PHYSIK

KLASSE 10

PHYSIK

EIN LEHRBUCH FÜR DIE OBERSCHULE

KLASSE 10

Ausgabe 1960

VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1964

Verfaßt von Alfons Böhm, Kurt Gogler, Rolf Grabow,
Arnim Haack, Edwin Kunert und Alfred Priem

Vom Ministerium für Volksbildung der
Deutschen Demokratischen Republik
als Lehrbuch für die zehnklassige
allgemeinbildende polytechnische
Oberschule bestätigt.

Vierte, durchgesehene Auflage

Redaktionsschluß: 15. Oktober 1963
Zeichnungen: Kurt Dornbusch, Eberhard Graf, Fritz Hampel, Heinrich Linkwitz, Anneliese Mahnkopf
Umschlag: Günther Klaus

ES 11 H · Bestell-Nr. 02 10 33-4 · Preis 3,45 DM · Lizenz-Nr. 203 · 1000/63 (DN)
Textkarte genehmigt: K 1 MdI der DDR Nr. 1172/63
Satz: B. G. Teubner, Leipzig (III/18/154)
Druck: LVZ-Druckerei „Hermann Duncker", Leipzig (III/18/138)

INHALTSVERZEICHNIS

I. Elektrizitätslehre

1. Leitungsvorgänge in Gasen 5
2. Die Glühemission 17
3. Der Fotoeffekt (lichtelektrischer Effekt) 32
4. Leitung in Metallen 38
5. Leitung in Halbleitern 40
6. Anwendung der Halbleiter als Gleichrichter 43
7. Die Selen-Flächengleichrichter 45
8. Transistoren 46
9. Der thermoelektrische Effekt 49

II. Mechanische Schwingungen und Wellen

10. Grundbegriffe der Schwingungslehre 53
11. Gedämpfte Schwingungen 59
12. Die Resonanz 61
13. Schwingungen in der Technik. 64
14. Entstehung von Wellen – Wellenarten 69
15. Bestimmungsstücke einer Welle 73
16. Die Interferenz 76
17. Das Huygenssche Prinzip – Die Beugung 79
18. Reflexion von Wellen – Stehende Wellen 82
19. Brechung von Wellen 86
20. Der Ultraschall 88

III. Elektromagnetische Wellen

A. Hertzsche Wellen. 95

21. Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen 95
22. Die Veränderung der Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen 98
23. Erzwungene elektromagnetische Schwingungen 100
24. Anwendung hochfrequenter elektromagnetischer Schwingungen 104
25. Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen . . . 108
26. Die Entstehung elektromagnetischer Wellen 109
27. Die Abstrahlung von Ultrakurzwellen – Der Dipol . . 110
28. Der offene Schwingkreis als Empfänger 115
29. Einige Eigenschaften Hertzscher Wellen 117

30. Die Ausbreitung Hertzscher Wellen in verschiedenen Wellenbereichen 119
31. Die Aussendung von Funkwellen 121
32. Der Empfang von Funkwellen 124
33. Das Fernsehen 126
34. Anwendungen Hertzscher Wellen 132

B. Lichtwellen 144

35. Grundbegriffe der Optik 144
36. Die Reflexion des Lichtes 147
37. Die Brechung des Lichtes 154
38. Linsen- und Linsenbilder 158
39. Optische Geräte für die Nah- und Fernbeobachtung . . 163
40. Die Interferenz der Lichtwellen 176
41. Die Polarisation 180
42. Die Dispersion – Spektren 183
43. Die Farben 191
44. Die Entwicklung der Lichttheorie 194

C. Röntgenwellen 196

45. Die Eigenschaften der Röntgenwellen 196
46. Anwendung der Röntgenwellen 199
47. Das elektromagnetische Spektrum 204

IV. Atomphysik

48. Der Weg zur wissenschaftlichen Untersuchung des Atoms 206
49. Die Radioaktivität 209
50. Geräte zum Nachweis der radioaktiven Strahlen . . . 211
51. Der Aufbau der Atome — Die Atommodelle 214
52. Der Bau der Atomkerne — Die Isotope 221
53. Der natürliche radioaktive Zerfall der Atomkerne — Die künstliche Radioaktivität 227
54. Beschleuniger 230
55. Gewinnung der Kernenergie 235
56. Die Ausnutzung der Kernenergie 242
57. Die Anwendung radioaktiver Isotope 253

Formelzeichen 262

Schaltzeichen 264

Namen- und Sachverzeichnis 266

I. Elektrizitätslehre

1. Leitungsvorgänge in Gasen

1. Unselbständige Leitung durch Ladungsträger. a) Elektrizitätsleitung in der Luft. In den vergangenen Schuljahren wurde die Erkenntnis gewonnen, daß die elektrischen Vorgänge auf kleinste in Bewegung befindliche Elementarteilchen zurückzuführen sind. Diese Elementarteilchen sind die *Elektronen*. Der elektrische Strom in metallischen Leitern besteht in einer gleichsinnigen Bewegung *freier Elektronen;* er ist ein *Elektronenstrom* (Abb. 5/1). Den elektrischen Strom erkennt man an seinen Wirkungen, beispielsweise an der *magnetischen Wirkung*. Diese Wirkungen können nur beim Vorhandensein einer elektrischen Spannung in einem geschlossenen Stromkreis nachgewiesen werden.

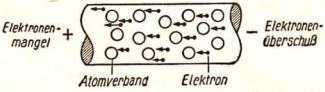


Abb. 5/1. Elektronenleitung in einem Leiter

In leitenden Flüssigkeiten, in *Elektrolyten*, wandern durch Dissoziation entstandene *Ionen* zwischen den Elektroden, wenn an diese eine Spannung angelegt ist. Ursache der Ionenbewegung ist das elektrische Feld zwischen der Anode und der Katode. Die *Kationen* wandern zur Katode, die *Anionen* zur Anode (Abb. 5/2). Die elektrischen Vorgänge in Flüssigkeiten beruhen also auf einem *Ionenstrom*. Die Ionen sind die Träger der zu transportierenden Ladungen. Man spricht häufig von Trägerleitung im Elektrolyten. Aus der Erfahrung heraus ist bekannt, daß in festen und flüssigen Körpern das Ohmsche Gesetz gilt.

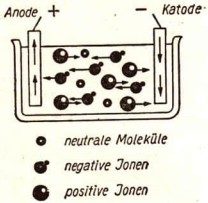


Abb. 5/2. Ionenleitung in einer Flüssigkeit

Bisher wurde die Tatsache einfach hingenommen, daß die uns umgebende atmosphärische Luft häufig als Isolator verwendet wird. Zwischen den Kontakten eines Schalters oder zwischen den Polen einer Steckdose, auch zwischen den Drähten von Überlandleitungen, wirkt die Luft als Isolator. Es erscheint aber merkwürdig, daß zum Beispiel bei einem Blitz die atmosphärische Luft die Elektrizität leitet. Wäre keine Leitfähigkeit gegeben, so könnte der Blitz nie die Erdoberfläche erreichen. Auch liegt die Frage nahe, warum die Leuchtröhren an Warenhäusern intensives Licht aussenden, ohne daß ein metallischer Draht in der Röhre vorhanden ist, der das Licht aussendet und damit elektrische Energie in Lichtenergie umwandelt. Um hier Klarheit zu bekommen, soll die Frage untersucht werden: Wann leiten Gase die Elektrizität?

b) Ionisation der Luft. Zur Beantwortung dieser Frage werden folgende Versuche durchgeführt. Zwei vertikale Kondensatorplatten werden isoliert aufgestellt. Zwischen ihnen befindet sich als Dielektrikum Luft (Abb. 6/1). Die Aufladung bleibt lange Zeit bestehen. *Trockene Luft ist ein guter Isolator.*

Man bringt nun zwischen die aufgeladenen Platten des Kondensators eine *glühende Heizwendel* (Abb. 6/2). *Der Ausschlag des Elektroskops geht sofort zurück.* Den gleichen Vorgang bemerkt man, wenn man zwischen die Platten eines aufgeladenen Kondensators einen *glühenden Metallkörper* bringt (Abb. 6/3). Sofort wird der Ausschlag des Elektroskops kleiner und verschwindet schließlich ganz.

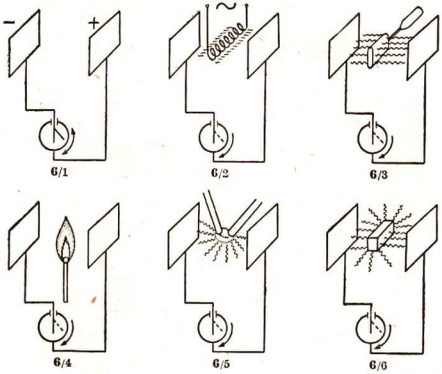


Abb. 6/1. Luft als Dielektrikum zwischen geladenen Kondensatorplatten

Abb. 6/2. Heizwendel zwischen geladenen Kondensatorplatten

Abb. 6/3. Glühender Metallkörper zwischen geladenen Kondensatorplatten

Abb. 6/4. Flamme zwischen Kondensatorplatten

Abb. 6/5. Das Licht einer Bogenlampe führt zur Entladung eines Kondensators

Abb. 6/6. Radioaktive Strahlen führen zur Entladung eines Kondensators

Führt man einen *brennenden Holzspan* oder eine *Bunsenbrennerflamme* zwischen die geladenen Kondensatorplatten, so wird die Ladung ebenfalls sofort abgeleitet (Abb. 6/4). Auch wenn durch den Raum zwischen den Kondensatorplatten ein Bündel *Röntgenstrahlen* oder *radioaktive Strahlen* geleitet wird oder wenn das *Licht einer Quarz-* oder *einer Bogenlampe* hineinstrahlt, geht der Ausschlag des Elektroskops sofort zurück (Abb. 6/5 und 6/6). *Offensichtlich ist die Luft leitend geworden.*

Untersuchungen der Wissenschaftler haben gezeigt, daß viele Gase auf diese Weise leitend gemacht werden können. *Gasmoleküle werden durch die oben angeführten Verfahren ionisiert.* Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes wandern die Ionen und werden zu Trägern eines elektrischen Stromes. Im Elektrofilter sind die Trägerteilchen von mikroskopischer Größe. In Luft und in den anderen Gasen sind Ionen die Elektrizitätsträger. Auch hier nennt man negative Ionen Anionen. Sie enthalten mehr Elektronen als das Molekül oder Atom im neutralen Zustand. Positive Ionen, Kationen, enthalten weniger Elektronen als die neutralen Moleküle.

Die Ionisation eines Gases tritt ein durch:

1. chemische Vorgänge bei hoher Temperatur (Flammen),

2. Röntgenstrahlen oder Quarzlampenlicht,

3. Wärmewirkung durch glühende Körper,

4. Strahlen radioaktiver Substanzen.

Eine unselbständige Leitung in Gasen kommt zustande, wenn durch äußere Einwirkungen Ionen entstehen; diese führen den Ladungstransport durch.

c) Stoßionisation. Die Leitfähigkeit der Luft zwischen den Platten des Kondensators wurde bei den beschriebenen Versuchen durch die Ionisation verursacht. Es erhebt sich die Frage, wie sich in ionisierten Gasen Strom und Spannung zueinander verhalten. Nach dem Ohmschen Gesetz ist bekanntlich die Stromstärke der Spannung proportional:

$$I \sim U.$$

Diese Beziehung gilt nicht für die elektrische Leitung in Gasen. Die Stromstärke hängt hier in erster Linie von der Anzahl der erzeugten Ionen ab (Abb. 7/1). Die angelegte Spannung wiederum wirkt auf die Geschwindigkeit der Ionen. Wächst die Spannung, so vergrößert sich die Geschwindigkeit der Ionen. *Treffen die Ionen bei ihrer Bewegung auf neutrale Moleküle, so zerfallen diese beim Aufprall in positive Ionen und Elektronen.* Je schneller sich die Ionen im elektrischen Felde bewegen, um so mehr Zusammenstöße treten auf. Es werden demnach durch schnelle Ionen neue Ionen und Elektronen erzeugt. Dieser Vorgang heißt *Stoßionisation.* Hierdurch wächst die Anzahl der Ionen so stark an, daß die Entladung zu Lichtbüscheln und Lichtbändern führen kann.

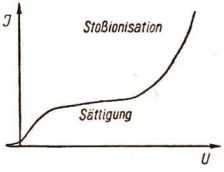


Abb. 7/1
Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung

2. Die selbständige elektrische Leitung in Gasen. a) Die Koronaentladung. Sobald bei einem Entladevorgang Stoßionisation einsetzt, brauchen von außen her keine Elektrizitätsträger mehr in den Entladungsraum hineingebracht zu werden. Man bezeichnet daher diese Art der Entladung als *selbständige Leitung in Gasen.* Die Stoßionisation setzt ein, wenn auf Grund der angelegten Spannung die Geschwindigkeit der erzeugten Ladungsträger einen bestimmten Wert erreicht hat. Durch das Anwachsen der Geschwindigkeit, das heißt durch eine *quantitative Änderung,* ändert sich auf einer bestimmten Stufe die Eigenschaft des Gases, seine *Qualität.* Man nennt eine solche Gesetzmäßigkeit den Umschlag einer Quantität in eine neue Qualität oder kurz den *Qualitätsumschlag.* Zur Untersuchung der selbständigen Leitung in Gasen dient der folgende Versuch:

Man zieht die beiden kugelförmigen Polanschlüsse einer Influenzmaschine oder eines Bandgenerators möglichst weit auseinander. Lädt man die Maschine auf, so beobachtet man im Dunkeln bei zunehmender Spannung, daß auf den Kugeln leuchtende Pünktchen zu sehen sind, der Raum zwischen den Kugeln aber dunkel bleibt. Bei nicht kugelförmigen Polen bildet sich um diese eine schwach leuchtende Hülle. Diese Leuchterscheinung ist das Kennzeichen einer Entladung, die man als *Koronaentladung* bezeichnet. Sie zeigt sich bei großer Luftfeuchtigkeit an Hochspannungsfreileitungen. Deren Leitungsteile und Armaturen überziehen sich mit bläulichem Licht. Dabei entsteht ein sausendes Geräusch. Bei sehr hohen Spannungen entstehen

leuchtende verästelte Entladungen, sogenannte *Lichtbüschel*, die an der Anode länger als an der Katode sind, woran man die Pole erkennen kann.

In der Hochspannungstechnik führt diese sich im Freien vollziehende Koronaentladung zu Energieverlusten, die beträchtliche Werte annehmen können. Die Koronaentladung ist von der elektrischen Feldstärke in der Umgebung des Leiters abhängig. Die Feldstärke ist dem Radius des Leiters umgekehrt proportional. Man kann die Energieverluste infolgedessen dadurch stark herabsetzen, daß man Drähte großen Durchmessers verwendet. Für Spannungen von 220 kV benutzt man zum Beispiel Drähte mit einem Durchmesser von 42 mm. Da die Elektronenleitung im wesentlichen an der Oberfläche erfolgt, können die Drähte hohl sein, so daß trotz des größeren Radius kein größerer Materialverbrauch und auch keine Gewichtserhöhung eintreten.

b) Die Spitzenentladung. Ersetzt man die Kugel des Bandgenerators durch eine Spitze, so nimmt die Leuchterscheinung die Gestalt eines auf der Spitze aufsitzenden Lichtbüschels an. Man spricht dabei von *Spitzenentladung*. Diese Entladungserscheinung beobachtet man ab und zu im Freien an Turmspitzen, Schiffsmasten und anderen spitzen Gegenständen und nennt sie auch *Elmsfeuer*. Früher knüpfte man abergläubische Vorstellungen an diese Naturerscheinungen. Die wissenschaftliche Erforschung der Entladungsvorgänge widerlegte jedoch alle diese mystischen Vorstellungen und zeigte auch an diesem Beispiel, *daß die Vorgänge in der Natur nach erkennbaren Gesetzmäßigkeiten verlaufen.*

c) Die Funkenentladung. Vollzieht sich die selbständige Entladung so, daß sich zwischen den Polen Funken bilden, dann liegt eine *Funkenentladung* vor (Abb. 8/1). Die Funken entstehen durch gesteigerte Stoßionisation. Es treten blendende Lichterscheinungen auf, und die plötzliche örtliche Erwärmung der Luft ist von einem peitschenartigen Geräusch begleitet. Wie Versuche gezeigt haben, ist die zum Auslösen einer Funkenentladung erforderliche Spannung von der Form der Elektroden sowie vom Gasdruck abhängig. Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über zusammengehörige *Zündspannungen* und *Funkenschlagweiten* zwischen zwei Kugeln von je 1 cm Radius in Luft beim Normzustand.

Abb. 8/1. Funkenentladung

Funkenschlagweiten und Zündspannungen

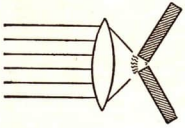
Schlagweiten in cm	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
Spannung in kV	5	11,4	17,9	23,2	28,6	30,0	39,3	47,0	57,0	64,0	69,0

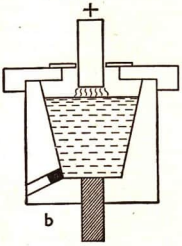
Man kann auf Grund der Beziehung zwischen Funkenlänge und Spannung Spannungsmessungen durchführen, indem man mit Hilfe verstellbarer Kugeln die Länge der Funkenstrecke ermittelt. Eine besondere Art von Funkenentladung ist das *Gewitter*. Es wurde bereits im 9. Schuljahr behandelt.

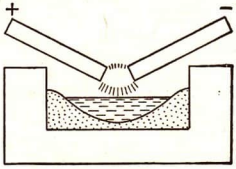
d) Die Bogenentladung. Vom Unterrichtstag in der sozialistischen Produktion ist das *Elektroschweißen* bekannt. Zwischen den Schweißelektroden – das Werkstück dient als die eine Elektrode – treten helle Lichtbänder auf, sogenannte *Lichtbogen*, vor denen der Schweißer die Augen mit einer Schutzbrille schützen muß. Den gleichen elektrischen Vorgang findet man an der *Bogenlampe* wieder.

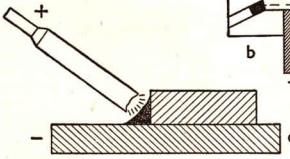
Abb. 9/1. Bogenentladung

Legt man an 2 Kohlestäbe einer Bogenlampe eine Spannung von etwa 50 V und schaltet einen passenden Widerstand davor, so gerät die Berührungsstelle in helle Rotglut. Zieht man die Kohleelektroden jetzt langsam auseinander, so bildet sich eine intensiv strahlende Lichtquelle (Abb. 9/1). Auch hier ist die Luft leitend geworden, sie wurde ionisiert. Die Ionisation wird unter anderem durch die hohe Temperatur der Elektroden hervorgerufen. Da ständig neue Ionen von selbst gebildet werden und auch ständig Elektronen aus der Katode heraustreten, spricht man von *selbständiger elektrischer Leitung*. Bei dieser Lichterscheinung treten Temperaturen um 4000 °C an den Elektroden auf. Die Anwendung der Bogenentladung wird an den nebenstehenden Abbildungen gezeigt (Abb. 9/2).









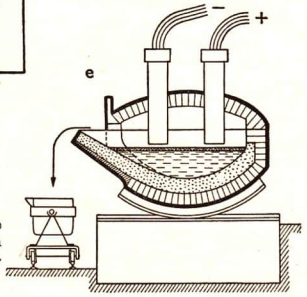


Abb. 9/2
Anwendungen der Bogenentladung. Erläutern Sie die Anwendungsbeispiele und erweitern Sie diese durch Ihre während des Unterrichtstages in der sozialistischen Produktion erworbenen Erfahrungen!

e) Selbständige Leitung in Gasen niederen Druckes. In Montagehallen, Bahnhöfen, Kulturstätten usw. findet man oft *Leuchtstofflampen* als Lichtquellen. Diese unterscheiden sich von den Glühlampen vor allem dadurch, daß der elektrische Strom, der die Lichtwirkung hervorruft, nicht durch einen Metallfaden, sondern *durch Gase unter vermindertem Druck fließt.* Um die elektrischen Leitungseigenschaften der Gase in Abhängigkeit von ihrem Druck zu untersuchen, wird folgender Versuch durchgeführt.

Abb. 10/1. Entladungsrohr

In einem mit einem Saugansatz versehenen Glasrohr von etwa 50 cm Länge sind scheibenförmige Elektroden eingeschmolzen (Abb. 10/1). Der Ansatz des Glasrohrs wird auf den Saugstutzen einer Vakuumpumpe gesteckt. Legt man die Spannung eines Funkeninduktors an die beiden Elektroden, so tritt bei normalem Luftdruck keine Entladung ein. Die Luft wirkt als Isolator. Wird nun mit der Vakuumpumpe die Luft aus dem Glasrohr herausgesaugt, so treten zwischen den Elektroden Lichterscheinungen auf, die mit abnehmendem Druck ihre Form und auch ihre Farbe ändern. Die Beobachtungen sind in der nachfolgenden Übersicht zusammengefaßt:

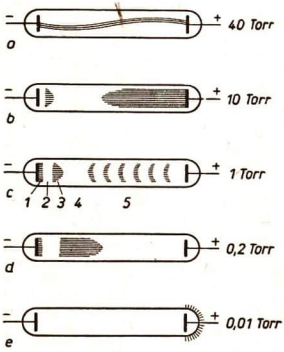


Abb. 10/2. Entladungserscheinungen bei verschiedenen Drücken

Bei normalem Luftdruck tritt keine Entladung auf. Bei etwa 40 Torr ist eine *fadenförmige Leuchterscheinung* zwischen den Elektroden als Zeichen einer Entladung festzustellen (Abb. 10/2 a). Wird der Druck weiter erniedrigt, so entsteht eine *Glimmentladung*, die sich mit der Druckerniedrigung verändert (Abb. 10/2 b bis e). Zunächst ist dabei die negative Elektrode (Katode) von einer *Glimmhaut* (1 in Abb. 10/2 c) überzogen. Daran schließt sich in Richtung auf die positive Elektrode (Anode) eine relativ dunkle Zone an (2), nach ihrem Entdecker *Hittorfscher Dunkelraum* genannt. Mit einem scharfen Glimmsaum beginnt dann das hell leuchtende *negative Glimmlicht* (3), das allmählich in den nach seinem Entdecker benannten *Faradayschen Dunkelraum* (4) übergeht. Diesem Dunkelraum folgt bis zur Anode die leuchtende *positive Glimmsäule* (5). Mit zunehmender Luftverdünnung werden der Hittorfsche Dunkelraum und das negative Glimmlicht größer, während das positive Glimmlicht sich in mehr und mehr verblassende Schichten aufteilt.

Bei etwa 0,01 Torr verschwinden die Leuchterscheinungen im Rohr vollständig; dafür *leuchtet die Glaswand des Rohres gegenüber der Katode in hellgrünem Fluoreszenzlicht* auf (vgl. S. 15).

Da sich die untersuchten Entladungsvorgänge durch Glimmlichter anzeigen, bezeichnet man die Entladung als *Glimmentladung*.

f) Die selbständige Leitung innerhalb der Entladungsröhre. Die Lichterscheinungen treten auf, *ohne daß von außen eine Ionisierung erfolgt.* In Luft und in jedem anderen Gas sind einige wenige Ionen vorhanden. Sie entstehen durch die schwache Strahlung radioaktiver Stoffe auf der Erde sowie auch durch Strahlen aus dem Weltall (kosmische Strahlung). Diese wenigen Ionen werden in dem elektrischen Felde zwischen den Elektroden beschleunigt. Infolge des verminderten Gasdrucks stoßen die in Bewegung geratenen Ionen nicht so oft auf Gasmoleküle wie bei Normaldruck. Dadurch erreichen die Ionen eine bestimmte Geschwindigkeit, die so groß ist, daß bei den schließlich doch stattfindenden Zusammenstößen mit den Molekülen des Gases neue Ionen entstehen (Stoßionisation). Die positiven Ionen wandern unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zur Katode und prallen mit großer Wucht auf sie auf. Dort lösen sie Elektronen aus dem Elektrodenmetall heraus. Durch das elektrische Feld beschleunigt, erreichen diese eine sehr hohe Geschwindigkeit. Trifft nun ein Elektron auf ein neutrales Gasmolekül, so vermag es neue Ladungsträger zu erzeugen. Das Elektron schlägt aus einem Atom des Moleküls ein Elektron heraus. Es entsteht ein positiv geladenes Gasion. Ein langsames Elektron kann diese Wirkung nicht erzielen, es kann sich aber an neutrale Moleküle anlagern. Auf diese Weise bildet sich ein negativ geladenes Gasion. *Durch derartige Einwirkungen entstehen ständig neue Ionen, deren Zahl lawinenartig anwächst.*

Durch Elektronenstoß werden Atome oftmals derart angeregt, *daß sie Licht aussenden.* In den dunklen Räumen der Entladungsröhre werden die Elektronen dann erneut beschleunigt, ionisieren das Gas und regen weitere Atome zur Lichtabgabe an. Die bei der Stoßionisation entstehenden positiven Ionen fliegen auf die Katode zu und erzeugen dort das Katodenglimmlicht. So sind Elektronen an der Aussendung von Licht beteiligt. Voraussetzung ist jedoch, daß ihre Geschwindigkeit eine bestimmte Größe erreicht hat. Hier entsteht also wieder *aus einer quantitativen Veränderung eine neue Eigenschaft, eine neue Qualität.*

3. Anwendungen der Glimmentladung. a) Glimmlampen. Während des Unterrichtes in der sozialistischen Produktion kann man an Schalt- und Steuerpulten häufig Betriebsüberwachungslampen finden. Das sind in den meisten Fällen Glimmlampen (Abb. **11**/1). Diese Glimmlampen stellen kleine Entladungsröhren dar. Ihr Aufbau unterscheidet sich auch grundsätzlich von dem der Glühlampen. Die Glimmlampen haben gegenüber Glühlampen den Vorteil, daß in ihnen nur ein sehr schwacher Strom fließt. Daher wird nur eine geringe elektrische Energie zu ihrem Betrieb benötigt.

In einer Glimmlampe herrscht ein Druck von etwa 15 Torr. Zwei Elektroden stehen einander gegenüber und sind nach Anlegen einer Wechselspannung von einem Glimmsaum umgeben. Auch hier sind Leitungsvorgänge in Gasen die Ursache der Lichterscheinung. Ein *Bariumüberzug* läßt die Glimmhaut über den Elektroden der Glimmlampe schon bei Spannungen um 100 V leuchten. Damit keine Zerstörung der Glimmlampe eintritt, ist oftmals

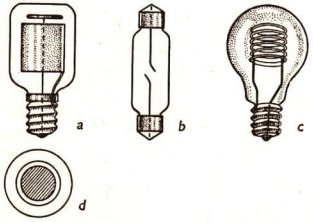


Abb. **11**/1. Ausführungsformen der Glimmlampen. Abb. d zeigt die Form a von oben

ein Vorschaltwiderstand als Strombegrenzung vorzuschalten (Abb. 12/1). Oft ist dieser Widerstand auch im Sockel untergebracht. Die Abbildung 12/2 zeigt einige Glimmlampenschaltungen.

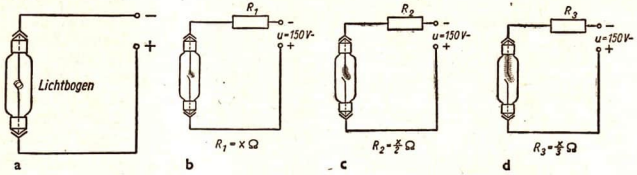


Abb. 12/1
Schaltung einer Glimmlampe
a) ohne Vorschaltwiderstand kann sich ein Lichtbogen bilden, b) bis d) je nach der Größe des Vorschaltwiderstandes leuchtet die Glimmlampe verschieden hell.

Im *Polprüfer* stehen beide Elektroden einander gegenüber. Beim Anlegen einer *Gleichspannung* überzieht sich stets nur *die Katode mit einer Glimmhaut*, mit dem Katodenglimmlicht. Befestigt man die angeschlossene Glimmlampe an einem Stab und schwenkt ihn in schneller Folge durch die Luft, so erscheint dem Auge ein Lichtband, wie es Abbildung 13/1 zeigt.

Legt man eine *Wechselspannung* an, so *zeigen beide Elektroden das Glimmlicht*. Wird diese Glimmlampe an einem Stab durch die Luft geschwenkt, so sieht man ein beiderseits gezacktes Lichtband, wie es Abbildung 13/2 zeigt. Das Glimmlicht wechselt also mit der Frequenz der angelegten Spannung die Elektroden. Bei einer Frequenz von 50 Hz vermag das menschliche Auge diesem schnellen Wechsel nicht zu folgen; man

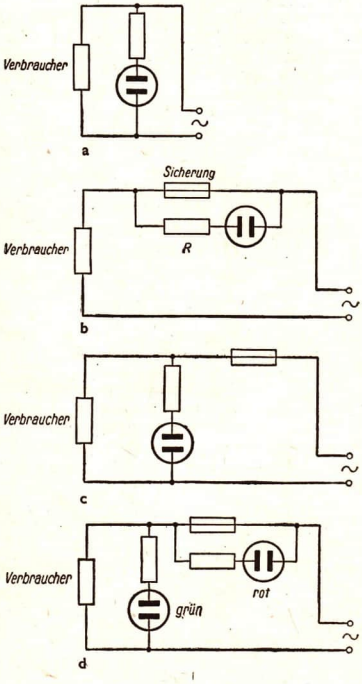


Abb. 12/2
Einige Glimmlampenschaltungen bei der Mechanisierung und Automatisierung der Produktion

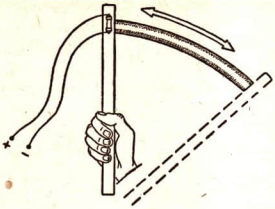


Abb. 13/1. Glimmband bei Gleichspannung

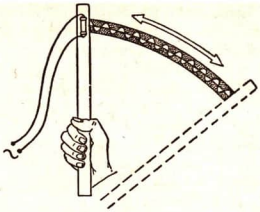


Abb. 13/2. Glimmband der Wechselspannung

sieht daher beide Elektroden glimmen. Eine besondere Eigenschaft der Glimmlampen besteht darin, daß sie von einer bestimmten Spannung an, der sogenannten *Zündspannung*, sprunghaft betriebsfähig sind und oberhalb einer niederen Spannung, der sogenannten *Löschspannung*, betriebsfähig bleiben (Abb. 13/4). In Abbildung 13/3 ist die Schaltung wiedergegeben, mit der man eine Kennlinie aufnehmen kann.

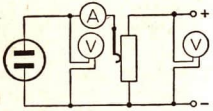


Abb. 13/3. Schaltung zur Aufnahme der Kennlinie einer Glimmlampe

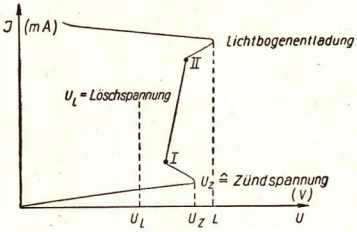


Abb. 13/4. Kennlinie einer Glimmlampe. Im Bereich I bis II bleibt die Spannung annähernd konstant.

Eine 220-V-Glimmlampe hat eine Zündspannung von etwa 160 V und eine Löschspannung von etwa 140 V. Die Stromstärke beträgt oft nur einige mA.

Bei einer *Korbglimmlampe* haben die Elektroden die Form von Wendeln. Dadurch wird eine größere Helligkeit erreicht. Diese Lampen dienen als Notbeleuchtung oder zur Betriebsanzeige von Anlagen usw.

b) Leuchtstofflampen. In der Beleuchtungstechnik gibt man immer mehr den Leuchtstofflampen den Vorzug. Nachstehende Ausführungen nennen ihre Vorteile gegenüber den Glühlampen.

Bei Glühlampen wird das Licht von einem Draht ausgestrahlt, der auf eine sehr hohe Temperatur, beispielsweise etwa 2400 °C, erhitzt worden ist. Diese Erwärmung bedeutet aber eine Umwandlung der aufgewandten elektrischen Energie zum größten Teil in Wärmeenergie und nur zu einem geringen Teil in Lichtenergie. Die Wärmeenergie ist aber bei den Glühlampen nicht beabsichtigt und stellt in gewissem Sinne einen Energieverlust dar.

Bei den Leuchtstofflampen wird dagegen die elektrische Energie hauptsächlich in Lichtenergie umgewandelt. Bei gleicher Aufnahme an elektrischer Energie ist die Lichtausbeute bei Leuchtstofflampen mehr als doppelt so groß wie bei Glühlampen. Zu diesem Vorteil kommt noch der einer längeren Lebensdauer.

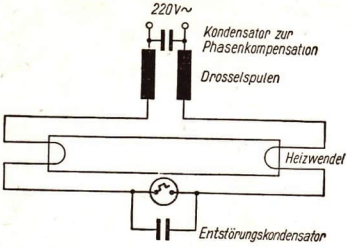


Abb. 14/1. Grundschaltung einer Leuchtstofflampe

Die gebräuchlichen Leuchtstofflampen benötigen eine Spannung von 220 V. Ihre Zündspannung liegt jedoch höher. Deshalb ist für ihre Inbetriebnahme noch eine besondere Zündanlage erforderlich. In ihr nutzt man den in einer Drosselspule entstehenden Selbstinduktions-Spannungsstoß beim Ausschalten eines Stromkreises aus. Diese Anlage wurde als Beispiel für die Anwendung der Selbstinduktion im Lehrbuch für die Klasse 9 beschrieben. Abbildung **14**/1 zeigt noch einmal die Schaltung der Leuchtstofflampe. Die Bestandteile der Anlage sind:

Entladungsrohr mit zwei eingeschmolzenen Heizwendeln, Drosselspulen, Glimmzünder oder Starter, Kondensatoren zur Phasenkompensation und zur Rundfunk- und Fernsehentstörung.

Die Entladungsvorgänge in einer Leuchtstofflampe wurden bereits allgemein erklärt. Folgende Begleiterscheinungen der selbständigen Gasentladung sind hier noch von Bedeutung: Durch den Stoß von Elektronen geringer Geschwindigkeit wird die kinetische Energie der getroffenen Gasatome erhöht. Das bedeutet Erhöhung des Wärmeinhaltes, also Erhöhung der Temperatur des Gases der Leuchtstofflampe.

Durch den Stoß eines Elektrons mittlerer Geschwindigkeit auf ein Atom nimmt das betreffende Atom eine gewisse innere Energie auf. Dabei verändert sich der innere Aufbau dieses Atoms. Eine solche Veränderung ist aber nicht beständig. Indem das Atom seine ursprüngliche Gestalt wieder annimmt, gibt es *die aufgenommene Energie in Form von Licht wieder ab.* Durch bestimmte auf die Innenwand der Entladungsröhre aufgetragene *Leuchtstoffe* erzielt man auf Grund entsprechender inneratomarer Vorgänge Lichtabstrahlungen von besonderer Qualität. Nach diesen Leuchtstoffen werden die Lampen Leuchtstofflampen genannt.

c) Leuchtröhren. Entladungsröhren ohne Leuchtstoffauskleidung, aber mit wesentlich gleichem Grundaufbau nennt man *Leuchtröhren* (Abb. **15**/1). Sie dienen fast ausschließlich der Lichtwerbung. Leuchtröhren werden meist mit *Stickstoff* oder auch mit *Edelgasen* mit einem Reinheitsgrad von 99,9% gefüllt. Man benötigt hierbei allerdings weit höhere Spannungen als bei Leuchtstofflampen. Sie liegen bei 1000 V für Edelgasfüllungen und bis zu 25 000 V bei Stickstoffgasfüllungen. Leuchtröhrenanlagen müssen daher besondere Sicherheitsvorkehrungen besitzen.

Die günstigsten Fülldrücke liegen bei 2 bis 6 Torr. *Die Füllgase bestimmen die Farbe des abgestrahlten Lichtes.* Eine Glasfärbung ist ebenfalls noch möglich. In der nebenstehenden Übersicht sind Gasart und Farbe gegenübergestellt.

Abb. 15/1
Leuchtröhren am Kinderkaufhaus in Berlin

Farben von Leuchtröhren

Gasart	Farbe
Helium	schwach gelbrot
Neon	zinnoberrot
Argon	schwach bläulich
Quecksilber	blaugrün
Natrium	intensiv gelb

d) Quecksilberdampflampen. Vielfach werden auch *Quecksilberdampflampen* für Beleuchtungszwecke verwendet. Bei diesen Lampen spielen sich die Gasentladungserscheinungen in Quecksilberdampf ab, der dadurch zum Aussenden von Licht, auch ultraviolettem Licht, angeregt wird. *Niederdrucklampen* mit 0,01 bis 1 Torr Gasdruck werden oft als Leuchtstofflampen ausgeführt, d. h., man gibt ihnen eine Leuchtstoffauskleidung. Bei *Hochdrucklampen* bis 30 at und *Höchstdrucklampen* bis zu einigen hundert at ist die Helligkeit sehr groß. Besteht der Brenner aus Quarzglas, kann unsichtbares ultraviolettes Licht zu Heilzwecken verwendet werden.

4. Die Katodenstrahlen. Die immer weiter voranschreitende Entwicklung der Fernsehtechnik gründet sich auf eine besondere Strahlungserscheinung bei der selbständigen Leitung im Gasentladungsrohr. Auf S. 10 wurde die Gasentladung bei immer mehr vermindertem Druck beschrieben. Die Leuchterscheinung des Gases nimmt ab, bis dann unterhalb von 0,02 Torr die der Katode gegenüberliegende Glaswand grünlich schimmert. *Das Glas fluoresziert.* Diese Erscheinung wurde 1858 von *Julius Plücker* entdeckt und erst 1869 von *Wilhelm Hittorf* weiter erforscht. Die Glasröhren für die Versuche wurden von dem Glasbläser *Geißler* angefertigt. Noch heute finden wir in vielen Schulsammlungen die nach Geißler benannten *Geißlerschen Röhren.* Beim Experimentieren mit diesen Strahlen zeigten sich merkwürdige Erscheinungen. Die Strahlen treten immer aus der Katode aus. Hittorf entdeckte, daß sie senkrecht aus der Katode austreten und sich geradlinig ausbreiten. Abbildung 15/2 zeigt ein *Katodenstrahlrohr.* Ein Körper hinterläßt auf der gegenüberliegenden Glaswand einen scharf begrenzten Schatten (Abb. 15/3).

Katodenstrahlen treten aus der negativen Elektrode senkrecht zu ihr aus und breiten sich geradlinig aus. Ihre Strahlrichtung ist von der Anode unabhängig.

Abb. 15/2
Katodenstrahlrohr

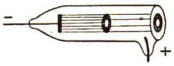


Abb. 15/3. Geradlinige Ausbreitung der Katodenstrahlen

Weitere Forschungen mit diesen Strahlen führten *Hittorf* zu dem Versuch, ein magnetisches Feld auf die Katodenstrahlen wirken zu lassen. Hält man einen Magneten über ein Katodenstrahlrohr, so werden die Katodenstrahlen durch das Magnetfeld abgelenkt (Abb. 16/1). Später wurden die Katodenstrahlen auch auf ihr Verhalten im elektrischen Feld hin untersucht. Sie werden zur positiven Platte hin abgelenkt (Abb. 16/2).

Katodenstrahlen lassen sich durch magnetische und elektrische Felder ablenken.

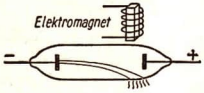


Abb. 16/1. Ablenkung der Katodenstrahlen im Magnetfeld.

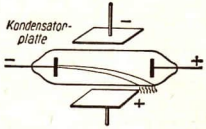


Abb. 16/2. Ablenkung der Katodenstrahlen im elektrischen Feld.

Heinrich Hertz gelang es nachzuweisen, daß dünne Metallfolien von Katodenstrahlen durchschlagen werden. *Lenard* entwickelte eine Katodenstrahlröhre, die ein durch eine dünne Aluminiumfolie verschlossenes Fenster besaß. Mit Hilfe von Katodenstrahlröhren mit *Lenardfenster* kann man Katodenstrahlen außerhalb des Glaskörpers untersuchen. Treffen diese Katodenstrahlen auf ein positiv geladenes Elektroskop, so geht der Ausschlag zurück (Abb. 16/3).

Katodenstrahlen durchdringen dünne Aluminium- bzw. andere Metallfolien.

Treffen nun Elektronenstrahlen auf einen Metallzylinder, der mit einem Elektroskop verbunden ist, so wird dieses negativ aufgeladen (Abb. 16/4).

Die Katodenstrahlen verursachen eine negative Aufladung.

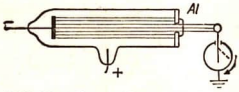


Abb. 16/3. Katodenstrahlen durchdringen dünne Metallfolien

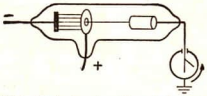


Abb. 16/4. Katodenstrahlen laden ein Elektroskop negativ auf

Befindet sich im Krümmungsmittelpunkt einer Hohlspiegelkatode ein Metallkörper, so wird dieser durch die gesammelten Katodenstrahlen glühend (Abb. 17/1).

Katodenstrahlen üben beim Aufprall auf einen festen Körper Wärmewirkungen aus.

Ein leicht bewegliches Rädchen wird oberhalb der Achse von Katodenstrahlen getroffen, es gerät in eine drehende Bewegung (Abb. 17/2).

Katodenstrahlen üben auf ein Hindernis infolge ihrer kinetischen Energie mechanische Wirkungen aus.

Abb. 17/1. Katodenstrahlen üben Wärmewirkungen aus.

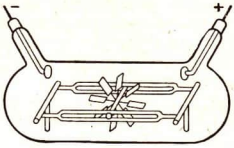


Abb. 17/2. Katodenstrahlen üben mechanische Wirkungen aus.

Aus allen diesen Untersuchungen und vielen weiteren Forschungsergebnissen wurde die Natur der Katodenstrahlen ermittelt. Die Katodenstrahlen bestehen aus Elementarteilchen. Diese kleinsten Elementarteilchen erhielten den Namen Elektronen. Sie haben eine negative Ladung und können in einem magnetischen beziehungsweise elektrischen Feld abgelenkt werden. Bei der Erforschung der Katodenstrahlen hatte man bereits erkannt, daß man mit ihrer Hilfe Abbildungen erzeugen konnte, doch war man sich der Bedeutung dieser Entdeckung noch nicht voll bewußt. Heute spielen Katodenstrahlen nicht nur beim Fernsehen, sondern auch in der Meßtechnik eine große Rolle. Eine weitere Anwendung finden Katodenstrahlen beim *Elektronenmikroskop*. Das ist deshalb möglich, weil diese Strahlen ähnliche Eigenschaften wie das Licht haben. Darauf gründet sich ein neues Forschungsgebiet, die *Elektronenoptik*. An Stelle der in der Strahlenoptik gebräuchlichen Glaslinsen brechen, sammeln und zerstreuen magnetische oder elektrische Felder die Elektronenstrahlen. So gibt es also auch *magnetische* und *elektrische „Linsen"*. Während man mit einem Lichtmikroskop Vergrößerungen nur bis zum 2000fachen erreichen kann, läßt das Elektronenmikroskop noch weit höhere Vergrößerungswerte zu, zur Zeit bis zu 200 000fach. Da, wo also das Licht für ein weiteres Eindringen in den Feinbau der Materie ungeeignet ist, überwindet man mit Hilfe der Elektronenoptik diese Schranke der Erkenntnis. Wenn der Mensch mit seinen bisherigen Methoden in seinem Forschen nicht weiter vordringen kann, dann sucht und findet er stets neue Wege, auf denen er seine Umwelt besser und tiefer erkennen kann als bisher. Dafür ist die Entwicklung des Elektronenmikroskops ein charakteristisches Beispiel. Es gibt also keine endgültigen Grenzen der menschlichen Erkenntnis.

