten werden, damit ein gleichbleibender Empfang gesichert ist und benachbarte Sender nicht gestört werden.
2. Musik- und Sprachdarbietungen müssen möglichst originalgetreu übermittelt werden.
3. Der Sender muß eine ausreichende Leistung besitzen, damit große Reichweiten erzielt werden.

Moderne Rundfunksender werden aus einzelnen **Baugruppen** zusammengesetzt, deren Zusammenwirken aus Bild 41/1 erkennbar ist.



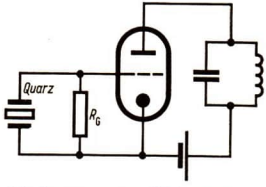
41/1 Blockschaltbild eines Rundfunksenders

Hochfrequenzgenerator

Er liefert die Trägerschwingung des Senders. Die Frequenz eines Röhrengenerators ist im wesentlichen durch den Schwingkreis bestimmt. Durch Veränderungen der Betriebsbedingungen der Röhren (Heizstrom, Anodenspannung) werden Frequenzschwankungen hervorgerufen. Das gleiche gilt auch für die Einflüsse der Temperatur, des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit. Aus diesem Grunde müssen vielfältige technische Vorkehrungen getroffen werden, um die Frequenz des HF-Generators im Sender konstant zu halten. (Internationale Vereinbarungen schreiben eine Tolerenz von etwa 0,003 bis 0,005% vor.)

● *Welche Schwankung der Frequenz in* Hz *ist hiernach für den Sender Leipzig zulässig, dessen Wellenlänge 521,7* m *beträgt?*

Die Hochfrequenzgeneratoren moderner Sender werden mit Hilfe von Schwingquarzen gesteuert. Aus Quarzkristallen werden in bestimmter Orientierung zylindrische oder rechteckige Scheiben geschnitten. Grund- und Deckfläche dieser Scheiben werden mit einer dünnen Metallschicht überzogen. Legt man an diese Flächen eine Spannung, so ändert sich daraufhin die Dicke der Scheibe. Umgekehrt tritt eine Spannung zwischen den Flächen auf, wenn die Scheibe zusammengedrückt wird. Diese Erscheinung beruht auf der besonderen Anordnung der Ionen im Kristallgitter des Quarzes und wird **piezoelektrischer Effekt** genannt. Der quarzgesteuerte Generator arbeitet sehr ähnlich der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung. An die Stelle der Gitterspule tritt eine Quarzscheibe. Wenn diese eine mechanische Schwingung ausführt, liegt am Gitter eine Wechselspannung. Dadurch wird der im Anodenkreis liegende Schwingkreis zu kräftigen Schwingungen angeregt, wenn er auf die Frequenz des Schwingquarzes abgestimmt ist. Die Quarzschwingungen werden durch eine Rückkopplung vom Anodenkreis zum Gitterkreis aufrechterhalten. Für diese Rückkopplung reicht z. B. schon die Kapazität zwischen Gitter und Anode der Röhre aus. Wird der Schwingquarz auf konstanter Temperatur gehalten, so liefert der Generator Schwingungen mit sehr geringen Frequenzschwankungen (Bild 41/2).

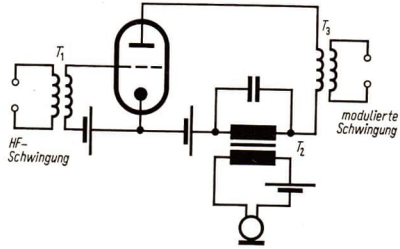


41/2 Quarzgesteuerter HF-Generator

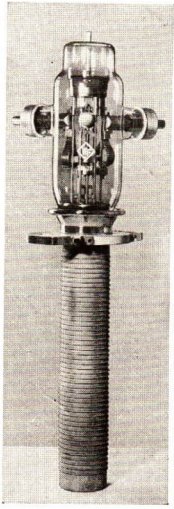
Modulationsstufe

In ihr wird die Trägerschwingung mit der vom Mikrofon gelieferten tonfrequenten Schwingung moduliert (Bild 42/1).

42/1 Schaltung zur Anodenspannungsmodulation. Die hochfrequente Trägerschwingung wird an das Gitter der Modulatorröhre geführt. Diese arbeitet lediglich als Verstärker für diese Schwingung, solange das Mikrofon nicht besprochen wird. Wenn jedoch durch die Primärspule des Transformators $T\,2$ der Mikrofonstrom fließt, wird in der Sekundärspule die tonfrequente Wechselspannung induziert. Die Modulatorröhre erhält dadurch eine veränderliche Anodenspannung, die im Takte der Tonfrequenz schwankt. Diese Schwankungen führt auch der Anodenstrom zusätzlich zu der bereits stattfindenden hochfrequenten Schwankung aus. Im Anodenkreis fließt damit außer dem Gleichstrom der amplitudenmodulierte hochfrequente Wechselstrom. Die modulierten Schwingungen gelangen über den Transformator $T\,3$ und nach Bedarf über weitere Verstärkerstufen zur Endstufe.



Die Sekundärspule des Transformators $T\,2$ bildet für den hochfrequenten Anteil des Anodenstroms einen sehr großen Widerstand. Durch die Überbrückung mit dem Kondensator C können die hochfrequenten Wechselströme ungehindert fließen





42/2 Senderöhre SRW 357

42/3 Empfängerröhre EL 84

	SRW 357 Senderöhre, wassergekühlt	EL 84 Verstärkerröhre in Rundfunkempfängern
Heizspannung	18 V	6,3 V
Heizstrom	200 A	0,76 A
Anodenspannung	13000 V	250 V
Anodenstrom	13 A	0,048 A
Nutzleistung	100 kW	5,3 W
Masse ohne Kühlanlage	ca. 18 kg	
Höhe	1 m	0,08 m
Kühlwassermenge	100 l · min^{-1}	

Hierfür gibt es eine große Zahl von Schaltungen. Die hier beschriebene Anodenspannungsmodulation war zu Beginn der Entwicklung des Rundfunks sehr verbreitet, ist aber heute durch verbesserte Verfahren abgelöst worden.

Endstufe

Sie ist für die Leistung des Senders maßgebend. In dieser Stufe werden spezielle Senderröhren eingesetzt. Bereits die Röhren in unseren Rundfunkempfängern werden im Betrieb warm. Diese Temperaturerhöhung kommt einerseits durch die Röhrenheizung zustande, andererseits durch den Aufprall der Elektronen auf das Anodenblech.
Bei den leistungsstarken Senderöhren reicht der normale Wärmeaustausch mit der Umgebung nicht aus, um eine unzulässige Temperatursteigerung zu vermeiden. Daher ist eine Kühlung dieser Röhren mit Wasser oder Druckluft notwendig. Die Gegenüberstellung auf Seite 42 gibt einen Einblick in die Betriebsbedingungen einer Röhre eines Großsenders (Bilder 42/2 und 42/3).

2.3. Der Telegrafiesender

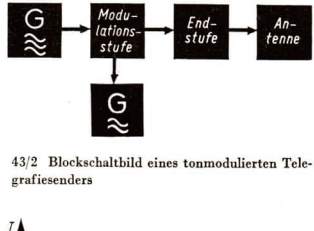
Wenn in der Schaltung nach Bild 40/1 das Mikrofon durch einen Schalter, z. B. eine Morsetaste ersetzt wird, erhält man einen einfachen Telegrafiesender.
Während jeder Tastung wird von der Antenne ein Wellenzug abgestrahlt. Diese Art der drahtlosen Nachrichtenübermittlung wird *tonlose* Telegrafie genannt (Bild 43/1).



43/1 Antennenstrom bei der tonlosen Telegrafie. Beim Schließen des Anodenstromkreises, dem „Tasten" setzt jedesmal der Vorgang des Aufschaukelns ein, beim Unterbrechen klingt die Schwingung nach kurzer Zeit ab

● *Begründen Sie diese Bezeichnung!*

Heute wird überwiegend die *tönende Telegrafie* angewendet. Bei diesem Verfahren wird eine amplitudenmodulierte Schwingung mit konstanter Tonfrequenz erzeugt. Die Zeichen werden gegeben, indem in gewünschten Zeitabständen die Modulation unterbrochen wird (Bilder 43/2 und 43/3).



43/2 Blockschaltbild eines tonmodulierten Telegrafiesenders

Fragen, Aufgaben

1. Weshalb sind beim Rundfunksender sehr geringe Toleranzen für die Trägerfrequenz vorgeschrieben?
2. Vergleichen Sie Rundfunksender und tönende Telegrafiesender miteinander!



43/3 Antennenstrom bei der tönenden Telegrafie

2.4. Der Rundfunkempfänger

2.4.1. Die Demodulation

Die von Rundfunksendern ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen rufen in einer Empfangsantenne amplitudenmodulierte Schwingungen hervor.

● *Beschreiben Sie, wie dieser Vorgang abläuft!*

Überträgt man die Schwingungen auf einen Kopfhörer oder Lautsprecher, so wird noch keine tonfrequente Schwingung hörbar. Die Membran vermag wegen ihrer großen Trägheit einer solchen hochfrequenten Anregung nicht zu folgen und behält deshalb ihre Ruhelage bei. Im Empfänger müssen daher zunächst aus den empfangenen hochfrequenten amplitudenmodulierten Schwingungen die tonfrequenten Schwingungen zurückgewonnen werden. Dieser Vorgang wird **Demodulation** genannt.

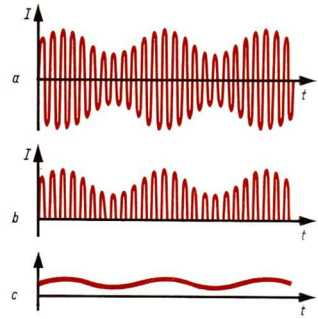
Die Demodulation wird erreicht, indem man den in der Antenne fließenden hochfrequenten Wechselstrom gleichrichtet. Man erhält auf diese Art einen pulsierenden Gleichstrom. Dieser besteht aus den modulierten Halbschwingungen der ursprünglichen hochfrequenten Schwingung.

Wird dieser pulsierende Gleichstrom einem Kopfhörer zugeführt, so folgt auch jetzt die Membran nicht jeder einzelnen hochfrequenten Halbschwingung, sondern sie stellt sich gemäß dem zeitlichen Mittelwert des pulsierenden Gleichstromes ein. Dieser Mittelwert schwankt im Takte der tonfrequenten Schwingung. Daher schwingt auch die Membran im Takte der Tonfrequenz (Bild 44/1).

Die Anteile des pulsierenden Gleichstroms

Eine genauere Untersuchung zeigt, daß der bei der Gleichrichtung entstandene pulsierende Gleichstrom drei Anteile enthält:

1. einen (konstanten) Gleichstrom,
2. den tonfrequenten Wechselstrom,
3. einen hochfrequenten modulierten Wechselstrom der im Vergleich zum Antennenstrom etwas verzerrt ist.



44/1 Demodulation
a) Amplitudenmodulierter hochfrequenter Wechselstrom
b) Pulsierender Gleichstrom
c) Kurve des zeitlichen Mittelwertes

2.4.2. Der Detektorempfang

Als Detektor[1] wurde ursprünglich jedes Gerät zum Nachweis hochfrequenter Wechselströme bezeichnet. In der Anfangszeit des Rundfunks spielte der **Kristalldetektor** eine große Rolle. Dieser besteht aus einem Kristall, z. B. Bleiglanz, der unter leichtem Druck

[1] detegere (lat.): entdecken

45/1 Einfachste Detektorempfangsschaltung
Während der einen Halbschwingung fließt der Strom durch die Diode, die in Durchlaßrichtung einen sehr kleinen Widerstand besitzt, während der folgenden Halbschwingung fließt der Strom über den Kopfhörer, da dann die Diode einen sehr großen Widerstand aufweist

von einer Metallspitze berührt wird. Diese Anordnung arbeitet als Gleichrichter mit der Durchlaßrichtung Spitze — Kristall für den Elektronenstrom.

Der in mechanischer Hinsicht sehr anfällige Kristalldetektor trat wegen der raschen Entwicklung der Elektronröhre lange Zeit in den Hintergrund. Heute stellt die Halbleiterindustrie leistungsfähige Detektoren her, die man jetzt meist nach dem verwendeten Kristall als Germanium- oder Silizium-Diode bezeichnet.

Bild 45/1 zeigt die einfachste Detektor-Empfangsschaltung. Germanium-Diode und Kopfhörer werden parallel zwischen Empfangsantenne und Erde eingeschaltet.

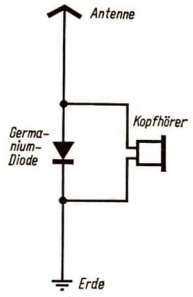
● *Erklären Sie den Aufbau eines Kopfhörers!*

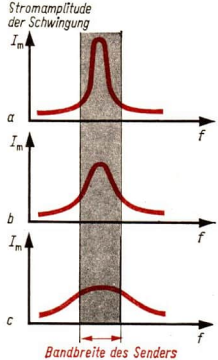
Selektion

Die Antenne empfängt zumeist die elektromagnetischen Wellen von mehreren Sendern. Die beschriebene Detektorschaltung hat den Nachteil, daß die tonfrequenten Schwingungen, die von diesen Sendern stammen, gleichzeitig hörbar werden. Ein befriedigender Empfang ist dann nicht möglich.

Im Empfänger muß daher aus einer Vielzahl von Antennenschwingungen eine gewünschte Empfangsfrequenz ausgesondert werden. Dieser Vorgang wird als **Selektion** bezeichnet.

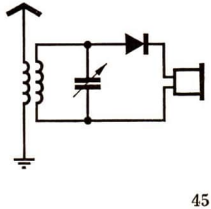
Die Selektion wird erreicht indem man an die Antenne einen Schwingkreis ankoppelt. Dieser wird am stärksten





45/2 Resonanzkurve des Empfänger-Schwingkreises
a) zu schmal, b) normal, c) zu breit

45/3 Detektorschaltung mit Schwingkreis und induktiver Antennenankopplung
Der Schwingkreis ist mit einem Drehkondensator ausgestattet, die Germanium-Diode liegt bei dieser Schaltung in Reihe mit dem Kopfhörer. Der angeregte Schwingkreis wirkt wie eine Wechselspannungsquelle. Durch den Gleichrichter wird jeweils nur eine Halbschwingung im Kopfhörerzweig wirksam.
Der Detektorempfänger hat den Vorteil, daß keine Spannungsquelle benötigt wird.
Da die Antenne aus dem Wellenfeld nur eine geringe Energie erhält, kann beim Detektorempfang, der ohne Verstärker arbeitet, nur ein Kopfhörer benutzt werden.



von jenen Antennenschwingungen angeregt, deren Frequenz in der Nähe der Eigenfrequenz des Schwingkreises liegt. Wenn die Resonanzkurve genügend schmal ist wird praktisch nur eine bestimmte Empfangsfrequenz wirksam (Bild 45/2).
Falls die Resonanzkurve zu schmal ist, wird beim Empfang ein Teil der Seitenbänder „abgeschnitten", so daß die höheren Tonfrequenzen verlorengehen. Das beeinträchtigt die Klangqualität. Bild 45/3 zeigt eine verbesserte Detektorschaltung.

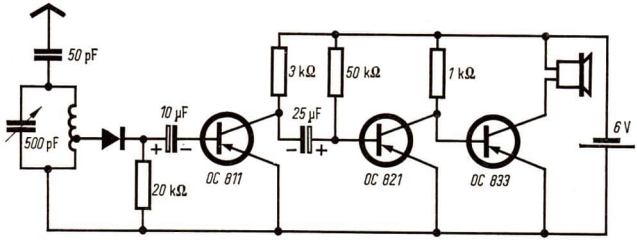
● *Welchen Zweck hat die veränderliche Kapazität?*

2.4.3. Der Geradeausempfänger

Der Detektorenempfänger kann durch zwei Zusatzglieder zum **Geradeausempfänger** erweitert werden. (Diese Bezeichnung wählt man zur Unterscheidung vom Überlagerungsempfänger, der auf Seite 48 behandelt wird.)

Niederfrequenzverstärker

Er ermöglicht den Betrieb eines Lautsprechers (Bild 46/1).



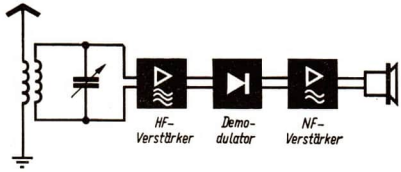
46/1 Detektorempfänger mit dreistufigem Transistorverstärker; eine solche Schaltung kann als Grundlage für den Selbstbau dienen

Hochfrequenzverstärker

Er wird vor dem Gleichrichter eingeschaltet und erhöht die *Reichweite* (Empfindlichkeit) des Empfängers.
Beide Verstärker arbeiten mit Röhren oder Transistoren nach den Prinzipien, die Sie in Klasse 11 kennengelernt haben. Bild 47/1 zeigt das Blockschaltbild eines Geradeausempfängers.

Für die Qualität eines Empfängers sind einige Merkmale maßgebend, die im folgenden zusammengestellt sind.

1. Die *Empfindlichkeit* wird durch den Effektivwert der hochfrequenten Wechselspannung gekennzeichnet, die von der Antenne geliefert werden muß, damit ein normaler Empfang möglich ist.

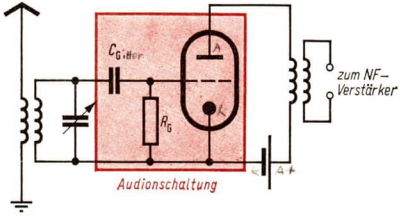


47/1 Blockschaltbild eines Geradeausempfängers

2. Die *Trennschärfe* ist durch den geringsten Frequenzabstand zweier Sender bestimmt, die noch unabhängig voneinander empfangen werden können.
   In größeren Empfängern befinden sich zur Verbesserung der Trennschärfe mehrere Schwingkreise.
3. Die Ausgangsleistung wird durch den Tonfrequenzverstärker bestimmt. Für den Kopfhörerempfang werden Ausgangsleistungen von 10 bis 20 Milliwatt, für den Lautsprecherempfang mehrere Watt benötigt.

Die Audionschaltung

Eine wesentlich bessere Empfangsqualität erhält man beim Geradeausempfänger durch die Anwendung der Audionschaltung[1].
Mit Hilfe einer Triode oder eines Transistors werden mit dieser Schaltung die empfangenen hochfrequenten Schwingungen gleichgerichtet und zugleich verstärkt (Bild 47/2).



47/2 Geradeausempfänger mit Triode in Audionschaltung. Für die Audionschaltung ist die Kombination von Gitterwiderstand $R_G = 1$ bis 3 MΩ und Gitterkondensator $C_G = 50$ bis 100 pF charakteristisch.

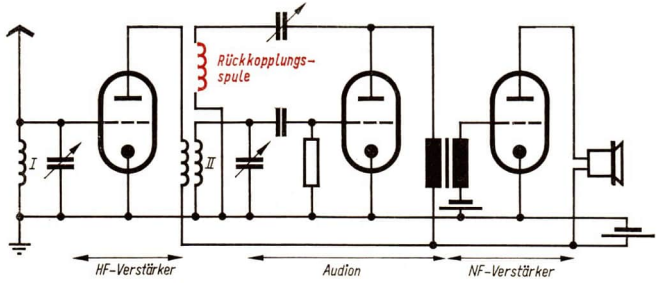
Der Gitterkreis der Triode entspricht der Detektorschaltung in Bild 45/3. An die Stelle der Germanium-Diode ist eine aus Katode und Steuergitter der Röhre gebildete Vakuumdiode getreten. Der Kopfhörer ist durch den Gitterwiderstand R_G ersetzt.

- *Skizzieren Sie eine Gleichrichterschaltung mit Vakuumdiode!*

Im Gitterkreis entsteht durch die Gleichrichtung der in Bild 44/1 dargestellte pulsierende Strom. Dessen hochfrequenter Anteil fließt über C_G, der tonfrequente Wechselstrom und der Gleichstrom über R_G. Der vom Gittergleichstromanteil herrührende Spannungsabfall an R_G muß durch geeignete Bemessung dieses Widerstandes so eingerichtet werden, daß das Gitter ständig eine negative Spannung erhält und somit der Arbeitspunkt der Röhre im geraden Abschnitt der Kennlinie liegt. Die tonfrequenten Schwan-

[1] audio (lat.): ich höre

kungen der Spannung an R_G veranlassen entsprechende Schwankungen des Anodenstroms der Röhre.
Im einfachsten Falle kann im Anodenkreis der Röhre ein Kopfhörer oder Lautsprecher (mit Übertrager) eingeschaltet werden. Es ist aber auch eine Tonfrequenzverstärkung in weiteren Stufen möglich.
Da am Gitter der Audionröhre zugleich auch die modulierte hochfrequente Eingangsspannung wirksam ist, hat auch der Anodenstrom der Röhre zusätzlich noch einen hochfrequenten Anteil. Dieser kann mit Hilfe einer Rückkopplungsschaltung gemäß Bild 17/2 ausgenutzt werden, um Empfindlichkeit und Trennschärfe des Empfängers zu steigern.



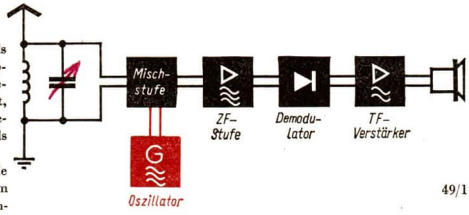
48/1 Schaltung eines Geradeausempfängers mit drei Röhren, zwei Schwingkreisen und einstellbarer Rückkopplung

Durch das Magnetfeld der Rückkopplungsspule werden die Schwingungen des angekoppelten Schwingkreises verstärkt, und man erhält somit auch einen größeren tonfrequenten Wechselstrom im Anodenkreis. Die Rückkopplung darf allerdings nicht bis zur Selbsterregung führen, da sonst der Empfang aussetzt und benachbarte Empfänger gestört werden können. Aus diesem Grunde ist die Rückkopplung zumeist einstellbar eingerichtet.

2.4.4. Der Überlagerungsempfänger

Der moderne Rundfunkempfänger ist der *Superheterodynempfänger*, kurz *Super* genannt. Die deutsche Bezeichnung ist Überlagerungsempfänger. Der Super unterscheidet sich vom Geradeausempfänger durch eine wesentlich veränderte Schaltung des Hochfrequenzteiles. Er übertrifft den Geradeausempfänger in der Empfangsqualität.
Der Überlagerungsempfang soll an Hand des Bildes 49/1 verfolgt werden.

Blockschaltbild eines Überlagerungsempfängers (Super). In der *Hochfrequenzstufe* wird ebenso wie beim Geradeausempfänger aus den von der Antenne aufgenommenen Schwingungen mit Hilfe eines abstimmbaren Schwingkreises die gewünschte Empfangsfrequenz ausgesondert.



49/1

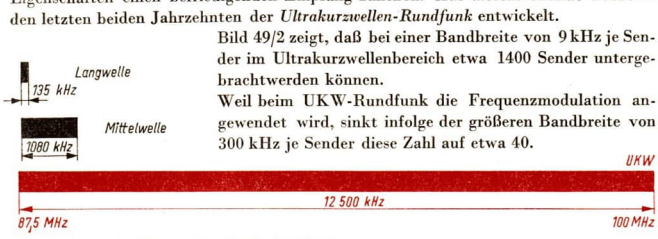
Im *Oszillator* wird z. B. mittels der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung eine hochfrequente Schwingung erzeugt, deren Frequenz um einen bestimmten Betrag größer als die Empfangsfrequenz ist.
In der *Mischstufe* werden die vom Schwingkreis und vom Oszillator kommenden Schwingungen einander *überlagert*.
(Daher kommt die Bezeichnung Überlagerungsempfänger.)
Bei dieser Überlagerung entstehen Schwingungen mit neuen Frequenzen. Diese sind gleich der Summe und der Differenz der beteiligten Frequenzen. Die nächste Stufe des Empfängers nimmt nur die Schwingung mit der Differenzfrequenz, der sogenannten *Zwischenfrequenz*. Diese Schwingung ist ebenso wie vorher die Empfangsschwingung noch mit der Tonfrequenz moduliert. Die Zwischenfrequenz hat bei unseren Rundfunkempfängern einheitlich den Wert 468 kHz.
In den *Zwischenfrequenzstufen* wird die von der Mischstufe gelieferte Schwingung durch Bandfilter geführt und außerdem verstärkt

Ein Bandfilter besteht aus mindestens zwei gekoppelten Schwingkreisen, die auf die gleiche Frequenz abgestimmt sind. Es hat daher die Eigenschaft nur Schwingungen eines bestimmten Frequenzbandes zu übertragen und außerhalb dieses Frequenzbandes liegenden Schwingungen zu sperren. Die Bandfilter des Empfängers werden so eingerichtet, daß gerade noch die bei der Modulation entstandenen Seitenbänder übertragen werden. Auf diese Weise werden die Trennschärfe des Empfängers gesteigert und die Klangqualität verbessert. Im Geradeausempfänger sind solche Bandfilter nicht anwendbar, da sie mit erträglichem Aufwand jeweils nur für eine Trägerfrequenz — das ist beim Super die konstante Zwischenfrequenz — herstellbar sind. Demodulator und Niederfrequenzverstärker sind im allgemeinen beim Super ebenso wie beim Geradeausempfänger aufgebaut. Beim Super wird jedoch fast ausschließlich die Diodengleichrichtung angewendet.

2.4.5. Der Ultrakurzwellen-Rundfunk

Da im Laufe der Zeit auf dem Mittelwellenbereich des Rundfunk immer mehr Sender hinzukamen, wurde es notwendig, auf andere Frequenzbereiche auszuweichen, deren Eigenschaften einen befriedigenden Empfang zuließen. Aus diesem Grunde wurde in den letzten beiden Jahrzehnten der *Ultrakurzwellen-Rundfunk* entwickelt.

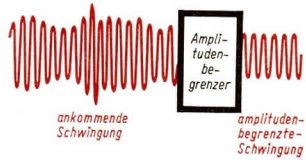
Bild 49/2 zeigt, daß bei einer Bandbreite von 9 kHz je Sender im Ultrakurzwellenbereich etwa 1400 Sender untergebrachtwerden können.
Weil beim UKW-Rundfunk die Frequenzmodulation angewendet wird, sinkt infolge der größeren Bandbreite von 300 kHz je Sender diese Zahl auf etwa 40.



49/2 Die Breite der Frequenzbereiche des Rundfunks

Wegen der begrenzten Reichweite der Ultrakurzwellen ist das kein Nachteil. In einem bestimmten Gebiet können jeweils nur wenige UKW-Sender empfangen werden und es bereitet keine Schwierigkeiten, diesen Sendern die Trägerfrequenzen mit ausreichendem Abstand zuzuteilen, so daß keine gegenseitige Störung stattfinden kann.

Beim UKW-Rundfunk wird praktisch der ganze Bereich der Hörfrequenzen übertragen, deshalb erzielt man hervorragende Klangqualitäten. Ein weiterer Vorzug ist die geringe Störanfälligkeit. Die meisten atmosphärischen Störungen wirken sich auf die Amplitude der empfangenen Welle aus. In jedem UKW-Empfänger befindet sich deshalb ein Amplituden-Begrenzer, der bei der Empfangsschwingung die Störspitzen „abschneidet" (Bild 50/1). Auch für den UKW-Empfang werden heute fast ausschließlich Super verwendet.



50/1 Wirkung des Amplitudenbegrenzers

Fragen, Aufgaben

1. Auf welche Art werden aus den empfangenen amplitudenmodulierten Schwingungen die tonfrequenten Schwingungen zurückgewonnen?
2. Beschreiben Sie Aufbau und Arbeitsweise eines einfachen Detektorempfängers!
3. Zeichnen Sie das Blockschaltbild eines Geradeausempfängers!
4. Der Drehkondensator in einem Empfänger hat eine größte Kapazität von 500 pF. Welche kleinste Kapazität muß noch einstellbar sein, wenn der Mittelwellenbereich des Rundfunks durch Veränderung der Kapazität überstrichen werden soll?
5. Welche Vorzüge hat der Ultrakurzwellen-Rundfunk gegenüber dem Mittelwellen-Rundfunk?

Zusammenfassung

1. **Für die drahtlose Übertragung von Musik und Sprache muß im Sender eine hochfrequente Schwingung mit der tonfrequenten Schwingung moduliert werden.**

   Erläutern Sie den Unterschied von Frequenz- und Amplitudenmodulation!

2. **Der Rundfunksender besteht im wesentlichen aus Hochfrequenzgenerator, Modulationsstufe, Endstufe und Antenne.**

   Welche Aufgaben haben die einzelnen Stufen?

3. **Der Geradeausempfänger besteht aus Hochfrequenzverstärker, Demodulator, Tonfrequenzverstärker und Lautsprecher.**

   Nennen Sie die Funktion der Hauptteile!
   Welche Teile des Empfängers werden bei der Audionschaltung vereinigt?

4. **Beim Überlagerungsempfang entsteht aus Empfangsfrequenz und Oszillatorfrequenz die konstante Zwischenfrequenz.**

   Welche Vorteile bietet der Überlagerungsempfang?

2.5. Funkdienste für Verkehr, Wirtschaft und Armee

2.5.1. UKW-Sprechfunk

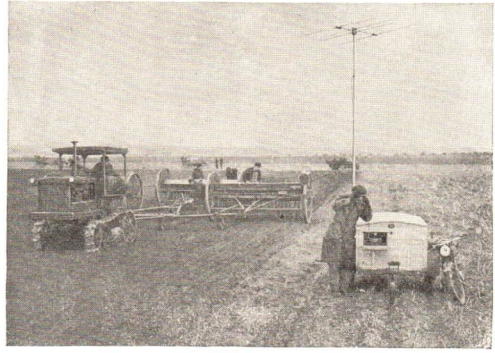
Der UKW-Sprechfunk dient zur drahtlosen Nachrichtenübermittlung auf kurzen Strecken. Er arbeitet nach den gleichen Prinzipien wie der UKW-Rundfunk, beansprucht jedoch eine wesentlich kleinere Bandbreite. Für Reichweiten von etwa 10 km werden Sendeleistungen von nur 10 W benötigt.

Je nach dem Anwendungsbereich können zwei oder mehrere Stationen, die ortsfest oder beweglich sind, miteinander in Sprechverbindung stehen.

Jede Station muß einen Sender und einen Empfänger besitzen. Die Antennen und Teile des Geräts werden für Sendung und Empfang benutzt (Bilder 51/1 und 51/2).



51/1
UKW-Rangierfunkanlage



51/2 UKW-Sprechfunkanlage in einer LPG.
Durch den UKW-Sprechfunk können in vielen Fällen die Arbeitsproduktivität gesteigert, die Betriebssicherheit und Einsatzbereitschaft erhöht werden. Man findet UKW-Sprechfunkanlagen z. B. auf Rangierbahnhöfen, bei der Feuerwehr, in den Streifenwagen der Volkspolizei, in Untertagebauen der Bergwerke und auf Montagekränen und Baggern

Überwiegend wird im *Wechselsprechverkehr* gearbeitet. Die beteiligten Stationen arbeiten abwechselnd – nicht gleichzeitig – als Sender und Empfänger mit gleicher Trägerfrequenz. Beim *Gegensprechverkehr*, wie er vom Fernsprecher her bekannt ist, müssen dagegen zwei Trägerfrequenzen belegt werden und zwei voneinander unabhängige Sende- und Empfangsanlagen vorhanden sein.

2.5.2. Richtfunk

Die Kabelverbindungen für den Fernsprechverkehr und andere Nachrichteneinrichtungen werden immer mehr von den Richtfunkverbindungen verdrängt, die man in Frankreich als „Hertzsche Kabel" bezeichnet.

Eine *Richtfunkverbindung* besteht aus Empfangs- und Sendestation und dazwischenliegenden *Relaisstationen*, die einen Abstand von 50 km bis 60 km haben.

Vom *Richtfunksender* werden mit einer großen *Parabolantenne*, deren Durchmesser ≈ 4 m beträgt, Dezimeterwellen als enges Bündel abgestrahlt. Die Relaisstation nimmt das Signal auf, verstärkt es und gibt es an die nächste Relaisstation weiter. Empfang und Ausstrahlung erfolgen ebenfalls über Parabolantennen (Bild 52/1). Da Dezimeterwellen stark gebündelt werden können, werden mit sehr geringen Leistungen von etwa 2 W bis 5 W die erforderlichen Entfernungen erreicht.

Richtfunkgeräte arbeiten auf Frequenzen zwischen 1,5 GHz und 2,7 GHz. Je nach den verwendeten Richtfunkgeräten kann man entweder einen Fernsehbildkanal oder vier Rundfunkkanäle übertragen. Als Kanal wird das von einem Sender beanspruchte Frequenzband bezeichnet (Bild 53/1).

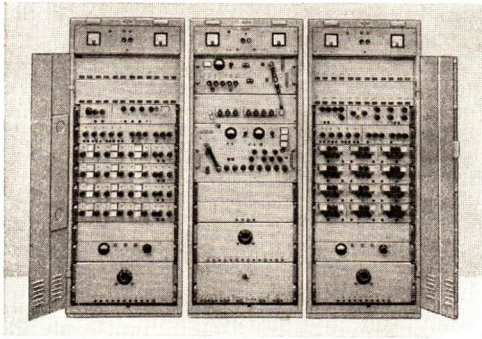
52/1 Parabolantennen



52/2 Relaisturm



53/1
Richtfunkverbindungsgerät



Ein großer Vorteil einer Richtfunkstrecke gegenüber einer Kabelverbindung besteht in dem wesentlich geringeren Kosten- und Materialaufwand.
Auf einer solchen Richtfunkstrecke können bei einer Wellenlänge von etwa 15 cm gleichzeitig nahezu 1000 von einander unabhängige Telefongespräche vermittelt werden, soweit der tägliche Bedarf dies erfordert.
Zwischen Berlin und einigen Bezirksstädten bestehen bereits Richtfunkverbindungen der Deutschen Post. Bild 52/2 zeigt die Relaisstation bei Birkholzaue. Sie dient als Zwischenstation für verschiedene UKW-Fernseh- und Richtfunkverbindungen.

2.5.3. Funkortung

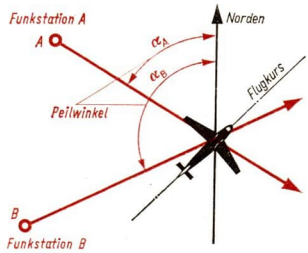
Für Standort- und Kursbestimmungen von Schiffen und Flugzeugen sind außer den auf Seite 56 behandelten Radareinrichtungen noch eine Reihe von Verfahren üblich, die ebenfalls auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beruhen:

Funkpeilung

Bei ihr wird die Richtung bestimmt, aus der die Zeichen bekannter Sender im Empfänger eintreffen. Dazu wird eine *Rahmenantenne* verwendet. Wenn die Rahmenebene senkrecht zur Richtung des Senders steht, so ist die Lautstärke am geringsten.

Eigenpeilung

Bei ihr werden auf diese Weise die Winkel zwischen der Nordsüdrichtung und den Richtungen zu zwei bekannten Sendern ermittelt (Bild 53/2). Danach kann auf der Karte der eigene Standort bestimmt werden.



53/2 Eigenpeilung

Fremdpeilung

Bei ihr sendet das Fahrzeug selbst Funksignale aus, die von zwei festen Stationen aufgenommen werden. Dort erfolgt die Bestimmung der Winkel und die Berechnung des Standorts des Fahrzeuges. Der Standort wird durch Funk mitgeteilt.

Für die Landung von Flugzeugen bei schlechter Sicht oder bei Nacht sind ebenfalls Funkeinrichtungen geschaffen worden: Der Pilot kann das Flugzeug im *Blindflug* auf die Landebahn aufsetzen.

2.5.4. Amateurfunk

Die Amateurfunker der Deutschen Demokratischen Republik sind in der Gesellschaft für Sport und Technik zusammengeschlossen. Jeder junge Mensch, der Interesse am Funkwesen hat, kann in einer Kollektivstation die ersten Kenntnisse erwerben, um dann als Mitbenutzer der Klubstation oder als Sendeamateur mit eigener Station die Verbindung zu Amateuren in aller Welt aufzunehmen. Mit geringer Sendeleistung, oft nur 10 W, überbrücken die Funkamateure im 20-m-, 40-m- und 80-m-Band große Entfernungen, die zehntausend Kilometer und mehr betragen können. Sie treten mit Amateuren anderer Länder in Verbindung und fördern so den Gedanken der Völkerfreundschaft. Viele junge GST-Nachrichtensportler leisten später ihren Ehrendienst in der NationalenVolksarmee als Funker. Eine moderne Armee, wie unsere Nationale Volksarmee, benötigt viele qualifizierte Funker (Bild 54/1).

54/1 Funker der Nationalen Volksarmee mit einem tragbaren Funkgerät (Dezimeterwellengerät)



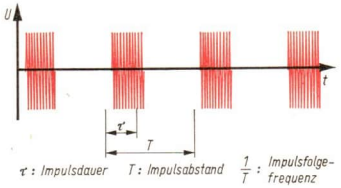
2.6. Das Funkmeßverfahren

2.6.1. Das Impuls-Echo-Prinzip

Bereits in den Anfangsjahren der drahtlosen Nachrichtentechnik gab es Bestrebungen, Hertzsche Wellen zum Auffinden entfernter Objekte bei ungünstigen Sichtverhältnissen, z. B. auf See, zu benutzen. Erst im Zusammenhang mit der Entwicklung der Ultrakurzwellentechnik gelang es, diese Gedanken in die technische Praxis umzusetzen. Es wurde das *Funkmeßverfahren* entwickelt, dessen englische Kurzbezeichnung **Radar** (radio detection and ranging = Funkermittlung und Entfernungsbestimmung) sich heute allgemein durchgesetzt hat.
Das Radar-Verfahren beruht auf dem *Impuls-Echo-Prinzip*: Ein Sender strahlt wäh-



55/1 Soldat der NVA am Radarschirm
Tag und Nacht wird der Luftraum an unseren Staatsgrenzen von den Soldaten der Nationalen Volksarmee überwacht, um die Deutsche Demokratische Republik zu schützen



55/2 Zum Impulsbetrieb

sehr kurzer Zeit eine elektromagnetische Welle aus. Diese Art der Sendung wird als Impulsbetrieb bezeichnet. Bei jedem Sendeimpuls entsteht ein Wellenzug bestimmter Dauer (Bild 55/2).
Die ausgesandten Wellenzüge werden an Gegenständen in der Umgebung reflektiert. Dadurch gelangten Echoimpulse an den Sendeort zurück und werden dort empfangen. Aus dem Zeitabstand von Sendung und Empfang — der Laufzeit des Wellenzuges — kann auf den Abstand der Reflexionsstelle vom Sender geschlossen werden.

- *Entwickeln Sie eine Beziehung zwischen der Impulsdauer und der Länge des Wellenzuges!*
- *Entwickeln Sie für diesen Zweck eine Gleichung!*

Bei der Verwirklichung des Impuls-Echo-Verfahrens waren zwei wesentliche Schwierigkeiten zu überwinden:

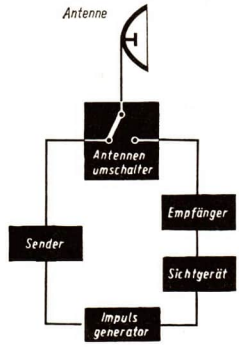
1. Mit dem Echoimpuls gelangt nur ein sehr kleiner Bruchteil der Sendeenergie zurück. Daher müssen die Empfangsgeräte eine außerordentlich hohe Empfindlichkeit haben.
2. Wegen der großen Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen kehrt der Echoimpuls bereits nach sehr kurzer Zeit zurück, auch wenn das Ziel mehrere Kilometer entfernt ist. Für die Messung dieser kurzen Laufzeiten müssen spezielle elektronische Anlagen vorhanden sein.

2.6.2. Die Radar-Anlage

Die Radar-Anlagen sind zumeist so eingerichtet, daß dieselbe Antenne zur Sendung und zum Empfang dient. Der Aufbau einer solchen Anlage ist aus Bild 56/1 ersichtlich.

Der *Antennenumschalter* stellt zunächst die Verbindung Sender–Antenne her. Dabei wird der Empfänger abgeschaltet, damit er von dem kräftigen Sendeimpuls nicht beschädigt werden kann. Sobald der Sendeimpuls abgestrahlt ist, wird die Antenne an den Empfänger angeschlossen.

Der *Sender* erzeugt in kurzen, einstellbaren Zeitabständen kräftige Impulse hochfrequenter Schwingungen. Die Sendeleistung beträgt dabei bis zu mehreren Hundert Kilowatt.



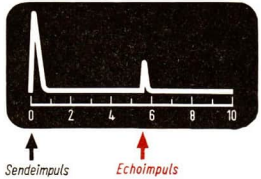
56/1 Blockschaltbild einer Radaranlage

Der nächstfolgende Sendeimpuls darf immer erst ausgestrahlt werden, wenn das Echo seines Vorgängers eingetroffen ist, weil sonst keine eindeutige Zuordnung der Echos zu den ausgesandten Impulsen möglich ist.

- *Wie weit darf unter dieser Bedingung das Radarziel entfernt sein, wenn die Sendeimpulse im Abstand von $T = 2$ Millisekunden aufeinander folgen?*

Im *Empfänger* wird der aufgenommene Echoimpuls verstärkt, gleichgerichtet und an das Sichtgerät weitergegeben.

Das Sichtgerät besteht aus einem Elektronenstrahloszillografen.



56/2 Entfernungsanzeige auf dem Bildschirm des Radargerätes

Der Vorlauf des Elektronenstrahls von links nach rechts beginnt beim Ausstrahlen des Sendeimpulses. Der Sendeimpuls und sein Echo werden durch je eine „Zacke", das ist eine kleine vertikale Auslenkung des Elektronenstrahls, sichtbar gemacht. Bei bekannter Vorlaufzeit des Strahls kann aus der Lage dieser Zacken auf die Entfernung des Radarzieles geschlossen werden (Bild 56/2).

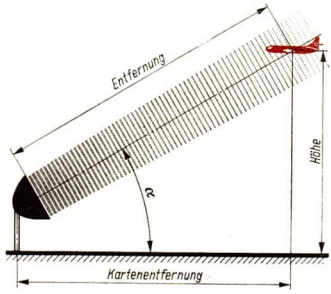
Der *Impulsgenerator* ist ein Taktgeber. Er steuert die Arbeit aller übrigen Teile der Anlage.

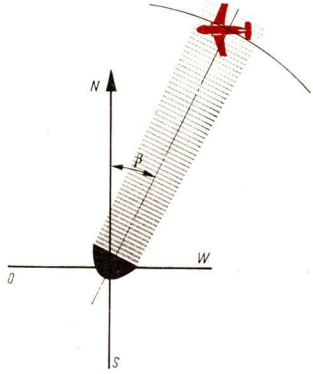
Der Generator liefert in regelmäßiger Form Impulse — kurz dauernde Gleichspannungen. Diese lösen den Sendeimpuls und zugleich den Kippspannungserzeuger des Sichtgerätes aus.

Die *Antenne* der Radaranlage muß eine gute Richtwirkung aufweisen. Als Richtantenne dienten früher Dipolkombinationen, d. h. ganze „Dipolwände" im Aussehen wie die Yagi-Antenne. In jüngerer Zeit ist es gelungen, mit den Radarfrequenzen in den Bereich der Dezimeter- und sogar Zentimeter-Wellen vorzustoßen. Zur Bündelung dieser Wellen werden Reflektoren in der Form von Parabolspiegeln eingesetzt; im Brennpunkt des Spiegels befindet sich der Strahler (Bilder 57/1 a, b und 57/2).



57/1 Je schärfer die ausgestrahlten Wellenzüge gebündelt sind, desto mehr Einzelheiten des Radarzieles sind erkennbar; (a) der Strahl ist nicht so scharf gebündelt, (b) jedes einzelne Flugzeug wird deutlich erfaßt



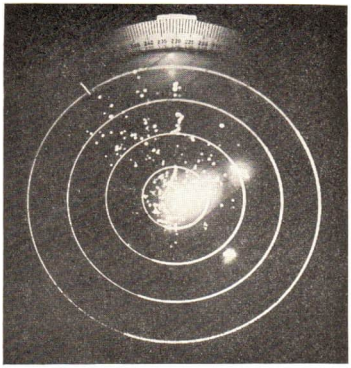


57/2 Aus Höhenwinkel α, Seitenwinkel β und der gemessenen Entfernung kann die genaue Position des angepeilten Radarzieles bestimmt werden

2.6.3. Das Panorama-Gerät

Mit dem soeben beschriebenen Radargerät ist es kaum möglich, die gesamte Umgebung eines Ortes ständig unter Kontrolle zu halten. Für diesen Zweck wurden deshalb *Rundsicht-* oder *Panorama-Geräte* konstruiert. Diese werden z. B. in der Flugsicherung angewendet. Bei den Panorama-Geräten wird die Antenne ständig gleichförmig um eine lotrechte Achse gedreht. Dabei werden fortwährend Sendeimpulse ausgestrahlt und Echoimpulse empfangen (Bild 58/2). Durch eine Umgestaltung des Sichtgerätes wird erreicht, daß auf dem Bildschirm die Lage der Radarziele maßstäblich, ähnlich wie auf einer Landkarte, abgebildet wird.

Der unabgelenkte Elektronenstrahl der Braunschen Röhre des Anzeigegeräts trifft den Mittelpunkt des Bildschirms. Bei jedem Sendeimpuls beginnt ein Vorlauf von der Mitte zum Rande des

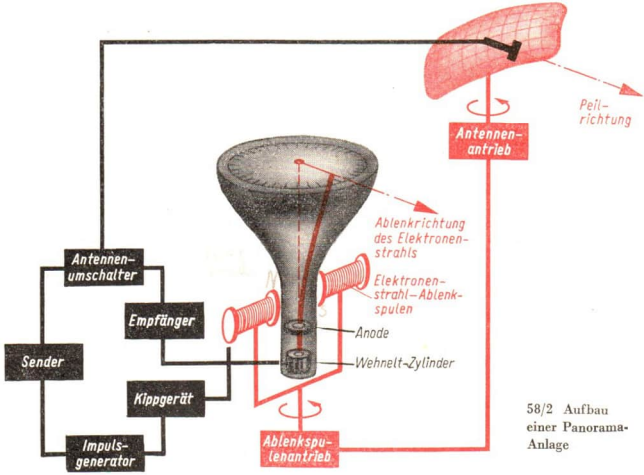


58/1 Schirmbild beim Panorama-Gerät

kreisförmigen Schirms. Die Ablenkung wird durch das magnetische Feld zweier Spulen hervorgerufen, die außen am Halse der Röhre liegen und an das Kippgerät angeschlossen sind. Diese Ablenkspulen rotieren mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit um die Röhre, mit der auch die Antenne umläuft. Dadurch wird erreicht, daß die Ablenkrichtung des Elektronenstrahls ständig mit der Senderichtung der Antenne übereinstimmt.

Das Echo wird beim Rundsichtgerät nicht mehr als „Zacke", sondern als heller Fleck sichtbar gemacht. Hierzu wird der Elektronenstrahl durch eine Spannung gesperrt, die zwischen Katode und Wehneltzylinder angelegt wird. Der Empfänger ist derart mit dem Wehneltzylinder verbunden, daß durch jeden Echoimpuls die Sperrspannung kurzzeitig aufgehoben wird. Dadurch erscheint auf dem Bildschirm eine helle Stelle (Bild 58/1).

Schließlich verwendet man für den Leuchtschirm des Sichtgeräts einen Leuchtstoff, der längere Zeit nachleuchtet. Dadurch ist ständig das gesamte Schirmbild beobachtbar.



58/2 Aufbau einer Panorama-Anlage

Einige Betriebsdaten eines Panorama-Geräts für Wasserfahrzeuge:

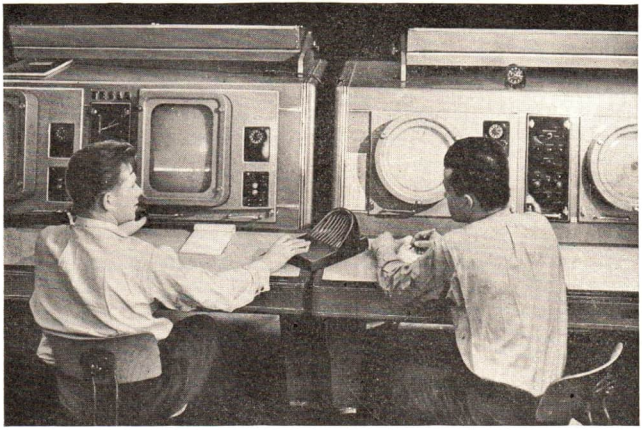
Drehzahl der Antenne	20 U/min
Frequenz der abgestrahlten Welle	9,375 GHz
Wellenlänge	3,2 cm
Impulsfrequenz (Anzahl der Impulse je Sekunde)	2000 Hz
Impulsdauer	0,2 μs
Impulsleistung	bis 40 kW
Entfernungsmeßbereich	bis 24 sm

2.6.4. Anwendungen des Radar-Verfahrens

Der *Luftverkehr* hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten außerordentlich entwickelt. Die Verkehrsdichte hat stark zugenommen. Flug- und Landegeschwindigkeiten wurden



59/1 Antenne eines Panorama-Gerätes auf dem Zentralflughafen Berlin-Schönefeld



59/2 Bedienungsraum der Radar-Anlage auf dem Zentralflughafen Berlin-Schönefeld

wesentlich erhöht. Dadurch wird es immer komplizierter, den Flugverkehr in der Nähe von Flughäfen zu überwachen und zu leiten. Im Kontrollturm moderner Flughäfen werden heute mit Hilfe von Panorama-Geräten ständig die Positionen der an- und abfliegenden Maschinen verfolgt (Bilder 59/1 und 59/2). Mit Hilfe besonderer Richtstrahl-Anlagen kann das Flugzeug bei Blindlandungen zuverlässig geleitet werden.

Im *Seeverkehr* erfaßt eine Rundsichtanlage auch bei Nebel und während der Nachtstunden in der Nähe befindliche andere Schiffe und Hindernisse. Bei der Einfahrt in Häfen erweist sich die Radaranlage als wirksame Navigationshilfe.

Für die *Landesverteidigung* ist das Radarverfahren von wesentlicher Bedeutung. Der Luftraum über unseren Staatsgrenzen wird ebenso wie die Grenzen anderer Länder ständig durch Radargeräte überwacht, damit der Einflug fremder Flugzeuge jederzeit kontrolliert werden kann.

Der Abschuß von USA-Spionageflugzeugen über der Sowjetunion und der DDR beweist die Wirksamkeit einer solchen Kontrolle.

Radargeräte ermöglichten auch eine Weiterentwicklung der Waffentechnik besonders im Bereiche der Luftverteidigung. Diese Geräte werden z. B. zur Zielbegleitung bei der Flak-Atillerie, zur Leitung von Jagdflugzeugen und, eingebaut in Flugzeugen, zur Bestimmung der Zielentfernung benutzt.

Während des zweiten Weltkrieges hatten die Alliierten Streitkräfte einen wesentlichen Vorsprung in der Radartechnik erlangt. Dadurch wurde die britische Luftverteidigung derart gestärkt, daß die faschistischen Bombenangriffe gestoppt werden konnten. Außerdem gelang es auch, die deutschen U-Boote sehr wirksam zu bekämpfen. Es ist jedoch verfehlt, von einer kriegsentscheidenden Wirkung dieser Radarüberlegenheit zu sprechen, wie das zuweilen geschehen ist.

An der *Eroberung des Weltraumes* ist die Radartechnik ebenfalls beteiligt. Die Bahnen von kosmischen Raketen und künstlichen Trabanten werden mit Radargeräten verfolgt. Einen außerordentlichen Erfolg konnten sowjetische Wissenschaftler im Jahre 1963 erzielen. Es gelang ihnen, Radarechos vom Planeten Mars über eine Entfernung von etwa 100 Millionen Kilometer zu empfangen. Diese Messungen ermöglichten die genauere Bestimmung der Entfernung dieses Planeten von der Sonne, zum anderen wurden auch Aufschlüsse über den Aufbau der Marsoberfläche gewonnen.

Fragen, Aufgaben

1. Die Länge der vom Radargerät ausgestrahlten Wellenzüge sei 60 m.
   Welchen Abstand müssen zwei in derselben Peilrichtung liegende Radarziele mindestens haben, damit noch zwei getrennte Echos auftreten?
2. Welche Aufgabe hat der Antennenumschalter eines Radargerätes?
3. Weshalb wird bei Radaranlagen für die Flugsicherung mit kürzeren Zeitabständen der Sendeimpulse als bei Schiffsanlagen gearbeitet?
4. Bei einer Radarbeobachtung dauerte der Vorlauf des Elektronenstrahls 1 Millisekunde. Auf dem Bildschirm wird dabei eine Strecke von 8 cm beschrieben. 5,5 cm hinter dem Sendeimpuls wird das Echo angezeigt. Welche Entfernung hat das Radarziel?

Zusammenfassung

1. **Das Radar-Verfahren arbeitet nach dem Impuls-Echo-Prinzip mit elektromagnetischen Wellen im Dezimeter- und Zentimeter-Bereich.**

   Erläutern Sie den Aufbau einer Radar-Anlage!

2. **Aus der Laufzeit des ausgestrahlten Wellenzuges wird auf die Entfernung des Radarzieles geschlossen.**

   Weshalb werden möglichst kurze Sendeimpulse ausgestrahlt?

3. **Das Radar-Verfahren wird im Verkehrswesen und in der Landesverteidigung vielseitig angewendet.**

   Welche Aufgabe erfüllt ein Panoramagerät?

2.7. Der Fernsehfunk

Am 22. Juni 1963 verfolgten Millionen begeisterter Menschen in fast allen Ländern Europas am Fernsehgerät den triumphalen Empfang der ersten Kosmonautin der Welt, VALENTINA TERESCHKOWA (Bild 61/1), und ihres „Himmelsbruders" VALERI BYKOWSKI auf dem Roten Platz in Moskau. Solche Direktübertragungen werden durch die Intervision, die Organisation des Fernsehfunks der sozialistischen Länder, ermöglicht (Bild 62/1).

2.7.1. Das Prinzip der Bildübertragung

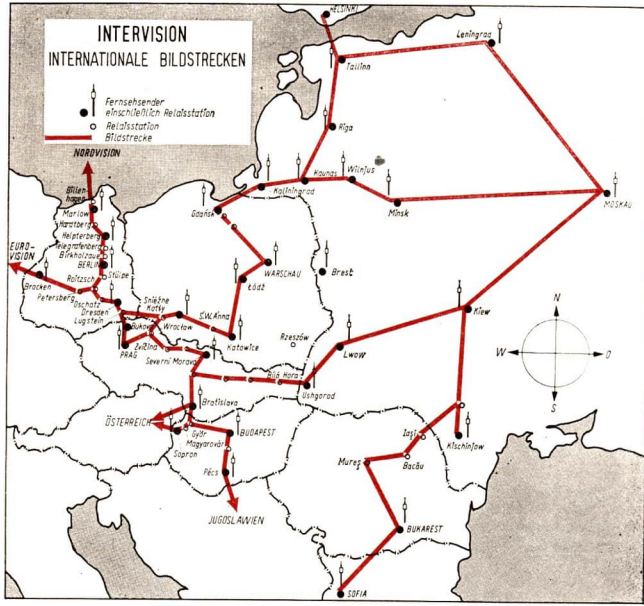
Bei jeder Fernsehbildübertragung werden zwei Eigenschaften unseres Auges ausgenutzt:

1. Das Auge kann Bilder, die aus einzelnen *Bildpunkten* zusammengesetzt sind, ebenso verarbeiten, als ob gleichmäßig getönte Flächen vorhanden wären. Als Bildpunkte werden sehr kleine Flächenstücke des Bildes bezeichnet, die nicht unbedingt aneinander stoßen müssen.

   - *Erläutern Sie, in welcher Art die Bildpunkte bei Zeitungsbildern angeordnet sind!*
   - *Wie werden die Helligkeitsabstufungen wiedergegeben?*
   - *Das Auge kann zwei Bildpunkte nicht mehr getrennt wahrnehmen, wenn diese bei einem Beobachtungsabstand von 1 m etwa 0,3 mm voneinander entfernt sind. Überprüfen Sie diese Behauptung durch Versuche!*

61/1 Valentina Tereschkowa





62/1 Fernsehsendernetz der sozialistischen Länder

2. Ein Lichtreiz wirkt nach seinem Aufhören noch etwa 0,1 Sekunden nach. Das Auge nimmt deshalb einen gleichmäßigen Bewegungsablauf wahr, wenn die Lage des bewegten Körpers durch eine Bildfolge in Zeitabständen von höchstens 1/16 Sekunde wiedergegeben wird. Hierauf beruht die Kinematografie — das „Filmen". Damit können die Grundgedanken der Bildübertragung beim Fernsehen verstanden werden:

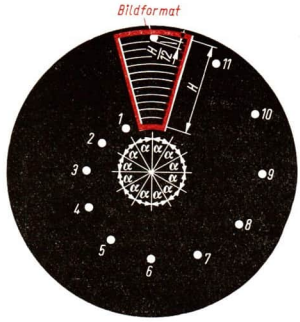
1. Das Bild wird in hinreichend kleine Bildpunkte *zerlegt.*
2. Diese Bildpunkte werden in bestimmter Reihenfolge nacheinander *abgetastet.*
3. Die beim Abtasten gefundenen Helligkeitswerte werden dem Empfänger *übermittelt.*
4. Im Empfänger wird das Bild aus seinen Bildpunkten aufgebaut. Das Auge nimmt die bei der Wiedergabe rasch nacheinander aufleuchtenden Bildpunkte als Gesamtbild wahr. Die in schneller Folge aufgenommenen Gesamtbilder täuschen wie beim Film den Bewegungsablauf vor.

5. Abtast- und Wiedergabevorgang müssen in vollkommenem *Gleichlauf* erfolgen. Die Bildpunkte müssen in gleicher Reihenfolge und gleicher Zeit abgetastet und wiedergegeben werden.

In der Anfangszeit des Fernsehens wurden *mechanische Verfahren* für die Bildabtastung benutzt. Bereits im Jahre 1884 hatte der deutsche Ingenieur PAUL NIPKOW ein Patent für die heute nach ihm benannte *Lochscheibe* erhalten (Bild 63/1).

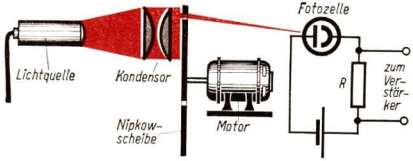
- *In welcher Reihenfolge werden mit Hilfe der Nipkow-Scheibe die Bildpunkte abgetastet? Wodurch ist die Zeilenzahl beim Abtastvorgang bestimmt? Konstruieren Sie selbständig eine Nipkow-Scheibe mit 6 Abtastöffnungen!*

Nach der in Bild 63/2 erläuterten Methode wurden 1928 erste Bildübertragungen erzielt. Die Zerlegung war mit 30 Zeilen noch



63/1 Spirallochscheibe nach Nipkow
Das abzutastende Bild liegt an der gekennzeichneten Stelle unter der rotierenden Scheibe. Damit jeweils nur eine Bohrung über die Bildfläche wandert, muß diese die Form eines Kreisringausschnitts erhalten

63/2 Bildabtastung mit Nipkow-Scheibe und Fotozelle.
Der Fotostrom ist durch die Helligkeit der durchstrahlten Stelle des Diapositivs bestimmt: Dieser Fotostrom dient als Bildsignal

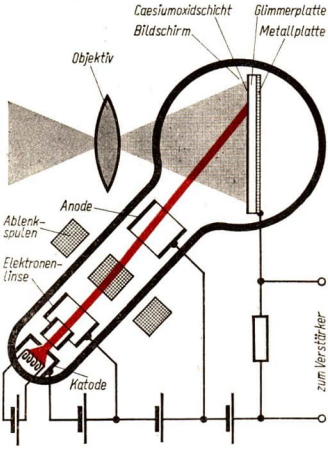


recht grob. In der Folgezeit konnte die Zeilenzahl zwar wesentlich gesteigert werden, doch gelangte man bald an die Grenze der technischen Möglichkeiten dieses mechanischen Verfahrens.
Als entscheidender Fortschritt erwies sich der Übergang zur *elektronischen Bildübertragung*. Diese wurde erstmalig 1930 von dem heutigen Nationalpreisträger Prof. Dr. h. c. MANFRED VON ARDENNE in Berlin vorgeführt.
Auf dieser Grundlage entstand die moderne Fernsehtechnik.

2.7.2. Die Fernsehsendung

Die Fernsehkamera

Die Fernsehkamera stimmt in ihrem optischen Teil weitgehend mit einer normalen Fotokamera überein. An die Stelle des Films tritt bei der Fernsehkamera die *Bildaufnahmeröhre*.



64/1 Aufbau eines Ikonoskops (schematisiert)

Das zu übertragende Objekt wird mit dem Objektiv der Fernsehkamera auf einen Bildschirm abgebildet, der sich im Inneren des hochevakuierten Röhrenkolbens befindet. Der Hals des Kolbens enthält die zum Erzeugen, Bündeln und Steuern des Elektronenstrahls erforderlichen Einrichtungen. Der Elektronenstrahl wird durch zwei Paare senkrecht aufeinander angeordneter Ablenkspulen mit Hilfe von *Kippschwingungen* nacheinander über alle Punkte der Schirmes geführt. Dieser Teil des Ikonoskops arbeitet ähnlich wie eine Braunsche Röhre.

Der Bildschirm besteht aus einer dünnen Glimmerplatte. Auf deren Vorderseite, die dem Objekt zugekehrt ist, befindet sich eine außerordentlich feine Schicht von *Caesiumoxid*. Diese wird aufgedampft und zerfällt durch starkes Erhitzen und nachfolgend rasches Abkühlen in ein Mosaik aus vielen Millionen Einzelkörnchen, die gegeneinander isoliert sind.

Die Rückseite der Glimmerplatte trägt eine zusammenhängende Metallschicht. Die Caesiumoxidkörnchen stellen kleine Fotozellen dar. Sie bilden mit der Metallplatte als zweite Elektrode und der Glimmerplatte als Dielektrikum winzig kleine Kondensatoren.

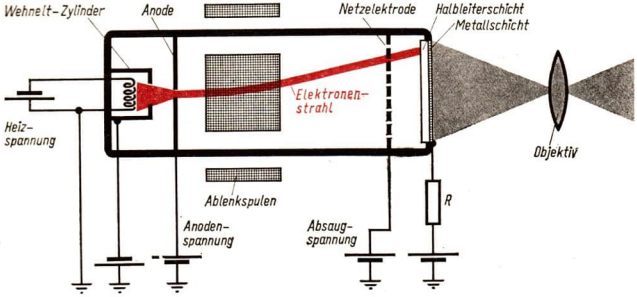
Die Lichtstrahlen lösen bei der Abbildung aus den kleinen Fotozellen infolge des lichtelektrischen Effekts Elektronen heraus, die von der Anode „abgesaugt" werden. Dadurch werden die Caesiumoxidkörnchen je nach der Helligkeit der Bildpunkte verschieden stark positiv aufgeladen. Auf der rückwärtigen Metallplatte entstehen durch Influenz gleichgroße negative Ladungen. Auf dem Bildschirm wird somit eine dem optischen Bild entsprechende Ladungsverteilung, ein *Ladungsbild*, erzeugt.

Der abtastende Elektronenstrahl wird zeilenweise über die positiv geladenen Caesiumoxidkörnchen des Schirmes geführt, wobei er die von ihnen und der Metallplatte gebildeten Kondensatoren entlädt. Die frei gewordenen negativen Ladungen auf der Rückseite des Schirmes fließen über einen Widerstand ab und erzeugen an diesem kurzzeitig einen Spannungsabfall, welcher der Helligkeit des Bildpunktes entspricht. Im Laufe der Abtastung entsteht auf diese Weise eine Folge von Impulsen, das *Bildsignal*. Dieser wird verstärkt und moduliert die Trägerschwingung des Fernsehsenders.

Die erste 1935 im praktischen Sendebetrieb eingesetzte Bildaufnahmeröhre, das **Ikonoskop** (Bild 64/1), geht auf ein Patent des russischen Ingenieurs VLADIMIR ZWORYKIN zurück, das dieser 1918 in den USA erhalten hatte. Das Ikonoskop ist zwar heute bereits durch verbesserte Aufnahmeröhren ersetzt worden, das Verfahren der elektronischen Bildabtastung ist aber unverändert geblieben.

Auch bei den Fernsehbild-Aufnahmeröhren werden seit einigen Jahren Halbleiter eingesetzt. Dabei wird der *innere Fotoeffekt* ausgenutzt: Durch Lichteinwirkung vergrößert sich die elektrische Leitfähigkeit eines Halbleiters. Aufnahmeröhren, die nach diesem Prinzip arbeiten, werden *Endicon* oder *Vidicon* genannt (Bilder 65/1 und 65/2).

Auf der Halbleiterschicht des Endicons wird das aufzunehmende Objekt abgebildet. Daraufhin wächst die Leitfähigkeit an jeder Stelle der Halbleiterschicht entsprechend der Helligkeit



65/1 Aufbau eines Endicons
Die Vorderwand des Rohres ist mit einer überaus dünnen, noch durchsichtigen Metallschicht bedampft. Darauf folgt die ebenfalls dünne Halbleiterschicht. Der Elektronenstrahl wird ebenso wie in einer Braunschen Röhre erzeugt und abgelenkt

65/2 Endicon vom VEB Werk für Fernsehelektronik



des Bildes. Auf der lichtabgewandten Seite wird über die Halbleiterschicht zeilenweise der Elektronenstrahl geführt. Ein Teil der auftreffenden Elektronen wird durch die positive Netzelektrode abgesaugt, der andere Teil fließt durch die Halbleiterschicht über den Widerstand R ab. Dieser zweite Anteil ist um so größer, je größer die Leitfähigkeit an der betreffenden Stelle der Schicht ist. Der vom Elektronenstrom hervorgerufene Spannungsabfall an R ist somit durch die Helligkeit des Bildpunktes bestimmt, der beim Abtasten getroffen wird. Der Spannungsabfall an R dient als Bildsignal.

Das Endicon arbeitet auch bei sehr ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen, läßt sich in sehr kleinen Ausführungen herstellen und ist robust. Für die Wiedergabe sehr rascher Bewegungsvorgänge ist diese Aufnahmeröhre aber nicht geeignet, da die Veränderungen der Leitfähigkeit nicht schnell genug ablaufen. Das Endicon wird daher vorwiegend in bestimmten Anwendungsbereichen des industriellen Fernsehens eingesetzt.

Die Fernsehnorm

In der Deutschen Demokratischen Republik und mehreren anderen Staaten Europas gelten für die Fernsehtechnik gleiche Normen. Hierdurch wird ein zwischenstaatlicher Programmaustausch erleichtert:

Das Bild wird in 625 waagerechte Zeilen zerlegt. Die Zahl der Bildwechsel beträgt 25 je Sekunde. Das Seitenverhältnis des Bildformats beträgt 3:4.

Ferner wird das Zeilensprungverfahren angewendet, um das Flimmern des Fernsehbildes zu beseitigen. Dabei werden zuerst die 1., 3., 5 . . . Zeile, danach die 2., 4., 6. . . . Zeile des Bildes abgetastet. Diese und einige weitere Einzelheiten werden im folgenden nicht berücksichtigt.

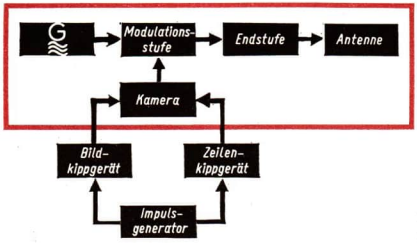
Die Bildpunkte einer Zeile gehen ineinander über. Sie sind als Quadrate mit der Zeilenbreite als Seitenlänge zu betrachten.

- *Wieviel Bildpunkte enthält eine Zeile? Aus wieviel Bildpunkten besteht das gesamte Bild?*
- *Bestätigen Sie, daß je Sekunde rund 13 Millionen Bildpunkte abgetastet werden müssen!*

Aus der Zahl der je Sekunde abgetasteten Bildpunkte kann auf die höchste Frequenz des Bildsignals geschlossen werden. Diese würde auftreten, wenn ein „Schachbrettmuster" von abwechselnd hellen und dunklen Bildpunkten zu übertragen wäre. Der vom Bildabtaster gelieferte Strom würde in diesem Falle mit einer Frequenz von 6,5 Millionen Hertz schwanken. Hieraus geht hervor, daß die Bildübertragung ein sehr breites Frequenzband beansprucht und ihre Trägerfrequenz im UKW-Bereich liegen muß.

Der Fernsehsender

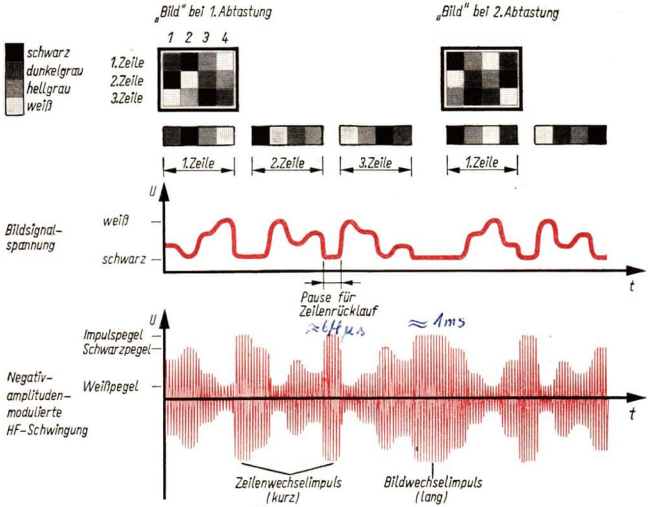
Der im Blockschaltbild des Fernsehsenders rot umrahmte Teil (Bild 66/1) unterscheidet sich nicht wesentlich vom Rundfunksender. An die Stelle des Mikrofons, das die tonfrequente Schwingung liefert, tritt die Fernsehkamera, die das Bildsignal abgibt.
Der *Impulsgenerator* arbeitet ähnlich wie beim Radargerät als Taktgeber. Er steuert die beiden Kippgeräte für die horizontale und vertikale Ablenkung des Elektronenstrahls.



66/1 Blockschaltbild eines Fernsehsenders

- *Wievielmal je Sekunde muß der Elektronenstrahl in horizontaler und vertikaler Richtung abgelenkt werden? Beachten Sie die Fernsehnorm!*

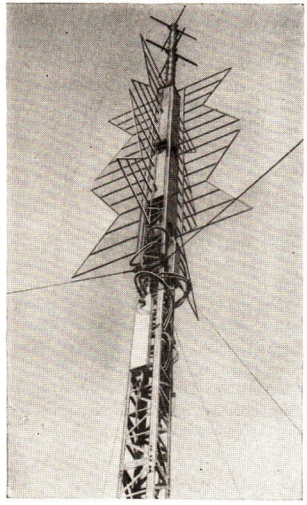
In der *Modulationsstufe* wird die Trägerschwingung mit dem Bildsignal moduliert. Man wendet die negative Amplitudenmodulation an. Dabei wird von der Spannungsamplitude der Trägerschwingung die Bildsignalspannung subtrahiert (Bild 67/1).



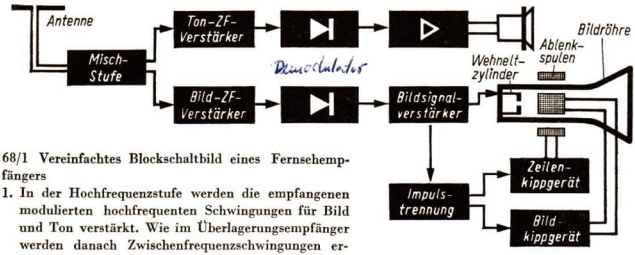
67/1 Die Modulation der Trägerschwingung beim Fernsehen

Außerdem werden der Trägerschwingung auch noch die vom Impulsgenerator abgegebenen Spannungsimpulse aufgeprägt. Diese werden übertragen, um die Kippgeräte des Fernsehempfängers im gleichen Takte wie in der Fernsehkamera zu steuern. Man nennt sie daher *Gleichlaufzeichen* oder *Synchronisierimpulse.*

Man unterscheidet Gleichlaufzeichen für den Zeilenwechsel und solche für den Bildwechsel. Der Begleitton für die Fernsehsendung wird durch einen UKW-Sender übermittelt. Bild- und Tonsender arbeiten in festgelegtem Frequenzabstand meist mit derselben Antenne (Bild 67/2).



67/2 Fernseh-Sendeantenne



68/1 Vereinfachtes Blockschaltbild eines Fernsehempfängers

1. In der Hochfrequenzstufe werden die empfangenen modulierten hochfrequenten Schwingungen für Bild und Ton verstärkt. Wie im Überlagerungsempfänger werden danach Zwischenfrequenzschwingungen erzeugt.
2. Der weitere Weg des Tonempfanges ist der gleiche wie im Rundfunkempfänger.
3. Auch die Zwischenfrequenzschwingung für den Bildempfang wird verstärkt und demoduliert.
4. Das Bildsignal wird an den Wehnelt-Zylinder der Braunschen Röhre geführt. Es steuert auf diese Weise die Intensität des Elektronenstrahls und somit die Helligkeit des jeweils erreichten Bildpunktes auf dem Bildschirm.
5. Durch eine „elektrische Weiche" werden die Synchronisierungsimpulse vom Bildsignal getrennt.
6. Die Synchronisierimpulse steuern nach weiterer Verstärkung die Kippgeräte für Zeilen- und Bildablenkung genau synchron mit den entsprechenden Vorgängen im Sender.
7. In der Bildröhre wird der Elektronenstrahl durch die magnetischen Felder der Ablenkspulen geführt

2.8. Der Fernsehempfang

Zur Bildwiedergabe im Fernsehempfang dient die *Bildröhre*, eine Braunsche Röhre, die bei großen Leuchtschirmabmessungen eine möglichst kleine Länge aufweisen soll. Die Bildröhre wird mit den von der Antenne aufgenommenen und im Empfangsteil weiterverarbeiteten Bildsignalen und Gleichlaufsignalen des Senders gesteuert.
Die wichtigsten Einzelvorgänge beim Fernsehempfang können an Hand von Bild 68/1 verfolgt werden.

2.9. Das industrielle Fernsehen

Unter der Bezeichnung *industrielles Fernsehen* werden die heute schon sehr zahlreichen Anwendungen der Fernsehübertragung in der Industrie, im Verkehrswesen und anderen Bereichen zusammengefaßt.
Beim industriellen Fernsehen wird nach den gleichen Prinzipien wie beim Fernsehfunk vorgegangen. In den meisten Fällen werden jedoch die Bildsignale über ein Kabel direkt zum Empfangsverstärker geleitet (Bild 69/1). Ein Begleitton wird nur ausnahmsweise übertragen.
Die Notiz aus der Berliner Zeitung (Bild 69/2) zeigt an einem Beispiel, wie das industrielle Fernsehen bereits wesentlich zur Steigerung der *Arbeitsproduktivität* beiträgt. In einer



69/1 Blockschaltbild einer industriellen Fernsehanlage

Hilfe durch Fernsehen

Rüdersdorf (ADN BZ). 18 industrielle Fernsehbeobachteranlagen zur Überwachung der Produktion wurden bisher in den Abteilungen des Baustoff-Zementwerkes Rüdersdorf in Betrieb genommen. Dadurch konnten 39 Arbeitskräfte eingespart und für andere wichtige Aufgaben eingesetzt werden.

69/2 Notiz aus der Berliner Zeitung vom 11. 3. 63



69/3 Fernsehkamera „telistor" für industrielle Fernsehanlagen und für Unterrichtszwecke

sowjetischen Glashütte wird der *vollautomatische Produktionsablauf* mit 25 Fernsehkameras überwacht. Die Fernsehanlagen können an Stellen eingesetzt werden, die für den Menschen unzugänglich sind, z. B. in Bohrlöchern für geologische Erkundungen, in chemischen Reaktionsräumen und in strahlungsgefährdeten Räumen (Bild 69/3).

Fragen, Aufgaben

1. Weshalb liegt die Trägerfrequenz für die Fernsehübertragung im UKW-Bereich?
2. Vergleichen Sie die Helligkeitswiedergabe beim Fernsehbild und beim Druckraster!
3. Weshalb werden mittels einer Lupe keine feineren Einzelheiten des Fernsehbildes sichtbar?
4. Warum muß beim Fernsehen ein bestimmter Betrachtungsabstand eingehalten werden?
5. Welche Übereinstimmungen bestehen zwischen Ikonoskop und Endicon?
6. Nennen Sie einige Vorzüge des industriellen Fernsehens!

Zusammenfassung

1. **Bei der Fernsehübertragung gewinnt man durch eine elektronische Bildabtastung das Bildsignal.**

   Erläutern Sie die Wirkungsweise des Ikonoskops!

2. **Das Bildsignal wird durch eine modulierte Ultrakurzwelle zum Empfänger geleitet und steuert dort den Bildaufbau in der Bildröhre.**

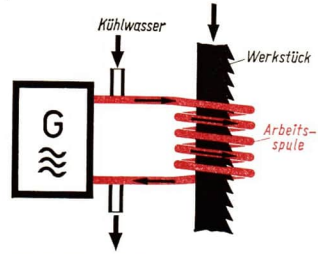
   Welches Modulationsverfahren wird bei der Bildübertragung benutzt?

3. **Durch Synchronisierimpulse wird für den Gleichlauf von Sender und Empfänger gesorgt.**

   Welche Aufgabe erfüllen die Synchronisierimpulse im Empfänger?

2.10. Anwendungen hochfrequenter elektromagnetischer Schwingungen

Die mit Hilfe von Röhrengeneratoren erzeugten hochfrequenten Wechselströme werden in vielen Zweigen der *Produktion* sowie auch in der *Medizin* angewendet. Außerdem werden solche Generatoren auch zur *Ultraschallerzeugung* eingesetzt. Für hohe Leistungen müssen die Generatoren mit Senderöhren ausgestattet werden. Im folgenden werden einige wichtige Verfahren der *Erwärmung* durch hochfrequente Wechselströme erläutert.



70/1 Induktive HF-Erwärmung

2.10.1. Die induktive HF-Erwärmung

Während beim Induktionsschmelzofen das Prinzip des Transformators angewendet wird, bringt man bei der *induktiven HF-Erwärmung* das metallische Werkstück in eine Spule, durch die ein hochfrequenter Wechselstrom fließt (Bild 70/1). Das magnetische Wechselfeld der Arbeitsspule induziert in diesem Werkstück kräftige Wirbelströme. Die Energie der Wirbelströme wird in Wärme umgewandelt. Um die auch in den Spulenwindungen entstehende Stromwärme abzuführen, wird die Arbeitsspule aus Kupferrohr hergestellt und von Kühlwasser durchströmt. Die induktive HF-Erwärmung bietet eine Reihe von Vorteilen:

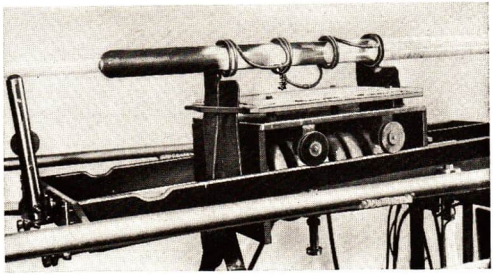
1. Das Werkstück kann in ein Vakuum oder ein inaktives Gas gebracht und darin behandelt werden, um auf diese Weise unerwünschte chemische Reaktionen zu verhindern.
2. Die Erwärmung kann auf ein bestimmtes Gebiet begrenzt werden. Das ist im wesentlichen der Innenraum der Arbeitsspule. Bei hohen Frequenzen macht sich außerdem der sogenannte *Hauteffekt* (Skineffekt) bemerkbar: Die hochfrequenten Wechselströme fließen nur in den Gebieten nahe der Oberfläche des Körpers. Die Oberflächenschicht wird deshalb auch am stärksten erwärmt.
3. Dauer und Zeitablauf der Wärmebehandlung sind leicht steuerbar.
4. Im Vergleich zu anderen Erwärmungsverfahren kann dem Werkstück in gleicher Zeit eine wesentlich größere Wärmemenge zugeführt werden.

Von den zahlreichen technischen Anwendungen der induktiven HF-Erwärmung seien hier zwei herausgegriffen.

Oberflächenhärten

Dabei befindet sich das Werkstück innerhalb der Arbeitsspule. Nachdem die gewünschte Temperatur in der Oberflächenschicht erreicht ist, wird eine Kühlflüssigkeit auf das Werkstück gespritzt. Man erhält auf diese Weise eine sehr gleichmäßige Härte. Das

71/1
Zonenschmelzverfahren



Verfahren kann automatisiert werden und eignet sich daher besonders für die Massenproduktion.
Die Oberflächenhärtung ist z. B. bei Zahnrädern, Schneidwerkzeugen, Eisenbahnschienen und Kurbelwellen anwendbar.

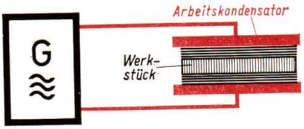
Zonenschmelzen

Es spielt eine wichtige Rolle beim Reinigen von *Germanium* für Halbleiterbauelemente (Bild 71/1).

Im Hochvakuum oder einem geeigneten Schutzgas befindet sich das Graphitschiffchen mit dem Germaniumbarren. Die Arbeitsspule wird langsam längs des Rohres bewegt, so daß die verflüssigte Zone nach und nach über den Barren wandert. Die Verunreinigungen bleiben zum größten Teil in der Schmelzzone und gelangen mit dieser an das Ende des Barrens.

2.10.2. Die kapazitive HF-Erwärmung

Mit Hilfe dieses Verfahrens können nur Isolierstoffe oder sehr schlechte Leiter behandelt werden.
Der zu erwärmende Körper wird zwischen die Platten eines Arbeitskondensators gebracht, an dem die hochfrequente Wechselspannung liegt (Bild 71/2).



71/2 Kapazitive HF-Erwärmung

Die kapazitive Erwärmung ist in folgender Weise zu erklären: Bei zahlreichen Stoffen sind die Moleküle konstante elektrische Dipole:
Die Schwerpunkte der positiven und der negativen Ladung fallen nicht zusammen. Diese Dipole richten sich im elektrischen Feld aus. Bei anderen Stoffen bilden sich diese Dipole erst unter Einwirkung des elektrischen Feldes.
Im elektrischen Wechselfeld werden die Dipole fortwährend umgepolt. Dadurch wird die ungeordnete Bewegung der Moleküle lebhafter — die Temperatur nimmt zu.

Die Vorteile der induktiven HF-Erwärmung treffen auch für das kapazitive Verfahren zu, jedoch wird bei letzterem das Werkstück gleichmäßig erwärmt.
Die kapazitive HF-Erwärmung hat beim *Pressen* von *Plasten* und besonders beim

Schweißen von *Plastfolien* große Bedeutung erlangt. Ein anderes wichtiges Anwendungsgebiet ist die *Holztrocknung*.
In der *Medizin* hat sich die kapazitive HF-Erwärmung beim Behandeln von *Gewebeerkrankungen* bewährt. Der Vorteil des HF-Verfahrens besteht darin, daß auch tiefergelegene Organe erwärmt werden können.

Fragen, Aufgaben

1. Weshalb können Isolierstoffe nicht induktiv erwärmt werden?
2. Wie ist zu erklären, daß bei kapazitiver HF-Erwärmung die in einer bestimmten Zeit erzielte Temperaturerhöhung mit der Frequenz zunimmt?
3. Welche Vorteile hat die kapazitive Erwärmung bei der Holztrocknung?

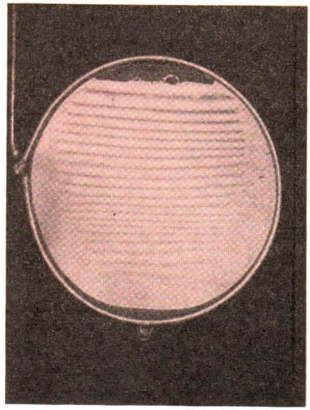
2.11. Stand und Perspektiven der Hochfrequenztechnik

Die Hochfrequenztechnik mit ihren Anwendungsgebieten ist ein hervorragendes Beispiel dafür, wie der Mensch es verstanden hat, die Naturgesetze zu erforschen, und wie er sie ausnutzt, sein Leben zu bereichern und zu verschönern.
An einigen Beispielen wird im folgenden gezeigt, welche Fortschritte erzielt wurden und welche Entwicklung zu erwarten ist:

1. Die *Halbleitertechnik* hat es ermöglicht, die Geräte der Hochfrequenztechnik wesentlich zu verkleinern, ihre Lebensdauer zu erhöhen und den Energiebedarf herabzusetzen. Die modernste Entwicklung auf diesem Gebiete ist die *Molekularelektronik*. An die Stelle der Halbleiterkristalle treten Aufdampfschichten bestimmter Zusammensetzung. In einem Baustein der Molekularelektronik ist jeweils ein ganzes Gerät, z. B. ein Verstärker bisheriger Bauweise enthalten.
2. Die technischen Probleme des *Farbfernsehens* sind bereits gelöst.
3. Durch *Nachrichtensatelliten*, z. B. *Telstar*, als Zwischenstationen können mit Hilfe von Ultrakurzwellen zuverlässige Nachrichtenverbindungen zwischen den Kontinenten hergestellt werden. Diese können für Fernseh- und Rundfunkübertragungen, aber auch für Telefongespräche genutzt werden. Diese Technik steht erst in den Anfängen und hat noch eine große Zukunft.
4. Im Bereich der *Astronautik* erwachsen der Hochfrequenztechnik ständig kompliziertere Aufgaben. Die Reichweite der Sender und die Empfindlichkeit der Empfänger, die ein Raumschiff mit der Erde verbinden, wird Schritt für Schritt erhöht, die Methoden der Fernsteuerung werden vervollkommnet.
5. Die *Mikrowellentechnik* eröffnet unter anderem Möglichkeiten, elektromagnetische Wellen in Rohrleitern zur verlustarmen Energieübertragung auszunutzen.

Besonders die **sowjetische Wissenschaft** hat auf all diesen Gebieten große Erfolge errungen. Darin kommt u. a. die große Perspektive der friedlichen Forschung in einer kommunistischen Gesellschaft zum Ausdruck.

3. Lichtwellen



Die schillernden Farben mancher Schmetterlinge und Käfer, die Farben auf Perlmutt und Seifenhäutchen, wie das nebenstehende Bild zeigt, und die Farben der Ölflecke auf regennasser Straße sind optische Erscheinungen, die ihre Erklärung in der Wellennatur des Lichts finden. Man nennt sie wellenoptische Erscheinungen zum Unterschied von den strahlenoptischen Erscheinungen, zu deren Erklärung man mit der Vorstellung von Lichtstrahlen auskommt.

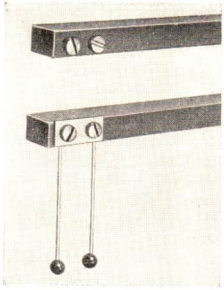
3.1. Interferenz durch Beugung

Das Wesen der Wellen als Schwingungen eines Systems gekoppelter schwingungsfähiger Teilchen wurde in der Klasse 10 behandelt. Im folgenden werden Sie noch einige andere Ausbreitungserscheinungen bei Wellen kennenlernen.
Bei der Ausbreitung von Wellen wirken häufig *mehrere* Wellen zusammen. Wir wollen die dabei auftretenden Erscheinungen Schritt für Schritt, beginnend mit dem Zusammenwirken zweier Wellen, an Wasserwellen untersuchen.

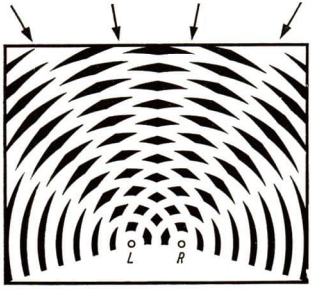
3.1.1. Interferenz zweier Wasserwellen

Versuch mit zwei gekoppelten Erregerzentren

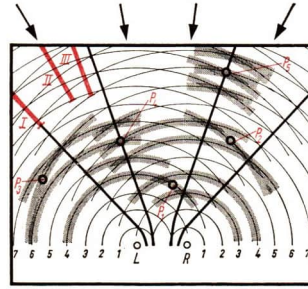
Eine Stimmgabel, die mit zwei Markierungsnadeln versehen ist, wird angeschlagen (Bild 73/2). Die beiden Markierungsnadeln sind zwei Erregungszentren, die im gleichen Rhythmus schwingen; man sagt, sie schwingen synchron. Taucht man die Kuppen der schwingenden Nadeln in eine Wasseroberfläche, dann entsteht eine Wellenerscheinung, wie sie beispielsweise Bild 77/1 zeigt.



73/2 Stimmgabel mit Markierungsnadeln



74/1 Wellenauslöschung (Pfeile) und Wellenverstärkung bei der Interferenz zweier kohärenter Wellen
(schwarz: Wellenberge, weiß: Wellentäler)



74/2 Verstärkung: $\Delta = n\,\lambda\ (P_4, P_5)$

Auslöschung: $\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2}\ (P_1, P_2, P_3)$

Hyperbeln: $\overline{LP} - \overline{RP} = \Delta$

Wir beschreiben zuerst die *Beobachtung*: Die ringförmigen Wellen sind von streifenförmigen Gebieten *ruhigen* Wassers durchsetzt oder, anders ausgedrückt: Die Wasseroberfläche zeigt Gebiete mit kräftiger Wellenbewegung und solche ohne Wellenbewegung.

Der Begriff der Interferenz

Um erklären zu können, wie dieses Wellenbild entsteht, bedienen wir uns eines sehr stark vereinfachten Bildes, das wesentliche Merkmale dieser Erscheinung enthält: Wir ersetzen die kreisförmigen Wellen, die sich um die beiden Erregerzentren L und R ausbilden, durch zwei geometrische Ringsysteme, in denen die *dunklen* Gebiete die *Wellentäler*, die *hellen* die *Wellenberge* bedeuten sollen (Bild 74/1 und 2). Betrachten wir in Bild 74/2 zunächst den Punkt P_1 in einem Gebiet der ruhigen Oberfläche: Dort fällt in diesem Moment der Wellenberg L_4 von links mit dem Wellental $R_{3/4}$ von rechts zusammen. Sie gleichen sich gewissermaßen aus und ergeben eine Stelle ruhigen Wassers.

- *Prüfen Sie diese Erscheinung an den Punkten P_2 und P_3 nach und überlegen Sie, ob sich analoge Feststellungen für alle Punkte der ruhigen Oberfläche treffen lassen?*

Einen solchen „Ausgleich" von Wellentälern und -bergen nennt man *Auslöschung der Wellenbewegung*.
Es gibt auch Gebiete mit kräftiger Wellenbewegung. Das ist offenbar an *den* Stellen der Fall, an denen von beiden Wellensystemen Berg auf Berg und Tal auf Tal fällt (P_4 und P_5). Fallen die Wellenberge eines Wellensystems auf die Berge eines zweiten, desgleichen die Täler, so ist die Folge davon eine *Verstärkung der Wellenbewegung*.

- *Beweisen Sie mit Hilfe der Hyperbeldefinition, daß die Gebiete der Wellenverstärkung und -auslöschung Hypereläste sind!*

Auslöschung und Verstärkung sind also eine Folge der gegenseitigen *Überlagerung* von Wellen. Die von L und R ausgehenden Wellen haben, da sie von synchron schwingenden Erregungszentren erzeugt werden, gleiche Wellenlängen.

Die Überlagerung von Wellen gleicher Wellenlänge nennt man Interferenz.

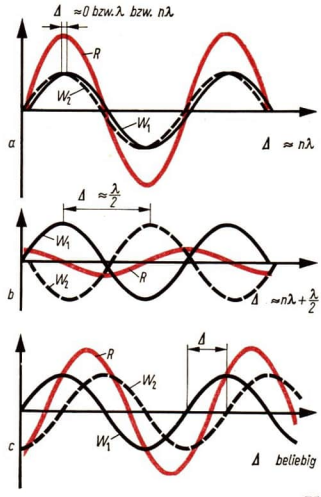
Grafische Darstellung der Interferenz

Die Interferenz zweier Wellen kann grafisch dargestellt werden: Wir legen einen Schnitt entlang der Linie I in Bild 74/2 und erhalten etwa das Bild 75/1.

- *Machen Sie sich auf die gleiche Weise den Zusammenhang zwischen Linie II in Bild 74/2 und Bild 75/1 b klar sowie zwischen Linie III und Bild 75/1 c!*
- *Welcher besondere Fall der Interferenz liegt bei den stehenden Wellen vor? (Vergleichen Sie die Ausbreitungsrichtung der interferierenden Wellen!)*

Die Energie bei Wellenüberlagerungen

Zum Verständnis der energetischen Verhältnisse betrachten wir nochmals das Interferenzbild (Bild 74/2): Entlang der Hyperbeln mit kräftiger Wellenbewegung, d. h. entlang der Verstärkungsgebiete, erfolgt ein Energietransport (vgl. Seite 29) von den Wellenzentren aus. Entlang der Hyperbeln ruhigen Wassers dagegen, d. h. entlang der Auslöschungsgebiete, erfolgt kein Energietransport; diese Gebiete wirken vielmehr wie Reflexionswände, die die Verstärkungsgebiete beiderseits begrenzen.



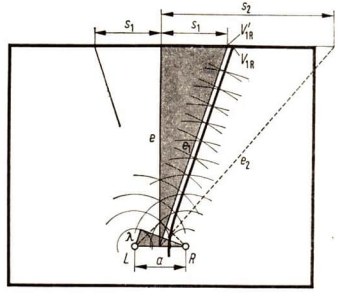
75/1 Interferenz zweier Sinuswellen:
a) $\Delta = 0$ bzw. λ, b) $\Delta = \frac{\lambda}{2}$ bzw. $\frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda$ usw.
c) Δ beliebig.

Im Falle der Verstärkung fallen die Wellenberge beider Wellen zusammen, d. h. beide Wellen haben einen Gangunterschied Δ von null oder λ oder 2λ usw.
Im Falle der Auslöschung haben sie einen Gangunterschied Δ von $\frac{\lambda}{2}$ oder $\frac{3}{2}\lambda$ usw. (Bild b). In jedem Falle ist die Amplitude der resultierenden Welle R von dem Gangunterschied Δ der beiden Wellen W_1 und W_2 abhängig (Bild c).
Wir beschränken uns hier und im folgenden auf die Interferenz von Wellen gleicher *Amplitude*

Mathematische Beziehungen

Wir können aus der Lage der Interferenzhyperbeln die Wellenlänge berechnen: In Bild 76/1 ist das erste, rechtsliegende Verstärkungsgebiet nochmals gezeichnet. Der Hyperbelast trifft die Wand, die wir im Abstand e von den Wellenzentren L/R anbringen, im Punkte V_{1R}. Es ist aber bequemer, den Hyperbelast durch die Asymptote zu ersetzen. Diese trifft die Wand in V'_{1R}; der Unterschied zu V_{1R} ist geringfügig.

- *Wovon ist die Differenz $(V'_{1R} - V_{1R})$ abhängig?*
- *Geben Sie die Bedeutung der eingezeichneten Größen a, e, e_1 und s_1 an!*
- *Inwiefern sind die schraffierten Dreiecke ähnlich?*



76/1 Zur Herleitung der Gleichung (2)

Wir können folgende Proportion aufstellen:

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{s_1}{e_1}.$$

$\left(\text{In der Regel ist } s_1 \ll e_1, \text{ so daß } e_1 \approx e \text{ und } \frac{\lambda}{a} \approx \frac{s_1}{e}.\right)$

Diese Gleichung dient vornehmlich zur Berechnung von λ, denn a, s_1 und e lassen sich ausmessen. Manchmal wird auch a mit Hilfe dieser Gleichung ermittelt, wenn die anderen Größen bekannt sind.

Wir haben hier nur die erste Interferenzhyperbel von der Mitte aus gerechnet betrachtet. Für das zweite Verstärkungsgebiet V_{2R} (punktierte Linien) ergibt sich ganz analog:

$$\frac{2\lambda}{a} = \frac{s_2}{e_2};$$

und, da $e_2 \approx e$

ist: $$\frac{2\lambda}{a} = \frac{s_2}{e}.$$

Allgemein gilt für die **Wellenverstärkung**:

$$\boxed{\frac{n\lambda}{a} \approx \frac{s_n}{e}} \qquad (2)$$

Ganz ähnliche Betrachtungen führen zu einer Gleichung für die Wellenauslöschungsgebiete. Wir werden jedoch mit Gleichung (2) auskommen, wenn wir unsere Überlegungen und Messungen stets auf die Verstärkungsgebiete beziehen.

Beispiel:

Die Gleichung (2) wird im wesentlichen auf optische Erscheinungen angewendet. Zur Übung soll sie auf einen Versuch mit Wasserwellen angewandt werden. Mit einer Stimmgabel nach Bild 73/2 wird eine Wellenerscheinung erzeugt, wie sie Bild 77/1 zeigt.
Die Wellen laufen so schnell, daß ihre Wellenlänge nicht gemessen werden kann. Sie soll aus den Größen berechnet werden, die dem Bild entnommen werden:

Gegeben:

$s_1 = 24$ mm

$a = 53$ mm

$e = 118$ mm

Lösung:

$$\lambda = \frac{a \cdot s_1}{e}$$

$$\lambda = \frac{53 \text{ mm} \cdot 24 \text{ mm}}{118 \text{ mm}}$$

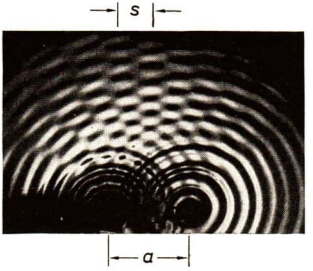
$$\lambda \approx 11 \text{ mm}$$

Gesucht:

Wellenlänge λ

Die Wellenlänge λ beträgt rund 11 mm.

● *Prüfen Sie das Ergebnis durch eine zweite Rechnung nach, indem Sie s_2 durch Ausmessen und Halbieren der Strecke $\overline{V_{2L} V_{2R}}$ ermitteln!*



77/1
Aufnahme eines Wasserwellen-Interferenzbildes

3.1.2. Interferenzen am Doppelspalt

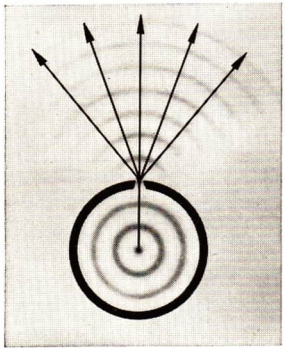
Statt die beiden im vorigen Abschnitt betrachteten Wellen durch den Stimmgabel-Doppeltupfer zu erregen, kann man auch aus einer *einzigen* ankommenden Wellenfront durch zwei nahe benachbarte Spaltöffnungen zwei Teilwellen ausblenden. In den Spaltöffnungen selbst kommt das aus der Klasse 10 bekannte Huygenssche Prinzip zur Geltung, so daß diese die beiden Stimmgabeltupfer voll vertreten.

● *Erklären Sie die Beugung mit Hilfe des Huygensschen Prinzips!*

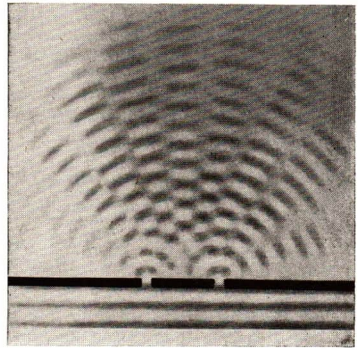
Die Öffnung im Hindernis, der *Spalt*, erzeugt also infolge der Beugung ein ähnliches Wellenbild, wie es von einem schwingenden Körper im Zentrum L oder R bei unseren vorhergehenden Versuchen hervorgerufen wird (Bild 78/1). Setzen wir nun zwei solcher Spalte zu einem *Doppelspalt* zusammen (Bild 78/2), so erhalten wir fast völlig das gleiche Interferenzbild wie in Bild 74/1.

Beugung des Lichts am Doppelspalt

Unsere bisherigen Versuche zeigten Wellenerscheinungen des Wassers. Gelingt es, gleichartige Erscheinungen bei Versuchen mit *Licht* zu zeigen, dann können wir annehmen, daß Licht *Wellencharakter* besitzt.
Eine erste optische *Interferenzerscheinung* erzeugen wir mit einer Versuchsanordnung, die im Prinzip der Anordnung in Bild 77/1 entspricht. Da die Wasserwelle eine Ober-



78/1 Beugung einer Wasserwelle am Spalt

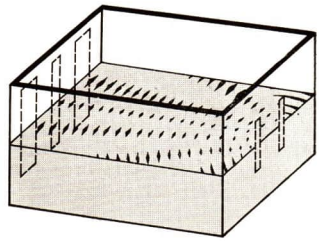


78/2 Interferenz von Wasserwellen am Doppelspalt

flächenwelle ist, d. h. eine flächenhafte Ausdehnung hat, die Lichtwelle dagegen sich im Raum ausbreitet, können wir die Öffnungen durch einen langgestreckten Spalt (Bild 78/3, gestrichelt) ersetzen.
Dadurch werden die Verstärkungsgebiete größer, d. h., die Lichterscheinungen werden heller, denn:

Verstärkung der Wellen bedeutet beim Licht Helligkeit; Auslöschung bedeutet Dunkelheit.

Das Licht erzeugt man durch einen Glühdraht oder durch einen „Leuchtspalt", d. h. im letzteren Fall durch einen mittels Bogenlicht und Kondensor beleuchteten schmalen Spalt (Bild 79/1). Glühdraht bzw. Spalt müssen zum Doppelspalt parallel stehen. In der vorliegenden Versuchsanordnung mögen die beiden Streifen 1. Ordnung einen Abstand von $2\,s_1 = 6$ mm haben.



78/3 Vergleich zwischen der Interferenz von Oberflächenwellen und von Lichtwellen (schematisch)

Beispiel

Wir berechnen nach Gleichung (2) überschlagsmäßig die Wellenlänge des Lichts für die im obigen Versuch angegebenen Zahlenwerte:

Gegeben:	*Lösung:*
$a = 0{,}5$ mm	$\lambda \approx \frac{a \cdot s_1}{e}$
$e = 3000$ mm	$\lambda \approx \frac{0{,}5 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}}{3000 \text{ mm}}$
$s_1 = \text{Abstand} \frac{\overline{V_{1L} V_{1R}}}{2} = 3$ mm	$\lambda \approx 0{,}0005$ mm

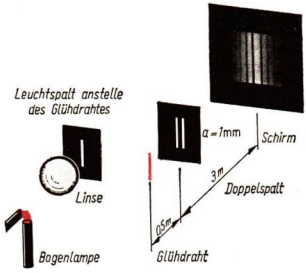
Gesucht:

Wellenlänge λ

$\lambda \approx 0{,}5\ \mu\text{m}$.

Die Wellenlänge des für diesen Versuch benutzten Lichts beträgt $\approx 0{,}5\ \mu$m.

Die Beugungserscheinungen am Doppelspalt sind im allgemeinen recht lichtschwach und daher nicht gut geeignet für die Berechnung der Wellenlängen von Licht. Ein genaueres Verfahren zur Bestimmung von Lichtwellenlängen lernen Sie auf Seite 82 kennen.

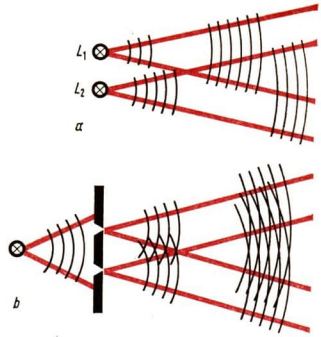


79/1 *Versuchsanordnung für die Interferenz mit Licht am Doppelspalt*
Der Doppelspalt besteht aus zwei 0,1 mm breiten Schlitzen von beispielsweise 0,5 mm Abstand, die in eine undurchsichtige Platte eingeschnitten sind. Auf dem Bildschirm sind die Lichtstreifen zu beiden Seiten der hellen Mitte die Verstärkungsgebiete V_1, V_2 usw. Man spricht von Streifen 1. Ordnung, 2. Ordnung usw. Die Streifen verlieren mit zunehmender Ordnung an Helligkeit

Kohärenz der Lichtwellen

Beim vorherigen Versuch wurde nur eine Lichtquelle benutzt.
Würde man den Versuch mit zwei Lichtquellen, z. B. zwei Glühdrähten, durchführen wollen (analog Bild 77/1), dann würden nicht die geringsten Interferenzerscheinungen wahrnehmbar sein. Die Erklärung liegt in der Eigenart der Lichtaussendung: Das Licht besteht aus einer unvorstellbar großen Zahl von *Wellenzügen*, die in rascher, unregelmäßiger Folge von den einzelnen Atomen der Lichtquelle, beispielsweise den Atomen eines glühenden Drahtes, ausgesandt werden. Diese Wellen sind nicht unendlich ausgedehnt, sondern sie haben in der Ausbreitungsrichtung einen Anfang und ein Ende.
Man nennt solche Wellen *Wellenzüge*; sie können an Wasserwellen folgendermaßen veranschaulicht werden: Man betätigt einen Wellenerreger nur kurz in Abständen. Dabei breiten sich Kreissysteme aus, die durch Gebiete ruhigen Wassers getrennt sind.
Wir gehen nun von dieser Vorstellung aus und untersuchen die Möglichkeiten für das Zustandekommen von Interferenzerscheinungen bei zwei nebeneinanderliegenden parallelen Drähten L_1 und L_2 (Bild 80/1).

Die von den beiden Drähten L_1 und L_2 in unregelmäßigen Zeitintervallen ausgehenden Wellenzüge interferieren zum Teil gar nicht, zum Teil interferieren sie zwar, bewirken jedoch infolge des willkürlichen und zufälligen Gangunterschiedes zweier solcher Wellenzüge einen raschen Wechsel in der Lage der hellen und dunklen Interferenzstreifen auf dem Bildschirm. Dadurch erscheint der Schirm gleichmäßig beleuchtet. Eine Interferenzerscheinung ist nicht wahrzunehmen. Anders ist es, wenn man nur eine Licht quelle verwendet und sie durch einen Doppelspalt gleichsam verdoppelt (Bild 80/1 b). Die beiden scheinbaren Lichtquellen senden im Gegensatz zu den beiden vorher benutzten wirklichen Lichtquellen ihre Wellenzüge stets gleichzeitig aus. Licht, das diese Bedingung erfüllt, nennt man **kohärentes Licht.** Im anderen Falle heißt das Licht *inkohärent.* Der oben angegebene Versuch hat erwiesen, daß Interferenzerscheinungen nur dann auftreten können, wenn man kohärentes Licht verwendet.



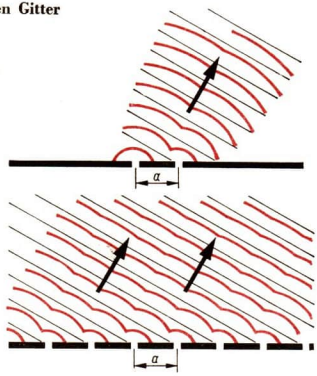
80/1 Kohärenz als Vorbedingung für das Zustandekommen einer Interferenz
a) Inkohärentes Licht — keine Interferenz,
b) kohärentes Licht — Interferenz

Lichtwellenzüge sind kohärent, wenn sie (unter bestimmtem Winkel) der gleichen Lichtquelle entstammen.
Nur kohärente Wellenzüge können Interferenzerscheinungen hervorbringen.

3.1.3. Beugung und Interferenz am optischen Gitter

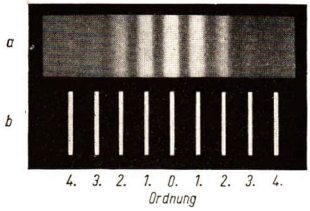
Doppelspalt und Gitter

Besonders helle und klare Interferenzerscheinungen erhält man, wenn man an Stelle eines Doppelspalts mit dem Abstand a *mehrere* Doppelspalte in gleichen Abständen voneinander anordnet (Bild 80/2). Eine solche Anordnung nennt man ein *optisches Gitter.*



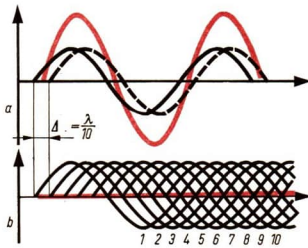
80/2 Interferenz am Doppelspalt und am Gitter
Die Richtungen, in denen das Licht verstärkt wird (Pfeile), sind beim Doppelspalt und beim Gitter die gleichen, sofern die Spaltabstände a gleich sind. Die Verstärkungsgebiete berechnen sich beim Gitter folglich ebenfalls nach Gleichung (2)

In den *Auslöschungsgebieten* ist beim Doppelspalt das Licht völlig anders verteilt als beim Gitter: Betrachten Sie dazu Bild 81/1 a und b!



81/1 a und b Interferenzbilder beim Doppelspalt und beim Gitter
a) Beim Doppelspalt gehen die hellen Gebiete allmählich in die dunklen Gebiete über
b) Beim Gitter entstehen schmale, scharfe und helle Streifen; dazwischen liegen breite Auslöschungsgebiete

Diese unterschiedliche Lichtverteilung wird folgendermaßen erklärt:
Inmitten der Verstärkungsgebiete besteht zwischen Doppelspalt und Gitter kein Unterschied: In beiden Fällen haben die interferierenden Wellenzüge einen Gangunterschied von genau $n \cdot \lambda$. Ein kleines Stück neben dieser Mitte aber besteht zwischen Doppelspalt und Gitter bereits ein großer Unterschied.
Beim Doppelspalt ergeben die zwei interferierenden Wellen an dieser Stelle noch eine gewisse Verstärkung, während die vielen sich überlagernden Wellen beim Gitter sich fast völlig auslöschen (Bild 81/2 a und b).
Nach dem Energieerhaltungssatz können wir aus dieser Tatsache schließen, daß die gesamte durch das Gitter hindurchgetretene Lichtenergie in den schmalen hellen Streifen zu finden ist.



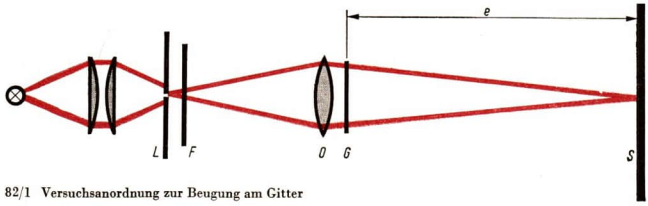
81/2 a und b Interferenz von Wellen mit geringem Gangunterschied
a) Zwei Wellen am Doppelspalt
b) Viele Wellen am Gitter

Eine Versuchsanordnung zur Beugung am Gitter

Um möglichst helle und scharfe Streifen zu erhalten, ändert man gewöhnlich die Anordnung von Bild 79/1 etwas ab, indem man noch eine Sammellinse oder ein Objektiv *O* (Bild 82/1) in den Strahlengang einschaltet.

Versuch zur Beugung am Gitter

Dieser Versuch soll zunächst mit einfarbigem Licht durchgeführt werden. Dazu wird ein Rotfilter *F* vor den Leuchtspalt *L* gesetzt. Als nächstes bilden wir den Leuchtspalt mittels des Objektivs *O* auf dem Schirm *S* scharf ab. Dabei entsteht auf dem Schirm ein schmaler roter Streifen. Bringt man nun das Gitter *G* in der Nähe der Linse in den Strahlengang, dann erscheinen auf dem Schirm beiderseits des roten Streifens in gleichen Abständen schmale Interferenzstreifen (vgl. Bild 81/1 b), die wegen des benutzten Rotfilters ebenfalls rot gefärbt sind.
In diesem Zusammenhang einiges zur Herstellung von optischen Gittern. Gitter, die in physikalisch-technischen Laboratorien verwendet werden, bestehen aus Glasplatten, in die



82/1 Versuchsanordnung zur Beugung am Gitter

parallele gerade Linien geritzt sind. Die nicht geritzten Streifen bleiben durchsichtig. Je mehr Spalte das Gitter enthält, um so schärfer sind die Streifen begrenzt. Man hat bisher eine Feinheit von 2000 Linien je Millimeter erreicht. Für geringe Ansprüche genügen fotografisch hergestellte Gitter, die Sie sich leicht selbst herstellen können, indem Sie ein schwarzweißes Streifenmuster fotografieren. Das Negativ kann direkt als Gitter verwendet werden. Auch Vogelfedern und dünne feine Gewebe wirken wie Gitter.

Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts

Wir wollen mit Hilfe des obengenannten Versuchs die Wellenlänge des benutzten Rotfilterlichts berechnen.