2. Die Glühemission

1. Der glühelektrische Effekt. Es ist untersucht worden, unter welchen Bedingungen Gase bei normalem Druck leitfähig werden und unter welchen Voraussetzungen darüber hinaus die Leitfähigkeit von Gas bei geringen Drücken gegeben ist. Alle diese Untersuchungen wurden mit *kalten Elektroden* durchgeführt. 1869 waren viele Forschungsergebnisse mit kalten Katoden u.a. durch *Hittorff* bereits erarbeitet. Mit der Erfindung der elektrischen Glühlampe durch *Heinrich Goebel* 1855 und unabhängig von ihm durch den russischen Physiker *A. N. Lodygin* im Jahre 1872 begann eine neue Periode in der Forschungsarbeit.

Im Jahre 1883 experimentierte der Physiker *Thomas Alva Edison* mit einer Kohlefadenglühlampe (Abb. 18/1). Um zu sehen, ob von dem Glühfaden eine Entladung

durch die Gasfüllung ausgehe, hatte er in den Glaskolben außer einem Kohlefaden noch eine Metallplatte eingebracht. Verband er nun die Metallplatte mit dem positiven Pol einer Stromquelle, so beobachtete er an einem zwischengeschalteten Galvanometer einen Ausschlag. Erst 1897 erklärten Physiker diesen Effekt damit, daß *aus der Oberfläche eines glühenden Metalls freie Elektronen heraustreten.* Die Erscheinung des Elektronenaustritts aus glühendem Metall heißt *thermische Emission.*

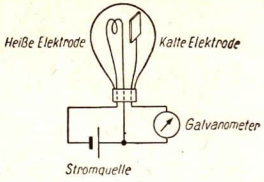


Abb. 18/1. Kohlefadenglühlampe mit heißer und kalter Elektrode (nach Edison)

Um den sogenannten *Edison-Versuch* in etwas abgewandelter Form zu wiederholen, setzt man eine Kohlefadenlampe in Betrieb und windet um den Glaskolben der Glühlampe einen blanken Kupferdraht (Abb. 18/2). Das eine Ende des Drahtes wird mit einem Elektroskop verbunden, dessen Gehäuse geerdet ist. War das Elektroskop vorher positiv aufgeladen (Elektronenmangel), so geht nach dem Einschalten der Glühlampe der Ausschlag sofort zurück. Lädt man dagegen das Elektroskop negativ auf (Elektronenüberschuß), so bleibt der Ausschlag erhalten. Der Versuch zeigt, daß sich der Glaskolben der Lampe negativ aufgeladen hat. Der Elektronenüberschuß auf dem Glaskolben verursacht in diesem Falle keine Veränderung der Anzeige des Elektroskops. Dagegen wird eine positive Ladung des Elektroskops durch die leitende Verbindung mit dem sich negativ aufladenden Glaskolben neutralisiert. Die negative Aufladung des Glaskolbens aber kann nur durch Elektronen geschehen sein, die der glühende Draht ausgesendet hat.

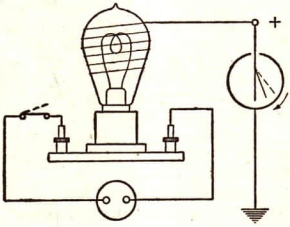


Abb. 18/2. Nachweis der thermischen Emission

Aus einem glühenden Draht treten freie Elektronen aus (thermische Emission).

2. Die Diode. a) Aufbau und Wirkungsweise der Diode. Um die Entdeckung, die der Edison-Versuch brachte, für die wissenschaftliche und technische Praxis anwenden zu können, mußte man durch systematische Untersuchungen das Verhalten der aus dem Glühdraht ausgetretenen Elektronen erforschen. Da ein Glühdraht frei bewegliche Elektronen liefert, braucht man kein Gas mehr, um aus dessen Molekülen Ladungsträger zu gewinnen. Man kann also im Hochvakuum mit einem Restgasdruck von 10^{-6} Torr arbeiten. Dieses hohe Vakuum ist an sich der beste Isolator, den es gibt. Man verwendet ein besonderes Hochvakuumrohr mit zwei Elektroden, deren eine als Glühfaden ausgeführt ist und durch einen hindurchgeleiteten elektrischen Strom erhitzt wird. Man nennt diese Röhre nach ihren zwei Elektroden *Diode*; sie gehört zur Gruppe der *Elektronenröhren* oder *Glühkatodenröhren.* Ohne zunächst den Versuch auszuführen, kann man sich folgendes überlegen:

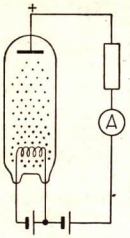


Abb. 19/1
Vorgänge in einer Diode bei Anodenspannung

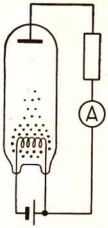


Abb. 19/2
Vorgänge in einer Anode ohne Anodenspannung

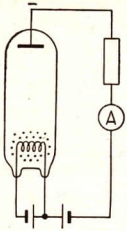


Abb. 19/3
Sperrwirkung der Diode

1. Ist die kalte Elektrode als Anode gegenüber dem Glühfaden positiv geladen, so müssen die freien Elektronen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes nach der Anode hin abgesaugt werden (Abb. **19**/1). Da der Glühfaden erhitzt bleibt, emittieren ständig neue Elektronen, die dauernd zur Anode wandern, so daß ein Elektronenstrom entsteht.
2. Liegt dagegen keine Spannung an der kalten Elektrode, so fehlt das beschleunigende Feld, so daß keine gerichtete Bewegung der Elektronen nach dieser Elektrode zustande kommt (Abb. **19**/2). Ein geringer Teil der Elektronen wird die kalte Elektrode dennoch erreichen. Also müßte ein schwacher Strom nachweisbar sein.
3. Wenn jedoch die kalte Elektrode gegenüber dem Glühfaden negativ geladen ist, dann verhindert die gleichartige elektrische Ladung der Elektronen und der kalten Elektrode offensichtlich einen Strom (Abb. **19**/3).
   Die aus dem glühenden Draht ausgetretenen Elektronen bleiben als eine „*Elektronenwolke*" um ihn herum gelagert. Diese negative Wolke verhindert auf Grund der elektrostatischen Abstoßungskräfte eine weitere Emission der Elektronen.

Zur Bestätigung dieser Überlegungen dienen folgende Versuche:

In einem hohen Vakuum befinden sich als erste Elektrode ein Glühfaden und ihm gegenüber eine zweite Elektrode. Wird nun der Glühfaden durch einen Gleichstrom geheizt, so zeigt ein hochempfindliches Galvanometer einen Elektronenstrom von 10^{-5} bis 10^{-7} A an (Abb. **19**/2).

Aus einer glühenden Katode treten im Hochvakuum Elektronen heraus. Es fließt ein geringer Elektronenstrom.

Wird nun eine Spannung so angelegt, daß der Glühfaden die Katode, die gegenüberstehende Elektrode die Anode ist, so steigt der Elektronenstrom erheblich an. Er wächst um so mehr, je größer die *Anodenspannung* ist (Abb. **19**/1).

Bei gleicher Glühtemperatur der Katode wird der Elektronenstrom mit wachsender Anodenspannung größer.

Wird die Anodenspannung konstant gehalten, aber die Katode durch einen stärkeren Strom im Glühfaden, einen stärkeren Heizstrom, erhitzt, so verstärkt sich auch der Elektronenstrom. Die Erwärmung des Heizfadens ist, je nach dem Material, nur bis zu einer bestimmten Temperatur möglich.

Je stärker die Glühkatode erhitzt wird, um so stärker ist der Elektronenstrom.

Legt man den Minuspol der Anodenbatterie an die Anode, so ist kein Anodenstrom nachzuweisen (Abb. 19/3).

Ist die kalte Elektrode negativ geladen, so kommt kein Elektronenstrom zustande.

Wie die Überlegungen und die bestätigenden Versuche erwiesen haben, ist eine Diode nur dann als Leiter wirksam, wenn *der Glühfaden als Katode, die kalte Elektrode als Anode* benutzt werden. Als Katode wurde in den ersten Jahren der Forschung häufig Platindraht verwendet. Die Platinkatode wurde bis auf Weißglut aufgeheizt und der Anodenstrom gemessen.

1903 machte der Physiker *Wehnelt* eine Entdeckung: Schon bei schwacher Rotglut um 700 °C und einer Anodenspannung von 10 V bis 100 V traten aus einigen Stellen der Platinkatode helle, blaue Katodenstrahlen aus. Wehnelt konnte einen sehr kräftigen Elektronenstrom messen. Er nahm an, daß Verunreinigungen des Platindrahtes die Ursache hierfür seien. Auf dieser Überlegung aufbauend, stellte er fest, daß die *Oxyde der Erdalkalimetalle* schon bei niederen Temperaturen sehr viel Elektronen emittieren. Bis in die heutige Zeit werden die Katoden daher mit *Bariumoxyd* überzogen, um die Heiztemperaturen bei gleichzeitiger verstärkter Elektronenemission wesentlich niedriger zu halten. Den Vorgang des Erhitzens der Glühkatode bezeichnet man auch als die *Heizung der Elektronenröhre*. Es gibt zwei Arten von Heizungen.

1. Die *direkte Heizung* (Abb. 20/1). Aus einer Gleichstromquelle läßt man bei möglichst konstanter Spannung durch die Wendel einer Katode einen elektrischen Strom fließen. Man kann die Anode über der Katode anordnen (Abb. 20/2) oder die Katode im Innern einer *Zylinderanode* anbringen (Abb. 20/3).

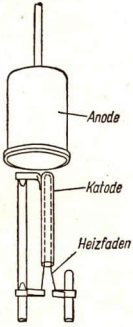


Abb. 20/3
Die Zylinderanode umgibt die Katode

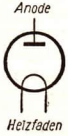


Abb. 20/1. Schaltzeichen einer direkt geheizten Diode

Abb. 20/2. Plattenanode über der Katode

2. Die *indirekte Heizung* (Abb. 20/4). Ein Nickelröhrchen mit Bariumoxyd wird durch einen Heizfaden erwärmt. Dadurch kann der Heizfaden auch mit Wechselstrom geheizt werden (Abb. 20/5).

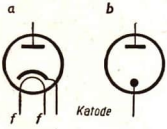


Abb. 20/4. a) Schaltzeichen indirekt geheizter Dioden
b) vereinfachtes Schaltzeichen

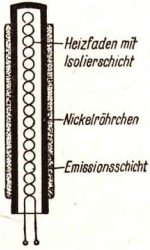


Abb. 20/5. Indirekte Heizung

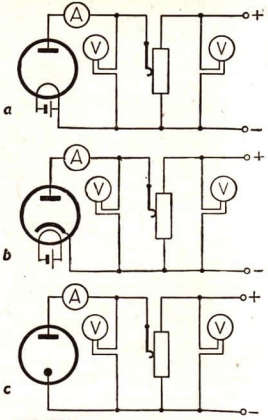


Abb. 21/1
a) Aufnahme der Kennlinie der Diode bei direkter Heizung
b) und c) Aufnahme der Kennlinie der Diode bei indirekter Heizung

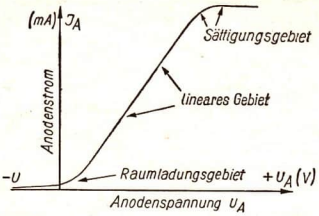


Abb. 21/2
Kennlinie einer Diode. Strom-Spannungs-Abhängigkeit

b) Die Kennlinie der Diode. Die Aufgabe der Physik ist es nicht nur, die physikalischen Vorgänge zu beschreiben, sondern auch Messungen durchzuführen, um mathematische Beziehungen zwischen den physikalischen Größen zu ermitteln.

In einer Versuchsanordnung nach Abb. 21/1 wird der Anodenstrom in seiner Abhängigkeit von der Anodenspannung *bei gleichbleibendem Heizstrom* gemessen. Man verändert zweckmäßig die Anodenspannung um jeweils 5 V. Man lädt die Anode zunächst negativ auf und geht über 0 V zu positiven Anodenspannungen über. Trägt man die Meßwerte in ein Koordinatensystem ein, so erhält man eine Kurve, die als *Kennlinie* oder *Charakteristik der Diode* bezeichnet wird (Abb. 21/2). Aus der Kennlinie ist ersichtlich, daß bei einer negativen Ladung der Anode wenig Strom fließt. Bei 0 V Spannung ist dagegen bereits ein sehr schwacher Strom nachweisbar. Bei Erhöhung der Anodenspannung steigt der Anodenstrom zunächst fast linear an. Von einem bestimmten Wert der Anodenspannung an wächst der Anodenstrom nicht weiter an. Der Glühfaden kann nicht mehr Elektronen abgeben. Die sogenannte *Sättigungsgrenze* ist erreicht. Die Sättigungsgrenze läßt sich nur durch Änderung des Heizstromes verschieben. Um dies experimentell nachzuweisen, muß man die Kennlinie *für verschiedene Heizströme* aufnehmen (Abb. 21/3).

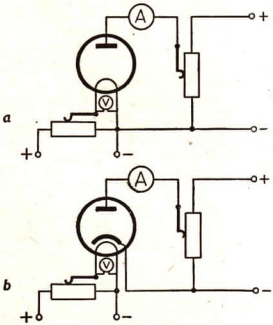


Abb. 21/3
a) Veränderung der Heizspannung bei direkt geheizter Katode, b) Veränderung der Heizspannung bei indirekt geheizter Katode

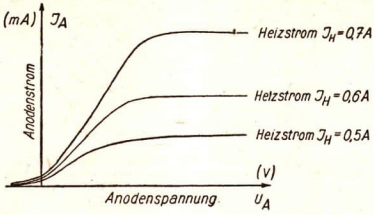


Abb. 22/1
Kennlinienschar einer Diode

Wie nach der Beziehung $I \sim U$ bekannt ist, hat eine Veränderung der Heizspannung stets eine Veränderung des Heizstromes zur Folge. Eine Veränderung des Heizstromes verursacht seinerseits eine Temperaturänderung der Katode. Abbildung 22/1 zeigt, daß eine Verringerung des Heizstromes die Emissionsfähigkeit der Katode herabsetzt, eine Erhöhung des Heizstromes verstärkt die Emission. Die technischen Dioden sind für einen bestimmten Heizstrom gebaut. Eine Überheizung kann zum Durchbrennen des Heizfadens führen.

c) Anwendung der Diode. In der Rundfunktechnik spielt der Begriff *Diodengleichrichtung* eine Rolle. Der damit bezeichnete Vorgang soll näher untersucht werden. Aus der Kennlinie ist zu ersehen, daß ein Anodenstrom nur fließen kann, wenn an der Anode eine positive Spannung liegt. Liegt an der Anode aber eine negative Spannung, so werden die Elektronen auf die Katode zurückgedrängt. Wenn nun an Anode und Katode eine Wechselspannung angelegt ist, so kann ein Anodenstrom nur fließen, wenn eine positive Halbwelle an der Anode liegt. *Die Diode wirkt demnach wie ein Ventil* (Ventilwirkung der Diode).

Liegt im Anodenstromkreis ein Milliamperemeter, so wird ein Anodenstrom angezeigt, gleichgültig, ob ein Drehspul- oder Dreheisenmilliamperemeter verwendet wird (Abb. 22/2). Demnach hat dieser Strom auch eine gleichbleibende Richtung, eben weil nur die positive Halbwelle fließen kann; die negative Halbwelle wird zurückgehalten. Die Diode sperrt diese Stromrichtung (vgl. Abb. 19/3).

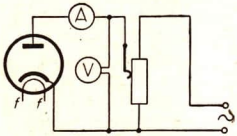


Abb. 22/2. Diode mit Wechselspannung an der Anode

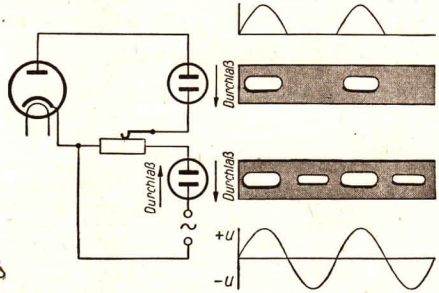


Abb. 22/3. Darstellung der Durchlaßrichtung einer Diode. Das Glimmlicht der Glimmlampen wird im Drehspiegel beobachtet.

Ein Versuch soll diesen Vorgang veranschaulichen. Eine Diode wird indirekt geheizt (Abb. 22/3). An Anode und Katode liegt eine Wechselspannung. Als Spannungsanzeiger dienen zwei untereinander liegende Glimmlampen, von denen eine unmittelbar im Anodenstromkreis, die andere im Wechselstromkreis liegt. Betrachtet man die Glimmlampen im rotierenden Drehspiegel, so erkennt man, daß der Anodenstrom immer nur fließt, wenn die positive Halbwelle an der Anode liegt. Eine Diode wirkt demnach als *Gleichrichter*; *Wechselströme werden in pulsierende Gleichströme umgewandelt.*

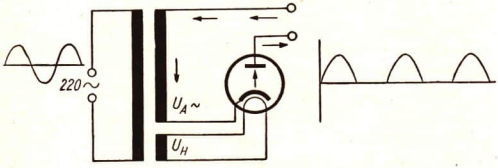


Abb. 23/1
Gleichrichtung der Wechselspannung mit Hilfe einer Diode (Einweggleichrichtung). Eine Halbwelle der Wechselspannung wird nicht ausgenutzt.

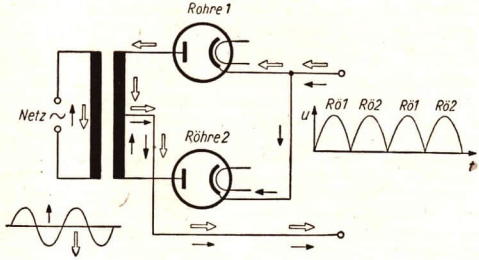


Abb. 23/2
Gleichrichtung einer Wechselspannung durch zwei Dioden

Wegen der großen Zuverlässigkeit, des hohen Wirkungsgrades und des geräuschlosen Arbeitens wird der *Dioden-* oder *Glühkatodengleichrichter* in der Elektrotechnik weitgehend verwendet. Man benutzt ihn vorzugsweise dort, wo Wechselströme geringer Leistung gleichgerichtet werden sollen, beispielsweise in Stromversorgungsgeräten, in Rundfunk- und Fernsehgeräten und beim Laden von Akkumulatoren.

Mit der beschriebenen Anordnung kann nur die positive Halbwelle des Wechselstromes ausgenutzt, die negative Halbwelle dagegen kann nicht nutzbar gemacht werden. Diese Art der Gleichrichtung nennt man *Einweggleichrichtung*. In der Abbildung 23/1 zeigen die Pfeile die Richtung des Stromes der positiven Halbwelle in der Röhre.

Will man beide Halbwellen ausnutzen, so braucht man zwei Dioden (Abb. 23/2). Die Gegenläufigkeit der Strompfeile in der Transformatorspule mit Mittelanzapfung soll zeigen, daß tatsächlich ein Wechselstrom mit beiden Halbwellen gleichgerichtet wird. Häufig wird zur Gleichrichtung der positiven und negativen Halbwellen

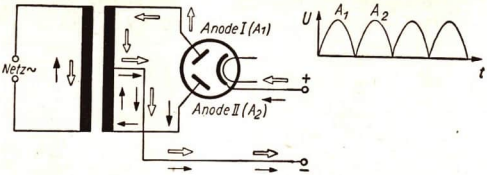


Abb. 24/1
Gleichrichtung durch eine Doppeldiode

eine *Doppelweg-Gleichrichterröhre* verwendet (Abb. 24/1). Sie enthält zwei isoliert voneinander angebrachte Anoden in einem Glaskolben mit gemeinsamer Katode und entspricht damit zwei einfachen Dioden.

3. Die Triode. a) Von der Zweielektrodenröhre zur Dreielektrodenröhre. Schon um die Jahrhundertwende herum war bekannt, daß man die Stärke des Elektronenstromes in einer Elektronenröhre auf zwei Arten verändern kann:

1. Läßt man die Glühtemperatur der Katode konstant, indem man immer die gleiche Spannung an die Glühkatode legt, so kann mit steigender Anodenspannung ein Ansteigen des Anodenstromes beobachtet werden, bis eine Sättigung erfolgt.
2. Wenn die Anodenspannung konstant bleibt, so kann durch Verändern der Glühtemperatur der Katode die Emissionsfähigkeit verändert werden.

Eine plötzliche Veränderung des Anodenstromes ist mit der Zweielektrodenröhre nicht möglich. Es lag der Gedanke nahe, einer Zweielektrodenröhre eine zusätzliche Elektrode zu geben, die zwischen Katode und Anode liegt, um die Elektronen zusätzlich anzusaugen. 1906 wurde eine solche *Dreielektrodenröhre* oder *Triode* von *de Forest* entwickelt. Diese Röhre enthielt als dritte Elektrode ein Drahtnetz, später auch eine Drahtwendel, die man *Gitter* nannte. Um die Wirkungsweise des Gitters zu erkennen, wird eine Versuchsreihe mit einer Triode durchgeführt. In einer Schaltung nach Abbildung 24/2 wird die Triode wie die Diode durch einen Heizstromkreis geheizt und in einen Anodenstromkreis mit Amperemeter geschaltet. Hinzu kommt der *Gitterstromkreis*, der durch Anlegen einer Spannung zwischen Gitter und Katode gebildet wird. Die einzelnen Versuchsschritte sind folgende:

1. Der Anodenstrom wird gemessen, wenn die Gitterspannung 0 V beträgt.
2. Die Messung wird bei einer Gitterspannung von + 4 V bzw. − 4 V wiederholt.

Eine positive Spannung am Gitter verstärkt den Elektronenstrom, eine negative Gitterspannung hemmt den Anodenstrom.

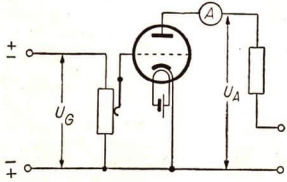


Abb. 24/2. Schaltbild zur Untersuchung der Wirkungsweise des Gitters. Die Voltmeter wurden der Einfachheit halber weggelassen.

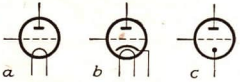
Zur Erklärung dieser Ergebnisse muß man die Gesetze der elektrostatischen Anziehung und Abstoßung auf die Vorgänge in der Triode anwenden. Eine positive Ladung des Gitters verstärkt das beschleunigende elektrische Feld zwischen Katode und Anode. Die Elektronen werden vom Gitter zusätzlich beschleunigt, gewissermaßen *angesaugt*. Eine negative Ladung des Gitters wirkt in umgekehrter Weise bremsend auf die zur Anode wandernden Elektronen. Auf diese Weise kann man den Elektronenstrom steuern. Man spricht deshalb auch von dem *Steuergitter*.

Im Laufe der Entwicklung der Triode wurde ihr Aufbau so vervollkommnet, daß *geringste Änderungen der Gitterspannung die Stärke des Anodenstromes in großen Bereichen veränderten.*

Der Anodenstrom einer Dreielektrodenröhre ist durch die Gitterspannung zu steuern. Positive Gitterspannung verstärkt den Anodenstrom, negative Gitterspannung schwächt den Anodenstrom.

b) Aufbau der Triode. Abbildung 25/1 zeigt das Schaltzeichen einer Triode für direkte bzw. indirekte Heizung; die indirekt geheizte Triode wird häufig vereinfacht dargestellt.

Abb. 25/1. Schaltzeichen einer Triode
a) direkte Heizung
b) indirekte Heizung
c) vereinfachte Darstellung



Der innere Aufbau ist dem einer Diode ähnlich. Zwischen der Bariumoxydschicht und der Anode liegt ein wendelförmig ausgebildetes Gitter (Abb. 25/2).

Die Schaltung einer Triode ist aus Abbildung 24/2 ersichtlich. Man erkennt in der Abbildung 25/3 die drei Stromkreise:

den *Heizstromkreis*,
den *Anodenstromkreis*
und den *Gitterstromkreis*.

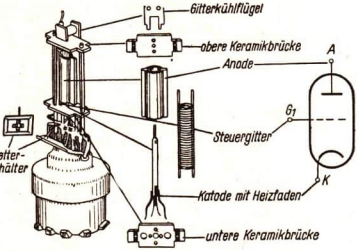


Abb. 25/2. Aufbau einer Triode

c) Die Kennlinie der Triode. Ähnlich wie bei der Aufnahme der Kennlinie der Diode kann man auch die der Triode gewinnen. Abbildung 26/1a zeigt noch einmal die Schaltung einer Triode zur Aufnahme der Kennlinie die Abbildung 26/1b die vereinfachte Darstellung.

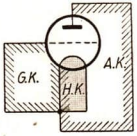
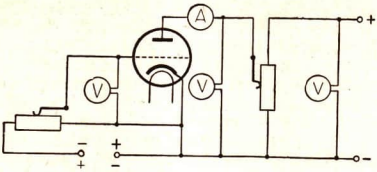


Abb. 25/3
Stromkreise einer Triode

Eine Veränderung der Gitterspannung und Wahl der Anodenspannung erfolgt durch Potentiometer- oder Spannungsteilerschaltung.

Nach der in Abbildung 26/1 wiedergegebenen Schaltung wird die Gitterspannung stufenweise verändert; Heizspannung und Anodenspannung werden konstant gehalten. Die Anodenstromstärke wird gemessen und in eine Tabelle und ein Koordi-



a) indirekte Heizung

Abb. 26/1. Schaltbild zur Aufnahme der Kennlinie einer Triode

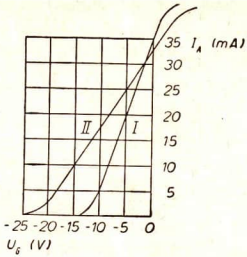
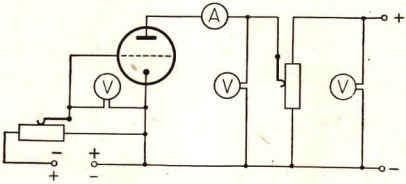


Abb. 26/2. Kennlinien zweier Trioden



b) vereinfachte Darstellung

natensystem eingetragen. Man erhält eine Kennlinie, wie sie in Abbildung 26/2 wiedergegeben ist.

Die Kennlinie I läßt erkennen, daß bei einer negativen Gitterspannung von − 15 V noch kein Elektronenstrom fließt. Von −10 V aufwärts steigt dann der Anodenstrom in nahezu linearer Abhängigkeit an.

Nimmt man Kennlinien für verschiedene Anodenspannungen auf, so erkennt man folgende Gesetzmäßigkeit:

Durch Veränderung der Anodenspannung verschiebt sich die Kennlinie auf der Abszisse.

Für die Beurteilung und Verwendung einer Triode ist die *Steilheit der Kennlinie* wichtig. Man meint damit den Anstieg des linearen Teils der Kennlinie (Abb. 27/1). Um die Steilheit (S) zu bestimmen, wird der Quotient aus der Änderung des Anodenstromes (ΔI_A) und der Änderung der Gitterspannung (ΔU_G) gebildet.

$$\text{Steilheit} = \frac{\text{Änderung der Anodenstromstärke}}{\text{Änderung der Gitterspannung}},$$

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G}.$$

Die Kennlinie I in Abbildung 26/2 ist steiler als die Kennlinie II. Eine Änderung der Gitterspannung von −10 V auf −5 V ergibt ein ΔU_G von 5 V. Diese Gitterspannungsänderung ruft eine Änderung der Anodenstromstärke von 15 mA hervor.

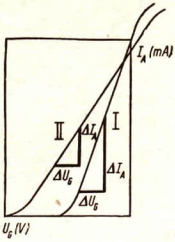


Abb. 27/1
Anodenstrom-Gitterspannungs-Kennlinien verschiedener Steilheit (vgl. Abb. 26/2)

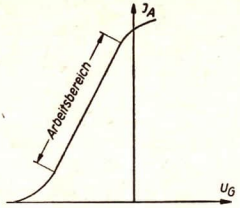


Abb. 27/2
Arbeitsbereich einer Röhre

Die Steilheit beträgt demnach:

$$S_I = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G}$$

$$S_I = \frac{15}{5}\,\frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S_I = 3\ \text{mA} \cdot \text{V}^{-1}$$

Bei der Kennlinie II verursacht eine Gitterspannungsänderung von 5 V eine Anodenstromänderung von nur 7,5 mA.

$$S_{II} = \frac{7{,}5}{5}\,\frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S_{II} = 1{,}5\ \text{mA} \cdot \text{V}^{-1}$$

4. Die Triode als Verstärker. a) Die verstärkende Wirkung der Dreielektrodenröhre. Zu einer Lautsprecheranlage gehört neben dem Mikrofon, den Lautsprechern und Kabeln der *Verstärker*. Das Herzstück des Verstärkers bilden Elektronenröhren, speziell auch Trioden. Wie diese die Verstärkung eines Sprechstromes vollführen, soll im folgenden dargestellt werden.

Die Kennlinie einer Triode kann bereits die grundlegenden Einsichten vermitteln. Der annähernd lineare Teil der Kennlinie, für den auch die Steilheit festgelegt wurde, hat in diesem Falle, wie noch gezeigt wird, allein Bedeutung. Den Funktionsbereich, zu dem der lineare Teil der Kennlinie gehört, bezeichnet man auch als den *Arbeitsbereich der Röhre* (Abb. 27/2).

Aus der Kennlinie kann man rein anschaulich entnehmen, daß im Arbeitsbereich durch *eine geringe Änderung der Gitterspannung eine große Änderung der Stärke des Anodenstromes* hervorgerufen wird. Der folgende Versuch bestätigt diese Vermutung.

Aus einem Mikrofon, einem Transformator mit dem Übersetzungsverhältnis 1 : 4, einer 4-V-Akkumulatorenbatterie und einem Lautsprecher werden zwei Stromkreise gebildet. Spricht man in das Mikrofon, so ist die Sprache im Lautsprecher nur schwach zu hören.

Nunmehr legt man die Sekundärspule des Transformators in den Gitterstromkreis einer Elektronenröhre mit möglichst steiler Kennlinie (Abb. 28/1). Die Gitterspannung wird negativ gewählt, und zwar soll die Mitte des Arbeitsbereiches an-

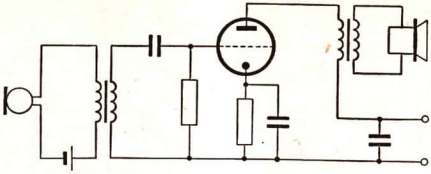


Abb. 28/1
Anwendung der Triode im Niederfrequenzverstärker

nähernd in der Mitte des linearen Teiles der Kennlinie liegen. Der Lautsprecher wird jetzt in den Anodenstromkreis eingeschaltet. Bespricht man nun das Mikrofon, so ist die Wiedergabe der Sprache wesentlich lautstärker als beim ersten Versuch.

Daraus folgt:

Mittels einer Dreielektrodenröhre kann ein elektrischer Strom verstärkt werden.

Schaltet man in den Gitterstromkreis ein Milliamperemeter ein, so stellt man fest, daß die Stärke des Gitterstromes im Verhältnis zum Anodenstrom nur äußerst klein ist. *Je geringer der Gitterstrom im Verhältnis zum Anodenstrom ist, um so größer ist die erzielte Verstärkung.* Den Gitterstrom kann man noch dadurch verringern, daß man zusätzlich an das Gitter eine negative Spannung anlegt. Diese wirkt dann dem Gitterstrom entgegen. Auf diese Weise wird der Leistungsaufwand für die Steuerung des Anodenstromes ganz gering.

Im Gitterstromkreis einer als Verstärker geschalteten Dreielektrodenröhre fließt bei hinreichender negativer Gittervorspannung fast kein Strom. Die Steuerung des Anodenstromkreises erfolgt nahezu ohne Leistungsaufwand.

Führt man den gleichen Versuch mit einer Röhre durch, deren Kennlinie weniger steil verläuft, so beobachtet man eine wesentlich geringere Verstärkung.

Der Verstärkungsgrad einer Verstärkerröhre ist abhängig von der Steilheit ihrer Kennlinie. Je steiler diese verläuft, um so größer ist die Verstärkung unter sonst gleichen Bedingungen.

Ein Vergleich der beiden Kennlinien in Abbildung 28/2 läßt die Richtigkeit dieser Feststellung rein anschaulich erkennen.

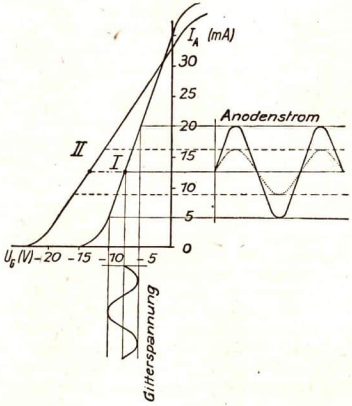
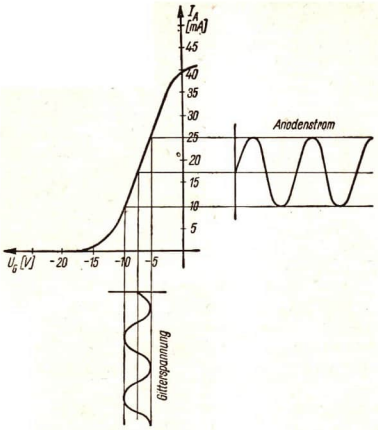


Abb. 28/2
Abhängigkeit der Verstärkung von der Steilheit der Kennlinie



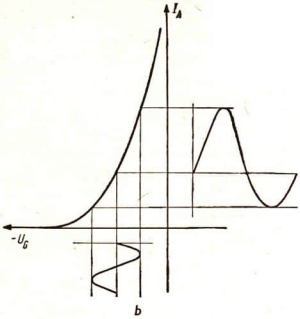


Abb. 29/1. Schematische Darstellung einer verzerrungsfreien (a) und einer verzerrten Wiedergabe einer Sinusschwingung (b)

b) Der Arbeitspunkt der Verstärkerröhre — Die verzerrungsfreie Verstärkung. Eine gute Verstärkeranlage soll aber auch Sprache und Musik deutlich und ohne Verzerrung wiedergeben. Zu diesem Zweck müssen die von der Röhre bewirkten Anodenstromschwankungen stets den zugrundeliegenden Gitterstromschwankungen proportional sein. Das ist so lange der Fall, wie der Arbeitsbereich der Röhre nicht überschritten wird. Der mittlere Ruhepunkt, um den die Stromschwankungen in beiden Richtungen erfolgen, muß auf der Kennlinie dem mittleren Punkt des linearen Teils entsprechen. Man nennt diesen Punkt den *Arbeitspunkt*. Praktisch werden diese Anforderungen durch eine richtige Wahl der Gitterspannung bestimmt. Dadurch wird zum Beispiel eine die Gitterspannung steuernde schwache Sinusschwingung als verstärkte Sinusschwingung des Anodenstromes verzerrungsfrei wiedergegeben (Abb. 29/1a). Liegt dagegen der Arbeitspunkt in dem unteren oder dem oberen Bogen der Kennlinie, so werden Schwankungen der Steuerspannung verzerrt wiedergegeben (Abb. 29/1b).

c) Die Verstärkung der Spannung — Trägheitslose Relaiswirkung. Aus den vorangehenden Ausführungen folgt, daß die Triode die dem Gitter zugeführten Spannungsschwankungen in Schwankungen des Anodenstromes umwandelt. Die Verstärkung braucht damit aber noch nicht abgeschlossen zu sein; man kann sie noch weiter fortsetzen. Dazu überträgt man die Stromschwankungen des Anodenstromes über einen Transformator auf das Gitter einer weiteren Röhre und schließt an die erste Verstärkerröhre eine zweite an. Die Primärspule des Transformators liegt dabei im Anodenstromkreis der ersten Verstärkerstufe, während die Sekundärspule in den Gitterstromkreis der zweiten Verstärkerstufe geschaltet ist (Abb. 30/1). Fließt nun durch die Primärspule ein schwankender Strom, so tritt an den Enden der

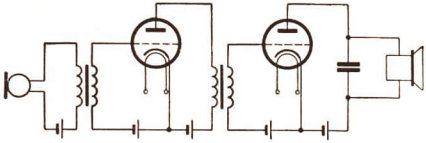


Abb. 30/1
Schaltbild eines zweistufigen Niederfrequenzverstärkers

Sekundärspule eine Spannungsschwankung im Rhythmus der Anodenstromschwankungen auf. Die Stromschwankungen werden also als Spannungsschwankungen auf den Gitterstromkreis der zweiten Verstärkerstufe übertragen. *In diesem Falle wirkt die Dreielektrodenröhre als nahezu trägheitsloses Relais.* Erst im Anodenstromkreis der letzten Verstärkerröhre, also in der Endstufe, erfolgt endgültig die Umwandlung der Spannungsschwankungen in Stromschwankungen.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Beschreiben Sie den Aufbau der Dreielektrodenröhre und geben Sie in einer Zeichnung die drei Stromkreise an!
2. Welche Bedeutung hat das Gitter der Dreielektrodenröhre?
3. Welche Bedeutung hat die Kennlinie für die Beurteilung einer Dreielektrodenröhre?
4. Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Anodenstrom, dem Emissionsstrom und dem Gitterstrom?
5. Von welchen Einflüssen ist der Verstärkungsgrad einer Verstärkerröhre abhängig?
6. Wo muß der Arbeitspunkt einer Verstärkerröhre liegen, wenn sie verzerrungsfrei arbeiten soll?
7. Geben Sie die Schaltung einer Dreielektrodenröhre für die Verstärkung von Spannungsschwankungen ohne Verwendung eines Transformators an!
8. Zeichnen Sie den Schaltplan einer a) einstufigen, b) zweistufigen Verstärkeranlage für eine Saal-Lautsprecheranlage!

6. Die Braunsche Röhre. a) Der Aufbau der Röhre in der ursprünglichen Form. Nachdem die Katodenstrahlen durch *Julius Plücker* im Jahre 1858 entdeckt waren, beschäftigten sich die Forscher lange Zeit hindurch mit diesen eigenartigen Strahlen. Man erkannte, daß es sehr schnelle Elektronen sind. Heute betrachten wir Sendungen auf dem Bildschirm des Fernsehgerätes und lernen im Unterrichtstag in der sozialistischen Produktion Meßinstrumente kennen, bei denen ein Katodenstrahl Meßwerte auf dem Bildschirm einer Katodenstrahlröhre abbildet. Der Weg von der Entdeckung der Katodenstrahlen bis zu ihrer heutigen Anwendung war lang und mühevoll. Er führt über den Physiker *Ferdinand Braun*. Im Jahre 1897 hat er der nach ihm benannten *Braunschen Röhre* die in Abbildung 30/2 dargestellte Form gegeben.

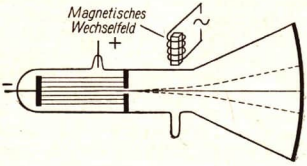


Abb. 30/2. Braunsche Röhre

Der eigentliche Entladungsvorgang geht von der kalten Elektrode aus. Die Anode ist seitlich angebracht, trotzdem treten die Katodenstrahlen senkrecht zur Katode aus und bewegen sich an der Anode vorbei geradlinig weiter.

Durch eine Lochblende mit einem Durchmesser von etwa 1 mm trifft ein Teil der Katodenstrahlen auf den fluoreszierenden Leuchtschirm auf und erzeugt hier einen kreisrunden Fleck. Durch magnetische Einwirkungen von außen her kann der Elektronenstrahl abgelenkt werden. Benutzt man zur Ablenkung einen wechselstromdurchflossenen Elektromagneten, so vollführt der Strahl Schwingungen. Betrachtet man nun diese Schwingungen im Drehspiegel, so sieht man eine zeitlich auseinandergezogene Schwingungskurve.

b) Die Katodenstrahl-Oszillographenröhre. Die Braunsche Röhre hat im Laufe der Jahre wesentliche Verbesserungen erfahren. Sie wurde zu einem äußerst zuverlässigen Beobachtungs- und Meßgerät entwickelt. Die Abbildung **31**/1 gibt einen Längsschnitt durch die Katodenstrahlröhre wieder. Sie besteht im wesentlichen aus:

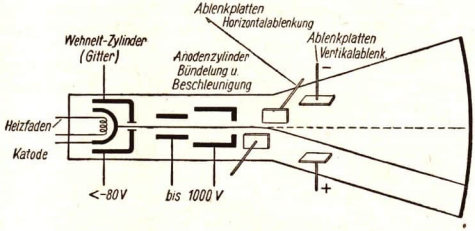


Abb. 31/1

Längsschnitt durch eine Oszillographenröhre

a) der *Glühkatode*,
b) dem *Wehnelt-Zylinder* als Steuergitter,
c) dem *Anodenzylinder* für die Bündelung,
d) den beiden *Ablenkplattenpaaren* und
e) dem *Leuchtschirm* mit einem Durchmesser zwischen 7 cm und 18 cm.

Die Katode besteht aus einem Nickelröhrchen mit einer Heizwendel. Die Stirnseite ist mit einer *Emissionsschicht aus Bariumoxyd* versehen. Fließt durch die Wendel der Heizstrom, so emittiert die Bariumoxydschicht Elektronen. Durch die Anodenspannung von mehreren 1000 V werden die Elektronen stark beschleunigt und fliegen mit großer Geschwindigkeit durch die röhrenförmigen Anodenbleche auf den Leuchtschirm zu.

Vor der Glühkatode liegt der *Wehnelt-Zylinder*. Er wirkt wie eine Steuerelektrode. So wie das Gitter in der Triode den Anodenstrom steuert, kann durch entsprechende Spannungen am Wehnelt-Zylinder der Elektronenstrom beeinflußt werden. Das bedeutet eine Regelung der *Bildhelligkeit*.

Die Anodenbleche sind als Metallröhren ausgebildet. Je nach der an sie angelegten Anodenspannung werden die Elektronen beschleunigt und gebündelt. So wirkt sich die Größe der Anodenspannung auf die *Bildschärfe* aus. Spannungsschwankungen, die man an entsprechende Plattenpaare, ähnlich den Kondensatorplatten, legt, verursachen *die vertikale und die horizontale Ablenkung des Elektronenstrahles*. Diese Ablenkung vollzieht sich fast trägheitslos. Mit Hilfe der Katodenstrahlröhre kann man

Strom- oder Spannungsänderungen von weniger als 10^{-6} s Dauer auf dem Leuchtschirm abbilden. Der Grad der Ablenkung hängt von der angelegten Spannung ab. Abbildungen 32/1a und b zeigen die Ablenkung des Elektronenstrahles bei Anlegen einer Gleichspannung. Legt man eine Wechselspannung an das vertikale Plattenpaar, so ergibt der in schneller Folge vertikal auf- und abschwingende Strahl auf dem Leuchtschirm als Bild einen senkrechten Strich (Abb. 32/1c). Gelingt es, dieses Bild zeitlich auseinanderzuziehen, so entsteht eine Sinuskurve. Das erreicht man durch ein Zusatzgerät, das sogenannte *Kippgerät*; es erzeugt die entsprechenden Spannungen für die horizontale Ablenkung (Abb. 32/1d).

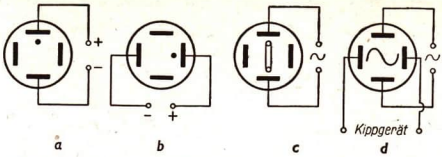


Abb. 32/1. Ablenkung des Elektronenstrahls a) bei Gleichspannung an den Platten für die Vertikalablenkung b) bei Gleichspannung an den Platten für die Horizontalablenkung c) bei Wechselspannung an den Vertikalplatten d) Eine Wechselspannung wird mit Hilfe des Kippgerätes als Kurve abgebildet

Eine Katodenstrahlröhre wird in veränderter Konstruktion auch in jedem Fernsehempfänger angewendet. Technische Probleme beim Fernsehen werden im Abschnitt „Das Fernsehen" behandelt.

3. Der Fotoeffekt (lichtelektrischer Effekt)

1. Der äußere lichtelektrische Effekt. a) Die Entdeckung des lichtelektrischen Effektes. Die Mechanisierung der sozialistischen Produktion schreitet immer weiter voran. In vielen Betrieben werden bereits Fertigteile *automatisch gezählt und sortiert*. Auch auf dem Gebiete des Arbeitsschutzes wendet man schon *automatische Sicherungsvorrichtungen* an. Eine Stanzmaschine wird beispielsweise sofort blockiert, wenn der Stanzer seine Hände in die Gefahrenzone hält. Die genannten Einrichtungen konnten auf Grund einer Entdeckung des großen Physikers *Heinrich Hertz* entwickelt werden.

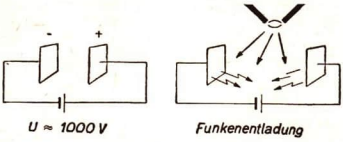


Abb. 32/2. Versuch von Hertz (schematisch)

Heinrich Hertz beobachtete 1887, daß eine Funkenentladung zwischen zwei Metallelektroden bereits bei einer viel kleineren elektrischen Spannung einsetzt, wenn man die Elektroden mit einer Lichtbogenlampe bestrahlt (Abb. 32/2). Diese Wirkung, die man allgemein als *Fotoeffekt* bezeichnet, verursacht ein unsichtbarer Bestandteil des Lichtes, das *ultraviolette Licht*.

b) Der Hallwachseffekt. Der Physiker *Hallwachs* beobachtete 1888, an die Entdeckung *Hertz'* anknüpfend, eine merkwürdige Erscheinung: Bestrahlte er eine negativ aufgeladene Zinkplatte mit Licht, das ultraviolette Strahlen enthält, bei-

spielsweise mit Licht einer Lichtbogenlampe, so ging die Aufladung sofort auf Null zurück (Abb. 33/1a). Als Meßinstrument benutzte er ein Elektroskop. Bei einer positiv aufgeladenen Zinkplatte blieb der Ausschlag erhalten (Abb. 33/1b).

Negativ geladene Körper werden durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht entladen.

c) Das Stoletowsche Prinzip. Im Jahre 1887 hatte der Moskauer Physiker *Stoletow* eine entscheidende Entdeckung gemacht: Er ließ intensive Lichtbündel auf eine im evakuierten Glaskolben befindliche Zinkplatte fallen (Abb. 33/2). Mit ihr war der negative Pol einer Spannungsquelle verbunden. Im gleichen Glaskörper stand dieser Zinkelektrode eine zweite Platte gegenüber, die mit dem positiven Pol der Spannungsquelle verbunden war. Mit einem empfindlichen Galvanometer wies *Stoletow* einen Elektronenstrom nach. Das Licht löst also aus dem Metall Elektronen heraus, die sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zur Anode bewegen.

Diesen Vorgang bezeichnet man als *Fotoemission*. Den entstehenden Strom nennt man *Fotostrom*. Als Ergebnis weiterer experimenteller Forschungen faßte *Stoletow* grundlegende Gesetze der Fotoemission im *Stoletowschen Prinzip* zusammen:

Die Zahl der Elektronen, die bei Belichtung des Metalls je Sekunde aus ihm herausfliegen, ist proportional der Intensität des auf das Metall fallenden Lichtes. Dabei geben Alkalimetalle, wie Na, K, Cs, bei Belichtung einen bedeutend größeren Fotostrom als alle anderen Metalle.

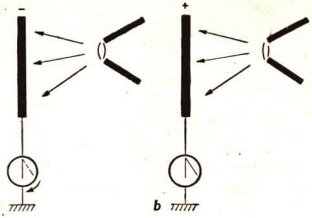
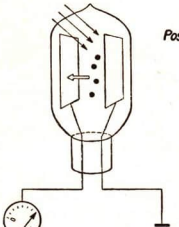


Abb. 33/1
Versuch von Hallwachs (schematisch)
a) negativ geladene Platte
b) positiv geladene Platte



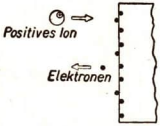


Abb. 33/3
Ablösung von Elektronen durch beschleunigte positive Ionen

Abb. 33/2
Versuch von Stoletow (schematisch)

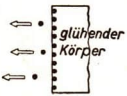


Abb. 33/4
Glühemission

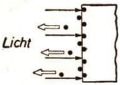


Abb. 33/5
Fotoemission

Nach diesen Erkenntnissen über die Fotoemission kennt man folgende Möglichkeiten, Elektronen aus einem Metall herauszulösen:

1. Stark *beschleunigte positive Ionen* schlagen beim Aufprallen auf ein Metall Elektronen aus ihm heraus (Abb. 33/3).
2. *Glühende Körper* emittieren Elektronen (Glühemission, Abb. 33/4).
3. *Licht* löst unter gewissen Bedingungen Elektronen aus bestimmten Metallen heraus (Fotoemission, Abb. 33/5).

Die Fotoemission stellt eine Wirkung des Lichtes auf bestimmte Metalle dar: Die Elektronen verlassen das Metall. Da die Wirkung nach außen gerichtet ist, bezeichnet man diese Erscheinung der Fotoemission als *äußeren lichtelektrischen Effekt.*

2. Die Alkali-Fotozelle. a) Aufbau und Wirkungsweise. Die Erkenntnisse über die Fotoemission ergaben die Möglichkeit, ein Gerät zu bauen, das auf ein Lichtsignal mit einem Stromstoß reagiert. Ein solches Gerät kann als *Lichtrelais* vielseitig verwendet werden. Als Kernstück dieser Geräte hat man die sogenannte *Alkali-Fotozelle* entwickelt (Abb. **34**/1). Ein Teil der Innenseite des Glaskolbens enthält eine Schicht Natrium, Kalium, Rubidium oder Caesium. Damit die Alkalimetalle nicht oxydieren, ist der Glaskolben hoch evakuiert oder mit einem Edelgas gefüllt. Die Alkalischicht hat eine leitende Verbindung zum Sockel des Glasrohres. Der Schicht gegenüber befindet sich eine Drahtschleife oder ein Drahtnetz, die Anode, die ebenfalls leitend mit dem Sockel verbunden ist.

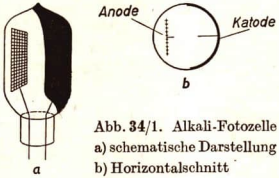


Abb. **34**/1. Alkali-Fotozelle
a) schematische Darstellung
b) Horizontalschnitt

Treffen Lichtstrahlen auf die Alkalischicht, so treten Elektronen, auch *Fotoelektronen* genannt, aus der Katode heraus. Werden die Elektronen nicht abgeleitet, so bildet sich eine Raumladung an der Katode aus, verstärkt sich und läßt schließlich keine Elektronen weiter austreten. Schließt man aber von der Anode über eine Anodenbatterie zur Katode den Stromkreis, so können die Fotoelektronen abfließen. *Solange die Zelle belichtet wird, werden ständig weitere Elektronen emittiert, und es fließt ein elektrischer Strom, der Fotostrom.* Die Fotozelle bewirkt also eine *Umwandlung von Lichtenergie* in Bewegungsenergie der ausgelösten Elektronen, das heißt *in elektrische Energie.*

b) Schaltung und Arbeitsweise. Die Abbildung **34**/2 zeigt die Schaltzeichen für die Fotozelle. Die lichtempfindliche Alkalischicht wird an den negativen Pol einer Spannungsquelle von 50 V bis 100 V gelegt (Abb. **34**/3). Dazwischen liegen ein

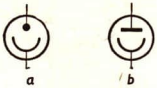


Abb. **34**/2. Schaltzeichen einer Fotozelle
oben Anode, unten Katode
a) früher verwendetes Schaltzeichen
b) Normschaltzeichen

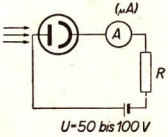


Abb. **34**/3. Schaltung einer Fotozelle

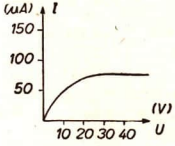


Abb. **34**/4. Stromstärke-Spannungs-Diagramm einer Hochvakuumzelle

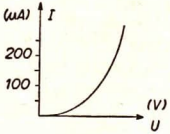


Abb. **34**/5. Stromstärke-Spannungs-Diagramm einer gasgefüllten Fotozelle

hochempfindliches Galvanometer sowie ein Sicherheitswiderstand mit 20 kΩ bis 50 kΩ. Letzterer soll zu hohe Stromstärken verhindern. Der positive Pol der Stromquelle ist mit der Anode der Fotozelle verbunden. Der bei Lichteinstrahlung entstehende Fotostrom wird mit dem Galvanometer gemessen. Bei *Hochvakuumzellen* tritt von etwa 20 V an ein Sättigungsstrom auf, der auch bei höheren Anodenspannungen nicht mehr gesteigert werden kann (Abb. 34/4). Bei *Zellen mit Edelgasfüllung* wächst der Fotostrom ständig mit Erhöhung der Lichtintensität (Abb. 34/5). Schließlich würde in der gasgefüllten Zelle die Stoßionisation und damit eine Glimmentladung eintreten. Damit dies nicht geschieht, ist ein Strombegrenzungswiderstand erforderlich. Es kann somit nur ein geringer Fotostrom auftreten, und eine Zerstörung der Zelle durch Glimmentladung ist nicht möglich.

Die durch Belichtung hervorgerufenen Fotoströme betragen oft nur einige 10 μA (Abb. 35/1a). Zur Verstärkung dieses Elektronenstromes benutzt man häufig Elektronenröhren (Abb. 35/1b).

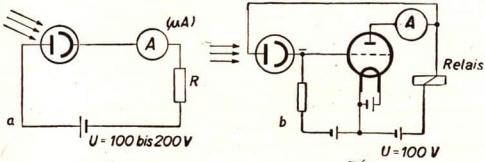


Abb. 35/1
Schaltung zur Messung eines Fotostromes
a) ohne Verstärkung
b) mit Triode und Relais

c) Anwendungen der Fotozelle — Die Lichtschranke. Abbildung 35/2 zeigt eine *Lichtschranke*. Der Lichtstrahl einer Lichtquelle fällt auf eine Fotozelle. Auf einem Transportband vorbeigeführte Werkstücke unterbrechen den Lichtstrahl, so daß auch der Fotostrom unterbrochen wird. *Jede Unterbrechung wird von einem Zählwerk registriert.* Dadurch kann die Stückzahl der vorbeigeführten Werkstücke festgestellt werden. Abbildung 35/3 zeigt die Schaltung einer Lichtschrankenanlage mit

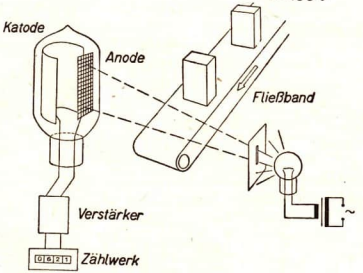


Abb. 35/2. Lichtschranke zur Zählung von Werkstücken

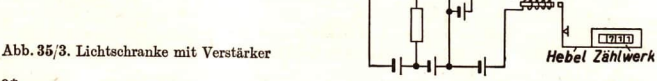


Abb. 35/3. Lichtschranke mit Verstärker

einer Verstärkerröhre. Da die Fotozelle auch auf die unsichtbaren Bestandteile des Lichtes reagiert, also auf ultraviolettes und infrarotes Licht, kann man *unauffällige Lichtschranken* bauen. So kann z. B. ein unsichtbarer Lichtstrahl zwischen den Pfosten einer Tür den Eingang sichern. Schreitet jemand durch die Tür, so wird der Strahl unterbrochen. Damit aber wird auch der Stromkreis unterbrochen, was zur Auslösung einer Alarmanlage führt. Abbildung **36**/1 zeigt eine entsprechende Schaltung. Lichtschrankenanlagen werden auch als Schutz für Banken, Werkanlagen, Warenlager, Garagen, militärische Anlagen usw. verwendet.

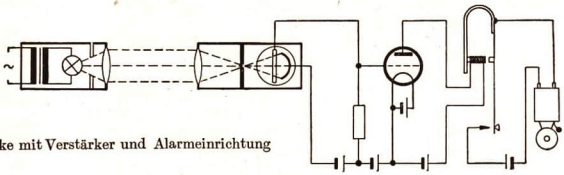


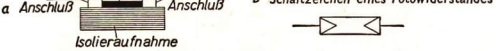
Abb. **36**/1
Lichtschranke mit Verstärker und Alarmeinrichtung

Mit ähnlichen Anlagen können *Rolltreppen* in Bewegung gesetzt und nach einer gewissen Zeit wieder ausgeschaltet werden. Ferner dienen derartige Anlagen auch zur automatischen Öffnung von Türen und zum Abschalten von Maschinen, wenn der Mensch die Unfallschutzbestimmungen nicht beachtet.

In Warmwalzwerken kann das von glühenden Blechen oder Blöcken ausgestrahlte Licht über Fotozellen *bestimmte Betriebsanlagen steuern*. Fotozellen lassen sich weiterhin verwenden zum Sortieren von Gegenständen nach Größe und Farbe, zur Überwachung von Behälterinhalten, bei der Tonwiedergabe des Tonfilmes, bei der Bildtelegrafie sowie beim Fernsehen. Ein breites Anwendungsgebiet ist in der *Steuerungs-* und *Regelungstechnik* gegeben. Wärmestrahlen wirken wie unsichtbare Lichtstrahlen. Mit Hilfe von Fotozellen kann man deshalb zum Beispiel einen im dunklen Zimmer stehenden, geheizten Kachelofen über Bildwandler (ähnlich den Fernsehgeräten) sichtbar machen. In der gleichen Weise kann man alle heißen Maschinenteile abbilden. Um den Flugort von Raketen zu bestimmen, fängt man deren Wärmestrahlung mit Hohlspiegeln ein. Mit Hilfe einer Fotozelle kann man die richtige Peilrichtung feststellen.

3. Der innere lichtelektrische Effekt. a) Der Fotowiderstand. Neben dem äußeren lichtelektrischen Effekt gibt es bei einigen sehr schlecht leitenden Kristallen den sogenannten *inneren lichtelektrischen Effekt*, den *Hittorff* 1852 nachgewiesen hat.

Abb. **36**/2
Fotowiderstand
a) Aufbau
b) Schaltzeichen



Trifft Licht auf diese Kristalle, so zeigen sie eine bessere Leitfähigkeit als vorher. *Der elektrische Widerstand dieser Kristalle wird also bei Belichtung geringer.*

Diese Lichtempfindlichkeit der Kristalle ist im allgemeinen sehr gering. Man hat daher Bauelemente aus besonders geeigneten Stoffen geschaffen, die man *Fotowiderstände* oder *Fotodioden* nennt. Sie werden aus Kadmiumsulfid, Selen, Kupfer(I)-oxyd, Zinksulfid, Germanium und Silizium hergestellt (Abb. 36/2). Die Fotowiderstände werden zur Messung von Lichterscheinungen benutzt. Man schaltet sie nach Maßgabe ihrer technischen Daten in einen Stromkreis. Es werden hierbei Spannungen von 30 V bis 100 V benutzt. Im Dunkeln stellt der Fotowiderstand einen guten Isolator dar, er unterbricht praktisch den Stromkreis. Bei Lichteinwirkung wird er leitend, so daß unter den genannten Spannungen Ströme bis zu 0,5 mA fließen. Diese schwachen Ströme werden meistens noch durch Elektronenröhren verstärkt und dann Meßgeräten zugeführt.

b) Das Fotoelement. Wer einen *elektrischen Belichtungsmesser* benutzt, stellt fest, daß bei Lichteinfall das Meßwerk einen bestimmten Wert anzeigt. Intensivere Lichteinstrahlung läßt den Zeigerausschlag größer werden. Da es sich bei dem Meßwerk um ein elektrisches Meßinstrument handelt, aber keine Batterie als Spannungsquelle in dem Belichtungsmesser vorhanden ist, kann der elektrische Strom nur durch die Einwirkung des Lichtes auf bestimmte Bauteile des Belichtungsmessers erzeugt worden sein.

Tatsächlich kann Licht nicht nur den Widerstand bestimmter Stoffe ändern, sondern auch in gewissen Anordnungen elektrische Spannungen hervorrufen. Diese Spannungen können bis zu 1 V betragen. Die in dieser Weise arbeitenden Bauteile des Belichtungsmessers heißen *Fotoelemente*. Die technische Ausführung und das Schaltzeichen eines solchen Fotoelementes zeigt Abbildung 37/1. Eine Kupferplatte ist an ihrer Oberfläche oxydiert. Das Kupfer(I)-oxyd (Cu_2O) wird mit einer Kupferhaut überzogen. Diese ist so dünn aufgedampft, daß sie lichtdurchlässig ist. Ein Metallring dient als Kontaktgeber. Die Lichteinwirkung läßt Elektronen aus dem Kupfer(I)-oxyd in die Kupferhaut treten. Es entsteht ein Elektronenüberschuß in der Kupferhaut. Dadurch besteht eine Spannung zwischen der Cu_2O-Schicht und der Kupferhaut. Dieses lichtelektrische Element kann einen Strom hervorrufen. Die Größe der Spannung ist von der Lichtintensität abhängig. Daher hat man in der Spannung und der von ihr abhängigen Stromstärke Maße für die Beleuchtungsstärke. Abbildung 37/2 zeigt die Abhängigkeit der Fotospannung eines Fotoelementes von der Lichtintensität.

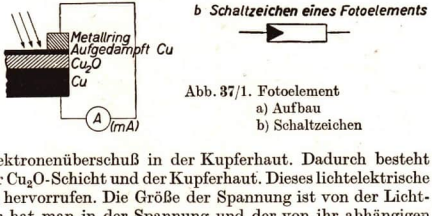


Abb. 37/1. Fotoelement
a) Aufbau
b) Schaltzeichen

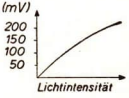


Abb. 37/2
Abhängigkeit der Fotospannung von der Lichtintensität

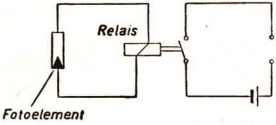


Abb. 37/3. Schaltung eines Fotoelementes in einem Relaiskreis

Eine andere Ausführung eines Fotoelements ist das *Selenelement*. Es

hat als Unterlage eine Eisenplatte. Darauf befindet sich Selen, das mit einer Schicht von einigen noch lichtdurchlässigen Atomlagen Blei überzogen ist.

Bei elektrischen Belichtungsmessern wird der durch die Belichtung entstehende Fotostrom direkt mit einem empfindlichen Drehspulinstrument gemessen. Der Strom, den Fotoelemente abgeben, genügt, um empfindliche Relais zu betätigen (Abb. 37/3). Elektronische Verstärker können dadurch entfallen.

Mit Hilfe von Fotoelementen kann man bei großzügigem Ausbau der Anlage abgelegene Einrichtungen mit Energie versorgen. Bekannt wurden Fotoelemente auch als *Sonnenbatterie in den sowjetischen Sputniks*. Sie übernehmen die gesamte Stromversorgung der Geräte und sind fast unbegrenzt einsatzbereit.

Wenn diese Fotoströme Rundfunkempfänger-Transistoren zugeleitet werden, dann kann man mit einigen Elementen unabhängig von Hilfsspannungen das Rundfunkgerät in Betrieb nehmen. Fotoelemente und Fotowiderstände sind unempfindlich, da sie nicht wie die Fotozelle in einen Glaskolben eingebracht zu werden brauchen.

Die weitere Mechanisierung und Automatisierung unserer sozialistischen Produktion erfordert in vielfältiger Weise den Einsatz von Fotozellen, Fotowiderständen sowie Fotoelementen.

4. Fragen und Aufgaben:

1. a) Woher stammen die Elektronen, die in der Schaltung nach Abbildung 38/1 aus der Fotozellenkatode austreten? Welcher Zustand zeigt sich am Gitter der Triode?
   b) Warum nennt man diese Schaltungsmöglichkeit Hellschaltung?
   c) Wie arbeitet das Relais bei Belichtung der Fotozelle?

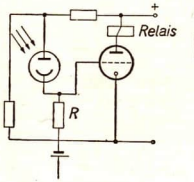


Abb. 38/1

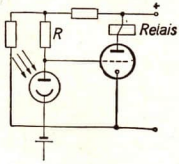


Abb. 38/2

2. a) Woher erhält die Fotozellenkatode die Elektronen, und welcher Zustand zeigt sich am Gitter der Triode (Abb. 38/2)?
   b) Warum nennt man diese Schaltungsmöglichkeit Dunkelschaltung?
   c) Wie arbeitet das Relais bei Belichtung der Fotozelle?
   Was würde geschehen, wenn *R* einen sehr geringen Widerstandswert hat?

4. Leitung in Metallen

1. Leitungselektronen. Durch umfassende Forschungen wurde nachgewiesen, daß die Leitfähigkeit der Metalle an Elektronen gebunden ist. Lange Zeit hindurch konnte man sich die Leitungsvorgänge nicht erklären, bis die Physiker *Riecke* (1845 bis 1915) und *von Drude* (1863 bis 1906) eine *Elektronentheorie* aufstellten. Aus den Ergebnissen der Forschung ist eine Modellvorstellung von den Leitungsvorgängen in Metallen entwickelt worden. *Das kristalline Gefüge der Metalle besteht aus Ionen.* Diese werden durch wechselseitige Einwirkung ihrer elektrischen Felder nahezu an einem Ort festgehalten, so daß sie ein räumliches Gitter bilden. Sie führen lediglich *Wärmeschwingungen um ihre Ruhelage* aus. Diese Schwingungen nehmen mit steigender Temperatur zu. In einem solchen Metallionengitter sind die äußeren Hüllenelektronen

zum großen Teil von den Atomrümpfen gelöst. Sie führen als *freie Elektronen* eigene Wärmebewegungen in allen Richtungen aus, ähnlich wie die Moleküle eines Gases. Legt man einen metallischen Leiter zwischen die Pole einer Spannungsquelle, so bewegen sich die freien Elektronen durch Einwirkung des elektrischen Feldes der Spannungsquelle durch das Ionengitter vom Minus- zum Pluspol hin. *Es fließt ein elektrischer Strom.*

Schließt man durch einen Schalter einen Stromkreis mit einer Glühlampe, so scheint diese sofort aufzuleuchten. Genaue Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß sich ein elektrisches Feld in einem metallischen Leiter nahezu mit der Lichtgeschwindigkeit von etwa 300 000 km $\cdot$ s^{-1} ausbreitet.

Während sich so der Anstoß für die Bewegung der Elektronen mit einer außerordentlich hohen Geschwindigkeit ausbreitet, bewegen sich die einzelnen Elektronen selbst verhältnismäßig langsam. Ihre Geschwindigkeit liegt in der Größenordnung von 1 mm $\cdot$ s^{-1}. Es ist bekannt, daß die Elektronengeschwindigkeit im Vakuum, etwa in einer Katodenstrahlröhre, viel größer ist und bei hohen Spannungen der Lichtgeschwindigkeit nahe kommt. Die geringe Geschwindigkeit der Elektronen in einem metallischen Leiter ist dadurch zu erklären, daß die schwingenden Ionen des Kristallgitters hemmende Hindernisse für die Elektronenbewegung darstellen. Da die Ionen bei höherer Temperatur schneller schwingen, werden die Elektronen mehr behindert. So wächst der Widerstand eines metallischen Leiters mit zunehmender Temperatur. Der *spezifische Widerstand* verschiedener Metalle erklärt sich aus *der unterschiedlichen Zahl der freien Elektronen in den Metallen.*

2. Nachweis von Leitungselektronen. Wenn es auch sehr wahrscheinlich war, daß Elektronen als wandernde negative Ladungen auftreten, so mußte man diese jedoch erst nachweisen. Der Physiker *Tolman* (geb. 1881) ging von folgender Überlegung aus.

Ein fahrender Eisenbahnzug enthält rollende Güter. Wird er plötzlich abgebremst, so behält nach dem Trägheitsgesetz das rollende Gut die Geschwindigkeit und auch die Bewegung bei. Befinden sich im Metall Elektronen, die als Leitungselektronen frei beweglich sind, so müssen sie in einem schnell bewegten und dann plötzlich stark abgebremsten Leiter einen Spannungsstoß hervorbringen. *Tolman* setzte einen etwa 10 km langen Draht, der als Spule gewickelt war, in sehr schnelle Umdrehungen, bremste die Spule plötzlich ab und konnte mit einem langsam schwingenden Galvanometer den erwarteten Spannungsstoß messen (Abb. 39/1). Die gemessenen Werte stimmten fast mit den errechneten überein. Der Ausschlag des Galvanometers nach Bremsung der Spule war der Beweis, daß die mitbewegten Elektronen infolge ihrer Trägheit ihre Geschwindigkeit zunächst noch beibehielten und als Elektronenfluß wirkten. In einem Metall sind also wirklich frei bewegliche Elektronen vorhanden. Da im Metall ein Gleichgewichtszustand zwischen negativen und positiven Ladungen herrscht, muß *neben den Elektronen eine gleiche Anzahl von positiven Ladungsträgern vorhanden sein.* Wenn also jedes Metallatom ein Leitungselektron abgibt, so werden die Metallatome zu *positiven Ionen*, die raumgitterartig angeordnet sind. An diesem Versuch wird es besonders deutlich, wie es Wissenschaftlern

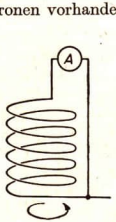


Abb. 39/1. Versuch von Tolman zum Nachweis von Leitungselektronen

und Forschern möglich ist, durch sinnvoll erdachte Versuchsanordnungen den Aufbau der Materie und Vorgänge im Bereich der Atome zu erkennen, obwohl diese Dinge durch unsere Sinnesorgane nicht unmittelbar wahrnehmbar sind.

Ein metallischer Leiter besteht aus einem Gitter positiver Ionen. In ihm befinden sich frei bewegliche Elektronen, die Leitungselektronen. Die freien Elektronen bewegen sich infolge des Einflusses eines elektrischen Feldes. Der elektrische Strom in einem Metall ist eine Elektronenbewegung. Die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle ist durch die große Zahl freier Elektronen bedingt.

5. Leitung in Halbleitern

1. Halbleiterwerkstoffe. Seit einigen Jahren werden in der Rundfunktechnik und auch auf anderen Gebieten der Schwachstromtechnik in zunehmendem Maße *Halbleiterbauelemente* an Stelle von Elektronenröhren eingesetzt. Durch die Entdeckung und Erforschung der besonderen Leitungseigenschaften der Halbleiter wurde die Entwicklung dieser neuartigen Bauelemente möglich.

Halbleiter sind Werkstoffe, die weit weniger freie Elektronen enthalten als metallische Leiter. Sie haben also einen hohen spezifischen Widerstand. Die typische Halbleitereigenschaft besteht aber darin, daß durch eine Energiezufuhr, durch Erwärmung oder Bestrahlung mit Licht, UV- oder Röntgenstrahlen, *die Zahl der freien Elektronen vergrößert werden kann.* Mit höherer Temperatur nimmt der spezifische Widerstand der Halbleiter, im Gegensatz zu den meisten anderen Leitern, daher ab. Zu den Halbleitern gehören viele Schwermetalloxyde und -sulfide, Graphit, Silizium, Bor und Germanium.

Die Vorgänge in Halbleitern sollen zunächst am Beispiel des Germaniums untersucht werden, da dieser Halbleiter gegenwärtig im Mittelpunkt der Forschung und Anwendung steht. Das Germaniumatom ist vierwertig, da sich auf der äußersten Schale vier *Valenzelektronen* befinden (Abb. 40/1). Im Kristallgitter bindet jedes Atom mit seinen vier Valenzelektronen vier weitere Germaniumatome; dadurch hält der Kristall als Ganzes fest zusammen.

Im Kristallgefüge der Halbleiter bilden die Valenzelektronen sogenannte *Elektronenpaare,* indem jedes Valenzelektron eines Atoms mit einem gleichartigen Elektron eines Nachbaratoms ein Paar bildet (Abb. 40/2). Abbildung 41/1 zeigt einen völlig gleichmäßigen störungsfreien Aufbau des Kristallgitters des Germaniums. Die Valenzelektronen sind gegenseitig gebunden. Leitungselektronen sind nicht vorhanden, es liegt ein Isolator vor. Diesen Idealzustand gibt es aber praktisch nicht. Schon bei

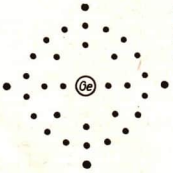


Abb. 40/1
Aufbau des Germaniumatoms (schematisch)

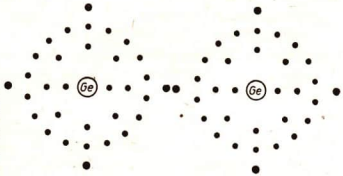


Abb. 40/2
Bildung von Elektronenpaaren bei Germanium (schematisch)

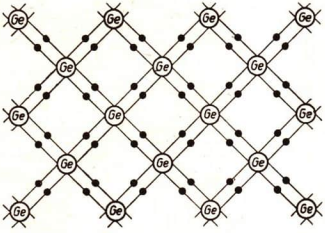


Abb. **41**/1. Störungsfreier Aufbau des Germanium-Kristallgitters

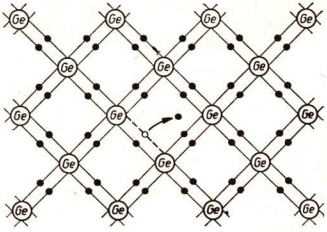


Abb. **41**/2. Infolge Erwärmung kann ein Elektron seinen Platz verlassen. Es entsteht ein positives Loch.

Zimmertemperatur ist er gestört. Die Wärmeschwingungen im Ionengitter sind so groß, daß einige Elektronen bereits bei Zimmertemperatur ihren Platz verlassen. Überall dort, wo ein Elektron wegwandert, entsteht eine *Fehlstelle*. Diese bezeichnet man als *positives Loch* (Abb. **41**/2). In einem Germaniumkristall, der nur aus Germaniumatomen besteht, ist also die Anzahl der Elektronen gleich der Anzahl von Fehlstellen. Legt man an die Enden eines reinen Germaniumstücks eine Spannung, so setzt eine Wanderung der Elektronen zum positiven Pol der Spannungsquelle ein (Abb. **41**/3). Neben dieser Elektronenleitung besteht noch ein zweiter Leitungsvorgang. Die Löcher verlagern sich in Richtung auf den Minuspol, da die Elektronen ihre Doppelbindung verlassen und in das Loch im Nachbaratom eintreten. Zur Vereinfachung der Betrachtungen ist es üblich, diesen Vorgang so aufzufassen, als ob *die Löcher als selbständige positive Ladungsträger vom Plus- zum Minuspol wanderten* (Abb. **41**/4).

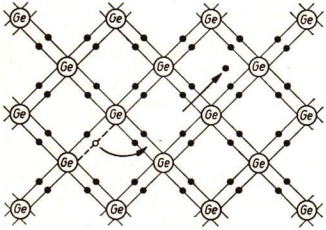


Abb. **41**/3. Wird eine Fehlstelle, ein positives Loch, besetzt, so verschiebt sich auch die Fehlstelle.

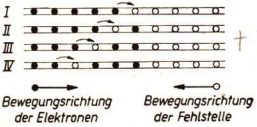


Abb. **41**/4. Die Bewegungsrichtung der Fehlstellen ist der Bewegungsrichtung der Elektronen entgegengesetzt.

Die Elektronenleitung nennt man wegen der negativen Ladung der Elektronen n-Leitung. Bei der Fehlstellenleitung, auch Löcherleitung genannt, spricht man von p-Leitung. Die Leitung im reinen Germanium bezeichnet man als Eigenleitung.

2. Leitungsvorgänge im Germanium mit eingelagerten Fremdatomen. Reines Germanium wird auch leitend, wenn auf etwa 10^7 Germaniumatome ein *Fremdatom* eingelagert wird. Es können beispielsweise Fremdatome zugeführt werden, die fünf Valenzelektronen besitzen, wie Arsen oder Antimon. Ersetzt man ein Ge-Atom durch ein Antimonatom (Sb), so finden die fünf Valenzelektronen des Antimons nur vier Elektronen für eine Elektronenpaarbildung vor, das fünfte Elektron ist frei und steht als Leitungselektron zur Verfügung (Abb. 42/1).

Durch Einfügen von Antimon wird die n-Leitfähigkeit des Germaniums vergrößert. Man spricht von einer Überschußleitung und nennt derartiges Germanium n-leitend.

Ersetzt man andererseits in reinem Germanium Ge-Atome durch dreiwertige Fremdatome, z. B. Indium, Gallium, Aluminium, so werden bei jedem Fremdatom nur die drei Valenzelektronen gebunden. Es tritt eine Fehlstelle, ein positives Loch, auf. Abbildung 42/2 zeigt

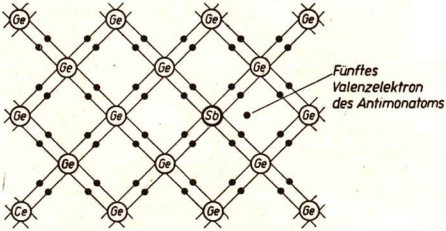
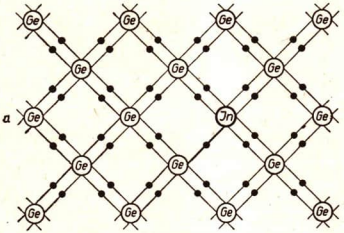
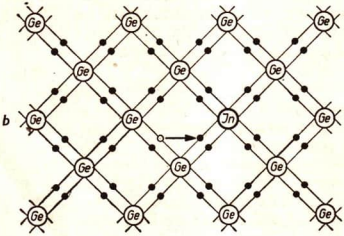


Abb. 42/1
Antimonatom im Germaniumkristall (schematisch)





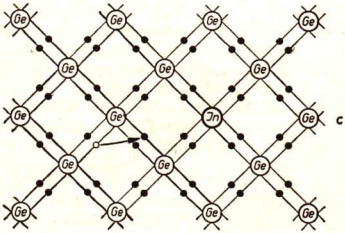


Abb. 42/2
Indiumatom im Germaniumkristall
a) ohne Fehlstelle und positives Loch
b) es entsteht eine Fehlstelle
c) die Fehlstelle wird besetzt, es entsteht an einer anderen Stelle ein positives Loch

den Einbau eines Indiumatomes (In) in reines Germanium und die sich daraus ergebende Elektronenbewegung.

Durch Einfügen von Indiumatomen wird die p-Leitfähigkeit des Germaniums vergrößert. Dieses Germanium nennt man p-leitend.

Legt man an n- oder p-leitendes Germanium eine Spannung, so fließt ein elektrischer Strom. Er besteht im n-leitenden Germanium in einer Wanderung freier Elektronen, im p-leitenden Germanium in einer Wanderung der positiven Löcher, die wie bei der p-Eigenleitung vor sich geht. Die Eigenleitung des Germaniums tritt in beiden Fällen daneben auf, ist aber von untergeordneter Bedeutung.

6. Anwendung der Halbleiter als Gleichrichter

1. Leitungsmechanismus und Aufbau einer Germanium-Diode. Mit Hilfe von Halbleitern kann man wie mit Röhrendioden Wechselstrom gleichrichten. Fügt man n-leitendes Germanium (Abb. 43/1) und p-leitendes Germanium (Abb. 43/2) zusammen, so bildet sich an der Berührungsfläche eine *Grenzschicht, in der es zu einem engbegrenzten Austausch der entgegengesetzten Ladungen kommt.* Diese Anordnung bezeichnet man als *Germaniumflächendiode* (Abb. 43/3). So entsteht eine sehr dünne ladungsträgerfreie Schicht. Legt man eine Spannung an die Enden der Diode, so tritt ein Ladungstransport ein (Abb. 43/4). Je nachdem, welcher Pol am n-Gebiet der Diode liegt, unterscheidet man zwei Vorgänge.

Abb. 43/1. Germanium mit Elektronenüberschuß

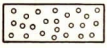


Abb. 43/2. Germanium mit Fehlstellenüberschuß

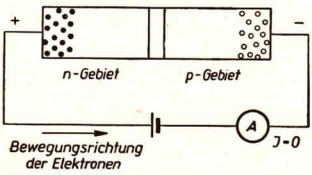


Abb. 43/4. Stromkreis mit Germaniumdiode (Sperrwirkung)

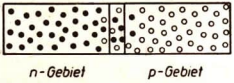


Abb. 43/3. Bildung der Grenzschicht

a) Sperrichtung einer Diode. Legt man den positiven Pol an das n-leitende Gebiet, so werden die Elektronen aus dem n-Gebiet angezogen, man sagt auch, sie werden infolge des Elektronenmangels der Spannungsquelle angesaugt. Da im p-Gebiet hauptsächlich Fehlstellen vorhanden sind, können keine Elektronen in das n-Gebiet nachgefördert werden.

In das *p*-Gebiet dringen bei derselben Schaltung vom Minuspol der Spannungsquelle Elektronen ein. Sie besetzen die Fehlstellen. Man kann das auch so auffassen, als ob die Fehlstellen vom Minuspol angezogen werden. So wird die ladungsträgerfreie Schicht verbreitert. Durch diese Vorgänge ist praktisch die Leitfähigkeit aufgehoben, da das Germanium in der Grenzschicht kaum Störstellen besitzt, also praktisch zum Nichtleiter wird. Man sagt, *die Diode ist in Sperrichtung gepolt.*

b) Durchlaßrichtung einer Diode. Legt man den Pluspol der Spannungsquelle an das p-Gebiet der Diode, so werden die Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet

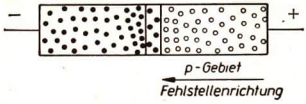


Abb. 44/1
Durchlaßrichtung einer Germaniumdiode

herübergezogen (Abb. 44/1). Sie treten in die Fehlstellen ein und bewegen sich von Fehlstelle zu Fehlstelle weiter. Dadurch tritt eine dauernde Verlagerung der Fehlstellen in Richtung auf den Minuspol ein. Auch hier kann man die Fehlstellen als selbständige positive Ladungsträger auffassen, die vom Pluspol in das n-leitende Gebiet hineingezogen werden. Bei dieser Polung der Diode wird die Grenzschicht von Ladungsträgern überflutet, und es fließt dauernd ein elektrischer Strom. *Die Diode ist in Durchlaßrichtung gepolt.*

2. Anwendung der Germanium-Diode als Gleichrichter. Zum Gleichrichten von Wechselströmen kann bei Beachtung der Belastbarkeit die Germaniumdiode verwendet werden. Der *VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder* stellt diese Gleichrichter zur Zeit in zwei verschiedenen Bauarten her.

Die erste Bauart umfaßt *Gleichrichter für Ströme bis* 100 mA (Abb. 44/2). Sie besitzen axiale Lötanschlüsse und können freitragend montiert werden. Diese Dioden haben eine Masse von etwa 1 g, einen Durchmesser von etwa 5 mm und eine Länge von etwa 12 mm.

In der zweiten Bauart werden Germaniumdioden als *Flächengleichrichter für eine höhere Belastung bis* 1 A hergestellt. Diese Gleichrichter werden meist auf Chassisblechen montiert. Dadurch wird eine große Kühlfläche geschaffen. Der Einschaltstrom kann bis 6 A betragen. Die Umgebungstemperatur soll 50° C nicht übersteigen. Die Anschlüsse sind an der Diode durch das Schaltzeichen besonders gekennzeichnet (Abb. 44/3). Neben den Germaniumflächendioden gibt es noch in Kleinstausführung *Punktkontaktdioden*, die besonders zur Gleichrichtung von hochfrequenten Wechselströmen in der Rundfunktechnik verwendet werden. In Abbildung 44/4 wird das Schaltbild für einen allereinfachsten Rundfunkapparat gegeben.

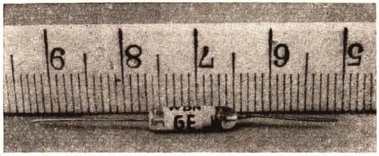


Abb. 44/2. Germaniumdiode

Abb. 44/3
Schaltzeichen für Gleichrichter

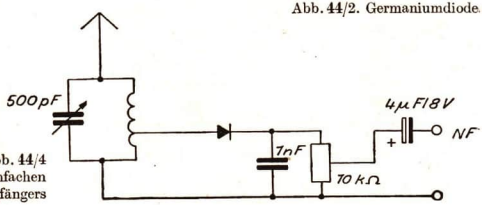


Abb. 44/4
Schaltbild eines einfachen Rundfunkempfängers

7. Die Selen-Flächengleichrichter

1. Aufbau und Wirkungsweise. Außer Germaniumdioden verwendet man zum Gleichrichten von Wechselstrom vielfach auch *Selen-Flächengleichrichter* (Abb. 45/1 und 46/1).