Beispiel

Die Abstände a der Spalte im Gitter, die **Gitterkonstante** a, ist für ein Gitter gewöhnlich bekannt; in unserem Falle beträgt $a = 0{,}04$ mm, d. h., auf 1 Millimeter kommen 25 Linien. Den Abstand e messen wir mit 2,50 m aus, den Abstand der beiden Streifen 2. Ordnung mit $2\,s_2 = 17$ cm. Mit diesen Werten errechnet sich die Wellenlänge des Rotfilterlichts mit Hilfe der Gleichung (2).

Gegeben: Gitterkonstante $a = 0{,}04$ mm

Abstand $e = 2{,}50$ m

Streifenabstand $s_2 = 8{,}5$ cm

Gesucht: Wellenlänge λ des roten Lichts

Lösung: $\lambda \approx \frac{a \cdot s_2}{2\,e}$

$\lambda \approx \frac{0{,}04 \text{ mm} \cdot 85 \text{ mm}}{2 \cdot 2500 \text{ mm}}$

$\lambda \approx 0{,}00068$ mm

$\lambda \approx 680$ nm.

Die Wellenlänge des verwendeten roten Lichts beträgt 680 nm.

Auf diese Weise können wir die Wellenlängen aller Lichtfarben bestimmen. Wir benutzen dazu *Interferenzfilter*, die Sie auf Seite 97 kennenlernen werden und die es für jede beliebige Wellenlänge bzw. Lichtfarbe gibt.

Tabelle 2: Spektralfarben und ihre mittlere Wellenlänge

Spektralfarbe	Rot	Orange	Gelb	Gelbgrün	Blaugrün	Blau	Blauviolett
Wellenlänge (in nm)	640	600	580	550	500	460	410

Spektren[1]

Durch Zwischenschalten von Interferenzfiltern können wir *einfarbiges* Licht erzeugen. Wir erhalten schmale Beugungsstreifen, die uns die Wellenlänge der jeweiligen Farbe zu berechnen gestatten. Bei sonst gleichen Versuchsbedingungen unterscheiden sich die Beugungsstreifen für die einzelnen Farben dadurch, daß ihr Abstand vom Mittelstreifen verschieden groß ist, und zwar sind die Abstände s_R für rotes Licht größer als die Abstände s_V für violettes, Tafel I.

Benutzt man *weißes* Licht (z. B. einer Glühlampe oder einer Bogenlampe), so entsteht zwischen dem roten und dem violetten Beugungsstreifen ein **Spektrum**, denn die Wellenlängen aller Farben, die das weiße Licht enthält, liegen zwischen diesen beiden Grenzen. Der Begriff des Spektrums ist Ihnen aus der Klasse 10 bekannt. Wir wollen im folgenden eine systematische Übersicht über die wichtigsten Arten der Spektren geben.

Tabelle 3: Einteilung der Spektren

Nach der Art der Zerlegung

Beugungsspektrum	entsteht durch Beugung an einem Gitter.
Dispersionsspektrum	entsteht durch Farbzerstreuung (Dispersion) in einem Prisma.

Unterscheidungsmerkmale von Beugungs- und Dispersionsspektrum

Beugungsspektrum	tritt paarweise in mehreren Ordnungen auf; rotes Licht ist am weitesten vom geraden Lichtweg weggebeugt; die Wellenlängen sind fast linear über das Spektrum verteilt; man spricht von einem **Normalspektrum.**
Dispersionsspektrum	tritt nur einfach auf; rotes Licht wird am wenigsten gebrochen; die Verteilung der Wellenlängen ist nicht linear; sie ist von der Glassorte des Prismas abhängig.

Nach dem Aggregatzustand des lichtaussendenden Stoffes

Kontinuierliches Spektrum	wird durch glühende feste oder flüssige Körper hervorgerufen.
Linienspektrum	wird durch glühende oder ionisierte Dämpfe und Gase hervorgerufen.

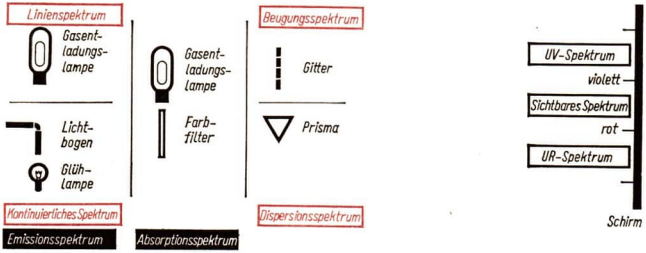
Nach der Art des Mediums zwischen Lichtquelle und Schirm

Emissionsspektrum	Es ergibt sich ein Emissionsspektrum, wenn kein das Licht absorbierender Stoff zwischen Lichtquelle und Schirm liegt.

[1] Farbfotos der Spektren enthalten die Tafeln I bis III am Ende des Buches.

Absorptionsspektrum

Liegt zwischen Lichtquelle und Schirm ein Stoff, der einen Teil des Lichts absorbiert, dann erhält man ein Absorptionsspektrum. Geht weißes Licht vor der Zerlegung durch ein leuchtendes Gas, so fehlen im Spektrum diejenigen Linien, die das Gas selbst aussendet.



84/1 Schematische Übersicht über die Entstehung der Spektren

Die verschiedenen Arten der Spektren sind in Bild 84/1 zusammengestellt.
Das Sonnenspektrum scheint bei flüchtiger Betrachtung ein kontinuierliches Spektrum zu sein.
Bei aufmerksamer Betrachtung erkennt man jedoch eine ganze Anzahl dunkler Linien, die FRAUNHOFERschen Linien.
FRAUNHOFER erkannte 1814 die Bedeutung dieser Linien: Das Sonnenlicht durchdringt auf seinem Wege zu uns Gasschichten in der Sonnenkorona und in der Erdatmosphäre, die einen Teil des Lichts absorbieren.

Monochromatisches Licht

Aus den Tafeln I bis III kann gefolgert werden, daß heiße oder ionisierte Gase Spektren liefern, die für das entsprechende Gas charakteristisch sind. Gase senden also Lichtwellen bestimmter Wellenlänge aus.
Sondert man die Linien aus dem Spektrum aus, dann erhält man „einfarbiges Licht", *monochromatisches Licht.*
Die Wellenlängen des von Gasen ausgesandten Lichts sind sehr konstant und mit Hilfe der Spektrallinien sehr genau meßbar. Aus diesem Grunde hat man eine Lichtwellenlänge als **Normale** für das *Meter* festgelegt, falls das *Urmeter* sich verändert.

1 Meter hat die Länge von 1 650 763, 73 Wellenlängen der gelbgrünen Linie des Krypton-Isotops Kr 86.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Stellen Sie anlog zur Gleichung (2) eine Gleichung auf für die *Wellenauslöschungsgebiete*! Beachten Sie, daß für diese Gebiete die Wellenberge des *einen* Systems auf die Wellentäler des *anderen* fallen. Wie groß ist dann stets der Gangunterschied beider Wellen?

2. Versehen Sie eine Stimmgabel etwa nach Bild 73/2 mit zwei Markierungsnadeln und halten Sie sie in eine kleine wassergefüllte Schale oder Dose. Messen Sie mit einem Stechzirkel a, s sowie e bzw. e_n und berechnen Sie daraus die Wellenlänge der erzeugten Wasserwellen (Kräuselwellen).
   Da Sie durch die Stimmgabel auch die Frequenz der Wellen kennen, berechnen Sie nach der Gleichung $c = f \cdot \lambda$ auch die Laufgeschwindigkeit c der Wellen.

3. Welche Parallelen und welche Unterschiede bestehen zwischen der Beugung von Wasserwellen und von Lichtwellen am Doppelspalt?

4. Warum sind die Beugungsstreifen bei Verwendung monochromatischen Lichts hinter einem *Gitter* schmal und scharf, beim *Doppelspalt* jedoch breit und unscharf?

5. Welche Wellenlängen kommen den Spektralfarben zu?

6. Welche Einteilung trifft man bei den Spektren?

7. Eine optisches Gitter hat eine Gitterkonstante von 0,015 mm. Bei einem Beugungsversuch sind auf dem 2,5 m entfernten Auffangschirm die beiden Beugungsstreifen 1. Ordnung 20 cm voneinander entfernt. Wie groß ist die Wellenlänge des verwendeten Lichts?

8. Bei einem Beugungsversuch mit einen optischen Gitter wurden die folgenden Werte festgestellt: Das verwendete Natriumlicht hat eine Wellenlänge von 590 nm. Der Auffangschirm ist 2 m vom Gitter entfernt. Der Abstand der beiden Beugungsstreifen 1. Ordnung voneinander beträgt 18 cm.
   Wie groß ist die Gitterkonstante?

9. Stechen Sie mit einer glühenden Nadelspitze ein Loch in ein Stück schwarzes Papier! Halten Sie das Papier vor eine Glühlampe. Betrachten Sie das Loch durch eine Vogelfeder, durch feines Gewebe (Gaze), durch ein feines Küchensieb!
   Was beobachten Sie, und wie ist die Erscheinung zu erklären?

10. Bauen Sie sich selbst eine einfache Versuchsanordnung zur Beugung am Gitter nach Bild 82/1 auf: Als Lampe genügt eine Glühlampe, der Kondensor kann entfallen. Der Leuchtspalt besteht aus zwei Rasierklingen, die auf eine Glasscheibe geklebt werden. Die Linse kann ein Fotoobjektiv, ein Leseglas oder eine andere einfache Sammellinse sein. Als Gitter soll das fotografische Negativ eines Streifenmusters dienen. Aus der Verkleinerung kann man die Gitterkonstante ermitteln. Bestimmen Sie in Versuchen entweder Lichtwellenlängen oder Gitterkonstanten!
    Im einfachsten Fall benutzt man einen Kleinbildprojektor. Der Leuchtspalt tritt an die Stelle des Diapositivs und wird auf einem Schirm abgebildet. Das Gitter wird unmittelbar vor das Objektiv gesetzt.

Zusammenfassung

1. Interferenz ist eine Überlagerung von Wellen gleicher Wellenlänge.

Wie hängt das Ergebnis der Interferenz mit dem Gangunterschied der Wellen zusammen?

2. Die gesamte Energie einer Welle wird in den Verstärkungsgebieten transportiert.

Was geschieht in den Auslöschungsgebieten mit der Energie?

3. Für die hellen Streifen in optischen Interferenzerscheinungen gilt

$$\frac{n\lambda}{a} \approx \frac{s_n}{e}.$$

Welche Bedeutung haben die Größen beim Gitter, welche beim Doppelspalt?

4. Nur kohärentes Licht ist interferenzfähig.

Was versteht man unter Kohärenz?

5. Monochromatisches Licht ist Licht von bestimmter Wellenlänge.

Was versteht man unter einem Wellenlängenormal des Meters?

6. Ein optisches Gitter entwirft von monochromatischem Licht schmale Linien, von weißem Licht Beugungsspektren.

Welchen Unterschied zeigen demgegenüber die Beugungsbilder bei monochromatischem Licht hinter einem Doppelspalt?

7. Man unterscheidet Beugungs- und Dispersionsspektren, Emissions- und Absorptionsspektren.

Nach welchen Gesichtspunkten werden diese unterschieden? Nennen Sie weitere Spektrenarten und ihre Unterscheidungsmerkmale!

3.2. Interferenz durch Brechung oder Reflexion

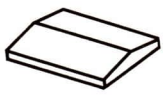
3.2.1. Das Fresnelsche Biprisma

Die bisher beschriebenen Interferenzerscheinungen *gebeugten Lichts* sind eine starke Stütze der Vorstellung von der **Wellennatur** des Lichts. Es konnte aber mit ihnen nicht der Einwand entkräftet werden, das Licht erhalte erst beim Beugungsvorgang Welleneigenschaften. Dies widerlegte jedoch FRESNEL (1785 bis 1827) im Jahre 1822, indem er nachwies, daß Lichtinterferenzen auch ohne Beteiligung der Beugung auftreten. Beugungserscheinungen sind allerdings fast immer als Nebenerscheinungen zu beobachten, denn stets weisen die Versuchsanordnungen Blenden und andere Lichtbündelbegrenzungen auf.

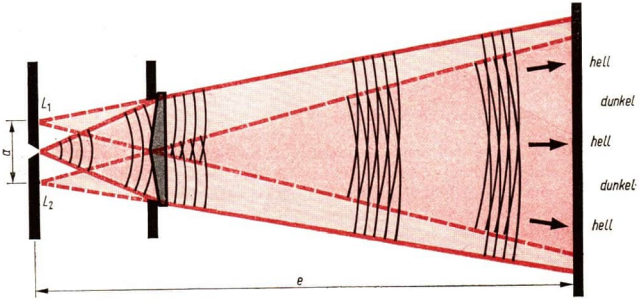
FRESNEL erzeugte die beiden zur Interferenz notwendigen kohärenten Lichtbündel mit Hilfe eines sehr flachen Doppelprismas (Bild 86/1), das als *Fresnelsches Biprisma* bezeichnet wird. Die Versuchsanordnung ist schematisch in Bild 87/1 wiedergegeben.

● *Inwiefern sind die Lichtbündel hinter dem Biprisma kohärent?*

Die Ähnlichkeit mit der *Interferenz am Doppelspalt* (vgl. Bild 79/1) ist unverkennbar. Wir können deshalb auch die dort entwickelte Gleichung (2) übernehmen.

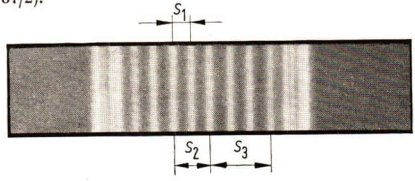


86/1 Fresnelsches Biprisma



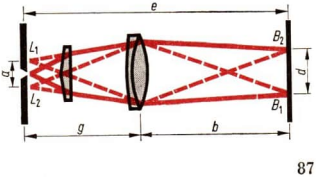
87/1 Versuchsanordnung mit dem Fresnelschen Biprisma
Das Biprisma teilt die aus einem Leuchtspalt austretenden Wellenzüge in zwei leicht gegeneinander geneigte Lichtbündel. Man kann erkennen, daß durch die Brechung im Biprisma zwei kohärente Lichtbündel entstehen, die von den beiden Punkten L_1 und L_2 herzukommen scheinen.

Die darin vorkommenden Größen haben folgende Bedeutung:
Die Größe e ist der Abstand vom Leuchtspalt zum Schirm. Die Größe s entnehmen wir dem Interferenzbild (Bild 87/2).



87/2 Interferenzbild hinter dem Fresnelschen Biprisma
Es kommt nicht darauf an, den Abstand s_1, s_2 oder s_3 zum hellen Mittelstreifen zu ermitteln. Wenn $e \gg s$, was stets der Fall ist, dann sind die Streifenabstände alle gleich, und man mißt s als den mittleren Abstand zweier Streifen. An den Rändern des Interferenzbildes sind die Streifen unregelmäßig; diese unregelmäßigen Streifen rühren von der Beugung an der Mittelkante des Biprismas her und dürfen zur Ermittlung von s nicht mit herangezogen werden.

Die Größe a als Abstand der beiden scheinbaren Lichtquellen L_1 und L_2 kann der Versuchsanordnung nicht unmittelbar entnommen werden. Wir ermitteln sie durch den in Bild 87/3 dargestellten Nebenversuch.



87/3 Zur Ermittlung des scheinbaren Spaltabstands a schaltet man eine Sammellinse, am besten ein Objektiv oder eine achromatische Linsenkombination, so ein, daß auf dem Schirm zwei scharfe Bilder B_1 und B_2 der scheinbaren Lichtquellen L_1 und L_2 entstehen. Aus b, g und d kann man mit Hilfe der Abbildungsgesetze a ermitteln

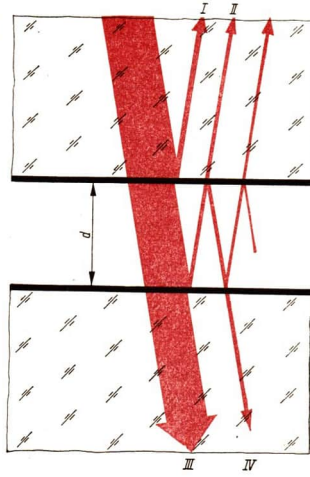
FRESNEL hat noch einen anderen im Prinzip gleichartigen Interferenzversuch ausgeführt und zwar mit zwei leicht gegeneinander geneigten Spiegeln, dem sogenannten *Fresnelschen Doppelspiegel*. Die Oberflächen der beiden meist aus schwarzem Glas bestehenden Spiegel reflektieren das auftreffende Lichtbündel als zwei kohärente Bündel, die miteinander interferieren.

3.2.2. Interferenzen an dünnen Schichten

Sie konnten erkennen, daß durch Reflexion und Brechung des Lichtes Interferenzerscheinungen hervorgerufen werden können. Ein auch im täglichen Leben besonders häufig zu beobachtender Fall dieser Art sind die Interferenzerscheinungen an **dünnen Schichten**. (Ein Beispiel dafür fanden Sie im Bild 73/1.) Man versteht darunter sehr dünne Schichten von durchsichtigen Medien, wie Luft, Glas, Wasser, Öl u. a.
Die Brechung ist in diesen Medien stets mit einer teilweisen Reflexion verbunden. So wird beispielsweise beim senkrechten Auftreffen von Licht auf eine Glasscheibe etwa 4% des Lichts an der Oberfläche reflektiert; beim Austritt an der Rückseite der Scheibe werden wieder etwa 4% des in das Glas eingetretenen Lichts reflektiert. Ebenso wirkt ein Luftspalt zwischen zwei Glasscheiben (Bild 88/1).
Bei einer keilförmig zunehmenden Schichtdicke wird man im *reflektierten Licht* also abwechselnd helle und dunkle Gebiete erwarten. In der *Durchsicht* dagegen sind nur ganz schwache Interferenzerscheinungen zu beobachten. Sie können sich selbst davon überzeugen, indem Sie auf eine sauber geputzte Glasscheibe ein ebenfalls sehr sauberes, möglichst schwach gewölbtes Uhrglas oder eine Sammellinse legen (Bild 89/1). Diese Erscheinung bezeichnet man als **Newtonsche Ringe.**

Der Reflexionsvorgang beim Licht

Eine erste Überlegung beim Betrachten des Bildes 88/1 könnte zu dem Schluß führen, daß der

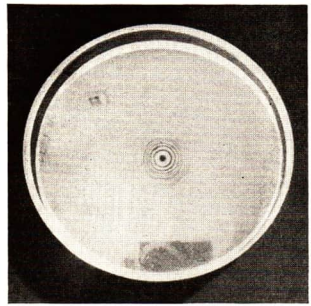


88/1 Reflexion und Brechung eines Lichtbündels an der Luftschicht zwischen zwei Glasplatten. Die beiden reflektierten Lichtbündel I und II haben nahezu gleiche Intensität, sie sind kohärent und interferieren miteinander. Je nach ihrem Gangunterschied verstärken oder schwächen sie sich.
Bei den hindurchtretenden Lichtanteilen dagegen ist der Wellenzug IV so schwach, daß eine Überlagerung mit dem Wellenzug III kaum merklich ist

Gangunterschied zwischen den Wellenzügen I und II etwa 2 d beträgt, denn der Wellenzug II muß die Schicht zusätzlich zweimal durchlaufen. Man müßte dann weiter schließen, daß bei sehr dünner Schicht ($d \ll \lambda$) der Gangunterschied nahezu null wird, wobei sich die beiden reflektierten Wellenzüge verstärken müßten. In Wirklichkeit aber löschen sie sich in diesem Falle aus, wie der dunkle Mittelfleck der Newtonschen Ringe (Bild 89/2) beweist. Dieser Widerspruch löst sich bei einer näheren Betrachtung des Reflexionsvorganges auf.

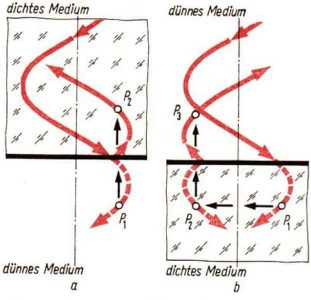


89/1



89/2 Newtonsche Ringe als Interferenzerscheinung an einer keilförmigen Luftschicht

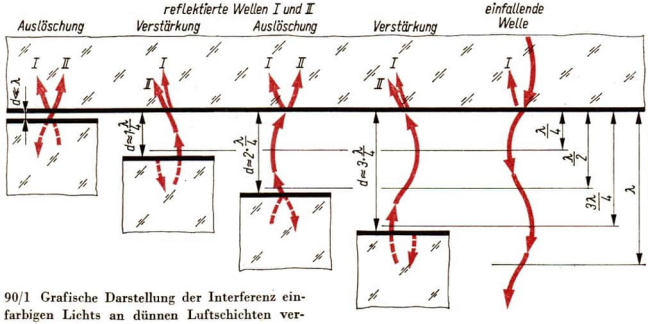
Von Klasse 10 her ist Ihnen bekannt, daß zwischen der Reflexion einer Welle am „festen Ende" und am „losen Ende" unterschieden werden muß. Dies gilt in gleicher Weise für die Reflexion von Lichtwellen beim Übergang von einem Medium in ein anderes. Beim **Übergang vom dichteren ins dünnere Medium**, also z. B. von Glas in Luft, wird eine Lichtwelle in einfacher Weise reflektiert, was sich in der grafischen Darstellung als einmalige „Spiegelung" an der Grenzfläche ausdrückt (Bild 89/3 a, $P_1 \rightarrow P_2$). Beim **Übergang vom dünneren ins dichtere Medium** dagegen erleidet die reflektierte Welle einen zusätzlichen **Gangunterschied** Δ von $\frac{\lambda}{2}$, einen sogenannten **Phasensprung**, (Bild 89/3 b), was in der grafischen Darstellung dadurch wiedergegeben wird, daß die Welle *zweimal* gespiegelt wird, und zwar einmal an der Achse der Welle ($P_1 \rightarrow P_2$) und einmal an der Grenzfläche ($P_2 \rightarrow P_3$).



89/3 Grafische Darstellung der Reflexion einer Welle
a) beim Übergang vom dichteren ins dünnere Medium
b) beim Übergang vom dünneren ins dichtere Medium, Auftreten eines zusätzlichen Gangunterschieds von $\frac{\lambda}{2}$ (Phasensprung)

Die Abhängigkeit der Interferenz von der Schichtdicke

Unter Berücksichtigung des Phasensprungs bei der Reflexion am dichteren Medium interferieren die beiden reflektierten Wellenzüge in der in Bild 90/1 grafisch dargestellten Weise.



90/1 Grafische Darstellung der Interferenz einfarbigen Lichts an dünnen Luftschichten verschiedener Dicke

Haben zwei reflektierte Wellen einen Gangunterschied Δ von $\frac{\lambda}{2}$, dann löschen sie sich aus.

Das ist dann der Fall, wenn die Schichtdicke d_A ein geradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{4}$ ist.

$$d_A = 2\,m \cdot \frac{\lambda}{4}$$

$$\boxed{d_A = m \cdot \frac{\lambda}{2}} \qquad (3\,a)$$

(m ist eine ganze Zahl.)

Beispiel:

Wie verhalten sich zwei Wellen mit einem Gangunterschied von $\frac{\lambda}{2}$, wenn die Schichtdicke 2400 nm und die Wellenlänge 600 nm beträgt?

Gegeben: $d = 2400$ nm

$\lambda = 600$ nm

Gesucht: Verhältniszahl m

Lösung:

$$d = m \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$m = \frac{2\,d}{\lambda}$$

$$m = \frac{2 \cdot 2400\ \text{nm}}{600\ \text{nm}}$$

$$m = 8\,.$$

Die Schichtdicke beträgt ein geradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{4}$, dementsprechend löschen sich die beiden Wellen aus!

Die Gleichung (3) kann wie folgt hergeleitet werden: Der Gangunterschied Δ der beiden reflektierten Wellen ist $2\,d$ zuzüglich des Phasensprungs $\frac{\lambda}{2}$;

also $\quad \Delta = 2\,d \mp \frac{\lambda}{2}$.

Andererseits beträgt der Gangunterschied Δ zweier Wellen bei ihrer Auslöschung stets ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$;

also $\quad \Delta = (2\,m \mp 1)\,\frac{\lambda}{2}$.

Nach Gleichsetzung ergibt sich als Schichtdicke d_A für Auslöschung

$$\boxed{2\,d_A = m\,\lambda} \tag{3b}$$

● *Leiten Sie auf ähnliche Weise die folgende Beziehung (4) für die Wellenverstärkung her!*

Zwei reflektierte Wellen verstärken sich, wenn die Schichtdicke ein ungeradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{4}$ ist.

$$\boxed{d_v = (2\,m + 1)\,\frac{\lambda}{4}} \tag{4}$$

An diese Grunderscheinung sollen noch einige Betrachtungen angeknüpft werden:

1. Die Interferenzringe oder -streifen zeigen sich bei gewöhnlichem Filterlicht (z. B. Rotfilter) nur bei *dünnen* Luftschichten. Die Erklärung liegt in der begrenzten Länge der interferierenden Wellenzüge.

   ● *Was geschieht bei $d = 10\,\lambda$, wenn der Wellenzug rund $15\,\lambda$ lang ist?*

   Bei Rotfilterlicht haben Wellenzüge eine Länge von rund $10\,\lambda$ bis $100\,\lambda$. Bei einer Schichtdicke von beispielsweise $15\,\lambda$ haben die beiden reflektierten Wellenzüge einen Gangunterschied von etwa $30\,\lambda$ $\left(\text{genau } 30\,\lambda \mp \text{Phasensprung } \frac{\lambda}{2}\right)$. Sie überlappen sich wenig oder gar nicht und können folglich nicht interferieren.
2. Natriumlicht und anderes monochromatisches Licht hat Wellenzuglängen von 1 mm bis 1 m. Mit solchem Licht sind noch Interferenzen an Schichten größerer Dicke zu beobachten.

Interferenzerscheinungen an dünnen Schichten von Flüssigkeiten und festen Körpern

Bisher haben wir Interferenzerscheinungen an Luftschichten untersucht. Häufig bilden sich aber auch sehr dünne Schichten von *Flüssigkeiten* oder von durchsichtigen *festen Körpern*. Als Beispiele seien genannt: Seifenhäutchen (Tafel III), Oberflächen-

schichten auf Glas (Tafel III), die „schillern" oder „irisieren", Perlmutt, bestimmte Käfer, Schmetterlinge u. a.

Sofern eine Seifenhaut oder eine andere Schicht von zwei optisch *dünneren* Medien begrenzt wird, was meist der Fall ist, tritt der Phasensprung bei der Reflexion an der *Vorderseite* der Schicht auf. Die Reflexion verläuft an der *Rückseite* der Schicht ohne Phasensprung.

Es ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber Interferenzerscheinungen an Luftschichten vorhanden: Der Weg innerhalb der Schicht, auf dem der eine reflektierte Wellenzug seinen Gangunterschied gegenüber dem anderen erhält, verläuft im optisch *dichten* Medium, beispielsweise in Wasser (Seifenhaut). Die Wellenlängen $\lambda = \lambda_0$ in Luft (genauer im Vakuum) verkürzen sich aber in einem Medium von der Brechzahl n auf die Wellenlänge

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n}.$$

Die Erklärung kann mit Hilfe der Gleichung $c = f \cdot \lambda$ gegeben werden: Die *Frequenz* f der Strahlung ist abhängig von der Lichtquelle; sie bleibt also konstant bei allen Reflexions- und Brechungsvorgängen. Die *Lichtgeschwindigkeit* c dagegen wird im dichteren Medium kleiner als im Vakuum:

$$c_n = \frac{c}{n}.$$

Für das Medium gilt

$$c_n = f \cdot \lambda_n,$$

für das Vakuum

$$c = f \cdot \lambda_0.$$

Nach Elimination von f ergibt sich

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_0} = \frac{c_n}{c} = \frac{1}{n} \qquad \left(\text{wegen } c_n = \frac{c}{n}\right),$$

daraus folgt

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n}.$$

Unter Berücksichtigung der Brechzahl n lautet nun ganz allgemein die Bedingung für die

Auslöschung bei der Interferenz an dünnen Schichten

$$d_A = \frac{m \cdot \lambda_0}{2n} \tag{5}$$

- *Welche Bedeutung haben die einzelnen Formelzeichen in dieser Gleichung?*
- *Leiten Sie die Gleichung (5) analog (3) her, indem Sie* $\frac{\lambda_0}{n}$ *setzen!*
- *Wie lautet die der Gleichung (5) entsprechende Gleichung (6) für Verstärkung?*

Aus Gleichung (5) kann man die Wellenlänge λ_0 (in Luft) für diejenige Lichtfarbe berechnen, die bei gegebener Schichtdicke d ausgelöscht wird:

$$\lambda_0 = \frac{2}{m} n \cdot d_A .$$

Aus der Gleichung wird deutlich, daß λ_0 nicht nur von der Schichtdicke d, sondern vom Produkt $n \cdot d$ abhängt, das man **optische Weglänge** nennt.

Interferenzerscheinungen an dünnen Schichten bei weißem Licht

Nachdem wir Interferenzerscheinungen bei einfarbigem Licht erklärt haben, werden die bei Verwendung von weißem Licht auftretenden mehrfarbigen Interferenzerscheinungen betrachtet.

Beleuchtet man die auf Seite 73 gezeigte Seifenhaut mit weißem Licht, so zeigen sich die in Tafel III wiedergegebenen Interferenzstreifen.

Diese Interferenzerscheinung wird folgendermaßen erklärt: Die Seifenhaut stellt eine *keilförmige Flüssigkeitsschicht* (Brechzahl $n \approx 1{,}4$) dar. Sie wird von der Oberflächenspannung gehalten und ist infolge der Schwere der Flüssigkeit unten breiter als oben. Wir greifen zur Erläuterung der Farberscheinungen willkürlich drei Schichtdicken heraus.

Beispiele:

1. Bei der Schichtdicke $d \ll \lambda$
   d. h. ganz oben, erscheint die Seifenhaut schwarz (vgl. Tafel III). Die Erklärung wurde schon auf Seite 89 gegeben.
2. Bei der Schichtdicke $d = 321$ nm
   zum Beispiel erscheint die Seifenhaut rot, weil gemäß Gleichung (5)

   $$\lambda_0 = \frac{2}{m} n\, d_A ,$$

   $$\lambda_0 = \frac{2}{2} 1{,}4 \cdot 321 \text{ nm} ,$$

   $$\lambda_0 = 450 \text{ nm}$$

   das im weißen Licht enthaltene blaue Licht mit der Wellenlänge $\lambda_0 \approx 450$ nm ausgelöscht, dagegen das enthaltene rote Licht gemäß Gleichung (6)

   $$\boxed{\lambda_0 = \frac{4}{2m-1} n\, d_v} \qquad (6)$$

   $$\lambda_0 = \frac{4}{3} \cdot 1{,}4 \cdot 321 \text{ nm},$$

   $$\lambda_0 = 600 \text{ nm}$$

   verstärkt reflektiert wird.
3. Bei der Schichtdicke $d = 1000$ nm $= 1\ \mu$m gibt es mehrere Farben, die gemäß (5) ausgelöscht werden, und auch mehrere, die nach Gleichung (6) verstärkt werden.
   Das sind im sichtbaren Spektralbereich (für $m = 5$) Rot mit $\lambda_0 = 622$ nm, (für $m = 6$) Grün mit $\lambda_0 = 510$ nm, (für $m = 7$) Blau mit $\lambda_0 = 430$ nm. Diese drei reflektierten Farben geben zusammen einen weißlichen Farbton.

An diesen drei Beispielen kann man erkennen:

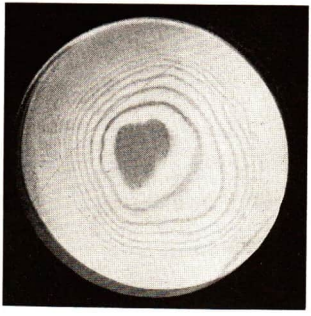
Interferenzstreifen von reflektiertem weißem Licht gehen mit zunehmender Dicke einer keilförmigen Schicht von Schwarz über kräftige Farben zu immer weißlicheren Farben über und verschwinden schließlich ganz.

Vorkommen und Anwendungen der Farben dünner Schichten

Die farbigen Ölflecke auf regennasser Straße werden durch die außerordentlich dünne Ölschicht verursacht, die sich auf dem Wasser mit zum Rande hin abnehmender Dicke ausbreitet. Die Farben entstehen durch Interferenz des an der Ober- und Unterseite der Ölschicht reflektierten Lichts.

Die **Anlauffarben** des Stahls (Tafel IV) sind Interferenzerscheinungen an dünnen Schichten. Hält man beispielsweise eine Messerklinge ins Feuer, dann zeigen sich Interferenzfarben. Sie beginnen bei etwa 210 °C mit Weißgelb und durchlaufen bei steigender Temperatur die Farbtöne Gelb, Braun, Rot, Violett, Blau und Grau, den sie bei 340 °C erreichen. Die Anlauffarben beruhen auf Veränderungen der optischen Dichte in äußerst dünnen Oberflächenschichten, die sich beim Erhitzen bilden. Aus der Farbe kann man auf die Temperatur schließen, auf die der Stahl erhitzt wurde.

Die Interferenz an dünnen Schichten wird bei modernen Objektiven zur **Entspiegelung** der Oberfläche (Oberflächenvergütung) ausgenutzt. Man dampft im Vakuum auf die Glasoberfläche ($n_g = 1{,}5$) eine dünne Schicht einer brechenden Substanz mit dem Brechungsverhältnis $n_s = 1{,}2$ auf. Da es sich sowohl beim Eintritt in die Schicht als auch beim Austritt um einen Übergang vom dünneren ins dichtere Medium handelt, tritt bei beiden reflektierten Wellenzügen ein zusätzlicher Gangunterschied (Phasensprung) von $\frac{\lambda}{2}$ auf. Man erhält eine Auslöschung des reflektierten Lichts für eine Schichtdicke $d = \frac{\lambda}{4}$. Für λ wählt man eine mittlere Wellenlänge, etwa 550 nm (Gelbgrün). Die Platten (Bild 95/1) zeigen in der mittleren, vergüteten Zone nur eine geringe Reflexion.



94/1 Prüfen einer Linse durch Auflegen auf ein Probeglas

Die Interferenz an dünnen Luftschichten nach dem Prinzip der Newtonschen Ringe benutzt man zur **Gütekontrolle** polierter optischer Teile. Dabei legt man das zu prüfende Teil auf ein entsprechendes Probeglas, also z. B. zwei ebene (plane) Platten aufeinander oder eine konvexe Fläche auf eine konkave gleicher Krümmung. Je stärker die Form des Prüflings von der des Probeglases abweicht, um so mehr Ringe bzw. Streifenbilden sich infolge der verbleibenden Luftschichten. Auch Risse und Schrammen machen sich durch Interferenzstreifen bemerkbar

Energiebetrachtung

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß die gegenseitige Auslöschung zweier Wellen nicht einer Vernichtung ihrer Energie gleichkommt: Die Lichtmenge, deren Reflexion durch Interferenz verhindert wurde, muß sich demnach im durchgehenden Licht wiederfinden. Das ist auch experimentell bestätigt worden.

Die *Oberflächenvergütung* erfüllt somit zwei Funktionen, die miteinander verbunden sind: Sie verhindert störende Reflexe und erhöht die Lichtdurchlässigkeit. Durch die Oberflächenvergütung ergibt sich bei modernen Objektiven, die meist aus zahlreichen Linsen bestehen, ein erheblicher Gewinn an nutzbarer Lichtstärke (Bild 95/1).

Vier vergütete Linsen haben beispielsweise eine Durchlässigkeit von etwa 92%, vier unvergütete eine solche von nur etwa 62%.

Zusammenfassung

1. **Beim Versuch mit dem Fresnelschen Biprisma entstehen Interferenzstreifen.**

   Vergleichen Sie diesen Versuch mit der Lichtbeugung am Doppelspalt!

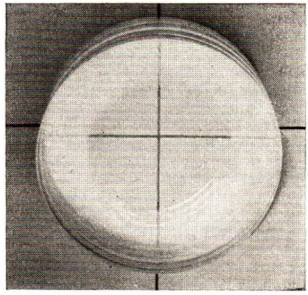
2. **Die an Vorder- und Rückseite dünner Schichten reflektierten Lichtwellen interferieren miteinander. Sie löschen sich aus, wenn**

$$d_A = \frac{m \lambda_0}{2 n}.$$

   Warum müssen es dünne Schichten sein?
   Welchen Einfluß hat das Material der Schicht?
   Wie äußert sich die Art des verwendeten Lichts im Interferenzbild?

3. **Wichtige Anwendungen der Interferenz dünner Schichten sind die optische Gütekontrolle, Entspiegelung polierter Glasflächen und Anlauffarben auf Stahl.**

   Beschreiben Sie diese Erscheinungen!



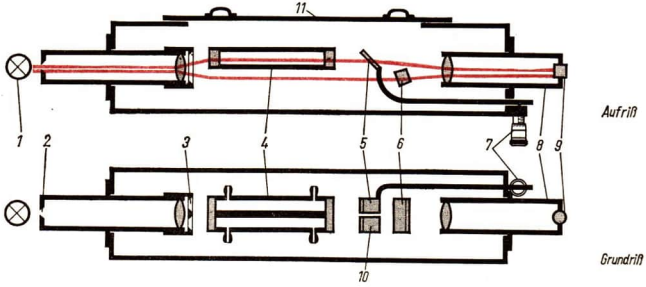
95/1 Nachweis der Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit durch Oberflächenvergütung

3.3. Optische Geräte

Im folgenden sollen optische Geräte besprochen werden, deren Wirkungsweise im wesentlichen auf der Interferenz beruht.

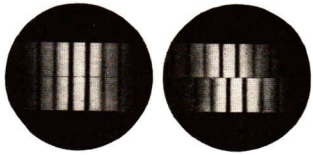
3.3.1. Interferometer

Mit Interferometern kann man Brechzahlen und Lichtwellenlängen mit höchster, durch andere Geräte kaum erreichbarer Genauigkeit messen.
Interferometer sind im Prinzip so aufgebaut, daß ein Strahlenbündel durch Beugung, Brechung oder Reflexion in zwei kohärente Bündel aufgespalten wird. Die beiden Teilbündel durchlaufen unterschiedliche Wege und werden dann wieder vereinigt, wobei sie miteinander interferieren. Aus dem Interferenzbild kann man auf die Wegunterschiede schließen.
Ein in Wissenschaft und Technik weit verbreitetes Interferometer ist das **Laboratoriums-Interferometer** vom VEB Carl Zeiss Jena (Bild 96/1).



96/1 Schnittdarstellung des Laboratoriums-Interferometers des VEB Carl Zeiss Jena
Durch den Doppelspalt (3) werden aus dem vom Leuchtspalt (2) herkommenden Licht zwei kohärente Lichtbündel ausgeblendet. Diese zwei nebeneinander liegenden Lichtbündel werden dann in zwei übereinanderliegende Lichtbündelpaare geteilt:
1. Ein unteres Bündelpaar verläuft in Luft, wird dann im Fernrohr (8) vereinigt und liefert im Okular (9) die untere Hälfte der in Bild 97/1 a und b dargestellten Interferenzbilder.
Die Ablenkplatte (6) lenkt diese untere Hälfte etwas nach oben ab, damit sie gut im Gesichtsfeld liegt.
2. Ein oberes Lichtbündelpaar durchläuft die Kammern (4), die Kompensatorplatten (5) und (10). Sind die beiden Kammern mit der gleichen Substanz gefüllt und sind die Kompensatorplatten völlig gleich und nehmen die gleiche Lage ein, so entsteht im Okular (9) ein oberes Interferenzbild, das mit der unteren Hälfte übereinstimmt (Bild 97/1 a). Enthalten dagegen die beiden Kammern verschiedene Flüssigkeiten oder Gase, so verschiebt sich auf Grund der unterschiedlichen optischen Weglängen das obere Interferenzbild (Bild 97/1 b). Durch Neigen der beweglichen Kompensatorplatte (5) mit Hilfe der Meßschraube (7) wird die Verschiebung rückgängig gemacht. Die vorbeiwandernden Streifen werden gezählt, und daraus wird die Differenz aus den Brechzahlen beider Stoffe errechnet

97/1 Interferenzbilder im Okular des Laboratoriums-Interferometers
a) durch Nachstellen erreicht man Übereinstimmung zwischen den beiden Interferenzbildern
b) durch unterschiedliche optische Weglängen seitlich verschobenes oberes Interferenzbild

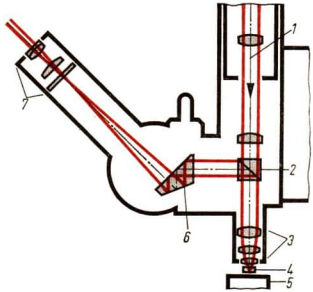


a b

3.3.2. Interferenz-Mikroskop

Dieses Gerät ist gleichsam eine Vereinigung von Mikroskop und Interferometer. Bei den vom VEB Carl Zeiss Jena entwickelten Gerät (Bild 97/2) entsteht das Interferenzbild nach Art der Newtonschen Ringe.

97/2 Strahlenverlauf im großen Interferenzmikroskop des VEB Carl Zeiss Jena
Ein von oben kommendes Lichtbündel (1) durchsetzt einen Teilungswürfel (2), das Mikroskopobjektiv (3) und eine halbdurchlässig versilberte Vergleichsplatte (4). Die Vergleichsplatte befindet sich dicht über der zu untersuchenden Oberfläche (5).
Die von der Vergleichsplatte und von der Oberfläche reflektierten Lichtbündel interferieren miteinander und liefern nach Durchlaufen des Mikroskops, das noch ein Umlenkprisma (6) und ein Okular (7) enthält, ein vergrößertes, von Interferenzstreifen durchzogenes Bild der Oberfläche.
Aus dem Streifenverlauf kann man auf die Oberflächengüte schließen.

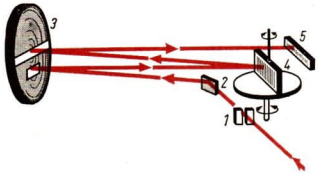


3.3.3. Gitterspektrograf

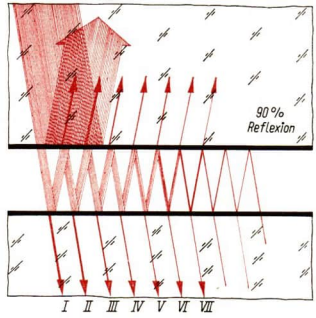
Die Erzeugung von Spektren mittels eines Gitters erfolgt in der Praxis mit Hilfe von Gitterspektrografen (Bild 98/1). Das Gitter ist in diesen Geräten fast stets ein Reflexionsgitter. Darunter versteht man eine Metallplatte mit Furchen. Die Furchen haben meist ein sägezahnartiges Profil; dadurch werden die Lichtwellen vorzugsweise in eine bestimmte Richtung reflektiert. Das Spektrum ist in diesem Bereich besonders hell. Je nach dem interessierenden Wellenlängenbereich wählt man ein Gitter mit geeignetem Profil.

3.3.4. Interferenzfilter

Interferenzfilter dienen zum Ausfiltern von schmalen Wellenlängenbereichen, d. h. von ziemlich einfarbigen hellen Lichtbündeln. Mit ihrer Hilfe kann man ferner einzelne Linien aus Linienspektren ausfiltern.



98/1 Schema des Plangitter-Spektrografen des VEB Carl Zeiss Jena
Das auf seine spektrale Zusammensetzung zu untersuchende Licht fällt durch den Spalt (1) über den ebenen Spiegel (2) auf den unteren Teil des Hohlspiegels (3).
Der Spalt steht im Brennpunkt des Hohlspiegels, so daß das Licht als paralleles Bündel auf das Gitter (4) reflektiert wird. Vom Gitter wird es wieder auf den Hohlspiegel (oberer Teil) geworfen, der es auf einer im Brennpunkt angeordneten Fotoplatte (5) vereinigt.
Da Abbildung und Beugung nur mit reflektierenden Teilen erfolgen, tritt keine Absorption ein. Dadurch können Spektraluntersuchungen bis weit in das Gebiet des ultravioletten Lichts (UV) durchgeführt werden



98/2 Reflektierte und durchgehende Wellen an einem Interferenzfilter. Die Stärke der Lichtbündel soll die Intensität andeuten. Die Silberschichten reflektieren in unserem willkürlich gewählten Beispiel etwa 90% der auffallenden Wellen. Die durch die Schicht hindurchtretenden Wellenzüge I, II, III usw. interferieren miteinander in der Weise, daß sie sich alle verstärken, wenn die optische Weglänge $2\,nd = m\,\lambda$ ist. In allen anderen Fällen löschen sie sich weitgehend aus.
Interferenzfilter lassen also einen nur schmalen Wellenlängenbereich durch

Metallinterferenzfilter bestehen aus einer dünnen durchsichtigen Schicht, die beiderseits mit einer sehr dünnen lichtdurchlässigen Silberschicht belegt ist. Dieser Silberbelag erhöht die Reflexion, so daß sich auch die mehrfach in der Schicht hin und her reflektierten Wellenzüge an der Interferenz beteiligen (Bild 98/2)

Der Unterschied zwischen den Schichten mit schwacher Reflexion (Newtonsche Ringe, Seifenhaut usw.), bei denen im wesentlichen zwei Wellenzüge interferieren, und den stark reflektierenden bespiegelten Schichten der Interferenzfilter findet eine lehrreiche Analogie zwischen der Beugung am Doppelspalt und am Gitter. Bei letzterem treten infolge des Zusammenwirkens sehr vieler Wellenzüge helle und scharf begrenzte Interferenzen auf. Ähnlich ist es auch bei den Interferenzfiltern.

Das Filter sieht wie ein Spiegel aus, weil alle Wellenlängen (Farben) des auffallenden Lichts (außer einer) reflektiert werden. Interferenzfilter werden für alle Wellenlängen des optischen Spektrums gefertigt. Nach

$$\lambda = \frac{2\,n\,d}{m}$$

läßt jedes Filter mehrere Wellenlängen durch, die man nach ihrer Ordnung m kennzeichnet. Um nur eine bestimmte gewünschte Ordnung durchzulassen, werden Interferenzfilter mit Glasfiltern kombiniert. Die für senkrechten Einfall angegebene Wellenlänge des durchgelassenen Lichts wird kürzer bei schrägem Lichtdurchtritt.

● *Wie ändert sich dabei die Farbe?*

Versuche, Fragen, Aufgaben

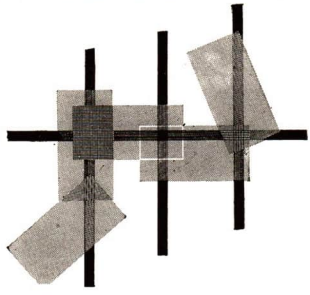
1. Welchen Einfluß hat der Winkel zwischen den beiden brechenden Flächen des Biprismas auf den Abstand a der scheinbaren Lichtquellen? Welchen Einfluß hat wiederum a auf die Streifenabstände s? Wie wirkt es sich auf die Streifenbreite aus, wenn das Biprisma näher an den Leuchtspalt herangerückt wird?
2. Ein Versuch mit dem Fresnelschen Biprisma ergab die folgenden Werte: Für das verwendete weiße Licht kann man im Mittel die Wellenlänge $\lambda = 550$ nm zugrunde legen. Der Abstand vom Spalt zum Auffangschirm betrug 2 m. Der Abstand der beiden virtuellen Lichtquellen wurde aus der vergrößerten Abbildung gemäß Bild 84/3 berechnet. Dabei wurden d mit 22 mm, g mit 20 cm und b mit 2,4 m gemessen. Wie groß ist der Abstand der Interferenzstreifen voneinander?
3. Legen Sie nach guter Säuberung eine Plankonvexlinse auf eine ebene Glasplatte und untersuchen Sie die auftretenden Newtonschen Ringe im reflektierten und im durchfallenden Licht! Betrachten Sie die Ringe durch ein Farbfilter!
4. Biegen Sie sich einen Drahtrahmen und tauchen Sie ihn in Seifenlösung! Erklären Sie die entstehenden Streifen! Betrachten Sie die Streifen durch ein Farbfilter im reflektierten Licht! Was beobachten Sie?
5. Erklären Sie an Hand einer Skizze, wieso bei schrägem Lichtdurchtritt durch ein Interferenzfilter die Wellenlänge des durchgelassenen Lichts kürzer wird; mit anderen Worten: Weisen Sie nach, daß in diesem Falle der Gangunterschied zwischen zwei benachbarten austretenden Wellenzügen kleiner als $2nd$ ist.
6. Vergleichen Sie die drei wichtigsten Verfahren zur Erzeugung von Spektren!

3.4. Polarisation des Lichts

3.4.1. Linear polarisiertes Licht

Versuch mit einer Polarisationsfolie

Aus einer Polarisationsfolie (ihr Aufbau ist auf Seite 101 beschrieben) werden fünf parallelliegende rechteckige Stücke herausgeschnitten. Sie werden teilweise übereinander willkürlich auf ein Strichmuster gelegt (Bild 99/1).



99/1 Blättchen einer Polarisationsfolie
Man kann feststellen, daß je nach Lage der Blättchen zueinander an den sich überdeckenden Stellen das von der Unterlage ausgehende Licht gut, wenig oder gar nicht passieren kann

Diese Erscheinung wird folgendermaßen gedeutet:

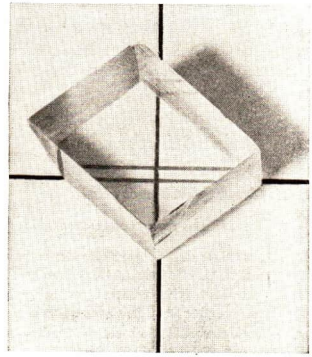
Lichtwellen sind transversale Wellen.

Bekanntlich schwingen transversale Wellen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung; davon ausgehend, sollen die Erscheinungen des oben beschriebenen Versuches verdeutlicht werden:
Von den willkürlich in allen Richtungen schwingenden transversalen Wellenzügen des natürlichen Lichts (Tafel V) sind nach dem Passieren der Polarisationsfolie nur noch Komponenten vorhanden, die alle in einer Richtung schwingen. Man bezeichnet solches Licht als **linear polarisiert**. Die Folie hat also eine bestimmte Richtung, in der alle Lichtwellen nach dem Durchtritt schwingen. Dabei werden Wellen, die bereits von vornherein in dieser Richtung schwingen, nahezu ungehindert hindurchgelassen, senkrecht dazu schwingende Wellen werden nahezu vollständig absorbiert. Die Durchlässigkeit gegenüber schräg schwingenden Wellen ist ohne Beweis auf Tafel V durch eine Thaleskreiskonstruktion angedeutet.
Die Polarisationsfolie, die aus dem natürlichen Licht linear polarisiertes ausfiltert, nennen wir einen *Polarisator*. Es ist nach der eben entwickelten Vorstellung klar, daß eine zweite Folie, die in den Weg des linear polarisierten Lichts gestellt wird und die man in dieser Verwendung allgemein *Analysator* nennt, kein Licht mehr durchläßt, wenn ihre Durchlaßrichtung zu der des Polarisators senkrecht steht.
An dieser Stelle muß zu den betrachteten Eigenschaften elektromagnetischer Wellen (vgl. Seite 32) ergänzt werden, daß sich diese Wellen ebenfalls polarisieren lassen. Man denke sich in Bild 33/1 ein *Metallgitter* in den Strahlengang zwischen Sender und Empfänger gebracht. Durch entsprechende Drehung des Metallgitters zur Schwingungsebene können die elektromagnetischen Wellen senkrecht zur Senderachse linear polarisiert werden.

● *Begründen Sie, warum Lichtwellen keine longitudinalen Wellen sein können!*

3.4.2. Polarisatoren

Polarisatoren sind optische Geräteteile zum Ausfiltern linear polarisierten Lichts.
Die meisten Polarisatoren sind aus *Kristallen* aufgebaut. Es gibt zahlreiche Kristalle, die die Eigenschaft haben, das Licht in *zwei senkrecht zueinander linear polarisierte Anteile* aufzuspalten (Bild 100/1). Man nennt sie *doppelbrechende Kristalle.*



100/1 Doppelbrechender Kristall (Kalkspat) auf ein Zeichenblatt gelegt

Unter ihnen sind wiederum solche von Bedeutung, die den einen Anteil stärker absorbieren als den anderen. Zu diesen Kristallen gehört der **Turmalin.** Bei geeigneter Dicke der Kristallplatte kann nur noch *ein* linear polarisiertes Lichtbündel hindurchtreten.

Polarisationsfolien bestehen aus doppelbrechenden Kristallen, die, in mikroskopischer Feinheit ausgerichtet, in eine durchsichtige Trägerfolie eingebettet werden. Schließlich werden sie beiderseits mit Glasscheiben verkittet und als **Polarisationsfilter** verwendet. Bei klar durchsichtigen doppelbrechenden Kristallen (z. B. Kalkspat), die beide Anteile gut hindurchlassen, geht man einen anderen Weg. Der eine Anteil wird dadurch ausgeschaltet, daß der Kristall schräg durchgeschnitten und wieder verkittet wird. Der Winkel der Schnittfläche und die Brechzahl des Kitts werden so gewählt, daß der eine Anteil hindurchtritt, der andere totalreflektiert und in der Fassung absorbiert wird (Tafel VI). Nach dem englischen Physiker NICOL nennt man eine solche Anordnung **Nicolsches Prisma.**

Einen sehr einfachen Polarisator kann sich jeder aus einer gewöhnlichen Glasplatte herstellen. Versuche ergeben, daß ein Lichtbündel nach der Reflexion an der Glasoberfläche vollständig linear polarisiert ist, wenn das Licht unter dem Polarisationswinkel α_P (bei Glas $\alpha_P \approx 57°$) einfällt (Tafel VII). Sie erkennen aus dem Bild, daß diejenigen Anteile, die vor der Reflexion in der Einfallsebene schwingen, nicht reflektiert werden. Sie dringen ins Glas ein, werden gebrochen und zum Teil absorbiert. Verwendet man also eine Glasplatte als Analysator, dann wird das auftreffende linear polarisierte Lichtbündel je nach der Lage der Platte reflektiert oder absorbiert.

Brewstersches Gesetz

Der Polarisationswinkel α_P ist nicht willkürlich; er genügt dem Gesetz von BREWSTER (1781 bis 1868):

Der reflektierte Strahl ist vollständig linear polarisiert, wenn der reflektierte und der gebrochene Strahl einen rechten Winkel bilden.

$$\boxed{\alpha_P + \beta_P = 90°} \tag{7}$$

Dazu Tafel VIII.

Daraus ergibt sich die folgende Bedingung für α_P:

Brechungsgesetz: $$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta},$$

$$n = \frac{\sin \alpha_P}{\sin \beta_P},$$

mit $\beta_P = 90° - \alpha_P$: $$n = \frac{\sin \alpha_P}{\sin (90° - \alpha_P)},$$

$$n = \frac{\sin \alpha_P}{\cos \alpha_P},$$

$$\boxed{n = \tan \alpha_P} \tag{8}$$

3.4.3. Anwendungen linear polarisierten Lichts

Ausschalten von Reflexen

In der Fotografie werden Polarisationsfilter dazu verwandt, störende Reflexe auf Fensterscheiben, auf Bildverglasungen, auf Brillengläsern, auf Wasserflächen usw. zu beseitigen. Eine vollständige Beseitigung der Reflexe ist nur unter dem Polarisationswinkel möglich.

Raumbildprojektion

Beim Auftreffen auf weiße, matte Flächen wird linear polarisiertes Licht *depolarisiert*, d. h., das diffus reflektierte Licht ist wieder natürliches Licht. Dagegen bleibt bei *senkrechtem* Auftreffen auf eine *Metallfläche* die Polarisation erhalten. Deshalb benutzt man bronzierte Bildwände, wenn für Raumbildprojektionen polarisiertes Licht verwendet wird. Von den beiden senkrecht zueinander polarisierten Teilbildern nimmt bei Benutzung einer Polarisationsbrille jedes Auge nur das eine „richtige" Teilbild wahr, so daß ein Raumeindruck entsteht.

Nachweis von Spannungen in Werkstücken

Zahlreiche, zum Teil sehr schöne farbige Erscheinungen treten auf, wenn man Kristalle oder Folien zwischen zwei Polarisatoren bringt. Wenn die zwischengeschalteten Stoffe eine auch nur geringe Doppelbrechung aufweisen, so hellt sich das an sich dunkle Gesichtsfeld hinter zwei gekreuzten Polarisatoren auf. Damit kann man Gefügespannungen z. B. in Gläsern nachweisen, denn bei ihnen tritt bei inneren Spannungen eine sogenannte **Spannungsdoppelbrechung** auf (Tafel IV). Technische Bedeutung hat diese Untersuchungsmethode dadurch, daß man ein Werkstück aus Plast (z. B. Polystyrol) nachbildet und unter Belastung zwischen zwei Polarisatoren untersucht. Die gedehnten oder gestauchten Teile zeigen eine Aufhellung.