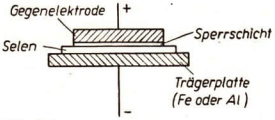
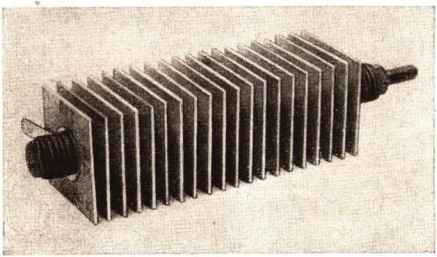


Abb. 45/1
Aufbau eines Selen-Flächengleichrichters

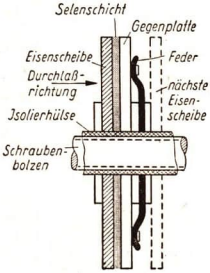
Auf einer Trägerplatte aus Eisen oder Aluminium ist Selen aufgebracht. Auf der Selenschicht liegt eine *Gegenelektrode* aus Zinn mit Kadmiumzusatz. Die Sperrschicht wird zwischen dem Selen und der Gegenelektrode gebildet. *Der positive Pol liegt stets an der Gegenelektrode.* Es wird hier an der Berührungsfläche zweier Leiter die Tatsache ausgenutzt, daß bei Anlegen einer entsprechenden Spannung mehr Elektronen in der einen Richtung übertreten als in der anderen. Die Elektronen haben also in der einen Richtung nur einen sehr geringen elektrischen Widerstand zu überwinden, in der anderen Richtung ist der Widerstand 4000- bis 8000mal so groß. *So ist der Strom für diese Richtung praktisch gesperrt.*

2. Die Belastbarkeit und die Verwendung von Trockengleichrichtern. An einer Trockengleichrichterzelle darf nur eine bestimmte Höchstspannung liegen, die man *Sperrspannung* nennt. Die Sperrspannung ist die effektive Wechselspannung, mit der eine Platte des Gleichrichters dauernd belastet werden kann. Wird die Sperrspannung überschritten, so kommt es zu einer unzulässig hohen Erwärmung der wirksamen Schichten. Die Sperrspannung einer Eisen-Selen-Zelle beträgt je nach Qualität 15 V bis 25 V.

Wenn mehrere Gleichrichterzellen in Reihe geschaltet werden, kann man ein Vielfaches der Sperrspannung gleichrichten. Die Zellen werden deshalb mechanisch zu sogenannten *Gleichrichtersäulen* zusammengesetzt (Abb. 45/2). Da die Gleich-



a



b

c

Abb. 45/2. Gleichrichtersäule a) Ansicht
b) Aufbau einer Eisen-Selen-Zelle c) Schaltzeichen

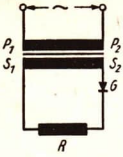


Abb. 46/1
Schaltplan zum Nachweis der Wirkung eines Selengleichrichters.
P_1, P_2 Primär-, S_1, S_2 Sekundärspule eines Transformators

richter auch in der Durchlaßrichtung einen Ohmschen Widerstand haben, wird entsprechend der Gleichung $N = I^2 \cdot R$ in ihnen elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Die Wärme muß abgeführt werden, damit die Gleichrichterplatten sich nicht zu stark erhitzen. Selengleichrichter sind in dieser Hinsicht empfindlich, da Selen einen ziemlich niedrigen Schmelzpunkt hat. Reines Selen schmilzt bei 220 °C. Die Schicht in einem Trockengleichrichter besteht nicht aus reinem Selen, sondern aus einer Legierung, deren Gleichrichterwirkung noch günstiger als die des reinen Selens ist; der Schmelzpunkt liegt jedoch bei etwa 105 °C.

Die Höchsttemperatur für Selengleichrichter bei Dauerbetrieb beträgt etwa 70 °C. Wird der Gleichrichter zu hoch belastet, so sinkt infolge weiterer Temperaturerhöhung durch die Stromwärme die Sperrfähigkeit, bis schließlich die aufgebrachte Schicht schmilzt und der Gleichrichter unbrauchbar wird.

In den Funkgeräten werden Trockengleichrichter im allgemeinen durch Luftströmung gekühlt; dabei ist es zweckmäßig, die Gleichrichtersäulen liegend anzuordnen, damit die erwärmte Luft schnell entweichen und kalte Luft von unten nachströmen kann.

Die zulässige Stromstärke einer Zelle wächst mit dem Flächeninhalt der Sperrschicht. Für höhere Stromstärken müssen daher entsprechend viele Zellen parallel geschaltet werden.

Der höchstzulässige Gleichstrom, den ein Gleichrichter dauernd abgeben kann, wird mit *Nenngleichstrom* bezeichnet, er ist von der Strombelastbarkeit abhängig. Diese beträgt etwa 20 bis 40 mA/cm².

Von besonderer Bedeutung sind die Silizium-Gleichrichter, die für Stromstärken bis zu einigen hundert Ampere gebaut werden. Sie werden beispielsweise für die Gleichrichtung von Wechselstrom in elektrischen Lokomotiven benutzt.

Trockengleichrichter benötigen keinerlei Wartung und arbeiten im Gegensatz zu den Maschinen und anderen Gleichrichterarten völlig funkstörfrei. Nur Überlastung, starke Luftfeuchtigkeit und chemische Einwirkungen zerstören die Gleichrichter allmählich. Der Wirkungsgrad liegt zwischen 75% bis 95%; er ist belastungsabhängig.

Besonders bei niedrigen Spannungen arbeiten Trockengleichrichter wirtschaftlicher als andere Arten von Gleichrichtern. Sie werden zur *Gleichstromversorgung von Funkgeräten* und zum *Aufladen von Akkumulatoren* benutzt. In besonderen Bauarten werden sie in der Meßtechnik als *Meßgleichrichter* verwendet.

8. Transistoren

1. Die Wirkungsweise des Transistors als Verstärker. *Transistoren* entstanden aus der Weiterentwicklung der Halbleiterdioden. Erst 1948 wurden sie in der Öffentlichkeit bekannt. Transistoren werden ähnlich wie Trioden verwendet und zwar hauptsächlich zur Verstärkung. Die wissenschaftlichen Voraussetzungen schufen vor allem die sowjetischen Wissenschaftler *Joffe*, *Frenkel* und *Wolkenstein*. Arbeiten der Forscher *Wilson*, *Shottky*, *Gudden* und *Shockley* waren für die Entwicklung der Halbleitertechnik ebenfalls wichtig.

Beim Transistor liegt zwischen zwei p-leitenden Germaniumschichten eine n-leitende Schicht, die *Basis* (Abb. 47/1). Diese ist oft nur 50 µm dick.

Von den *p*-leitenden Schichten heißt die eine *Emitter*, die andere *Collektor*. Die Anzahl der Fehlstellen in ihnen ist wesentlich größer als die Anzahl der Überschußelektronen in der Basis. Im wesentlichen dienen die Elektronen in der Basis der Erzeugung der beiden Grenzschichten, während die Leitungsvorgänge vorwiegend durch die Fehlstellen, als Löcherleitung, erfolgen.

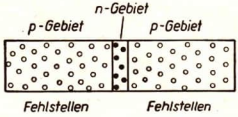


Abb. 47/1. Aufbau eines Transistors

Am Transistor können zwei Stromkreise geschaltet werden, der Emitter-Basis-Stromkreis, kurz *Emitterkreis*, und der Collektor-Basis-Stromkreis, kurz *Collektorkreis* (Abb. 47/2). *Der Collektorkreis ist immer in Sperrichtung zu polen*, so daß in ihm zunächst kein Strom fließt. *Der Emitterkreis ist immer in Durchlaßrichtung der Sperrschicht an die Spannungsquelle anzuschließen.* Dadurch treten beim Stromfluß Fehlstellen in die n-leitende Basis ein. Damit befinden sie sich in dem elektrischen Feld zwischen Basis und Collektor.

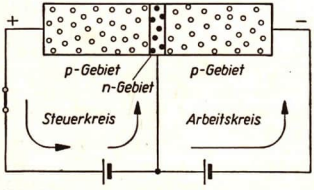
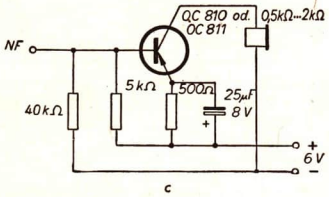


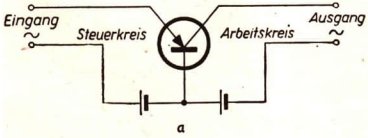
Abb. 47/2
Transistor mit Emitter- und Kollektorkreis

Da man die Collektorspannung höher wählt als die Emitterspannung, treten 99% der Fehlstellen in den Collektorkreis und überfluten die Collektorgrenzschicht, so daß ein Collektorstrom fließt. *Zur Basis fließt nur ein sehr kleiner Basisstrom.*

Abbildung 47/3 zeigt Schaltbilder und Schaltzeichen eines Transistors.

Legt man in den Emitterkreis die Sprechwechselspannung eines Mikrofons über einen Transformator, so schwankt die Zahl der in die Basis vom Emitter eintretenden Löcher mit der Tonfrequenz. Somit ändern sich die Leitungsverhältnisse für den Collektorkreis mit dieser Frequenz, und der Collektorstrom schwankt mit ihr.





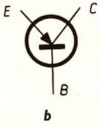


Abb. 47/3
a) Schaltbild eines Transistors
b) Schaltzeichen
c) einstufiger Verstärker

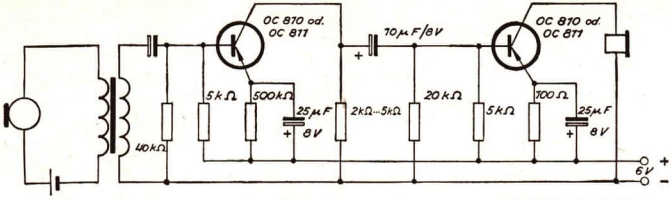


Abb. 48/1. Zweistufiger Transistorverstärker

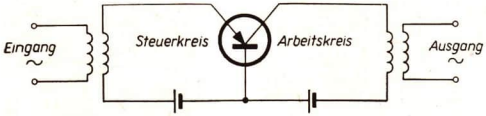


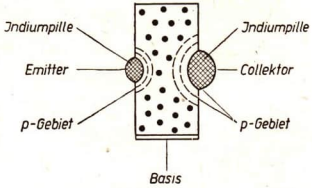
Abb. 48/2
Induktive Kopplung des Transistors als Verstärker

Die Stromstärke im Collektorstromkreis ist kleiner als die Emitterstromstärke. Leitet man den Collektorstrom aber durch einen hochohmigen Arbeitswiderstand, so entsteht ein Spannungsabfall, der erheblich größer ist als die Emitterspannung. Daher tritt im Collektorkreis eine größere Leistung auf als im Emitterkreis. Als Arbeitswiderstand kann die hochohmige Primärwicklung eines Transformators dienen. An seine Sekundärwicklung wird ein Lautsprecher angeschlossen. In ihm werden die Stromstärkeschwankungen wieder in Schallwellen umgesetzt. Ähnlich wie bei Röhrenverstärkern kann man auch mit Transistoren mehrere Verstärkerstufen hintereinanderschalten. Abbildung 48/1 zeigt das Schaltbild eines zweistufigen Transistorverstärkers. Die Emitter- und Collektorspannungen werden durch Spannungsteilerschaltungen derselben Spannungsquelle entnommen. Die Übertragung von einer Stufe zur anderen erfolgt durch einen Kondensator von 10 μF. Widerstände und Kondensatoren vor den Emittern dienen der Stabilisierung, damit keine Verzerrungen auftreten. Abbildung 48/2 zeigt das Schaltbild einer induktiven Kopplung eines Transistors als Verstärker.

3. Bau des Transistors. Da es sehr schwer ist, einen p-n-p-Transistor durch Zusammensetzen der einzelnen Teile nach Art der Abbildung 47/1 herzustellen, wird der Transistorkörper nach dem Legierungsverfahren gefertigt. Der *Legierungstransistor* besteht aus einer 0,12 mm dicken rechteckigen Scheibe, 5 mm lang und 2 mm breit, aus n-Germanium (Abb. 48/4). Diese Scheibe stellt die Basis dar. Beider-

Abb. 48/3
Anordnung der Lötfahnen eines Transistors

Abb. 48/4
Aufbau eines p-n-p Transistors in technischer Ausführung (schematisch)



seitig werden kleine Kügelchen aus Indium (Durchmesser 0,3 mm) nacheinander auflegiert. Während des Glühens dringen die Indiumatome von beiden Seiten her in das n-Germanium ein. Die legierten Zonen nähern sich bis auf einen möglichst geringen Abstand einander. Sie stellen die p-Gebiete dar. Es gibt auch Transistoren mit einer n-p-n-Schichtung, deren Herstellung komplizierter und kostspieliger ist.

4. Vorteile des Transistors. Der Transistor hat gegenüber der Elektronenröhre wesentliche Vorteile. Ein Transistor hat einen *sehr geringen Stromverbrauch*, da er keine Glühkatode als Elektronenquelle benötigt. Nach Anlegen der Spannung ist er *sofort betriebsbereit*. Der Transistor ist mechanisch sehr *widerstandsfähig*. Neben *kleinen Abmessungen* hat er eine *geringe Masse* von etwa 2 g. Sein Volumen ist kleiner als 1 cm^3. Seine Lebensdauer ist nahezu unbegrenzt. Wegen der niedrigen Betriebsspannungen und geringen Stromstärken können auch die anderen Bauelemente in Kleinstausführungen verwendet werden.

Die Emitterspannung beträgt oft weniger als 1 Volt, die Collektorspannung bis 4 Volt. Der Wirkungsgrad bei Röhrenempfängern beträgt 1% bis 10%, bei Transistorenempfängern bis zu 50%.

Neben diesen Vorteilen gibt es auch Nachteile. Der Transistor ist sehr *temperaturempfindlich*. Die höchstzulässige Betriebstemperatur beträgt 50°C bis 60°C. Oft tritt ein Eigenrauschen auf.

5. Aufgaben:

1. Vergleichen Sie die Leitungseigenschaften von Halbleitern und von Metallen!
2. Stellen Sie die Verstärkerschaltungen mit einer Triode und mit einem Transistor einander gegenüber!

9. Der thermoelektrische Effekt

1. Die Berührungsspannung. Im Jahre 1793 entdeckte der italienische Physiker *Alessandro Graf Volta*, daß nach der Berührung zweier verschiedener Metalle eine elektrische Spannung zwischen den Metallen festzustellen ist. Heute kennt man die Ursache dieser Erscheinung. *Bei Metallen, die einander berühren, treten freie Elektronen von einem Metall in das andere über.* Dies geschieht infolge der thermischen Bewegung der Elektronen und wegen der größeren Anzahl freier Elektronen in einem der beiden Metalle.

Man hat die Metalle in eine *Spannungsreihe* derartig eingeordnet, daß irgendein Metall aus der Reihe negativ elektrisch wird, wenn es mit einem weiter links stehenden Metall in Berührung kommt. Das weiter links stehende Metall ist dann gegenüber dem rechts stehenden positiv elektrisch geladen. Diese Spannungsreihe nennt man im Unterschied zu der in Klasse 9 behandelten galvanischen Spannungsreihe die *Voltasche Spannungsreihe*. In der galvanischen Spannungsreihe sind bekanntlich die Stoffe nach dem Spannungszustand angeordnet, den sie beim gemeinsamen Eintauchen in eine Flüssigkeit (Wasser) annehmen.

Voltasche Spannungsreihe:

(+) Rb–K–Na–Al–Zn–Pb–Sn–Sb–Bi–Fe–Cu–Ag–Au–Pt (–)

Werden zwei Metalle nach Abbildung 50/1 zu einem offenen Ring gebogen, so entsteht zwischen den beiden Enden ein elektrisches Feld.

An der Berührungsfläche zweier Metalle treten Elektronen von einem Metall in das andere über. Dadurch entsteht zwischen den Metallen eine Spannung. Die Größe der Berührungsspannung hängt von der Art der Metalle ab. Die Polarität der sich berührenden Metalle erkennt man aus der Spannungsreihe.

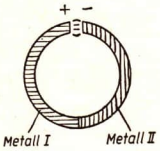


Abb. 50/1
Ausbildung der Berührungsspannungen an einem Ring aus zwei Metallteilen

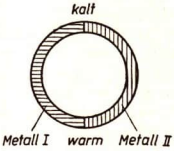


Abb. 50/2
Ausbildung des Thermostromes in einem Metallring

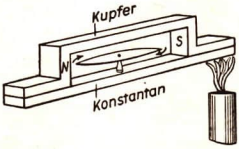


Abb. 50/3
Geschlossenes Leiterrechteck, bestehend aus zwei zusammengelöteten Metallen. Die in der Mitte angebrachte Magnetnadel schlägt aus, sobald die eine Lötstelle erwärmt wird.

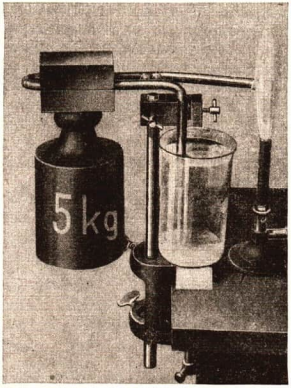


Abb. 50/4
Thermoelektrischer Elektromagnet. Eine einzige Stromwindung verleiht dem Magneten eine Tragkraft von 5 kp.

2. Der thermoelektrische Effekt. Die Berührungsspannung zwischen zwei Metallen wird wesentlich erhöht, wenn man *die Metalle sehr eng miteinander verbindet*, so wie es beim Nieten, Löten und Schweißen der Fall ist. Außerdem wird durch Erwärmung der Niet-, Löt- und Schweißstellen die Spannung um ein Vielfaches größer. Ein Metallring aus zwei verschiedenen Metallen wird an der einen Niet-, Löt- oder Schweißstelle stark erwärmt, während die andere Berührungsfläche eine tiefere Temperatur hat (Abb. 50/2). Im Leiterkreis fließt ein elektrischer Strom, ein sogenannter *Thermostrom*. Der Ring zeigt das Prinzip eines *Thermoelementes*. Die Ursache des Thermostromes ist die größere Berührungsspannung an der warmen Berührungsstelle gegenüber der kälteren Stelle. Die auftretende Spannung wird als *Thermospannung* bezeichnet. Zur Messung der Thermospannung schaltet man einen Spannungsmesser in den Leiterkreis. Wird die Temperatur an der heißen und auch an der kalten Berührungsstelle konstant gehalten, so fließt ständig ein konstanter Strom. *Je größer der Temperaturunterschied der Berührungs-(Löt-)stellen ist, desto größer sind die Thermospannung und die Stromstärke.*

Die folgenden Versuche zeigen, wie man den Thermostrom nachweisen kann.

1. Erwärmt man nach Abbildung 50/3 eine Seite des Metallkörpers über einer Bunsenflamme, so fließt trotz der geringen Thermospannung wegen des großen Metallquerschnitts ein starker Strom. Das erkennt man an der starken Ablenkung der Magnetnadel durch das entstehende magnetische Feld.
2. Zwischen einem etwa 10 mm dicken Kupferbügel ist ein kurzer Konstantanstab eingelötet (Abb. 50/4). Das eine Ende der Kupfer-Konstantan-Verbindung wird mit einer Bunsenflamme erwärmt, das andere wird in Eiswasser gekühlt. Der Eisenkern wird durch den Thermostrom magnetisch und kann große Lasten tragen. Es entstehen Ströme von über 100 A.

Bezieht man die auftretenden elektrischen Spannungen auf einen bestimmten elektrischen Leiter, beispielsweise auf Platin, so kann man auch hier eine *Spannungsreihe* bilden (vgl. die nachstehende Tabelle).

Thermoelektrische Spannungsreihe, bezogen auf Platin, bei Lötstellentemperaturen von 0 °C *und* 100 °C

Metall	Spannung (mV)	Metall	Spannung (mV)	Metall	Spannung (mV)
Fe	+1,886	Ag	+0,741	Al	+0,402
Mo	+1,224	Zn	+0,689	Pt	0
Cd	+0,861	Tl	+0,590	Pd	−0,283
Au	+0,778	Sn	+0,459	Ni	−1,496
W	+0,773	Pb	+0,443	Co	−1,679
Cu	+0,769	Mg	+0,434	Bi	−5,839

Die Thermospannungen sind besonders groß bei folgenden Kombinationen:

Wismut-Antimon ($1 \cdot 10^{-4}$ V · grd^{-1}),
Konstantan-Kupfer ($0{,}42 \cdot 10^{-4}$ V · grd^{-1}),
Platin-Platinrhodium ($0{,}06 \cdot 10^{-4}$ V · grd^{-1}).

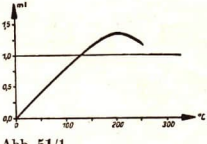


Abb. 51/1
Temperatur-Spannung-Diagramm

Oft können schon geringe Beimengungen von anderen Metallen, die man als Spuren bezeichnet, die Spannungswerte verändern. Auf Grund der Kenntnisse aus der Halbleitertechnik läßt sich diese Erscheinung erklären. *Durch zusätzliche freie Leitungselektronen wird die Thermospannung verändert.*

Die Thermospannung erhöht sich bei der Erwärmung der Verbindungsstelle der Metalle. Der Spannungsanstieg erfolgt nicht linear (Abb. 51/1). Nach Erreichen einer bestimmten Temperatur sinkt bei weiterem Temperaturanstieg die Thermospannung wieder.

Bei der Kombination Kupfer-Eisen beobachtet man das Absinken der Thermospannung bei etwa 276 °C, während bei der Kombination Eisen-Zink der Umkehrpunkt bei 200 °C liegt.

3. Das Thermoelement. *Thermoelemente wandeln die Wärmeenergie sofort ohne Hilfsmittel in elektrische Energie um.* Das ist eine neue Art der Energieumwandlung, die sonst bisher nicht möglich war. Daher werden Thermoelemente zur Erzeugung

technisch verwertbarer Elektroenergie verwendet. Allerdings beträgt ihr Wirkungsgrad zur Zeit nur etwa 10%.

Da die Spannung einzelner Thermoelemente gering ist, schaltet man mehrere Thermoelemente hintereinander; man erhält eine *Thermobatterie* (Abb. 52/1). Durch Erdgas erhitzte Thermobatterien liefern beispielsweise die gesamte Elektroenergie der sowjetischen Rundfunkstation Uroskaj. In der Sowjetunion werden Öfen mit Thermobatterien gebaut, die eine Leistung von 1 kW haben.

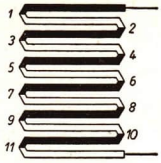


Abb. 52/1
Thermobatterie

Berechnungen haben ergeben, daß mit Hilfe von Thermoelementen die Wärmeenergie der Sonne mit geringeren Verlusten in elektrische Energie umgewandelt werden kann als die Energie in Wasserkraftwerken.

Hieraus ergeben sich große Perspektiven für die Energiewirtschaft. Die künftige weitere Anwendung ist noch nicht zu übersehen.

Das Hauptanwendungsgebiet der Thermoelemente ist zur Zeit die *Anzeige von Temperaturen*. Zur Temperaturmessung liegt bei Thermoelementen die eine Lötstelle an der Meßstelle, eine zweite wird auf konstanter Temperatur gehalten, beispielsweise auf der Temperatur des schmelzenden Eises. Die Thermospannung wird mit einem empfindlichen Millivoltmeter gemessen. Die Skale des Meßinstrumentes kann direkt in Celsius-Grad geeicht sein.

Diese Thermoelemente haben unter anderem zwei große Vorteile. Man kann Temperaturen über größere Entfernungen und an den verschiedenen Stellen eines Werkes messen. Alle Meßergebnisse können an einer zentralen Stelle abgelesen bzw. registriert werden. Außerdem kann man auch an sonst unzugänglichen Stellen messen. So wird beispielsweise die Temperatur an vielen Stellen eines Motors bei der Erprobung während des Laufes gemessen. Konstrukteure und Ingenieure haben also jederzeit einen genauen Überblick über die Temperatur der Bauteile.

Thermoelemente können in den verschiedensten Formen und Abmessungen ausgeführt werden. Dadurch ist ihre Einsatzmöglichkeit sehr vielseitig. Mit sehr kleinen Thermoelementen kann man sogar die Körpertemperatur von Insekten messen.

Für Messungen bis 500 °C ist die *Kupfer-Konstantan-Kombination* gebräuchlich. Die wichtigsten Kombinationen und den entsprechenden Temperaturbereich zeigt die nachstehende Tabelle.

Thermospannung und Temperatur bei einigen gebräuchlichen Kombinationen
(Temperatur der kalten Lötstelle: 0 °C)

Metallpaar	Temperatur der heißen Lötstelle			
	100 °C	500 °C	1000 °C	1500 °C
	Thermospannung in mV			
Kupfer-Konstantan	4,1	26,3	—	—
Eisen-Konstantan	4,2	25,9	59,2	—
Nickel-Nickelchrom	3,3	19,7	40,0	—
Platin-Platinrhodium (5%)	0,55	3,22	6,79	10,56

An dem Beispiel der Anwendung der Thermospannung und des Thermostroms erkennt man, wie wichtig die Anwendung der Forschungsergebnisse der Wissenschaftler in der Technik für die Entwicklung neuartiger Geräte ist.

II. Mechanische Schwingungen und Wellen

10. Grundbegriffe der Schwingungslehre

1. Die Schwingung. Fährt ein schwerer Lastkraftwagen an einem Schaufenster vorbei, so zittert und klirrt manchmal die Scheibe. — In einem Omnibus kann man gelegentlich beobachten, daß bei einer bestimmten Geschwindigkeit die ganze Karosserie heftig erschüttert wird und dröhnt. — Beim Anlassen eines Elektromotors stellt man zuweilen fest, daß er bei einer bestimmten Drehzahl ebenfalls in Erschütterungen gerät, die sogar im Fundament der Maschine spürbar sind. Alle diese Erschütterungen gehen auf *Schwingungen* zurück. Werden solche Erschütterungen zu stark, so können sie zur Zerstörung von Maschinen, Bauteilen und dgl. führen. Damit die unbeabsichtigten Folgen dieser Schwingungen beim Bau von Maschinen, Gebäuden und Fahrzeugen vermieden werden, muß man die Gesetzmäßigkeiten der *Schwingungslehre* studieren und sie in der Praxis beachten.

Hin- und hergehende Bewegungen, wie sie bei Schwingungen auftreten, sind häufig zu beobachten. Stößt man beispielsweise eine Luftschaukel an, so bewegt sie sich hin und her. Die gleiche Beobachtung kann man am Klöppel einer elektrischen Klingel machen. Der gefederte Sitz eines Traktors schwingt beim Überfahren einer Bodenunebenheit auf und ab. Eine ähnliche Bewegung führt ein Massenstück aus, das an einer Schraubenfeder befestigt ist. Zieht man es einige Zentimeter nach unten und läßt es dann los, so bewegt es sich auf und ab.

Den beschriebenen Vorgängen ist gemeinsam, daß sich die Körper zwischen bestimmten Grenzlagen längs eines Weges hin- und herbewegen. Solche Bewegungen nennt man **mechanische Schwingungen.**

Bewegt sich ein Körper zwischen bestimmten Grenzlagen längs eines Weges hin und zurück, so führt er eine mechanische Schwingung aus.

Bei einem Uhrpendel wiederholt sich die Schwingung in gleichen Zeiträumen in allen Einzelheiten. Die Geschwindigkeit, mit der ein bestimmter Punkt der Bahn durchlaufen wird, ist stets gleich groß. Auch die Lage der Umkehrpunkte des Pendels ändert sich nicht. Die Pendelbewegung ist eine *periodische Schwingung:*

Wiederholt sich eine Schwingung in gleichen Zeiträumen in allen Einzelheiten, dann heißt die Schwingung periodisch.

2. Energieumwandlung bei mechanischen Schwingern. Beim schwingenden Uhrpendel hat der Schwerpunkt des Pendels in den Umkehrpunkten eine höhere Lage als beim Schwingen durch die Ruhelage. Außerdem befindet sich das Pendel in einem ständig wechselnden Bewegungszustand. Mit einem Schwingungsvorgang ist offensichtlich *eine Energieumwandlung verbunden,* die im folgenden Versuch näher untersucht werden soll.

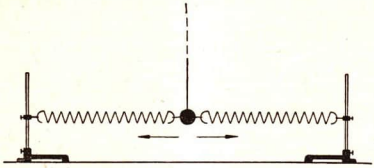


Abb. 54/1. Horizontaler Federschwinger

Ein Massenstück ist zwischen zwei Schraubenfedern befestigt. Sein Gewicht wird durch einen Faden aufgehoben (Abb. 54/1). Diese Anordnung heißt *horizontaler Federschwinger*. Um das Massenstück nach links zu ziehen, ist eine bestimmte Kraft erforderlich; denn die rechte Feder wird gedehnt und die linke zusammengedrückt. Die notwendige Kraft hängt vom Abstand des Massenstücks von der Ruhelage ab; sie wächst mit zunehmender Entfernung.

Die zum Spannen der Federn aufgewendete Arbeit ist als potentielle Energie im Federschwinger vorhanden. Gibt man das Massenstück frei, so wird infolge der Elastizität der Federn die potentielle Energie in Beschleunigungsarbeit umgeformt. Zwischen dem Freigabepunkt und der Ruhelage wächst die kinetische Energie des schwingenden Systems, und seine potentielle Energie nimmt ab, jedoch bleibt die Summe von potentieller und kinetischer Energie immer gleich der potentiellen Energie vor der Freigabe. Beim Durchgang durch die Ruhelage hat das Massenstück nur kinetische Energie, da die Federn entspannt sind. Auf Grund der Trägheit aller Körper kommt es dort aber nicht zur Ruhe. Es bewegt sich weiter, dehnt dabei die linke Feder und drückt die rechte zusammen. Dadurch wird die kinetische Energie des Schwingers wieder in potentielle Energie der Federn umgewandelt. Im rechten Umkehrpunkt ist schließlich nur potentielle Energie vorhanden. Nun kehrt sich der Vorgang um. Das Massenstück wird wieder zur Ruhelage hin beschleunigt. Die Energieumwandlungen wiederholen sich so lange, bis die ursprünglich aufgewandte Energie infolge der Reibung aufgebraucht ist. Der Schwingungsvorgang hört dann auf.

Man kann die mechanischen Schwingungen nach der Art der zur Ruhelage *zurücktreibenden Kräfte* unterscheiden. Sind die wirkenden Kräfte durch elastische Eigenschaften der Stoffe bedingt, so spricht man von *elastischen Schwingungen*. Diese Art der Schwingungen trat beispielsweise beim horizontalen Federschwinger auf. Auch Blattfedern und Spiralfedern vollführen elastische Schwingungen. *Pendelschwingungen* erfolgen dagegen unter dem Einfluß der Schwerkraft. Sie ist die Ursache dafür, daß das Pendel zur Ruhelage zurückgezogen wird. Es gibt auch viele mechanische Schwingungsvorgänge, bei denen beide Kräfte als Ursache auftreten. Auf einen *vertikalen Federschwinger* wirken beispielsweise Schwerkraft und Federkraft gleichzeitig ein.

Mechanische Schwingungen werden durch elastische Kräfte oder durch die Schwerkraft verursacht. Bei mechanischen Schwingungen findet eine ständige Umwandlung von potentieller in kinetische Energie statt und umgekehrt.

3. Die Bestimmungsstücke einer Schwingung. Will man die Schwingungen eines Körpers beschreiben, so sind bestimmte für die Schwingung charakteristische Angaben notwendig. Man bezeichnet sie als *Bestimmungsstücke der Schwingung*. Diese sollen am Beispiel des vertikalen Federschwingers erläutert werden (Abb. 55/1).

a) Unter der **Elongation** oder dem **Ausschlag** x versteht man den jeweiligen Abstand des schwingenden Körpers von der Ruhelage.

b) Die **Amplitude** oder **Schwingungsweite** x_0 ist der größte Abstand des schwingenden Körpers von der Ruhelage.

c) Die **Periode** oder **Schwingungsdauer** T ist die Zeitdauer einer vollen Schwingung, d. h. eines vollständigen Hin- und Herganges. Sie ist gleich der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichgerichteten Durchgängen durch einen beliebigen Punkt der Bahn (Abb. 55/2).

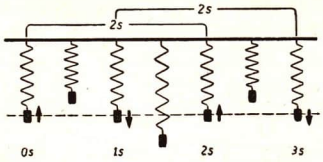


Abb. 55/2. Nach je 2 Sekunden erfolgt ein gleichgerichteter Durchgang des Massenstücks durch einen bestimmten Punkt der Bahn. $T = 2$ s.

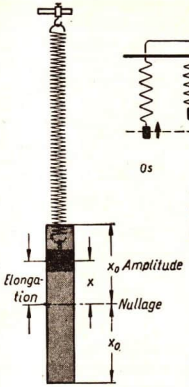


Abb. 55/1. Ausschlag und Amplitude am vertikalen Federschwinger

d) Die **Frequenz** f oder **Schwingungszahl** ist der Quotient aus einer beliebigen Anzahl voller Schwingungen und der dazu notwendigen Zeit. Sie ist zahlenmäßig gleich der Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde.

Die Maßeinheit der Frequenz ist das **Hertz** (Hz), das seinen Namen nach dem deutschen Physiker *Heinrich Hertz* erhalten hat.

Da die Anzahl der Schwingungen nur durch eine Zahl angegeben wird, ist die Maßeinheit der Frequenz $\frac{1}{\mathrm{s}}$ beziehungsweise s^{-1}. $\boxed{1\ \mathrm{Hz} = 1\ \mathrm{s}^{-1}.}$

Heinrich Hertz (1857 bis 1894)

Größere Einheiten für die Frequenz sind das **Kilohertz** (kHz), das **Megahertz** (MHz) und das **Gigahertz** (GHz). Diese Einheiten werden vor allem in der Hochfrequenztechnik verwendet.

$1\ \mathrm{kHz} = 10^3\ \mathrm{Hz}, \quad 1\ \mathrm{MHz} = 10^6\ \mathrm{Hz}, \quad 1\ \mathrm{GHz} = 10^9\ \mathrm{Hz}.$

Zwischen der Frequenz und der Periode einer Schwingung besteht ein bestimmter Zusammenhang. Die Periode T kann aus einer beliebigen Anzahl von Schwingungen n und der dabei verflossenen Zeit t bestimmt werden:

$$T = \frac{t}{n}.$$

Führt beispielsweise ein Federschwinger in der Zeit $t = 40$ s insgesamt $n = 50$ Schwingungen aus, so ergibt sich:

$$T = \tfrac{4}{5}\ \mathrm{s}.$$

Die Frequenz f des gleichen Schwingers ist der Quotient aus der Anzahl n der vollen Schwingungen und der dabei verflossenen Zeit t:

$$f = \frac{n}{t}.$$

Das gewählte Zahlenbeispiel ergibt:

$$f = \tfrac{5}{4}\ \mathrm{s}^{-1}.$$

Die Gleichungen $T = \frac{t}{n}$ und $f = \frac{n}{t}$ zeigen, daß f der reziproke Wert von T ist.

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

Periode und Frequenz sind einander reziprok.

e) Unter der **Phase** versteht man den Schwingungszustand in einem bestimmten Zeitpunkt. Dazu ist die Angabe der Elongation und der Richtung notwendig, in der sich der Körper bewegt.

4. Die harmonische Schwingung und ihre graphische Darstellung. Bei der Untersuchung von Schwingungen ist es wichtig zu wissen, ob und wie die Kraft, die auf einen Feder- oder Pendelschwinger einwirkt, von der Elongation abhängt. Je weiter ein Federschwinger oder ein Pendelschwinger von seiner Ruhelage entfernt ist, desto größer ist die Kraft, die ihn zur Ruhelage zurücktreibt. Für kleine Schwingungsweiten ist diese rücktreibende Kraft dem Abstand von der Ruhelage proportional. Die Bewegung eines Schwingers, für den diese Aussage gültig ist, heißt **harmonische Schwingung.** Diese Bezeichnung ist darauf zurückzuführen, daß auch bei Musikinstrumenten derartige Schwingungen auftreten.

Bei einer harmonischen Schwingung ist die rücktreibende Kraft der Elongation proportional und zur Ruhelage hin gerichtet.

Auch die Schwingung eines in einer Ebene schwingenden Fadenpendels ist eine harmonische Schwingung. Projiziert man die Bewegung eines Kreispendels mit Hilfe von Lichtstrahlen auf eine Wand, so erkennt man, daß die Bewegung des Kegelschattens der Bewegung des in einer Ebene schwingenden Fadenpendels ähnelt (Abb. 56/1). Das verwundert nicht, denn die Bewegung des in einer Ebene schwingenden Pendels kann man als Teilbewegung eines kreisförmig schwingenden Pendels auffassen. Wird nämlich ein Pendel in geeigneter Weise regelmäßig angestoßen, so geht die lineare Schwingung in eine kreisförmige Schwingung über. Da das Fadenpendel eine harmonische Schwingung ausführt, ist die Projektion des Kreispendels ebenfalls eine solche Schwingung.

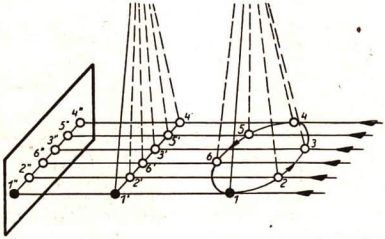


Abb. 56/1. Projektion eines Kegelpendels und eines in einer Ebene schwingenden Fadenpendels

Statt nun die Bewegung des in einer Ebene schwingenden Fadenpendels für die graphische Darstellung einer harmonischen Schwingung zu benutzen, ist es einfacher, aus der kreisförmigen Bewegung dieses Pendels die Darstellung zu entwickeln.

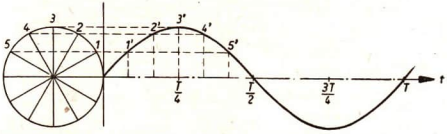


Abb. 57/1. Graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer harmonischen Schwingung

Jedem Punkt auf der Kreisbahn eines Kegelpendels entspricht ein Punkt der Projektion. Zur graphischen Darstellung einer harmonischen Schwingung zeichnet man einen Kreis mit der Amplitude x_0 als Radius und teilt seinen Umfang in gleiche Abschnitte (Abb. 57/1). Der waagerechte Durchmesser des Kreises wird verlängert und dient als Zeitachse. Senkrecht dazu werden die entsprechenden Elongationen für jeden Zeitpunkt abgetragen. Bei entsprechender Einteilung der Achsen ergibt die graphische Darstellung eine wellenförmige Kurve, eine *Sinuskurve*. Sie ist bereits als Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer Wechselspannung beziehungsweise eines Wechselstromes bekannt. Da die Projektion der Schwingung eines Kegelpendels mit einer harmonischen Pendelschwingung übereinstimmt, ist die Sinuskurve der Abbildung 57/1 die graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer harmonischen Schwingung.

Die graphische Darstellung einer harmonischen Schwingung ergibt eine Sinuskurve.

5. Die Aufzeichnung von Schwingungen. Die im letzten Abschnitt gewonnenen Ergebnisse können durch Versuche bestätigt werden. Man benutzt dazu ein *Sandpendel* nach der Abbildung 57/2. Es ist an zwei Fäden, oder wie man auch sagt, *bifilar* aufgehängt, damit es nur in einer Ebene schwingen kann. Bei schwingendem Pendel hinterläßt der ausfließende Sand geradlinige Spuren, die einander überdecken. Zieht man die Unterlage mit gleichbleibender Geschwindigkeit unter dem Pendel hinweg, so entsteht auf der Unterlage eine Wellenlinie oder Sinuskurve (Abb. 57/3).

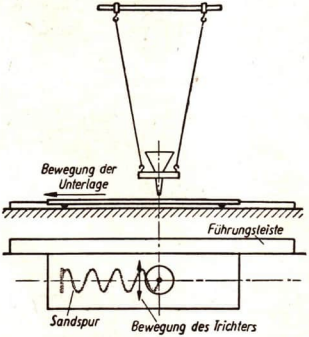


Abb. 57/2. Sandpendel

Abb. 57/3. Wellenlinie als Sandspur eines Sandpendels

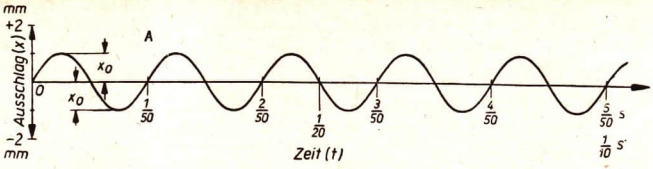


Abb. 58/1. Stimmgabelschwingung in einem Koordinatensystem

Auch mit einer *Stimmgabel* kann man Schwingungsvorgänge aufzeichnen. Dazu befestigt man an einer Zinke der Stimmgabel einen dünnen, vorn zugespitzten Stahlstreifen. Die Spitze zieht man nach dem Anschlagen der Stimmgabel gleichförmig über eine berußte Glasplatte. Es entsteht wiederum eine Wellenlinie. Projiziert man die Wellenlinie mit einem Bildwerfer auf weißes Papier, so ergibt sich die Abbildung 58/1.

Die Bewegungsrichtung der Stimmgabel fällt mit der Abszissenrichtung zusammen. Beträgt die Frequenz der Stimmgabel beispielsweise 50 Hz, so entspricht der Strecke $\overline{OA}$ die Zeit $\frac{1}{50}$ s; denn in dieser Zeit erfolgt eine Schwingung. Die Ordinatenwerte geben die Elongation der Schreibspitze zu einem bestimmten Zeitpunkt an. Die Elongation ändert sich mit der Zeit.

Die Elongation einer Schwingung ist eine Funktion der Zeit: $x = f(t)$.

6. Die Schwingungsdauer. Bestimmt man die Schwingungsdauer verschiedener Federschwinger und Pendelschwinger, so stellt man fest, daß sie nicht von der Amplitude abhängt. Genau gilt dies jedoch nur für kleine Ausschläge.

Die Schwingungsdauer ist von der Amplitude unabhängig.

Da beim Federschwinger die Masse von einer veränderlichen Kraft beschleunigt wird, muß die Schwingungsdauer von der Masse abhängen. Genauere Untersuchungen haben ergeben: *Je größer die schwingende Masse ist, desto größer ist auch die Schwingungsdauer*, doch sind die beiden Größen nicht proportional. Dagegen ist die Schwingungsdauer eines Fadenpendels von der Masse des Pendelkörpers unabhängig.

Vergleicht man die Schwingungsdauer von Fadenpendeln verschiedener Länge, so ergibt sich, daß längere Pendel eine größere Schwingungsdauer haben. Auch hier ist die Abhängigkeit nicht linear.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Nennen Sie mechanische Schwingungen! Welche von diesen sind periodische Schwingungen?
2. Beschreiben Sie den Schwingungsvorgang eines vertikalen Federschwingers!
3. Bestimmen Sie die Frequenz und die Schwingungsdauer eines selbstgebauten vertikalen Federschwingers!
4. Ermitteln Sie Frequenz und Schwingungsdauer eines Körpers, der an einem Gummifaden schwingt!
5. Welche Schwingungsdauer hat ein Schwingungsvorgang mit einer Frequenz von a) 50 Hz, b) 7,3 Hz, c) 0,55 Hz?

11. Gedämpfte Schwingungen

1. Aufzeichnung gedämpfter Schwingungen. Bei allen Schwingungen, die bisher betrachtet wurden, *nahmen die Amplituden mit der Zeit ab.* Solche Schwingungen nennt man **gedämpfte Schwingungen.** Befestigt man an den Tragschnüren eines Sandpendels eine große Pappscheibe, dann wird die Schwingung merklich gedämpft (Abb. 59/1). Zieht man eine Blattfeder mit Schreibspitze schnell über eine berußte Glasplatte, dann zeichnet sie ebenfalls eine gedämpfte Schwingung auf (Abb. 59/2).