102/1 Taschenpolarimeter des VEB Carl Zeiss Jena
Es enthält eine 20 cm lange Porzellanröhre, die an den Enden mit je einer Glasplatte abgeschlossen ist und die zu untersuchende Flüssigkeit aufnimmt. Ehe das Licht in die Porzellanröhre eintritt, durchläuft es ein Polarisationsfilter. Auf der anderen Seite der Röhre befindet sich der Analysator, der mit einer Präzisionskreisteilung versehen ist

Diagnostik und Lebensmittelchemie

Es gibt eine Gruppe von Stoffen, in denen die Schwingungsebene linear polarisierten Lichts gedreht wird. Sie heißen **optisch aktive Stoffe.**

Zu ihnen gehören vor allem *Zuckerlösungen* und *organische* Säuren. Geräte, mit denen man den durch einen optisch aktiven Stoff hervorgerufenen Drehwinkel bestimmen kann, heißen Polarimeter (Bild 102/1).
Polarimeter werden zum Beispiel in der medizinischen Praxis zur Untersuchung des Harns verwandt, in dem sie schon geringe Mengen von Zucker nachzuweisen ermöglichen. Ihre größte Verwendung geschieht in den zuckerverarbeitenden Industriezweigen.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Welche Modellvorstellungen kann man sich von natürlichem Licht und von linear polarisiertem Licht machen?
2. Nehmen Sie zwei geschwärzte Glasplatten! Lassen Sie ein Bündel natürlichen Lichts unter einem Einfallswinkel von etwa 57° auf die erste Platte fallen und dann den reflektierten Strahl unter dem gleichen Winkel auf die zweite Platte. Drehen Sie die zweite Platte unter Beibehaltung dieses Winkels um den Strahl als Achse. Wie deuten Sie die Erscheinungen?
3. Beschreiben Sie einige Anwendungen linear polarisierten Lichts!

Zusammenfassung

1. **Lichtwellen sind transversale Wellen.**

   Begründen Sie diese Aussage!

2. **Linear polarisiertes Licht läßt sich durch Nicolsche Prismen, Polarisationsfilter oder Glasplatten ausfiltern.**

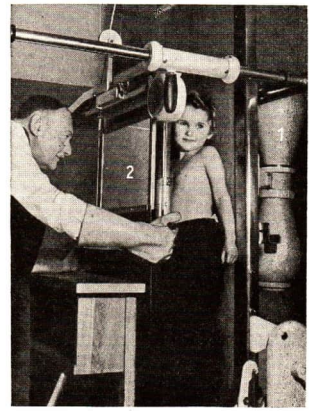
   Beschreiben Sie die Wirkungsweise dieser Geräte!

3. **Der Polarisationswinkel eines Stoffes berechnet sich nach der Gleichung**

   $$\tan \alpha_p = n .$$

   Leiten Sie diese Beziehung aus dem Brewsterschen Gesetz ab!

4. Röntgenwellen



WILHELM CONRAD RÖNTGEN entdeckte 1895 eine bis dahin unbekannte Strahlenart: X-Strahlen, die ihm zu Ehren später Röntgenstrahlen genannt wurden und deren Erforschung bis heute viele Wissenschaftler zum Gegenstand ihrer Arbeit gemacht haben. Röntgenstrahlen erweisen sich sehr nützlich bei z. B. Reihenröntgendurchleuchtungen, durch die die Verbreitung solcher Krankheit wie die Tuberkulose weitgehend eingeengt wird. (1 Röntgenröhre, 2 Leuchtschirm.)

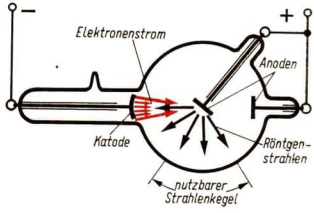
4.1. Röntgenröhren

4.1.1. Ionenröntgenröhren

Die ersten Röntgenröhren, die aus der von RÖNTGEN benutzten hervorgegangen sind und auch heute noch zu Demonstrationszwecken verwendet werden, sind Kaltkatodenröhren. Man bezeichnet sie als *Ionenröntgenröhren* (Bild 104/2). Der Luftdruck beträgt in ihnen etwa 10^{-3} Torr. Wie Ihnen bekannt ist, setzt beim Anlegen einer genügend hohen Spannung eine Gasentladung ein.

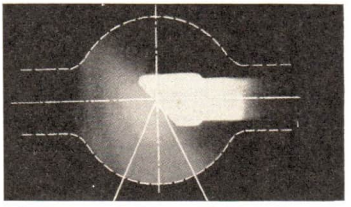
● *Welche Erscheinungen treten bei diesem Druck auf, und wie sind sie zu erklären?*

Dadurch, daß man die Katode hohlspiegelartig ausbildet, werden die aus ihr austretenden Elektronen so gebündelt, daß sie sich in einem kleinen Brennfleck vereinigen. In diesen Brennpunkt legt man die Anode. Beim Aufprall der Elektronen auf die Anode entsteht außer einer starken Wärmeentwicklung die Röntgenstrahlung. Die Anode, die der Katode unmittelbar gegenübersteht, wird auch als *Antikatode* bezeichnet. Sie besteht aus dem schwer schmelzbaren Metall Wolfram und ist schräg gestellt, damit die



104/2 Gasgefüllte Röntgenröhre (Ionenröhre)

Röntgenstrahlen seitlich durch die Glaswand nach außen fallen (Bild 105/1). Es ist üblich, die Ionenröntgenröhre noch mit einer zweiten, mit der Antikatode verbundenen Anode zu versehen. Die benötigte hohe Spannung von 10 bis 100 kV wird durch einen Funkeninduktor oder durch einen Hochspannungstransformator erzeugt. Die richtige Polung wird durch eine vorgeschaltete Ventilröhre (Gleichrichterröhre) bewirkt.



105/1 Entstehen der Röntgenstrahlung in der Anode

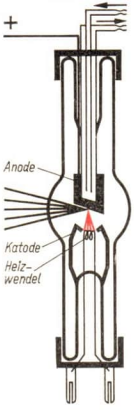
Die Ionenröntgenröhre altert schnell; außerdem hat man keine Möglichkeit, die Stärke und Art der Strahlung zu variieren. Sie genügt deshalb den Anforderungen, die heute von seiten der Medizin und der Technik an eine Röntgenröhre gestellt werden, nicht mehr.

4.1.2. Weiterentwicklung der Röntgenröhren

Glühkatoden-Röntgenröhre

Der amerikanische Physiker William Coolidge konstruierte eine *Glühkatoden-Röntgenröhre*, in der die Elektronen im Hochvakuum aus einer geheizten Katode austreten (Bild 105/2).

Die *Intensität*, d. h. die Stärke der Strahlung, wird durch Verändern der Heizstromstärke eingestellt. Mit steigender Temperatur des Heizfadens wächst die Stärke des elektrischen Stromes zwischen Katode und Anode und auch die Stärke der Röntgenstrahlung.



Die *Durchdringungsfähigkeit* der Röntgenstrahlung (d. h. ihre „Härte", vgl. Seite 107) hängt dagegen von der Geschwindigkeit der Elektronen ab. Diese wiederum ist eine Funktion der zwischen Katode und Anode gelegten Spannung, die sich in weiten Grenzen verändern läßt. Die Spannung liegt je nach Röhrenart zwischen 10 kV und 400 kV.

Röntgenröhren sind in spannungs- und strahlensicheren Gehäusen untergebracht. Schutzhüllen und -hauben aus Blei lassen die Strahlen nur in einem bestimmten Strahlenkegel austreten.

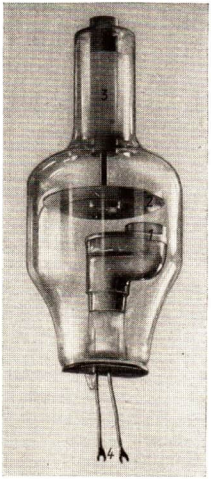
Die vom Brennfleck der Röhre ausgehenden Strahlen entwerfen auf einem Leuchtschirm nach den Gesetzen der Zentralprojektion

105/2 Glühkatoden-Röntgenröhre
Ein spiralförmig gewundener Wolframglühdraht befindet sich inmitten einer hohlspiegelartig ausgebildeten Katode. Durch die Form der Katode werden die vom Heizfaden ausgehenden Elektronen auf der gegenüberliegenden, aus Wolfram bestehenden Anode in einem *Brennfleck* vereinigt, von dem die Röntgenstrahlung ausgeht. Damit die Anode im Brennfleck nicht schmilzt, wird sie von innen mit Wasser gekühlt

ein Bild des durchstrahlten Körpers. Das Bild ist um so schärfer, je kleiner die Ausdehnung des Brennflecks ist.

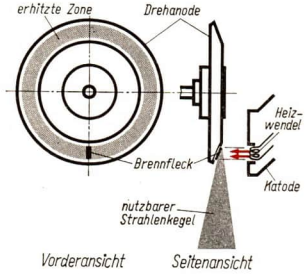
Drehanoden-Röntgenröhre

Damit der Anodenwerkstoff (Wolfram) trotz der Kühlung nicht am Brennfleck durchschmilzt, hat man einen besonderen Röhrentyp konstruiert, die *Drehanodenröhre* (Bild 106/1).



106/1 Drehanodenröhre
Sie ist eine Röntgenröhre mit kleinem Brennfleck und hoher Intensität
Die Katode (1) mit der Heizwendel ist seitlich der Röhrenachse angeordnet. Das Durchschmelzen der Anode (2) im Brennfleck wird dadurch vermieden, daß die als Kreisscheibe ausgebildete Anode durch einen kleinen Elektromotor (3) gedreht wird, so daß immer andere Stellen der Anode erhitzt werden. Die Anode erhitzt sich dabei in ihrer Gesamtheit auf etwa 1500 °C. Die Wärme wird bei dieser hohen Temperatur gut abgestrahlt, von der die Röhre umgebenden Ölkühlung aufgenommen und weitergeleitet. Der Kurzschlußläufer des Antriebsmotors befindet sich in der Röhre und sitzt mit der Drehanode auf einer Achse. Die Ständerwicklung umgibt den Läufer außerhalb der Röhre. Die Anschlüsse (4) für die Heizung sind unten herausgeführt

106/2 Strahlung einer Drehanodenröhre (schematische Darstellung)



Maßgebend für die erreichbare Intensität der Strahlung ist die Brennfleckgröße, wie sie in der Durchstrahlungsrichtung erscheint, sie beträgt etwa 1 mm² (Bild 106/2).

4.2. Eigenschaften der Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen sind imstande, alle Stoffe in mehr oder minder dicken Schichten zu durchdringen.

Die Durchdringungsfähigkeit von Röntgenstrahlen ist um so geringer, je größer das Atomgewicht des durchstrahlten Stoffes und je größer die Schichtdicke ist.

Man gibt für die verschiedenen Werkstoffe *Halbwertschichten* an, das sind diejenigen Schichtdicken, durch die die Röntgenstrahlung gerade bis zur Hälfte ihrer ursprünglichen Stärke geschwächt wird. Die zu einer bestimmten Röntgenstrahlung gehörigen Halbwertschichten sind z. B. Pb: 0,1 mm, Cu: 1 mm, Fe: 1,3 mm, Al: 10 mm, H_2O: 30 mm.

Man bezeichnet die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen als ihre *Härte*. Wir unterscheiden hinsichtlich der Härte heute die in der folgenden Tabelle angegebenen Gruppen.

Tabelle 4: Härteeinteilung der Röntgenstrahlen

Bezeichnung	Erzeugungsspannung U (in kV)	mittlere Halbwertschicht für Aluminium (in mm)
überweiche Röntgenstrahlen	5 bis 20	0,1
weiche Röntgenstrahlen	20 bis 60	1
mittelharte Röntgenstrahlen	60 bis 120	10
harte Röntgenstrahlen	120 bis 150	30
überharte Röntgenstrahlen	über 250	bis 100

Die Halbwertschichten für Aluminium, die in der Tabelle für die einzelnen Härtebereiche angegeben sind, bestätigen:

Die Härte der Röntgenstrahlung wächst mit zunehmender Röhrenspannung.

● *Welche ungefähre Halbwertschicht hat Blei für weiche Röntgenstrahlen, welche für harte?*

Je geringer die Durchdringungsfähigkeit, um so größer ist die *Absorption* der Strahlung im Stoff. Bei der Absorption wirkt die Röntgenstrahlung in bestimmter Weise auf die Stoffe ein:

1. Verschiedene Stoffe fluoreszieren.
   Zum Beispiel Uranglas, Zähne, einige Sulfate, Ca-Wolframat u. a. Letztere werden als Leuchtstoffe für Röntgenbildschirme verwendet, denn die Röntgenstrahlung ist selbst nicht sichtbar.
2. Fotografische Emulsionen schwärzen sich nach der Entwicklung.
   Das gilt für alle Arten von fotografischen Schichten. Man hat aber besondere Röntgenfilme entwicklet, bei denen der Film auf beiden Seiten eine Emulsion trägt; dadurch wird die Empfindlichkeit erhöht.
3. Luft wird ionisiert.
   Das benutzt man, um mittels der mehr oder minder schnellen Entladung eines Elektrometers die Stärke (Intensität) der Röntgenstrahlung zu bestimmen.

4.3. Medizinische Anwendungen

Die Verwendung der Röntgenstrahlen zu medizinischen Zwecken beruht einerseits auf der unterschiedlichen Durchdringungsfähigkeit der Strahlung durch Knochen, Knorpel, innere Organe, Muskeln usw., wodurch man krankhafte Veränderungen im Körperinnern erkennen kann, andererseits auf der Absorption der Strahlung durch die Körperzellen, wodurch man auf krankes Gewebe einwirken kann.

4.3.1. Röntgendiagnostik

Die medizinische *Diagnostik*[1] hat die Aufgabe, Krankheiten zu erkennen. Die Röntgenstrahlung kann hierbei auf folgende Weise mitwirken.

1. Bei der **Durchleuchtung** (vgl. das Bild auf S. 104) beobachtet der Arzt das Röntgenbild auf einem Leuchtschirm. Der Schirm ist zum Schutz des Arztes mit einer dicken Bleiglasplatte abgedeckt. Der Patient tritt zwischen den Röntgenapparat und den Schirm. Infolge ihrer verschiedenen Dichte heben sich innere Organe, Knochen, Fremdkörper, Ablagerungen u. ä. im Röntgenbild unterschiedlich hell ab. Hohlorgane wie Magen und Darm werden mit einem breiartigen Kontrastmittel, etwa Bariumsulfat, gefüllt, wodurch sich das Organ im Röntgenbild durch seine dunkle Tönung von der Umgebung unterscheidet und wobei die Form und die Lage des Organs gut zu erkennen sind.
2. Bei der **Röntgenaufnahme** wird an die Stelle des Leuchtschirmes ein großer Planfilm gebracht. Damit die Belichtungszeiten möglichst niedrig gehalten werden können, werden von beiden Seiten Verstärkerfolien auf den Film gelegt.
3. Bei der **Schirmbildaufnahme** wird das große Schirmbild mit einer fest angebauten Kamera fotografiert. Die Negative werden zur Auswertung vergrößert projiziert. Das Verfahren stellt einen bedeutenden Fortschritt der Röntgentechnik dar; denn es arbeitet mit geringem Materialverbrauch, ist zeitsparend und deshalb für die vorbeugenden Reihenuntersuchungen der gesamten Bevölkerung, die in der DDR seit mehreren Jahren regelmäßig durchgeführt werden, hervorragend geeignet.

4.3.2. Strahlenschutz

Die in der Medizin zu einem bestimmten Zweck aufgewandte Strahlungsmenge wird als **Dosis** bezeichnet. Die Einheit der Dosis ist das **Röntgen** (r). Es ist durch die ionisierende Wirkung der Strahlung festgelegt:

> **Ein Röntgen (1 r) ist diejenige Strahlungsmenge, die infolge der Absorption an 1 Gramm Luft eine Energie von 84 erg abgibt.**

Die Wirkung auf menschliche Körperzellen ist von der Gewebeart und der Strahlungshärte abhängig. Diese Faktoren berücksichtigt man in der spezielleren Dosiseinheit rem, deren Festlegung wir hier nicht behandeln können.

[1] diagnosis (griech.): Unterscheidung, Entscheidung

Eine geringere Röntgendosis als etwa 25 r ruft im Organismus keine Veränderungen hervor. Eine stärkere Dosis dagegen kann verbrennungsartige Hautschädigungen herbeiführen, die im allgemeinen aber wieder ausheilen. Besonders empfindlich sind die Keimzellen gegenüber Röntgenschädigungen. Hier liegt die schädigende Dosis wesentlich niedriger, wobei auch kleinere Strahlungsmengen, auf Jahre verteilt, sich summieren. Für eine Durchleuchtung oder eine Aufnahme eines Patienten wird weniger als 1 r benötigt. Für die zulässigen Röntgendosen, denen die Patienten, das ärztliche Personal, Ärzte und Forscher im Höchstfalle ausgesetzt werden dürfen, liegen strenge Vorschriften vor, die die Gesundheit aller schützen.
Dosen, die 100 r wesentlich überschreiten, rufen krebsartige Röntgenverbrennungen hervor. Da diese zellschädigenden Wirkungen anfangs nicht genügend bekannt waren, haben derartige Verbrennungen vielen Pionieren der Röntgentechnik das Leben gekostet.

4.3.3. Röntgentherapie

Es hat sich herausgestellt, daß Röntgenstrahlen krankhaftes, insbesondere krebsartiges Gewebe stärker schädigen als gesundes. Auf dieser Erkenntnis beruht die **Röntgentherapie**[1], das heißt die Heilung mittels Röntgenstrahlung. Durch Bestrahlung krankhaften Gewebes ist oft eine Heilung möglich. Voraussetzung ist aber meist, daß die Bestrahlung bereits im *Anfangsstadium* der Krankheit vorgenommen wird. Oft wird auch die Röntgenbestrahlung mit einer chirurgischen Behandlung verknüpft. Für die Bestrahlung der Haut werden weiche Strahlen verwendet, die von ihr völlig absorbiert werden. Das darunterliegende gesunde Gewebe wird nicht geschädigt. Bei der Bestrahlung innerer Organe dagegen verwendet man harte Röntgenstrahlen. Damit das gesunde Gewebe, das die Röntgenstrahlen durchdringen müssen, möglichst wenig geschädigt wird, bewegt man den Röntgenapparat im Halbkreis um die kranke Stelle. Dadurch wird diese Stelle dauernd bestrahlt, der übrige Körper aber an immer anderen Stellen.

In den letzten Jahren werden für strahlentherapeutische Zwecke auch immer mehr radioaktive Isotope verwendet, deren Strahlung in ganz ähnlicher Weise wie Röntgenstrahlen wirkt (vgl. Seite 185).

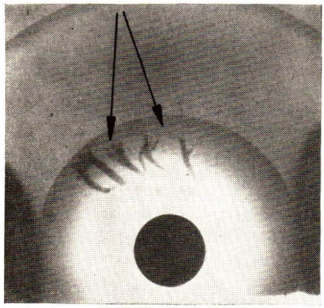
4.4. Technische Anwendungen

Die große Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen macht sie auch zur Untersuchung von Werkstücken auf innere Fehlerstellen geeignet. Zum Unterschied von den *Feinstrukturuntersuchungen*, bei denen mittels Röntgenstrahlen der Molekülbau der Stoffe erklärt werden kann, läßt die Grobstrukturuntersuchung Unregelmäßigkeiten innerhalb der Werkstücke erkennen. Der Vorzug dieses Prüfverfahrens liegt vor allem darin, daß es eine **zerstörungsfreie** Werkstoffprüfung ermöglicht und deshalb

[1] therapeia (griech.): Heilung

auf sämtliche Werkstücke der Fertigung erstreckt werden kann, falls es erforderlich ist. Bei den mechanischen Prüfverfahren dagegen werden einzelne Probestücke bis zur Grenze ihrer Festigkeit beansprucht. Abgesehen davon, daß der Probekörper dabei zerstört wird, ist damit noch keine Gewähr gegeben, daß alle hergestellten Werkstücke fehlerfrei sind. Der Grobstrukturuntersuchung werden vor allem solche Werkstücke unterworfen, die im Falle einer fehlerhaften Beschaffenheit großen Schaden anrichten können. Insbesondere gilt dies für Flugzeugteile, für die Achsen und Wellen der Verkehrsmittel, der Schwermaschinen u. a. Auch Werkstücke, die einen langwierigen Bearbeitungsprozeß vor sich haben, werden vorteilhafterweise zu Beginn der Fertigung einer Grobstrukturuntersuchung unterzogen.

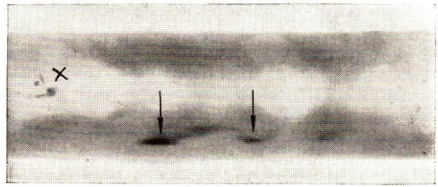
Zeigen sich im Röntgenbild des durchstrahlten Werkstückes helle Flecken, dann sind Gaseinschlüsse im Werkstoff, beispielsweise runde Gasblasen oder unregelmäßig geformte hohle Stellen in Gußstücken, die man als *Lunker* bezeichnet (Bild 110/1). Es ist klar, daß das Werkstück an diesen Stellen besonders der Bruchgefahr ausgesetzt ist.



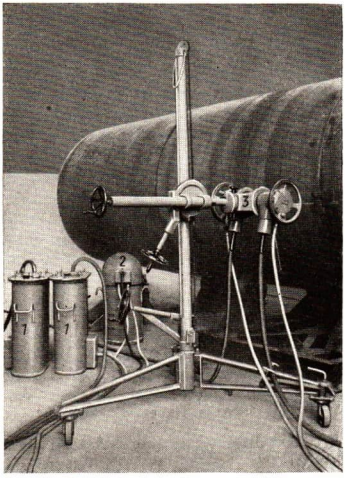
110/1 Lunker in einem Werkstück
Auf dem Röntgenfilm, der ein fotografisches Negativ liefert, heben sich die Gaseinschlüsse dunkel von der Umgebung ab

Feinere Risse im Werkstoff treten in der Röntgendurchleuchtung im allgemeinen nur undeutlich hervor. Dagegen liefert die Grobstrukturuntersuchung wertvolle Ergebnisse bei der Prüfung von *Schweißnähten*, wobei gut zu erkennen ist, ob die beiden Metallteile einwandfrei verbunden sind oder ob noch spaltenartige Hohlräume zwischen ihnen bestehen (Bild 110/2). Auch Schlacken und andere Abscheidungen innerhalb von Gußteilen sind im Röntgenbild zu erkennen.

Technische Röntgenanlagen für Grobstrukturuntersuchungen sind meist transportabel (Bild 111/1). Dadurch ist es möglich, auch Brückenkonstruktionen, Schweißnähte bei Hochseeschiffen, Druckgasleitungen und Großbehälter zu überprüfen.



110/2 Fehlerhafte Schweißnaht im Röntgenbild
× Lunker → schlechte Verbindung



111/1 Röntgenanlage aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden für Grobstrukturuntersuchungen
1 Hochspannungserzeuger
2 Ölkühlung
3 Stativ mit Röntgenröhre

4.5. Die Wellennatur der Röntgenstrahlung

4.5.1. Arten und Entstehung der Röntgenstrahlung

Schon RÖNTGEN hatte bei seinen Bemühungen, die Natur der neuentdeckten Strahlung zu erforschen, nach Beugungs- und Interferenzerscheinungen gesucht. Aber erst Jahrzehnte später gelang es, die Beugung von Röntgenstrahlen beim Durchgang durch einen sehr engen Spalt (Breite 5 μm bis 20 μm) nachzuweisen. Auch mit sehr feinen Beugungsgittern, auf die man die Röntgenstrahlung streifend auftreffen läßt, erhält man Interferenzerscheinungen. Die klarsten Interferenzen treten jedoch bei der Beugung an Kristallen auf, worauf wir im Abschnitt 4.5.3. (Seite 113) noch zu sprechen kommen werden. Auch Polarisationserscheinungen werden an Röntgenstrahlen beobachtet. Überhaupt zeigen die Versuche eine weitgehende Analogie zu den Lichtwellen und zu den Hertzschen Wellen (vgl. Bilder 32/1 bis 33/3). Aus allen Untersuchungen geht einwandfrei hervor:

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen.

- *Was ist das Wesen elektromagnetischer Wellen?*

Die Wellenlängen der Röntgenstrahlungen liegen zwischen etwa 10 nm und 10 pm.

- *Geben Sie die Vorsätze Mikro* (μ), *Nano* (n) *und Piko* (p) *in Zehnerpotenzen an!*[1]

Die unterschiedliche Härte (Durchdringungsfähigkeit) der Röntgenstrahlung hängt mit ihrer Wellenlänge zusammen. Die weiche Strahlung enthält vorwiegend Wellenlängen um 0,1 nm, während die harte Strahlung wesentlich kurzwelliger ist (um 0,01 nm = 10 pm).
Bei der Untersuchung der Röntgenwellen stellte sich heraus, daß sie sich aus zwei Anteilen zusammensetzen:

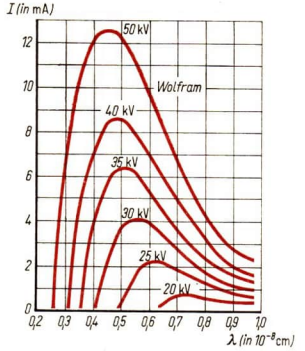
[1] Früher wurden die Wellenlängen meist in Ångström (Å) angegeben. 1 Ångström = 10 nm

Bremsstrahlung

Sie besteht aus Röntgenwellen, deren Wellenlängen sich *kontinuierlich* über einen großen Bereich erstrecken. Sie ist auf das Eindringen schnell fliegender Elektronen in die Atome der Anode zurückzuführen. Die Elektronen werden bei der Annäherung an den Atomkern sehr stark abgebremst und geben ihre kinetische Energie in Form der Röntgenstrahlung ab, die dabei entsteht. Näheres über die Vorgänge der Strahlungserzeugung im Atom erfahren Sie bei der Behandlung der atomistischen Struktur der stofflichen Materie.

- *Welcher mathematische Zusammenhang besteht zwischen angelegter Spannung und kinetischer Energie des durch die Spannung beschleunigten Elektrons?*

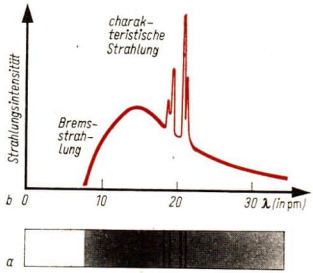
Die Zusammensetzung der Strahlung hängt nur von der an die Röntgenröhre gelegten Spannung, nicht vom Anodenwerkstoff ab (Bild 112/1).



112/1 Röntgen-Bremsstrahlung
Aus den Kurven ist abzulesen: Mit höherer Röhrenspannung wächst erstens die Gesamtintensität der Strahlung (= Fläche unter den Kurven), zweitens verschiebt sich das Maximum der Strahlung nach kürzeren Wellenlängen hin, d. h., die Strahlung wird härter, durchdringender

Charakteristische Strahlung

Sie ist der zweite Anteil der vom Brennfleck ausgehenden Röntgenstrahlung; sie liefert ein Linienspektrum, das dem kontinuierlichen Spektrum der Bremsstrahlung überlagert ist (Bild 112/2).
Die auftretenden Wellenlängen sind für den Werkstoff der Anode charakteristisch; daraus erklärt sich auch der Name der Strahlung. Beim Eindringen in die Atome der Anode treten die Elektronen in Wechselwirkung mit diesen und regen sie zur Eigenstrahlung an. Es läßt sich mit Hilfe absorbierender Metallschichten erreichen, daß die Strahlung praktisch nur eine Wellenlänge enthält; man spricht dann in Analogie zur Optik von *monochromatischer Strahlung* oder auch im übertragenen Sinne von *monochromatischem Röntgenlicht.*



112/2 Spektrum der Röntgenstrahlung einer Wolframanode bei 170 kV Spannung
a) Intensität als Schwärzung,
b) Intensität in einer grafischen Darstellung als Ordinate aufgetragen

Das charakteristische Röntgenspektrum weist Gesetzmäßigkeiten auf, die einen bedeutenden Beitrag zur Erforschung der Struktur der Materie leisteten.
Will man die charakteristische Strahlung nutzen, dann arbeitet man vorwiegend mit Röhrenspannungen von 20 bis 30 kV. Bei diesen Spannungen ist die zugleich erzeugte Bremsstrahlung noch nicht intensiv.
Zur Kennzeichnung der Röntgenstrahlen muß noch eine andere Unterscheidung getroffen werden:

Primärstrahlen

sind diejenigen Röntgenstrahlen, die vom Brennfleck ausgehen, die also von den mit großer Geschwindigkeit auftreffenden Elektronen ausgelöst werden.

Sekundärstrahlen

werden außerhalb der Röhre aus irgendwelchen Stoffen ausgelöst, wenn Röntgenstrahlung auf sie auftrifft.

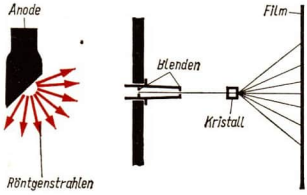
4.5.2. Die Beugung von Röntgenwellen in Kristallen

Im Jahre 1912 faßte der deutsche Physiker Max von Laue (1879 bis 1960) den Gedanken, *Kristalle zur Erzeugung von Röntgeninterferenzen* zu verwenden, da die Dimensionen der Kristallgitter in dieser Größenordnung liegen.

Versuch der Beugung von Röntgenwellen

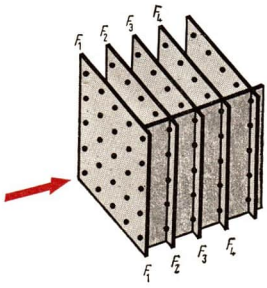
Durch zwei Lochblenden von etwa 1 mm Durchmesser, die im Abstand von einigen Zentimetern voneinander angeordnet sind, wird ein schmales Bündel Röntgenwellen ausgeblendet. Das Bündel durchstrahlt einen Kristall und trifft auf eine fotografische Schicht (Bild 113/1). Auf dem Film zeigen sich rund um den Schwärzungsfleck, den das direkte, unabgelenkte Bündel hervorruft, punktförmige *Beugungsbilder* in regelmäßiger Anordnung (Bild 113/2).

Zur Erklärung der Erscheinung gehen wir zunächst von einem Kreuzgitter aus. Es erzeugt von weißem Licht das auf Tafel IV dargestellte Beugungsbild. Um das Zustandekommen des Laue-Diagramms zu verstehen, müssen wir vom flächenhaften zum räumlichen Gitter übergehen (Bild 114/1).

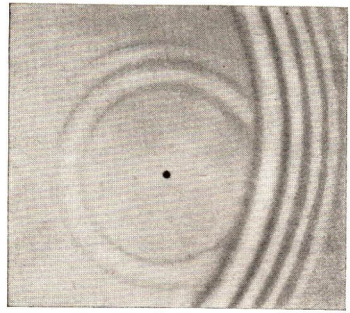


113/1


113/2 Beugung von Röntgenwellen beim Durchgang durch einen Kristall (Laue-Diagramm). Man nennt dieses Beugungsbild ein *Laue-Diagramm*. Es gibt einerseits Aufschluß über das Wesen der Röntgenwellen und andererseits über die Struktur des durchstrahlten Kristalls



114/1 Kristallgitter, vorgestellt als eine Folge paralleler Kreuzgitter F_1 bis F_n



114/2 Beugung einer Wasserwelle an einem punktförmigen Hindernis

Auf einen Unterschied des Kristallgitters gegenüber den optischen Gittern sei noch hingewiesen: Bei letzteren sind wir von den Gitteröffnungen ausgegangen, von denen aus sich die Elementarwellen ausbreiten.

Bei großen Zwischenräumen und kleinen Hindernissen, wie es in den Kristallen der Fall ist, geht man zur Erklärung besser von den Hindernissen aus. Sie wirken als Beugungszentren, an denen sich die Elementarwellen ausbilden. Man kann das durch einen Wellenwannenversuch modellartig wiedergeben (Bild 114/2).

Es stellt sich heraus, daß sich die in einem Raumgitter gebeugten Röntgenwellen nur in wenigen Richtungen verstärken. Diese Richtungen sind durch die Punkte des Laue-Diagramms gekennzeichnet. Zu jeder dieser Richtungen gehört eine bestimmte Wellenlänge der Bremsstrahlung, für die sich die an den unzähligen tiefgestaffelten Gitterpunkten gebeugten Wellen sämtlich verstärken.

- *Wie groß muß in diesem Falle der Gangunterschied zwischen den gebeugten Wellen sein?*

Es wurden noch zwei weitere wichtige Verfahren zur Beugung von Röntgenstrahlen in Kristallen entwickelt:

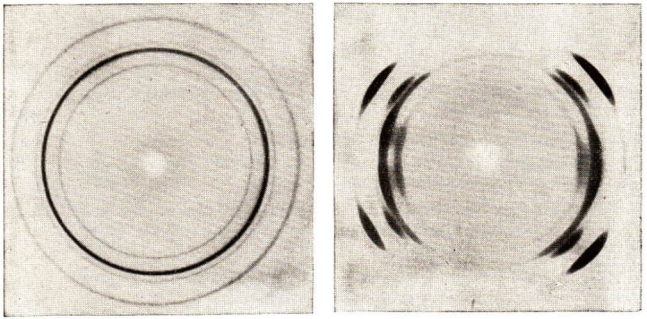
Das *Drehkristallverfahren*

unterscheidet sich vom Laue-Verfahren dadurch, daß monochromatische Röntgenstrahlung verwendet wird. Ein Kristall wird langsam gedreht. Bei dem sich stetig ändernden Einfallswinkel tritt verschiedentlich der Fall ein, daß sich alle an den Kristallbausteinen gebeugten Wellen in bestimmten Richtungen verstärken und an entsprechenden Stellen des Films Schwärzungen hervorrufen. In den übrigen Stellungen löschen sich, ähnlich wie bei der Beugung am Gitter, die gebeugten Wellen gegenseitig aus, weil ihr Gangunterschied $\Delta = n \cdot \lambda$ ist.

Das *Debye-Scherrer-Verfahren*

ist eine wichtige Abänderung des Drehkristallverfahrens. Benutzt man zur Beugung *pulverisierte Kristalle*, so kann man auf eine Drehung des Kristalles verzichten, denn

infolge der regellosen Lage der kleinen Kristallsplitter sind bereits alle Lagen des Kristalls zum Röntgenstrahl vorhanden. Das Verfahren bewährt sich vor allem bei der Untersuchung der Metalle, die nicht in großen, wohlausgebildeten Kristallen, in *Einkristallen*, vorkommen, sondern aus mikroskopisch kleinen Kristallkörnchen, aus *Kristalliten*, zusammengesetzt sind. Man braucht also nur einen Metalldraht an die Stelle des Drehkristalls zu bringen, wenn man Beugungserscheinungen erhalten will.
Die zu einem bestimmten Winkel gehörigen gebeugten Strahlenbündel bilden einen Kegelmantel.
Zum Unterschied von den Grobstrukturuntersuchungen hat man die Anwendungen der Interferenzerscheinungen von Röntgenwellen als *Feinstrukturuntersuchungen bezeichnet.*
Sie bieten dem Wissenschaftler die Möglichkeit, den kristallinen oder amorphen Zustand eines Stoffes, seine Kristallisationsform, die Abstände der Ionen, die das Kristallgitter bilden, und anderes mehr zu bestimmen. Darüber hinaus zeigen Feinstrukturuntersuchungen in vielen Fällen die durch die verschiedenen Erzeugungs- und Bearbeitungsverfahren hervorgerufenen Veränderungen der Stoffe, so daß sie dem Techniker ein wertvolles *Hilfsmittel zur Werkstoffprüfung* geworden sind (Bild 115/1).



a) *b)*

115/1 Debye-Scherrer-Aufnahmen von Kupfer a) Pulver, b) Blech

4.5.3. Zur Geschichte der Röntgenstrahlung

Im Jahre 1896 hielt RÖNTGEN einen Vortrag über die neuentdeckten Strahlen vor der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft. Zum Schluß wurde von den begeisterten Zuhörern der Vorschlag gemacht, die neuen Strahlen Röntgenstrahlen zu nennen.

Für seine hervorragenden wissenschaftlichen Leistungen wurde RÖNTGEN 1901 mit dem ersten Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Röntgens großes Verdienst besteht darin, daß er eine zufällige Beobachtung in ihrer Bedeutung richtig erkannte und durch zielstrebige Versuche die wichtigsten Eigenschaften der neuen Strahlen feststellte.

Nur einem Forscher mit großen Erfahrungen und einer sehr gründlichen Arbeitsmethode sind solche Entdeckungen möglich. Diese Eigenschaften besaß RÖNTGEN in hohem Maße. Er hat noch eine Reihe weiterer Entdeckungen auf anderen physikalischen Gebieten gemacht und gehört zu den bedeutendsten Physikern des 19. Jahrhunderts. RÖNTGEN stellte die Ergebnisse seiner Arbeit kostenlos zu Verfügung.

Eine zweite Periode in der Erforschung des Wesens und der Eigenschaften der Röntgenstrahlung begann mit den Beugungsversuchen in Kristallen. Hier ist vor allem der deutsche Forscher MAX VON LAUE zu nennen, der im Jahre 1912 als erster die Idee zu dieser Art Interferenzverfahren faßte. Er war mit ALBERT EINSTEIN befreundet und zählt ebenfalls zu den bedeutendsten Physikern. Er erhielt im Jahre 1914 den Nobelpreis für Physik. LAUE erkannte die gesellschaftliche Verantwortung der Wissenschaftler und trat stets für ihre Zusammenarbeit für friedliche Ziele ein. Er gehörte zu den Initiatoren des Göttinger Appells vom Jahre 1957 von 18 führenden westdeutschen Physik-Professoren gegen die westdeutsche Atomaufrüstung.

Zusammenfassung

1. Die Ionenröntgenröhren sind spezielle Gasentladungslampen mit kalter Katode.

Wo und wodurch entsteht die Röntgenstrahlung?

2. Moderne Röntgenröhren arbeiten mit Glühkatode.

Welche Vorteile hat dies?
Welche speziellen Formen kennen Sie?

3. Die Durchdringungsfähigkeit (Härte) der Strahlung hängt von ihrer mittleren Wellenlänge ab.

In welcher Weise hängen Härte und Wellenlänge zusammen?
Wie hängen beide von der Röhrenspannung ab?

4. In der Medizin wird die Röntgenstrahlung einmal wegen ihrer Durchdringungsfähigkeit, zum anderen wegen ihrer Wirkung auf Körperzellen angewandt.

Wie heißen die entsprechenden Verfahren?
Was versteht man unter Strahlenschutz?

5. Die Röntgen-Grobstrukturuntersuchung ist ein Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

Welche Untersuchungen sind mit diesem Verfahren möglich?

6. Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen.

Welche Wellenlängen umfassen sie?

7. Auf der Beugung der Röntgenstrahlung in Kristallen beruhen die Feinstrukturuntersuchungen.

Wie erhält man ein Laue-Diagramm?
Welche Feststellungen erlauben die Röntgeninterferenzen?

5. Das elektromagnetische Spektrum



Die Sonne und die übrigen Fixsterne senden außer der Lichtstrahlung auch Hertzsche Wellen aus. Diese Tatsache führte zu einem neuen Zweig der Astronomie, zur Radioastronomie.
Das Radioteleskop des Heinrich-Hertz-Instituts der Deutschen Akademie der Wissenschaften hat einen Durchmesser von 26 Metern. Die Radioastronomie hat wertvolle Beiträge zur Erforschung von Fixsternen geleistet; darüber hinaus konnten unsichtbare Himmelskörper festgestellt werden, die ausschließlich Hertzsche Wellen aussenden.

5.1. Die elektromagnetische Natur der Lichtwellen

Die Maxwellschen Voraussagen über das Vorhandensein elektromagnetischer Wellen schlossen die Behauptung ein, auch die Lichtwellen seien elektromagnetischer Natur. Um dies nachzuprüfen, werden die *Eigenschaften* von Lichtwellen und Hertzschen Wellen miteinander verglichen. Man erkennt dabei Übereinstimmungen in wesentlichen Punkten:

1. Beide Wellenarten sind nicht an stoffliche Medien gebunden, sie breiten sich auch im Vakuum aus.
2. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen im Vakuum beträgt in beiden Fällen nahezu 300 000 km · s^{-1}.
3. Metalle sind (mit Ausnahme dünnster Schichten) für beide Wellenarten undurchlässig.
4. Beim Übergang vom Vakuum in einen Isolator werden beide Wellenarten zum Einfallslot hin gebrochen. Die Brechzahlen stimmen in vielen Fällen sehr genau überein.

Die Maxwellsche Theorie ergibt für die Brechung elektromagnetischer Wellen einen Zusammenhang zwischen der Brechzahl und der Dielektrizitätskonstanten eines Stoffes:

$$n = \sqrt{\varepsilon}\,.$$

Die Tabelle 5 enthält für einige Stoffe die aus optischen Messungen gewonnenen Werte des Brechungsindex n, daneben jeweils die Größe $\sqrt{\varepsilon}$:

Tabelle 5: Vergleich des Brechungsindex mit der Wurzel der Dielektrizitätskonstanten einiger Stoffe

	n	$\sqrt{\varepsilon}$
Luft	1,000294	1,000295
Wasserstoff	1,000138	1,000132
Benzol	1,482	1,483
Petroleum	1,386	1,39

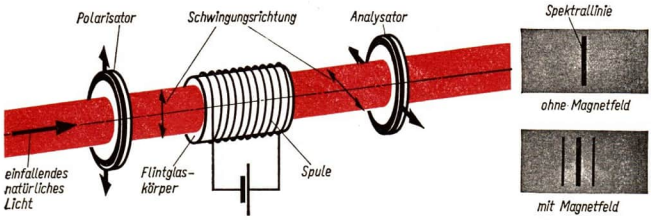
Abweichungen, die in anderen Fällen auftreten, können durch weiterführende Überlegungen erklärt werden.
Auf dieser Grundlage kann nunmehr bestätigt werden:

Lichtwellen sind elektromagnetische Wellen, die sich von den Hertzschen Wellen nur durch die wesentlich kleinere Wellenlänge unterscheiden.

Zur Erklärung der elektromagnetischen Natur der Lichtwellen werden häufig zwei Versuche herangezogen:

1. Die Beeinflussung einer *Lichtwelle* durch ein magnetisches Feld wurde erstmalig von FARADAY beobachtet (Bild 118/1).
2. Der holländische Physiker ZEEMAN konnte 1896 nachweisen, daß auch die *Lichtquelle* durch ein magnetisches Feld beeinflußbar ist (Bild 118/2).

Der Zeemann-Effekt deutet darauf hin, daß auch die Lichtwellen von schwingenden elektrischen Dipolen ausgehen, die sich nur wegen ihrer Kleinheit einer direkten Beobachtung entziehen.



118/1 Faraday-Effekt

Linear polarisiertes Licht wird durch Flintglas oder einen anderen geeigneten Stoff geleitet. Dieser befindet sich in einem Magnetfeld. Die Richtung der magnetischen Feldstärke stimmt mit der Lichtrichtung überein. Man beobachtet eine Drehung der Polarisationsebene wie bei einer optisch aktiven Substanz. Der Drehwinkel ist der magnetischen Feldstärke proportional

118/2 Zeeman-Effekt

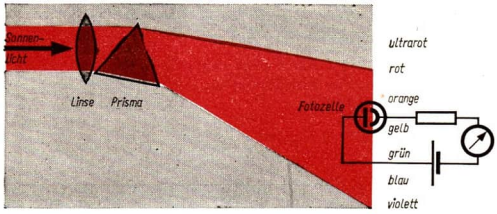
Ein glühendes Gas, das ein Linienspektrum aussendet, befindet sich in einem starken Magnetfeld. Es ist daraufhin eine *Aufspaltung* der Spektrallinien zu beobachten. Beiderseits der ohne Magnetfeld sichtbaren Einzellinie treten in symmetrischer Anordnung zwei oder auch mehrere zusätzlicher Linien geringerer Intensität auf

5.2. Die ultrarote Strahlung

Die Bereiche der Hertzschen Wellen (kleinste bisher beobachtete Wellenlänge $8 \cdot 10^{-5}$m) und der Lichtwellen (größte Wellenlänge $7{,}6 \cdot 10^{-7}$ m) grenzen nicht unmittelbar aneinander. Die Lücke zwischen beiden Bereichen entsteht dadurch, daß das menschliche Auge elektromagnetische Wellen mit einer größeren Länge als $7{,}6 \cdot 10^{-7}$ m nicht mehr wahrnimmt. Dies ist nachzuweisen, wenn statt des Auges eine Fotozelle zur Untersuchung eines Spektrums herangezogen wird.

Versuch zum Nachweis unsichtbarer Strahlung mit Hilfe des Fotoeffekts

Mit einem Prisma wird das Spektrum von Sonnenlicht oder Bogenlicht erzeugt. Durch dieses Spektrum wird vom violetten zum roten Ende hin eine Fotozelle bewegt, die über einen Strommesser und einen Schutzwiderstand mit der Spannungsquelle verbunden ist. Das Meßinstrument zeigt auch noch einen Strom an, wenn sich die Fotozelle bereits jenseits der roten Grenze des Spektrums befindet. (Bei dem Versuch muß eine rotempfindliche Fotozelle verwendet werden.)



119/1 Untersuchung eines Spektrums mit Hilfe einer Fotozelle

Aus dem Ergebnis des Versuchs ist zu schließen:

Ein glühender Körper sendet außer dem sichtbaren Licht eine unsichtbare Strahlung aus. Diese schließt sich an die rote Grenze des sichtbaren Spektrums an und wird daher *ultrarote* oder *infrarote Strahlung* sowie auch *ultrarotes Licht* genannt.

Große Teile der ultraroten Strahlung werden von Glas, Wasser und vielen anderen durchsichtigen Stoffen absorbiert. Andererseits gibt es auch undurchsichtige Filter, z. B. aus manganhaltigem Glas, die für ultrarote Strahlung durchlässig sind. Das ist mit der soeben beschriebenen Versuchsanordnung nachzuweisen:
Man schickt das Licht vor der Zerlegung durch stärkere Glasplatten, wassergefüllte Küvetten usw. Dadurch vermindert sich jeweils der im ultraroten Bereich des Spektrums hervorgerufene Fotostrom.
Kristalle aus Steinsalz und anderen Stoffen absorbieren in bestimmten Bereichen der Wellenlänge nur geringe Teile der ultraroten Strahlung. Aus solchen Kristallen werden daher Prismen und Linsen für diesen Spektralbereich hergestellt.

Zum Nachweis der ultraroten Strahlung kann auch die bei der Absorption frei werdende Wärme benutzt werden:

Versuch zum Nachweis unsichtbarer Strahlung mit Hilfe der Wärmeabsorption

Ein Bündel Sonnenlicht wird mit einer Sammellinse auf das Gefäß eines Thermometers konzentriert. Die Temperatur steigt daraufhin sehr schnell an. Auch wenn jetzt mit Hilfe eines Filters der sichtbare Teil des Lichtes abgetrennt wird, beobachtet man noch eine raschere Temperaturzunahme.

Aus solchen und anderen Versuchen konnte gefolgert werden:

Die von einem heißen Körper ausgehende Wärmestrahlung besteht vorwiegend aus ultraroter Strahlung

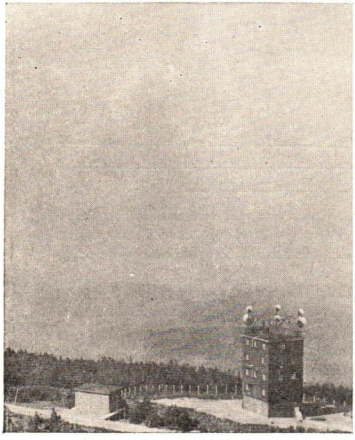
Bei niedrigen Temperaturen sendet ein Körper nur ultrarote Strahlung aus. Mit wachsender Temperatur entfällt ein immer größerer Teil der ausgestrahlten Energie auf das sichtbare Licht.

Die Wärmeübertragung durch ultrarote Strahlung wird in sehr vielseitiger Weise technisch genutzt. Es wurden besondere Strahlungsquellen für diesen Spektralbereich entwickelt, die Sie in Klasse 8 kennengelernt haben.

- *Beschreiben Sie den Aufbau eines Hellstrahlers und eines Dunkelstrahlers!*
- *Erläutern Sie Anwendungen der Ultrarottechnik in Industrie und Landwirtschaft!*

120/1 Fernaufnahme a) sichtbares Licht b) Ultrarotlicht

a)



b)



Fotografische Schichten können durch besondere Verfahren auch für ultrarotes Licht empfindlich gemacht werden. Bei der *Ultrarot-Fotografie* wird das sichtbare Licht durch ein Filter vom Objektiv ferngehalten. Man erzielt ausgezeichnete Fernaufnahmen, da das ultrarote Licht von den Trübungen in der Atmosphäre weniger als das sichtbare Licht gestreut wird (Bild 120/1).

In jüngerer Zeit ist es gelungen *Ultrarot-Bildwandler* herzustellen. Diese wandeln das mit ultrarotem Licht erzeugte Bild in ein sichtbares Bild um. Ultrarot-Bildwandler haben in Verbindung mit Ultrarot-Scheinwerfern große Bedeutung in der modernen Militärtechnik.

5.3. Die ultraviolette Strahlung

Das Spektrum des Sonnen- und Bogenlichtes erstreckt sich auch über die violette Grenze des sichtbaren Bereichs hinaus.

Versuch zum Nachweis unsichtbarer Strahlung jenseits der violetten Grenze

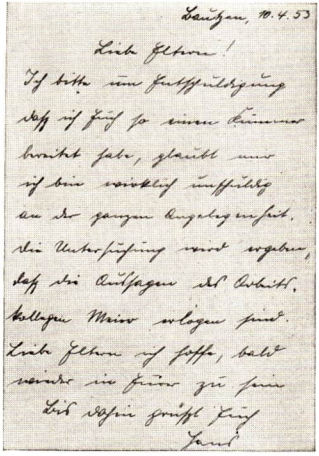
Mit Hilfe eines Prismas wird ein Sonnenspektrum auf einen Schirm projiziert, der mit einer Leuchtstoffschicht versehen ist. Man beobachtet, daß der Schirm noch jenseits der violetten Grenze des Spektrums aufleuchtet. Dieses Leuchten zeigt an, daß dort eine Strahlung auftritt, die von unserem Auge nicht mehr wahrgenommen wird. Der Leuchtstoff hat die Eigenschaft, diese unsichtbare Strahlung in sichtbares Licht umzuwandeln.

An das sichtbare Spektrum schließt sich jenseits der violetten Grenze die *ultraviolette Strahlung*, auch ultraviolettes Licht genannt, an. Die ultraviolette Strahlung, abgekürzt *UV-Strahlung*, besteht somit aus elektromagnetischen Wellen mit kleinerer Wellenlänge als sie das sichtbare Licht besitzt.
Diese Strahlung ist auch mit bestimmten Fotozellen und fotografischen Schichten nachweisbar. Einen hohen UV-Anteil enthält das Bogenlicht und besonders das Licht der Quecksilberdampflampe. Die UV-Strahlung wird in normalem Glas weitgehend absorbiert, von Spezialglas, sogenanntem Uviolglas, und Quarzglas aber durchgelassen. Der ultraviolette Anteil des Sonnenlichts hat für den Vitaminhaushalt des menschlichen Körpers große Bedeutung. Diese Strahlung veranlaßt die Bildung des antirachitischen Vitamins D.

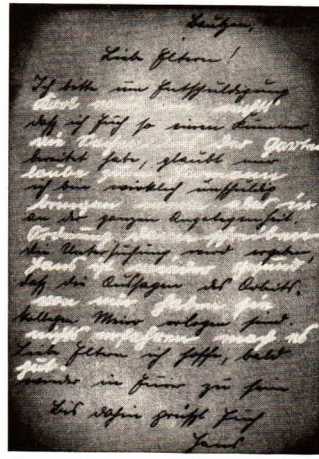
Das Bräunen der Haut ist eine Schutzreaktion gegenüber der UV-Strahlung.
Zu kräftige UV-Strahlung führt zu Schädigungen der Haut in Form des Sonnenbrandes und vor allem zu Augenentzündungen.

- *Wie wird die Gefährdung durch UV-Strahlung beim Arbeitsschutz berücksichtigt?*
- *Welche Eigenschaften müssen die Gläser von Sonnenbrillen besitzen?*

Die UV-Strahlung hat in der Kriminalistik eine gewisse Bedeutung erlangt, da viele Stoffe ähnlich wie der im Versuch verwendete Leuchtstoff durch UV-Strahlen zur Aussendung sichtbaren Lichts veranlaßt werden (Bild 122/1).



a)



b)

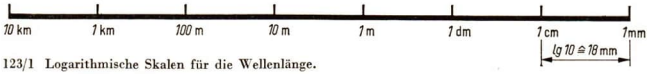
122/1 Mit Geheimtinte beschriebenes Schriftstück a) im normalen b) im UV-Licht

5.4. Das elektromagnetische Spektrum

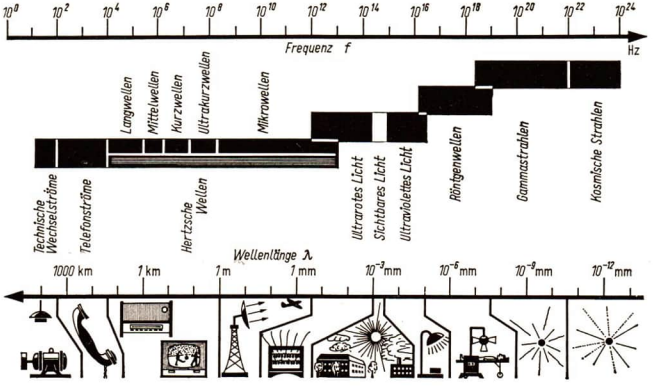
Die elektromagnetischen Wellen können nach ihrer Wellenlänge in einem *einheitlichen System* geordnet werden. Dieses wird **elektromagnetisches Spektrum** genannt: Das optische Spektrum ist ein Teil des elektromagnetischen Spektrums.
Der russische Physiker LEBEDEW (1886 bis 1918) führte zur Darstellung dieses elektromagnetischen Spektrums logarithmische Skalen für die Wellenlängen und Frequenzen ein. Diese Skalen wurden bereits bei der Darstellung des Bereichs der Hertzschen Wellen auf Seite 34 verwendet. Sie haben den Vorteil, daß Veränderungen einer Größe um mehrere Zehnerpotenzen sehr übersichtlich wiedergegeben werden (Bild 123/1).



122/2 PETER NIKOLAJEWITSCH LEBEDEW



123/1 Logarithmische Skalen für die Wellenlänge.
Gemäß dem Zusammenhang $\lg 10\,x = \lg x + \lg 10$ bedeutet ein Fortschreiten um die Strecke $\lg 10 \leqq 18$ mm eine Verzehnfachung der Wellenlänge



123/1 Das elektromagnetische Spektrum
Die kleinen Bilder am Fuße der Darstellung deuten symbolisch die Hauptverwendungen bzw. Hauptgeltungsbereiche der Wellenarten an

In das elektromagnetische Spektrum (Bild 123/1) wurden am langwelligen Ende die technischen Wechselströme und tonfrequenten Ströme einbezogen, da auch diese mit der Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle längs eines Leiters verbunden sind. Der darauffolgende Bereich der Hertzschen Wellen überdeckt sich teilweise mit dem des ultraroten Lichts. (Im Lichte von Quecksilberdampflampen findet man einen Ultrarotanteil mit 1,3 mm Wellenlänge.)
Das sichtbare Licht ist ein nur sehr schmaler Ausschnitt des gesamten elektromagnetischen Spektrums. Das kurzwellige UV-Licht hat die gleichen Eigenschaften wie die langwellige Röntgenstrahlung. Hieraus ist zu schließen, daß auch die Röntgenwellen dem Spektrum der elektromagnetischen Wellen angehören. Dies wird auch durch andere Ergebnisse bestätigt. Die nachfolgenden Gammastrahlen entstehen bei Atomkernumwandlungen; noch kleinere Wellenlängen treten in der kosmischen Strahlung auf, die von anderen Himmelskörpern zur Erde gelangt.
Unsere Kenntnisse über das elektromagnetische Spektrum sind bis in die jüngste Zeit hinein ständig erweitert worden.