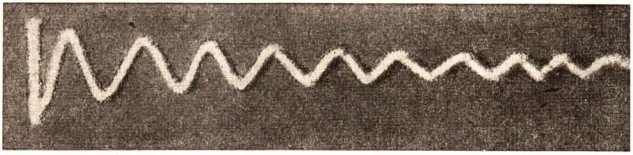


Abb. 59/1. Gedämpfte Schwingung eines Sandpendels

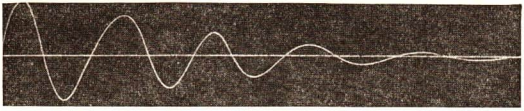


Abb. 59/2. Aufzeichnung der gedämpften Schwingung einer Blattfeder

Die Ursache der Amplitudenabnahme bei den mechanischen Schwingungen ist die allmähliche Umwandlung der mechanischen Energie in Wärmeenergie. Ein Teil der Schwingungsenergie geht durch den Luftwiderstand, ein anderer durch Reibung an den Aufhängepunkten verloren.

Schwingungen, deren Amplituden abnehmen, heißen gedämpfte Schwingungen.

2. Dämpfung von Schwingungen. Die Abbildung 59/3 zeigt ein Pendel, dessen Dämpfungsscheibe verschieden tief in eine Flüssigkeit eintauchen kann. Offensichtlich hängt die Art der Dämpfung von der Eintauchtiefe der Scheibe ab. Befindet sich das Pendel vollständig in der Luft, so ist die Dämpfung gering. Die Schwingungsamplitude nimmt nur langsam ab (Abb. 60/1a).

Taucht die Dämpfungsscheibe vollständig in die Flüssigkeit ein, so ist die Dämpfung sehr groß. Das ausgelenkte Pendel kehrt nur ganz langsam in die Ruhelage zurück. Es vollführt keine periodische Bewegung mehr, sondern eine *aperiodische Kriechbewegung* (Abb. 60/1b).

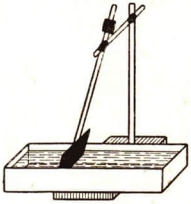


Abb. 59/3. Pendel mit Flüssigkeitsdämpfung

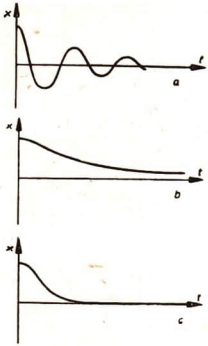


Abb. 60/1
Gedämpfte Schwingungen

Bei einer bestimmten mittleren Dämpfung, wenn das Pendel nur zum Teil in die Flüssigkeit eintaucht, kehrt es am schnellsten in die Ruhelage zurück, ohne diese zu überschreiten. Man spricht dann von dem *aperiodischen Grenzfall* (Abb. 60/1c). Infolge der quantitativen Änderung einer Größe, in diesem Falle der Dämpfung, wird eine Eigenschaft, eine Qualität, geändert, das heißt, es findet keine Schwingung statt.

Besonders stark ist die Dämpfung, wenn man zähe Flüssigkeiten verwendet, beispielsweise Öl oder Glycerin. Die Teilchen dieser Flüssigkeiten haben eine größere innere Reibung als Wasser und lassen sich nur schwer verdrängen. Motorräder sind oft mit einer *Teleskopfederung* versehen. Mit ihrer Hilfe werden Fahrbahnstöße gemildert. Je besser die Federung ist, um so längere Zeit würde der Rahmen mit dem Fahrersitz schwingen. Daher ist die Teleskopfederung mit einer Öldämpfung versehen. Sie dämpft die Amplitude der Schwingungen, so daß sie schnell kleiner wird.

Lang andauernde mechanische Schwingungen sind in der Technik oft störend und müssen daher gemindert werden. Man vergrößert deshalb oft die Dämpfung auf verschiedene Weise. Zum Beispiel wird bei elektrischen Meßinstrumenten eine auf Induktion beruhende *Wirbelstrombremse* eingebaut. Auch *Luftdämpfungen* sind gebräuchlich. Bei dieser Dämpfungsart bewegt sich eine Metallscheibe in einer Kammer. Die Luft kann bei der Verdrängung durch die Scheibe nur langsam entweichen. Der Zeiger kommt schnell zur Ruhe, so daß die Ablesung erleichtert wird (Abb. 60/2). Nach dem gleichen Prinzip arbeitet die Luftdämpfung sehr empfindlicher Analysenwaagen (Abb. 60/3).

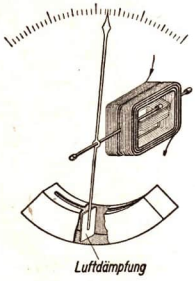


Abb. 60/2
Dämpfung eines elektrischen Meßgerätes

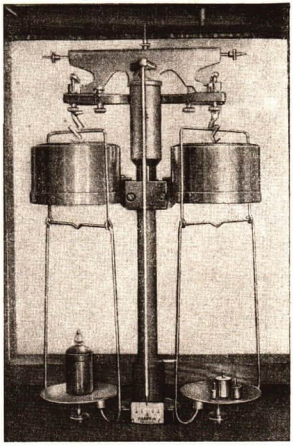


Abb. 60/3
Dämpfung einer Analysenwaage. Ein Kolben gleitet mit geringem Spielraum in einem Zylinder.

Das Zuschlagen von Haustüren wird durch *Flüssigkeitsdämpfer* vermieden (Abb. 61/1). In einem Zylinder befindet sich ein beweglicher Kolben mit einer engen Bohrung. Der Zylinder ist mit einer zähen Flüssigkeit gefüllt.

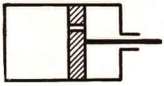


Abb. 61/1. Schema einer Öldämpfung an einer Haustür

3. Fragen und Aufgaben:

1. Wodurch läßt sich die Dämpfung eines Sandpendels verändern?
2. Worauf beruht die Wirkung des Dämpfers beim Klavier? Bestimmen Sie, wie lange eine Saite mit beziehungsweise ohne Dämpfung schwingt!
3. Untersuchen Sie die Dämpfung eines vertikalen Federschwingers in Luft, Wasser und Öl! Befestigen Sie zu diesem Zweck auf dem Massenstück eine Kreisscheibe aus dünnem Blech!

12. Die Resonanz

1. Eigenschwingung und erzwungene Schwingung. Ein Federschwinger kann durch einen einmaligen Anstoß in Schwingung versetzt werden (Abb. 61/2). Er hat wie jeder andere schwingungsfähige Körper eine bestimmte Frequenz, die *Eigenfrequenz* f_0. Sie ist unabhängig von der Stärke des Anstoßes, aber abhängig von der Federbeschaffenheit und der Masse des schwingenden Körpers.

Jeder schwingungsfähige Körper führt nach einmaligem Anstoß Eigenschwinschwingungen aus. Die dabei auftretende Frequenz heißt Eigenfrequenz f_0.

Eine Erregung des Federschwingers ist auch auf andere Weise möglich. Mit Hilfe eines Morsetasters kann die unter ihm befindliche Spule periodisch ein- und ausgeschaltet werden. Wird beispielsweise der Schalter in einer Minute 30 mal geschlossen und kurz danach wieder geöffnet, so beträgt die Schaltfrequenz $f = \frac{n}{t} = 0{,}5$ Hz. Das eiserne Massenstück wird dadurch periodisch angezogen; es wird zum Schwingen erregt. Man bezeichnet die Schaltfrequenz daher auch als *Erregerfrequenz* f_E.

Da die Spule keinen Kern besitzt, ist die Anziehungskraft nur gering. Durch einmalige Schalterbetätigung beginnt daher der Federschwinger nur mit kleiner Amplitude zu schwingen.

Erregt man ihn durch periodisches Ein- und Ausschalten mit einer kleinen Frequenz, so führt er *erzwungene Schwingungen* mit der Erregerfrequenz aus. Die Amplitude ist hierbei klein. Vergrößert man allmählich die Erregerfrequenz, so wird die Amplitude größer. Bei einer bestimmten Frequenz wird die Amplitude sehr groß. Dies ist dann der Fall, wenn die Erreger-

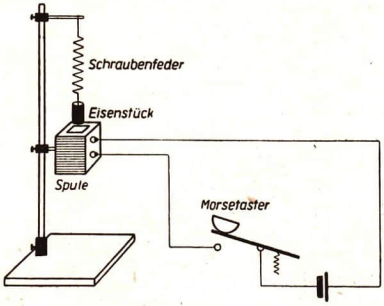


Abb. 61/2. Federschwinger mit magnetischer Anregung

frequenz $f_E = f_0$ ist. Dieses starke Mitschwingen, das bei Übereinstimmung der Frequenzen auftritt, nennt man **Resonanz.** Vergrößert man die Erregerfrequenz weiter, so nimmt die Amplitude wieder ab. In diesem Falle führen wieder quantitative Veränderungen, nämlich die Änderung der Erregerfrequenz, zu einem qualitativ anderen Verhalten, zum Mitschwingen infolge Resonanz.

Ein schwingungsfähiger Körper wird durch regelmäßige Anstöße in heftige Schwingung sehr großer Amplitude versetzt, wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des Körpers übereinstimmt.

2. Die Resonanz. Beim Schaukeln wendet man diese Erkenntnisse meist unbewußt an. Man gibt der Schaukel in geeigneten Zeitabständen einen Anstoß. Die Frequenz dieser Anstöße muß der Frequenz der Schwingungen entsprechen. Man kann auf diese Weise durch geringen Kraftaufwand eine große Schwingungsweite erzielen. Die Schwingung wird *aufgeschaukelt.*

Stellt man die Amplitude des Federschwingers in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz graphisch dar, so erhält man eine *Resonanzkurve* (Abb. 62/1). Ihr Verlauf ist von der Dämpfung des schwingenden Systems abhängig. Die Resonanz ist um so stärker, je geringer die Dämpfung ist. Bei fehlender Dämpfung würde die Amplitude über alle Grenzen wachsen (Abb. 62/2)

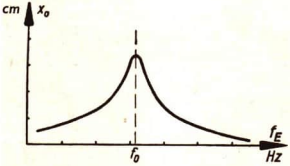


Abb. 62/1. Resonanzkurve einer Schwingung. Die Amplitude des Federschwingers ist eine Funktion der Erregerfrequenz.

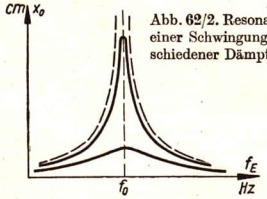


Abb. 62/2. Resonanzkurven einer Schwingung bei verschiedener Dämpfung

Abb. 62/3 Resonanz zwischen einer Stimmgabel und einer Luftsäule

Resonanz läßt sich auch an Schallschwingungen nachweisen. Nach der Abbildung 62/3 wird ein Glasrohr, das beiderseits offen ist, in einen hohen Zylinder mit Wasser eingetaucht. Über das Rohr hält man eine angeschlagene Stimmgabel, die als Erreger dient. Durch Heben und Senken der Röhre kann die Länge der einseitig abgeschlossenen Luftsäule geändert werden. Sie wird auf die Erregerfrequenz *abgestimmt.* Bei einer bestimmten Länge wird der Stimmgabelton sehr laut: *Die Luftsäule schwingt mit der Stimmgabel in Resonanz.*

3. Kopplung. Ein Versuch mit zwei Stimmgabeln von gleicher Schwingungszahl zeigt, daß man Schwingungen von einem schwingenden Körper auf einen anderen übertragen kann. Die Stimmgabeln sind auf je einem Holzkästchen angebracht und

werden in geringer Entfernung voneinander aufgestellt. Die Kästchen dienen der Verstärkung des Schalles, indem sie beim Schwingen der Stimmgabeln selbst erzwungene Schwingungen ausführten. Schlägt man die eine Stimmgabel an, so beginnt die andere ebenfalls zu schwingen. Man kann dies nachweisen, indem man die erste Stimmgabel festhält. Man nimmt dann den von der zweiten Stimmgabel abgestrahlten Ton wahr. Ändert man die Eigenfrequenz der einen Stimmgabel durch Aufschrauben eines kleinen Massestückchens, so tritt keine Resonanz auf. Wodurch sind die Schwingungen von der einen auf die andere Stimmgabel übertragen worden? Da sich die Schallwellen in der Luft ausbreiten, ist zu vermuten, daß die Luft die Ursache dieser Schwingungsübertragung ist. Der folgende Versuch soll zeigen, unter welchen Bedingungen Schwingungen übertragen werden.

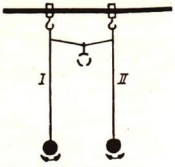


Abb. 63/1. Kopplung zweier Fadenpendel

Hängt man zwei Fadenpendel gleicher Länge nebeneinander auf und stößt das eine an, so bleibt, wie zu erwarten ist, das andere in Ruhe. Die Fadenpendel werden dann durch einen dünnen Faden miteinander verbunden (Abb. 63/1). Man bezeichnet eine solche Verbindung als Kopplung. Stößt man nun das eine Pendel an, so gerät auch das zweite Pendel in Schwingungen. Die Amplitude des ursprünglich erregten Pendels nimmt dabei immer mehr ab. Dagegen wird die Amplitude des anderen Pendels größer. Ist das ursprünglich erregte Pendel zur Ruhe gekommen, dann erreicht die Amplitude des anderen Pendels ihren größten Wert.

Die Energie des ersten Schwingers ist auf den anderen Schwinger übertragen worden. Dann kehrt sich der Vorgang um, und das erste Pendel beginnt wieder zu schwingen. Es erfolgt also eine periodisch wechselnde Energieübertragung. Sie dauert so lange an, bis sich durch Dämpfung die gesamte Schwingungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt hat.

Durch Kopplung kann Energie von einem schwingenden Körper auf einen anderen schwingungsfähigen Körper übertragen werden.

Belastet man den Verbindungsfaden mit einem kleinen Wägestück, so erfolgt die Energieübertragung auf das andere Pendel in kürzerer Zeit. Man spricht von *loser Kopplung*, wenn die Energieübertragung langsam vor sich geht, und von *fester Kopplung*, wenn sie rasch verläuft. *Je straffer der Faden gespannt ist, um so fester ist die Kopplung.*

Die Stimmgabeln bilden ebenfalls ein gekoppeltes System, wobei die Luft als Kopplungsglied dient. Bei geringer Entfernung wird die zweite Stimmgabel schneller zum Schwingen angeregt; die Kopplung ist fest. Mit zunehmender Entfernung wird die ausgestrahlte Schallenergie in geringerem Maße auf die andere Stimmgabel übertragen; die Kopplung ist lose.

Bei fester Kopplung erfolgt eine raschere Energieübertragung als bei loser Kopplung.

Ein interessantes Beispiel einer Kopplung bietet der Versuch nach Abbildung 63/2. Ein dünner Wasserstrahl wird gegen eine eingespannte dünne Membran aus Blech oder

Abb. 63/2. Mechanische Rückkopplung

Trommelhaut geleitet. Die Ausströmdüse und die Membran sind durch einen aufgelegten Holzstab verbunden. Die Membran wird durch die zerfallenden Tröpfchen zu Schwingungen angeregt, die über den Stab auf die Düse übertragen werden. Der Querschnitt des Wasserstrahls ändert sich dadurch periodisch. Die erneute Erregung der Membran erfolgt daher jetzt im Rhythmus der Eigenfrequenz der Membran. Sie beginnt so stark zu schwingen, daß die Schwingungen laut hörbar werden. Man bezeichnet diese Form der Übertragung als **mechanische Rückkopplung.**

4. Fragen und Aufgaben:

1. Ein Federschwinger nach Abbildung **61**/2 ist von Hand in heftige Schwingungen versetzt worden. Trotz periodischer Betätigung des Morsetasters werden die Amplituden geringer, obwohl die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz ist. Begründen Sie diese Erscheinung!
2. Welchen Einfluß hat die Dämpfung auf die Resonanz?
3. Stellen Sie nach Abbildung **64**/1 eine Versuchsanordnung zusammen! In welcher Höhe muß das Wägestück II befestigt werden, damit Resonanz herrscht?
4. Eine Stimmgabel mit der Frequenz $f = 440$ Hz wird einer Stimmgabel mit der Frequenz $f = 280$ Hz gegenübergestellt und angeschlagen. Warum erfolgt in diesem Fall kein Mitschwingen?
5. Welcher Unterschied besteht zwischen Eigenschwingungen und erzwungenen Schwingungen?

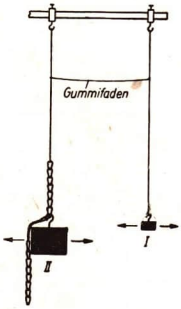


Abb. **64**/1
Versuchsanordnung zum Erzeugen erzwungener Schwingungen

13. Schwingungen in der Technik

1. Frequenzmessung von Schwingungen. Mechanische Schwingungen treten in der Technik äußerst vielfältig auf. In vielen Fällen sind sie nicht beabsichtigt und stören. Um sie zu beseitigen, muß man die auftretenden Frequenzen genau kennen. Diesem Zweck dient der *Zungenfrequenzmesser*. Er besteht aus einer Reihe elastischer Stahlzungen, deren Eigenfrequenzen der Reihe nach zunehmen (Abb. **64**/2). Wird das Gerät auf den zu untersuchenden Körper gestellt, so schwingt infolge der Resonanz die Zunge am stärksten, deren Eigenfrequenz mit der Frequenz der Erschütterung übereinstimmt. Die beiderseits benachbarten Zungen schwingen ebenfalls mit geringen Amplituden mit. Auf dem gleichen Prinzip beruht auch der aus dem Unterricht der Klasse 9 bekannte Frequenzmesser für Wechselströme.

2. Störende Schwingungen. Bei allen Maschinen mit hin- und herbewegten Teilen können durch den Arbeitsrhythmus Schwingungen hervorgerufen werden. Dies ist zum Beispiel bei Kolbendampfmaschinen und Brennkraft-Kolbenmaschinen der Fall. Stimmt die Frequenz der Kolben-

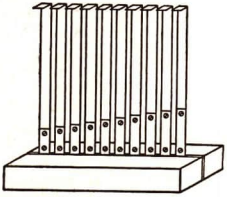


Abb. **64**/2
Modell eines Zungenfrequenzmessers

bewegung bei einer bestimmten Drehzahl mit der Eigenfrequenz eines Bauteils der Maschine, beispielsweise der Kurbelwelle oder des Chassis, überein, so kann durch Resonanz dieser Teil so stark zum Schwingen angeregt werden, daß er bricht. Deshalb werden schon beim Bau solcher Maschinen diese sogenannten *kritischen Drehzahlen* beachtet. Durch richtige Bemessung der Bauteile erreicht man, daß keine unbeabsichtigte Resonanz eintreten kann.

Auch bei Maschinen mit rotierenden Teilen, wie Turbinen, Elektromotoren und Generatoren, können störende Schwingungen auftreten, wenn der Schwerpunkt der umlaufenden Teile nicht auf der Drehachse liegt. Man sagt, die Teile müssen *ausgewuchtet* sein. Vor der Bearbeitung auf der Drehmaschine werden beispielsweise Kurbelwellen durch Zusatzmassen ausgewuchtet.

Abb. 65/1. Die Welle eines nicht ausgewuchteten Elektromotors „schlägt".

Eine Erklärung für diese Maßnahme gibt folgender Versuch: Ein kleiner Elektromotor trägt auf seiner Welle eine Holzscheibe, die in einer Bohrung ein Bleistück enthält. Der Motor ist auf einem dünnen Brett befestigt, das nach Abbildung 65/1 beiderseits unterstützt wird. Bei allmählich zunehmender Drehzahl des Motors beginnt das Brett stark zu schwingen, die Ursache ist die unsymmetrische Massenverteilung. Dadurch heben die Fliehkräfte einander nicht auf. Vielmehr wirkt im Punkt S eine Kraft vom Betrag F radial nach außen (Abb. 65/2). Unter ihrer Wirkung verbiegt sich die Welle etwas. Sie beginnt zu *schlagen*. Die auftretenden Schwingungen werden auf die Unterlage übertragen. Bei sonst gleichen Versuchsbedingungen ist die Auslenkung y proportional dem Abstand e des Schwerpunktes von seiner Ruhelage. Die Lager erfahren deshalb eine starke Belastung und unterliegen einem schnellen Verschleiß. Besteht zwischen der Umlauffrequenz des Motors und der Eigenfrequenz des Brettchens Resonanz, ist also die kritische Drehzahl erreicht, so kann das Brettchen durch Aufschaukeln der Schwingungen zerstört werden.

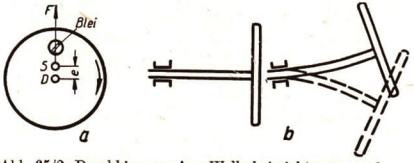


Abb. 65/2. Durchbiegung einer Welle bei nicht ausgewuchtetem Motor
S Schwerpunkt, D Drehpunkt, F Fliehkraft

Die *Beseitigung von Unwuchten* ist daher im Maschinenbau eine der wichtigsten Aufgaben. Die Scheibe wird auf eine Achse gesteckt. Sie muß in jeder Stellung in Ruhe bleiben, wenn sie ausgewuchtet ist. Dreht sie sich und pendelt dann hin und her, so ist von dem unten liegenden Sektor Material zu entfernen, zum Beispiel durch Ausbohren. Bei komplizierten Umlaufkörpern und bei Großserien ist dieses Verfahren zu ungenau und zu umständlich. Man benutzt dann *Auswuchtmaschinen* (Abb. 66/1). Auswuchtungen müssen unter anderem bei folgenden Teilen vorgenommen werden: Elektromotorenankern, Turbinenläufern, Luftschrauben, Schiffsschrauben, Kupplungen, Getriebesätzen, Kurbelwellen, Kardanwellen, Radsätzen usw. Eine völlig exakte Auswuchtung ist praktisch nicht zu erreichen. Alle rotierenden Maschinen haben gewisse Restschwingungen. Somit bleiben die kritischen Drehzahlen auch

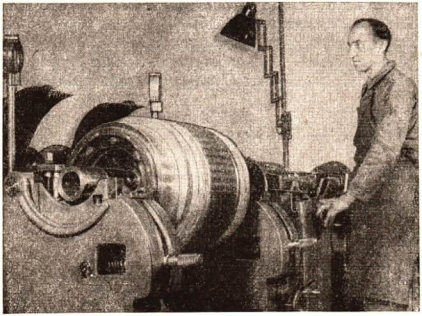


Abb. 66/1
Auswuchtmaschine

Ein Elektromaschinenbauer prüft auf der Auswuchtmaschine den Anker für einen Fahrmotor.

nach dem Auswuchten bestehen. Beim Anlassen muß man darauf achten, daß man die kritischen Drehzahlen möglichst schnell überwindet.

Die Schwingungen der Maschinen werden auf Fundamente und andere Bauteile übertragen (vgl. auch S. 64). Um diese Übertragung zu mindern, werden Dämpfungen angebracht. Dies kann durch Zwischenlagen hochelastischer Werkstoffe, zum Beispiel Gummi und Kork, erfolgen. Sie wirken zugleich federnd und dämpfend. Bei Blattfedern von Kraftfahrzeugen tritt eine Dämpfung durch die Reibung zwischen den einzelnen Blättern ein.

Durch Luftbewegungen können Sendemasten, elektrische Freileitungen, Schornsteine, Hängebrücken usw. in Schwingungen geraten. Hinter den umströmten Körpern entstehen Wirbel, die sich periodisch ablösen. Dadurch kommt es zu Schwingungen. Auch das Summen der Telefondrähte hat ähnliche Ursachen.

3. Schwingungserzeugende Geräte. Meßgeräte und andere Instrumente, die in Kraftfahrzeugen, Flugzeugen und anderen Verkehrsmitteln eingebaut sind, werden durch Erschütterungen beansprucht. Sie müssen deshalb vor dem Einbau auf

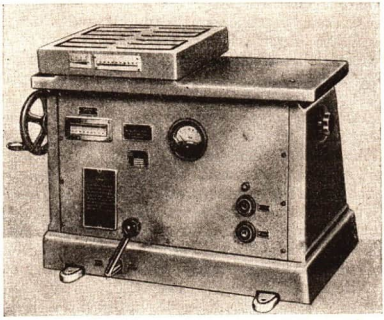


Abb. 66/2
Schwingtisch ST 300, hergestellt im VEB Geräte- und Regler-Werk Teltow. Der Prüfling wird auf dem Schwingtisch eingespannt. Ein Elektromotor versetzt über einen Exzenter den Tisch in Schwingungen.

ihre Verwendungsmöglichkeit überprüft werden. Zu diesem Zwecke werden sie auf sogenannten *Schwingtischen* angebracht, die auf eine Frequenz von 20 Hz bis 1000 Hz eingestellt werden können (Abb. 66/2). Dadurch werden die Vorgänge denen der Praxis nachgeahmt. Auf Grund dieser Untersuchungen können entsprechende Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

Zur Erfüllung unseres Siebenjahrplanes ist vor allem eine weitere Erhöhung der Arbeitsproduktivität notwendig. Dazu zählt auch die Senkung der Ausschußquoten. Durch Mängel der Gußform entsteht beispielsweise in Gießereien noch viel Ausschuß. Er läßt sich unter anderem durch das *Maschinenformen* herabsetzen. Kleine und mittlere Gußstücke in großen Stückzahlen werden deshalb vorteilhaft in maschinell hergestellten Formen gegossen.

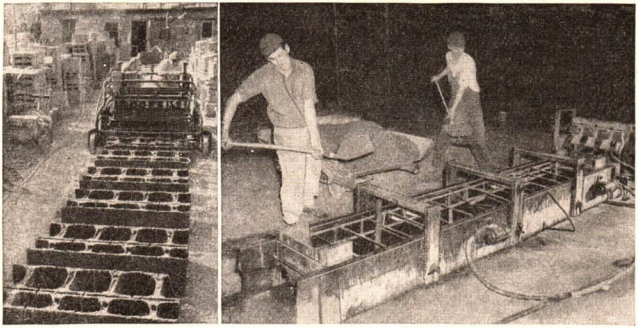


Abb. 67/1. Rüttelformmaschinen zum Formen von Betonteilen

Bei der *Rüttelformmaschine* befindet sich die Modellplatte auf dem Formtisch. Auf ihm steht der Formkasten, der mit Formsand gefüllt wird. Mit Hilfe von Preßluft wird der Formtisch mit dem Formkasten um 3 cm bis 8 cm angehoben. Er fällt dann auf eine harte Unterlage. Der Vorgang wiederholt sich in kurzer Zeit mehrmals. Durch diese Erschütterungen verdichtet sich der Formsand. Der Vorteil von maschinell hergestellten Gußformen liegt vor allem in der größeren Genauigkeit und Gleichmäßigkeit der Formen, in der Zeitersparnis und in der Erleichterung der körperlichen Arbeit des Formers. Auf ähnliche Weise werden Betonfertigteile hergestellt. Durch die Erschütterungen wird das Material stärker verdichtet, so daß die Festigkeit des Betons ein größtmögliches Maß annimmt (Abb. 67/1).

Beim Schütten größerer Betonkonstruktionen werden zum Verdichten des Betons *Preßluftrüttler* eingesetzt (Abb. 68/1).

Schwingsiebe werden zur Sandaufbereitung verwendet. Bei Kartoffelsortiermaschinen führen die Siebe ebenfalls rüttelnde Bewegungen aus. Dadurch werden die Kartoffeln vom Schmutz befreit und gleichzeitig weiterbefördert, so daß ein schnelles Auslesen möglich ist (Abb. 68/2).

Abb. 68/1. Preßluftrüttler

Abb. 68/2. Kartoffelsortierer

4. Fragen und Aufgaben:

1. An welcher Maschine, die Sie vom Unterrichtstag in der sozialistischen Produktion her kennen, befinden sich schwingende Teile?
2. Untersuchen Sie in dem Industriebetrieb beziehungsweise in der Werkstatt, in der Sie am Grundlehrgang Maschinenkunde teilnehmen, auf welche Weise die Ausbreitung störender Schwingungen auf die Gebäudeteile vermindert wird!
3. Nennen Sie Beispiele aus dem Verkehrswesen, bei denen mechanische Schwingungen auftreten!
4. Auf welche Weise dämpft man die Schwingungsübertragung eines Kraftwagenmotors auf das Chassis?
5. Welche Frequenz zeigt der Zungenfrequenzmesser nach Abbildung **68/3** an?
6. Welche physikalischen Gesetze über Gleichgewichtslagen werden beim Auswuchten benutzt?
7. Wenn marschierende Gruppen kleinere Brücken im Gleichschritt überqueren, können diese in Schwingungen geraten. Erklären Sie den Vorgang!
8. Berichten Sie über Beobachtungen, die Sie zu Hause machen, wenn schwere Fahrzeuge vorüberfahren!
9. Warum müssen PKW-Räder sorgfältig ausgewuchtet sein? Welche Gefahrenquellen ergeben sich durch nicht ausgewuchtete Räder?
10. Nennen Sie Resonanzbeispiele aus dem täglichen Leben!

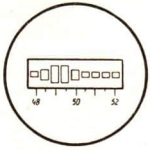


Abb. 68/3
Zungenfrequenzmesser

14. Entstehung von Wellen – Wellenarten

1. Die Ausbreitung eines Schwingungsvorganges. Wirft man einen Stein in ruhendes Wasser, so geraten die Wasserteilchen in Schwingungen. Es entstehen *Wellenberge* und *Wellentäler*, die über die Wasseroberfläche hinwegwandern. Die Wasserteilchen selbst bewegen sich nicht vom Ort weg. Das kann man deutlich zum Beispiel an einem schwimmenden Holzstückchen erkennen, das beim Durchgang der Wellen an einer Stelle schwingt, sich aber nicht mit den Wellen fortbewegt. Der Schwingungsvorgang erfaßt immer mehr Wasserteilchen und breitet sich damit aus.

Ähnliches gilt für den Schall. Beispielsweise werden die Schwingungen einer Lautsprechermembran auf die umgebenden Luftteilchen übertragen. Sie beginnen ebenfalls zu schwingen. Um den Lautsprecher breitet sich eine *Schallwelle* aus.

In allen Beispielen wird der Schwingungszustand weitergegeben. *Die Teilchen selbst führen nur Schwingungen um die Ruhelage aus, wobei jedes Teilchen das folgende zum Schwingen anregt.* Die Ausbreitung eines Schwingungsvorganges wird in folgendem Experiment genauer untersucht:

Eine Anzahl gleichlanger Fadenpendel ist an einem Stativstab befestigt (Abb. 69/1). Alle Pendel sind durch gespannte Fäden miteinander gekoppelt (vgl. S. 63). Wird eines der Pendel aus seiner Gleichgewichtslage gebracht, so führt es um die Ruhelage Schwingungen aus. Durch die Kopplung wird die Schwingung auf die benachbarten Pendel übertragen. Jedes Pendel erreicht etwas später als das vorhergehende seine größte Elongation. Die Einzelschwingungen sind demnach gegeneinander phasenverschoben. Die Schwingungen der einzelnen Teile verschmelzen zu einer Gesamtbewegung, die sich durch die Pendelreihe ausbreitet (Abb. 69/2). Man nennt diese Bewegung eine *fortschreitende Welle.*

Abb. 69/1. Pendelvorrichtung zur Erzeugung einer Welle. Die einzelnen Pendel schwingen senkrecht zur Zeichenebene.

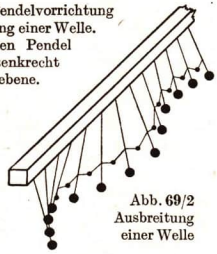


Abb. 69/2 Ausbreitung einer Welle

Voraussetzung für das Entstehen einer fortschreitenden Welle ist somit *eine Anzahl schwingungsfähiger Teilchen, die miteinander gekoppelt sind.* Ihre Gesamtheit nennt man das *Medium der Welle.*

In einem Medium entsteht eine fortschreitende Welle dadurch, daß eine Reihe gekoppelter Teilchen zeitlich nacheinander gleichartige Schwingungen ausführt. Die Schwingungen der Einzelteilchen sind gegeneinander phasenverschoben.

2. Energieübertragung durch Wellen. Um das erste Pendel einer gekoppelten Pendelreihe zu Schwingungen anzuregen, muß ihm *Energie zugeführt werden.* Diese Energie überträgt sich durch die Kopplung auch auf die anderen Pendel; denn diese beginnen ebenfalls zu schwingen.

Mit der Ausbreitung von Wellen ist eine Energieübertragung verbunden.

Besonders gut ist diese Energieübertragung bei *Wasserwellen* zu beobachten. Ein fahrender Dampfer ruft auf einem Fluß Wellen hervor. Sie breiten sich über die Wasseroberfläche aus und treffen auf das Ufer. Dort bewegen sie kleine Steinchen und Pflanzen. Bei Sturm können die Meereswellen sogar Zerstörungen an den Küstenbefestigungen hervorrufen. An der Westküste des Darß verschob sich unter der zerstörenden Wirkung der Wellen die Strandlinie nach Osten. Um dieses Zerstörungswerk aufzuhalten, hat man Holzpfähle seewärts dammartig in den Grund gerammt oder Steindämme errichtet. An diesen Buhnen brechen sich schräg anlaufende Wellen.

Bei *Erdbeben* breitet sich der Schwingungsvorgang ebenfalls als Welle aus. Die Energie der Erdbebenwellen ist auch in großer Entfernung vom Ort des Bebens noch beträchtlich. Beispielsweise ist die Erdbebenwarte in Jena in der Lage, an einem beliebigen Ort der Erde entstehende Erdbeben zu registrieren Die Aufzeichnung der Erdbebenwellen erfolgt mit Hilfe sehr schwerer Pendel, sogenannter *Seismographen*.

3. Wellenarten. Je nach der Schwingungsrichtung der Teilchen und der Ausbreitungsrichtung der Welle unterscheidet man verschiedene *Wellenarten*.

Bei dem in Abbildung **70**/1 dargestellten Versuch schwingen die einzelnen Teilchen *senkrecht zur Ausbreitungsrichtung* der Welle. Solche Wellen heißen **Transversalwellen.** Mechanische Transversalwellen sind nur in festen Körpern möglich.

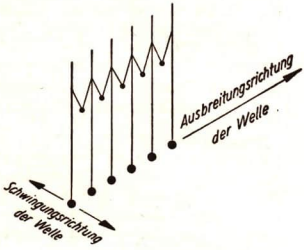


Abb. **70**/1. Schwingungsrichtung der Teilchen bei einer Transversalwelle

Eine Welle, bei der die gekoppelten Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen, nennt man eine Transversal- oder Querwelle.

Bei der Ausbreitung von Schallwellen *fallen dagegen Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung der einzelnen Teilchen zusammen.* Man bezeichnet solche Wellen als **Longitudinalwellen.** Sie können in allen Stoffen, unabhängig vom Aggregatzustand, auftreten.

Die Vorgänge bei Longitudinalwellen können durch einen Modellversuch veranschaulicht werden. Man benutzt dazu die in Abbildung **71**/1 wiedergegebene *Wellenmaschine.* Eine Anzahl bifilarer Pendel ist so in einer Reihe angeordnet, daß alle Pendel nur in Richtung dieser Reihe schwingen können. Da sie nicht miteinander gekoppelt sind, entsprechen die im folgenden beschriebenen Vorgänge nur in ihrer äußeren Erscheinung, nicht aber in energetischer Hinsicht den Longitudinalwellen. Alle Pendel werden nacheinander angestoßen, indem man mit einem kleinen Brett leicht streifend unter den Pendelkörpern entlangfährt. Man sieht eine Stelle durch die Reihe hindurchlaufen, an der sich die Pendelkörper zusammendrängen. Ihr folgt eine Stelle, an der der Abstand der Pendelkörper stark vergrößert ist. Beide Erscheinungen wiederholen sich regelmäßig. *Verdichtungen* und *Verdünnungen* laufen hintereinander durch die Reihe hindurch. Der dargestellte Vorgang stellt eine Longitudinalwelle nur modellmäßig dar. Gesetzmäßigkeiten dürfen aus solchen

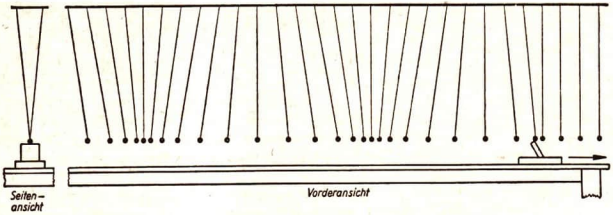


Abb. 71/1. Modellversuch zur Veranschaulichung einer Longitudinalwelle

Modellversuchen nicht abgeleitet werden. Der Versuch dient nur zur Veranschaulichung der Längswellen.

Eine Welle, bei der die einzelnen Teilchen in der Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen, nennt man eine Longitudinal- oder Längswelle.

Wasserwellen können für die Veranschaulichung von Wellenvorgängen und die Ableitung der Gesetzmäßigkeiten von Wellen herangezogen werden. Wasserwellen könnte man auf den ersten Eindruck hin für Transversalwellen halten. Die Wasserteilchen an der Oberfläche der Flüssigkeit führen jedoch kleine kreisende Bewegungen aus. Bei Transversalwellen erfolgen dagegen die Bewegungen der Teilchen geradlinig. Im Unterschied zu den Transversalwellen sind die Wellenberge der Wasserwellen schmaler als die Wellentäler (Abb. 71/2).

4. Ebene Wellen und Kugelwellen. Im allgemeinen breiten sich Wellen flächenhaft oder räumlich aus. Wasserwellen breiten sich über die gesamte Wasseroberfläche aus, Schallwellen und Lichtwellen erfüllen den ganzen Raum.

Die Abbildung 71/3a zeigt einen Schnitt durch eine Wasserwelle. Alle Teilchen, die sich auf kreisförmigen konzentrischen Ringen

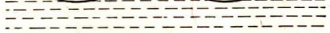


Abb. 71/2. Form einer Wasserwelle

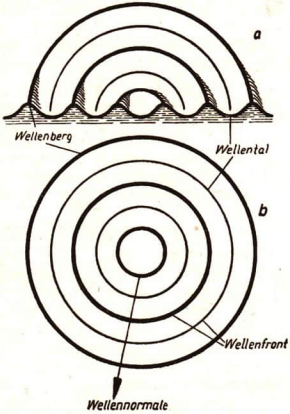


Abb. 71/3. Zeichnerische Darstellung einer Wasserwelle

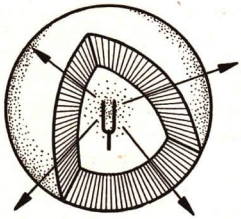


Abb. 72/1. Kugelwellen um eine Stimmgabel

befinden, weisen zu dem bestimmten Zeitpunkt der Beobachtung den gleichen Schwingungszustand, die gleiche Phase, auf.

Die Linien, die phasengleich schwingende Teilchen miteinander verbinden, heißen *Wellenfronten*. Wellenfronten werden zeichnerisch dargestellt, indem man sie auf eine waagerechte Ebene projiziert (Abb. 71/3 b). Man zeichnet nur die Wellenfronten, die den Amplituden der Wellenberge oder der Wellentäler entsprechen.

Die auf der Wellenfront errichtete Senkrechte gibt die Richtung an, in der sich der Wellenvorgang ausbreitet. Sie heißt *Wellennormale*.

Um eine schwingende Stimmgabel bilden sich *Kugelwellen* (Abb. 72/1). Statt der Wellenfronten muß man sich um die Stimmgabel herum *Wellenflächen* vorstellen. Alle Luftteilchen auf einer solchen Kugelfläche schwingen in gleicher Phase. Jeder Mittelpunktschnitt durch Kugelwellen kann entsprechend der Abbildung 71/3 b dargestellt werden. Diese schematische Darstellung läßt sich auch auf Longitudinalwellen übertragen. Die einzelnen Wellenfronten bedeuten hier nicht Wellenberge oder Wellentäler, sondern Stellen der Verdichtung oder der Verdünnung.

Auf einer Wellenfläche oder einer Wellenfront befinden sich alle Teilchen im gleichen Schwingungszustand. Die Wellennormale gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an. Sie steht senkrecht auf der Wellenfläche oder Wellenfront.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Welches Merkmal einer Welle fehlt bei der Ausbreitung des Schwingungszustandes in einem Ährenfeld? Mit welchem Versuch läßt sich der Vorgang vergleichen?
2. Was versteht man in der Physik unter einer Welle?
3. Zeigen Sie den Unterschied zwischen Transversal- und Longitudinalwellen auf und geben Sie Beispiele für beide Wellenarten an!
4. Welche physikalischen Gesetze werden bei einer Dampframme angewendet?
5. Warum können bei Explosionen noch in größerer Entfernung die Fensterscheiben zerstört werden?
6. Einem Kinde ist ein Ball in einen Teich gefallen. Es wirft Steine hinter den Ball in das Wasser. Warum wird der Ball auf diese Weise im allgemeinen nicht an das Ufer gelangen?
7. Die Erdbebenwellen breiten sich an der Erdoberfläche als Transversalwellen, im Erdinneren als Longitudinalwellen aus (Abb. 72/2). Beide Wellenarten werden als „Vorläufer" beziehungsweise als „Hauptbeben" registriert. Warum können die Erdbebenforscher aus der Aufzeichnung des Bebens die Entfernung des Erdbebens bestimmen?

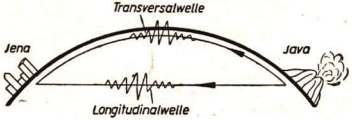


Abb. 72/2. Ausbreitung von Erdbebenwellen

15. Bestimmungsstücke einer Welle und die zeichnerische Darstellung von Wellen

1. Zeichnerische Darstellung einer Transversalwelle. Betrachtet man das *Augenblicksbild einer fortschreitenden Transversalwelle* an der Wellenmaschine, wie es die Abbildung **73**/1 zeigt, von oben, so sieht man, daß die Pendelkörper sich auf einer *Sinuskurve* befinden. Das Bild entspricht der Kurve, die man bei der Aufzeichnung einer harmonischen Schwingung erhält.

Hinsichtlich ihrer Deutung unterscheiden sich die graphischen Darstellungen einer Schwingung und einer Welle wesentlich voneinander. Bei einer Schwingung wird der sich dauernd wiederholende Bewegungsvorgang eines einzelnen schwingenden Teilchens dargestellt. Die Abszissenachse ist die Zeitachse. *Die Elongation der Schwingung ist demnach vom Zeitpunkt der Beobachtung abhängig. Die Elongation ist eine Funktion der Zeit.*

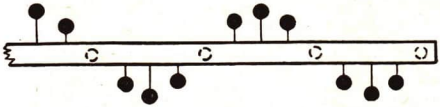


Abb. **73**/1. Augenblicksbild einer Transversalwelle

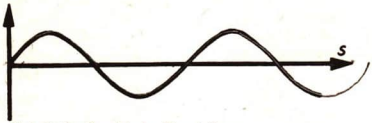


Abb. **73**/2. Graphische Darstellung einer Transversalwelle

Abb. **73**/3. Wellenbild zu verschiedenen Zeitpunkten

In der bildlichen Wiedergabe einer Transversalwelle wird dagegen die jeweilige Elongation aller schwingenden Teilchen des Mediums in einem bestimmten Augenblick festgehalten. Die Abszissenachse gibt die Entfernung vom Erregungszentrum an. *Die jeweilige Elongation ist also eine Funktion der Entfernung der schwingenden Teilchen vom Erregungszentrum* (Abb. **73**/2).

Das Fortschreiten einer Welle wird dadurch veranschaulicht, daß man das Wellenbild zu verschiedenen aufeinanderfolgenden Zeitpunkten darstellt (Abb. **73**/3).

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

a) Die **Frequenz** f einer Welle ist gleich der Schwingungsfrequenz der einzelnen Teilchen. Sie wird ebenfalls in Hertz gemessen. Im allgemeinen besitzen die Teilchen eines schwingungsfähigen Mediums (beispielsweise Luft, Wasser oder feste Körper) keine Eigenfrequenz, so daß ihre Schwingungszahl stets von der Erregerfrequenz bestimmt wird.

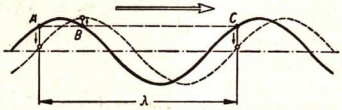


Abb. 74/1. Schwingungszustand der Teilchen einer fortschreitenden Welle

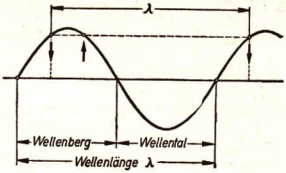


Abb. 74/2. Wellenlänge einer fortschreitenden Welle

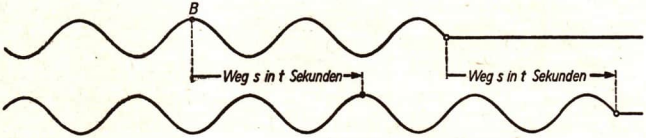


Abb. 74/3. Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle

b) Die **Amplitude** x_0 einer Welle ist gleich der Amplitude der einzelnen schwingenden Teilchen. Vom Entstehungsort der Welle aus nimmt die Amplitude der fortschreitenden Welle allmählich ab. Die Abnahme ist von der Dämpfung abhängig. Bei großer Dämpfung nimmt die Amplitude der Welle sehr schnell ab.

Die Amplitude ist auch ein Kennzeichen der übertragenen Energie. Eine große Amplitude der fortschreitenden Welle bedeutet eine Übertragung großer Energie.

c) Zwei Teilchen haben dann den *gleichen Schwingungszustand*, die *gleiche* **Phase,** wenn sie nicht nur in der Elongation übereinstimmen, sondern auch die gleiche Schwingungsrichtung haben. So befinden sich in der Abbildung 74/1 die beiden Teilchen A und C im gleichen Schwingungszustand, die Teilchen A und B dagegen nicht. A und B haben zwar den gleichen Ausschlag, bewegen sich aber in entgegengesetzter Richtung. Dies ist an der gestrichelten Kurve der Abbildung 74/1 zu erkennen, die die Welle zu einem späteren Zeitpunkt zeigt.

Den Abstand zweier benachbarter Punkte der Welle, die sich in gleicher Phase befinden, bezeichnet man als **Wellenlänge** λ (Abb. 74/2).

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** c gibt an, wie schnell sich ein bestimmter Schwingungszustand im Medium ausbreitet. Wie bei der Bestimmung der Geschwindigkeit eines gleichförmig bewegten Fahrzeuges stellt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit beispielsweise dadurch fest, daß man die Wegstrecke s mißt, die eine Stelle der Welle von bestimmter Phase in der Zeit t zurücklegt, und den Quotienten aus s und t bildet (Abb. 74/3).

$$c = \frac{s}{t}.$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird in $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ oder in $\mathrm{km \cdot s^{-1}}$ gemessen.

Zwischen der Frequenz, der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang. Während sich die Welle um eine Wellenlänge vorwärtsschiebt, vollführt jedes Teilchen eine ganze Schwingung. Ersetzt man

in der Gleichung $c = \frac{s}{t}$ die beliebige Strecke s durch die Strecke λ, so ist die Zeit t jetzt die Schwingungsdauer T. Nach T Sekunden wiederholt sich die gleiche Phase.

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

Setzt man $T = \frac{1}{f}$, so erhält man die **Grundgleichung der Wellenlehre:**

$$\boxed{c = \lambda \cdot f}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle ist gleich dem Produkt aus der Wellenlänge und der Frequenz.

Mit Hilfe dieser Gleichung kann bei allen Wellenerscheinungen aus zwei bekannten Größen die dritte unbekannte Größe bestimmt werden. Dadurch ist es beispielsweise möglich, die Wellenlänge der von einem Rundfunksender ausgestrahlten Wellen zu berechnen, wenn man die Frequenz und die Ausbreitungsgeschwindigkeit kennt.

Beispiel: $f = 900\ \text{kHz} = 900\,000\ \text{s}^{-1}$

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

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^5}{9 \cdot 10^5}\ \frac{\text{km} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{s}^{-1}} = \frac{1}{3}\ \text{km}.$$

Breiten sich zwei beliebige Wellen gleicher Wellenlänge im gleichen Medium aus, so weisen sie meist eine Verschiebung gegeneinander auf. Das bedeutet, daß sich die Wellen an einem beliebig gewählten Beobachtungspunkt in verschiedenen Schwingungszuständen befinden. Man bezeichnet den an einem Beobachtungsort zwischen den Wellen bestehenden Unterschied des Schwingungszustandes als den *Phasenunterschied* der Wellen oder als die *Phasenverschiebung*. Der Phasenunterschied wird meistens in Bruchteilen der Wellenlänge λ angegeben, zum Beispiel $\frac{\lambda}{2}; \frac{\lambda}{3}; \frac{\lambda}{10}$. Je nachdem, ob der Anfangspunkt der zweiten Welle vor oder hinter dem Anfangspunkt der ersten Welle liegt, spricht man von einer *Phasenvoraneilung* oder einer *Phasenverzögerung*. Die Abbildung 75/1 gibt dafür zwei Beispiele.

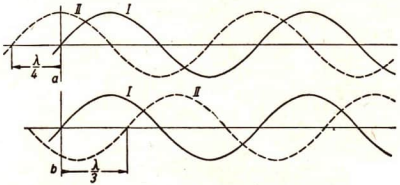


Abb. 75/1. Phasenunterschied zwischen zwei Wellen gleicher Wellenlänge

3. Fragen und Aufgaben:

1. Vergleichen Sie die zeichnerische Darstellung einer Schwingung und die einer Transversalwelle und erklären Sie die dargestellten Vorgänge!
2. Wie groß ist die Wellenlänge einer Wasserwelle, deren Frequenz 13,5 Hz beträgt und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit mit 23 cm · s^{-1} bestimmt worden ist?
3. Welche Frequenz hat eine Schallwelle, deren Wellenlänge in Luft 77 cm beträgt? ($c_{Luft} \approx 340\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
4. Zeichnen Sie zwei Wellen gleicher Wellenlänge, die eine Phasenverschiebung von $\frac{\lambda}{3}$ aufweisen ($\lambda = 6$ cm; $x_0 = 1{,}5$ cm)!

16. Die Interferenz

1. Interferenzerscheinungen. Bisher wurde jeweils nur die Ausbreitung eines Wellensystems untersucht. Die Wellen gingen dabei nur von einem Erregungszentrum aus. Jedes Teilchen wurde nur von diesem einen Wellensystem getroffen. Welche Vorgänge spielen sich nun ab, wenn Teilchen von zwei verschiedenen Wellenzügen erreicht und bewegt werden? So werden zum Beispiel bei Großveranstaltungen und Kundgebungen viele Lautsprecher aufgestellt, von denen jeder Schallwellen ausstrahlt. Man sollte meinen, daß überall Sprache und Musik besonders gut zu hören sind. Trotzdem gibt es aber Stellen, an denen nur wenig zu hören ist. Die von den einzelnen Lautsprechern kommenden Schallwellen überlagern einander und verursachen eine resultierende Wellenbewegung. Dort, wo man nur wenig hört, muß die Amplitude der resultierenden Welle sehr klein sein. Diese Überlagerung kann bei allen Wellenarten auftreten. Sehr gut läßt sie sich an Wasserwellen beobachten.

Die Wasseroberfläche einer Wellenwanne wird gleichzeitig durch zwei Luftdüsen periodisch erregt (Abb. **76**/1). Dadurch haben die Wellen gleiche Wellenlängen. Die in den Erregungszentren entstehenden Störungen breiten sich als Kreiswellen aus. Sie *durchdringen* und *überlagern* sich. Die Abbildung **76**/2 zeigt das Ergebnis der Überlagerung. Auffällig ist, daß die Wellenfronten von Streifen ruhigen Wassers durchsetzt werden, die von dem Gebiet zwischen den Erregungszentren ausgehen. Im Gebiet der Streifen ist demnach die Wellenbewegung ausgelöscht. *Die Ursache kann nur die Überlagerung der beiden Kreiswellen sein.* Eine Erklärung ist mit Hilfe der Abbildung **77**/1 möglich.

Die dunklen Kreisringe sollen die Wellenberge, die hellen die Wellentäler darstellen. In den durch Pfeile gekennzeichneten Richtungen fallen die Wellenberge des einen Erregungszentrums mit den Wellentälern des anderen zusammen. Da die Amplituden gleich sind, füllen die Wellenberge die Wellentäler gewissermaßen aus (vgl. Abb. **77**/3b). Zwischen den Streifen ruhigen Wassers liegen Gebiete kräftiger

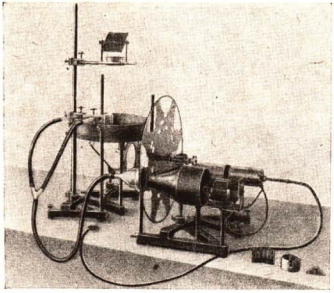


Abb. **76**/1
Wellenwanne mit zwei Luftdüsen

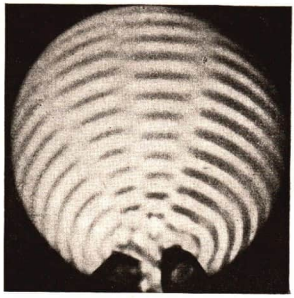


Abb. **76**/2
Zwei sich durchdringende Wasserwellen

Wellenbewegung. Dort treffen die Wellenberge bzw. die Wellentäler beider Systeme zusammen (vgl. Abb. 77/3a).

Man bezeichnet die *Überlagerung zweier Wellensysteme* als **Interferenz.** Im engeren Sinne versteht man unter Interferenz die zu einer Auslöschung führende Überlagerung von Wellen. Die in der Wellenwanne beobachteten Streifen ruhigen Wassers heißen *Interferenzstreifen.*

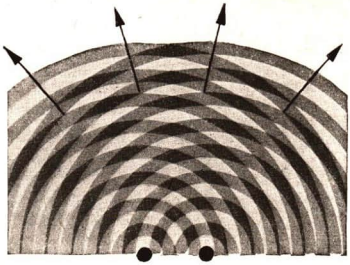


Abb. 77/1. Schematische Darstellung der Überlagerung zweier Wasserwellen

2. Zeichnerische Darstellung von Interferenzen. Die Form der resultierenden Welle kann *zeichnerisch* ermittelt werden, indem man die Ausschläge der beiden einander überlagernden Wellen an jeder Stelle geometrisch addiert. Die Abbildung 77/2 zeigt zwei Beispiele für die Überlagerung zweier Wellen gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude. Man erkennt, daß in diesem Falle die Amplitude der resultierenden Welle vom Phasenunterschied der einander überlagernden Wellen abhängt. Die größte Amplitude der resultierenden Welle ergibt sich, wenn sich beide Wellen in gleicher Phase befinden, somit kein Phasenunterschied besteht (Abb. 77/3a). Beträgt die Phasenverschiebung jedoch eine halbe Wellenlänge, $\varphi = \frac{\lambda}{2}$, so löschen die beiden Wellen einander gegenseitig aus (Abb. 77/3b).

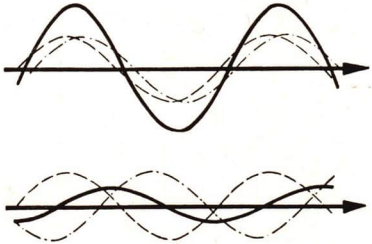


Abb. 77/2. Graphische Darstellung der Überlagerung zweier Wellen gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude

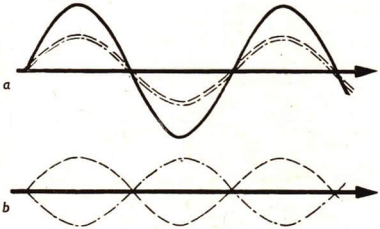


Abb. 77/3. Überlagerung zweier Wellen gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude

a) $\varphi = 0$ b) $\varphi = \frac{\lambda}{2}$

Die Lage und die Anordnung der Interferenzstreifen ergibt sich aus folgenden Überlegungen (Abb. 78/1). Bei A und B entstehen gleichzeitig zwei Wellen gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude. Außerdem sollen beide die gleiche Phase haben. Bis zum Punkt C haben sie unterschiedliche Wege zurückzulegen. Zwischen beiden Wellen besteht daher beim Eintreffen in C ein Gangunterschied, den man aus der Wegdifferenz $AC - BC$

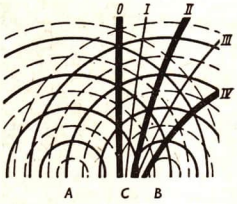


Abb. 78/1. Zeichnerische Darstellung von Interferenzen

bestimmen kann. Im vorliegenden Beispiel beträgt er $1\frac{1}{2} \cdot \lambda - 1 \cdot \lambda = \frac{1}{2} \cdot \lambda$. Auch für alle anderen Punkte längs der Interferenzkurve *I* beträgt der Phasenunterschied $1 \cdot \frac{\lambda}{2}$. Nach Abbildung 78/1 herrscht dort Auslöschung. Untersucht man auf die gleiche Weise den Gangunterschied längs der Kurven *0, I, II, III, IV* usw., so ergibt sich folgende Tabelle:

Entstehung der Interferenzkurven

Interferenzkurve	Gangunterschied		Ergebnis der Überlagerung
0		$0 \cdot \frac{\lambda}{2}$	Verstärkung
I	$1 \cdot \frac{\lambda}{2}$		Auslöschung
II		$2 \cdot \frac{\lambda}{2}$	Verstärkung
III	$3 \cdot \frac{\lambda}{2}$		Auslöschung
IV		$4 \cdot \frac{\lambda}{2}$	Verstärkung
V	$5 \cdot \frac{\lambda}{2}$		Auslöschung
VI		$6 \cdot \frac{\lambda}{2}$	Verstärkung

Man kann auf Grund der Ergebnisse feststellen:

Beträgt der Gangunterschied der beiden einander überlagernden Wellen ein gerades Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$, so verstärken die Wellen einander. Beträgt er ein ungerades Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$, so löschen die Wellen einander aus.

Der Gangunterschied $0 \cdot \frac{\lambda}{2} = 0$ gilt dabei als gerades Vielfaches. Der Mittelstreifen 0 weist demnach eine Verstärkung auf. Alle anderen Punkte zwischen den gezeichneten Kurven haben ebenfalls Gangunterschiede. Die Amplitude der resultierenden Welle ist dort größer als 0 und kleiner als $2 \cdot x_0$, wenn x_0 die Amplitude einer Welle ist. Die Wellenbewegung nimmt daher von den Verstärkungsgebieten zu den Auslöschungsgebieten allmählich ab.

3. Interferenz bei Schallwellen. Die auf S. 76 beschriebene Interferenz von Schallwellen läßt sich mit Hilfe eines Versuches nachweisen. Die Zinken einer Stimmgabel schwingen gleichzeitig aufeinander zu beziehungsweise auseinander. Je zwei Schall-

wellen gehen von der Außenseite der Zinken aus, zwei weitere werden nach innen abgestrahlt. In größerer Entfernung löschen die einzelnen Wellen einander durch Interferenz aus, so daß der Ton einer Stimmgabel nicht weit zu hören ist. Hält man eine schwingende Stimmgabel zwischen den Schlitz eines größeren Holzbrettes (Abb. 79/1), dann ist der Ton sehr laut, wenn die Gabel die Stellung *a* hat. In diesem Falle gelangt zwar nur eine Schallwelle in unser Ohr, da die anderen durch das Brett abgeschnitten werden, es kann aber keine Interferenz auftreten. In Stellung *b* treffen auf unser Ohr dagegen alle vier Wellen, so daß der Ton durch Interferenz nur sehr leise zu hören ist.

Interferenzerscheinungen treten immer auf, wenn Wellen gleicher Wellenlänge einander überlagern. Man kann die Interferenz daher als *typisches Kennzeichen eines Wellenvorganges* betrachten.

Abb. 79/1
Interferenz bei einer Stimmgabel

4. Fragen und Aufgaben:

1. Werfen Sie zwei kleine Steine gleichzeitig nahe beieinander in einen Teich! Was können Sie beobachten?
2. Wie groß ist die resultierende Amplitude zweier Wellen gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude, die einen Phasenunterschied von $2 \cdot \frac{\lambda}{4}$ haben?
3. Zeichnen Sie die Überlagerung zweier Wellen gleicher Wellenlänge und Amplitude, die einen Phasenunterschied von $\frac{4}{10}\lambda$ haben! Welche Aussage läßt sich über die resultierende Amplitude machen?
4. Warum treten bei dem Versuch nach Abbildung 76/2 keine Interferenzlinien, sondern Interferenzstreifen auf (vgl. S. 77)?
5. Zeichnen Sie mit dem Zirkel zwei Kreiswellensysteme, die einander überlagern (vgl. Abb. 78/1)! Die Entfernung der Punkte *A* und *B* beträgt 3,5 cm, $\lambda = 1$ cm. Benutzen Sie für die Darstellung der Wellentäler eine rote Mine! Zeichnen Sie die Gebiete der Auslöschung und Verstärkung ein!
6. Unter welchen Bedingungen gilt die merkwürdige Beziehung: Schall + Schall = Ruhe?

17. Das Huygenssche Prinzip — Die Beugung

1. Das Huygenssche Prinzip. Auf Grund von Versuchen wurde festgestellt, daß sich Wellen in einem Medium geradlinig ausbreiten. Wie erklärt sich aber die folgende Beobachtung? Steht man seitlich von einem geöffneten Fenster, so kann man unter Umständen hören, wenn sich Menschen in dem Zimmer unterhalten. Eine Reflexion des Schalles soll bei dieser Beobachtung nicht möglich sein. Wie gelangen die Schallwellen von der Schallquelle zum Beobachter, obwohl die sprechenden Menschen durch die Wand verdeckt sind?

Diese Vorgänge können wieder mit Hilfe von Wasserwellen untersucht werden. In einer Wellenwanne werden geradlinige Wasserwellen hervorgerufen. Man läßt sie gegen ein Hindernis anlaufen, in dem sich ein schmaler Spalt befindet. Aus dem Spalt treten wieder kreisförmige Wellen heraus, die in das durch das Hindernis abgeschirmte

Christian Huygens (1626 bis 1695)

Gebiet hineinreichen (Abb. 80/1). *Das Zentrum dieser neu entstehenden Wellen liegt offensichtlich im Spalt.*

Eine Erklärung dieser Erscheinung ergibt sich aus Überlegungen, die erstmalig der holländische Physiker *Christian Huygens* anstellte. Er untersuchte die Ausbreitung von Wellen und kam 1678 zu folgender Erkenntnis, die später durch Versuche bestätigt wurde:

Um jeden Punkt eines Mediums, der von einer sich ausbreitenden Welle erreicht wird, bilden sich neue kreisförmige Wellen, sogenannte Elementarwellen.

Im Versuch regt also die anlaufende Welle die Wasserteilchen in der Spaltöffnung zu Schwingungen an. Im Spalt entstehen Elementarwellen, die sich nach außen kreisförmig ausbreiten, nach innen jedoch durch die vom Zentrum nachfolgenden Wellen überdeckt werden.

Warum kann man nun bei ungehinderter Ausbreitung der Wellen keine Elementarwellen beobachten? Zur Erklärung dieser Erscheinung dient folgender Versuch: Man umgibt ein Wellenzentrum mit einem Ring, der viele Öffnungen hat (Abb. 80/2). Aus jeder Öffnung treten Elementarwellen heraus. Sie überlagern einander so, daß sie in einer bestimmten Entfernung vom Ring wieder zu einer gemeinsamen Wellenfront verschmelzen. Diese neue, aus den Elementarwellen durch Überlagerung entstandene Wellenfront ist identisch mit der Wellenfront, die ohne Behinderung durch den Ring fortwandert.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Ausbreitung von linearen Wasserwellen. Die Abbildung 80/1 zeigt, daß auch hier jede Stelle zum Ausgangspunkt von Elemen-

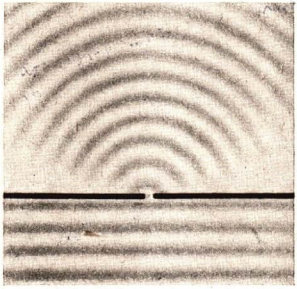


Abb. 80/1. Ausbildung einer Kreiswelle um einen Punkt einer linearen Frontwelle

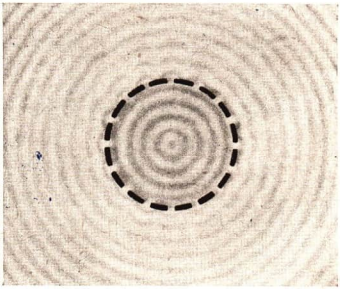


Abb. 80/2. Zusammensetzung von Elementarwellen zu einer neuen Wellenfront

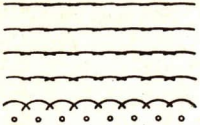


Abb. 81/1
Die Elementarwellen setzen sich zu einer gemeinsamen linearen Wellenfront zusammen.

Abb. 81/2
Eine kurzzeitige Schallwelle (Knall) wird durch ein besonderes Verfahren sichtbar gemacht. Im unteren Teil breitet sich die Wellenfront ungestört aus. Oben entstehen in den Ringöffnungen Elementarwellen, die sich zu einer gemeinsamen Wellenfront zusammensetzen.

tarwellen wird. Das Verschmelzen der Elementarwellen zu einer gemeinsamen Front kann in folgendem Versuch nachgewiesen werden: Die Wasseroberfläche wird durch eine Reihe eng beieinanderliegender Düsen erregt. Jede Düse bildet ein Erregungszentrum; die ganze Reihe veranschaulicht die Zentren der Elementarwellen einer geraden Wellenfront. Die Elementarwellen überlagern einander, so daß in einiger Entfernung von den Erregungszentren wieder eine lineare Wellenfront entsteht (Abb. 81/1).

Diese an Beispielen der Wasserwellen gewonnenen Erkenntnisse gelten für alle Wellenarten. Die Abbildung 81/2 zeigt die Ausbreitung einer kurzzeitigen Schallwelle, wie sie bei einem Knall auftritt. In der Mitte der Versuchsanordnung wird einmalig eine solche Schallwelle hervorgerufen. Das Hindernis enthält Öffnungen, die als Erregungszentren aufzufassen sind. Da vom ursprünglichen Erregungszentrum keine neuen Wellen nachrücken, sind um die Öffnungen kugelförmige Elementarwellen zu sehen. Die gemeinsame Wellenfront an der Außenseite hat den gleichen Radius wie die vom Zentrum ausgehende Wellenfront.

Die Huygenssche Erklärung der Wellenausbreitung gilt für transversale und longitudinale Wellen. Das **Huygenssche Prinzip** stellt daher das grundlegende Gesetz der Wellenlehre dar.

Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen Welle. Diese Elementarwellen setzen sich zu einer gemeinsamen Wellenfront zusammen.

Mit Hilfe des Huygensschen Prinzips kann man die Reflexion und die Brechung von Wellen erklären (vgl. S. 83 und 86).

2. Die Beugung von Wellen. Mit Hilfe dieser Kenntnisse kann man auch die Beobachtung beim Hören außerhalb eines Zimmers erklären (vgl. S. 79). Nach dem Huygensschen Prinzip breiten sich Schallwellen wie alle Wellen hinter einem Hindernis auch in das abgeschirmte Gebiet hinein aus (vgl. Abb. 80/1 und 80/2). Diese Erscheinung nennt man **Beugung**. Sie tritt stets dann auf, wenn eine Welle eine schmale Öffnung durchläuft. Man erkennt die Beugung daran, daß die Wellennormalen hinter der Öffnung eine Richtungsänderung erfahren (Abb. 81/3).

Wie weit die Beugung in den Raum hinter dem Hindernis hineinreicht, hängt von dem *Verhältnis der Spaltöffnung zur Wellenlänge* ab. Liegt die Spaltbreite in der

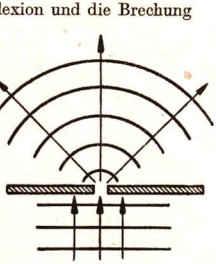


Abb. 81/3
Beugung an einem Spalt

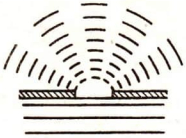


Abb. 82/1
Durch Beugung an einem Spalt entstandene Interferenzstreifen

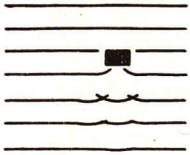


Abb. 82/2
Beugung hinter einem kleinen Hindernis

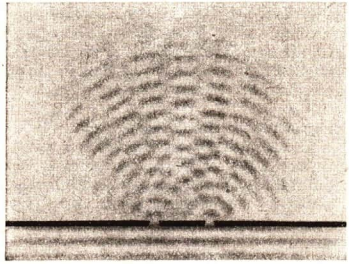


Abb. 82/3
Interferenz hinter einem Hindernis mit Doppelspalt

Größenordnung der Wellenlänge oder ist sie kleiner (wie in Abb. 81/3), so greift die Wellenbewegung weit in das Gebiet hinter dem Hindernis hinein.

Eine besonders auffällige Beugungserscheinung ist zu beobachten, wenn die Spaltbreite ein kleines Vielfaches der Wellenlänge ist. In diesem Falle entstehen hinter dem Spalt *Interferenzstreifen verstärkter und ausgelöschter Wellenbewegung* (Abb. 82/1). Ihre Entstehung kann hier nicht näher erklärt werden.

Ist dagegen die Spaltbreite gegenüber der Wellenlänge sehr groß, so sind die Beugungserscheinungen kaum wahrnehmbar. Das Hindernis wirft gewissermaßen einen Schatten.

Von einer Beugung spricht man auch, wenn sich Wellen um ein kleineres Hindernis herum ausbreiten (Abb. 82/2).

Die Beugung ist ein charakteristisches Kennzeichen für die Wellennatur eines Vorganges. Beugungserscheinungen sind vor allem in der Optik von Bedeutung. Sie werden dort ausführlich behandelt.

Man erkennt die Beugung daran, daß hinter einem Spalt oder einem kleineren Hindernis eine Ausbreitung der Welle auch in seitlicher Richtung erfolgt.

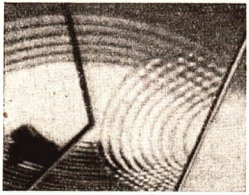
3. Fragen und Aufgaben:

1. Erklären Sie das Auftreten von Interferenzstreifen hinter einem Hindernis nach Abb. 82/3! Benutzen Sie dazu das Huygenssche Prinzip und die Erklärungen auf S. 78!
2. Untersuchen Sie mit Hilfe einer Signalpfeife die Beugung von Schallwellen hinter einem Baum, einer Hütte, einer Scheune oder Hindernissen ähnlicher Größe!
3. Zeichnen Sie einen Kreis mit dem Radius $r = 5$ cm als Momentbild einer Kreiswelle! Legen Sie um eine größere Anzahl von Punkten kleine Kreise mit dem Radius $r_1 = 1$ cm als Bilder der Elementarwellen! Zeichnen Sie nach dem Augenmaß die fortgeschrittene Wellenfront!

18. Reflexion von Wellen – Stehende Wellen

1. Reflexion von Wellen. Das **Echo** beruht auf der Tatsache, daß Schallwellen an einem Hindernis zurückgeworfen werden, man sagt, sie werden **reflektiert.** Zur Untersuchung der Vorgänge bei der **Reflexion** von Wellen erzeugt man Kreiswellen. An einem geradlinigen Hindernis werden die Kreiswellen *reflektiert* (Abb. 83/1).

Abb. 83/1. Reflexion einer Kreiswelle an einem geradlinigen Hindernis



Die reflektierten Wellenfronten sind wiederum kreisförmig.

Wellen mit linearer Wellenfront werden an Hindernissen ebenfalls reflektiert. Am einfachsten läßt sich die Reflexion erklären, wenn man eine einzelne geradlinige Wellenfront graphisch darstellt (Abb. 83/2). Die Wellenfront trifft bei A auf die Wand. Nach dem Huygensschen Prinzip bildet sich um A eine Elementarwelle. Nach einer gewissen Zeit wird von der fortschreitenden Wellenfront der Punkt B erreicht. Die in dieser Zeit durchlaufene Strecke sei λ. Auch um B bildet sich eine Elementarwelle. Die zum ersten Zeitpunkt um A entstandene Elementarwelle hat sich inzwischen ebenfalls um die Strecke λ ausgebreitet. Die fortschreitende Wellenfront erreicht dann den Punkt C, um den eine weitere Elementarwelle entsteht. Der Radius der Wellen um A und B beträgt zu diesem Zeitpunkt $2 \cdot \lambda$ beziehungsweise λ. Der Einfachheit halber sind nur die Elementarwellen für vier Punkte gezeichnet. In Wirklichkeit treten an allen Stellen des Hindernisses, die von der einfallenden Welle erreicht werden, Elementarwellen auf. Sie durchdringen und überlagern einander zu einer neuen Wellenfront. Auf diese Weise entsteht die reflektierte Wellenfront. Zwischen der Richtung der einfallenden und der der reflektierten Wellenfront bestehen gesetzmäßige Zusammenhänge. Aus Abb. 83/2 ist bereits zu erkennen, daß die einfallende und die reflektierte Wellenfront gleiche Neigung gegenüber der Wand haben. Unter Verwendung der Begriffe Wellennormale und Einfallslot können die Gesetzmäßigkeiten der Reflexion in einfacher Weise dargestellt werden. Die *Wellennormale* gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an. Das *Einfallslot* ist die im Auftreffpunkt der Wellenfront auf dem geradlinigen Hindernis errichtete Senkrechte. Die Richtung der auftreffenden Welle wird durch den *Einfallswinkel* α festgelegt, den man zwischen dem Einfallslot und der Wellennormale mißt (Abb. 83/3). Den vom Einfallslot und der Wellennormale der reflektierten Welle gebildeten Winkel nennt

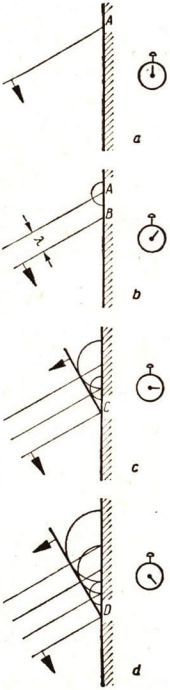


Abb. 83/2
Konstruktion der reflektierten Wellen mit Hilfe von Elementarwellen

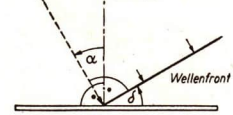


Abb. 83/3
Wellennormale und Einfallslot bei einer einfallenden Welle

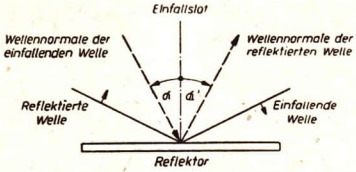


Abb. 84/1. Schematische Zeichnung zum Reflexionsgesetz

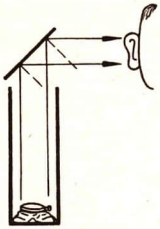


Abb. 84/2. Reflexion von Schallwellen

man den *Reflexionswinkel* α'. Beide Winkel sind gleich groß (Abb. 84/1). Es ergibt sich das **Reflexionsgesetz** einer Welle:

Bei der Reflexion einer Welle an einem geradlinigen Hindernis ist der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel.

$$\boxed{\alpha = \alpha'}\,.$$

Das Reflexionsgesetz kann auch an Schallwellen nachgewiesen werden. Man legt eine tickende Taschenuhr auf den Boden eines langen Glaszylinders (Abb. 84/2). Hält man über die Öffnung eine glatte Scheibe, so kann man in einem ruhigen Raum den Schall auch seitlich wahrnehmen. Die Reflexion des Schalles kann man in manchen Gewölben besonders deutlich feststellen. Flüsternd kann man sich über größere Strecken verständigen (Flüstergewölbe).

2. Stehende Wellen. Ein mehrere Meter langer Wollfaden wird auf der einen Seite über eine Federwaage an einem Stativ, auf der anderen Seite an dem Klöppel einer elektrischen Klingel befestigt. Beim Einschalten der Klingel wird das eine Seilende periodisch erregt, so daß Transversalwellen durch den Faden hindurchlaufen. Da sie am anderen Ende reflektiert werden, kommt es zu einer Überlagerung der anlaufenden und der reflektierten Wellen. Bei richtig gewählter Spannung des Fadens sind in gleichem Abstand Stellen vorhanden, die ständig in Ruhe sind. Dazwischen befinden sich Stellen maximaler Schwingung (Abb. 84/3). Im Gegensatz zu einer fortschreitenden Seilwelle bezeichnet man eine solche Welle als *stehende Welle*. Die ständig in Ruhe bleibenden Stellen heißen *Schwingungsknoten*, die Stellen maximaler Schwingung nennt man *Schwingungsbäuche*.

Man kann das Zustandekommen stehender Wellen zeichnerisch erläutern, indem man die Überlagerung zweier einander entgegenlaufender

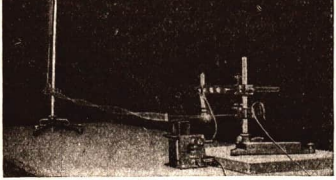


Abb. 84/3. Stehende Transversalwelle auf einem gespannten Faden

Wellenzüge in einer Reihe von Momentbildern festhält (Abb. 85/1). Die beiden Wellen sollen gleiche Wellenlänge und gleiche Amplitude haben. Von Bild zu Bild ist jede der beiden Teilwellen um eine Achtelwellenlänge weitergeschoben, und zwar die eine nach links, die andere nach rechts. Aus der Zeichnung ersieht man, daß die resultierende Welle überhaupt nicht fortschreitet. Die Schnittpunkte der Welle mit der Nullinie bleiben an derselben Stelle liegen. Der Abstand zweier Knoten beträgt jeweils $\frac{\lambda}{2}$.

Stehende Wellen sind bei allen Wellenarten möglich. Mit Hilfe stehender Schallwellen kann man die Wellenlänge eines unbekannten Tones bestimmen, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls bekannt ist. Das *Resonanzrohr* nach Abbildung 85/2 wird zuerst vollkommen in das Wasser eingetaucht und dann langsam herausgezogen. Bei einer bestimmten Länge der Luftsäule hört man eine angeschlagene Stimmgabel sehr laut. Im Resonanzrohr hat sich dann infolge der Reflexion an der Wasseroberfläche eine stehende Welle herausgebildet. Da am Rohrende ein Schwingungsbauch und an der Wasseroberfläche ein Knoten liegt, beträgt die Länge der Luftsäule $\frac{\lambda}{4}$ (Abb. 85/2). Beim weiteren Herausziehen der Röhre wird der Ton leiser und erreicht bei einer Länge von $3 \cdot \frac{\lambda}{4}$ erneut einen Höchstwert. Da bei Stimmgabeln meist die Frequenz angegeben ist, kann man mit Hilfe dieser Anordnung die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls nach der Gleichung $c = \lambda \cdot f$ bestimmen.

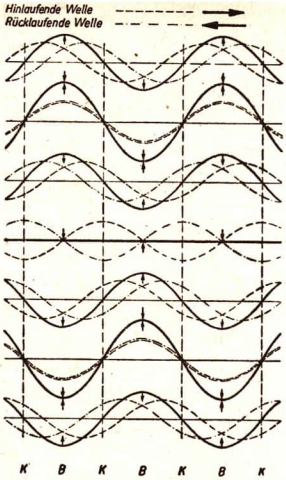


Abb. 85/1. Zeichnerische Darstellung einer stehenden Welle

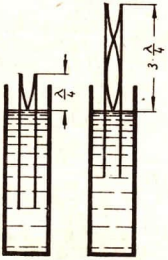


Abb. 85/2. Stehende Schallwellen in einem Resonanzrohr

8. Fragen und Aufgaben:

1. Unter welchen Bedingungen kann das Ticken der Uhr im Versuch nach Abbildung 84/2 am deutlichsten wahrgenommen werden?

2. In einem Resonanzrohr tritt zum ersten Mal eine Verstärkung ein, wenn die Länge der Luftsäule 18 cm beträgt. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit? Die Frequenz der Stimmgabel ist $f = 440$ Hz.

3. Schildern Sie Erscheinungen, bei denen man das Huygenssche Prinzip an Wasserwellen beobachten kann!

19. Brechung von Wellen

1. Brechung von Wellen. Am Ufer eines Sees kann man beobachten, daß Wellen mit geradlinigen Wellenfronten, die aus dem Bereich des tiefen Wassers kommen und schräg auf die Grenzlinie zwischen tiefem und flachem Wasser treffen, beim Übertritt in das Flachwassergebiet aus ihrer Richtung abgelenkt werden. Abb. **86**/1 zeigt den entsprechenden Versuch. Die Richtungsänderung bezeichnet man als **Brechung.**

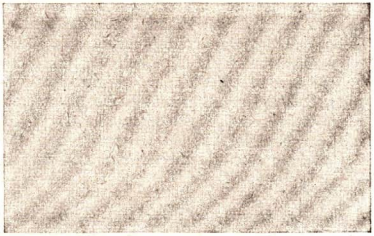


Abb. **86**/1. Brechung von Wasserwellen

In die Wellenwanne legt man eine Glasplatte, die vom Wasser nur einige Millimeter bedeckt ist. In dem flachen Wasser über der Glasplatte haben die Wasserwellen eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit als im tiefen Wasser (Abb. **86**/1). Das Medium mit der größeren Ausbreitungsgeschwindigkeit wird *wellenmäßig dünner* genannt. Im wellenmäßig dichteren Medium breitet sich die Welle langsamer aus (vgl. die folgende Tabelle).

Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien

Wellenart	Medium ist	
	wellenmäßig dichter (geringere Geschwindigkeit)	wellenmäßig dünner (größere Geschwindigkeit)
Wasserwellen	flaches Wasser	tiefes Wasser
	Wasser von $t = 4°C$	Wasser von $t = 20°C$
	Petroleum	Wasser
Schallwellen	kalte Luft	warme Luft
	Kohlendioxid	Luft

Das Huygenssche Prinzip ermöglicht auch eine Erklärung dieses Vorganges. Zur Vereinfachung wird die Darstellung auf eine einzige Wellenfront beschränkt (Abb. **87**/1). Sie trifft im Punkte A auf die Grenzlinie zwischen den beiden Medien (Abb. **87**/1 a). Um A entsteht eine neue Elementarwelle, die jedoch in beiden Medien eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hat. Der Radius der Elementarwellen ist daher im flachen Wasser kleiner als im tiefen Wasser (Abb. **87**/1 b). Beim weiteren Vorrücken der einfallenden Wellenfront entstehen um jeden Punkt der Grenzlinie Elementarwellen. In den Abbildungen **87**/1 c und d sind die Elementarwellen im tiefen Wasser aus Übersichtsgründen nicht mitgezeichnet. Die Elementarwellen im Flachwassergebiet setzen sich zu einer gemeinsamen Wellenfront zusammen. Diese bleibt gegenüber dem Teil zurück, der im wellenmäßig dünneren Medium verläuft.

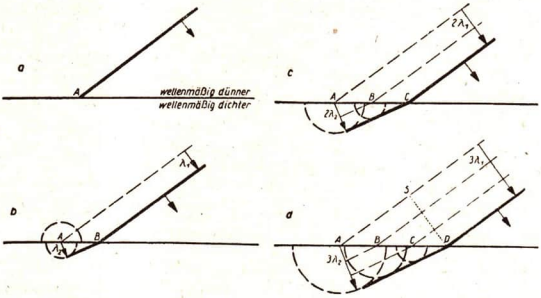


Abb. 87/1 Konstruktion der gebrochenen Welle mit Hilfe von Elementarwellen

Die Wellenfront weist infolgedessen an der Grenzlinie einen Knick auf.

Unter Verwendung der Begriffe *Einfallswinkel* und *Brechungswinkel* können die Vorgänge bei der Brechung qualitativ erfaßt werden. Nach Abbildung 87/2 ergibt sich folgende Regel für die Brechung von Wellen:

Beim Übertritt einer Welle aus einem wellenmäßig dünneren in ein wellenmäßig dichteres Medium werden die Wellenfronten in der Weise gebrochen, daß der Brechungswinkel β kleiner ist als der Einfallswinkel α. Beim Übergang vom dichteren ins dünnere Medium ist der Brechungswinkel β größer als der Einfallswinkel α.

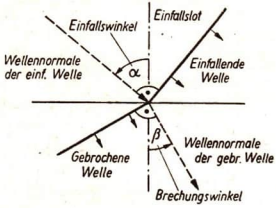


Abb. 87/2. Schematische Zeichnung zur Brechung einer Welle

An der Grenzlinie zweier Medien kommt es auch stets zu einer Reflexion, die bei den schematischen Zeichnungen der Übersichtlichkeit wegen weggelassen wurde.

Jede Brechung einer Welle ist mit einer Reflexion verbunden.

2. Das Brechungsgesetz. Die Zusammenhänge zwischen Einfalls- und Brechungswinkel können auch *quantitativ* ausgedrückt werden. Die Abbildung 87/3 gibt den Brechungsvorgang gemäß Abbildung 87/1 noch einmal vereinfacht wieder. Die einfallende Wellenfront AS hat nach dem Fortschreiten um 3 Wellenlängen die neue Lage TD. Der Punkt A verschiebt sich nach T und der Punkt S nach D. Die verschieden langen Strecken AT und SD werden von der Wellenfront in der gleichen Zeit zurückgelegt. Das ist möglich, weil die Geschwindigkeiten verschieden sind.

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

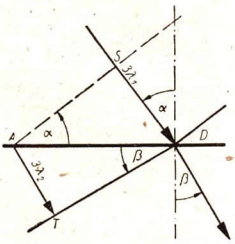


Abb. 87/3. Darstellung zur Ableitung des Brechungsgesetzes

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

$$\sin \alpha = \frac{3\lambda_1}{AD}$$

und für den Brechungswinkel β der Ausdruck

$$\sin \beta = \frac{3\lambda_2}{AD}.$$

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

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{3\lambda_1}{3\lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Da das Verhältnis $\lambda_1 : \lambda_2$ andererseits gleich $c_1 : c_2$ ist, so gilt:

$$\sin \alpha : \sin \beta = c_1 : c_2.$$

Das Verhältnis der Sinuswerte des Einfallswinkels und des Brechungswinkels ist stets gleich dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten. Es heißt **Brechungsverhältnis** oder **Brechungszahl** n.