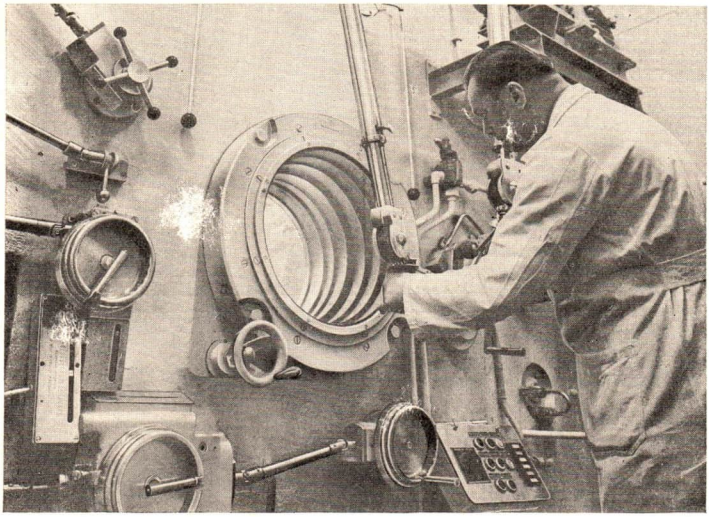
So gelang es z. B. in den letzten Jahren den **Laser**, eine Lichtquelle mit völlig neuartigen Eigenschaften, zu entwickeln.
Laser ist eine Abkürzung für *Light amplifier by stimulated emission of radiation* (Lichtverstärker durch angeregte Emission von Strahlung).
Im Laser wird erreicht, daß ein großer Teil der Atome eines Festkörpers oder eines Gases gleichzeitig Licht einer einheitlichen Wellenlänge aussendet, sobald dieser Körper mit einer herkömmlichen Lichtquelle bestrahlt wird.
Der Laser strahlt Lichtbündel aus, deren Öffnungswinkel kleiner als eine Winkelminute gehalten werden kann. Dadurch ist es möglich, mit Hilfe der Laserstrahlung eine große Strahlungsenergie auf kleinste Flächen zu konzentrieren.
Es gibt bereits eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten der Laserstrahlung auf verschiedensten Gebieten der Wissenschaft und Technik, zum Beispiel

Übermitteln von Lichtsignalen zu anderen Himmelskörpern.
(Es gelingt, noch in der Entfernung des Mondes Gebiete von nur wenigen hundert Metern Durchmesser zu bestrahlen.)
Schmelzen von Hochtemperaturwerkstoffen.
Feinste Punktschweißungen bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen.

Eine Perspektive der Anwendungen besteht darin, Laserstrahlung zu modulieren; dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten für die Nachrichtenübermittlung.

Fragen, Aufgaben

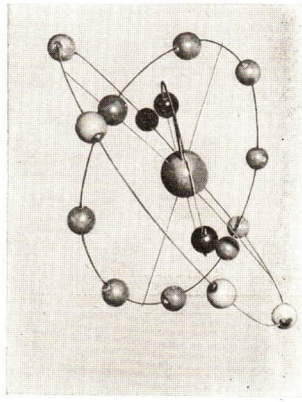
1. Nennen Sie Möglichkeiten, wie man gleiche Eigenschaften Hertzscher Wellen und Lichtwellen nachweisen kann!
2. Worin besteht der wesentliche Unterschied zwischen Hertzschen Wellen und Lichtwellen?
3. Wie kann die elektromagnetische Natur der Lichtwellen nachgewiesen werden?
4. Nennen Sie Eigenschaften der ultraroten Strahlung!
5. Nennen Sie Eigenschaften der ultravioletten Strahlung!
6. Suchen Sie Beispiele für die technische Nutzung der Wellenarten des elektromagnetischen Spektrums!



Die atomistische Struktur der stofflichen Materie

Die Frage nach dem Entstehen, Sein und Vergehen hat die Menschheit von jeher beschäftigt; zunächst ist darauf vielfältig, oftmals mystisch und dunkel geantwortet worden. Erst mit dem Erkennen des Aufbaus der stofflichen Materie konnte diese Frage, beginnend mit den Deutungsversuchen griechischer Philosophen, in immer präziserer Weise beantwortet werden. Forscher haben den Aufbau der stofflichen Materie aus kleinsten Teilen nachgewiesen. Gleichzeitig wurden Eigenschaften dieser kleinsten Teile erkannt und den Menschen nutzbar gemacht. So zeigt unser Bild, wie mit Hilfe des Manipulators mit strahlungsaktiven Präparaten hantiert werden kann; die Arbeiten werden durch ein 70 cm dickes Bleiglasfenster beobachtet. Strahlungsaktive Präparate werden in vielen Gebieten der Technik und Medizin eingesetzt; sie sind Errungenschaften der modernen Kerntechnik, über die Ihnen in den kommenden Abschnitten bei der Behandlung der Atomhülle und des Atomkerns ein Überblick gegeben wird.

1. Die Atomhülle



Schon in der Klasse 8 haben Sie das Modell eines Atoms in einfacher Weise kennengelernt. Es ist heute allgemein bekannt, daß jedes Atom aus einem Kern besteht, um den sich Elektronen bewegen. Im Chemieunterricht wurden z. B. die Elektronenbindungen besprochen. Es liegt nahe, daß die Forschung sich zunächst mit der Elektronenhülle befaßte. Sie ist leichter zugänglich als der Kern.

1.1. Erste Hinweise auf die Existenz von Molekülen und Atomen

1.1.1. Der Atombegriff im Altertum und Mittelalter

Um das ewige Werden und Vergehen in der Natur zu verstehen, wurde von den griechischen Denkern LEUKIPP und seinem bekannteren Schüler DEMOKRIT (um 400 v. d. Z., Bild 126/2) die Lehre von den Atomen, die Atomistik, geschaffen.

DEMOKRIT nahm rein spekulativ an, daß es im leeren Raume unendlich viele Stoffteilchen gibt, die qualitativ gleich, der Gestalt nach verschieden sind. Er nannte sie *Atome*, d. h. Unteilbare. Sie sind unveränderlich und wegen ihrer Kleinheit mit den Sinnen nicht wahrnehmbar. Die Mannigfaltigkeit der Welt erklärte DEMOKRIT aus der verschiedenen Gestalt und der verschiedenen Anordnung der Atome in den Körpern. Alles Werden ist nach seiner Ansicht nur eine lokale, d. h. örtliche Veränderung der Atome. Qualitätsunterschiede sind nur Unterschiede der Quantität und der räumlichen Verhältnisse.



126/2 DEMOKRIT

Eine Möglichkeit experimenteller Untersuchungen war in den frühen Zeiten nicht gegeben, denn die körperliche Arbeit, die den Sklaven zufiel, wurde in der Antike verachtet. Außerdem fehlten auch die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen, um eine solche Theorie wie die Atomistik experimentell zu überprüfen. Denn die alten Griechen betrachteten die Welt in ihrem Gesamtzusammenhang als Ganzes und kamen spekulativ zu ihren Theorien. Experimente im eigentlichen Sinne waren erst möglich, als man begann, die Welt in ihren einzelnen Teilen zu betrachten, zu klassifizieren und zu systematisieren.

EPIKUR hatte um 300 v. d. Z. die Lehre Demokrits aufgegriffen und weiter entwickelt. In einem großen lateinischen Lehrgedicht „Von der Natur der Dinge" wurde sie uns von LUCRETIUS CARO (55 v. d. Z.) ausführlich überliefert. Viele Jahrhunderte vergingen, bis die Atomistik wieder beachtet wurde. BACO VON VERULAM (1561 bis 1626), ein englischer Staatsmann und Denker, vertrat die Ansicht, daß sich ohne die Annahme von Atomen die Natur nicht erkennen lasse. Der französische Physiker PETRUS GASSENDI (1592 bis 1655) erneuerte die Lehre Epikurs. Der große englische Gelehrte ISAAC NEWTON (1643 bis 1724) hat sich die Lehre von den Atomen nach der Darstellung Gassendis zu eigen gemacht. Auch der bedeutende russische Naturforscher MICHAEL WASSILJEWITSCH LOMONOSSOW (1711 bis 1765) hatte klare Vorstellungen über das Vorhandensein von Atomen. Er unterschied bereits die Atome, die er Elemente nannte, von den von ihm als *Korpuskeln* bezeichneten *Molekülen*.

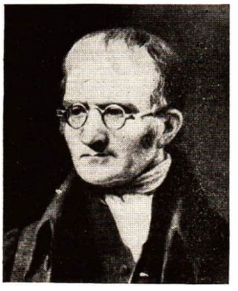
1.1.2. Der Daltonsche Atombegriff

Ein großer Fortschritt in der auf Erfahrung begründeten Erkenntnis des Aufbaus der Materie kam im 18. Jahrhundert von der Chemie. Eine Reihe bedeutender Forscher hatte eine große Zahl von Stoffen genau untersucht und dabei auch die Mengen ihrer Bestandteile ermittelt. Die im 18. Jahrhundert entdeckten Gase, z. B. der Sauerstoff der Luft, der Wasserstoff und der Stickstoff, förderten die Erkenntnis, daß bestimmte, bei den Versuchen immer wieder aufgefundene Stoffe in festen *Gewichtsverhältnissen* die Materie aufbauen.

Von JOHN DALTON (1766 bis 1844, Bild 127/1) wurde das „Gesetz der multiplen Proportionen" der zu Verbindungen zusammentretenden Mengen der Grundstoffe ausgesprochen.

Beispiel

Zwei Elemente vereinigen sich zu einer chemischen Verbindung in einem bestimmten Gewichtsverhältnis (Gesetz der konstanten Proportionen).



127/1 J. DALTON

Zwei Elemente können sich auch zu mehreren unterschiedlichen Verbindungen vereinigen. Dargestellt werden Verbindungen von Stickstoff N und Sauerstoff O:

N_2O (Distickstoffmonoxid) Gewichtsverhältnis $\frac{O}{N} = \frac{16}{28} = \frac{0{,}571}{1} = \frac{(1 \cdot 0{,}571)}{1}$

NO (Stickstoffmonoxid) Gewichtsverhältnis $\frac{O}{N} = \frac{16}{14} = \frac{1{,}142}{1} = \frac{(2 \cdot 0{,}571)}{1}$,

N_2O_3 (Distickstofftrioxid) Gewichtsverhältnis $\frac{O}{N} = \frac{48}{28} = \frac{1{,}713}{1} = \frac{(3 \cdot 0{,}571)}{1}$

NO_2 (Stickstoffdioxid) Gewichtsverhältnis $\frac{O}{N} = \frac{32}{14} = \frac{2{,}286}{1} = \frac{(4 \cdot 0{,}571)}{1}$.

Bei diesen Verbindungen stehen die mit den gleichen Mengen Stickstoff verbundenen Sauerstoffmengen untereinander im Verhältnis von 1:2:3:4; bilden also zwei Elemente mehrere Verbindungen, so stehen die unterschiedlichen Gewichtsverhältnisse im Verhältnis einfacher ganzer Zahlen zueinander (Gesetz von den multiplen Proportionen).

Daltons unvergängliche Leistung ist es, die Verbindungsgesetze durch die Atomhypothese (1807) anschaulich verständlich gemacht zu haben.

Jedes Element besteht danach aus einer sehr großen Anzahl kleinster, gleicher und unveränderlicher Massenteilchen, die DALTON nach antikem Vorbild Atome nennt.

Es gelang bereits DALTON, eine erste Atomgewichtstabelle aufzustellen, für die er das Gewicht des leichtesten Atoms, des Wasserstoffatoms, als Einheit wählte. So wurde eine wesentliche Grundlage für die Kenntnis der Struktur der stofflichen Materie geschaffen.

Daltons **Atomhypothese** umfaßt folgende Aussagen:

1. Jedes Element besteht aus unzerstörbaren Atomen.
2. Alle Atome des gleichen Elements haben gleiche Größen und gleiche Massen.
3. Die chemischen Verbindungen entstehen durch Vereinigung von Atomen verschiedener Elemente.

1.1.3. Hinweise aus den Gesetzen der Elektrolyse — Die Elementarladung

Mit der Daltonschen Atomhypothese wurde, in enger Verbindung mit experimenteller Erfahrung, ein Vorstoß in ein Gebiet gewagt, das den Sinnen nicht ohne weiteres zugänglich ist. Auf ihrer Grundlage hat sich allmählich eine *Atomtheorie* entwickelt, die sich ohne Ausnahme bewährte. Die Atome sind heute genau so gesicherte Realität wie die sinnlich unmittelbar wahrnehmbaren Dinge. Den Weg, der zu diesem Ziele geführt hat, lernen wir nun kennen.

Der große englische Physiker MICHAEL FARADAY (1791 bis 1867) hat 1833 Untersuchungen über die bei der *Elektrolyse* abgeschiedenen Stoffmengen angestellt.

● *Erläutern Sie den Vorgang der Elektrolyse, den Sie in der Klasse 9 kennengelernt haben!*

Im Jahre 1881 hat HELMHOLTZ als erster eine damals überraschende Folgerung gezogen:

> *„Wenn wir Atome der chemischen Elemente annehmen, so können wir nicht umhin, weiter zu schließen, daß auch die Elektrizität, positive wie negative, in bestimmte elementare Quanta geteilt ist, die sich wie Atome der Elektrizität verhalten."*

Die Begründung für diese Meinung ist folgende: Nach dem *ersten Faradayschen Gesetz* ist die elektrolytisch abgeschiedene Menge eines Elements der Ladungsmenge proportional, somit muß jedes Ion die gleiche Ladungsmenge tragen. Nach dem *zweiten Gesetz* scheidet die Einheit der Elektrizitätsmenge aus den einwertigen Stoffen solche Mengen ab, die sich wie die Atomgewichte dieser Stoffe verhalten. Jedes einwertige Atom irgend eines Elements muß daher die gleiche Ladung haben. Man kann sie Einheitsladung nennen. Da die Einheit der Elektrizitätsmenge aus zwei- oder dreiwertigen Stoffen die Hälfte oder ein Drittel der genannten Stoffmenge abscheidet, müssen zwei- bzw. dreiwertige Atome zwei bzw. drei Einheitsladungen tragen.
Der Schluß, den HELMHOLTZ gezogen hat, erwies sich als richtig. Es wurde bald möglich, die Größe der *elektrischen Elementarladung* zu bestimmen. Aus Messungen bei der Elektrolyse hat FARADAY die sogenannte

Faradaysche Konstante zu

$$9{,}65 \cdot 10^7 \, \frac{\text{As}}{\text{Kilomol}}$$

ermittelt.

Damit wird gesagt: Eine Ladung von $9{,}65 \cdot 10^7$ As scheidet bei der Elektrolyse an einer Elektrode ein kg-Äquivalent

$$\left(= \frac{\text{Kilomol}}{\text{Wertigkeit}}\right) \text{ab.}$$

Wenn die Zahl der Atome in einem kg-Äquivalent bekannt wäre, so ließe sich die Ladung eines Atoms bestimmen. Die Zahl der in einem Kilomol irgendeines Stoffes enthaltenen Atome ist erstmals 1865 von dem österreichischen Physiker J. LOSCHMIDT (1821 bis 1895) annähernd berechnet worden.

- *Erläutern Sie die Loschmidtsche Zahl, die Sie im Zusammenhang mit der kinetischen Gastheorie in der Klasse 10 kennengelernt haben!*

Der Wert der Loschmidtschen Zahl ergibt sich zu

$$L = 6{,}02 \cdot 10^{26} \text{ Atome je kg-Mol.}$$

Die elektrische Elementarladung e wird ermittelt zu

$$e = \frac{9{,}65 \cdot 10^7}{6{,}02 \cdot 10^{26}} \text{ As}$$

$$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ As.}$$

Die elektrische Elementarladung hat den Wert $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As.

Beispiel

R. A. MILLIKAN (1868 bis 1953) brachte feinst zerstäubte Öltröpfchen zwischen die Platten eines Kondensators mit senkrecht verlaufenden Feldlinien. Ohne elektrisches Feld fallen die Tröpfchen langsam mit konstanter Geschwindigkeit zu Boden. Wird die Luft ionisiert (z. B. durch Röntgenbestrahlung), so lagern sich Ionen an die Tröpfchen an. Durch geeignete elektrische Feldstärke kann man diese zum Schweben, Steigen oder Fallen bringen. Daraus läßt sich die elektrische Ladung berechnen:

Schweben die Tröpfchen, dann gilt

$$m \cdot g = Q \cdot E \,.$$

Darin bedeuten

m: die Masse der Öltröpfchen (sie wird aus der Öldichte und dem mikroskopisch ermittelten Tröpfchendurchmesser berechnet),

g: die Fallbeschleunigung,

Q: die Elektrizitätsmenge (elektrische Ladung),

E: die elektrische Feldstärke.

In der Klasse 9 erfuhren Sie beim Plattenkondensator, daß

$$E = \frac{U}{s} \text{ und demnach}$$

$$Q = \frac{m \cdot g \cdot s}{U} \text{ ist.}$$

Bei der Bestimmung von $m \cdot g$ mißt man mikroskopisch den Tropfenradius r und berücksichtigt mit den Dichten von Öl und Luft (ϱ und ϱ') den Auftrieb:

$$m \cdot g = \frac{4}{3} \pi r^3 (\varrho - \varrho') \,.$$

Es sind stets nur Vielfache einer kleinsten Ladungsmenge $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As gefunden worden.

1.1.4. Hinweise aus der kinetischen Wärmetheorie

Von einer ganz anderen Seite kamen Hinweise auf die Existenz von Atomen und aus ihnen aufgebauten Molekülen. Die Frage nach der Natur der *Wärme* hat die Wissenschaft schon seit langem interessiert. Die Wärme wurde von vielen für einen *gewichtslosen Stoff* gehalten. Erfahrungen beim Hämmern von Metallen, die dadurch warm wurden, beim Feuerschlagen mit alten Feuerzeugen führten aber schon im 17. Jahrhundert zu der Vermutung, daß ein Zusammenhang zwischen Wärme und Bewegung bestehe. Im 19. Jahrhundert wurde von bedeutenden Physikern die *mechanische Wärmetheorie* entwickelt, nach der die Wärme als die kinetische Energie der ungeordneten Bewegung von Molekülen bzw. Atomen aufgefaßt wird. Es gelang mit dieser Betrachtungsweise, das *Boyle-Mariottesche Gesetz* und die *allgemeine Gasgleichung*, die durch die Erfahrung gesichert waren, theoretisch herzuleiten. Die Abhängigkeit des Gasdrucks von der Temperatur beruht danach auf größerer Geschwindigkeit der Atome bzw. Moleküle mit steigender Temperatur. Auch die Wärmeleitung und die

innere Reibung der Gase konnten auf Energie und Impuls dieser Teilchen zurückgeführt werden. Besonders überzeugend für die Realität der Moleküle war die Erklärung der *Brownschen Bewegung.*

- *Erläutern Sie die Brownsche Bewegung!*

Die Bestimmung der Loschmidtschen Zahl

Eine der wichtigsten *Konstanten* der Physik, nämlich die Zahl der in 1 kg-Atom oder 1 kg-Mol enthaltenen Atome bzw. Moleküle zu berechnen, gelang dem schon erwähnten J. LOSCHMIDT. Er verwandte dazu Annahmen und Ergebnisse der kinetischen Gastheorie. Seither sind viele andere und genauere Methoden entwickelt worden. Eine Möglichkeit, die Menge kleinster Teilchen *abzuschätzen*, zeigt folgendes

Beispiel

Man stellt eine Lösung von 1 Teil Triolein $C_3H_5\,(C_{17}H_{33}COO)_3$, das ist eine ölige Flüssigkeit, in tausend Teilen niedrig siedendem Leichtbenzin her und bringt einen Tropfen der Lösung auf eine fettfreie, mit Bärlappsamen bestreute Wasserfläche, etwa in einer großen Fotoschale. Das Benzin verdampft sofort. Das Öl bildet einen dünnen, kreisförmigen Film, dessen Rand durch den Bärlappsamen gut sichtbar begrenzt ist. Da sich unter gleichen Bedingungen immer die gleiche, bei n-facher Ölmenge annähernd die n-fache Kreisfläche ergibt und da sich mit Hilfe von Lichtinterferenzfarben Schichtdicken von der durch LOSCHMIDT angegebenen Größenordnung errechnen lassen, kann man annehmen, daß die Ölschicht die Dicke eines Moleküls hat. Diese Dicke läßt sich aus der Ölfläche und dem Ölvolumen in einem Tropfen errechnen. Wenn man sich die Moleküle als dichtgelagerte Kugeln mit dem Radius der halben Schichtdicke vorstellt, so läßt sich ihre Anzahl und weiterhin die Loschmidtsche Zahl abschätzen.

Aus 100 in einem Meßzylinder aufgefangenen Tropfen ergab sich das Volumen eines Tropfens zu

$$V = 2{,}3 \cdot 10^{-2}\,\text{ml}\,.$$

Demnach war Triolein in einer Menge von

$$V = 2{,}3 \cdot 10^{-5}\,\text{ml}$$

enthalten.

Aus dieser Menge läßt sich die Höhe h des Trioleins bestimmen, denn

$$V = 2{,}3 \cdot 10^{-5}\,\text{ml}\,,$$

$$V = (\pi \cdot r^2 \cdot h)\,\text{ml}\,,$$

$$V = A \cdot h\ \text{ml}\,,$$

daraus folgt

$$h = \frac{V}{A}\,\text{cm}\,,$$

A wurde aus einem Durchmesser von durchschnittlich 23 cm zu 415 cm² bestimmt. Daraus folgt

$$h \approx 5{,}5 \cdot 10^{-8}\,\text{cm}.$$

Die Höhe der Trioleinmenge beträgt $5{,}5 \cdot 10^{-8}$ cm.

Wir verteilen nun überschlagsmäßig die Fläche

$A = 415\ \text{cm}^2$

auf die Hauptkreise der Kugelflächen (Großkreise) der als Kugeln gedachten x Moleküle:

$A = x \cdot \pi \cdot r^2$,

$415\ \text{cm}^2 = x \cdot 3{,}14 \cdot 2{,}75^2 \cdot 10^{-16}\ \text{cm}^2$,

$x \approx 17 \cdot 10^{16}$.

Überschlagsmäßig ergibt sich eine Anzahl der Moleküle von $17 \cdot 10^{16}$ für die Kreisfläche von 415 cm².

Das heißt, $17 \cdot 10^{16}$ Moleküle haben eine Masse von $2{,}3 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}92$ g,

da die Dichte des Trioleins $0{,}92\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ist.

Die Anzahl x der Moleküle für 1 g-Mol, das sind 884 g, ergibt sich aus

$17 \cdot 10^{16} : 2{,}12 \cdot 10^{-5}\ \text{g} = x : 884\ \text{g}$.

$$x = \frac{17 \cdot 10^{16} \cdot 884\ \text{g}}{2{,}12 \cdot 10^{-5}\ \text{g}}$$

$x \approx 7 \cdot 10^{24}$.

Der Wert von $7 \cdot 10^{24}$ hat gegenüber dem von Loschmidt *gefundenen Wert von $6{,}02 \cdot 10^{23}$ einen vertretbaren Fehler.*[1]

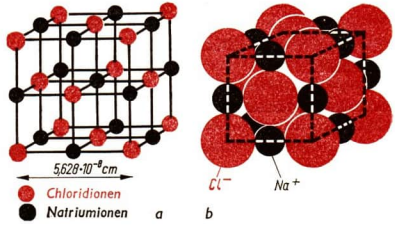
- *Eine elektrische Zählvorrichtung soll je Sekunde 1000 Moleküle zählen. Wie lange benötigt sie, um die in 1 cm³ Wasserstoff (bei 0 °C und 760 Torr) enthaltenen Moleküle zu zählen? (Molvolumen = 22,4 l.)*

1.1.5. Hinweise aus dem Aufbau der Kristalle

Die bisher aufgeführten Hinweise auf die Existenz kleinster Bausteine bezogen sich auf Gase und Flüssigkeiten. Aus der Chemie wissen wir, daß die Hypothese von Atomen und Molekülen bei der *Untersuchung von Gasen* begründet wurde. Es hat Jahrzehnte gedauert, bis Klarheit der Begriffe erreicht wurde und diese in der Chemie allgemeine Anerkennung fanden. Es blieb die Frage offen, ob sich diese Hypothese auch bei den festen Körpern bestätigen würde. In diesen können die Atome keine fortschreitenden Bewegungen, sondern nur Schwingungen um eine Gleichgewichtslage ausführen, deren kinetische Energie einer bestimmten Temperatur entspricht. Es hat lange gedauert, bis der Feinbau der kristallinen Körper experimentell durch die *Röntgenspektralanalyse*, deren erste Versuche ins Jahr 1912 zurückgehen, geklärt werden konnte. Damals gelang es nach einem Vorschlag von Max von Laue, Beugungsbilder von Röntgenstrahlen, die Kristalle durchdrangen, auf fotografischen Platten zu erhalten (vgl.

[1] Fehlerquellen liegen in der Volumenbestimmung des Tropfens, im Mischungsverhältnis Öl–Benzin; bei zu kleinen Schalen kann außerdem eine Stauwirkung gegen den Ölfilm auftreten; der Durchmesser fällt dann zu klein aus.

Seite 113). Es zeigte sich im Laufe der Forschung, daß die kristallinen Körper einen gitterartigen Aufbau aus Atomen, Molekülen oder Ionen haben.
Die Ergebnisse lassen keinen Zweifel an der Realität der Atome mehr zu. Gleichzeitig hat sich ergeben, daß fast alle anorganischen Stoffe keine Atomgruppierungen zu Molekülen zeigen. Man darf also nicht sagen, daß alle Körper aus Molekülen bestehen. Ein bekanntes Beispiel dafür, daß der Molekülbegriff nicht anwendbar ist, bildet der Gitteraufbau eines Kochsalzkristalls (Bilder 133/1 a und b).



133/1
a) Wenn man die Ladungsschwerpunkte der Ionen als kleine Kreise zeichnet, erhält man dieses Bild vom Gitteraufbau
b) In voller Raumerfüllung sieht das Gitter so aus: Einzelmoleküle NaCl sind hier nicht vorhanden, da jedes Ion in gleichen Beziehung zu allen Nachbarn steht

1.2. Erste Erforschung des Atombaus

Bis in das 20. Jahrhundert hinein gab es namhafte Forscher, z. B. Ernst Mach (1838 bis 1916) und Wilhelm Ostwald (1853 bis 1932), die viele Jahre Atome nur für Hilfsvorstellungen hielten, aber schließlich mußten auch sie die Existenz der Atome anerkennen.

1.2.1. Forschungen mit Katodenstrahlen

Im Lehrbuch der Klasse 11 sind Entstehen und Eigenschaften der Katodenstrahlen beschrieben. Einen wesentlichen Fortschritt in der Erforschung des Atombaus wurde durch den deutschen Physiker Philipp Lenard[1] (1862 bis 1947), einen Assistenten von Heinrich Hertz, erreicht.

Beispiel

Wir wollen uns einige Größenordnungen, die für die Atomphysik typisch sind, kenntlich machen: Wenn die Katodenstrahlen eine Aluminiumfolie von $2\ \mu m = 2 \cdot 10^{-6}$ m Dicke durchflogen haben, dann sind sie annähernd durch 10 000 Atomschichten hindurchgegangen, denn es ist der **Atomdurchmesser** $\approx 10^{-10}$ m. Daraus folgt

$$\frac{2 \cdot 10^{-6}\ \text{m}}{10^{-10}\ \text{m}} = 10^4.$$

[1] Lenards wissenschaftliche Leistungen wurden durch seine weltanschaulich-politischen Anschauungen überschattet: Er stellte sich aktiv in den Dienst des Nationalsozialismus und billigte damit die verbrecherische Politik der nazistischen Politiker und ihrer Hintermänner.

Da die Atome als dicht aneinanderliegend anzusehen und bei 10 000 Schichten alle Zwischenräume verdeckt sind, müssen die Elektronen der Katodenstrahlen sehr viele Atome durchquert haben. Atome können demnach *keine massiven undurchdringlichen Teilchen* sein.

Da bei der Durchquerung der Atome *Ablenkungen* der Katodenstrahlen auftreten, war der Schluß auf *elektromagnetische* Felder im Atominnern naheliegend.

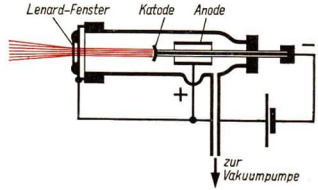
Wichtige Ergebnisse erhielt LENARD aus *Absorptionsmessungen.*

Absorption deutete er als die Eigenschaft gewisser Teile des Atomquerschnitts, die Durchquerung nicht zu gestatten. Für sehr schnelle Elektronen erwies sich der absorbierende Querschnitt als sehr klein. LENARD folgerte:

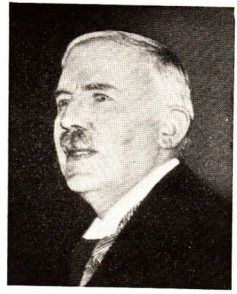
Der größte Teil des Atominnern ist "leer".

1.2.2. Rutherfords Streuversuche mit α-Teilchen — Das Rutherfordsche Atommodell

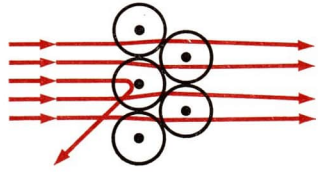
Mit Hilfe der Elektronen hatte man erste Grundlagen zur Erkenntnis vom Atominnern geschaffen. Der englische Physiker ERNEST RUTHERFORD (1871 bis 1937, Bild 134/2) stellte ähnliche Versuche mit α-Teilchen an (Bild 134/3). Das sind kleine Korpuskeln in der radioaktiven Strahlung, über die später noch Näheres gesagt wird. Zunächst genügt es zu wissen, daß ihre Masse etwa 7 300 mal so groß ist wie die des Elektrons und daß sie eine doppelt so große positive Ladung tragen.



134/1 LENARD entwickelte eine Katodenstrahlröhre, die mit einem für Katodenstrahlen durchlässigen Verschluß, dem Lenardfenster, versehen war. Das Lenardfenster befindet sich an dem der Katode gegenüberliegenden Ende der Röhre, es besteht aus einer mit kleinen Löchern versehenen geerdeten Metallplatte. Die Löcher sind mit einer Aluminiumfolie von etwa 2 μm Dicke überdeckt. Mit Hilfe des Lenardfensters können Katodenstrahlen außerhalb des Glaskörpers untersucht und zu Untersuchungen eingesetzt werden



134/2 ERNEST RUTHERFORD



134/3 Ablenkung von α-Teilchen

RUTHERFORD und seine Mitarbeiter fanden in den Jahren 1906 bis 1913, daß die α-Teilchen dünne Materieschichten, d. h. Tausende von Atomen, ohne große Ablenkung durchdringen, gelegentlich aber stärkste Ablenkung erfahren

Die Verteilung der Ablenkungen (Streuung) konnte nur so erklärt werden, daß die positiv geladenen Teilchen bis in die Nähe einer ebenfalls positiven Ladung gelangen, die sie nach einem dem Gravitationsgesetz ähnlichen Gesetz abstößt.

Ein Ergebnis dieser Untersuchungen war die berühmte *Rutherfordsche Streuformel*, auf die hier nicht eingegangen werden kann, die jedoch durch alle Erfahrungen bestätigt wurde.

Den Sitz der positiven Ladung im Atom bezeichnet RUTHERFORD als **Atomkern.**

Die größten Ablenkungswinkel sind auf sehr starke Abstoßung zurückzuführen. Eine große Ablenkung kann nur eintreten, wenn sich das betreffende α-Teilchen dem Kern sehr dicht genähert hat. Da es sich dabei nur um vereinzelte Fälle handelte, muß der Kern sehr klein sein. Die Rechnung ergibt einen Durchmesser, der kleiner als 10^{-14} m ist. Aus den geschilderten Erfahrungen entwickelte RUTHERFORD ein *Atommodell.*

Das Rutherfordsche Atommodell

1. Ein Atom besteht aus einem *Atomkern* und einer *Atomhülle.* Die *positive Ladung* und fast die ganze *Masse des Atoms* sind im Kern konzentriert.
2. Elektronen in der Hülle kompensieren die positive Ladung, so daß das Atom elektrisch *neutral* ist. Die Elektronen müssen in dauernder Bewegung sein, damit sie nicht infolge der elektrostatischen Anziehung in den Kern stürzen.
3. Da der Kerndurchmesser nur etwa $\frac{1}{10\,000}$ des Atomdurchmessers ist, muß die Hülle im wesentlichen leerer Raum sein.

   RUTHERFORD hat einmal scherzhaft gesagt:

   „*Ein Atom besteht in der Hauptsache aus nichts.*"

Beispiel

1 m³ Platin hat nur etwa 1 mm³ undurchdringliche Substanz. Denkt man sich die Atomkerne als stecknadelkopfgroße Masseklümpchen, so würden sie 30 m Abstand voneinander haben. Dazwischen bewegen sich einige Elektronen von verschwindend geringer Masse $(0{,}9 \cdot 10^{-27}$ g).

Sinn und Aufgabe von Modellen

Der Mensch ist tief verwurzelt in den Eindrücken und Erfahrungen des täglichen Lebens. Deshalb versucht er auch in Gebieten, in die seine Sinne ihm keinen unmittelbaren Zugang ermöglichen, Erfahrungen durch anschauliche Bilder verständlich zu machen.

Dabei ist ein Modell nie ein absolut getreues Abbild der Wirklichkeit, sondern es spiegelt nur eine oder einige Seiten des betrachteten Dinges oder Prozesses wider, aber das sind gerade die im jeweils gegebenen Zusammenhang wesentlichen Seiten.

Ein Beispiel haben wir in der mechanischen Wärmetheorie kennengelernt. Mechanische Vorgänge sind dem Menschen aus der täglichen Erfahrung am vertrautesten. Deshalb galt es lange als Ziel der Physik, alle Vorgänge in der Natur mechanisch zu erklären. Bei der Wärme ist das weitgehend gelungen. Bei den elektromagnetischen Erscheinungen führten rein mechanische Vor-

stellungen immer wieder zu Widersprüchen und mußten aufgegeben werden. So wurden vergeblich Modelle eines angenommenen Äthers konstruiert, um die Ausbreitung der Wellen anschaulich zu machen. Folgerungen aus den Modellvorstellungen ließen sich experimentell nicht bestätigen, und neue Erfahrungen konnten mit den Modellen nicht in Einklang gebracht werden. Auch wenn die Wirklichkeit sich schließlich anders erweist, können Modellvorstellungen sehr fruchtbar für die Forschung sein. Wenn sie dem Erfahrungsbereich zu einem bestimmten Zeitpunkt der Forschung angepaßt sind, so ermöglichen sie Fragestellungen für neue Versuche, deren Ergebnisse unter Umständen zu einer Veränderung des Modells führen.

Modelle müssen sinnvoll stets nur auf der Grundlage gesicherter Erfahrungen konstruiert werden. Dann können sie ein immer getreueres Abbild der Wirklichkeit auf dem Wege „der ewigen unendlichen Annäherung des Denkens an das Objekt" (LENIN) werden.

Bleibendes Ergebnis des Rutherfordschen Atommodells:

Atome bestehen aus einem sehr kleinen positiv geladenen Kern und einer Elektronenhülle, in der sich Elektronen bewegen.

1.3. Die Grundlagen der Quantentheorie der Atome

1.3.1. Temperaturstrahlung

Nähert man ein erhitztes Stahlstück der Haut, so spürt man, daß es Wärmestrahlung, d. h. eine elektromagnetische Strahlung (vgl. Seite 119), aussendet. Steigt die Temperatur des Stahls auf etwa 400 °C, beobachtet man Grauglut, bei rund 800 °C Rotglut, die bei noch höherer Temperatur in Weißglut übergeht.

Die durch Temperatur bewirkte Strahlung heißt Temperaturstrahlung.

Die Strahlung hängt auch von der Beschaffenheit der Oberfläche ab. Je mehr Strahlungsenergie ein Körper aussendet, desto mehr vermag er auch zu absorbieren, wenn er bestrahlt wird. Absorbiert ein Körper alle auf ihn fallende Strahlung vollkommen und verwandelt sie in Wärme, dann ist er ein **absolut schwarzer Körper**. Experimentelle Annäherung erreicht man durch einen innen berußten Hohlkörper mit kleiner Öffnung. Die aus ihr austretende Strahlung heißt **schwarze Strahlung** oder **Hohlraumstrahlung**.

Versuch zum Hohlraumstrahler

Ein Karton wird innen und außen schwarz angestrichen. Dann bringt man ein Loch in der Wand an. Es erscheint viel dunkler als die umgebende schwarze Wand.

Aus der Untersuchung dieser Strahlung resultiert das **Stefan-Boltzmannsche Gesetz**:

Die Gesamtenergie der Hohlraumstrahlung ist proportional der 4. Potenz der absoluten Temperatur.

$$S = \alpha \cdot T^4 \tag{9}$$

Dieses Gesetz gilt annähernd auch für elektrisches Glühlicht.

Die schwarze Strahlung wurde bei verschiedenen Temperaturen des Hohlkörpers untersucht. Nach spektraler Zerlegung erforschte man die *Energieverteilung* auf die einzelnen Wellenlängen (Bild 137/1). Man fand 1893 das

Wiensche Gesetz

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{const} = 0{,}2896 \text{ cm} \cdot \text{grad} \qquad (10)$$

λ_{max} ist die Wellenlänge des Strahlungsmaximums. Lange Zeit schlugen alle Versuche fehl, die experimentell gesicherten Erkenntnisse theoretisch abzuleiten. Erst MAX PLANCK (1858 bis 1947) gelang 1900 die Aufstellung einer Strahlungsformel, die sich bewährt hat. PLANCK legte folgende Annahmen zugrunde:

1. Die Abgabe und Aufnahme von Strahlungsenergie W erfolgt diskontinuierlich in Energiequanten.
2. Die Quanten sind nicht gleich, sondern der Frequenz der Strahlung proportional:

$$W = h \cdot \nu .$$

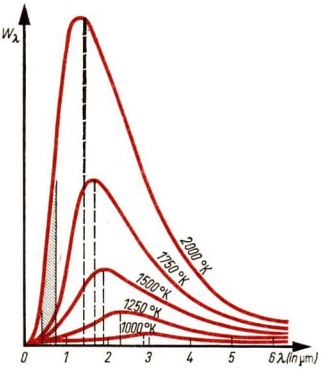
In der Folgezeit hat sich h als eine der wichtigsten Naturkonstanten erwiesen; ihre Dimension ist

$$h = \text{Energie} \cdot \text{Zeit}.$$

Eine solche physikalische Größe wird als Wirkung bezeichnet; h heißt daher das

Plancksche Wirkungsquantum.

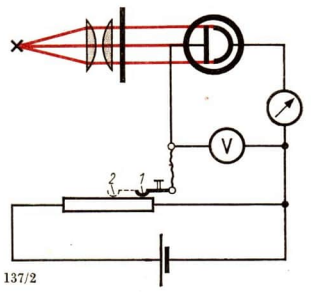
Sein Wert ist $h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Joulesekunden (Ws²).



137/1 Energieverteilung W im Spektrum des schwarzen Körpers als Funktion von λ (das sichtbare Gebiet ist schraffiert)

Versuch zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

In zwei Versuchen werden nach Bild 137/2 durch jeweils einen Lichtfilter bestimmte Lichtwellen auf eine Fotozelle geschickt. Der Fotostrom wird durch ein Spiegelgalvanometer bei Stellung 1 des Stellwiderstandes gemessen.
Durch eine genau zu bestimmende Gegenspannung bei Stellung 2 des Stellwider-



137/2

standes wird der Ausschlag kompensiert. Um die Elektronen aus der Katode herauszulösen, ist zunächst eine Austrittsarbeit W_A zu verrichten. Die Energie der Elektronen ist dann

$$W = h \cdot \nu - W_A$$
$$W = e \cdot U .$$

Demnach ist

$$e\,U_1 = h\,\nu_1 - W_A , \quad \text{und}$$
$$e\,U_2 = h\,\nu_2 - W_A ,$$

daraus folgt

$$h = \frac{e\,(U_1 - U_2)}{\nu_1 - \nu_2} .$$

Beispiel

Dieser Versuch wurde mit zwei Interferenzfiltern des VEB Carl Zeiss Jena durchgeführt.

Gegeben:

Interferenzfilter mit der Wellenlänge

$\lambda_1 = 450$ nm

Interferenzfilter mit der Wellenlänge

$\lambda_2 = 500$ nm

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As

$U_1 - U_2 = 0{,}25$ V

Gesucht:

Plancksches Wirkungsquantum h

Lösung:

$$h = \frac{e\,(U_1 - U_2)}{\nu_1 - \nu_2}$$

$$h = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{As} \cdot 0{,}25\ \text{V}}{\nu_1 - \nu_2}$$

$$h = \frac{0{,}4 \cdot 10^{-19}\ \text{Ws}}{\nu_1 - \nu_2} ;$$

Da

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

ist, gilt

$$\nu_1 - \nu_2 = \frac{3 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{4{,}5 \cdot 10^{-7}\ \text{m}} - \frac{3 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{5 \cdot 10^{-7}\ \text{m}} ,$$

$$\nu_1 - \nu_2 = \frac{(3 \cdot 10^8 \cdot 5 - 3 \cdot 10^8 \cdot 4{,}5\ \text{m}) \cdot \text{s}^{-1}}{4{,}5 \cdot 5 \cdot 10^{-7}\ \text{m}} ,$$

$$\nu_1 - \nu_2 = \frac{1{,}5 \cdot 10^8\ \text{s}^{-1}}{22{,}5 \cdot 10^{-7}} ,$$

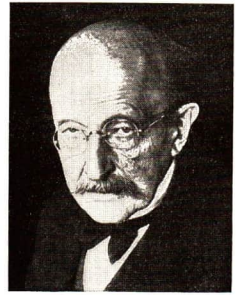
$$\nu_1 - \nu_2 = \frac{10^{15}}{15}\ \text{s}^{-1} . \qquad \textit{Prüfen Sie dieses Ergebnis nach!}$$

Die ermittelte Differenz wird nunmehr in die Gleichung eingesetzt.

$$h = \frac{0{,}4 \cdot 10^{-19}\ \text{Ws}}{\frac{10^{15}}{15}\ \text{s}^{-1}} ,$$

$$h = 6 \cdot 10^{-34}\ \text{Ws}^2 .$$

Der Wert des Planckschen Wirkungsquantums läßt sich mit guter Genauigkeit zu $h = 6 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Ws^2}$ ermitteln!



139/1 MAX PLANCK

MAX PLANCK (Bild 139/1) wurde am 23. April 1858 in Kiel als Sohn eines Universitätsprofessors geboren. In München verbrachte MAX PLANCK seine Schulzeit und die ersten Universitätsjahre. Schon als Schüler wies er besondere Leistungen in Physik und Mathematik auf. Große musikalische Begabung und Neigung ließ ihn noch nach Beginn seines mathematisch-physikalischen Studiums schwanken, ob er sich nicht ganz der Musik widmen sollte. Er blieb der Physik treu, ist aber immer ein großer Musikkenner und Pianist gewesen. Schon als Student fesselte ihn die Theorie der Wärme. Er promovierte 1879 in München über den 2. Hauptsatz, nachdem er zwei Jahre in Berlin bei HELMHOLTZ und KIRCHHOFF studiert hatte. 1885 wurde PLANCK Professor für theoretische Physik in Kiel und 1889 Nachfolger Kirchhoffs in Berlin. Von 1896 bis 1900 arbeitete er besonders an der Theorie der Strahlung. Mit der Entdeckung des Wirkungsquantums begann die neuzeitliche Physik. 1918 erhielt PLANCK den Nobelpreis. In den folgenden Jahren wurde er aller Ehrungen teilhaftig, die einem Gelehrten erwiesen werden können. In der Zeit des Faschismus ist er für die Erhaltung einer echten wissenschaftlichen Forschung unbeirrbar eingetreten. Sein Sohn ist als Mitglied einer Widerstandsgruppe hingerichtet worden, er selbst starb 1947.

1.3.2. Einsteins Lichtquantenlehre

Im Jahre 1905 erweiterte ALBERT EINSTEIN die Plancksche Hypothese vom quantenhaften Aussenden und Absorbieren von Strahlung durch die Atome zu der Lehre von den *Photonen* oder **Lichtquanten**. Nach dieser Lehre breitet sich die elektromagnetische Strahlung nicht kontinuierlich, sondern in Form winziger Energiequanten $h \cdot \nu$ aus:

Licht besteht aus Teilchen.

Das war eine sehr kühne Lehre, nachdem viele Erfahrungen den Wellencharakter des Lichts eindeutig erwiesen hatten. EINSTEIN konnte nun aber andere Tatsachen erklären, denen gegenüber die Wellentheorie versagte, vor allem den
lichtelektrischen Effekt

Seit dem Jahre 1902 war bekannt: Die Energie der von Licht ausgelösten Elektronen hängt nur von dessen Frequenz und nicht von der auffallenden Lichtenergie ab.

Erläutern Sie den lichtelektrischen Effekt, wie Sie ihn in der Klasse 11 kennengelernt haben!

Man kann folgende Erklärung durch ein mechanisches Bild geben:

Photonen kurzwelliger Strahlung gleichen *energiereichen* Geschossen, solche langwelliger Strahlung *energiearmen*. **Ein** Photon der ersten Art vermag ein Elektron aus dem Atom herauszuschlagen, **viele** Photonen der zweiten Art vermögen es nicht. So ist es auch zu verstehen, daß der lichtelektrische Effekt, wenn überhaupt, sofort mit Beginn der Bestrahlung einsetzt.

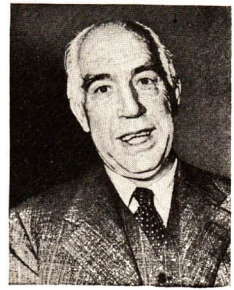
Die Entstehung der Quantentheorie zeigt sehr deutlich, daß sie bei dem *Durchdenken experimenteller Erfahrungen* geschaffen wurde. Jedes Ergebnis der Theorie wurde durch neue Experimente geprüft. So ist aus dem Zusammenwirken von experimentellen und theoretisch-mathematischen Arbeiten die heutige moderne Physik geschaffen worden.

1.4. Das Bohrsche Atommodell

In der Klasse 10 haben Sie gelernt, daß leuchtende Stoffe im Gaszustand Spektren aus einzelnen Linien (Linienspektren) ergeben; vergleichen Sie dazu auch Seite 83! Diese Atome strahlen demnach Energie ganz bestimmter Frequenzen aus. Im Rutherfordschen Atommodell führen die Elektronen *Kreisbewegungen*, also beschleunigte Bewegungen aus. Sie müßten daher ein veränderliches Magnetfeld hervorrufen, das wiederum mit einem wechselnden elektrischen Feld verknüpft ist. Ein solches elektromagnetisches Feld breitet sich im Raum aus. Diese Energieabgabe hätte zur Folge, daß die Bahn der Elektronen dem Kerne sich immer mehr nähern und die Elektronen in sehr kurzer Zeit in den Kern stürzen würden. Die *Frequenz* der ausgestrahlten Energie wäre in dieser Zeit *dauernd veränderlich*:

Das Rutherfordsche Atommodell vermag nicht die Frequenzkonstanz der Spektrallinien und die Beständigkeit der Atome verständlich zu machen.

Hier setzen die Arbeiten von Rutherfords Schüler NIELS BOHR (1885 bis 1962, Bild 140/1) ein.



140/1 NIELS BOHR

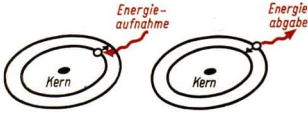
1.4.1. Die Bohrschen Postulate

Im Jahre 1913 verwandte BOHR die Quantentheorie zu einer *Umgestaltung* des Rutherfordschen Atommodells; dazu machte er die folgenden Annahmen[1]:

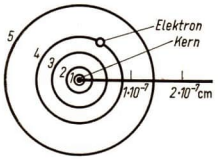
1. Die Hüllenelektronen können nur auf bestimmten („erlaubten") Bahnen kreisen. Dabei wird keine Energie ausgestrahlt.
2. Eine Ausstrahlung von Energie erfolgt bei einem Sprunge von Elektronen auf eine kernnähere Bahn; eine Absorption von eingestrahlter Energie führt zu einem Sprung auf eine dem Atomkern entferntere Bahn (Bild 141/1).
3. Die Energiedifferenz der Bahnen $W_1 - W_2 = h \cdot \nu$.

Die erste Annahme widersprach den bekannten Gesetzen der elektromagnetischen Felder beschleunigter Elektronen. Ein Grund für die Existenz nur der „erlaubten" Bahnen war nicht zu erkennen. Nur der Erfolg konnte die kühnen Gedanken rechtfertigen.

[1] Man nennt sie auch Postulate (lat.): wörtlich „Forderungen", hier: nicht beweisbare, aber notwendige Voraussetzungen



141/1 Elektronensprung



141/2 Bohrsches Modell des Wasserstoffatoms

1.4.2. Das Bohrsche Modell des Wasserstoffatoms

Am Modell des Wasserstoffatoms (Bild 141/2) vermochte BOHR das *Spektrum* des Wasserstoffs richtig abzuleiten und den Atomdurchmesser in Übereinstimmung mit der bekannten Größenordnung 10^{-10} m zu berechnen. Schon 1885 war es dem Baseler Lehrer JOHANN JACOB BALMER gelungen, aus den gemessenen Wellenlängen der vier Hauptlinien (Serienspektren) des Wasserstoffspektrums ($6562{,}79 \cdot 10^{-10}$ m; $4861{,}33 \cdot 10^{-10}$ m; $4340{,}47 \cdot 10^{-10}$ m; $4101{,}74 \cdot 10^{-10}$ m) mit mathematischem Spürsinn die folgende Gleichung abzuleiten:

$$\lambda = k \cdot \frac{m^2}{m^2 - 2^2}.$$

Darin hat die Konstante k den Wert $3645{,}6 \cdot 10^{-10}$ m; für m sind die Zahlen 3, 4, 5, 6 einzusetzen.
Das gleiche Ergebnis fand BOHR aus seinen Annahmen.

Beispiel

Berechnung des Atomdurchmessers

Im Wasserstoffatom kreist nur ein Elektron. Zwischen ihm und dem Kern wirkt gemäß dem Coulombschen Gesetz eine anziehende Kraft

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}.$$

Hierin bedeuten

ε_0: Dielektrizitätskonstante,
e_1: Ladung des Elektrons,
e_2: Ladung im Kern.

Der Kraft F_1 wird durch die Radialkraft

$$F_2 = \frac{m_e \cdot v^2}{r}$$

beim Kreislauf das Gleichgewicht gehalten. Hierin bedeuten

m_e: Masse des Elektrons.

Da

$F_1 = F_2$,

ist

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} = \frac{m_e \cdot v^2}{r}.$$

Man formt zunächst um nach

$$e^2 = 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot m_e \cdot v^2 \cdot r\,.$$

BOHR nimmt nun an, daß der Drehimpuls des Elektrons auf einer erlaubten Bahn

$$m \cdot r \cdot v = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

ist.

Wird aus dieser Gleichung v eliminiert, so erhält man

$$v = \frac{n \cdot h}{2\pi \cdot m \cdot r}\,.$$

Dieser Wert wird in die Gleichung eingesetzt:

$$e^2 = \frac{4\pi\,\varepsilon_0 \cdot m_e \cdot n^2 \cdot h^2 \cdot r}{4\pi^2 \cdot m_e^2 \cdot r^2}\,,$$

$$e^2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot n^2 \cdot h^2}{\pi \cdot m_e \cdot r}\,.$$

Nunmehr wird r eliminiert:

$$r = \frac{\varepsilon_0 \cdot n^2 \cdot h^2}{\pi \cdot e^2 \cdot m_e} \text{ und } n = 1 \text{ (innerste Bahn) gesetzt,}$$

$$r = \frac{8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\frac{(\mathrm{As})^2}{\mathrm{m^2\,N}} \cdot 6{,}625^2 \cdot 10^{-68}\,\mathrm{N^2\,m^2\,s^2}}{3{,}14 \cdot 1{,}6^2 \cdot 10^{-38}\,(\mathrm{As})^2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}}\,.$$

$$r \approx 5{,}3 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m}$$

Der hier ermittelte Radius stimmt mit guter Genauigkeit mit der schon genannten Größenordnung des Atomdurchmessers von 10^{-10} überein.

- *Welche Fortschritte gegenüber dem Rutherfordschen Atommodell brachte das Bohrsche?*
- *Welche physikalischen Tatsachen konnten mit Hilfe des Bohrschen Atommodells beschrieben werden?*

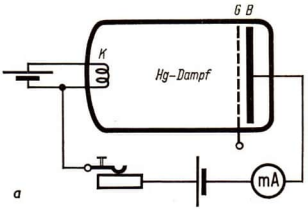
1.4.3. Die Elektronenstoßversuche von Franck und Hertz

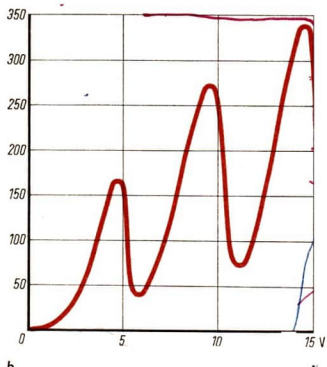
Die Bohrsche Anwendung der Quantentheorie auf die Serienspektren der Atome machte Versuchsergebnisse verständlich, die kurz vorher von J. FRANCK und G. HERTZ erzielt worden waren. Die beiden Forscher haben nachgewiesen, „daß unter bestimmten Bedingungen von Druck und Feldstärke Elektronen, die in einem elektrischen Feld in Quecksilberdampf beschleunigt werden, Energie nur im Betrage von 4,9 eV an die Quecksilberatome abgeben“[1] (Bilder 143/1a und b). Es gilt:

$$1\ \mathrm{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{As} \cdot 1\ \mathrm{V},\ 1\ \mathrm{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{Ws}\,.$$

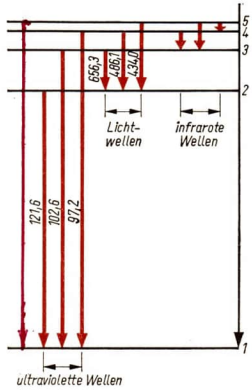
Dieser Tatbestand wird folgendermaßen erklärt: Die bei einer Spannung von 4,9 V erreichte Energie wird von den Elektronen plötzlich an die Quecksilberatome ab-

[1] G. HERTZ in einem Vortrag bei der Feier des hundertsten Geburtstages von MAX PLANCK am 24. 4. 1958 in Berlin („Die Naturwissenschaften“ 45. Jg., Heft 17, Seite 404).





143/1 a) Die Elektronen werden durch die zwischen Katode *K* und Gitter *G* liegende Spannung stark beschleunigt und fliegen zum Teil durch das Gitter. Sie überwinden zunächst mühelos die geringe Gegenspannung von 0,5 V zwischen Gitter und Anode. Das Galvanometer zeigt einen Strom an.
b) Bei der Beschleunigungsspannung von 4,9 V sinkt der Strom plötzlich ab. Ansteigen und Absinken wiederholen sich bei steigender Spannung in gleicher Weise



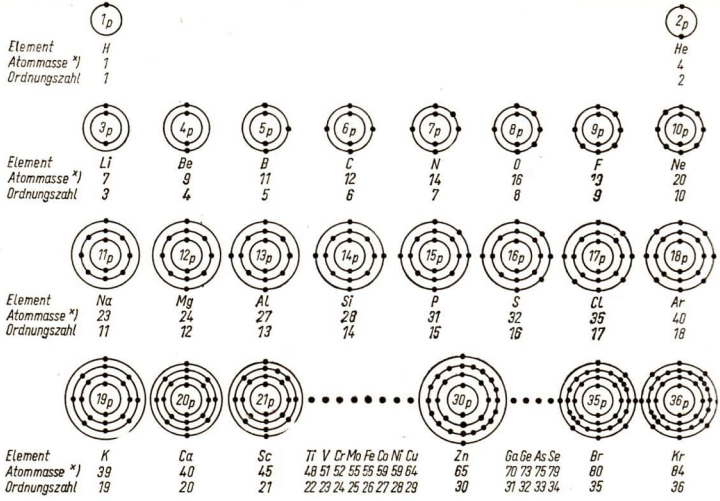
143/2 Energieniveauschema des Wasserstoffatoms mit eingezeichneten Serien von Spektrallinien

gegeben. Deren Hüllenelektronen werden auf eine energiereichere Bahn gehoben und strahlen beim Rücksprung eine Spektrallinie ganz bestimmter Frequenz aus. Eine stetige Energieabgabe an die Quecksilberatome erwies sich als unmöglich. FRANCK und HERTZ konnten die *Energiestufen* verschiedener Atome experimentell bestimmen und aus der Bohrschen Gleichung $W_1 - W_2 = h \cdot \nu$ bei bekanntem ν die Konstante h berechnen.
Für den Wasserstoff gilt das folgende *Energieniveauschema* (Bild 143/2).