Das Brechungsgesetz für Wellen lautet:

Beim Übergang einer Welle von einem Medium in ein anderes wird sie gebrochen. Das Brechungsverhältnis ist konstant; es ist gleich dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten in den beiden Medien.

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

3. Fragen und Aufgaben:

1. Erläutern Sie die Brechung einer Wellenfront nach dem Huygensschen Prinzip!
2. Welche Wellenlänge hat eine Wasserwelle der Frequenz $f = 13$ Hz in tiefem Wasser, in dem sie sich mit einer Geschwindigkeit von $c_1 = 23\ \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$ fortbewegt? Welche Wellenlänge hat diese Welle nach dem Übertritt in ein Flachwassergebiet bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von $c_2 = 20\ \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$?
3. Warum ändern Wasserwellen in Teichen und Flüssen ihre Richtung?
4. Wie groß ist das Brechungsverhältnis beim Übergang von Luft in Kohlendioxid ($c_{Luft} = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, $c_{CO_2} = 258\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$)?

20. Der Ultraschall

1. Die Erzeugung von Ultraschall. Können Tiere rechnen? Hin und wieder werden Hunde vorgeführt, die angeblich einfache Rechenaufgaben lösen können. „Rechnende" Tiere gibt es aber nicht. In Wirklichkeit handelt es sich stets um einen Dressurakt: Ein Helfer des Dresseurs gibt unbeobachtet Signale, die den Hund zum Bellen und damit zur „Lösung" der Aufgabe veranlassen. Meist benutzt der Helfer eine *Galtonpfeife*. Die *obere Hörgrenze* des Menschen liegt bei Tönen mit einer Frequenz von etwa 20 kHz. Hunde nehmen noch Töne mit Frequenzen von 35 kHz wahr. Mit der Galtonpfeife können solche hohen Frequenzen zwischen 20 kHz und 35 kHz hervorgerufen werden.

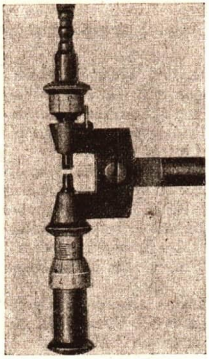


Abb. 89/1
Galtonpfeife

Abb. 89/2
Längsschnitt durch eine Lippenpfeife

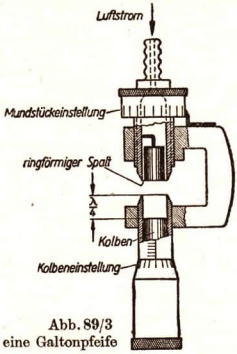


Abb. 89/3
Längsschnitt durch eine Galtonpfeife

Die Galtonpfeife (Abb. 89/1) ist nach dem Prinzip einer *Lippenpfeife* gebaut. Bei der Lippenpfeife stößt der Luftstrom gegen eine scharfe Kante, die Lippe (Abb. 89/2). Dadurch kommt es zur Bildung von Luftwirbeln, die sich periodisch von der Lippe ablösen. Die auftretenden Schwingungen werden durch die Luftsäule im Rohr verstärkt.

Die ganz aus Metall gefertigte Galtonpfeife enthält ein zylindrisches Mundstück. Durch einen ringförmigen Spalt strömt die Luft aus und stößt auf eine ringförmige Schneide, den oberen Rand des Pfeifenrohres. Seine Länge kann durch einen verschiebbaren Kolben geändert werden. Der Abstand zwischen Mundstück und Pfeifenrohr ist ebenfalls veränderlich (Abb. 89/3). Bläst man durch das Mundstück einen starken Luftstrom, so ist ein sehr hoher Ton wahrzunehmen. Die Tonhöhe nimmt zu, wenn die Länge des Pfeifenrohres verkürzt wird und erreicht schließlich die Hörbarkeitsgrenze.

Diese Schallwellen oberhalb der menschlichen Hörgrenze nennt man **Ultraschall.**

Schallwellen mit einer Frequenz von 20 kHz bis 20 MHz bezeichnet man als Ultraschall.

In der Technik erzeugt man Ultraschall vorwiegend mit Hilfe schnell schwingender Platten und Stäbe, die elektrisch erregt werden. Sie heißen *Ultraschallgeber*.

2. Ultraschallwahrnehmung durch Tiere. Außer Hunden gibt es auch andere Tiere, die Ultraschall wahrnehmen. Fledermäuse fliegen in dunklen und mit Hindernissen durchsetzten Räumen deshalb sicher, weil sie fortgesetzt Ultraschallschreie mit einer Frequenz von 30 000 Hz bis 80 000 Hz ausstoßen. Die von einer fliegenden Fledermaus hervorgerufenen Ultraschallwellen werden an Hindernissen reflektiert und von der Fledermaus als Echo wahrgenommen. Diese kann sich dadurch im Raum orientieren und auch Beute erjagen.

Ebenso sind manche Insektenarten mit Ultraschallorganen ausgerüstet, zum Beispiel die Grashüpfer (Conocephalus). Sie erzeugen durch Reiben der Flügeldecken

Ultraschallschwingungen von etwa 40 000 Hz, die sie andererseits auch wahrnehmen können. Auch von Walen ist bekannt, daß sie Ultraschallsignale zu geben und zu empfangen vermögen.

3. Anwendung der Ultraschallstrahlung. Die Tatsache, daß Wale Ultraschall wahrnehmen können, nutzt man bei den Walschreckanlagen aus. Unter dem Walfangschiff sind große Ultraschallgeber angebracht. Ein in größerer Tiefe schwimmender Wal versucht beim Auftreffen von Ultraschallwellen auszuweichen und zur Wasseroberfläche zu gelangen. Er kann dann verfolgt und erlegt werden.

In der Schiffahrt ist es bei Untiefen und Hafeneinfahrten notwendig, die Wassertiefe laufend zu kontrollieren, um ein Auflaufen des Schiffes zu verhindern. Früher wurde zu diesem Zweck die Tiefe mit einem Handlot ermittelt. Das Schiff mußte dabei seine Fahrt sehr stark verlangsamen, da sonst durch die Fahrtgeschwindigkeit das Lot nicht senkrecht hing. Eine Verbesserung stellt das *Echolotverfahren* mit hörbarem Schall dar. Aus der Laufzeit eines Schallimpulses, der am Meeresboden reflektiert wird, kann die Wassertiefe berechnet werden.

Ultraschallwellen können wegen ihrer kleinen Wellenlänge scheinwerferartig gebündelt werden. Die modernen *Echolotgeräte* arbeiten deshalb mit Ultraschall. Abbildung 90/1 zeigt das Prinzip einer *Echolotung*. Durch einen in die Schiffswand eingebauten Ultraschallgeber werden fortlaufend kurze Schallsignale erzeugt. Die Ultraschallwellen durchlaufen das Wasser, werden am Meeresboden reflektiert und von einem in der gegenüberliegenden Schiffswand befindlichen Ultraschallempfänger wieder aufgefangen. Die Registrierung des Echos erfolgt im Innern des

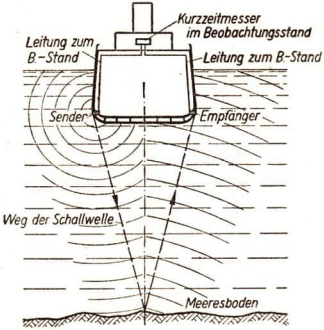


Abb. 90/1. Echolotung

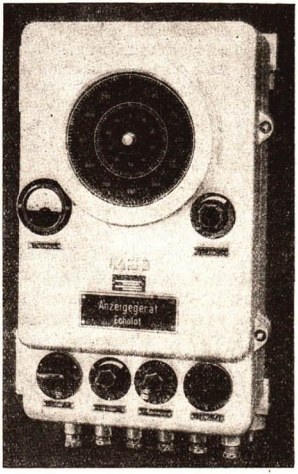


Abb. 90/2. Echolotgerät

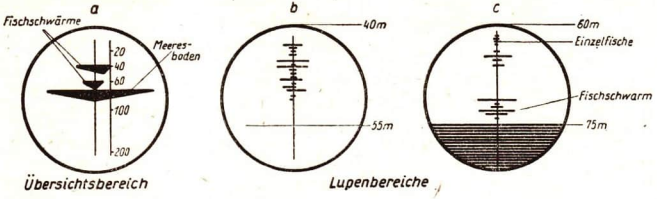


Abb. **91**/1. Schirmbilder einer „Fischlupe"
a) Übersichtsbereich b) Teilbereich 40—55 m c) Teilbereich 60—75 m

Schiffes an einem zentralen Beobachtungsstand. Das Empfangsgerät ist so eingerichtet, daß man an der Skale eines Instrumentes die Wassertiefe ohne Rechnung ablesen kann (Abb. **90**/2). Das Schiff braucht während der Messung die Fahrt nicht zu unterbrechen, da seine Geschwindigkeit gegenüber der hohen Geschwindigkeit des Schalles im Wasser ohne wesentlichen Einfluß auf die Laufzeit des Echos und damit auf die Genauigkeit der Ergebnisse ist. Mit Hilfe des Echolotes kann man auch ausgedehnte Profile des Meeresbodens in verhältnismäßig kurzer Zeit untersuchen, ohne daß die Fahrt unterbrochen zu werden braucht.

Beim *Echografen* werden die zurückkehrenden Ultraschall-Impulse einem Schreibgerät zugeführt, so daß ein Bild des Meeresbodens und der Gegenstände zwischen Schiffskiel und Meeresboden entsteht. Auch Fischschwärme und größere Einzelfische werden registriert. Verwendet man zur Anzeige des Echos eine Braunsche Röhre, so kann man Fischschwärme besonders gut auffinden. Je dichter der Fischschwarm ist, um so mehr Schallenergie wird reflektiert. Die waagerechte Auslenkung des Elektronenstrahls ist dann groß. Solche Geräte heißen *Fischlupen*. Neben einem Übersichtsbereich lassen sich auch Teilbereiche genauer untersuchen (Abb. **91**/1). Alle größeren Fischereifahrzeuge der volkseigenen Fischkombinate Saßnitz und Rostock werden mit Echografen und Fischlupen des VEB Funkwerk Köpenick ausgerüstet. Durch diese und andere Maßnahmen können die Fangergebnisse erheblich verbessert werden. Während im Jahre 1958 die Fischereifahrzeuge der DDR insgesamt einen Fang von etwa 86 000 t erbrachten, steigt das Fangergebnis je Fahrzeug von Jahr zu Jahr weiter an. So wird durch Anwendung neuester Geräte die Arbeitsproduktivität auch im Fischfang gesteigert. Solche neuzeitlichen Verfahren werden dazu beitragen, im Laufe des Siebenjahrplanes den Fischfang auf etwa 215 000 t im Jahre 1965 zu steigern.

Eine große Bedeutung kommt dem Ultraschall in der modernen *Werkstoffprüfung* zu. Insbesondere handelt es sich dabei um das Auffinden von Rissen, Lunkern (Hohlräumen) und Fremdkörpern in metallischen Werkstücken. Ein Ultraschallimpuls wird gegen das zu untersuchende Werkstück gerichtet. Er dringt in das Werkstück ein und wird an dessen Rückseite reflektiert. Ist in dem Werkstück ein Lunker oder ein Riß vorhanden, so findet auch an diesem eine Reflexion statt. Die reflektierten Ultraschallwellen werden auf dem Leuchtschirm einer Braunschen Röhre sichtbar gemacht (Abb. **92**/1). Das Ultraschallverfahren gehört zu den Verfahren der *zerstörungsfreien Werkstoffprüfung* wie beispielsweise auch das Röntgenverfahren (vgl. S. 202) und das Isotopen-Verfahren. Der besondere Vorteil

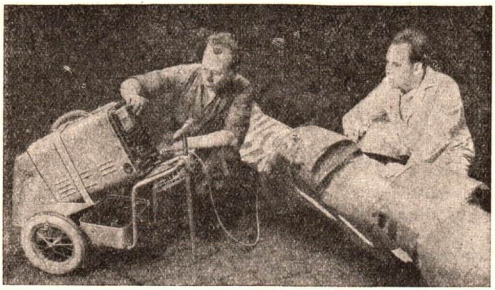


Abb. 92/1
Prüfung einer Welle nach dem Ultraschall-Impuls-Verfahren

des Ultraschallverfahrens gegenüber den anderen Verfahren ist, daß auch sehr dicke Werkstücke geprüft werden können. Es ergänzt daher die anderen Verfahren. Außerdem sind keine besonderen Strahlenschutzmaßnahmen erforderlich.

4. Anwendung der Ultraschallenergie. Zum Beschallen von Flüssigkeiten benutzt man meist sogenannte *Ultraschalltöpfe* (Abb. 92/2). Der Ultraschallgeber befindet sich bei ihnen am Gefäßboden. Ultraschalltöpfe werden zum *Herstellen von Emulsionen* aus Flüssigkeiten verwendet, die sich nur schwer emulgieren lassen. So kann man mit

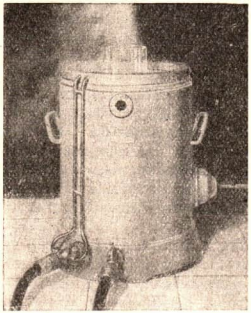


Abb. 92/2. Ultraschalltopf

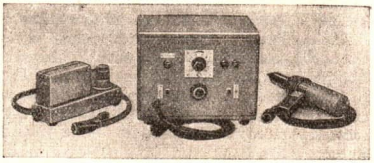


Abb. 92/3. Ultraschall-Lötgerät aus dem VEB Funkwerk Erfurt; in der Mitte der Ultraschallgenerator, rechts der Lötkolben, links ein Ultraschallverzinnungsgerät

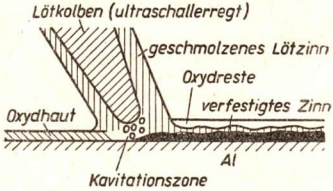


Abb. 92/4
Schematische Darstellung der Ultraschallötung

Hilfe von Ultraschall eine sehr feine Verteilung des Silberbromids in der Gelatine fotografischer Filme und Platten erreichen. Unter dem Einfluß der energiereichen Ultraschallstrahlen kommt es zu einer schnellen Wechselbewegung der Teilchen und damit zu einer gegenseitigen Durchdringung.

Auf der schnellen Wechselbewegung beruht auch die *Ultraschallreinigung*. Sie wird in der Industrie zum Säubern von Uhrenteilchen, optischen Linsen, kleinen und kleinsten Schrauben usw. von Bearbeitungsrückständen und Ölschichten eingesetzt.

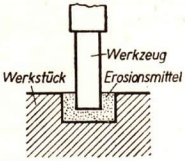


Abb. 93/1
Herstellen einer Bohrung durch Ultraschallerosion

Jede mit Luft in Berührung kommende Aluminiumoberfläche überzieht sich mit einer Oxidschicht, die eine Lötverbindung verhindert. Bringt man die zu verbindenden Werkstücke in ein Zinnbad, so wird bei Einwirkung von Ultraschall die Oxidhaut zerstört, und das flüssige Zinn verbindet sich mit dem Aluminium. Das Zusammenlöten erfolgt dann auf die übliche Weise. Nach dem gleichen Verfahren arbeitet der *Ultraschallötkolben* (Abb. 92/3 und 92/4). Mit ihm können Aluminiumwerkstücke ohne vorheriges Verzinnen gelötet werden.

Hartmetalle und Hartkeramiken lassen sich mit Hilfe der *Ultraschallerosion* bearbeiten. Zwischen dem Werkzeug, das durch einen Ultraschallerzeuger erregt wird, und dem Werkstück befindet sich ein Erosionsmittel. Es besteht aus sehr kleinen, härtesten, scharfkantigen Kristallen (Abb. 93/1). Diese werden durch die Schwingungen gegen die Werkstoffoberfläche geschleudert und schlagen aus ihr kleinste Teilchen heraus. Für weiche Werkstoffe ist das Ultraschallerosions-Verfahren dagegen nicht geeignet; es werden nämlich keine Teilchen herausgeschlagen, da sich die Kristalle in das Material eindrücken ohne abzusplittern. Durch besondere Formgebung des Werkzeuges können auch komplizierte Bohrungen hergestellt werden. Die ultraschallerosive Bearbeitung findet vor allem bei der Fertigung von Lager- und Ziehsteinen aus Edelsteinen Anwendung.

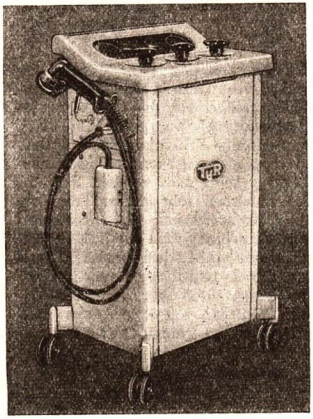


Abb. 93/2
Ultraschall-Therapie-Gerät „TuR US 2—1“ aus dem volkseigenen Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden.
In dem fahrbaren Gehäuse befindet sich ein HF-Generator. Er erregt den Schallkopf zu Ultraschallschwingungen mit der Frequenz 800 kHz.

Auch in der Heilkunde wird der Ultraschall angewendet. Vor allem Nervenentzündungen und Gelenkerkrankungen werden erfolgreich behandelt. Dazu werden besondere *Ultraschall-Therapie-Geräte* verwendet (Abb. 93/2). Der Ultraschallkopf wird entweder unter

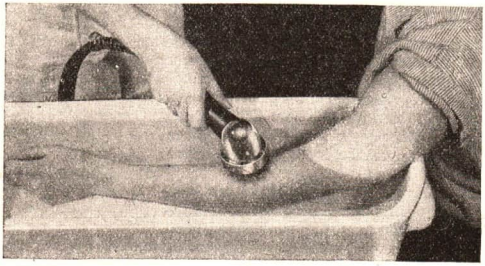


Abb. 94/1
Abstandsbeschallung mit Wasserkopplung.
Zwischen der strahlenden Fläche des Schallkopfes und dem Körper darf sich keine Luft befinden, da die Schallverluste sonst zu groß sind.

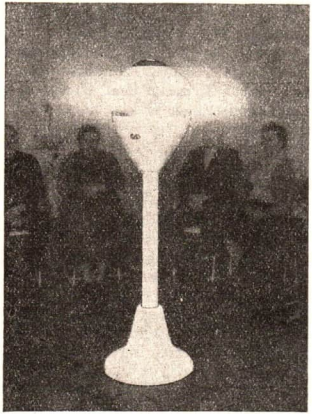


Abb. 94/2
Ultraschall-Raumvernebler aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden im FDGB Silikose-Kurheim Bad Suderode (Harz)

Zwischenschaltung einer dünnen Ölschicht über die zu behandelnden Hautstellen geführt oder die Beschallung erfolgt in einem Wassergefäß (Abb. 94/1). Verschiedene Erkrankungen der Atemwege des Menschen werden durch Inhalation geheilt. Man versteht darunter das Einatmen sehr kleiner Tröpfchen einer Kochsalzlösung. Eine besonders gute Verneblung wird durch den Ultraschall erreicht. Mit dem vom VEB Transformatoren- und Röntgenwerk in Dresden hergestellten Raumvernebler können Tröpfchen von etwa 2 μm Durchmesser erzeugt werden (Abb. 94/2).

5. Fragen und Aufgaben:

1. Welche Wellenlängen haben Ultraschallwellen der Frequenzen 20 kHz und 20 MHz?
2. Das Echolotgerät eines Schiffes registriert eine Gesamtlaufzeit des Ultraschallimpulses von 0,04 s. Wie groß ist die Wassertiefe? (Die Breite des Schiffes wird vernachlässigt, die Schallgeschwindigkeit in Wasser beträgt 1450 $m \cdot s^{-1}$.)
3. Erklären Sie die Werkstoffprüfung mit Hilfe des Ultraschallverfahrens!
4. Warum lassen sich Aluminium und Kupfer nicht ultraschallerosiv bearbeiten?
5. Stellen Sie eine Übersicht über die Anwendungen des Ultraschalls in Technik und Medizin zusammen!
6. Erklären Sie an Hand der Abbildung 92/4 die Wirkungsweise des Ultraschalllötkolbens!

III. Elektromagnetische Wellen

A. HERTZSCHE WELLEN

21. Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen

1. Erzeugung elektrischer Schwingungen — Schwingkreis. Im Oktober 1959 konnte die Geschichte der Naturwissenschaften ein denkwürdiges Ereignis verzeichnen: Als Ergebnis der kollektiven Arbeit sowjetischer Wissenschaftler, Techniker und Arbeiter gelang es, eine *interplanetarische Station* zu starten, die erstmalig den Mond umkreiste, seine Rückseite fotografierte und diese Bilder durch Funkwellen zur Erde übermittelte. Die Übertragung erfolgte in ähnlicher Weise wie bei einem Fernsehsender. Jedoch waren die technischen Probleme wegen der großen Entfernung von über 300 000 km viel schwieriger. Eine mühevolle vielseitige Forschungsarbeit war nötig, bis diese Leistung möglich wurde. Im folgenden werden die wesentlichen Entwicklungsstufen dargestellt, die zur Erzeugung und Anwendung von *Funkwellen*, auch **Hertzsche Wellen** genannt, geführt haben.

Für die Entstehung mechanischer Wellen müssen bekanntlich mechanische Schwingungen vorhanden sein. Auch elektromagnetische Wellen können erst dann entstehen, wenn entsprechende Schwingungen erzeugt worden sind. In einem elektrischen Stromkreis treten unter gewissen Bedingungen Schwingungen auf, die jedoch völlig anderer Art sind als die mechanischen Schwingungen. Man unterscheidet auch hier zwischen gedämpften und ungedämpften Schwingungen. Erstere entstehen bei der Entladung eines Kondensators über eine Spule. Wird ein Kondensator über einen Ohmschen Widerstand entladen, so erhält man nur einen kurzen Entladestrom. Verwendet man nun eine Spule als Entladewiderstand (Abb. 95/1), so ergibt sich für die Spannung ein Diagramm, wie es die Abbildung 95/2 zeigt. Es tritt offensichtlich kein einfacher Entladungsgleichstrom auf, sondern ein Wechselstrom mit abnehmender Amplitude. Man bezeichnet diesen Wechselstrom als *freie elektrische Schwingung*, da er nicht von einer Wechselspannungsquelle erzeugt wird. Den aus Spule und Kondensator bestehenden Kreis nennt man einen **elektrischen Schwingkreis.**

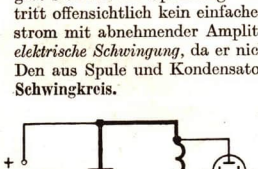


Abb. 95/1. Entladung eines Kondensators über eine Spule — Elektrischer Schwingkreis

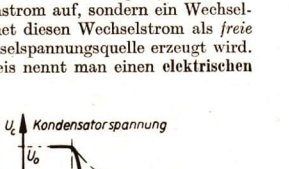
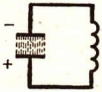
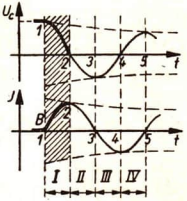
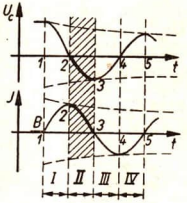
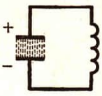


Abb. 95/2 Spannung-Zeit-Diagramm der Entladung eines Kondensators über eine Spule. *B* Beginn der Entladung

Wird ein Kondensator über eine Spule entladen, so erfolgt der Entladungsvorgang periodisch schwingend. Spule und Kondensator bilden einen elektrischen Schwingkreis.

2. Darstellung der Vorgänge im Schwingkreis. Zur genauen Erklärung der Vorgänge im Schwingkreis werden das *Spannung-Zeit-Diagramm* und das zugehörige *Strom-Zeit-Diagramm* der elektrischen Schwingungen gegenübergestellt. Die Darstellung der Zusammenhänge zwischen beiden Diagrammen erfolgt in Schritten, die einer Viertelperiode entsprechen (Abb. 96/1).

Prinzipschaltbild (Abb. 96/1)	Zustand zum jeweiligen Zeitpunkt	Vorgänge während des Zeitabschnittes
	1. Der Kondensator ist aufgeladen. Es fließt kein Strom. 	Der Entladestrom beginnt zu fließen. Die Kondensatorspannung nimmt ab. I. Durch die verzögernde Wirkung der Selbstinduktion erreichen Entladestrom und sein Magnetfeld erst allmählich ihre volle Stärke.
	2. Der Entladestrom und sein Magnetfeld haben ihren höchsten Wert. Die Kondensatorenspannung ist auf Null abgesunken — die Entladung ist beendet. 	Der Strom nimmt ab, und sein Magnetfeld wird abgebaut. II. Durch die verzögernde Wirkung der Selbstinduktion wird das Abnehmen des Stromes hinausgezögert — der Strom fließt in der alten Richtung weiter und lädt den Kondensator mit entgegengesetzter Polung auf.
	3. Die Kondensatorspannung hat ihren (negativen) Höchstwert erreicht. Der Ladestrom ist auf Null abgesunken, die Aufladung in umgekehrter Richtung beendet.	

Damit ist im wesentlichen der gleiche Zustand wie bei Zeitpunkt 1 erreicht, nur daß die Kondensatorplatten jetzt Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen tragen. Bei Zeitpunkt 3 beginnen also wieder die gleichen Vorgänge, wie sie eben beschrieben wurden, jedoch in umgekehrter Richtung. Dies kann man an beiden Diagrammen für die Zeitabschnitte III und IV verfolgen.

Wie man aus den Diagrammen der Abbildung **96**/1 erkennt, ändern sich Spannung und Stromstärke mit der gleichen Frequenz, sie sind aber um eine Viertelperiode verschoben. *Im Schwingkreis eilt die Spannung der Stromstärke voraus.*

Infolge der verzögernden Wirkung der Selbstinduktion fließt der Elektronenstrom nach jeder beendeten Entladung weiter. Dadurch wird der Kondensator jeweils wieder in entgegengesetzter Polung aufgeladen. Lade- und Entladungsvorgänge wiederholen sich periodisch.

3. Energieumwandlungen im Schwingkreis. Beim Laden des Kondensators (Schaltstellung *A* in Abb. **97**/1) führt man dem Schwingkreis *elektrische Energie* zu. Diese wird im elektrischen Feld des Kondensators gespeichert. Sie verwandelt sich während seiner Entladung in die *Energie des Magnetfeldes* der Spule. Beim nachfolgenden Wiederaufladen des Kondensators wandelt sich die im Magnetfeld enthaltene Energie wieder in die elektrische Energie des elektrischen Feldes um. Der Schwingungsvorgang ist also *durch ständige Energieumwandlungen* gekennzeichnet: *Die dem Schwingkreis zugeführte elektrische Energie schwingt zwischen dem elektrischen Feld des Kondensators und dem Magnetfeld der Spule ständig hin und her. Man bezeichnet diese Schwingungen deshalb als* **elektromagnetische Schwingungen.**

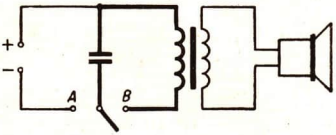


Abb. **97**/1. Schwingkreis mit induktiv gekoppeltem Lautsprecher

4. Dämpfung der elektromagnetischen Schwingungen. Aus dem Oszillogramm der Abbildung **95**/2 ergibt sich, daß die Amplituden der Schwingungen abnehmen und der Schwingungsvorgang nach einer gewissen Zeit sein Ende findet. Wie bei den mechanischen Schwingungen *bezeichnet man auch elektromagnetische Schwingungen, deren Amplituden abnehmen, als gedämpft.*

Bei den mechanischen Schwingungen bewirken Reibungsvorgänge das Abnehmen der Amplituden. Durch Reibung wird mechanische Energie in Wärme umgewandelt und geht dadurch für den Schwingungsvorgang verloren. Auch im Schwingkreis erfolgen außer den periodischen noch zusätzliche Energieumwandlungen, die bewirken, daß die Schwingungsenergie abnimmt. Diese Verluste an elektrischer Energie erfolgen in der Hauptsache durch Umwandlung in Wärmeenergie durch den Ohmschen Widerstand der Spule und der Zuleitungen.

Die Schwingungen eines einmal erregten Schwingkreises sind gedämpft. Hauptsächliche Ursache der Dämpfung ist die Umwandlung elektrischer Energie in Wärme.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Geben Sie Beispiele für die Anwendung der Funkwellen an!
2. Warum bezeichnet man einen aus Kondensator und Spule bestehenden Stromkreis als Schwingkreis?

3. Beschreiben Sie das Zusammenwirken von Kondensator und Spule bei der Entstehung elektromagnetischer Schwingungen!
4. Schildern Sie die Energieumwandlungen in einem Schwingkreis und begründen Sie, warum die Dämpfung nicht verhindert werden kann!
5. Vergleichen Sie an Hand der nachstehenden Tabelle die Vorgänge beim Federschwinger mit den Vorgängen in einem elektrischen Schwingkreis!
6. Was versteht man unter elektromagnetischen Schwingungen?

Vergleich mechanischer und elektromagnetischer Schwingungen

Gegenstand des Vergleichs	Federschwinger	elektrischer Schwingkreis
Einander entsprechende Energiearten	*Potentielle Energie* der gespannten Feder	*Elektrische Energie* des geladenen Kondensators
	Kinetische Energie des schwingenden Körpers im Zustand der Bewegung	*Energie des Magnetfeldes* der Spule im Zustand des Stromflusses
Voraussetzung für das Entstehen der Schwingungen	*Trägheit des schwingenden Körpers*, gekennzeichnet durch seine *Masse*	*Trägheit von Strom und Magnetfeld*, gekennzeichnet durch *die Induktivität der Spule*
Ursache der Dämpfung	*Umwandlung mechanischer Energie in Wärme* durch Reibung	*Umwandlung elektrischer Energie in Wärme* durch den Ohmschen Widerstand

22. Die Veränderung der Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen

1. Die Bestimmungsstücke einer elektromagnetischen Schwingung. Zeichnet man den zeitlichen Verlauf der Spannung oder der Stromstärke einer elektromagnetischen Schwingung auf (vgl. Abb. 96/1), so kann man erkennen, daß hier dieselben Bestimmungsstücke auftreten wie bei einer mechanischen Schwingung:

Eine elektromagnetische Schwingung wird durch die Bestimmungsstücke Amplitude, Schwingungsdauer und Frequenz beschrieben.

Die bedeutsamste dieser Größen ist die *Frequenz*. Zu ihrer Messung benutzt man wie in der Mechanik die Maßeinheit **Hertz** und deren Vielfache **Kilo-, Mega-** und **Gigahertz** (vgl. S. 55).

2. Der Einfluß von Kapazität und Induktivität auf die Frequenz. Da die elektromagnetischen Schwingungen infolge des Zusammenwirkens von Kondensator und Spule entstehen, muß die Frequenz dieser Schwingungen von den Abmessungen des Kondensators beziehungsweise der Spule abhängen. Die Abbildung 97/1 zeigt eine Versuchsanordnung, mit der man den Einfluß der Kapazität auf die Frequenz eines Schwingkreises untersuchen kann. Als Nachweisgerät für die elektromagnetischen Schwingungen dient ein Lautsprecher, der ähnlich wie ein Telefon wirkt. Er wird mit dem Schwingkreis *induktiv gekoppelt*, das heißt, er ist an die Sekundärspule

eines Transformators geschaltet, dessen Primärspule die Schwingkreisspule bildet. Die Höhe des Tones im Lautsprecher hängt von der Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen ab: Schwingungen mit höherer Frequenz liefern einen höheren Ton als Schwingungen mit einer niedrigeren Frequenz.

Der zeitliche Ablauf der Lade- und Entladevorgänge im Schwingkreis wird dadurch bestimmt, wie groß die *Kapazität des Kondensators* und die *Induktivität der Spule* sind. Die Abhängigkeit der Frequenz von diesen beiden charakteristischen Größen eines Schwingkreises wird mit der Schaltung nach Abbildung 97/1 untersucht, indem man nacheinander die Kapazität durch Austauschen des Kondensators und die Induktivität durch Austausch der Spule oder durch Verschieben des Eisenjoches verändert. Die experimentellen Ergebnisse und die dazugehörigen Erklärungen sind in folgender Übersicht zusammengestellt:

Abhängigkeit der Frequenz von der Kapazität und der Induktivität

Veränderung	Ergebnis	Auswirkung im Schwingkreis
Vergrößern der Kapazität	Tieferer Ton — *Abnahme der Frequenz*	Bei gleicher Ladespannung kann mehr Energie im Kondensator gespeichert werden: Die Entladungen und Aufladungen dauern länger.
Verkleinern der Kapazität	Höherer Ton — *Zunahme der Frequenz*	Bei gleicher Ladespannung kann weniger Energie im Kondensator gespeichert werden: Die Entladungen und Aufladungen brauchen weniger Zeit.
Vergrößern der Induktivität	Tieferer Ton — *Abnahme der Frequenz*	Die Trägheit des Magnetfeldes wird größer: Die Lade- und Entladevorgänge werden stärker verzögert und dauern länger.
Verkleinern der Induktivität	Höherer Ton — *Zunahme der Frequenz*	Die Trägheit des Magnetfeldes wird kleiner: Die Lade- und Entladevorgänge werden weniger verzögert und brauchen weniger Zeit.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

Die Kapazität des Kondensators und die Induktivität der Spule bestimmen die Frequenz der im Schwingkreise entstehenden elektromagnetischen Schwingungen. Vergrößern der Kapazität beziehungsweise der Induktivität vermindert die Frequenz, Verkleinern der Kapazität beziehungsweise Induktivität vergrößert sie.

Die Frequenz (f), mit der ein Schwingkreis freie Schwingungen ausführt, ist durch seine Kapazität (C) und durch seine Induktivität (L) bestimmt. Man nennt diese Frequenz die *Eigenfrequenz* des Schwingkreises.

Zur Berechnung der Eigenfrequenz benutzt man die *Thomsonsche Schwingungsgleichung:*

$$\boxed{f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}}\,.$$

Auf die Herleitung dieser wichtigen Gleichung kann hier nicht eingegangen werden.

Die durch Kapazität und Induktivität eines Schwingkreises bestimmte Frequenz heißt Eigenfrequenz. Schwingungen in der Eigenfrequenz, die selbständig, unbeeinflußt von außen erfolgen, nennt man freie elektromagnetische Schwingungen. Freie elektromagnetische Schwingungen sind immer gedämpft.

3. Die Frequenzbereiche. Es ist möglich, in einem Schwingkreis elektromagnetische Schwingungen sehr kleiner Frequenz zu erzeugen. Andererseits kann man jedoch Schwingkreise bauen, in denen die erzeugten Wechselströme mit sehr hohen Frequenzen pulsieren, die man mit mechanischen Schwingern nicht erreichen kann. Die elektromagnetischen Schwingungen haben einen sehr großen *Frequenzumfang*. Deshalb ist es zweckmäßig, sie nach der Größenordnung ihrer Frequenz in *Frequenzbereiche* einzuteilen:

a) *Niederfrequente Schwingungen:* bis 10 kHz,
b) *Hochfrequente Schwingungen:* 10 kHz bis 30 MHz,
c) *Ultrahochfrequente Schwingungen:* ab 30 MHz.

Schwingungen, deren Frequenzen innerhalb des Hörbereiches des menschlichen Ohres liegen (zwischen 16 und 20 000 Hz), bezeichnet man als *tonfrequente Schwingungen*.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Zeichnen Sie das Spannung-Zeit-Diagramm einer gedämpften elektromagnetischen Schwingung, und erklären Sie daran die Bestimmungsstücke einer elektromagnetischen Schwingung!
2. Nennen Sie Maßeinheiten für die Frequenz, und geben Sie ihre gegenseitigen Beziehungen an!
3. Nennen Sie Frequenzbereiche der elektromagnetischen Schwingungen!
4. Welche Wirkung kann man an einem Schwingkreis erzielen, wenn man
   a) einen kleineren Kondensator,
   b) eine Spule mit größerer Windungszahl verwendet? Erklären Sie die Zusammenhänge!
5. Was versteht man unter Eigenfrequenz und unter freien elektromagnetischen Schwingungen?
6. Ein Schwingkreis besteht aus einem Kondensator mit einer Kapazität von 2 μF und einer Spule von 0,5 H.
   a) Berechnen Sie die Eigenfrequenz des Schwingkreises!
   b) Wie ändert sich die Frequenz, wenn man dem Schwingkreiskondensator einen weiteren mit der gleichen Kapazität parallelschaltet und gleichzeitig die Induktivität der Spule durch Verschieben des Eisenjoches um die Hälfte verkleinert? Begründen Sie das Ergebnis!
   c) Welchen Frequenzbereichen gehören die unter a) und b) berechneten Eigenfrequenzen an?

23. Erzwungene elektromagnetische Schwingungen

1. Ungedämpfte Schwingungen. Die Entwicklung des Rundfunks und Fernsehens bis zum heutigen Stand, die funktechnischen Leistungen beim Starten und Beobachten künstlicher Erdsatelliten und interplanetarischer Raketen sind nur dadurch möglich geworden, daß Wissenschaftler in der Vergangenheit Wege gefunden haben, einen Schwingkreis trotz der vorhandenen Dämpfung, die sich ja nie ganz beseitigen läßt,

zu *ungedämpften Schwingungen* anzuregen. Dazu ist es notwendig, den Teil der elektrischen Energie, der infolge der Dämpfung in Wärme umgewandelt wird, ständig zu ersetzen. Man bezeichnet diesen Vorgang als *Entdämpfung*.

Die Zufuhr der Energie beim Entdämpfen darf nicht willkürlich geschehen. Dies zeigt das mechanische Beispiel einer Schaukel:

Ungedämpfte Schwingungen einer Schaukel

Beispiel	Erkenntnis
Wird die Schaukel einmalig angestoßen, so führt sie Schwingungen aus, die nach einer gewissen Zeit zur Ruhe kommen.	Der Schwinger führt *gedämpfte* Schwingungen in seiner *Eigenfrequenz* aus.
Soll die „Schaukelamplitude" konstant bleiben, so muß ein Spielgefährte die Schaukel in bestimmten Abständen immer wieder anstoßen.	Zur Entdämpfung muß *periodisch* Energie zugeführt werden. Es ist eine *Erregerquelle* notwendig.
Aus der Erfahrung ist bekannt, daß zum Konstanthalten der Schaukelamplitude bereits sehr kleine Anstöße genügen, wenn sie zum richtigen Zeitpunkt erteilt werden.	Die Erregerquelle muß mit dem Schwinger in Resonanz stehen.

In einem elektrischen Schwingkreis bildet sich eine ungedämpfte Schwingung aus, wenn er von einer Wechselspannung erregt wird. Man schließt einen Schwingkreis an eine Wechselspannung von 50 Hz aus dem Lichtnetz an (Abb. **101**/1). Die Spule hat einen U-Eisenkern mit verschiebbarem Querjoch. In die Zuleitung und in jeden Zweig des Schwingkreises legt man eine Kleinspannungsglühlampe als Stromanzeiger. Durch Verschieben des Querjochs ändert man die Induktivität der Spule und damit die Eigenfrequenz f_0 des Schwingkreises. Dabei findet man eine Stellung des Querjochs, bei der die Glühlampe in der Zuleitung viel dunkler als die beiden anderen Lampen leuchtet. Daraus kann man schließen, daß jetzt in dem Schwingkreis eine elektromagnetische Schwingung mit größerer Stromstärke erfolgt, als von außen zugeführt wird. Der Resonanzfall ist hergestellt: Der Schwingkreis ist auf eine Eigenfrequenz von 50 Hz abgestimmt.

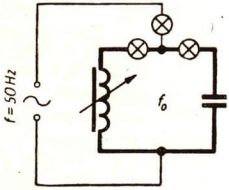


Abb. **101**/1. Erregung eines Schwingkreises auf dem Netz

Dieser Versuch führt, ebenso wie der Vergleich mit mechanischen Schwingungen, zu folgenden Erkenntnissen:

Um einen Schwingkreis zu entdämpfen, muß man den Anteil der elektrischen Energie ersetzen, der in Wärme umgewandelt wird. Die Energiezufuhr muß periodisch geschehen. Es ist eine Erregerquelle erforderlich, die eine Wechselspannung liefert. Schwingungen mit größter Amplitude treten im Resonanzfall ein, wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des Schwingkreises übereinstimmt.

Um in einem Schwingkreis ungedämpfte Schwingungen einer beliebigen Frequenz auf die gleiche Art und Weise zu erregen, benötigte man einen Wechselstromgenerator, der die gewünschte Frequenz erzeugen könnte. Unter Verwendung der Elektronenröhre wurde dieses Problem gelöst.

2. Die Elektronenröhre als Erregerquelle. Die Versuchsanordnung der Abbildung **101**/1 wird etwas abgeändert, indem man als Erregerkreis den Anodenstromkreis einer Triode verwendet (Abb. **102**/1). In diesen wird ein Milliamperemeter und ein Ausschalter gelegt.

Das Ziel, ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen einer beliebigen Frequenz mit Hilfe einer Elektronenröhre zu erzeugen, läßt sich in den folgenden vier Schritten erreichen:

1. Schritt: Wird der Anodenstromkreis mit dem Schalter geschlossen, so weist der Oszillograph nur gedämpfte Schwingungen nach. Solange der Anodenstrom gleichmäßig fließt, bleibt der Schwingkreis in Ruhe. Schaltet man den Anodenstrom aus, so entstehen im gleichen Moment wieder gedämpfte Schwingungen.

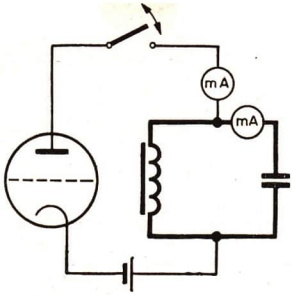


Abb. **102**/1
Stoßerregung eines Anodenstromkreises. Der Oszillograph ist nicht eingezeichnet.

Der Schwingkreis wird nur zum Schwingen angeregt, wenn sich der Anodenstrom verändert. Bei jeder Änderung führt eine Stoßanregung des Schwingkreises zu gedämpften Schwingungen.

Hätte man die Möglichkeit, den Anodenkreis im Rhythmus der Eigenfrequenz des Schwingkreises ein- und auszuschalten, dann bekäme man ungedämpfte Schwingungen der gewünschten Frequenz.

2. Schritt: Eine Änderung des Anodenstromes kann mit einer Triode am einfachsten erreicht werden, indem man ihre Gittervorspannung ändert. Mit Hilfe eines Schalters im Gitterstromkreis kann man wahlweise eine negative Spannung oder die Spannung 0 V an das Gitter legen.

Bei jeder Änderung der Gitterspannung ändert sich der Anodenstrom und damit erfolgt jeweils Stoßanregung des Schwingkreises.