1.4.4. Atombau und Periodensystem

Das *Periodensystem der Elemente* ist aus dem Aufbau der Atomhüllen verständlich geworden. Durch genaue Messungen bei den Rutherfordschen Streuversuchen mit α-Teilchen wurde durch J. CHADWICK bestätigt, was vorher schon vermutet wurde:

Die Ordnungszahl eines Elements im Periodensystem ist gleich der Kernladungszahl und der Zahl der Elektronen in der Hülle.



144/1 Schalenaufbau der Atome

*) auf ganze Zahlen gerundet

Da die Kernladungszahl regelmäßig um 1 zunimmt, die Eigenschaften der Elemente aber eine Periodizität aufweisen, schloß man auf eine Periodizität in der Anordnung der Elektronen in der Hülle. Jede Periode endet mit einem *Edelgas*, dessen *chemische Indifferenz* auf eine symmetrische Anordnung der Elektronen zum Kern zurückgeführt wird. Aus verschiedenen chemischen und physikalischen Erfahrungen schloß man auf einen schalenartigen Aufbau der Atomhülle (Bild 144/1). Die Schalen entsprechen den Energiestufen.

1.5. Die Doppelnatur des Lichts

In der Optik ist u. a. die Interferenz durch die *Wellentheorie* des Lichts erklärt. Der lichtelektrische und andere Effekte wiederum lassen sich nur durch die *Lichtquantentheorie* verständlich machen. Dieser Dualismus weist darauf hin, daß sich die Natur durch ein einziges Modell nicht in allen ihren Eigenschaften anschaulich darstellen läßt. Die heutige *Lichttheorie* umfaßt sowohl die Wellen- als auch die Korpuskeltheorie.

Beide sind für verschiedene Erfahrungsbereiche zuständig, die

Wellentheorie für Interferenz, Beugung, Polarisation, die
Korpuskeltheorie für Entstehung des Lichts, Wechselwirkung mit Atomen und Elektronen (Energieumsetzungen).

Das heißt nicht, daß das Licht in Wirklichkeit in zwei Dinge oder Prozesse zerfällt, sondern es ist tatsächlich **ein** Objekt mit einem komplizierten, widersprüchlichen Charakter, den wir mit unserem historisch beschränkten Vorstellungsvermögen nicht an einem Modell *darstellen* können.

1.5.1. Die Welleneigenschaften des Elektrons

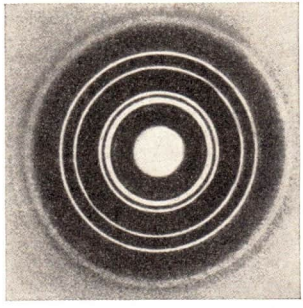
In physikalischen Tabellen wird die Masse des ruhenden Elektrons mit $9{,}10 \cdot 10^{-31}$ kg angegeben. Man stellt sich darunter gewöhnlich ein winziges Kügelchen vor, das durch die Angabe seiner Masse, Ladung und Geschwindigkeit ähnlich wie ein Körper aus der Erfahrungswelt unserer Sinne beschrieben werden kann. Tatsächlich genügt diese Vorstellung für manche technische Anwendung. Es gibt aber auch experimentelle Erfahrungen, bei denen sie versagt. In einer berühmten theoretischen Arbeit entwickelte der französische Physiker LOUIS DE BROGLIE (1924) für bewegte Atome und Elektronen neben dem Teilchenbild ein Wellenbild. Nach der von ihm angegebenen Formel für die Wellenlänge der **Materiewellen**

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \qquad (11)$$

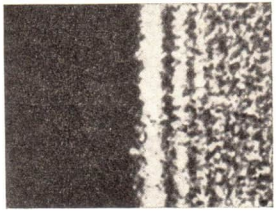
ist diese für Massen aus der täglichen Erfahrung unbeobachtbar klein. Für Elektronen nicht sehr großer Geschwindigkeit müßte sie wie die der Röntgenwellen meßbar sein (Bilder 145/1 und 145/2).

Beispiel

Eine Masse von 1 g bewege sich mit einer Geschwindigkeit von $0{,}01\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.
Wie groß ist die Wellenlänge dieser Masse?



145/1 Unter Verwendung von Metallfolien (hier eine Kupferfolie) als Beugungsgitter konnten die Welleneigenschaften des Elektrons nachgewiesen werden; wie mit den Röntgenstrahlen lassen sich auch mit Katodenstrahlen Beugung und Interferenz hervorrufen: Elektroneninterferenzen an dünnen Kupferfolien



145/2 Sehr überzeugend für den Wellencharakter des Elektrons ist der Nachweis von Fresnelschen Beugungsstreifen an einer mit Katodenstrahlen bestrahlten scharfen Kante

Gegeben:

$m = 1\ \text{g}$

$v = 0{,}01\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Gesucht:

Wellenlänge λ

Lösung:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$\lambda = \frac{6{,}625 \cdot 10^{-34}\ \text{Nm} \cdot \text{s}}{0{,}001\ \text{kg} \cdot 0{,}01\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$\lambda = 6{,}625 \cdot 10^{-29}\ \text{m}$$

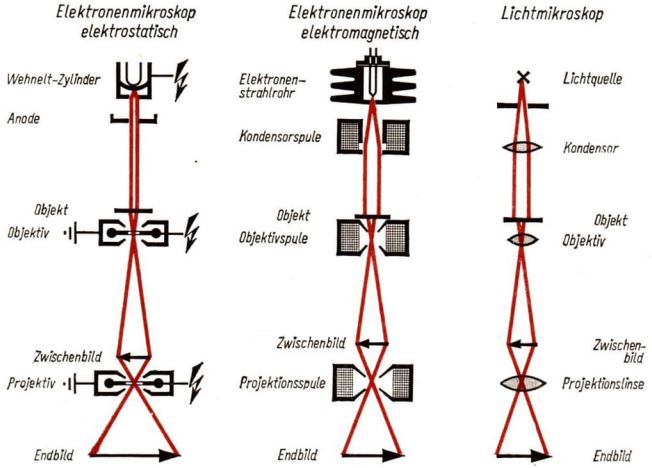
Diese Wellenlänge liegt in einer wesentlich höheren Größenordnung, als sie uns von der Lebedewschen Wellenskale her bekannt ist.

Für ein Elektron mit einer Geschwindigkeit von 30 000 km · s^{-1} (das ist $\frac{1}{10}$ der Lichtgeschwindigkeit) folgt

$$\lambda = \frac{6{,}625 \cdot 10^{-34} \cdot \text{Nm} \cdot \text{s}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 3 \cdot 10^{7}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}},$$

$$\lambda = 0{,}24 \cdot 10^{-10}\ \text{m}$$

Diese Wellenlänge liegt im Bereich der Röntgenstrahlen.

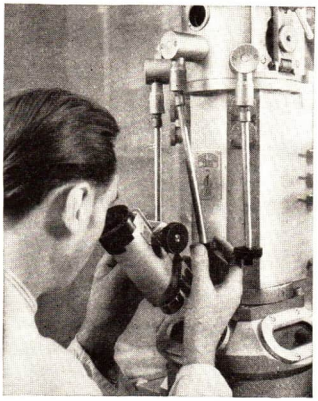


146/1 Vergleich zwischen elektrostatischem Elektronenmikroskop, elektromagnetischem Elektronenmikroskop und Lichtmikroskop

Das Elektronenmikroskop

ist eine der wichtigsten Anwendungen der neuen Erkenntnisse. Es wurde seit 1930 entwickelt.

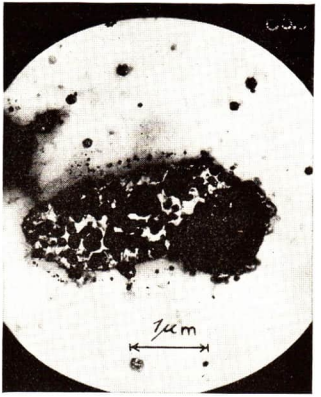
Mit dem *Lichtmikroskop* kann man zwei Punkte noch getrennt wahrnehmen, wenn sie einen Abstand von der Größenordnung 10^{-7} m haben. Mit *Elektronenstrahlen* läßt sich das Auflösungsvermögen auf das 100fache steigern, da dies mit der Abnahme der Wellenlänge steigt. Nachdem es gelungen war, entweder durch das Magnetfeld stromdurchflossener Spulen oder durch das elektrische Feld besonders geformter Kondensatoren (magnetische und elektrostatische Linsen) die Elektronenstrahlen ebenso zu lenken wie Lichtstrahlen mit Glaslinsen, wurden *Elektronenmikroskope* gebaut. Die Objekte werden auf eine 10 bis 100 μm dicke Trägerfolie aufgebracht und von Elektronen mit etwa 10^5 eV durchstrahlt. Das Bild wird elektronenoptisch auf einen Leuchtschirm geworfen. Durch lichtoptische Verfahren kann man es auf das 500000-fache vergrößern. So konnten sogar einzelne sehr große Moleküle sichtbar gemacht werden (Bilder 146/1, 147/1 und 147/2).



Anstelle von Röntgenstrahlen werden Elektronenstrahlen heute auch zur Werkstoffuntersuchung verwendet. Dadurch werden z. B. die Belichtungszeiten für Interferenzbilder wesentlich verkürzt.

1.5.2. Ausblick auf die Wellenmechanik

Die Erkenntnis der Welleneigenschaften der Elektronen läßt es fraglich erscheinen, ob die Elektronen nahezu punktförmige Teilchen sind, die auf festen Bahnen kreisen. Das Bohrsche Atommodell stellt die Wirklichkeit sicher nicht vollkommen dar. Es hat sich gezeigt, daß sich Wahrscheinlichkeiten für die Übergänge zwischen bestimmten Energiewerten berechnen lassen. In der **Wellenmechanik** wurden mathematische Formeln für die Berechnung der möglichen Energiewerte und Übergangswahrscheinlichkeiten entwickelt; dabei ist die Anschaulichkeit weitgehend verlorengegangen, aber



147/1 Elektronenmikroskop vom VEB Optik Carl Zeiss Jena

147/2 Bild einer Vergrößerung durch ein Elektronenmikroskop

die Rechenergebnisse stimmen mit den experimentellem Befunden völlig überein. Diese Tatsache lehrt, daß die Materie weder aus Wellen noch aus Teilchen nach Art der unseren Sinnen unmittelbar zugänglichen Natur besteht. Es geht darum, das einheitliche komplizierte Objekt in der Theorie zu erfassen, dabei nähern wir uns immer mehr der Erkenntnis dieser komplizierten Struktur. Die Erkenntnis des Welle-Korpuskel-Dualismus ist durchaus ein Fortschritt gegenüber der klassischen Mechanik, wird aber in Zukunft nicht ausreichen, um tiefer in das Wesen der Sache einzudringen.

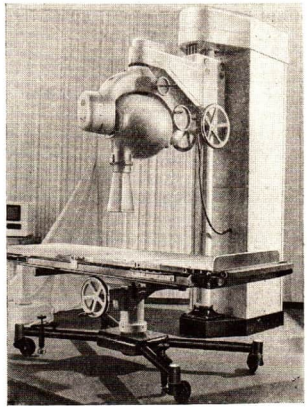
Fragen, Aufgaben

1. Vergleichen Sie die Atomlehre des Altertums mit der unserer Zeit!
2. Welche chemischen Gesetze werden mit dem Daltonschen Atombegriff erklärt?
3. Welche Untersuchungen lieferten die erste Kunde vom Atominnern?
4. Beschreiben Sie das Rutherfordsche Atommodell!
5. Wie unterscheidet sich das Bohrsche vom Rutherfordschen Modell?
6. Welche Mängel haben beide Modelle?
7. Wie erklärt sich die gegenüber dem Atomkern sehr geringe Dichte der Stoffe?
8. Welche Gesetze der Temperaturstrahlung kennen Sie?
9. Was versteht man unter Hohlraumstrahlung?
10. Wie erklärt Bohr die Linienspektren?
11. Was besagt die Ordnungszahl im Periodensystem über den Bau des betreffenden Atoms?
12. Was ist eine Modellvorstellung in der Naturwissenschaft? (Nennen Sie Beispiele!)

Zusammenfassung

1. **Der Atombegriff wurde spekulativ im Altertum von den Griechen geschaffen.**
   Nennen Sie Merkmale der antiken Atomistik!
2. **Die Begründung der atomistischen Struktur der stofflichen Materie auf experimentelle Erfahrung erfolgte durch J. DALTON zu Beginn des 19. Jahrhunderts.**
   Welche Erkenntnisse bildeten die Grundlage der Daltonschen Atomhypothese?
3. **Es gibt eine elektrische Elementarladung $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As.**
   Wie wurde die Größe der Elementarladung festgestellt?
4. **Atome haben eine Eigenstruktur: Sie bestehen aus Kern und Elektronenhülle.**
   Nennen Sie Methoden, wie man mit Hilfe von Katoden- und α-Strahlen diese Tatsache feststellen konnte!
5. **Fast die gesamte Masse eines Atoms ist in seinem Kern vereinigt.**
   Durch welche Versuche konnte diese Tatsache begründet werden?
6. **Von den nicht sichtbaren Atomen hat man Modellvorstellungen entwickelt, die den jeweiligen Erfahrungsbereich beschreiben; diese Modellvorstellungen sind jeweils nur ein einseitiges Abbild der Wirklichkeit.**
   Welche Atommodelle haben Sie kennengelernt und wodurch unterscheiden sie sich?
7. **MAX PLANCK entdeckte im Jahre 1900 das elementare Wirkungsquantum $h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Ws^2.**
   Erläutern Sie die Bedeutung der Planckschen Entdeckung für die Atomtheorie!

2. Der Atomkern



Die physikalische Erforschung des Atomkerns hatte zur Folge, daß sich eine neue Technik, die Kerntechnik, entwickelte. In dieser Technik nimmt z. B. die Anwendung radioaktiver Isotope einen breiten Raum ein: In der Werkstoffprüfung und -veredelung und in der Medizin sind neue umwälzende Möglichkeiten erschlossen worden, wie z. B. diese „Kobaltkanone", ein medizinischer Strahlungsapparat aus der Sowjetunion.

2.1. Der Bau der Atomkerne — Die Isotope

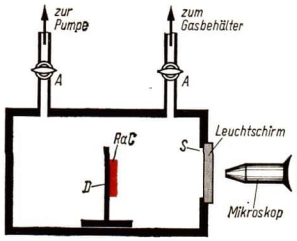
Im Jahre 1815 hat WILLIAM PROUT (1785 bis 1850) die Vermutung ausgesprochen, daß alle Atome aus Wasserstoffatomen aufgebaut seien. Da deren Gewicht als geringstes unter allen gleich 1 gesetzt wurde, hätten die Atomgewichte ganze Vielfache, also ganze Zahlen, sein müssen. Jedoch zeigten genaue Bestimmungen der Atomgewichte vielfache Abweichung von der Ganzzahligkeit, namentlich bei Elementen mit höherem Atomgewicht. Die Proutsche Hypothese geriet daher in Vergessenheit. Sie enthielt aber ein Stück Wahrheit, das rund hundert Jahre später erkannt wurde.

2.1.1. Die Protonen

Für den Kern des Wasserstoffatoms, der eine positive Elementarladung trägt, hatte schon RUTHERFORD den Namen **Proton** (sinngemäß: das Erste, Urbestandteil) vorgeschlagen. Er hielt den Kern zunächst für das positive Elektron. Dem widersprach aber das Ergebnis der Massenbestimmung zu $(1{,}67253 \mp 0{,}000003) \cdot 10^{-24}$ g. Das ist der 1836,3fache Wert der Ruhmasse des Elektrons.

Ein positiv geladenes Teilchen mit der Elektronenmasse wurde erst 1932 entdeckt und heißt **Positron.**

Daß das Proton tatsächlich ein Baustein der Atomkerne ist, konnte RUTHERFORD 1919 in einem berühmt gewordenen Versuch bestätigen: Er ließ sehr schnelle α-Teilchen, die von Radium-C (vgl. Seite 134) mit einer Geschwindigkeit von fast 20000 $km \cdot s^{-1}$ ausgehen, auf Stickstoff auftreffen (Bild 150/1).



150/1 RaC ist auf der Platte *D* aufgetragen. Durch die Hähne *A* wird Luft ausgepumpt und Stickstoff eingebracht. Die Abmessungen des Gefäßes und die Dichte des Stickstoffes garantieren, daß die α-Teilchen die Öffnung *S* nicht erreichen. Trotzdem konnte Rutherford auf dem dahinter angebrachten Leuchtschirm deutliches Aufblitzen mit dem Mikroskop beobachten. Bei einer Füllung des Gefäßes mit anderen Gasen, z. B. O_2 oder CO_2, trat es nicht auf

RUTHERFORD vermutete, daß bei der Bestrahlung Teilchen aus dem Stickstoff herausgeschlagen werden, die auf den Schirm gelangen. Er versuchte, sie durch magnetische und elektrische Felder abzulenken und konnte dabei Ladung und Masse bestimmen. Die Werte wiesen eindeutig auf Protonen hin. Sorgfältige Reinigung und Untersuchung des Stickstoffes schlossen die Möglichkeit aus, daß sich Wasserstoff in dem bestrahlten Gase befand. RUTHERFORD gab dazu folgende Erklärung: Die energiereichen α-Teilchen haben aus den Stickstoffkernen Protonen herausgeschlagen.
Diese Mitteilung erregte 1919 die ganze wissenschaftliche Welt. RUTHERFORD konnte bald auch aus den Kernen anderer Atome (B, F, Na, Al, P) Protonen herausschießen. Heute gilt als gesichert:

Alle Atomkerne enthalten Protonen.

Da mit einer Änderung des Kerns ein anderes Element entsteht, ist durch RUTHERFORD die jahrtausendalte Annahme der Unveränderlichkeit der Elemente widerlegt worden. Welcher Stoff aus Stickstoff entstand, wird auf Seite 167 behandelt.

Daß diese jahrtausendalte Annahme auch relative Wahrheit enthält, zeigt sich daran, daß die Unveränderlichkeit der Elemente im **Rahmen der Chemie** nicht aufgehoben wird.

2.1.2. Die Entdeckung des Neutrons

Lange Zeit wurde es für sicher gehalten, daß die Kerne nur aus Protonen und Elektronen bestehen.
Protonen allein machen die Stabilität der Kerne unverständlich, da sie einander abstoßen. Elektronen dachte man sich gewissermaßen als ein Bindemittel.

Beim Natrium erklärte man z. B. das Atomgewicht 23 durch 23 Protonen. Die Ordnungszahl 11 ließ aber nur eine Kernladungszahl 11 zu. So nahm man an, daß 12 Elektronen im Kern 12 Protonenladungen ausgleichen. 11 Elektronen in der Hülle würden dann das gesamte Atom neutral machen.

Verschiedene experimentelle Erfahrungen ließen sich schwer mit dem Einbau von Elektronen im Atomkern in Übereinstimmung bringen.
Erst 1932 verhalf eine der für die Atomphysik wichtigsten Entdeckungen zu einer neuen Erkenntnis: Bei der Bestrahlung von Beryllium mit α -Strahlen entdeckten die deutschen Physiker BECKER und BOTHE eine vom Beryllium ausgehende außerordent-

lich durchdringende Strahlung. Sie hielten diese zunächst für eine sehr kurzwellige elektromagnetische Strahlung, die wir auf Seite 157 als γ-Strahlung kennenlernen werden.

IRÈNE und FRÉDERIC JOLIOT-CURIE[1] wiederholten die Versuche unter Abänderung der Bedingungen. Dabei stellten sie fest, daß die Luft besonders stark ionisiert wurde, wenn die Berylliumstrahlung auf wasserstoffhaltige Stoffe, z. B. Paraffin, auftraf. Als Ursache konnten Protonen nachgewiesen werden, die aus dem Wasserstoff stammen. Als man ihre Energie maß, ergaben sich für die sie auslösende vermeintliche α-Strahlung unmöglich hohe Werte.

Eine Lösung der Widersprüche fand der englische Physiker JAMES CHADWICK (geb. 1891), ein Mitarbeiter Rutherfords, durch eine neue Hypothese. RUTHERFORD hatte schon 1920 die Existenz eines „Nullten Elements" vermutet, aber nicht nachweisen können. Es sollte im Periodensystem noch vor dem Wasserstoff stehen, etwa die Masse des Protons, aber keine Elektronenhülle haben. CHADWICK nahm nun an, daß die Berylliumstrahlung aus derartigen **Neutronen** bestehe, wie er sie wegen ihrer Ladungslosigkeit nannte.

Eigenschaften der Neutronen

Sie werden von den elektrischen Feldern des Atoms nicht beeinflußt und durchfliegen ungehindert den freien Raum zwischen Kern und Elektron. Man kann die Neutronen daher auch nicht in Behältern aufbewahren, denn sie gehen selbst durch dicke Panzerplatten hindurch, wenn sie nicht zufällig auf einen Kern auftreffen. Dann vermögen sie sogar in diesen einzudringen.

Neutronenquelle

Um Neutronen zu gewinnen, benutzt man zu Versuchszwecken noch heute das Verfahren, das zur Entdeckung der Neutronen führte: In einem Glasbehälter werden ein Berylliumsalz und ein α-Strahler eingeschlossen. Die Vorgänge, die sich dabei abspielen, werden auf Seite 173 behandelt.

2.1.3. Neutronen als Kernbausteine

Bald nach der Entdeckung des Neutrons wurde von den sowjetischen Physikern D. IWANENKO und I. TAMM und dem Deutschen W. HEISENBERG erkannt, daß die Atomkerne aus Protonen und Neutronen bestehen. HEISENBERG legte als erster eine vollständig ausgearbeitete Theorie vor:

Alle Atomkerne bestehen aus Nukleonen: Protonen und Neutronen. Kernladungszahl = Ordnungszahl = Zahl der Protonen. Zahl der Nukleonen (Protonen + Neutronen) = Massenzahl[2]

[1] IRÈNE (1897 bis 1956), Tochter von MARIE CURIE, und FRÉDERIC JOLIOT-CURIE (1900 bis 1958), Nobelpreis 1935

[2] Als Masseneinheit (ME) wird neuerdings ein Zwölftel der Masse von C^{12} verwendet. Die meisten Tabellen geben noch ein Sechzehntel der Masse von O^{16} an. 1 ME = $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g. Die auf C^{12} bezogenen Werte weichen sehr wenig ab

Man kennzeichnet seither ein Element durch sein chemisches *Symbol*, dem oben die Massenzahl, unten die Ordnungszahl als Index[1] angefügt wird (Tabelle 6).

Tabelle 6: Charakteristische Größen einiger Atomkerne

Kern (Teilchen)	Symbol	Massenzahl	Protonenzahl (Kernladungszahl)	Neutronenzahl	Kernmasse bzw. Teilchenmasse	Schreibweise
Neutron	n	1	0	1	1,00898	n_0^1
Proton	p	1	1	0	1,00759	p_1^1
Helium	He	4	2	2	4,00278	He_2^4
Stickstoff	N	14	7	7	14,00368	N_7^{14}
Sauerstoff	O	16	8	8	15,99561	O_8^{16}
Natrium	Na	23	11	12	22,9910	Na_{11}^{23}
Jod	J	127	53	74	126,9157	J_{53}^{127}
Uran	U	238	92	146	238,125	U_{92}^{238}

2.1.4. Die Isotope

Die Kenntnis der Kernbausteine hat die Erklärung einer Erscheinung gebracht, die schon seit 1907 bekannt, aber nicht verständlich war: Man lernte 6 Elemente mit der Ordnungszahl 90 kennen, die chemisch völlig gleich sind, aber ein verschiedenes Atomgewicht haben. Später fand man chemisch gleiches Neon mit den Atomgewichten 20, 21 und 22.

Heute weiß man, daß die Kerne solcher Stoffe die *gleiche Anzahl* von Protonen, aber eine *verschiedene Anzahl* von Neutronen enthalten. Man nennt diese Atome **Isotope**[2]. Sie haben die gleiche Ordnungszahl im Periodensystem, verhalten sich chemisch gleichartig, unterscheiden sich aber in manchen physikalischen Eigenschaften (Bild 153/1).

Isotope sind Kerne mit gleicher Protonenzahl, aber verschiedener Neutronenzahl. Sie sind chemisch nicht zu unterscheiden.

Die meisten Elemente sind Gemische aus Isotopen; das Zinn erreicht mit 10 Varianten die größte bisher bekannte Zahl. Nur bei 20 Elementen[3] kennt man je einen stabilen Atomkern.

Im Lehrbuch der Kernphysik, Bd. II, von G. HERTZ sind in einer Tabelle über „Instabile Atomkerne" folgende Angaben zu finden:

Pb_{82}^{207}; KaD_{82}^{210}; AcB_{82}^{211}; ThB_{82}^{212}; RaB_{82}^{214} und

Bi_{83}^{209}; Bi_{83}^{210}; RaE_{83}^{210}; AcC_{83}^{211}; ThC_{83}^{212}; ThC_{83}^{213}; RaC_{83}^{214}.

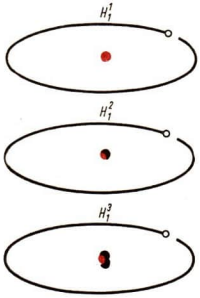
- *Erläutern Sie diese Angaben!*

[1] Aus technischen Gründen konnte in dieser Auflage die heute übliche Schreibweise mit vor das Symbol gesetzten Zahlen noch nicht gedruckt werden.

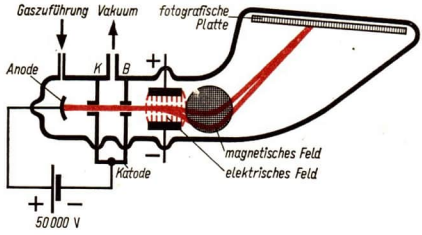
[2] isos topos (griech.): gleicher Ort

[3] Be, F, Na, Al, P, Sc, Mn, Co, As, Y, Nb, Rh, J, Cs, Pr, Tb, Ho, Tm, Au, Bi

Die relative Häufigkeit der Isotope als Bestandteile der natürlichen Elemente ist nahezu konstant. Deswegen ergibt sich bei den chemischen Methoden der Atomgewichtsbestimmung ein bestimmter mehr oder weniger von einer ganzen Zahl abweichender Wert.



153/1 Der Wasserstoff hat 2 natürlich vorkommende Isotope: H_1^1, H_1^2. Der schwere Wasserstoff H_1^2, auch Deuterium D_1^2 genannt, ist zu 0,015% im gewöhnlich vorkommenden Wasserstoff enthalten. Natürliches Wasser enthält geringe Mengen von schwerem Wasser D_2O, so daß etwa 1 l aus 5000 l Wasser durch Elektrolyse gewonnen werden kann. Ein nicht stabiles Isotop Tritium H_1^3 ist bei Kernumwandlungen entdeckt worden



153/2 Massenspektrograf
Zwischen Anode und Katode wird das gasförmige Isotopengemisch durch Elektronenstöße ionisiert; durch die Katodenöffnung gelangt ein feiner Ionenstrahl (Kanalstrahl) in das elektrische Feld eines Kondensators. Hier wird er gemäß der etwas verschiedenen Geschwindigkeit seiner Teilchen aufgespalten, die Ablenkung erfolgt umgekehrt proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit. Nun durchqueren die Strahlen ein Magnetfeld mit kreisförmigem Querschnitt. Seine Feldlinien stehen senkrecht zu denen des elektrischen Feldes. Die schnellen Strahlen werden hier weniger gekrümmt als die langsamen, so daß es möglich ist, durch geeignete Feldstärken Teilchen gleicher Masse, aber verschiedener Geschwindigkeit auf einen Punkt einer Fotoplatte zu vereinigen. Auf dieser erhält man ein sogenanntes Massenspektrum.

Massenbestimmung von Isotopen

In der Klasse 11 ist die spezifische Ladung des Elektrons erwähnt worden: $\frac{e}{m}$ wird aus der Ablenkung von Elektronen beim Durchgang durch ein elektrisches und magnetisches Feld berechnet. Die gleiche Methode bietet auch die Möglichkeit, die Masse von Isotopen zu bestimmen. Das dazu benutzte Geräte heißt **Massenspektrograf** (Bild 153/2).

- *Erklären Sie die Leitungsvorgänge in Gasen, die Sie in der Klasse 11 kennengelernt haben!*

Heute sind die Massenspektrografen so verfeinert worden, daß man $\frac{1}{9 \cdot 10^5}$ Masseneinheiten noch unterscheiden kann. Man sagt: Das Auflösungsvermögen beträgt 900000 und meint damit das Verhältnis $\frac{M}{\Delta M}$ einer Masse zu einer eben noch feststellbaren Diffe-

renz. Diese Präzisionsmessungen sind von hoher Bedeutung für die *Kernphysik.* Man kann das aus den folgenden Angaben für Kernmassen erkennen:

$$H^1 = (1{,}008141 \mp 0{,}000002)\ \text{ME}\,,$$
$$C^{12} = (12{,}003807 \mp 0{,}000011)\ \text{ME}\,.$$

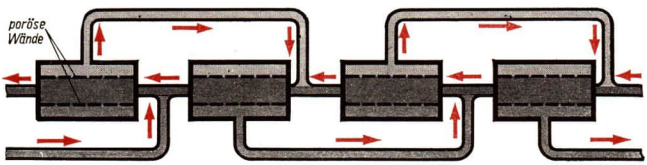
Ähnliche Präzisionsgeräte sind die **Massenspektrometer,** die zur Messung der relativen Häufigkeit der einzelnen Isotope dienen. Man verändert die *Beschleunigungsspannung* oder das *Magnetfeld* so, daß man die einzelnen Ionenarten nacheinander durch einen Spalt fliegen läßt und in einem Behälter auffängt. Ihre Menge wird elektrometrisch gemessen.

Isotopentrennung

Auf wissenschaftlichem und praktischem Gebiet gibt es Probleme, für deren Lösung reine Isotope gebraucht werden. Deswegen sind Verfahren zur Isotopentrennung entwickelt worden. Sie beruhen auf *Isotopieeffekten,* d. h., auf kleinen Unterschieden in Eigenschaften, die auf der Kernmasse beruhen.

Dieselben Grundlagen wie die Massenspektrometer benutzt die
elektromagnetische Trennmethode:
Da man mit jenen im besten Falle nur 10^{-9} g in einer Stunde gewinnen kann, kommt es bei der technischen Trennung von Isotopen darauf an, Ionenquellen mit hohen Ionenströmen zu benutzen, die Ionenstrahlen hoher Stromdichte zu fokussieren und die entladenen Ionen verlustfrei in den Auffängern zu sammeln. Mit ungeheurem Materialaufwand wurde während des 2. Weltkrieges das für die Atombombe benötigte Isotop U^{235} in den USA gewonnen. So konnten mehrere Kilogramm pro Tag hergestellt werden. Heute verwenden viele Forschungsstätten elektromagnetische Isotopentrennapparate.

Eine von GUSTAV HERTZ entwickelte Trennmethode benutzt die
Diffusion von gasförmigen Gemischen durch poröse Wände:
Leichte Moleküle diffundieren schneller als schwere, da ihre thermische Bewegung größer ist. Die mittleren thermischen Geschwindigkeiten verhalten sich ungefähr wie die Wurzeln aus den Molekulargewichten. Da sich diese bei isotopen Atomen nur wenig unterscheiden, ist der Effekt eines Diffusionsvorganges sehr gering. HERTZ hat deshalb viele Diffusionsstufen hintereinander geschaltet und so ein Verfahren zur großtechnischen Trennung der Uranisotope U^{235} und U^{238} aus gasförmigen Uranhexafluorid UF_6 entwickelt (Bild 154/1).



154/1 Schema der Stufendiffusion
Der leichte Anteil wird in jeder Stufe nach rechts, der schwere nach links geleitet

● *Wiederholen Sie die Grundtatsachen der Diffusion, wie sie Ihnen in der Klasse 10 vermittelt wurden!*

Thermodiffusion

ist eine Methode der Isotopentrennung, die in Laboratorien benutzt wird: Durch die Mitte eines viele Meter langen senkrechten Rohres läuft ein elektrisch geheizter Draht entlang. Nach den Wänden zu entsteht ein Temperaturgefälle. Die leichteren Isotope sammeln sich am Draht, die schwereren an der Rohrwand. Da der leichtere und wärmere Anteil nach oben steigt, der schwerere dagegen fällt, tritt allmählich eine Trennung ein.

Fragen, Aufgaben

1. Was wissen Sie über Kernbausteine?
2. Was bedeutet K_{19}^{39} und Hg_{80}^{200}?
3. Was versteht man unter Isotopen?
4. Wie arbeitet ein Massenspektrograf?
5. Wie kann man Isotope trennen?
6. Erklären Sie die große Durchdringungskraft der Neutronen!

2.2. Die Radioaktivität

Die Rutherfordschen Streuversuche haben gezeigt, daß der Kern nur einen winzigen Bruchteil des Gesamtvolumens eines Atoms einnimmt. Der Radius des Wasserstoffkerns oder Protons r_0 ist annähernd $1{,}4 \cdot 10^{-15}$ m. Für den Radius von anderen Kernen gilt die Gleichung

$$r = r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}} \tag{12}$$

Darin bedeutet A die Massenzahl.
Daraus folgt, daß die Dichte aller Kerne gleich ist, etwa

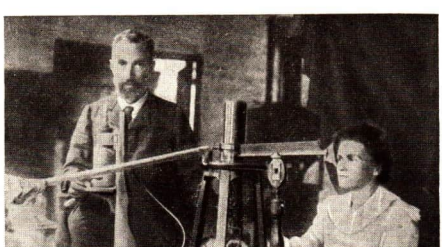
$$1{,}5 \cdot 10^{14} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}.$$

Das Volumen des Atomkerns beträgt dann

$$V = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \cdot A \tag{13}$$

Aus der Gleichung (13) folgt, daß die Dichte $\frac{A}{V}$ konstant ist. Diese Tatsache erinnert an eine Flüssigkeit, deren Tropfen unabhängig von der Größe dieselbe Dichte haben. Deswegen ist für die Atomkerne, Gebilde von unvorstellbarer Kleinheit, u. a. eine anschauliche Modellvorstellung, das Tröpfchenmodell, entwickelt worden. Es macht einen Teil der experimentellen Erfahrungen verständlich.

Es ist eine großartige Leistung der Wissenschaft, Aussagen über den Bau der Atomkerne zu machen: Eine erste Kunde davon brachte die **natürliche Radioaktivität.**



156/1 PIERRE CURIE und MARIE CURIE-SKLODOWSKA

2.2.1. Die Entdeckung der Radioaktivität

Im Dezember 1895 hatte WILHELM CONRAD RÖNTGEN seine erste Mitteilung über die von ihm entdeckten Strahlen veröffentlicht. Er sagte:

> *„Nach besonders zu diesem Zweck angestellten Versuchen ist es sicher, daß die Stelle der Wand des Entladungsapparates, die am stärksten fluoresziert, als Hauptausgangspunkt der nach allen Richtungen sich ausbreitenden X-Strahlen zu betrachten ist."*[1]

Auf Grund dieser Feststellung untersuchte 1896 der französische Physiker HENRI BECQUEREL (1852 bis 1908) an fluoreszierenden Stoffen, ob die Fluoreszenz die Ursache der Röntgenstrahlen sei. Dabei entdeckte er, daß alle *Uransalze* auch dann Strahlen aussenden, wenn sie nicht fluoreszieren. Die weitere Forschung war eine Aufgabe sowohl der Physik als auch der Chemie, da die strahlenden Stoffe und die Strahlung selbst untersucht werden mußten. Hervorragende Ergebnisse verdanken wir dem Ehepaar PIERRE CURIE (1859 bis 1906) und MARIE CURIE-SKLODOWSKA (1867 bis 1934, Bild 156/1).

Unter schwierigsten äußeren Bedingungen fanden sie, daß auch *Thoriumsalze* die gleiche Strahlung wie Uransalze aussenden. Da sich die Strahlung von Uranpechblende stärker als die des reinen Urans erwies, vermutete MARIE CURIE, daß in dem Erz unbekannte Elemente mit stärkerem Strahlungsvermögen enthalten seien. Es gelang ihr in jahrelanger Arbeit, zwei neue, stark strahlende Elemente zu gewinnen. Das eine erhielt den Namen *Radium* (Ra), „Das Strahlende", das andere zu Ehren der polnischen Heimat der Entdeckerin den Namen *Polonium* (Po).

Die Eigenschaft, die von BECQUEREL entdeckten Strahlen auszusenden, wurde **Radioaktivität** genannt.

Die Größe der Leistung wird man recht würdigen, wenn man bedenkt, daß 7 t Erz verarbeitet werden mußten, um 1 g Ra zu gewinnen. MARIE CURIE hat sich durch die jahrelange Arbeit mit

[1] W. C. RÖNTGEN, Grundlegende Abhandlungen über die X-Strahlen; neu herausgegeben von der Physikalischen Gesellschaft in der DDR, I. A. Barth Leipzig, 1954, Seite 13

radioaktiven Stoffen gesundheitlichen Schaden zugezogen, der zu ihrem Tode führte. PIERRE und MARIE CURIE haben gleich WILHELM CONRAD RÖNTGEN abgelehnt, ihre Entdeckungen geschäftlich auszubeuten. Diese sollten zum Wohle der Menschen dienen.

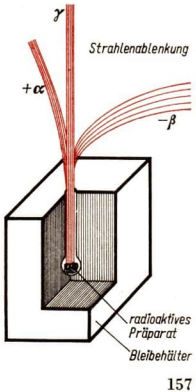
2.2.2. Eigenschaften der radioaktiven Strahlung

Schon im Laufe der ersten Untersuchungen konnten die folgenden Eigenschaften festgestellt werden:

1. Die Strahlen der radioaktiven Stoffe wirken auf Fotoplatten auch durch lichtdichte Verpackung.
2. Sie bringen geeignete Stoffe zum Fluoreszieren.
3. Sie ionisieren die Luft.
4. Sie durchdringen alle Stoffe mehr oder weniger stark.
5. Sie üben eine Reizwirkung auf Organismen aus.
6. Die Strahlungsfähigkeit ist durch kein Mittel (Hitze, Kälte, Druck, chemische Einwirkung, elektromagnetische Felder) zu beeinflussen.

2.2.3. Die Natur der Strahlung

Die Curies schlossen einen radioaktiven Stoff in eine Bleikapsel ein, so daß nur ein dünnes Strahlenbündel durch einen Kanal austreten konnte. Das Bündel ging durch ein magnetisches Feld (Bild 157/1). Dabei stellten die Forscher fest, daß ein Teil der Strahlen genauso abgelenkt wurde wie die Katodenstrahlen. Durch Bestimmung der spezifischen elektrischen Ladung mit Hilfe schwacher magnetischer und elektrischer Felder konnte dieser Teil als sehr schnelle Elektronen bestimmt werden; ihre Geschwindigkeit ist jedoch nicht einheitlich; man nennt sie **Betastrahlen** (β-Strahlen).
Die Strahlung, die nicht abgelenkt werden konnte, wurde von RUTHERFORD mit Hilfe eines **sehr starken** Magnetfeldes ebenfalls aufgespalten. Ein Teil wurde nicht beeinflußt, der andere Teil erfuhr eine sehr geringe, aber deutliche Ablenkung, die der Ablenkung der Elektronen entgegengerichtet war. Folglich mußte er aus *positiv geladenen* Teilchen bestehen. Da dieses Bündel nicht aufgespalten wurde, ergab sich eine einheitliche Energie der Teilchen, die als α-Teilchen bezeichnet wurden. Als *spezifische Ladung* $\frac{e}{m}$ fand RUTHERFORD den 3680ten Teil des Wertes der β-Strahlen. Da eine



157/1 Aufspaltung radioaktiver Strahlung durch ein magnetisches Feld
Absorptionsversuche lehrten, daß die α-Teilchen in jeder Substanz eine bestimmte Reichweite haben. Sie werden stärker als β- und γ-Strahlung absorpiert. Ihre Reichweite in Luft beträgt etwa 7 cm. Auf ihrem Wege ionisieren sie sehr stark. Ein Teilchen erzeugt bis zu 200 000 Ionenpaare. Auch die Fluoreszenz wird vor allem durch α-Teilchen bewirkt. Der nicht ablenkbare Teil der radioaktiven Strahlung, die γ-Strahlung, erwies sich als eine elektromagnetische Wellenstrahlung, ähnlich den Röntgenstrahlen

Ladung nicht kleiner als die Elementarladung des Elektrons sein kann, so muß die Masse der Teilchen mindestens 3680mal so groß sein wie die eines Elektrons. Das stimmt mit der geringen Ablenkbarkeit überein. Eine Deutung des Ergebnisses fand RUTHERFORD, als er durch Spektraluntersuchungen *Helium* feststellte, sobald er die Strahlen in ein Vakuum eintreten ließ, in dem elektrische Entladungen stattfanden. RUTHERFORD vermutete, daß die Strahlung aus Heliumionen besteht. Zur Nachprüfung ließ er sie von Blei absorbieren, das darauf im Vakuum geschmolzen wurde. Dabei entwich Helium. Da sich in allen radioaktiven Mineralien Helium nachweisen läßt, wurde die Vermutung zu einer begründeten Hypothese. Zur völligen Sicherung mußten Ladung und Masse der Teilchen bestimmt werden. Das Verhältnis $\frac{e}{m}$ für Wasserstoffionen war als doppelt so groß wie bei einem Alphateilchen bekannt. Da keine Atome mit der doppelten Masse des Wasserstoffatoms bekannt waren, nahm RUTHERFORD eine Ladung von 2 Elementarladungen an, dann müßte die Masse gleich 4, könnte also ein Heliumkern sein. In mühsamen Versuchen wurden α-Teilchen gezählt, aufgefangen und die Ladungen elektrometrisch gemessen. Die Ladung eines Teilchens bestand tatsächlich aus 2 Elementarladungen. Aus dem durch magnetische und elektrische Ablenkungen bekannten Wert von $\frac{e}{m}$ ergab sich für m ein Wert, dermit dem für Helium bekannten befriedigend übereinstimmte. Seither gilt die von RUTHERFORD und SODDY (1877 bis 1960) aufgestellte Theorie:

α-Teilchen sind doppelt positiv geladene Heliumkerne.

Energie und Frequenz von γ-Strahlen können aus dem lichtelektrischen Effekt ermittelt werden. Auch Interferenzen an Kristallgittern ermöglichen eine Bestimmung der Frequenz. Dabei ergeben sich Werte bis $6 \cdot 10^{20}$ Hz und Energien von 2,6 MeV. Wegen dieser großen Werte haben die γ-Strahlen ein hohes Durchdringungsvermögen und schädigen lebende Zellen.

2.2.4. Die Ursachen der Radioaktivität

Die *dauernde* Strahlung der radioaktiven Stoffe, an denen man lange Zeit keine Veränderung feststellen konnte, schien dem *Energiesatz* zu widersprechen. Die Größe der abgegebenen Energie konnte bestimmt werden, indem man alle Strahlen eines radioaktiven Präparats in einer Bleikapsel auffing, die in einem Eiskalorimeter stand. So wurde die Energie als Wärme gemessen. 1 g Ra liefert etwa $100 \frac{\text{cal}}{\text{h}}$. Über lange Zeiträume ergeben sich erstaunlich hohe Werte.

Die Erkenntnis, daß α-Teilchen und Elektronen Bestandteile der Strahlung sind, wies auf eine Erklärung ihrer Entstehung hin. Die erste Vermutung ist in der Literatur von ELSTER und GEITEL[1] ausgesprochen worden. Sie hielten einen Zerfall der Atom-

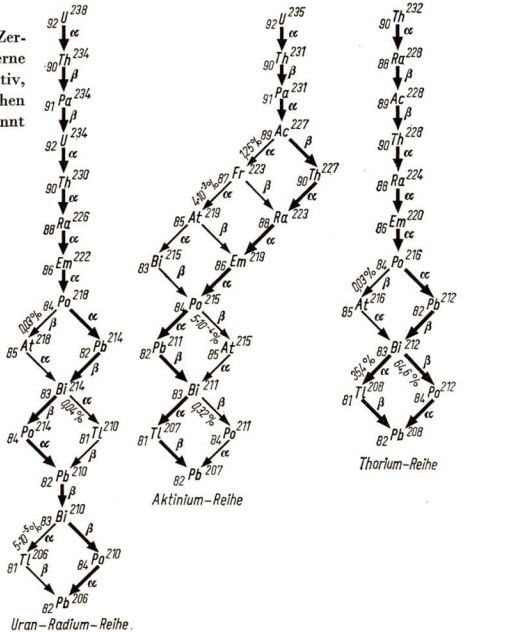
[1] JULIUS ELSTER (1854 bis 1920) und HANS GEITEL (1855 bis 1923) waren Lehrer am Gymnasium in Wolfenbüttel und bedeutende physikalische Forscher

kerne für möglich. Eine experimentell gesicherte Theorie des radioaktiven Zerfalls lieferten um 1903 RUTHERFORD und SODDY zusammen mit RAMSEY:
Aus Ra_{88}^{226} entsteht ein Edelgas Radon, Rn_{86}^{222}, das unter α-Strahlung in einigen Tagen zerfällt.
RAMSEY vollbrachte die großartige Leistung, aus winzigsten Mengen sowohl die Eigenschaften als auch mit eigens zu diesem Zwecke konstruierten Mikrowaagen das Atomgewicht zu bestimmen. Wie die durch Ramseys Arbeiten ermöglichte Angabe der Indizes zeigt, sinkt die Massenzahl um 4, die Ladung (Ordnungszahl) um 2, wie es nach dem Ausstoß von Heliumkernen zu erwarten ist. Allgemein gilt:

Bei Aussendung eines α-Teilchens nimmt die Massenzahl um 4, die Ordnungszahl um 2 ab. Bei Aussendung eines β-Teilchens bleibt die Massenzahl erhalten, die Ordnungszahl steigt um 1, da dem Kern eine negative Ladungseinheit entzogen wird.

Zerfallsreihen

Die bei einem radioaktiven Zerfall entstehenden neuen Kerne sind meist wieder radioaktiv, so daß man ganze Zerfallsreihen (radioaktive Familien) kennt (Bild 159/1).



159/1 Bei den natürlich vorkommenden Elementen gibt es 3 Zerfallsreihen, die alle als stabiles Endprodukt Blei ergeben.
Eine 4. Zerfallsreihe beginnt mit künstlich hergestellten Kernen

Das Zeitgesetz des radioaktiven Zerfalls

Die in der Natur vorkommenden radioaktiven Stoffe zeigen sich meist in den möglichen Beobachtungszeiten als unveränderlich. In jahrelangen Untersuchungen ihrer Abkömmlinge konnte eine deutliche Abnahme der Strahlung festgestellt werden. Offenbar ist die Strahlung proportional der in jedem Augenblick vorhandenen Anzahl zerfallender Atome. Durch viele Messungen hat sich die Richtigkeit der folgenden mathematischen Betrachtung für alle radioaktiven Stoffe bestätigt:
Zur Zeit t seien N Atome vorhanden, von denen in dem Zeitelement dt gerade dN Atome zerfallen mögen.
Dann gilt

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N .$$

Darin ist λ eine Konstante; das Minuszeichen deutet die Abnahme von N mit der Zeit t an.
Eine Umwandlung in

$$\frac{dN}{N} = -\lambda\, dt$$

und Integration ergibt

$$\ln N = -\lambda t + \text{const.}$$

Falls zur Zeit $t = 0$ gerade N_0 Atome vorhanden sind, gilt

$$\ln N_0 = \text{const} .$$

Durch Subtraktion von der vorangehenden Gleichung folgt

$$\ln N - \ln N_0 = \lambda t$$

oder

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t ,$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} .$$

λ wird als Zerfallskonstante bezeichnet und hat für die verschiedenen Elemente spezifische Werte. Meist gibt man eine davon abgeleitete andere Konstante, die **Halbwertszeit** T, an. Zu einer Zeit T sei die Zahl der nicht zerfallenen Atome nur noch $\frac{1}{2} N_0$.
Dann gilt

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t} ,$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

$$T = \frac{0{,}693}{\lambda}.$$

Diese Größe ist vom Zeitpunkt der Betrachtung unabhängig. Nach der Halbwertszeit T ist immer die Hälfte der am Anfang des Zeitintervalls vorhandenen Kerne zerfallen. Die Halbwertszeiten sind sehr verschieden, wie die folgende Tabelle zeigt. Sie variieren um den Faktor 10^{23}.

- *Wieviel Prozent einer radioaktiven Substanz sind nach Ablauf von 5 Halbwertszeiten noch vorhanden?*

Tabelle 7: Halbwertszeiten einiger Elemente

Uran	$4{,}5 \cdot 10^9$ Jahre	Radium	$1{,}6 \cdot 10^3$ Jahre
Polonium	138 Tage	Radon	3,83 Tage
RC′	$1{,}64 \cdot 10^{-4}$ s		

Nach welcher Zeit ist die Radioaktivität eines Radium-Präparates auf $\frac{1}{10}$ *gesunken?*

$\left(t = \frac{\ln 10}{\lambda}\,!\right)$

T und λ können durch Untersuchung des Abklingens der Strahlungswirkungen in vielen Fällen experimentell bestimmt werden. Auch zwischen der Reichweite der α-Strahlen und der Halbwertszeit besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang.

Auf eine Merkwürdigkeit des Zerfallsgesetzes sei noch hingewiesen. Es liefert eine völlig sichere Aussage darüber, wieviel radioaktive Atome aus einer großen Zahl in einer bestimmten Zeit zerfallen sind. Wann ein bestimmtes Atom zerfällt, läßt sich aber nicht voraussagen. Das Zerfallsgesetz gibt als *statistisches Gesetz* nur Mittelwerte für eine sehr große Anzahl von Atomen an, sagt aber nichts über ein Einzelatom aus.

Die Einheit der Radioaktivität

Die Zerfallstheorie erlaubt die Einführung einer *Maßeinheit* für die Radioaktivität. Sie heißt **1 Curie** (c) und liegt vor bei $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Zerfallsakten in 1 s. Sie entspricht etwa der Aktivität von 1 g Ra.

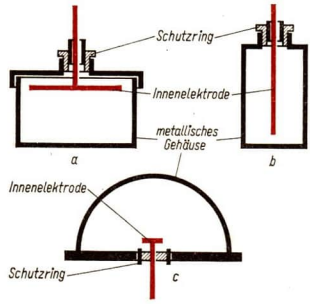
$$1\text{ c} = 10^3\text{ mc} = 10^6\ \mu\text{c}$$

- *In 1 s soll gerade 1 Zerfallsakt geschehen. Wieviel Radiumatome müssen vorhanden sein?*

2.3. Nachweismethoden der radioaktiven Strahlung

2.3.1. Ionisationskammern

Alle radioaktiven Strahlen vermögen Elektronen aus den Atomen herauszulösen und dadurch Ionen zu erzeugen. Gase werden dabei leitfähig, und in einem abgeschlossenen Raume bildet sich beim Anlegen eines elektrischen Feldes ein *Ionisationsstrom*. Man kann ihn messen und dadurch die Strahlungsintensität bestimmen.



162/1
a Plattenkammer b Zylinderkammer
c Halbkugelkammer

Ionisationskammern werden nach den folgenden Arten gebaut (Bild 162/1).
Die Stromstärke wird meist aus der Entlade- oder Aufladegeschwindigkeit eines Elektrometers gemessen.

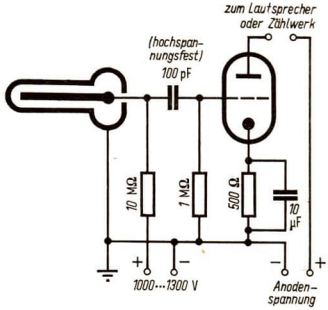
2.3.2. Zählrohre

Die heute meist gebrauchte Form ist das **Geiger-Müller-Zählrohr.** Es besteht aus einem dünnwandigen Metallrohr oder einem mit einem Metallbelag versehenen Glasrohr, durch das axial ein dünner Stahldraht gespannt ist. Das Rohr ist meist mit einem Gasgemisch von Argon ($p = 90$ Torr) und Alkohol ($p = 10$ Torr) oder Halogenen gefüllt. Gegenüber der Wand erhält der Draht eine Spannung von etwa 1200 V (Bild 162/2).
Je nachdem, ob man α-, β- oder γ-Strahlen nachweisen will, haben die Zählrohre spezielle Ausführungen.

2.3.3. Nebelkammern

Wilsonsche Nebelkammer

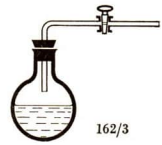
Der englische Physiker Ch. T. R. Wilson (1869 bis 1959) beobachtete, daß Ionen als Kondensationskeime für Tröpfchen in übersättigten Dämpfen dienen können und baute 1912 die ersten darauf beruhenden Nebelkammern.



162/2 Eine in das Rohr eindringende Strahlung ionisiert das Gas, wobei infolge der hohen Beschleunigung der Gasmoleküle Stoßionisation eintritt. Ein kurzzeitig fließender Strom erzeugt am Widerstand einen Spannungsimpuls, den man über einen Verstärker, einem Lautsprecher oder einem Zählwerk zuführt

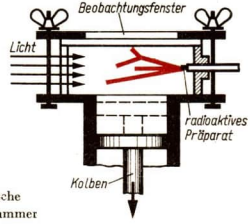
Versuch zum Prinzip einer Nebelkammer

In einen Kolben füllt man etwas Wasser, bläst ein wenig Rauch hinein und verschließt ihn mit einem Stopfen, durch den ein mit Hahn versehenes Glasrohr führt (Bild 162/3). Man bläst kräftig Luft durch das Rohr und verschließt dann sofort den Hahn. Unter leichtem Erwärmen läßt man



162/3

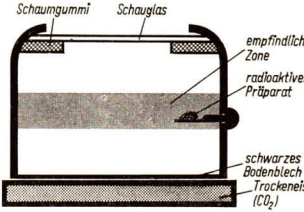
den Luftraum sich mit Wasserdampf sättigen. Öffnet man darauf den Hahn, so tritt durch die Entspannung Abkühlung und Übersättigung mit Wasserdampf ein. Die feinen Rauchteilchen wirken als Kondensationskeime, es bildet sich deutlich Nebel.



163/1 Wilsonsche Nebelkammer

Die Übersättigung des Dampfes erreichte WILSON durch schnelle adiabatische Ausdehnung von Luft, die mit Wasserdampf gesättigt war. Der räumliche Verlauf einfallender ionisierender Teilchen kann bei Beleuchtung beobachtet und auch fotografiert werden (Bild 163/1). BLACKETT konstruierte als erster *vollautomatische* Kammern. Der russische Physiker SKOBELZYN machte die Nebelkammer durch Verwendung in *Magnetfeldern* zu einem Forschungsmittel für Massen- und Geschwindigkeitsbestimmung ionisierender Teilchen. Ihre Bahnen erfahren dabei eine Krümmung.

- *Erklären Sie was isotherme und adiabatische Zustandsänderungen sind!*



163/2 Eine Kammer wird auf festes Kohlendioxid gesetzt und dadurch auf einer Temperatur von — 70 °C gehalten. Oben in der Kammer ist ein offenes Gefäß mit Methylalkohol angebracht, der verdampft. Vom Gebiet der Sättigung gelangt der Dampf durch Diffusion nach unten und wird dort übersättigt

Diffusionsnebelkammer

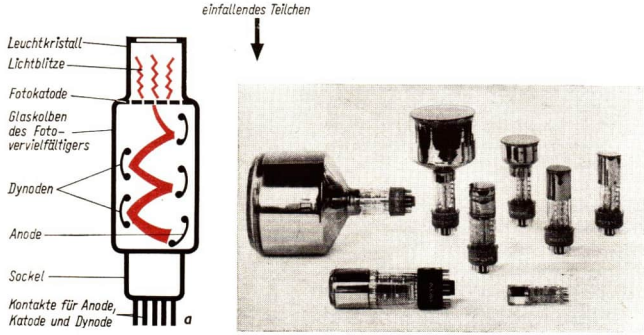
Um dauernd ein Gebiet geeigneter Übersättigung zu erhalten, ist die folgende Nebelkammer erdacht worden (Bild 163/2). Die Kammer muß von Zeit zu Zeit durch ein elektrisches Feld von den absinkenden entladenden Nebeltröpfchen gesäubert werden.

Blasenkammer

In überhitzten Flüssigkeiten wird die Spur eines ionisierenden Teilchens durch Dampfbläschen gekennzeichnet. Eine solche Blasenkammer ist besonders für den Nachweis sehr energiereicher Teilchen geeignet.

2.3.4. Szintillationszähler

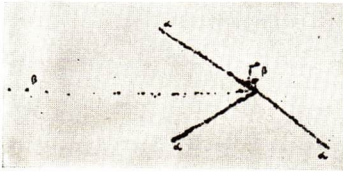
Die auf Seite 134 geschilderte Streuung der α-Teilchen hat RUTHERFORD mit Leuchtschirmen nachgewiesen, auf denen auftreffende Teilchen Lichtblitze (Szintillationen) verursachen. Heute ist ein verbesserter Szintillationszähler (Sekundär-Elektronen-Vervielfacher) zu einem der besten Meßgeräte der Kernphysik geworden (Bilder 164/1a und b).



164/1 a) Sekundär-Elektronen-Vervielfacher
Lichtquanten lösen aus einer Fotokatode Elektronen aus, die durch ein elektrisches Feld zu einer Elektrode (Dynode) hin beschleunigt werden. Dort lösen sie Sekundärelektronen aus, die auf eine weitere Dynode geleitet werden. Bis zur Anode hin beträgt die Gesamtvervielfachung bis 10^8.
b) Vervielfacher vom VEB Carl Zeiss, Jena

2.3.5. Kernspurenplatten

Die Eigenschaft der radioaktiven Strahlen, fotografische Platten nach der Entwicklung zu schwärzen, hat BECQUEREL zur Entdeckung der Radioaktivität geführt. Durch die Entwicklung sehr feinkörniger (Kerndurchmesser 0,1 bis 0,5 μm) dicker Emulsionsschichten (bis 1 mm) wurde es möglich, alle ionisierenden Teilchen festzustellen (Bild 164/2).



164/2 Kernspurenplatten des VEB ORWO
Bei mikroskopischer Untersuchung sieht man ähnliche Bahnspuren wie bei einer Nebelkammer. Sie können sehr genau vermessen werden

2.3.6. Beschleuniger

Auf Seite 149 wurde gesagt, daß es RUTHERFORD gelang, mit Teilchen der radioaktiven Strahlung Protonen aus Stickstoffkernen herauszuschlagen. Diese Ergebnisse haben die moderne Kernforschung und Kerntechnik eingeleitet.
α-Teilchen radioaktiver Stoffe stehen nur in begrenzter Menge und Energie zur Verfügung. Daher wurde versucht, auf technischem Wege Ionen hoch zu beschleunigen; das geschieht grundsätzlich dann, wenn sie hohe Spannungen durchfallen. Dabei treten Iso-

lierungsschwierigkeiten auf und man versuchte daher, eine mehrfache Beschleunigung durch wiederholtes Durchlaufen eines technisch tragbaren Spannungsunterschiedes. Ein Beschleuniger ist das

Zyklotron

Es wurde 1930 von E. O. LAWRENCE (1901 bis 1958) konstruiert. Als Ionenquelle dienen Gasentladungen mit Glühkatoden, deren Elektronen ionisieren.
Die Ionen unterliegen dem Einfluß eines starken Magnetfeldes und eines elektrischen Wechselfeldes. Das erste zwingt Ionen, die sich senkrecht zu seinen Feldlinien bewegen, in Kreisbahnen. Das zweite zieht sie nach der entgegengesetzt geladenen Elektrode. Das sind die einfachen physikalischen Grundlagen (Bilder 165/1 a und b).

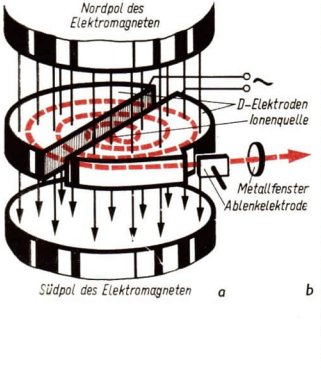
Bei konstantem Magnetfeld ist die auf die Kreisbahn zwingende Kraft (Ziehkraft) gleich der Fliehkraft:

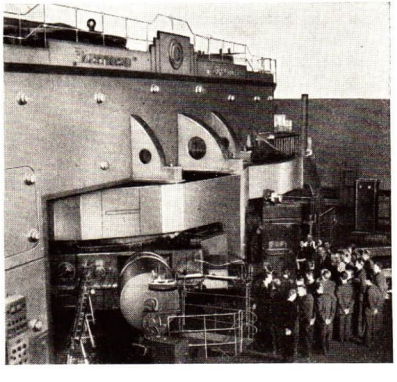
$$Q\,v\,B = \frac{m\,v^2}{r},$$

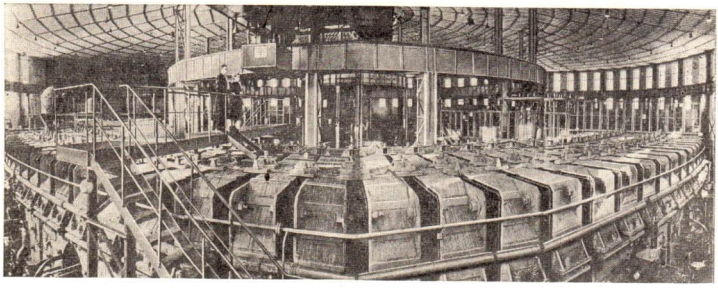
$$r = \frac{m\,v}{Q\,B},$$

(darin sind Q: Ladung, B: magnetische Kraftflußdichte).

165/1 a) Zwischen den Polschuhen eines starken Elektromagneten sind zwei hochevakuierte Kammern in Gestalt zweier halbkreisförmiger Metalldosen angebracht. Sie sind gegeneinander isoliert, durch einen Spalt getrennt und nach ihm zu offen. Die Ionenquelle befindet sich in der Mitte. An die beiden Dosenhälften (wegen ihrer D-förmigen Gestalt einfach D's, Des oder Duanten genannt) wird eine hochfrequente Wechselhochspannung gelegt. Sofort werden die positiven Ionen in das gerade negativ gelegene D gezogen und beschreiben unter dem gleichzeitigen Einfluß des Magnetfeldes einen Kreis. Sein Radius ist wegen der noch geringen Geschwindigkeit klein. Wenn die Ionen an den Spalt kommen, erfolgt die Umpolung und eine Beschleunigung innerhalb des Spaltes, so daß das nächste D mit größerer Geschwindigkeit auf einer Bahn mit größerem Radius durchlaufen wird. Der gleiche Vorgang wiederholt sich viele Male. Der Spannungswechsel muß auf die Umlaufzeit der Ionen, die auf allen Bahnen gleich ist, genau abgestimmt sein. Gebräuchliche Frequenzen sind 10^7 Hz, die Scheitelspannung 10^4 bis 10^5 V
b) Beschleuniger im Institut für Kernprobleme der Akademie der Wissenschaften der UdSSR







166/1 Synchrophasotron

Die Umlaufzeit

$$T = \frac{2\pi r}{v},$$

$$T = \frac{2\pi m}{Q \cdot B}.$$

Also hängt die Umlaufszeit nur von den konstanten Größen m, Q, B ab. Die an die D's anzulegende Frequenz ist $\frac{1}{T}$.

Am Rande der Kammer werden die Ionen durch eine Ablenkelektrode tangential durch ein dünnes Metallfenster nach außen abgelenkt und zur Bestrahlung verwendet, oder man läßt sie innerhalb der D's mit maximaler Geschwindigkeit auf eine Prallplatte auftreffen.

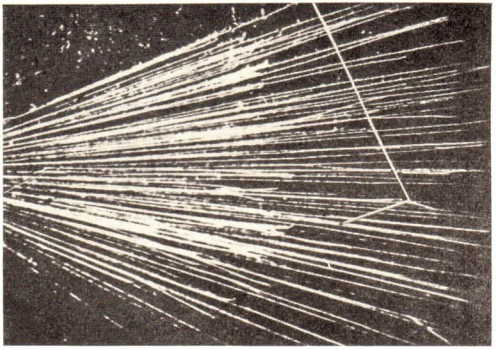
In der Folgezeit sind die Beschleuniger weiterentwickelt worden. Eine der größten Anlagen ist das **Synchrophasotron** in Dubna in der Sowjetunion, das Protonen mit einer Energie von 10^4 MeV liefert (Bild 166/1).

Ein besonderer Kreisbeschleuniger ist das **Betatron** oder die **Elektronenschleuder**; auf dieses Gerät wird hier nicht näher eingegangen.

2.4. Künstliche Kernumwandlungen

2.4.1. Die Versuche von Rutherford und Blackett

Die Ursache der natürlichen Radioaktivität sind Kernumwandlungen, die ohne Einwirkungen von außen eintreten. Auf Seite 150 wurde gezeigt, daß RUTHERFORD 1919 eine künstliche Kernumwandlung gelang. Er gab die folgende Deutung: Die α-Teilchen (Heliumkerne) dringen gelegentlich in einen Stickstoffkern ein. Das dadurch entstandene Gebilde zerfällt sogleich in ein Proton und einen Rest, den man errechnen kann,



167/1
Nebelkammeraufnahme
An der Gabelungsstelle der α-Teilchenspur ist ein Stickstoffkern getroffen worden. Das α-Teilchen ist in den Kern eingedrungen, zwei Teile fliegen auseinander. Die kurze dicke Bahn ist die eines Sauerstoffkerns, die lange dünnne dagegen die eines Protons

da die Summe der Massenzahlen und der Kernladungszahlen vor und nach der Reaktion gleich sein müssen. Der neue Kern ist ein Sauerstoffisotop:

$$N_7^{14} + He_2^4 \rightarrow H_1^1 + O_8^{17},$$
$$(14 + 4 = 1 + 17)\,,\ (7 + 2 = 1 + 8)\,.$$

Dafür schreibt man auch N_7^{14} (α, p) O_8^{17}. Die Klammer drückt aus, daß ein α-Teilchen aufgenommen und ein Proton abgegeben wurde. BLACKETT ist es gelungen, den Vorgang in der Nebelkammer zu beobachten (Bild 167/1).

● *Welche Regel gilt für die oberen und unteren Indizes bei Atomumwandlungen?*

In 23000 Aufnahmen mit über 400000 Bahnen fand er 8 derartige Treffer. In den folgenden Jahren sind viele Kernumwandlungen durch „Beschuß" mit schnellen Teilchen (Protonen, Deuteronen, C_6^{12} u. a.) gelungen.

2.4.2. Kernumwandlungen durch Neutronen

Als besonders wichtig haben sich Kernreaktionen durch *Neutronen* erwiesen, da diese keine Ladung haben und keine Abstoßungskräfte auf sie einwirken. Daher können auch langsame (thermische) Neutronen Kernumwandlungen herbeiführen; z. B.:

$$O_8^{16}\,(n, p)\,N_7^{16}\,,$$
$$B_5^{11}\,(n, \alpha)\,Li_3^8\,.$$

Bei der Wechselwirkung von Neutronen mit Atomkernen zeigt sich besonders deutlich die Wichtigkeit des für alle Kernreaktionen gebildeten Begriffs **Wirkungsquerschnitt**. Man kann sich die Kernquerschnitte als kleine Scheiben vorstellen, auf die Geschosse auftreffen sollen. Nun zeigt sich merkwürdigerweise, daß der Wirkungsquerschnitt gegenüber verschiedenartigen und verschieden schnellen Teilchen verschieden groß

ist. So ist er bei verschiedenen Atomen gegenüber langsamen Neutronen größer als gegenüber schnellen.

So einfach der Begriff erscheint, so sehr muß man sich hüten, ihn sich als anschauliche Größe vorzustellen. Er ist eine mathematische Konstruktion, durch welche die Wahrscheinlichkeit einer Einwirkung von Kernen aufeinander gemessen wird und zeigt, daß im atomaren Bereich Vorstellungen aus der täglichen Erfahrung nicht ohne weiteres zutreffend sind.

Berechnen Sie den geometrischen Querschnitt eines Kernes des Boratoms nach der auf Seite 155 aufgegebenen Gleichung (12). Gegeben ist $r = 1{,}5 \cdot 10^{-23}$ m; $A = 11$. *Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Querschnitt von Neutronen, der je nach ihrer Energie zwischen etwa* $200 \cdot 10^{-24}$ cm^2 *und* $4000 \cdot 10^{-24}$ cm^2 *schwankt!*

2.4.3. Künstliche Radioaktivität

1934 entdeckte das Ehepaar JOLIOT-CURIE, daß bei künstlichen Kernumwandlungen sich Kerne bildeten, die unter radioaktiver Strahlung wieder zerfallen. Das erste Beispiel war:

$$\mathrm{Al}^{27}_{13}\,(\alpha, \mathrm{n})\,\mathrm{P}^{30}_{15}\,.$$

Das Phosphorisotop erwies sich als radioaktiv. Mit einer Halbwertszeit von etwa 3 Minuten zerfällt es unter Abgabe von Positronen:

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

Heute werden durch Bestrahlungen viele Radioisotope hergestellt, die ausgedehnte Verwendung in der Forschung, der Technik, der Medizin finden.

2.4.4. Transurane

Der italienische Physiker ENRICO FERMI[1] hat als erster den Kernbeschuß mit Neutronen durchgeführt und viele radioaktive Isotope gewonnen. Aus Uran entstanden dabei Atome, die β-Teilchen aussandten. FERMI nahm an, daß dadurch die Ordnungszahl 92 des Urans um eine Einheit erhöht worden und ein neues künstliches Element mit der Ordnungszahl 93 entstanden sei. Man nennt solche Elemente, die in der Natur nicht gefunden wurden, **Transurane**. Fermis Deutung, deren Nachprüfung sehr folgenreich war, erwies sich als Irrtum. Einige Jahre später konnten aber mit Hilfe des Zyklotrons tatsächlich Transurane hergestellt werden. In wägbaren Mengen wurde im Jahre 1942 das *Neptunium* Np^{238}_{93} gewonnen und mit Hilfe einer besonders entwickelten *Ultramikrochemie* untersucht. Mittels der modernen Beschleuniger sind durch Beschuß des Urans und neu gewonnener Transurane bis jetzt noch *Plutonium* Pu_{94}, *Americium* Am_{95}, *Curium* Cu_{96}, *Berkelium* Bk_{97}, *Californium* Cf_{98}, *Einsteinium* Es_{99}, *Fermium* Fm_{100}, *Mendelevium* Md_{101} und *Nobelium* No_{102} hergestellt worden.

[1] ENRICO FERMI (1901 bis 1955), vor dem Faschismus nach den USA emigriert, Nobelpreis 1938

Fragen, Aufgaben

1. Leiten Sie die Ablenkung der α- und β-Strahlen im Magnetfeld aus der *I-B-F*-Regel für Leiterbewegung (3-Fingerregel der rechten Hand) ab!
2. Warum werden γ-Strahlen nicht abgelenkt?
3. Erläutern Sie die anschauliche Bedeutung von λ im Zerfallsgesetz $\frac{dN}{N} = -\lambda\, dt$!
4. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Zerfallskonstante λ und der Halbwertszeit T?
5. Was bedeutet Si^{29}_{14} (α, n) S^{32}_{16}?
6. Welchen Forschern verdankt man die Erklärung der Radioaktivität?
7. Erklären Sie den Begriff der künstlichen Radioaktivität!
8. Mit welchen Teilchen können Kernumwandlungen durchgeführt werden?
9. Welche Wirkung hat das elektrische Feld im Spalt der D-Elektroden?
10. Nennen Sie Transurane!
11. Welche Wirkung hat die Aussendung eines α- bzw. β-Teilchens auf die Stellung eines Elements im Periodensystem?
12. Nennen Sie Nachweismethoden der radioaktivem Strahlung!

Zusammenfassung

1. Alle Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen; ihr Sammelname ist Nukleonen.

Erklären Sie die Nukleonen, und vergleichen Sie sie mit Elektronen!

2. Die Anzahl der Nukleonen eines Atomkerns entspricht der Massenzahl des Elements.

In welcher Schreibweise wird die Massenzahl eines Elements deutlich gemacht?

3. Die Anzahl der Protonen eines Atomkerns entspricht der Kernladungs- und der Ordnungszahl.

Erklären Sie die Ordnungszahl im Periodischen System der Elemente!

4. Die meisten Elemente bestehen aus Isotopen.

Wodurch unterscheiden sich Massen- und Ordnungszahlen der Isotope?

5. Beim radioaktiven Zerfall eines Elements vermindert sich bei Abgabe eines α-Teilchens die Massenzahl um 4 und die Ordnungszahl um 2 Einheiten; bei Abgabe eines β-Teilchens bleibt die Massenzahl erhalten, und die Ordnungszahl wird um 1 Einheit erhöht.

Charakterisieren Sie α-Teilchen und β-Teilchen!

6. Künstliche Kernumwandlungen werden häufig durch geladene Teilchen durchgeführt, die in Beschleunigern eine große Energie erhalten.

Beschreiben Sie den Vorgang im Zyklotron!

7. Aus dem Element Uran konnten durch Beschuß mit zunächst ungeladenen später mit geladenen Teilchen Transurane gewonnen werden.

Erklären Sie den Begriff „Transuran"!

2.5. Massendefekte und Bindungsenergien

Als man die Atomkerne aus *Protonen* und *Elektronen* zusammengesetzt dachte, schien das Problem ihrer Festigkeit durch die *elektrostatische* Anziehung gelöst.
Es mußte jedoch eine Erklärung für die Festigkeit des Kerns bei Protonen und *Neutronen* gegeben werden. Die Protonen stoßen einander ab wegen ihrer gleichen positiven Ladung. *Gravitationskräfte* reichen nicht aus, um die Stabilität des Kerns zu erklären. Man nimmt heute besondere **Kernkräfte** an, die bei geringster Reichweite (Größenordnung 10^{-15} m) außerordentlich groß sind (10^{11} mal so groß wie die Bindungskraft eines Valenzelektrons).

Kernkräfte werden experimentell durch Streuversuche mit so schnellen Protonen untersucht, daß diese in den Wirkungsbereich der anziehenden Kernkräfte der Stoßpartner gelangen, nachdem sie die abstoßende elektrostatische Kraft (Coulombkraft) überwunden haben. Dabei und auch bei niedrigenergetischer Streuung wurde gefunden, daß die Kernkräfte unabhängig von der elektrischen Ladung der Nukleonen, demnach gleich sind zwischen Proton-Proton, Proton-Neutron, Neutron-Neutron, Neutron-Proton.

● *Beschreiben Sie das Gravitationsgesetz!*

Das Wissen über die Kernkräfte ist noch sehr unvollkommen und erfordert zu seiner Erweiterung höchste mathematische Hilfsmittel. Einfacher lassen sich Aussagen über die **Massendefekte** und die **Bindungsenergien** darstellen.

2.5.1. Der Massendefekt

Die Genauigkeit moderner Massenbestimmung, die bis in die 5. oder 6. Dezimale reicht, brachte eine eigentümliche Erscheinung zur Kenntnis der Physiker: Es beträgt der **Massenwert** des *Protons*

$$M_p = 1{,}007596 \text{ ME},$$

der des *Neutrons*

$$M_n = 1{,}008983 \text{ ME}.$$

Erst bei der siebenten Dezimale wird eine Massenwertbestimmung unsicher.
Bei einem Atomkern aus Z Protonen und N Neutronen erwartet man einen Massenwert

$$M = Z \cdot M_p + N \cdot M_n.$$

Er ist aber immer etwas kleiner als die Summe. Die Differenz heißt **Massendefekt.** Zahlenmäßig gilt für den *Heliumkern:*

$$D = (2 \cdot 1{,}007596 \text{ ME} + 2 \cdot 1{,}008983 \text{ ME}) - 4{,}002775 \text{ ME},$$

$$D = 0{,}030383 \text{ ME}.$$

Ähnliches gilt für alle Kerne.

Bei der Bildung eines Kernes aus Protonen und Neutronen tritt ein Verlust an Masse ein (Massendefekt).

● *Wie groß ist die Differenz zwischen dem experimentell ermittelten Massenwert 73,94604 und der Massenwertsumme des Selenkerns* Se_{34}^{74}*?*

Diese Masse kann nicht verschwunden sein. Eine Erklärung der Erscheinung verdanken wir ALBERT EINSTEIN. Er hat in allgemeiner Form bewiesen, daß jeder Masse ein bestimmter Energiebetrag entspricht. Diese zahlenmäßige Beziehung zwischen beiden Größen wird durch die

Einsteinsche Gleichung

$$W = m\,c^2$$

ausgedrückt.

c bedeutet hierbei die Lichtgeschwindigkeit. Zahlenmäßig ergibt sich die Gleichwertigkeit von 1 g Masse mit der folgenden Energie:

$$W = 0{,}001\ \text{kg}\ (3 \cdot 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2\,,$$

$$W = 9 \cdot 10^{13}\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}\,,$$

$$W = 9 \cdot 10^{13}\ \text{Nm} \quad \text{oder} \quad 9 \cdot 10^{13}\ \text{Ws} = 25 \cdot 10^6\ \text{kWh}\,.$$

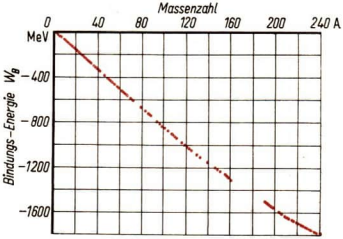
Diese Energiemenge wird bei einem Massendefekt von 1 g frei.

EINSTEIN hat seine Gleichung im Jahre 1905 theoretisch abgeleitet. Sie ist durch die Kernphysik als eines der bedeutungsvollsten Gesetze bestätigt worden.

● *Widerspricht der Massendefekt dem Satz der Erhaltung von der Masse?*

2.5.2. Die Bindungsenergie

Die Massendefekte sind für die stabilen Kerne genau bestimmt worden. Wenn man sie in die Energieeinheit MeV umrechnet, läßt sich die **Bindungsenergie**, die bei der Bildung der Kerne frei würde und umgekehrt bei der Zerlegung in ihre Bestandteile aufzuwenden wäre, als Funktion der Massenzahl darstellen (Bild 171/1).



171/1 Mittlere Bindungsenergie der stabilen Kerne

Tabelle 8: Umrechnung von Energiemaßen

	kpm	Ws	cal	eV
1 kpm	1	9,81	2,34	$6{,}12 \cdot 10^{18}$
1 Ws	0,102	1	0,239	$6{,}24 \cdot 10^{18}$
1 cal	0,427	4,19	1	$2{,}61 \cdot 10^{18}$
1 eV	$1{,}63 \cdot 10^{-22}$	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$	$3{,}83 \cdot 10^{-20}$	1

Um ME in MeV umzurechnen ist zu beachten, daß

$$1\ \text{ME} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$

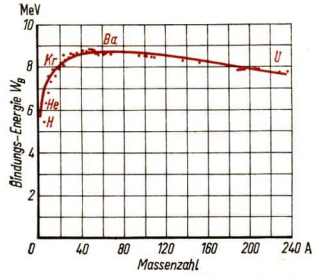
ist.
Die Umrechnung mit Hilfe der Einsteinschen Gleichung und der Tabelle ergibt

$$1\ \text{ME} = 931\ \text{MeV}\,.$$

Überschlagsmäßig kann man sich merken:

$$1\ \text{TME} = \frac{1}{1000}\,\text{ME} \approx 1\ \text{MeV}\,.$$

Da die Kurve in Bild 171/1 nahezu eine Gerade ist, so muß die Bindungsenergie je Nukleon annähernd gleichgroß und etwa 8 MeV sein. Man hat sie genauer untersucht und das folgende Diagramm (Bild 172/1) erhalten:



172/1 Bindungsenergie je Nukleon. Das Diagramm zeigt, daß am Anfang und am Ende des Periodensystems die Werte geringer sind. Die Höchstwerte liegen zwischen den Massenzahlen 60 und 120, das zeigt auch die schwache Krümmung der Kurve in Bild 171/1. Diese Tatsache ist von großer Bedeutung

Zunächst ist noch zu bemerken, daß in der Kernphysik die Bindungsenergie, die bei der Bildung von Kernen aus Nukleonen frei wird (und die zur Zerlegung wieder aufgewendet werden muß), negativ gerechnet wird. So zeigt es auch Bild 171/1. In der Chemie dagegen ist es üblich, die bei der Bildung einer Verbindung frei werdende Energie positiv zu rechnen.

Wenn es gelingt, einen schweren Kern annähernd zu halbieren, so muß Energie frei werden. Dasselbe gilt für das Verschmelzen von leichten Kernen. In beiden Fällen muß als Äquivalent ein Massendefekt eintreten.

Albert Einstein, einer der bedeutendsten Physiker der Neuzeit, wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren. Seine Kindheit verlebte er in München. Mit 15 Jahren kam er auf das Gymnasium nach Aarau in der Schweiz, nachdem seine Eltern nach Italien übergesiedelt waren. In Zürich studierte er Mathematik und Physik bis zum Jahre 1902. Einstein hatte die Schweizer Staatsangehörigkeit erworben und erhielt eine Anstellung im Patentamt in Bern. In rascher Folge schuf er bedeutende Arbeiten über Molekularphysik. 1905 veröffentlichte er die spezielle Relativitätstheorie und schuf damit die Grundlage für die Bewegungsgesetze von Körpern, deren Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. Einsteins Gedanken fanden vielfach Ablehnung, sind aber gerade durch Erfahrungen im atomaren Gebiete glänzend bestätigt worden. Sehr bald wandte Einstein die Plancksche Quantentheorie auf das Licht an und schuf die Lehre von den Lichtquanten (Photonen). Von 1909 an war er Professor in Zürich, Prag und wiederum in Zürich. 1914 wurde er auf Anregung von Max Planck nach Berlin berufen. Seit Beginn des 1. Weltkrieges trat er entschieden für Völkerverständigung und Frieden ein. 1933 verließ er das faschistische Deutschland und ging über Belgien nach den USA, wo er an der Universität Princeton lehrte. Auch hier trat er mutig gegen Krieg und Rassenhetze und gegen den Mißbrauch der Kernenergie zu Kriegszwecken auf. Er hat bis zuletzt an schwierigen physikalischen Feldtheorien gearbeitet.

2.6. Die Kernspaltung

Auf Seite 168 wurde von der Bestrahlung des Uranisotops U^{235}_{92} mit langsamen Neutronen gesprochen. Die dabei entstehenden radioaktiven Kerne hielt FERMI zunächst für Transurane.

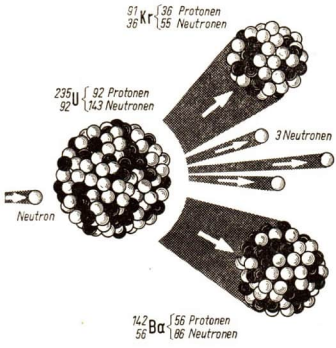
Schon 1934 hatte die deutsche Chemikerin IDA NODACK die Möglichkeit diskutiert, daß der Urankern in zwei annähernd gleichgroße Teile gespalten werden könnte. Erst Ende 1938 konnten OTTO HAHN (Bild 173/1) und sein Mitarbeiter FRITZ STRASSMANN in schwierigen chemischen Untersuchungen nachweisen, daß nach der Bestrahlung *Barium* auftritt. Das aber ist ein **Spaltstück** mittlerer Masse, eine Erscheinung, die erstmalig einwandfrei festgestellt wurde. Wie sehr damals die Spaltung noch unwahrscheinlich erschien, ist aus den folgenden Sätzen der ersten Veröffentlichung Hahns vom 22. Dezember 1938 zu erkennen:



173/1 OTTO HAHN

> *„Als Chemiker müßten wir eigentlich sagen, bei den neuen Körpern handelt es ... sich um Barium ... Als Kernchemiker können wir uns zu diesem allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik widersprechenden Sprung noch nicht entschließen."*

Das ungeheure Aufsehen, das diese Arbeiten in allen Forschungsstätten erregten, erklärt sich daraus, daß bei einer Spaltung des Urankernes durch Neutronen weitere Neutronen entstehen, die von Neuem Kerne spalten können. Somit rückte eine praktische Verwendung der Kernspaltung in den Bereich der Möglichkeiten, an die selbst RUTHERFORD wegen der geringen Anzahl von Zufallstreffern bei den bisherigen Bestrahlungen nicht geglaubt hatte. Die Spaltungsneutronen wurden bald nachgewiesen, und überall setzte eine fieberhafte Arbeit in den Forschungsstätten ein.



2.6.1. Vorgang der Kernspaltung

Der Vorgang der Kernspaltung wird durch das Bild 173/2 verdeutlicht.

173/2 Ein Neutron dringt in den Atomkern ein und führt zu einem Zwischenkern, der bald in mittelschwere Spaltstücke zerfällt. Bei diesem Vorgang wird eine erhebliche Energie frei, und überschüssige Neutronen werden ausgeschleudert. Die Energie steckt als Bewegungsenergie in den Bruchstücken, den Neutronen, und in der β- und γ-Strahlung, die bei der Spaltung oder dem weiteren Zerfall der Bruchstücke ausgestrahlt wird

Die Bewegungsenergie verwandelt sich bei der Abbremsung durch die Umgebung in Wärme. Als Äquivalent dieser Energie tritt ein Massendefekt ein, aus dem diese Energie errechnet werden kann. Man weiß heute:

Bei jeder Spaltung eines Urankernes wird eine Energie von etwa 200 MeV oder $7{,}7 \cdot 10^{-15}$ kcal frei.

Um zu einem Vergleich mit der durch chemische Vorgänge frei werdenden Energie zu gelangen, zeigen wir folgendes

Beispiel

1 Grammatom U^{235} enthält $6{,}023 \cdot 10^{23}$ Atome. Wenn 235 g Uran vollständig gespalten werden könnten, so erhielte man $6{,}023 \cdot 10^{23} \cdot 200$ MeV $= 1204{,}6 \cdot 10^{23}$ MeV. 1 kg würde dann $\frac{1000}{235}$ mal so viel $= 5 \cdot 10^{26}$ MeV $= 2 \cdot 10^{10}$ kcal liefern. Vergleicht man damit die Energie von etwa 7500 kcal je kg, die bei der Verbrennung von Steinkohle frei wird, so erkennt man:

Die Spaltung von Uran liefert über 2 Millionen mal soviel Energie wie die Verbrennung der gleichen Menge Steinkohle.

● *Wieviel Kilowattstunden elektrischer Energie lassen sich gewinnen, wenn 1 kg U^{235} vollständig gespalten wird?*

Die Spaltung liefert nicht immer die gleichen Bruchstücke. Es finden sich Barium, Krypton, Lanthan, Brom, Caesium, Rubidium u. a. Das in der Natur vorkommende Uran besteht zu über 99% aus U^{238}. Dieses Isotop wird nur selten und nur von sehr schnellen Neutronen gespalten. Bei Energien unter 1000 eV werden Neutronen eingefangen und bilden einen neuen radioaktiven Kern, der unter β-Strahlung in das Transuran Neptunium übergeht, das dann mit einer Halbwertszeit von 2,34 Tagen unter β-Strahlung in Plutonium Pu^{239}_{94} übergeht, das wiederum mit langsamen Neutronen, wie U^{235}, gespalten werden kann.

U^{235}_{92} und Pu^{239}_{94} sind die technisch wichtigsten spaltbaren Stoffe.

Auch Thorium und Wismut sind gespalten worden.

2.7. Die Kernfusion

Die Bindungsenergiekurven ließen eine zweite Möglichkeit erkennen, aus Kernumwandlungen Energie zu gewinnen: Die *Synthese leichter Kerne.*
Die Umrechnung des Massendefektes bei der Heliumsynthese ergibt eine Energie von

$$0{,}030383 \text{ MeV} \cdot 931 = 28{,}28 \text{ MeV} = 1{,}08 \cdot 10^{-15} \text{ kcal}.$$

Die Erkenntnis, daß bei der Heliumsynthese sehr hohe Energiebeträge frei werden, hat eine Antwort auf die Frage nach der Herkunft der *Sonnenenergie* gegeben.

Man weiß heute, daß ihre Quelle die Bildung von Atomkernen aus Protonen und Neutronen ist, und zwar im wesentlichen die Bildung von Heliumkernen. In allen Fixsternen sind

reichlich Protonen vorhanden. Diese können sich unter Freiwerden eines Positrons ($p \rightarrow n + e_{+1}^0$) in ein Neutron umwandeln. Umgekehrt kann ein Neutron sich in ein Proton verwandeln, wobei ein freies Elektron gebildet wird ($n \rightarrow p + e_{-1}^0$). Der gemeinsame Name Nukleon deutet diese Umwandelbarkeit an.

Es gibt verschiedene Wege, auf denen in der hohen Temperatur von etwa $2 \cdot 10^7$ °K des Sonneninnern die stabilen Heliumkerne He_2^4 (α-Teilchen) entstehen können. Ihr Endergebnis ist die Bildung dieser Kerne aus 4 Protonen, wobei 2 Positronen frei werden:

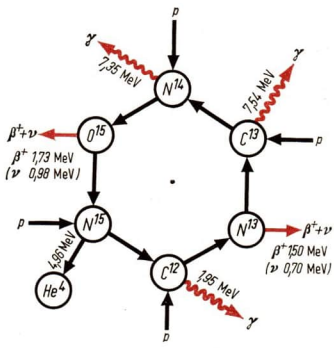
$$4\,H_1^1 \rightarrow He_2^4 + 2\,e_{+1}^0 .$$

Genauere Untersuchungen haben ergeben, daß folgende beiden Reaktionszyklen (Bild 175/1) in Frage kommen:

$$H_1^1 + H_1^1 \rightarrow H_1^2 + e_{+1}^0$$
$$H_1^2 + H_1^1 \rightarrow He_2^3$$
$$He_2^3 + He_2^4 \rightarrow Be_4^7$$
$$Be_4^7 + e_1^0 \rightarrow Li_3^7 + 2\,e_{+1}^0$$
$$Li_3^7 + H_1^1 \rightarrow 2\,He_2^4$$

$$C_6^{12} + H_1^1 \rightarrow N_7^{13} \rightarrow C_6^{13} + e_{+1}^0$$
$$C_6^{13} + H_1^1 \rightarrow N_7^{14}$$
$$N_7^{14} + H_1^1 \rightarrow O_8^{15} \rightarrow N_7^{15} + e_{+1}^0$$
$$N_7^{15} + H_1^1 \rightarrow C_6^{12} + He_2^4$$

C_6^{12} spielt die Rolle eines Katalysators.



175/1 C-N-Zyklus, beginnend mit dem Einfang eines Protons durch C^{12} und γ-Emission

Die Energieberechnungen ergeben, daß die dauernd ausgestrahlte Sonnenenergie (Leistung von $3{,}7 \cdot 10^{23}$ kW) noch auf etwa 10^{11} Jahre gedeckt ist.

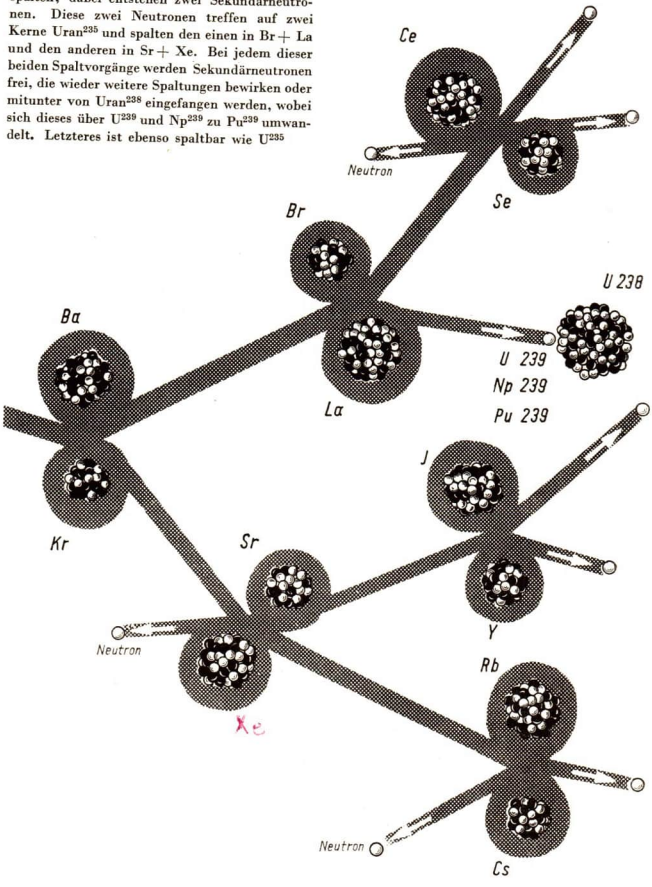
Man nennt solche Kernreaktionen, bei denen die Stoßenergie der Teilchen durch hohe Temperatur erzeugt wird, thermonukleare Reaktionen.

Wenn man bedenkt, daß bei **1 kg He_2^4 durch Fusion etwa 200 Millionen kWh**, also 10 mal soviel wie bei der Spaltung von 1 kg U_{92}^{235}, frei werden, so ist ersichtlich, daß eine technische Beherrschung thermonuklearer Reaktionen von größter Bedeutung ist.

In den großen Forschungstätten wird am Problem der thermonuklearen Reaktion mit Eifer gearbeitet. Ökonomisch wichtig dabei ist die praktische Unerschöpflichkeit des Rohstoffes Wasser, der das zu der Reaktion besonders geeignete Deuterium D_1^2 zu etwa 0,016% enthält, das sich durch Isotopentrennung gewinnen läßt. Die thermonuklearen Prozesse sind etwa D^2 (d, n) He^3 + 3,25 MeV; He^3 (d, p); He^4 + 18,3 MeV.

Es ist nötig, daß ein einmal eingeleiteter Verschmelzungsvorgang sich selbsttätig weiter fortsetzt (ähnlich wie ein Brand sich ausbreitet). Er muß zugleich aber lenkbar und nicht eine Explosion sein, die in der noch zu besprechenden H-Bombe eintritt.

176/1 Links hat ein Neutron einen Kern des Urans^{235} in zwei Bruchstücke (Ba und Kr) gespalten; dabei entstehen zwei Sekundärneutronen. Diese zwei Neutronen treffen auf zwei Kerne Uran^{235} und spalten den einen in Br + La und den anderen in Sr + Xe. Bei jedem dieser beiden Spaltvorgänge werden Sekundärneutronen frei, die wieder weitere Spaltungen bewirken oder mitunter von Uran^{238} eingefangen werden, wobei sich dieses über U^{239} und Np^{239} zu Pu^{239} umwandelt. Letzteres ist ebenso spaltbar wie U^{235}



2.8. Die Kettenreaktion

Die Hahnsche Entdeckung der Kernspaltung wurde durch die wichtige Entdeckung von I. und F. JOLIOT-CURIE ergänzt, daß bei einer Spaltung 2 bis 3 Neutronen frei werden, die neue Spaltungen bewirken können. Es kann dadurch zu einer lawinenartig anschwellenden Kette von Spaltungen kommen (Bild 176/1).
Die Kernspaltungen durch Protonen, Deuteronen, γ-Strahlen großer Energie, die man in Beschleunigern erhält, vermögen keine Kettenreaktion hervorzurufen, da durch die Spaltungen diese Teilchen nicht neu entstehen. Neutronen dagegen können Kettenreaktionen in Uran, Thorium und Plutonium erzeugen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Es dürfen nicht zu viele Neutronen nach außen entweichen. Das wird verhindert bei genügend großer Menge des spaltbaren Stoffes. Die Mindestmasse für das Eintreten einer Kettenreaktion heißt die **kritische Masse.**
2. Das Spaltmaterial darf nicht zu viel Stoffe enthalten, die Neutronen auffangen.
3. Die frei werdenden Neutronen müssen eine entsprechende Geschwindigkeit für die neue Spaltung haben.

2.9. Die Ausnutzung der Kernenergie

Die Entdeckung der Kernspaltung und der in ihr liegenden Möglichkeiten fiel in die politisch erregten Monate vor Beginn des 2. Weltkrieges. Die deutschen und amerikanischen Imperialisten ließen sofort die mit der Kernspaltung verbundenen Forschungsprobleme auf den Krieg ausrichten.
In Deutschland und in den USA wurden Forschergruppen gebildet, die zahlreiche grundlegende Fragen zu klären hatten. Da zu befürchten war, daß das nationalsozialistische Deutschland die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Herstellung von Atombomben ausnützen würde, sahen sich EINSTEIN und andere führende Physiker, die in den USA lebten, gezwungen anzuraten, dem zuvorzukommen. Mit einem riesigen Material- und Geldaufwand wurde nach dem Kriegseintritt Amerikas die Atombombe geschaffen. Nachdem der Krieg im August 1945 schon entschieden war, erfolgte entgegen den Warnungen von EINSTEIN und BOHR ihr Abwurf über Japan.
Die **friedliche Nutzung** der Kernenergie ist das Energieproblem unseres Zeitalters. Wohl reichen die Vorräte an Kohle und Öl, die auf der Erde vorhanden sind, noch längere, aber immerhin nur begrenzte Zeit. Dasselbe gilt für die Reserven an Wasserkräften. Da der Energiebedarf der gesamten Welt dauernd steigt, wird überall an der Nutzbarmachung der Kernenergie gearbeitet. Zwischen der Sowjetunion, den USA und Großbritannien ist 1963 ein Abkommen über eine gemeinsame Arbeit auf diesem Gebiet getroffen worden.

2.9.1. Der Reaktor

Ein Kernreaktor ermöglicht es, durch eine gesteuerte, selbständig ablaufende Kettenreaktion Energie zu gewinnen.

Brennstoff der Reaktoren

Dazu wird zunächst spaltbares Material, der sogenannte *Kernbrennstoff* benötigt. Geeignet dazu sind natürliches Uran, U^{235}, U^{233} und mit U^{235} angereichertes natürliches Uran; außerdem auch Plutonium. U^{235} wird durch Isotopentrennung gewonnen; Plutonium wird in Reaktoren künstlich erzeugt.

Der Brennstoff wird in Form von metallischen Stäben oder Platten als Oxid oder als gelöstes Salz verwendet.

Metallisches U^{238} ist ungeeignet, da der Wirkungsquerschnitt der Kerne für die Spaltung sehr klein ist.

Die ersten Reaktoren (1942 erster Reaktor von FERMI in Chicago) waren thermische Reaktoren mit natürlichem Uran. Der geringe Gehalt an U^{235} hat einen großen Spaltquerschnitt für thermische Energien, so daß Spaltungen häufig genug vorkommen, um einen genügenden Neutronenüberschuß für eine Kernreaktion zu liefern.

Bremssubstanz (Moderator)

Da die frei werdenden Neutronen hohe Geschwindigkeiten haben, wird im Reaktor ein Stoff benötigt, der ihre Energie vermindert, ohne sie einzufangen. Man verwendete dazu oft reinen *Graphit* (thermischer Uran-Graphit-Reaktor).

Besonders geeignet als Bremssubstanz ist *schweres Wasser*, das zunächst nicht in ausreichender Menge vorhanden war. Für manche Reaktortypen ist auch *gewöhnliches Wasser* geeignet. Für einige Reaktoren wird das in der Herstellung sehr teure *Beryllium* verwendet.

Regelungseinrichtungen

Die Regelung der thermischen Reaktoren erfolgt mit Hilfe von *beweglichen Stäben* oder *Platten* aus *Cadmium* oder *borhaltigem Stahl*. Beide Stoffe absorbieren in hohem Maße langsame Neutronen. Je tiefer die Stäbe im Reaktor stecken, desto mehr Neutronen werden absorbiert. Während des Vorganges erfolgt die Regelung automatisch; ebenso die Ausschaltung im Gefahrenfalle. Zur Inbetriebnahme des Reaktors werden die Stäbe so weit herausgezogen, daß auf jedes spaltende Neutron mehr als eines der nächsten Generation kommt. Man sagt der Multiplikationsfaktor ist $k > 1$.

Wenn die nötige Neutronendichte erreicht ist, so stellt man auf $k = 1$ ein. Beim Abschalten werden die Stäbe so tief gesenkt, daß $k < 1$ wird. Bei dem Betrieb eines Reaktors ist die Änderung der Reaktivität durch die steigende Temperatur und die Einwirkung der Spaltprodukte zu berücksichtigen. Unter letzteren bewirken besonders Xe^{135} und Sm^{149} eine sogenannte Vergiftung, da sie einen großen Einfangsquerschnitt für thermische Neutronen haben. Dazu kommen Verschlackung durch die übrigen Spaltprodukte und der Abbrand des Spaltmaterials. Für eine längere Betriebsdauer müssen dafür Reaktivitätsreserven berechnet werden (Nachschub von Brennmaterialstäben, Herausziehen von Absorptionsstäben).

Kühlsystem

Die bei der Spaltung frei werdende Energie wird durch Zusammenstöße der Spaltprodukte und β-Teilchen mit den Atomen der Umgebung sowie Absorption der γ-

Strahlung in Wärmeenergie verwandelt. Um diese zu nutzen und zugleich das Reaktormaterial vor Zerstörung zu schützen, muß die Wärme abgeleitet werden. Wenn als Moderator gewöhnliches oder schweres Wasser verwendet wird, kann das durch *Zirkulation* des Wassers erfolgen.

Graphit als Moderator bedingt eine zusätzliche Kühlung durch eine Flüssigkeit (Wasser, flüssiges Metall, z. B. Na- oder Na-K-Legierungen) oder ein Gas, z. B. CO_2.

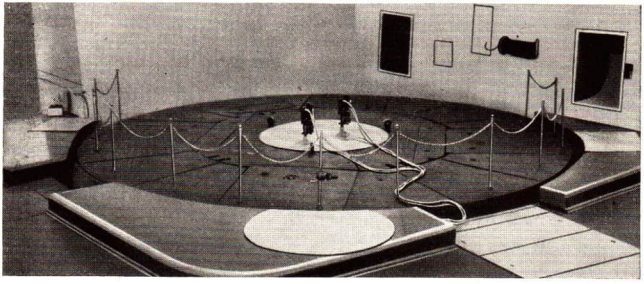
Strahlenschutz

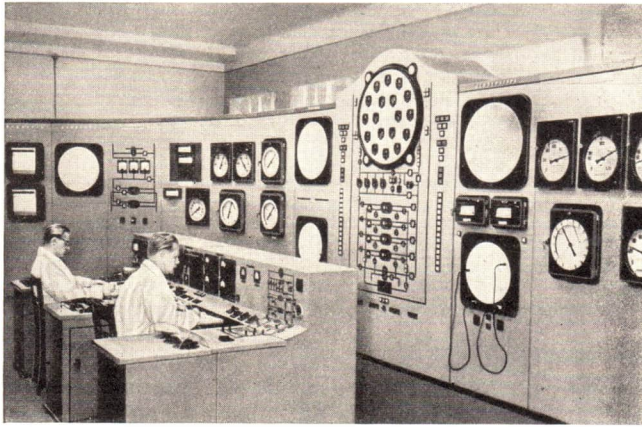
Die radioaktiven zum Teil gasförmigen Produkte müssen ebenso wie die γ-Strahlen abgeschirmt werden. Jeder Reaktor ist daher mit einer dicken Wand aus *Schwerbeton* umgeben. Er wird auch teilweise in den Erdboden eingelassen. Außerdem umgibt man ihn mit einem *Neutronenreflektor*. Dieser besteht aus Graphit, Beryllium oder Berylliumoxiden, an deren Atomkernen die Neutronen gestreut werden. Von dort aus gelangen ein Teil davon in den Reaktor zurück.
Die gesamte Reaktoranlage wird von einem Schaltraum überwacht und gesteuert.

2.9.2. Reaktortypen

Nach ihrer *Verwendung* unterscheidet man Forschungs-, Energie- und Produktionsreaktoren. Die Grenzen lassen sich nicht scharf ziehen.
Nach der *räumlichen Anordnung* des spaltbaren Materials gibt es zwei Arten: ***homogene*** und ***heterogene*** Reaktoren.
Im homogenen Reaktor ist der Brennstoff in einem Moderator (meist Wasser) suspendiert oder als Salz gelöst.
Im heterogenen Reaktor sind Brennstoff und Moderator örtlich getrennt, er ist komplizierter gebaut.
Forschungsreaktoren bilden die größte Gruppe der bisher gebauten Reaktoren. Mit ihnen werden vielerlei Untersuchungen zu Problemen der Kernphysik, der Werkstoff-

179/1 Blick in die Reaktorhalle des ersten sowjetischen Kernkraftwerkes





180/1 Überwachung der radioaktiven Strahlung in den Räumen des ersten sowjetischen Kernkraftwerkes

forschung, der medizinischen Therapie usw. durchgeführt. Sie dienen auch der Ausbildung von Wissenschaftlern und Technikern.

Der erste **Energiereaktor**, der nur der Erzeugung elektrischer Energie dient, wurde am 27. Juni 1954 in der Sowjetunion in Betrieb genommen (Bilder 179/1 und 180/1). Er ist ein thermischer heterogener Reaktor mit 5%ig angereichertem Uran und Graphit. Die frei werdende Wärme wird mit Hilfe eines Druckwassersystems (100 at, 270 °C) nach außen geleitet. Der Reaktor arbeitet sehr zuverlässig. Weit größere Kernkraftwerke (750 MW) sind im Bau. Eine schematische Darstellung der Energieumwandlungen in einem Kernkraftwerk zeigt Bild 180/2.



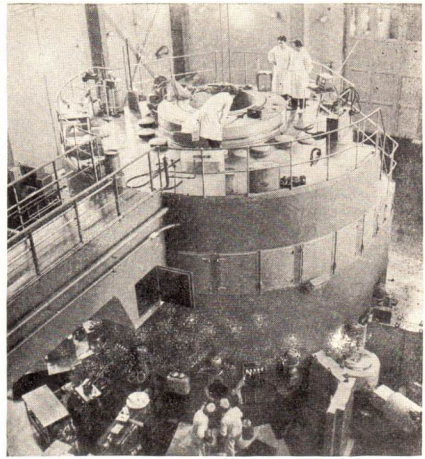
180/2 Energieumwandlungen in einem Kernkraftwerk

Die **Produktionsreaktoren** erzeugen Plutonium aus U^{238}, U^{233} und aus dem nichtspaltbaren Th^{232}. Man nennt sie auch Brutreaktoren.

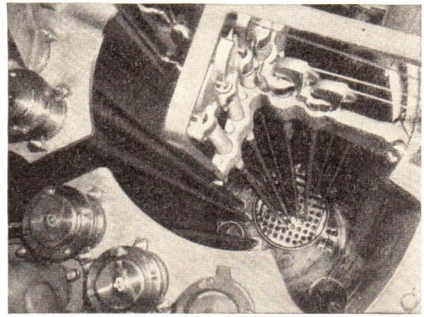
2.9.3. Kernenergie zum Antrieb von Fahrzeugen

Bis jetzt werden nur Schiffe mit Kernenergie angetrieben. Bei Flugzeugen, Raketen, Lokomotiven ist man über Vorstudien noch nicht hinausgekommen. Die Haupt-

181/1 a und b Der erste Reaktor der DDR in Rossendorf bei Dresden wurde mit großer Hilfe der Sowjetunion 1957 in Betrieb genommen. Er dient zu Forschungszwecken und zur Herstellung radioaktiver Isotope. Als Brennstoff wird auf 10% U^{235} angereichertes natürliches Uran verwendet. Als Kühlmittel und Moderator dient gewöhnliches Wasser. Die Brennstäbe haben einen Durchmesser von 1 cm und eine Länge von 60 cm und sind mit Aluminium verkleidet. Je 16 davon werden in einer Kasette vereinigt. Die Spaltung erfolgt durch thermische Neutronen. Die ganze Anlage ist demnach ein thermischer heterogener Reaktor. 1961 wurde in Rossendorf ein zweiter Reaktor in Betrieb genommen

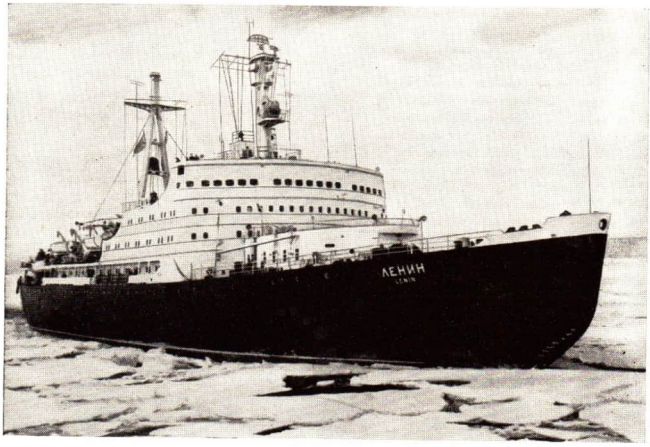


a



b

schwierigkeit liegt in der Konstruktion geeigneter Sicherheitseinrichtungen.
1959 wurde in der Sowjetunion der erste und zugleich auch größte durch Kernenergie angetriebene Eisbrecher „Lenin" fertiggestellt (Länge 134 m, Breite 27,6 m, 16 000 BRT, Bild 182/1).
Die Sowjetunion und die USA verfügen auch über U-Boote mit Kernenergieantrieb. Größere Fracht- und Fahrgastschiffe dieser Art sind im Bau.



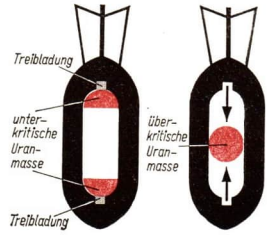
182/1 Der Eisbrecher „Lenin" ist mit drei Druckwasserreaktoren ausgestattet und arbeitet mit angereichertem Uran. Der Eisbrecher kann ohne Brennstoffaufnahme über 1 Jahr laufen und verbraucht dabei etwa 80 kg Uran

2.9.4. Kernwaffen

Die Uranbombe

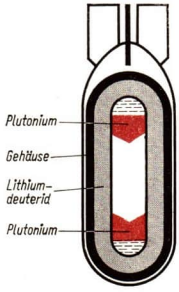
Für die ersten Atombomben wurde reines U^{235} verwendet. Die überall vorhandenen freien Neutronen lösen darin eine Kettenreaktion aus, falls die kritische Masse vorhanden ist. Daher wird der Spaltstoff in der Bombe in zwei voneinander getrennten unterkritischen Massen angeordnet. Die Bombe wird dadurch gezündet, daß die Massen durch eine Sprengladung innerhalb eines dicken Metallmantels aufeinander geschossen werden (Bild 182/2).

Der zweite Weltkrieg war praktisch schon entschieden, als eine solche Uranbombe am 6. August 1945 über Hiroshima abgeworfen wurde. Ihre Anwendung war durch keinerlei militärische Notwendigkeit begründet. Sie tötete 80 000 Menschen sofort, noch mehr wurden verletzt. Durch Strahleneinwirkung waren viele von ihnen zu Siechtum und Tod verurteilt.



182/2 Schema einer Uranbombe

Drei Tage später wurde die Stadt Nagasaki das Opfer einer amerikanischen Plutoniumbombe ähnlicher Konstruktion. Auf Kosten des Lebens und der Gesundheit unzähliger Männer, Frauen und Kinder hatten die amerikanischen Imperialisten eine „neue Waffe taktisch erprobt" und meinten, der Welt gezeigt zu haben, daß ein Widerstand gegen ihren Anspruch auf Weltherrschaft nutzlos sei.



183/1 Schema einer Wasserstoffbombe

Die Wasserstoffbombe

Auch die Möglichkeit, Energie durch Verschmelzung von Kernen freizusetzen, ist zuerst in den Dienst kriegerischer Vorbereitungen gestellt worden. In Amerika wurde die Wasserstoffbombe entwickelt. Bild 183/1 zeigt die schematische Darstellung einer Wasserstoffbombe.
Wir wissen, daß für eine Kernfusion eine sehr hohe Temperatur nötig ist. Sie wird durch die Zündung einer Plutoniumbombe erzeugt. Dann setzt unter sehr großer Wärmebildung eine Kernfusion ein, bei der sich Heliumkerne aus Wasserstoffisotopen bilden. Dabei ist der Masse keine kritische Grenze gesetzt, so daß die Möglichkeiten ungeheuerlicher Zerstörung bestehen.

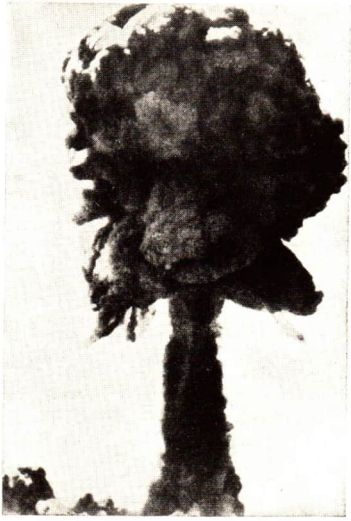
Tabelle 9: Die Wirkung einer mittleren H-Bombe (unmittelbare Explosionswirkung)

Abstand vom Explosionszentrum	Wirkung der Wärmestrahlung	Wirkung der radioaktiven Strahlung	Wirkung der Druckwelle
15 km	tödliche Verbrennungen	absolut tödlich	völlige Zerstörung von Gebäude usw.
30 km	schwere bis tödliche Verbrennungen, Entflammung aller leicht entzündlichen Gebäude, Anlagen usw.	noch tödlich, schwere Hautschäden	mittlere bis schwere Zerstörung
60 km	noch leichte bis schwere Verbrennungen, Brände möglich	noch Schädigungen bei entsprechenden Windverhältnissen	
120 km	leichte Hitzedefekte		

● *Stellen Sie den Unterschied zwischen einer Uranbombe und einer Wasserstoffbombe heraus!*

Der Schutz vor Kernwaffen

Der Schutz vor der vielfachen Wirkung der Kernwaffen ist bedeutend schwieriger als der Schutz vor den herkömmlichen Waffen.
Im Zentrum einer Atombombenexplosion gibt es keinen Schutz. Mit der weiteren Entfernung vom Zentrum nehmen die Aussichten auf einen wirksamen Schutz ständig



184/1 Oberer Teil eines Explosionspilzes einer Atombombenexplosion

zu. Schutzmittel vor dem Hauptfaktor der Vernichtung, der Druckwelle, sind Bunker, Unterstände, Löcher, Gräben, Keller massiver Gebäude. Sie schützen auch vor der Wärmestrahlung, gegen die auch Umhänge aus nicht brennbarem Material verwendet werden können. Gegen die durchdringenden Neutronen- und γ-Strahlen vermögen dicke Mauern und Erdwälle einen gewissen Schutz zu bieten, da sie die Strahlung absorbieren. Neutronen können künstliche Radioaktivität hervorrufen, deswegen müssen Lebensmittel in betroffenen Gebieten vor dem Genuß auf etwaige Strahlung untersucht werden. Da der radioaktive Zerfall weder aufzuhalten noch zu beschleunigen ist, wird man mit dem Betreten eines verseuchten Geländes oder mit der Benutzung von Gegenständen genügend lange warten müssen.

Der beste Schutz vor der Kernwaffe, an dem jeder Mensch mitarbeiten kann, ist der weltweite Kampf um die totale Abrüstung.

Die Sowjetunion schlug im September 1959 vor der Vollversammlung der Vereinten Nationen vor:

Alle im Besitz der Staaten befindlichen Atom- und Wasserstoffbomben werden vernichtet, ihre Produktion wird eingestellt. Die Energie der spaltbaren Materialien wird ausschließlich für friedliche, wirtschaftliche und wissenschaftliche Zwecke verwendet. Die Raketen aller Reichweiten für militärische Zwecke werden abgeschafft, und die Raketentechnik dient nur Transportzwecken und der Erschließung des Weltraumes zum Wohle der ganzen Menschheit.

Ein erster Schritt ist das im Juli 1963 in Moskau von der UdSSR, den USA und Großbritannien beschlossene Verbot von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre, im Weltraum und im Wasser. Ebenso wie die DDR sind viele Staaten diesem Abkommen beigetreten.

2.10. Erzeugung und Anwendung radioaktiver Isotope

Die Kernreaktoren ermöglichen es heute, von fast allen Elementen radioaktive Isotope herzustellen. Die Elemente werden in den Moderator eingebracht und hier durch Neutronen umgewandelt, z. B. ist

$$Co^{59}_{27} + n^{1}_{0} \rightarrow Co^{60}_{27} + \gamma$$

z. Zt. der stärkste γ-Strahler.

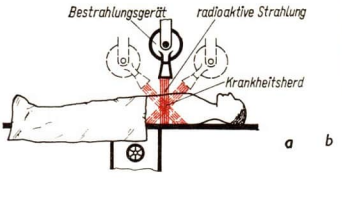
Beim Arbeiten mit Radioisotopen sind besondere *Schutzmaßnahmen nötig.* Mittels eines Übertragungsmechanismus (Manipulator) kann man die Bewegungen der Hand auf Greifwerkzeuge im Innern eines mit strahlensicheren Wänden und Fenstern abgeschirmten Arbeitsraumes übertragen.

Es gibt drei grundsätzliche Methoden der Anwendung radioaktiver Isotope:
1. Bestrahlungsverfahren,
2. Durchstrahlungsverfahren,
3. Markierungsverfahren.

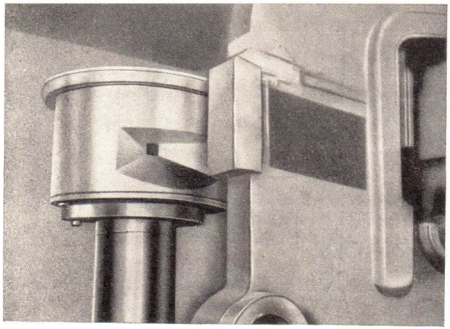
2.10.1. Bestrahlungsverfahren

Bestrahlungen werden in der Medizin zur *Therapie* und in der Kunststoffindustrie zur *Veredelung von Hochpolymeren* verwendet. Das Hauptziel der therapeutischen Anwendung ist es, eine geeignete *Strahlendosis* auf Krankheitsherde zu richten. Stark wachsende Gewebe mit regem Stoffwechsel (alle bösartigen Geschwulste) sind besonders strahlenempfindlich. Um sie völlig zu zerstören und dabei das benachbarte Gewebe möglichst zu schonen, wendet man sowohl eine *äußere* Bestrahlung vorwiegend mit Co^{60} oder Cs^{137} (Bilder 185/1 a und b) als auch eine *innere* Bestrahlung durch Einbringen von kurzlebigen Radioisotopen direkt in die Gewebe an.

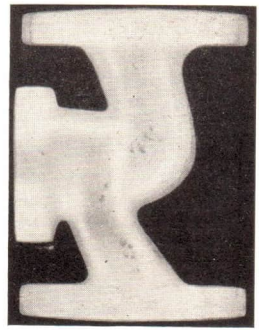
Eine Neutronentherapie konnte bisher noch nicht entwickelt werden. Das natürliche Radium behält nach wie vor seine große Bedeutung als Quelle konstanter Strahlung.



185/1 a) Schema einer Bestrahlung mit schwenkbarem Kobaltpendelgerät
b) Medizinischer Apparat zur Bestrahlung krebskranker Körperteile



186/1 Stationäre Isotopenanlage; Strahlenquelle und Film sind gut zu erkennen

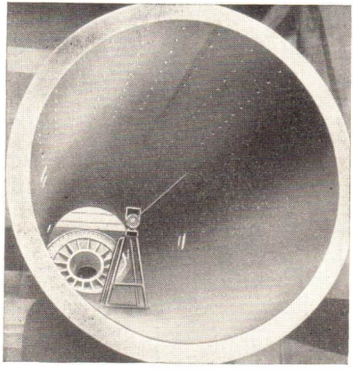


186/2 Aufnahme eines Ventilgehäuses unter Verwendung von γ-Strahlen

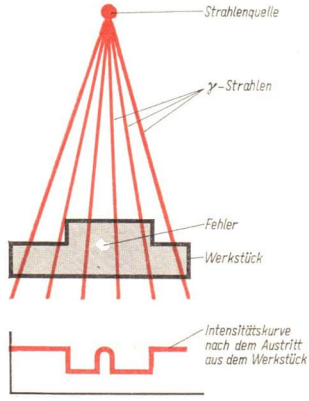
2.10.2. Durchstrahlungsverfahren

Zur Durchstrahlung verwendet man α-, β- und γ-Strahlen. Gußteile und Schweißverbindungen können durch die γ-Strahlung vorwiegend von Co^{60}, Cs^{137}, Ir^{192}, Tm^{170} auf Risse, Poren und Lunker untersucht werden. Die größere Intensität der durch

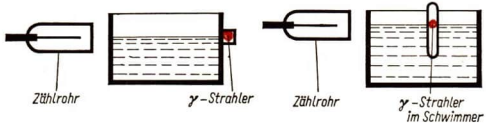
186/3 Prüfen von Rundschweißnähten



186/4 Verlauf der Intensität der γ-Strahlen nach Durchgang durch ein Werkstück

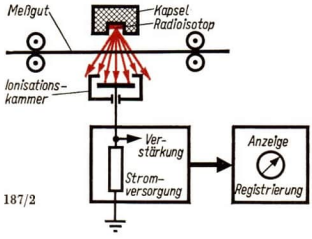


die Lücken weniger geschwächten Strahlung wird mit Hilfe eines Films oder eines Zählers registriert (Bilder 186/1 bis 4). Die Werkstoffprüfung mit γ-Strahlen heißt *γ-Defektoskopie.* Vorteilhaft z. B. gegenüber Röntgengeräten sind die kleinen Abmessungen der Strahlenquellen und Arbeitsgeräte. Die Präparate sind meistens Zylinder mit der Höhe und dem Durchmesser von einigen Millimetern. Normalerweise braucht man keine Elektroenergie, keine Kühlung und keine Hochspannung.
Eine Durchstrahlung mit γ-Strahlen ermöglicht es, die Füllhöhe eines Behälters zu messen, da Füllgut und Luft verschieden absorbieren (Bilder 187/1 a und b).

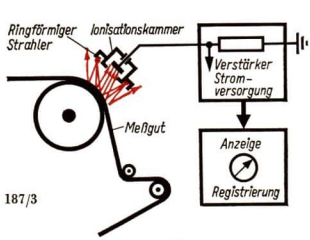


187/1 a und b Schemata von Füllstandmessungen bei Flüssigkeiten

Beim Durchgang von β- und γ-Strahlen durch Stoffe kann man mit einer Genauigkeit von 1% bis $1^0/_{00}$ die Dicke eines Materials bei konstanter Dichte oder die Dichte bei konstanter Dicke kontinuierlich und berührungsfrei messen (Bild 187/2).

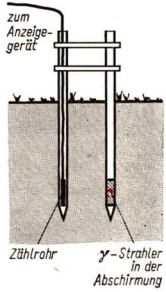


187/2



187/3

Wenn das Meßgut nur von einer Seite zugänglich ist, wird die *Rückstreumessung* angewendet (Bild 187/3).
Die Verwendung *radioaktiver Bodensonden* zeigt das Bild 187/4.



187/4 Die Messung der Absorption von γ-Strahlen kann für die Dichtebestimmung der Erde verwendet werden: Man treibt zwei Rohre in einen bestimmten Abstand in das Erdreich. In das eine Rohr kommt die Strahlenquelle, in das andere das Nachweisgerät. Die Dichte der Erde bestimmt die ankommende Strahlungsintensität

2.10.3. Markierungsverfahren

Für die naturwissenschaftlich-technische Forschung und für die Praxis in Medizin, Landwirtschaft und Industrie ist das *Markierungsverfahren* von großer Bedeutung. Man fügt einer Verbindung aus stabilem Atomen einige radioaktive Isotope bei, die in geringsten Mengen durch ihre Strahlung nachweisbar sind. Wenn eine markierte Substanz von einem lebenden Körper aufgenommen wird, so läßt sich ihr Weg im Körper verfolgen.

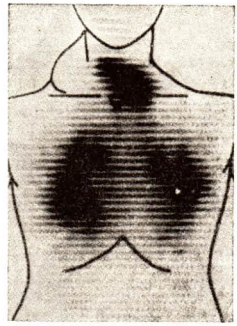
Beispiele:

Mit radioaktiven Eisenatomen, z. B. im Hämoglobin der roten Blutkörperchen, läßt sich der Blutkreislauf kontrollieren und bei verminderter Lebensdauer der Erythrozyten eine Blutkrankheit feststellen. Durch radioaktive Ca-Isotope im Vogelfutter wurde nachgewiesen, daß Ca zuerst in die Knochen des Vogels und dann erst in die Eierschalen geht.

Manche Krebszellen speichern Jod. Man kann sie auffinden, wenn man eine Salzlösung mit radioaktivem J^{131} trinken läßt (Bild 188/1).

In der *Landwirtschaft* konnte festgestellt werden, wo und innerhalb welcher Zeit Pflanzen die aus dem Dünger aufgenommenen Nährstoffe ablagern.

In der Industrie läßt sich die Abnutzung beweglicher Maschinenteile untersuchen, wenn sie vor dem Einbau mit Neutronen bestrahlt und dadurch radioaktive Eisenkerne erzeugt werden. Diese gelangen in das Schmiermittel, dessen Strahlung dann dem Verschleiß entspricht.



188/1 Verteilungsbild von radioaktiven Jod bei Schilddrüsenkrebs mit Lungenmetastasen

2.11. Dosimetrie und Strahlenschutz

Die Grundlage der Dosimetrie bildet die Ionisierung der Luft. Die Dosiseinheit Röntgen (r) wurde 1928 eingeführt (vgl. Seite 108).

Da für die biologische Wirkung die je g Gewebe absorbierte Strahlungsenergie maßgebend ist, hat man nach 1945 definiert eine

Einheit der Energiedosis

$$\mathbf{1\ rad^1 = 100\ \frac{erg}{g} = 10^{-2}\ \frac{Ws}{kg}.}$$

Diese Definition gilt für alle ionisierenden Strahlen:

1 r entspricht 0,88 rad in trockener Luft und
1 rad in Wasser und Weichteilgewebe.

Eine große Zahl radiologischer Forscher der Frühzeit ist an Strahlenschäden vorzeitig

[1] (engl.): Radiation absorbed dosis

gestorben. Die Erfahrung hat gelehrt, daß gleiche Energiedosen bei verschiedenen Strahlenarten verschiedene biologische Wirkungen haben. Deswegen ist der Begriff der **RBW-Dosis** (relative biologische Wirksamkeit) mit der Einheit rem[1] geschaffen worden.

Dosis in rem = f Dosis in rad.

Der RBW-Faktor ist noch mit Unsicherheiten behaftet. Nach internationaler Empfehlung wird gerechnet

$f = 1$ für Röntgen- und Elektronenstrahlen,
$f = 10$ für schnelle Neutronen und Photonen sowie für natürliche γ-Strahlen.

Die unvermeidliche natürliche Strahlenbelastung durch immer vorhandene radioaktive Stoffe und kosmische Strahlung wird jährlich mit 150 mrad gegeben. Sie ist seit 1945 durch die Versuche mit nuklearen Waffen gestiegen. Besonders gefährdet sind die blutbildenden Organe, die Augen und die Keimdrüsen. Bis zum 30. Lebensjahre hält man eine mittlere wöchentliche Belastung von 100 mrad für zulässig, später etwas mehr. Bei einmaliger Belastung gelten 25 rad noch als zulässig. 100 rad nennt man *kritische Dosis*, bei der die ersten Todesfälle auftreten. 700 rad werden als letale Dosis bezeichnet. Es ist zu beachten, daß es für die Chromosomen keinen Schwellenwert gibt. Kleinste Dosen summieren sich und verursachen schließlich Erbschäden.
Von 1963 an werden in der DDR alle beruflich Strahlenbelasteten mit Filmdosimetern kontinuierlich überwacht.

Fragen, Aufgaben

1. Was versteht man unter Massendefekt?
2. Erläutern Sie die Einsteinsche Gleichung!
3. Welche Überschlagsrechnung gilt zwischen Masseneinheit und Elektronenvolt?
4. Welcher Unterschied besteht zwischen Kernumwandlung und Kernspaltung?
5. Wie verhält sich die Größe der Spaltungsenergie zur Verbrennungsenergie?
6. Welche sind die z. Zt. wichtigsten spaltbaren Stoffe?
7. Woher stammt die Sonnenenergie?
8. Was versteht man unter thermonuklearen Reaktionen?
9. Welche Voraussetzungen hat eine Kettenreaktion?
10. Welcher Unterschied besteht zwischen den Spaltungsvorgängen im Kernreaktor und in der Atombombe?
11. Wozu werden Moderatoren benötigt?
12. Wie kann der Reaktor gesteuert werden?
13. Was versteht man unter dem Multiplikationsfaktor?
14. Wie erzeugt man radioaktive Isotope?

[1] (engl.): Roentgen equivalent men

Zusammenfassung

1. **Der Zusammenhalt (Stabilität) der Kerne wird durch spezifische Kernkräfte von sehr geringer Reichweite (10^{-15} m) und großer Stärke bewirkt.**

   Erläutern Sie die Natur dieser Kräfte!

2. **Die Bindungsenergie der Kerne ist so groß, daß man ihr Massenäquivalent $\frac{W}{c^2}$ als Massendefekt ermitteln kann:**

   $1\ g = 25 \cdot 10^6$ kWh,

   1 TME = 1 MeV.

   Was verstehen Sie unter der Bindungsenergie?

3. **Die Bindungsenergie eines Nukleons beträgt etwa 7 bis 8,6 MeV.**

   Charakterisieren Sie die Arten der Nukleonen!

4. **Energie wird frei, wenn Atomkerne mit kleiner Bindungsenergie je Nukleon in solche mit großer übergeführt werden.**

   In welcher Weise können die energetischen Verhältnisse eines Atomkerns verändert werden?

5. **Kerne aus dem Ende des Periodensystem (Th, U, Pu) können unter Freisetzen großer Energiemengen durch Neutronen gespalten werden.**

   Wie kann die Kernspaltung realisiert werden?

6. **Thermonukleare Reaktionen sind Kernreaktionen, bei denen die Wärmeschwingung der reagierenden Teilchen so groß ist, daß eine Kernfusion eintreten kann.**

   Was versteht man unter Kernfusion?

7. **Kernreaktoren sind Einrichtungen, mit denen durch eine gesteuerte Kettenreaktion die bei der Kernspaltung frei werdende Energie gewonnen wird.**

   Nach welchen Gesichtspunkten werden Kernreaktoren eingeteilt?

8. **Radioaktive Isotope werden im Bestrahlungs-, Durchstrahlungs- und Markierungsverfahren angewendet.**

   Nennen Sie Anwendungsbeispiele für die genannten Verfahren!

9. **Maßeinheiten der radioaktiven Strahlung sind r, rad und rem.**

   Erklären Sie diese Maßeinheiten und ihre Beziehungen untereinander!

1. Formeln

Thomsonsche Schwingungsgleichung

$$T = 2\pi\sqrt{L\,C} \tag{1}$$

Wellenverstärkung

$$\frac{n\lambda}{a} \approx \frac{s_n}{e} \tag{2}$$

Wellenauslöschung

$$d_A = m\frac{\lambda}{2} \tag{3 a}$$

(m ist eine ganze Zahl)

Schichtdicke für Wellenauslöschung

$$2\,d_A = m\lambda \tag{3 b}$$

Wellenverstärkung reflektierender Wellen

$$d_v = (2\,m + 1)\frac{\lambda}{4} \tag{4}$$

Wellenauslöschung bei der Interferenz an dünnen Schichten

$$d_A = \frac{m \cdot \lambda_0}{2\,n} \tag{5}$$

$$\lambda_0 = \frac{4}{2\,m - 1}\,n\,d_v \tag{6}$$

Brewstersches Gesetz

$$\alpha_p + \beta_p = 90° \tag{7}$$

Brechungsgesetz

$$n = \tan\alpha_p \tag{8}$$

Stefan-Boltzmannsches Gesetz

$$S = \alpha \cdot T^4 \tag{9}$$

Wiensches Gesetz

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{const} = 0{,}2896\ \text{cm} \cdot \text{grad} \tag{10}$$

Materiewellen

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \tag{11}$$

Radius des Atomkerns

$$r = r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}} \tag{12}$$

Volumen des Atomkerns

$$V = \frac{4}{3}\pi \cdot r_0^3 \cdot A \tag{13}$$

2. Lösungen

Seite 12

5. In diesem Falle entlädt sich der Kondensator aperiodisch. Das entsprechende mechanische Beispiel ist die Bewegung eines Federschwingers in einer sehr zähen Flüssigkeit.

6. Potentielle Energie der gespannten Feder

$$W = \frac{1}{2} k s^2 .$$

Energie des geladenen Kondensators

$$W = \frac{1}{2} \frac{1}{C} Q^2 .$$

Seite 15

1. Bei diesem Experiment müßte zum Erreichen des Resonanzfalles die Masse eines Federschwingers verändert werden, während er zu erzwungenen Schwingungen mit konstanter Frequenz angeregt wird.

Seite 16

2. Im Resonanzfall durchläuft der Scheitelwert des Stromes, der durch die Reihenschaltung fließt, den Maximalwert $\hat{I} = \frac{\hat{U}}{R}$ (R ist der Ohmsche Widerstand des Kreises, $\hat{U}$ ist der Scheitelwert der angelegten Spannung.) Der Wechselspannungsabfall an Spule und Kondensator ist dann größer als die angelegte Spannung und reicht zum Zünden der Glimmlampe aus.

Fertigen Sie ein Zeigerdiagramm zur Erläuterung dieses Sachverhalts an!

4. $L_1 C_1 = L_2 C_2 .$

5. *Gegeben:* *Gesucht:* T

$L = 0{,}6\ \mathrm{H}$
$C = 6{,}5\ \mu\mathrm{F}$

Lösung:

$$T = 2\pi\sqrt{L\,C}$$

$$T = 2\pi\sqrt{0{,}6\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}}\,6{,}5 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{V}}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{3{,}9 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{s}^2}$$

$$T = 1{,}24 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{s}$$

$$T = 12{,}4\ \mathrm{ms}$$

Die Schwingungsdauer beträgt 12,4 Millisekunden.

6. *Gegeben:* *Gesucht:* L

$T = 1\ \mathrm{s}$
$C = 30\ \mu\mathrm{F}$

Lösung:

$$T = 2\pi\sqrt{L\,C}$$

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C}$$

$$L = \frac{1\ \mathrm{s^2\,V}}{4\pi^2 \cdot 30 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{As}}$$

$$L \approx 850\ \mathrm{H}$$

Die Induktivität beträgt etwa 850 Henry.

Seite 19

3. Der angekoppelte Schwingkreis wird zu erzwungenen Schwingungen veranlaßt. Die Spannungsamplitude erreicht bei Resonanz den Höchstwert. Diese tritt ein, wenn außer den Induktivitäten auch die Kapazitäten beider Kreise übereinstimmen.
Oberhalb und unterhalb der Kapazität 250 pF sind die Spannungsamplituden kleiner als im Resonanzfall. Die grafische Darstellung ergibt eine Kurve ähnlich wie im Bild 13/3.

Seite 40

1. Den am häufigsten auftretenden Buchstaben müssen die kürzesten Zeichen zugeordnet werden.

3. 111 Sender (Beachten Sie die Tabelle auf Seite 34).

4. 42 Sender.

Seite 50

4. *Gegeben:* *Gesucht:* C_2

$C_1 = 500\ \text{pF}$

$f_1 = 0{,}5\ \text{MHz}$

$f_2 = 1{,}5\ \text{MHz}$

(aus Tabelle Seite 34)

Lösung:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C_1}}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C_2}}$$

$$\frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

$$C_2 = C_1\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2$$

$$C_2 = 500\ \text{pF} \cdot \frac{1}{3^2}$$

$$C_2 = 55\ \text{pF}$$

Die kleinste einstellbare Kapazität muß 55 Pikofarad betragen.

Seite 60

1. Der Abstand beider Ziele muß größer als die halbe Länge des Wellenzuges sein.

4. *Gegeben:* *Gesucht: s*

$L = 8\ \text{cm}$

$l = 5{,}5\ \text{cm}$

$T = 1\ \text{ms}$

a) Berechnung der Laufzeit des Impulses

$$t : T = l : L$$

$$t = T\,\frac{l}{L}$$

$$t = 10^{-3}\,\text{s}\,\frac{5{,}5}{8}$$

$$t = 0{,}69 \cdot 10^{-3}\,\text{s}$$

In der Zeit t legt der Wellenzug, der sich mit Lichtgeschwindigkeit

$$\left(c = 3 \cdot 10^5\,\frac{\text{km}}{\text{s}}\right)$$

ausbreitet, die Strecke $2\,s$ zurück:

b) $$s = \frac{1}{2}\,c\,t$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 10^5\,\frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot 0{,}69 \cdot 10^{-3}\,\text{s}$$

$$s = 104\ \text{km}$$

Die Entfernung des Radarzieles beträgt 104 km.

Seite 85

1. Der Gangunterschied beider Wellen beträgt $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$, allgemein $(2n-1)\frac{\lambda}{2}$. Gemäß Bild 76/1 ist dann

$$\frac{\frac{\lambda}{2}}{a} = \frac{s_1}{e_1} \approx \frac{s_1}{e}$$

und allgemein

$$(2n-1)\frac{\lambda}{2} = \frac{a\,s_n}{e}$$

für die Gebiete der Wellenauslöschung.

2. *Beispiel:* Die Stimmgabel hat die Frequenz $f = 100\ \text{Hz} = 100\ \text{s}^{-1}$. Gemessen werden:

$$a = 1\ \text{cm},\quad e = 4\ \text{cm},\quad s_1 = 1{,}2\ \text{cm}.$$

Berechnet werden:

$$\lambda \approx \frac{a\,s_1}{e} = \frac{1\ \text{cm} \cdot 1{,}2\ \text{cm}}{4\ \text{cm}} = 0{,}3\ \text{cm}$$

$$c = f\lambda = 100\ \text{s}^{-1} \cdot 0{,}3\ \text{cm} = \underline{\underline{0{,}3\ \text{m s}^{-1}}}$$

3. Beide Wellenarten werden durch die Beugung am Doppelspalt in zwei kohärente Wellensysteme aufgespalten und liefern ein Interferenzbild. Die Unterschiede zwischen beiden Interferenzbildern liegen in der Eigenart der Wellen. Wasserwellen sind (flächenhaft ausgedehnte) Oberflächenwellen; deshalb sind die Gebiete der Wellenverstärkung und -auslöschung auf dem Auftreffschirm im wesentlichen linear angeordnet. Lichtwellen breiten sich allseitig im Raum aus; deshalb ist das Interferenzbild auf dem Auffangschirm flächenhaft ausgedehnt. Wellenverstärkung bedeutet Helligkeit, Auslöschung Dunkelheit.

4. Beim Gitter interferieren sehr viele Lichtbündel miteinander. Das bedeutet große Helligkeit in den Richtungen der Wellenverstärkung ($\Delta = n\lambda$) und weitgehende Auslöschung in allen anderen Richtungen ($\Delta \neq n\lambda$). Beim Doppelspalt liefern die zwei gebeugten Lichtbündel einen sinusförmigen Helligkeitsverlauf.

7. $$\lambda \approx \frac{a\,s_1}{e} = \frac{15\ \mu\text{m} \cdot 0{,}1\ \text{m}}{2{,}5\ \text{m}} = \underline{\underline{0{,}6\ \mu\text{m}}}.$$

8. $$a \approx \frac{\lambda e}{s_1} = \frac{0{,}59\ \mu\text{m} \cdot 2\ \text{m}}{0{,}09\ \text{m}}$$

$$13\ \mu\text{m} = \underline{\underline{0{,}013\ \text{mm}}}.$$

9. Durch die Vogelfeder sieht man eine Folge von Spektren, die im wesentlichen in einer Reihe angeordnet sind. Durch Gewebe und ein Sieb sind die Spektren in einer Art Quadratmuster angeordnet. Letzteres ist dadurch zu erklären, daß diese Gegenstände Kreuzgitter sind, d. h., daß sie zwei Gruppen von senkrecht zueinander verlaufenden Gittern enthalten (vgl. Tafel IV).

Abschirmung 32
Absorptionsspektrum 84
Amateurfunk 54
Amplitudenmodulation 37, 38
—, negative 66
Analysator 100
Anlauffarben des Stahls 94
Anoden-gleichstrom 18
— wechselstrom 18
Antennen 30
— umschalter 56
Antikatode 104
ARDENNE 63
Ausbreitungsgeschwindigkeit 34, 117
Ätherhypothese 24
Atom-bau 133
— bomben 182
— durchmesser 133
— hülle 126
— hypothese 28
— kern 135, 149
— modell 135
Audionschaltung 47

Bandfilter 48
BECQUEREL 164
Bestrahlungsverfahren 184
Betastrahlen 157
Betatron 166
Beugung 77, 80
Beugungsspektrum 83
Bild-aufnahmeröhre 63
— punkte 61
— wechsel 66
Bindungsenergie 170, 171
Biprisma, Fresnelsches 86
BLACKETT 167
Blasenkammer 163
Boden-sonden, radioaktive 187
— -welle 35
Bohrsches Atommodell 140

Brechung 33
Brechungsindex 118
Brems-strahlung 112
— substanz 178
Brennstoff 178
Brewstersches Gesetz 101

CARO 127
CHADWICK 143

Dämpfung 10
DALTON 127
Debye-Scherrer-Verfahren 114
Demodulation 44
DEMOKRIT 126
Detektor 44
Diagnostik 102
Diffusionsnebelkammer 163
Dipol 23
Dispersionsspektrum 83
Doppel-prisma 86
— spalt 77
Dosimetrie 188
Dosis 108
Dreh-anoden-Röntgenröhre 106
— kristallverfahren 114
Dreipunktschaltung 19
Durch-dringungsfähigkeit 106
— leuchtung 108
— strahlungsverfahren 186

Effekt, piezoelektrischer 41
Eigen-frequenz 14, 17
— peilung 53
Einkristalle 115
EINSTEIN 172
Elektrolyse 128
Elektronen-mikroskop 147
— schleuder 166
— stoßversuche 142
Elementarladung 128

ELSTER 158
Emissionsspektrum 83
Empfängerröhre 42
Endicon 64, 65
Endstufe 43
Energie 95
— austausch 12
— dosis 188
— reaktor 180
— transport 28, 75
— umwandlung 10
— verteilung 137
Entspiegelung 94
EPIKUR 127

Faltdipol 31
FARADAY 20
— Effekt 118
Faradaysche Konstante 129
Federschwinger 10
Feinstrukturuntersuchung 115
Feldausbreitung 28
FERMI 168
Fernsehen, industrielles 68
Fernseh-empfang 68
— kamera 63
— norm 65
— sender 66
— sendung 63
Fernwirkung 20
Forschungsreaktor 179
FRANCK 143
Fremdpeilung 54
Frequenz 10
— modulation 37, 39
Funk-meßverfahren 54
— ortung 53
— peilung 53
— wellen 8

Gangunterschied 89
GASSENDI 127
GEITEL 158
Geradeausempfänger 46
Geräte, optische 96
Gitter 80
— konstante 82
— spektrograf 97
Gitterspule 19
Gleichlauf 63
— zeichen 67
Gleichung, Einsteinsche 171
Glühkatoden-Röntgenröhre 105
Grobstrukturuntersuchung 109

HAHN 173
Halb-leitertechnik 72
— wertschichten 107
— wertszeiten 161
Hauteffekt 70
H-Bombe 183
HEISENBERG 151
HERTZ 21
HF-Erwärmung, induktive 70
—, kapazitive 71
Hochfrequenz-generatoren 19
— technik 37
— verstärker 46
Hohlraumstrahler 136

Ikonoskop 64
Impuls-Echo-Prinzip 54
— generator 56, 66
Interferenzen am Doppelspalt 77
— an dünnen Schichten 88, 93
— durch Beugung 73
— durch Brechung oder Reflexion 86
Interferenzfilter 97
Interferometer 96
Ionenröntgenröhren 104
Ionisationskammer 161
Ionosphäre 36
Isotope 152
Isotopentrennung 154
IWANENKO 151

Katodenstrahlen 133
Kern-fusion 174
— kräfte 170
— kraftwerk 180
— spaltung 173
— spurenplatten 164
— umwandlungen 166
— waffen 182
Kettenreaktion 177
Kochsalzkristall 133

Kohärenz 79
Kopplung 15
Korpuskeltheorie 145
Kreuzgitter 114
Kristall, doppelbrechendes 100
— gitter 114
Kristallite 115
Kühlsystem 178
Kurzwellen 36

Längstwellen 36
Langwellen 36
L-Antenne 31
Laser 124
Laue-Diagramm 113
LAWRENCE 165
LEBEDEW 122
Lebensmittelchemie 102
LEUKIPP 126
Licht, Doppelnatur des 144
—, kohärentes 80
—, linear polarisiertes 99
—, monochromatisches 84
—, ultrarotes 119
—, Wellenlängen des sichtbaren 82
— mikroskop 147
— quanten 139
Linienspektrum 83
LOMONOSSOW 127
LOSCHMIDT 129

MARCONI 32
Markierungsverfahren 188
Masse, kritische 177
Massen-bestimmung 153
— defekte 170
— spektrograf 153
— spektrometer 154
— wert 170
— zahl 151
Materiewellen 145
MAXWELL 20
Metallinterferenzfilter 98
Mikrowellentechnik 72
MILLIKAN 130
Mischstufe 49
Mittelwellen 36
Moderator 178
Modulation 37
Modulationsstufe 41, 66
Molekularelektronik 72

Nachrichtensatelliten 72
Nahwirkung 20
Neutron 150
Newtonsche Ringe 88
Nicolsches Prisma 101
Niederfrequenzverstärker 46
Nipkow-Scheibe 63
Normale 84

Oberflächen-härten 70
— vergütung 94
Oszillator 49

Panorama-Gerät 57
Parabolantenne 52
Periodensystem 143
Phasensprung 89
Photonen 139
PLANCK 139
Polarimeter 103
Polarisations-filter 101
— folien 101
— winkel 101
Polarisatoren 100
POPOW 32
Positron 149
Primärstrahlen 113
Produktionsreaktor 180
Proton 149

Quantentheorie 136
Quarzglas 121

Radar 54
— Anlage 56
Radioaktivität 155
—, künstliche 168
Radioastronomie 117
Rahmenantenne 31
RAMSEY 159
Raumbildprojektion 102
Raumwelle 36
Reaktion, thermonukleare 175
Reaktortypen 179

Reflexe 102
Reflexion 33
Resonanz 14
Relaisstation 52
Richtfunk 52
— sender 52
— verbindung 52
Röhrengenerator 18
Röntgen 108
— diagnostik 108
— interferenzen 113
— licht, monochromatisches 112
— röhren 104
— spektralanalyse 132
— strahlung, Härte der 107
— strahlung, Wellennatur der 111
— therapie 109
— wellen 104
— wellen, Beugung von 113
Rückkopplungs-schaltung, Meißnersche 17
— spule 17
Rückstreumessung 187
Rundfunk-empfänger 44
— sender 40
Rundsichtgerät 57
RUTHERFORD 134

Seiten-bänder 39
— frequenz 39
Sekundär-Elektronen-Vervielfacher 164
— strahlen 113
Selbst-erregung 16, 18
— steuerung 16
Selektion 45
Sende-antenne 31
— röhre 42
Sichtweite, optische 36
Skineffekt 70
SODDY 159
Spalt 77
Spannungs-doppelbrechung 102
— teilerschaltung 19
— verteilung 24
Spektralfarben 82
Spektren 83
Spektrum, elektromagnetisches 117, 122
—, kontinuierliches 83
Spulenwechselstrom 18
Stab-antenne 31
— dipol 23
Station, interplanetarische 8
Stefan-Boltzmannsches-Gesetz 136
Stoffe, optische aktive 102
Strahlenschutz 108, 179, 188
Strahlung, charakteristische 112
—, ultrarote 119
—, ultraviolette 121
—, unsichtbare 119
STRASSMANN 173
Strom-bauch 24
— knoten 24
Struktur, atomistische 125
Super 48
Synchronisierimpulse 67
Synchrophasotron 166
Szintillationszähler 163
Scheinwiderstand 13
Schirmbildaufnahme 108
Schicht, dünne 88
Schichten, Farben dünner 94
Schwingkreis, elektrischer 9
—, offener 22
— spule 19
Schwingungen, erzwungene ungedämpfte 13
—, freie elektromagnetische 8
—, mechanische 10
Schwingungs-dauer 10
— formel, Thomsonsche 14
— knoten 24

Tele-foniesender 37, 43
— grafie, tönende 43
— grafie, tonlose 43
— grafiesender 37
Telstar 72
Temperaturstrahlung 136
Thermodiffusion 155
Tonfrequenzgeneratoren 19
Träger-frequenz 38
— schwingung 38
Transurane 168
Trennmethode 154

Überlagerung 75
Überlagerungsempfänger 48
Ultra-kurzwellen 36

Ultra-rot-Bildwandler 121
— Fotografie 121
UKW-Rundfunk 49
— Sprechfunk 51
Uranbombe 182
Uviolglas 121

Versuchsanordnung, Hertzsche 22
VERULAM 127

Wärmeabsorption 120
Wasser-stoffbombe 183
— wellen 73
Wechselstrom 12
Weglänge, optische 93
Wellen, direkte 36
—, elektromagnetische 20
—, Empfang elektromagnetischer 29
—, stehende 33
— bereiche 34
— mechanik 147
Wellen-natur des Lichts 86
— theorie 144
— zug 79
Werkstoffprüfung 115
—, zerstörungsfreie 109
Wiensches Gesetz 137
Wilsonsche Nebelkammer 162
Wirbelfeld 21
Wirkungs-quantum 137
— querschnitt 167

Yagi-Antenne 31

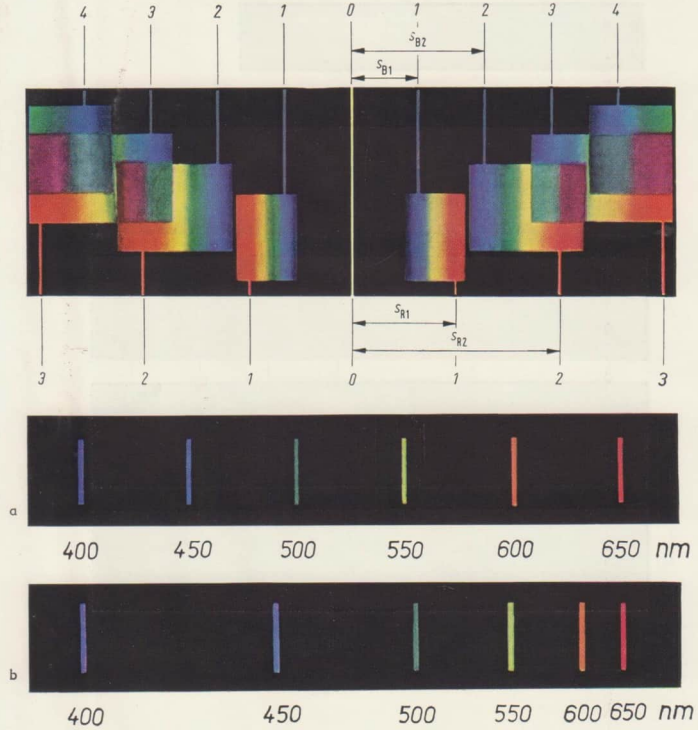
Zählrohre 162
Zeeman-Effekt 118
Zeilensprungverfahren 66
Zeitgesetz 160
Zerfallsreihen 159
Zonenschmelzen 71
Zwischenfrequenz 49
Zyklotron 165

Quellennachweis der Bilder

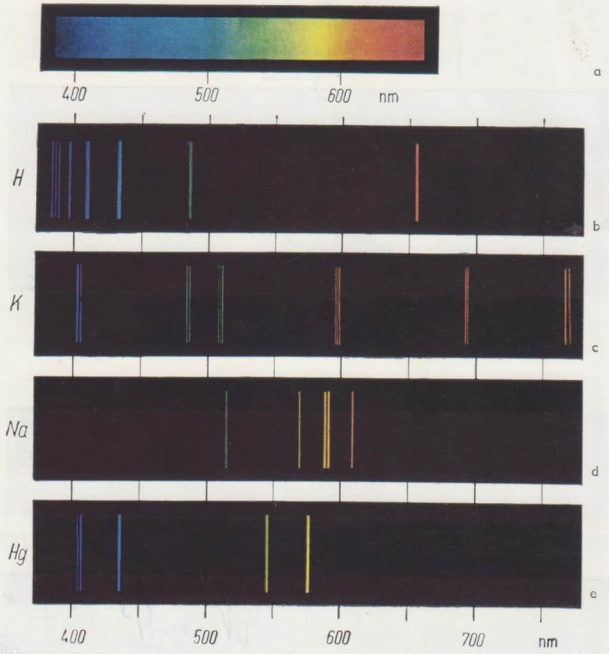
Die Zeichnungen wurden nach Vorlagen angefertigt von Heinrich Linkwitz, Berlin.

Titelbild: Zentralbild Berlin

Bildarchiv VWV: 51/1, 67/2, 73/1, 73/2, 77/1, 78/1, 78/2, 89/2, 94/1, 95/1, 100/1, 106/1, 110/1, 110/2, 113/2, 114/2, 115/1, 122/1, 122/2, 145/1, 145/2, 147/2, 167/1; Bischoff, Weimar: 126/1; Deutscher, Berlin-Grünau: 59/1; Deutscher Fernsehfunk: 52/1, 52/2; Institut für Halbleitertechnik, Teltow: 77/1; Kaufmann, Halle: 120/1; Kindt, Schulzendorf: 58/1, 59/2; Körner, Dresden: 51/1; Krüger, Berlin-Falkensee: 104/1; Krütgen, Halle: 25/1; Militär-Bild-Dienst: 55/1; VEB CARL ZEISS JENA: 97/1, 102/1, 164/1b; VEB Fachbuchverlag, Leipzig: 126/1; VEB Filmfabrik Wolfen: 164/2; VEB Funkwerk Erfurt: 42/3; VEB Phönix Röntgenröhren, Rudolstadt: 105/1, VEB Werk für Fernsehelektronik, Berlin: 42/2, 65/2, 69/3; VWV/Seifert: 37/1; Werner, Dresden: 111/1; Zentralbild, Berlin: 7/1, 8/1, 20/1, 21/1, 31/2, 51/2, 54/1, 61/1, 117/1, 127/1, 134/1, 139/1, 140/1, 147/1, 149/1, 156/1, 165/1b, 166/1, 173/1, 179/1, 180/1, 181/1, 182/1, 185/1b; Reproduktionen: „Bilderbuch vom starken Mann", Verlag der Nation, Berlin: 184/1; „Isotope in Forschung und Produktion", VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig: 186/1, 186/2 186/3, 188/1; Farbtafeln I bis IV: Dr. H. Mucke, Dresden.

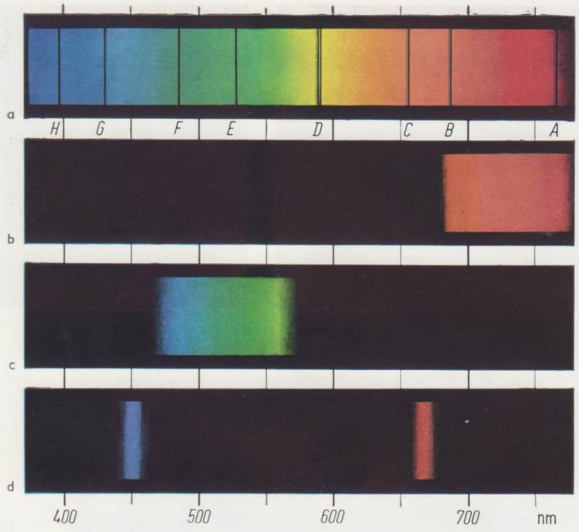


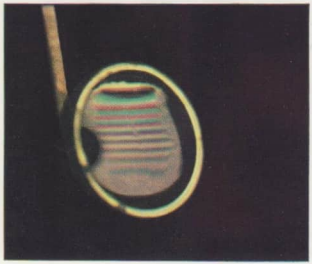
Beugung am Gitter. Entstehen eines Spektrums aus weißem Licht (oben)
a) Beugungsspektrum b) Dispersionsspektrum (Prisma aus Glas) (unten)

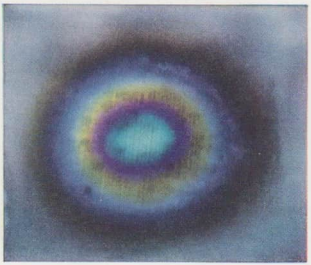


a) kontinuierliches Spektrum;
b) Wasserstoffspektrum;
c) Kaliumspektrum;
d) Natriumspektrum;
e) Quecksilberspektrum

Tafel II

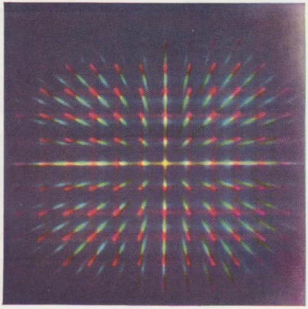


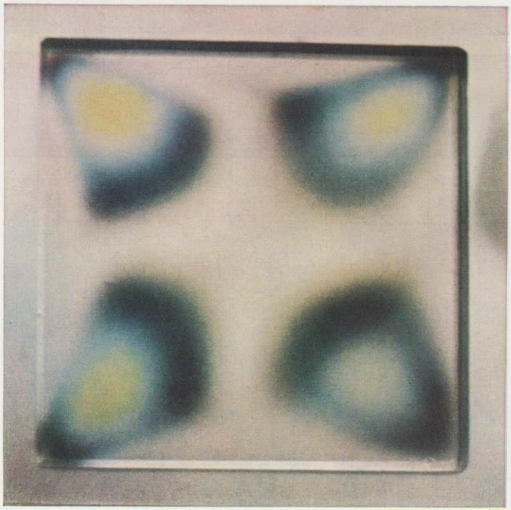




a) Sonnenspektrum; b) rotes Glasfilter; c) grünes Glasfilter; d) Metallinterferenzfilter (oben)
Seifenhaut in reflektiertem weißem Licht (unten links)
Aufgedampfte Schicht auf Glas (unten rechts)

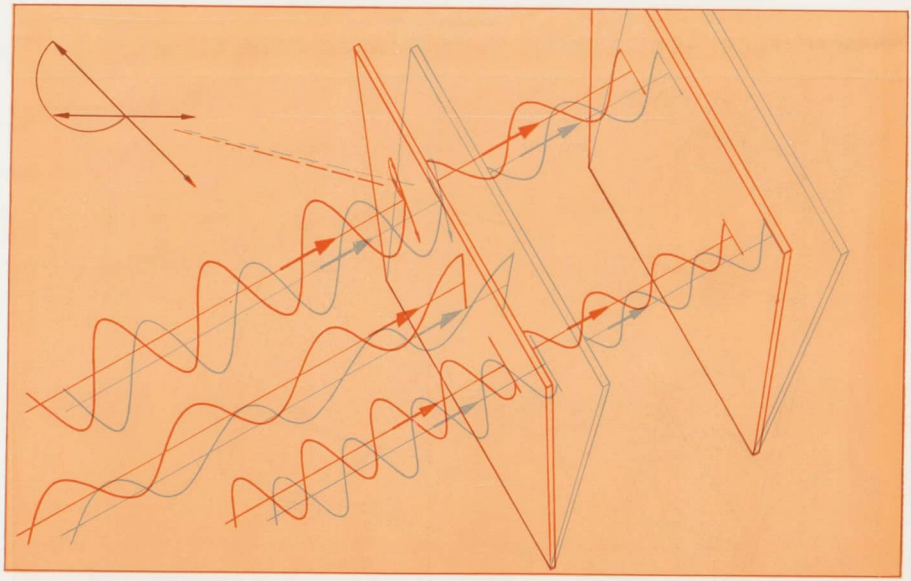






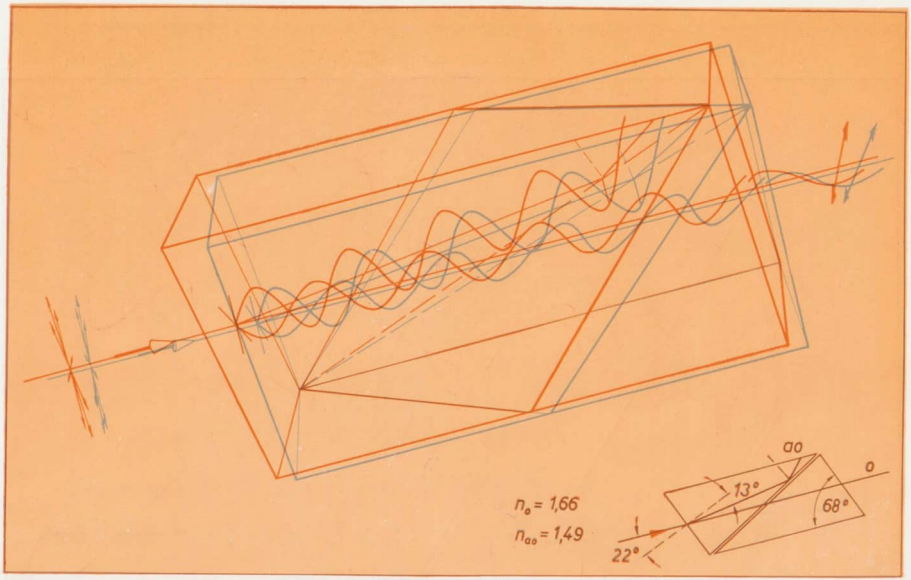
Anlauffarben einer Stahlklinge (oben links)
Kreuzgitter (oben rechts)
Spannungsdoppelbrechung (unten)

Tafel IV

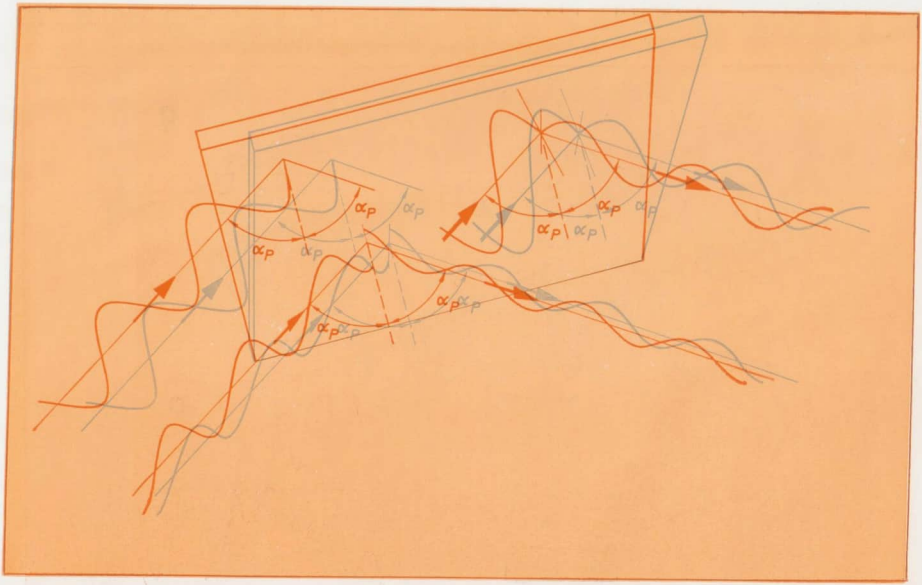


Tafel V

Von links kommendes natürliches Licht wird durch ein Polarisationsfilter (Polarisator) linear polarisiert. Ein zweites Filter (Analysator) mit Durchlaßrichtung senkrecht zum ersten absorbiert das linear polarisierte Licht

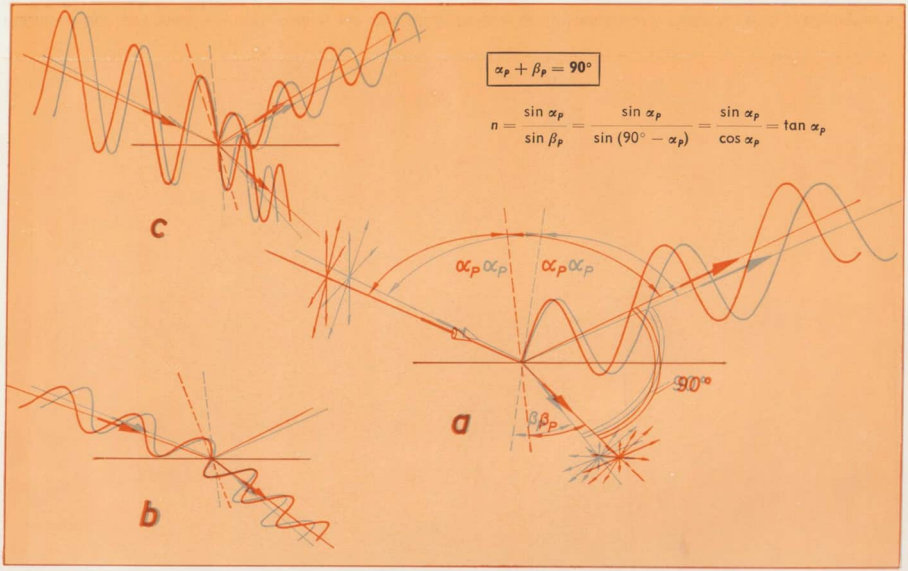


Natürliches Licht wird durch ein Nicolsches Prisma linear polarisiert. Der außerordentliche Strahl trifft so flach auf die Kanadabalsam-Kittschicht, daß er totalreflektiert wird. Vorn eine Vertikalschnitt-Zeichnung



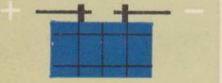
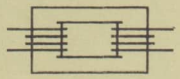
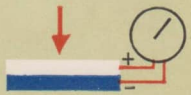
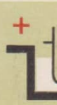
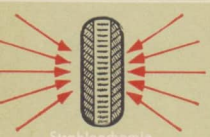
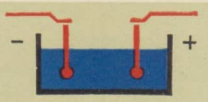
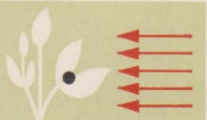
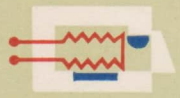
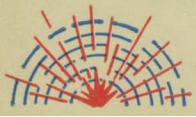
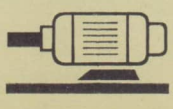
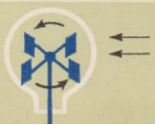
Tafel VII a

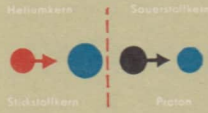
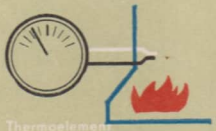
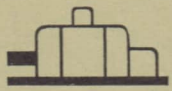
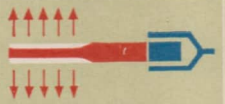
Natürliches Licht wird linear polarisiert, wenn es von einer Glasfläche unter dem Polarisationswinkel reflektiert wird. Es schwingt nach der Reflexion senkrecht zur Einfallsebene



Brewstersches Gesetz: Wenn Reflexionswinkel α_P und Brechungswinkel β_P einen Rechten bilden, dann ist das reflektierte Licht 100% polarisiert. Für das gebrochene Licht gilt dies nicht; es enthält nur einen großen Anteil von Lichtwellen, die in der Einfallsebene schwingen

UMWANDLUNGEN DER ENERGIEFORMEN

Kernenergie	Elektrischer Strom	Elektromagnetische Wellen	Chem Energ
$^{238}_{92}U + n \rightarrow {}^{239}_{94}Pu$	 Beschleuniger	ATOMARER FOTOEFFEKT	
 Atombatterie	 Transformator	 Fotoelement	
ATOMLASER	 Lampe	 Lumineszenz	
 Strahlenchemie	 Elektrolyse	 Fotosynthese	H_2 S Zn S
 Atomreaktor	 Elektroofen	 Sonnenofen	 Verbre
			

	Wärmeenergie	Mechanische Energie	gehen über in
	 Thermonukl. Reaktionen		Kernenergie
	 Thermoelement	 Dynamo	Elektrischer Strom
	 Leuchten bei Erwärmung	 Bremsstrahlung	Elektromagnetische Wellen
$+ Zn \rightarrow$ $+ H_2$	$C + S_2 \rightarrow CS_2$ Endotherme Reaktionen	 Worobjowscher Versuch	Chemische Energie
	 Gaskühlschrank	 Reibung	Wärmeenergie
			Mechanische Energie



021251 - 3
4.50