Hätte man die Möglichkeit, den Schalter im Rhythmus der Eigenfrequenz zu betätigen, dann bekäme man ungedämpfte Schwingungen.

3. Schritt: Statt den Schalter im Gitterstromkreis dauernd zu bewegen, ist es zweckmäßiger, dem Gitter eine kleine Wechselspannung zuzuführen, zum Beispiel von 50 Hz aus dem Stromversorgungsgerät. Die Gitterwechselspannung wirkt dann wie ein automatisierter Schalter.

Die Anodenstromstärke schwankt im Rhythmus der Gitterwechselspannung. Bei jeder dieser Änderungen des Anodenstromes wird der Schwingkreis angeregt — in ihm entstehen erzwungene ungedämpfte Schwingungen.

4. Schritt — Die Meißnersche Rückkopplungsschaltung: Nach den vorhergehenden Schritten ergibt sich: In der Eigenfrequenz des Schwingkreises sind ungedämpfte Schwingungen nur möglich, wenn die Gitterwechselspannung die gleiche Frequenz aufweist wie der Schwingkreis. Der deutsche Ingenieur *Alexander Meißner* löste dieses Problem auf eine einfache, geniale Weise.

Er kam im Jahre 1913 auf den Gedanken, die Steuerung des Gitters mit einer Wechselspannung durch den Schwingkreis selbst durchführen zu lassen: Er koppelte

mit der Schwingkreisspule induktiv eine zweite Spule, die sogenannte *Gitterspule*, die er an Gitter und Katode der Röhre anschloß. Abbildung **103/1** zeigt die *Meißnersche Rückkopplungsschaltung*. Mit Hilfe dieser Schaltung werden ungedämpfte Schwingungen in der Eigenfrequenz ihres Schwingkreises erzeugt.

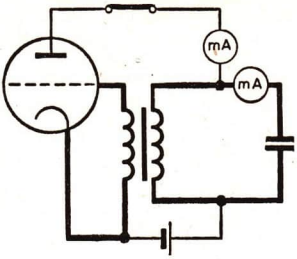


Abb. **103/1**
Meißnersche Rückkopplungsschaltung

Die beim Einschalten des Anodenstromes im Schwingkreis entstehenden Schwingungen (vgl. 1. Schritt) werden jetzt auf das Gitter übertragen. Diese Gitterwechselspannung steuert den Anodenstrom. Dessen Stromstärke ändert sich dadurch im Rhythmus der Eigenfrequenz des Schwingkreises. Von diesem pulsierenden Anodenstrom wird der Schwingkreis weiter angeregt, und zwar zu ungedämpften Schwingungen. Dabei wird der Teil der elektrischen Energie, der dem Schwingkreis infolge Dämpfung verloren geht, aus dem Anodenstromkreis ersetzt.

Da bei der Meißnerschaltung der Schwingkreis über Gitter und Anodenstromkreis auf seine eigenen Schwingungen zurückwirkt, nennt man sie eine *Rückkopplungsschaltung*. Die Gitterspule bezeichnet man auch als *Rückkopplungsspule*.

3. Der Röhrengenerator — Das Rückkopplungsprinzip. In der Starkstromtechnik bezeichnet man eine Maschine, die eine Wechselspannung erzeugt, als *Generator*. Entsprechend nennt man ein Gerät, in dem mit Hilfe einer Röhrenschaltung ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen erzeugt werden, einen *Röhrengenerator*. Der *Meißnergenerator* ist die erste und einfachste Form eines Röhrengenerators. Alle anderen Schwingschaltungen beruhen ebenfalls auf dem Rückkopplungsprinzip.

Die Wirkungsweise des Meißnergenerators und anderer Röhrengeneratoren läßt sich grundsätzlich wie folgt zusammenfassen:

> **Dem Schwingkreis wird ein kleiner Teil der elektrischen Energie entzogen und dem Steuergitter der Röhre zugeführt. Schwingkreis und Steuergitter sind miteinander gekoppelt. Durch die zugeführte Gitterwechselspannung erzeugt die Röhre Schwankungen des Anodenstromes im Rhythmus der Eigenfrequenz des Schwingkreises. Bei Änderung des Anodenstromes erhält der Schwingkreis eine Stoßanregung in gleicher Frequenz und Phase. Er wird dadurch zu ungedämpften Schwingungen angeregt.**

Es wird also dem Schwingkreis etwas Energie entzogen, die ihm nach Verstärkung durch die Röhre wieder zugeführt wird. Wie in der Mechanik nennt man solch einen Vorgang **Rückkopplung** (vgl. S. 64).

4. Meißner-Generator für verschiedene Frequenzbereiche. Je nach dem Verwendungszweck kann man mit der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen in den verschiedenen Frequenzbereichen erzeugen. Wie bei den freien gedämpften Schwingungen des Schwingkreises hängt die

Frequenz von der Kapazität des Kondensators und der Induktivität der Spule ab. Die folgende Tabelle enthält Beispiele aus drei Frequenzbereichen:

Beispiele für zusammengehörende Werte der Kapazität und der Induktivität eines Meißner-Generators

Art der Schwingungen	Frequenz f	Kondensatorkapazität C	Windungen der Schwingkreisspule	Nachweis der Schwingungen
Sehr langsame Schwingungen	etwa 1,5 Hz	10 µF	15000 mit Eisenkern	Milliamperemeter mit Zeigermittellage im Kondensatorzweig; Lautsprecher
Tonfrequente Schwingungen: Kammerton a′	440 Hz	1 µF	etwa 250 mit Eisenkern	Lautsprecher; Glimmlampe; Elektronenstrahl-Oszillograph
Hochfrequente Schwingungen: Frequenz des Deutschen Freiheitssenders 904	904 kHz	200 pF	etwa 40 ohne Eisenkern	Glimmlampe; Elektronenstrahl-Oszillograph

5. Fragen und Aufgaben:

1. Was versteht man unter Entdämpfung? Welche Forderung muß bei der Entdämpfung eines Schwingkreises erfüllt sein?
2. Auf welche Art und Weise kann man die Eigenfrequenz eines Schwingkreises ändern?
3. Wodurch kann ein Schwingkreis, der im Anodenstromkreis einer Triode liegt, zum Schwingen angeregt werden?
4. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Meißner-Generators!

24. Anwendung hochfrequenter elektromagnetischer Schwingungen

1. Die Übertragung elektromagnetischer Schwingungen auf einen Resonanzkreis. Um die elektromagnetischen Schwingungen eines Röhrengenerators verwenden zu können, ist es im allgemeinen notwendig, daß die Frequenz konstant bleibt. Wird die Hochfrequenzenergie unmittelbar aus dem Generatorschwingkreis entnommen, so schwankt die Generatorfrequenz etwas, je nachdem, welche Energiemenge dem Schwingkreis entzogen wird. Man muß daher die elektromagnetischen Schwingungen *auf einen zweiten Schwingkreis übertragen.*

In der Abbildung **105**/1 ist die Rückkopplungsspule ein Teil der Schwingkreisspule. Die Enden der Schwingkreisspule und eine Stelle zwischen ihnen sind mit den drei Elektroden der Röhre verbunden. Man nennt diese Schaltung daher *Dreipunktschaltung.* Die Schwingungen des Generatorkreises werden durch Induktion auf den zweiten Schwingkreis übertragen. Beide Schwingkreise sind *induktiv gekoppelt.* Das Lämpchen dient als Stromanzeiger und zeigt die Amplitude der Schwingungen im gekoppelten Kreise an. Es leuchtet am hellsten, wenn die Eigenfrequenz des

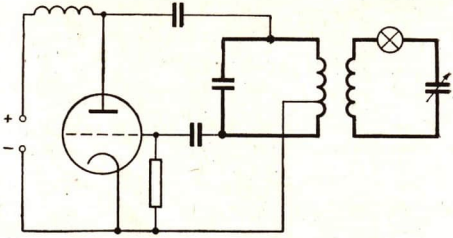


Abb. 105/1
Röhrengenerator in induktiver Spannungsteilerschaltung mit Resonanzkreis

zweiten Kreises durch Verstellen des Drehkondensators auf die Generatorfrequenz abgestimmt ist. Beide Kreise stehen dann zueinander in Resonanz. Man nennt deshalb den angekoppelten Kreis einen *Resonanzkreis*.

Als Resonanzkreis bezeichnet man einen angekoppelten Schwingkreis, dessen Eigenfrequenz auf die Generatorfrequenz abgestimmt werden kann. Bei der induktiven Kopplung zweier Kreise wird die Energie durch die Induktion zwischen den Spulen übertragen.

Die wichtigste Anwendung finden die elektromagnetischen Schwingungen in der Funktechnik (vgl. S. 123). Weitere Anwendungsgebiete sind die Ultraschall- und die Wärmetechnik.

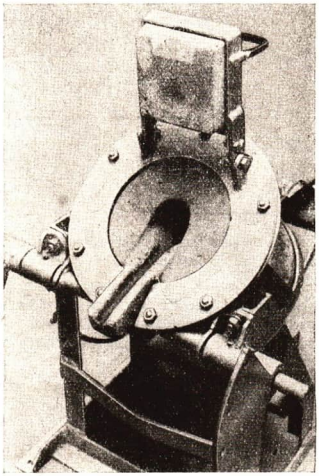
2. Der Ultraschallgenerator. Auf den Seiten 90 bis 94 sind zahlreiche Beispiele für die Anwendung des *Ultraschalls* beschrieben. Der Einsatz des Ultraschalls in Technik und Wissenschaft ist jedoch erst durch die Ausnutzung hochfrequenter elektromagnetischer Schwingungen möglich geworden.

Die rein *mechanische Erzeugung* des Ultraschalls, zum Beispiel durch Ultraschallpfeifen, liefert nur Schallwellen *kleinerer Frequenz* und *sehr geringer Energie*. Mit Hilfe elektromagnetischer Schwingungen kann man jedoch Ultraschall *beliebiger Frequenz* und *hoher Energie* herstellen. Dies geschieht im *Ultraschallgenerator*.

Ein Ultraschallgenerator besteht aus einem leistungsfähigen *Hochfrequenzgenerator* und einem *Ultraschallgeber*. Dieser wandelt die elektromagnetischen Schwingungen in mechanische und damit in Schallschwingungen um. Im Geber verwendet man entweder *Quarzplatten* oder *Nickelstäbe*. Bei diesen Materialien nutzt man die Eigenschaft aus, daß sie ihre Längenausdehnung periodisch ändern, wenn sie von elektromagnetischen Schwingungen durchsetzt werden.

Mit Hilfe der elektromagnetischen Schwingungen kann man Ultraschall beliebiger Frequenz und hoher Energie erzeugen. Ein Ultraschallgenerator besteht aus einem Hochfrequenzgenerator und dem Ultraschallgeber. Im Geber werden die elektromagnetischen Schwingungen in Ultraschallschwingungen umgewandelt.

3. Die Anwendung der Wärmewirkung hochfrequenter elektromagnetischer Schwingungen. a) Induktive Hochfrequenz-Erwärmung. Der Kern eines stark belasteten Transformators erwärmt sich. Durch das magnetische Wechselfeld werden in den Blechen des Eisenkerns Ströme induziert, die zu dieser Erwärmung führen. In viel stärkerem Maße werden Metalle erwärmt, wenn sie in das hochfrequente Wechselfeld eines Röhrengenerators großer Leistung gebracht werden.



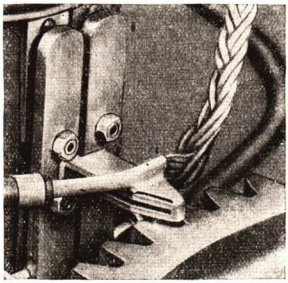


Abb. **106**/2
Oberflächenhärten
von Zahnrädern

Abb. **106**/1
Hochfrequenzschmelzofen

Zur *induktiven Hochfrequenz-Erwärmung* werden elektrische Leiter und Halbleiter im *Magnetfeld der Hochfrequenzspule* eines Hochfrequenzgenerators großer Leistung erhitzt. Die Spule besteht aus wenigen Windungen dicken Kupferrohres. Wird ein Metallstab eingebracht, so werden in ihm sehr starke hochfrequente Wechselströme induziert, die den Stab in einigen Sekunden zum Glühen bringen können.

Bei der induktiven Hochfrequenz-Erwärmung werden elektrische Leiter und Halbleiter im Magnetfeld einer Hochfrequenzspule erhitzt.

Beispiele für die Anwendung der induktiven Hochfrequenz-Erwärmung sind:

1. *Hochfrequenzschmelzofen* (Abb. **106**/1) zur Gewinnung von Edelstahlsorten und von reinen Halbleitermaterialien;
2. *Härten der Oberflächen* von Zähnen bei Zahnrädern und Sägeblättern (Abb. **106**/2);
3. *Ausglühen der Elektrodensysteme* von Elektronenröhren, um eingeschlossene Gasreste aus den Metallteilen auszutreiben.

b) Kapazitive Hochfrequenz-Erwärmung. Im hochfrequenten *elektrischen Wechselfeld* zwischen den Platten eines vom Hochfrequenzgenerator gespeisten *Kondensators* können auch Isolierstoffe erwärmt werden. Die dabei auftretenden Vorgänge können hier nicht dargestellt werden. Durch das dauernde sehr schnelle Umpolen des elektrischen Feldes gehen auch im Innern des Dielektrikums Umpolungsvorgänge vor sich. Infolgedessen erhöht sich die Temperatur des isolierenden Stoffes.

Bei der kapazitiven Hochfrequenz-Erwärmung werden isolierende Stoffe im hochfrequenten elektrischen Wechselfeld eines Kondensators erhitzt.

Beispiele für die Anwendung der kapazitiven Hochfrequenz-Erwärmung sind:

1. *Schnelltrocknen* von Holz bei der Sperrholzherstellung;
2. *Schnellzubereitung* von Speisen, die heute technisch grundsätzlich möglich ist;
3. *Schweißen* von Verbindungsnähten zwischen Folien aus Thermoplasten (Abb. **107**/1),
4. *Diathermiegeräte* für eine Wärmebehandlung in der Medizin (Abb. **107**/2). Das hochfrequente elektrische Wechselfeld vermag tief im Innern des Körpers liegende Organe zu erwärmen. Man kann durch die elektrische Heizung sogar die gesamte Körpertemperatur erhöhen, das heißt künstliches, genau regelbares Fieber hervorrufen, was für die Heilung mancher Krankheiten erforderlich ist.

c) Vorteile der Hochfrequenz-Erwärmung. Beide Arten der Hochfrequenz-Erwärmung weisen gegenüber den herkömmlichen Methoden, Stoffe zu erhitzen, wesentliche Vorteile auf:

Das Erhitzen geht außerordentlich schnell vor sich.

Die Erwärmung kann auf bestimmte Teile des zu behandelnden Stoffes begrenzt werden, zum Beispiel nur auf die Oberfläche, auf das Innere oder nur auf eine bestimmte Zone seines Querschnittes.

Schlechte Wärmeleiter lassen sich mittels Hochfrequenz wie gute Wärmeleiter von außen erwärmen.

Es ist zu erwarten, daß uns die Technik auf diesem Gebiet noch manchen Fortschritt bringen wird.

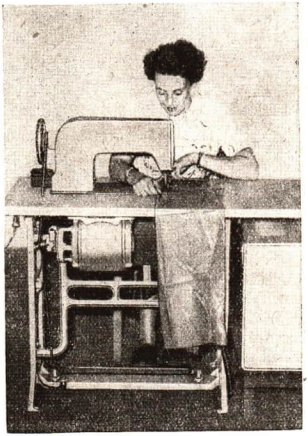


Abb. **107**/1. Schweißmaschine zum Herstellen von Schweißnähten bei PVC-weich

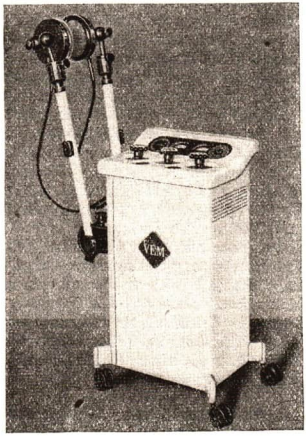


Abb. **107**/2. Diathermiegerät des VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden

4. Fragen und Aufgaben:

1. Unterscheiden Sie Ultraschallschwingungen und elektromagnetische Schwingungen!
2. Beschreiben Sie die Wirkungsweise eines Ultraschallgenerators!
3. Nennen Sie Anwendungen des Ultraschalls!
4. Unterscheiden Sie zwischen induktiver und kapazitiver Hochfrequenz-Erwärmung, und geben Sie zu beiden Arten Beispiele für ihre Anwendung an!

25. Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen

1. Die Voraussage elektromagnetischer Wellen. Wie ist es nun möglich, die Schwingungen für eine drahtlose Nachrichtenübermittlung auszunutzen, wie wir das heute vom Rundfunk und Fernsehen kennen? Auf Grund unserer Kenntnisse über mechanische Schwingungen und Wellen sowie angesichts der großartigen funktechnischen Leistungen bei Erdsatelliten und interplanetarischen Raketen erscheint es uns heute fast als selbstverständlich, daß **elektromagnetische Wellen** existieren. Bis zur Entdeckung der elektromagnetischen Wellen mußte jedoch die physikalische Forschung einen langen, mühevollen Weg zurücklegen. Um so mehr ist anzuerkennen, daß die Existenz elektromagnetischer Wellen bereits 20 Jahre vor ihrer tatsächlichen Entdeckung vorausgesagt worden war.

Michael Faraday (1791 bis 1867)

Die grundlegende Erkenntnis, die später zu ihrer Entdeckung führte, gewann der englische Physiker *Michael Faraday*. Seine bedeutendste wissenschaftliche Leistung war die Entdeckung der *elektromagnetischen Induktion*. Durch seine Forschungen wurde er ferner zu dem Begriff des magnetischen und elektrischen Feldes geführt.

Darauf baute sein Landsmann *James Clerk Maxwell* auf. Er arbeitete im Gegensatz zu *Faraday* in erster Linie auf dem Gebiete der theoretischen Physik. Die experimentellen Ergebnisse *Faradays* wurden von *Maxwell* genial verallgemeinert und zu einer neuen Theorie ausgebaut: Auf Grund seiner Überlegungen und Rechnungen behauptete er 1868 das Vorhandensein von elektromagnetischen Wellen, mit denen eine Übertragung elektromagnetischer Energie in den freien Raum hinaus verbunden sein müsse. Darüber hinaus kam er zu der Schlußfolgerung, daß auch das Licht die Natur solcher elektromagnetischer Wellen haben sollte. Mit diesen theoretischen Ergebnissen war *Maxwell* der experimentellen Forschung seiner Zeit um Jahrzehnte vorausgeeilt.

James Clerk Maxwell (1831 bis 1879)

2. Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen. Dem deutschen Physiker *Heinrich Hertz* (siehe S. 55) gelang es, die Richtigkeit der Behauptungen *Maxwells* durch das Experiment nachzuweisen. Unermüdlich

schuf er immer wieder neue Versuchsanordnungen und ließ sich zwei Jahre lang von allen Fehlschlägen nicht entmutigen. Zuerst konnte er nachweisen, daß sich *elektromagnetische Schwingungen an ausgespannten Drähten wellenartig ausbreiten*, und zwar mit der Lichtgeschwindigkeit von 300 000 km · s^{-1}. Sein Ziel, die Ausbreitung von Wellen in den freien Raum hinaus zu beweisen, erreichte er 1888.

Er benutzte einen Funkeninduktor mit angeschlossener Funkenstrecke als Erreger elektromagnetischer Schwingungen sehr hoher Frequenz. Zur Erklärung sei hier nur gesagt, daß jeder Funke aus einer Reihe hin- und hergehender Entladungen besteht, die einen Schwingkreis zu gedämpften Schwingungen anregen können. Mittels eines Resonanzkreises, bestehend aus einem Drahtbügel mit einer winzigen Funkenstrecke an den Enden, suchte *Hertz* den Raum vor einer Metallwand ab, die die vom Induktor beziehungsweise von der angeschlossenen Funkenstrecke erzeugten Wellen reflektieren sollte. Nach unermüdlichen Versuchen konnte *Hertz* die ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen durch das Überspringen winziger Funken in der Funkenstrecke des Drahtringes nachweisen. Das Ergebnis seiner Experimente faßte er selbst wie folgt zusammen: *Die elektrischen Kräfte lösen sich von den Körpern los und können selbständig als Zustände oder Veränderungen des Raumes fortbestehen.*

Später konnte er durch weitere Versuche zeigen, daß sich die von ihm gefundenen *elektromagnetischen Wellen* lichtähnlich verhielten. Damit war auch die zweite Behauptung *Maxwells* bestätigt. Ein Jahr später starb *Heinrich Hertz*. Er konnte den nun folgenden Siegeszug seiner Entdeckung nicht mehr erleben.

26. Die Entstehung elektromagnetischer Wellen

1. Der geschlossene und der offene Schwingkreis. Die Erregung eines Resonanzkreises hat gezeigt, daß es möglich ist, *ohne Drahtverbindung* elektromagnetische Schwingungen, und damit elektrische und magnetische Energie, zu übertragen. Die Reichweite dieser Übertragung ist aber relativ gering. Der Grund liegt darin, daß bei den bisher besprochenen Schwingkreisen das elektrische Feld im wesentlichen auf den engen Raum zwischen den Kondensatorplatten zusammengedrängt ist (Abb. 109/1a). Man nennt diese Form einen *geschlossenen Schwingkreis*. Mit Hilfe eines geschlossenen Schwingkreises ist es jedoch nur möglich, die elektromagnetischen Schwingungen auf andere gekoppelte Resonanzkreise zu übertragen. Man suchte daher nach Wegen, bei der Übertragung elektromagnetischer Schwingungen *größere Reichweiten zu erreichen*. Denkt man sich die Kondensatorplatten auseinandergezogen, bis der Schwingkreis ein gerader Leiter geworden ist, so bleibt auch diese Anordnung noch schwingungsfähig (Abb. 109/1b und c). Man bezeichnet diesen Schwingkreis als *offenen Schwingkreis*.

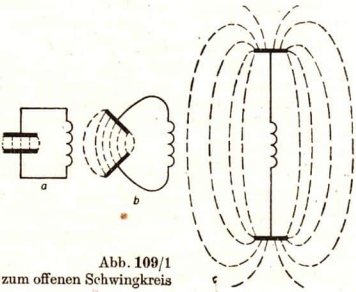


Abb. 109/1
Übergang vom geschlossenen zum offenen Schwingkreis

Der offene Schwingkreis unterscheidet sich vom geschlossenen Schwingkreis vor allem dadurch, daß sein elektrisches Feld nicht nur im engen Raum zwischen den Kondensatorplatten wirksam ist, sondern daß es *sich weit in die Umgebung hinein erstreckt*. Dadurch ist es möglich geworden, elektromagnetische Schwingungen und damit elektrische und magnetische Energie auf große Entfernungen drahtlos zu übertragen. Es ist nachgewiesen worden, daß *mit Hilfe des offenen Schwingkreises die elektromagnetischen Schwingungen in elektromagnetische Wellen umgewandelt werden.* Diese Tatsache nutzt man für die drahtlose Nachrichtenübermittlung aus.

2. Abstrahlung von Wellen aus dem offenen Schwingkreis. Elektromagnetische Wellen entstehen aus elektromagnetischen Schwingungen erst von etwa 10 kHz an. Sie werden von einem offenen Schwingkreis *abgestrahlt*. Zur Erhöhung seines Strahlungsvermögens verbindet man oft das eine seiner Enden, die *obere Kondensatorplatte* in Abbildung **109**/1, mit einer Antenne und das andere mit der Erde (Abb. **110**/1). Man nennt diesen offenen Schwingkreis dann auch *Antennenkreis*. Damit der Antennenkreis elektromagnetische Wellen abstrahlen kann, muß er durch einen Röhrengenerator, beispielsweise in der Meißnerschen oder in der Dreipunktschaltung, zu elektromagnetischen Schwingungen der gewünschten Frequenz erregt werden (Abb. **110**/2).

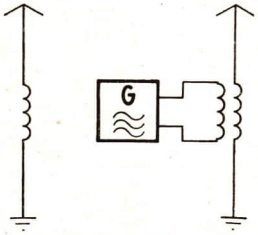


Abb. **110**/1 Antennenkreis

Abb. **110**/2 Hochfrequenzgenerator mit Antennenkreis

Auch für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen gilt die Grundgleichung der Wellenlehre (vgl. S. 75):

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

Das Produkt aus Wellenlänge und Frequenz ist konstant und gleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen, die gleich der Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 \cdot 10^8\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ ist. Die Wellenlänge des Senders Berlin (Mittelwelle) mit einer Frequenz von 611 kHz beträgt:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}}{611 \cdot 10^3\,\mathrm{s^{-1}}},$$

$$\lambda = 491{,}0\,\mathrm{m}.$$

3. Fragen und Aufgaben:

1. Berechnen Sie die Frequenz des Senders Leipzig, dessen Wellenlänge 521,7 m beträgt!
2. Berechnen Sie die Wellenlänge der elektromagnetischen Wellen, die der Deutsche Freiheitssender 904 ausstrahlt ($f = 904$ kHz)!
3. Unterscheiden Sie zwischen einem geschlossenen und einem offenen Schwingkreis!

27. Die Abstrahlung von Ultrakurzwellen — Der Dipol

1. Der Höchstfrequenzgenerator. Im Unterrichtszimmer kann man mit großen Wellenlängen nicht experimentieren. Dazu sind Wellen in der Größenordnung von 1 m erforderlich. Laut Verordnung des Ministeriums für Post und Fernmeldewesen der Deutschen Demokratischen Republik ist für Schulzwecke eine Wellenlänge von 1 m zugelassen. Wie die Rechnung ergibt, beträgt die zugehörige Frequenz 300 MHz.

Eine Frequenz in dieser Größenordnung nennt man eine *ultrahohe Frequenz* (UHF) oder *Höchstfrequenz* (vgl. S. 100). Zu ihrer Erzeugung ist ein besonderer Generator, ein *Höchstfrequenzgenerator*, erforderlich.

Man kann sehr hohe Frequenzen nur erzeugen, wenn man die Kapazität und die Induktivität sehr klein wählt. Das erreicht man dadurch, daß man die Spule zum einfachen Leiterstück „entarten" läßt. Die benötigte winzige Kapazität besteht bereits zwischen Gitter und Anode einer jeden Röhre, und zwar in der Größenordnung von 1 pF. Deshalb ist ein Schwingkreiskondensator überflüssig. Die Kapazität dieses *Gitter-Anoden-Kondensators* bestimmt in diesem Fall die Frequenz.

Die Schaltung eines Höchstfrequenzgenerators nach Abbildung **111**/1 ist aus der in Abbildung **105**/1 dargestellten Schaltung hervorgegangen. L_A und L_G bedeuten die Induktivität des Schwing- beziehungsweise Gitterkreises. Der Kondensator C hält lediglich die Anodengleichspannung vom Gitter fern. Die Drosseln D sollen ein Abfließen der Hochfrequenz-Energie über die Anodenspannungsquelle verhindern. Sie bestehen zwar nur aus einigen Windungen, stellen aber trotzdem für die höchstfrequenten Schwingungen einen hohen induktiven Widerstand dar. Durch den Widerstand R wird die notwendige geringe negative Gittervorspannung erzeugt, bei der die Röhre am besten arbeitet.

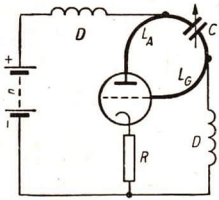


Abb. **111**/1
Schaltbild
eines Höchstfrequenzgenerators

2. Der Dipol. Nähert man dem Bügel des Höchstfrequenzgenerators eine Glimmlampe, so leuchtet sie auf. Ihr Aufleuchten zeigt das Wechselfeld in der unmittelbaren Umgebung des Generators an.

Es wird nun ein zweiter Schwingkreis benutzt, der auf die Generatorfrequenz abgestimmt werden kann (Abb. **111**/2). Hält man den Resonanzkreis *a* parallel zum Bügel des Generators, so leuchtet das Lämpchen am hellsten, sobald durch Verstellen des kleinen Kondensators Resonanz hergestellt worden ist.

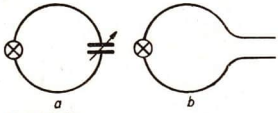


Abb. **111**/2
Resonanzkreise
für den Höchstfrequenzgenerator

Im Resonanzkreis *b* ist kein besonderer Kondensator mehr vorhanden. Durch Verlängern der Schwingkreisbügel erhöht man die Induktivität. Außerdem wirken die beiden gegenüberliegenden Drähte gleichzeitig wie die Platten eines Kondensators mit einer sehr geringen Kapazität, die aber bei so hohen Frequenzen eine Rolle spielt. Durch Nähern und Auseinanderbiegen der Drähte kann man Induktivität und Kapazität dieses Schwingkreises verändern. Das Lämpchen leuchtet weiter, wenn der Schwingkreis immer weiter aufgebogen wird. Aus der Abbildung **111**/3 sind einzelne Zwischenstellungen zu ersehen. Bei einer entsprechend abgestimmten

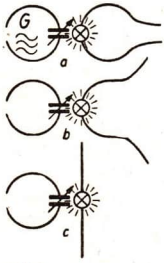


Abb. **111**/3
Der Übergang vom geschlossenen Schwingkreis zum Stabdipol

Länge stellt auch ein gerader Leiter einen Schwingkreis für UHF dar. Es ist ein *offener Schwingkreis.*

Bei einem offenen Schwingkreis für ultrahohe Frequenzen sind Kapazität und Induktivität über seine gesamte Länge verteilt. Ein solcher Schwingkreis heißt Dipol.

3. Die Vorgänge im Dipol. Der Dipol der Abbildung **111**/3c wird auch oft als *Stabdipol* bezeichnet. Er ist durch das Lämpchen sehr stark gedämpft. Nach Abbildung **112**/1 kann man als Resonanz-„kreis" auch einen Stabdipol bestimmter Länge ohne Lämpchen verwenden. Man benutzt ihn oft als Sendedipol.

Das leuchtende Lämpchen als *Stromanzeiger* weist darauf hin, daß in einem Dipol ein hochfrequenter Wechselstrom fließt wie in einem geschlossenen Schwingkreis. In einem gewöhnlichen Gleichstromkreis ist die Stromstärke an allen Stellen gleich. Beim Dipol trifft das nicht zu, wie dies Abbildung **112**/2a schematisch darstellt: In der Mitte ist die Stromstärke des Wechselstromes am größten, nach außen nimmt sie ab, und an den Enden beträgt sie Null.

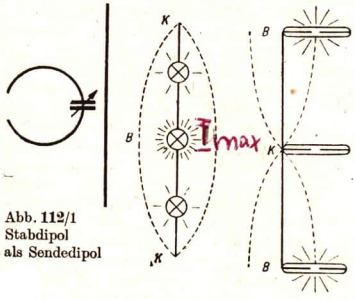


Abb. **112**/1
Stabdipol
als Sendedipol

Abb. **112**/2
Verteilung von Spannung und Stromstärke des höchstfrequenten Wechselstroms am Dipol
a) *B* Strombauch, *K* Stromknoten
b) *B* Spannungsbauch, *K* Spannungsknoten

Fährt man mit einer Glimmlampe als *Spannungsanzeiger* an einem schwingenden Dipol entlang, so leuchtet sie ebenfalls nicht an allen Stellen gleich hell. Die Abbildung **112**/2b zeigt dies wieder: Die hochfrequente Wechselspannung ist an den Dipolenden am größten, nimmt nach innen ab und beträgt in der Dipolmitte Null. Deshalb darf man einen schwingenden Dipol ohne weiteres in der Mitte berühren. Die Spannungs- und Stromverteilung ändern sich dabei nicht. Wie aus den Kurven hervorgeht, sind die Höchstwerte der Wechselspannung und der Stromstärke für jede Stelle des Dipols konstant. Entsprechend den stehenden Wellen in der Mechanik kann man auch hier von stehenden Wellen sprechen.

4. Das elektromagnetische Feld eines Dipols. a) Das magnetische Feld des Dipols. Die Elektronen schwingen im Dipol hin und her. Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben, dessen Feldlinien konzentrische Kreise um den Draht bilden. So ist auch das Magnetfeld eines Dipols aufgebaut. Es bestehen aber wesentliche Unterschiede zu dem Magnetfeld eines Gleichstromleiters:

1. **Das magnetische Feld ist in der Mittelebene des Dipols am stärksten, weil dort sein Strombauch liegt (Abb. 113/1).**
2. **Es ist ein magnetisches Wechselfeld, da die Feldlinien ständig ihre Richtung wechseln (Abb. 113/2).**
3. **Das magnetische Wechselfeld breitet sich in allen Richtungen aus, die senkrecht zum Dipol stehen.**

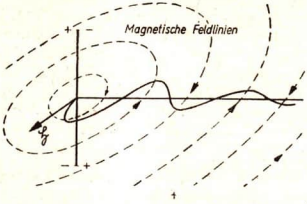


Abb. 113/2
Die Richtung der magnetischen Feldlinien eines Dipols

Abb. 113/1
Verteilung der magnetischen Feldlinien am Dipol

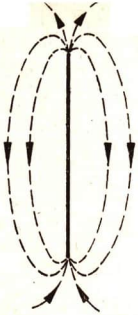


Abb. 113/3
Elektrisches Feld eines Dipols in einem bestimmten Augenblick

b) Das elektrische Feld des Dipols. Die Enden des Dipols zeigen eine im Rhythmus der Schwingungen wechselnde Elektronenverteilung. Die Dipolenden wechseln periodisch ihre Ladungen. *Die elektrischen Feldlinien verlaufen von einem Ende des Dipols zum anderen* (Abb. 113/3). Sie ändern ebenfalls wie die magnetischen Feldlinien abwechselnd ihre Richtung und breiten sich nach allen Seiten senkrecht zum Dipol aus. Entscheidend für das Ablösen elektromagnetischer Wellen vom Dipol ist die Tatsache, daß das magnetische und elektrische Wechselfeld des Dipols sich gegenseitig durchdringen und miteinander verknüpft sind. Die magnetischen Feldlinien umschlingen die elektrischen und umgekehrt (Abb. 113/4). Beide Wechselfelder können nicht für sich allein existieren, sondern nur in ihrem Zusammenwirken. Eine derartige Verknüpfung von sich ausbreitenden elektrischen und magnetischen Wechselfeldern bezeichnet man als elektromagnetische Wellen. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Die elektrischen und magnetischen Felder und die elektromagnetischen Wellen bestehen auch im Vakuum, wie die Funkverbindungen mit den sowjetischen Weltraumraketen bestätigen.

Bringt man in einiger Entfernung von einem Sendedipol parallel zu ihm einen Empfangsdipol an, so regen die elektromagnetischen Wellen den Empfangsdipol zu Resonanzschwingungen an. Eine Glühlampe in der Mitte des Dipols leuchtet auf. Daraus erkennt man, daß die *elektromagnetischen Wellen Energie durch den Raum hindurch übertragen.*

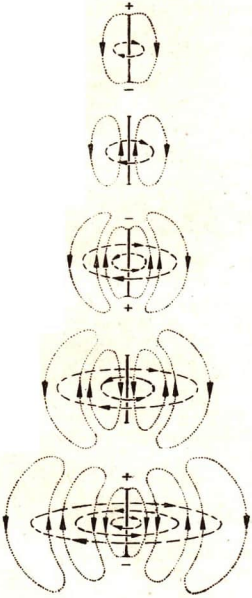


Abb. 113/4. Stark schematisierte Darstellung der Ausbreitung des elektromagnetischen Wechselfeldes um einen Dipol

Bisher ist uns der Ohmsche Widerstand als wichtigste Ursache der Dämpfung bekannt. Bei einem offenen Schwingkreis kommt noch eine weitere Ursache dazu: *Durch die Abstrahlung der Energie in den Raum wird ein Sendedipol sehr stark gedämpft.*

Zu den elektromagnetischen Wellen gehören alle wellenartigen Erscheinungen, die man nicht zu den mechanischen Wellen zählen kann, zum Beispiel das *Licht*, die *Röntgenstrahlen*, die *Wärmestrahlen*, die *Funkwellen*. Letztere stellen also nur ein Teilgebiet aus dem gesamten Gebiet der elektromagnetischen Wellen dar. Man bezeichnet die Funkwellen zu Ehren ihres Entdeckers als *Hertzsche Wellen*.

Unter elektromagnetischen Wellen versteht man periodisch schwingende Änderungen des elektrischen und magnetischen Feldes, die sich im Raum ausbreiten und dabei Energie übertragen.
Ihre Ausbreitung erfolgt auch im Vakuum.
Ein Sendedipol wird durch Abstrahlung der elektromagnetischen Wellen sehr stark gedämpft.
Zu den elektromagnetischen Wellen gehören unter anderem Licht-, Röntgen-, Wärmestrahlen und die Funkwellen (Hertzsche Wellen).

5. Resonanzwellenlänge eines Dipols. Ein Dipol besitzt wie jeder Schwingkreis eine bestimmte *Eigenfrequenz*, die von seiner Länge abhängt: Verlängert man ihn, so *vermindert* sich die Eigenfrequenz; wird er verkürzt, so *vergrößert* sich diese.

Wie die Grundgleichung der Wellenlehre zeigt, entspricht der *Eigen-* oder *Resonanzfrequenz* eines Dipols eine zugehörige *Resonanzwellenlänge*. Mit der Veränderung der Resonanzfrequenz beim Verlängern oder Verkürzen ändert sich daher auch seine Resonanzwellenlänge.

Versuche haben ergeben, daß ein offener Schwingkreis dann auf die Generatorfrequenz abgestimmt ist, wenn seine Länge gleich der halben Wellenlänge der vom Sender erzeugten elektromagnetischen Wellen ist.

Die geometrische Länge eines Dipols stimmt mit seiner halben Resonanzwellenlänge überein.

Man bezeichnet ihn daher als $\frac{\lambda}{2}$-*Dipol*. Der $\frac{\lambda}{2}$-Dipol hat in der modernen Technik der ultrakurzen Wellen (UKW) eine große Bedeutung erlangt. Die meisten Dipolantennen auf den Häuserdächern für den UKW-Rundfunk- und Fernsehempfang sind $\frac{\lambda}{2}$-Dipole.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Demonstrieren Sie an einem Stativstab, in welcher Richtung sich bei einem waagerecht liegenden Dipol die elektrischen und die magnetischen Feldlinien ausbilden!
2. Was versteht man unter einer elektromagnetischen Welle?
3. Begründen Sie, warum ein offener Schwingkreis stärker gedämpft ist als ein geschlossener!
4. Nennen Sie Erscheinungen, die zu den elektromagnetischen Wellen gehören!
5. Erläutern Sie, wie sich die Resonanzwellenlänge beziehungsweise die Resonanzfrequenz eines Dipols ändert, wenn man ihn verlängert oder verkürzt!
6. Ein Dipol ist 1 m lang. Berechnen Sie seine Eigenfrequenz!

7. Der UKW-Rundfunk sendet mit einer Frequenz in der Größenordnung von 100 MHz. Berechnen Sie die Länge eines $\frac{\lambda}{2}$-Dipols für den UKW-Empfang! Schätzen Sie die Länge eines geraden UKW-Dipols im Schaufenster eines Rundfunkgeschäftes ab, beziehungsweise erfragen Sie oder messen Sie seine Länge, und vergleichen Sie diese mit dem Rechenergebnis!

28. Der offene Schwingkreis als Empfänger

1. Der Empfangsdipol. Betrachtet man die Fernseh-Dipolantennen auf den Dächern genauer, so kann man zweierlei feststellen:

1. Die einzelnen Stäbe der Antenne sind ungefähr gleich lang.
2. In den meisten Fällen stehen die Dipole parallel zueinander.

Diese Beobachtungen lassen sich leicht erklären. Bei der Konstruktion der Antennenteile und beim Aufstellen der Antennen auf den Dächern werden physikalische Gesetzmäßigkeiten beachtet. Jeder Stabdipol kann als Empfänger für elektromagnetische Wellen benutzt werden, wenn er zwei Voraussetzungen erfüllt:

1. Seine Länge muß auf die Wellenlänge der Wellen, die er empfangen soll, annähernd abgestimmt sein, das heißt, er soll möglichst ein $\frac{\lambda}{2}$-Dipol sein.
2. Er muß *parallel zum Sendedipol* stehen. In dieser Stellung ist der beste Empfang gewährleistet. Die vom Sender ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen durchsetzen den Empfangsdipol. Dabei werden die freien Elektronen des Metalls, aus dem der Dipol besteht, zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Im Dipol fließt ein hochfrequenter Wechselstrom.

Mit Hilfe eines Lämpchendipols kann nachgewiesen werden, daß der Empfangsdipol einen Teil der ausgestrahlten Energie des elektromagnetischen Feldes wieder aufnimmt. Der Empfangsdipol wird zu maximalen Schwingungen erregt, wenn seine Eigenfrequenz mit der Frequenz der auftreffenden Wellen übereinstimmt.

Elektromagnetische Wellen verursachen in einem Empfangsdipol einen hochfrequenten Wechselstrom. Der Dipol nimmt einen Teil der vom Sender ausgestrahlten Energie wieder auf. Ein Stabdipol bietet dann den besten Empfang, wenn seine Länge annähernd gleich der halben Wellenlänge der eintreffenden elektromagnetischen Wellen ist, und wenn er parallel zum Sendedipol steht.

Auf vielen Dächern in Städten und Dörfern sieht man Dipole für den Empfang des UKW-Rundfunks und des Fernsehens. Dabei tauchen vielfältige Formen auf. Sie lassen sich im wesentlichen auf zwei Grundformen zurückführen:

1. *Offener* oder *gestreckter Dipol.* Er entspricht dem bisher benutzten Stabdipol.
2. *Falt-* oder *Schleifendipol.* Er hat die Form einer Schleife.

Man setzt auch mehrere Dipolelemente übereinander. Dann erhält man die sogenannten *gestockten Antennen.*

2. Andere Antennenformen. Für den Empfang der Lang-, Mittel- und Kurzwellen dienen andere Antennenformen. *Hochantennen* bestehen aus einer mehrere Meter langen Kupferlitze, die isoliert an Häusern, Masten oder Bäumen aufgehängt ist.

Sie ergeben im allgemeinen einen guten Empfang (Abb. **116**/1). Auf Hausdächern, vor allem aber an Kraftwagen sieht man *Stabantennen*. In einem „Wartburg" wäre zum Beispiel ohne Außenantenne kein Rundfunkempfang möglich, da die Blechkarosserie die Hertzschen Wellen abschirmt.

Gelegentlich behilft man sich mit einer *Zimmerantenne:* Eine isolierte Kupferlitze wird an den Wänden eines Zimmers befestigt und ersetzt zum Teil eine Hochantenne.

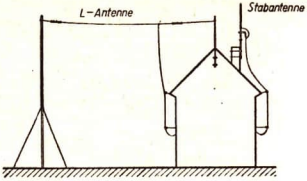


Abb. **116**/1
Hochantenne und Stabantenne

In modernen, hochwertigen Radiogeräten unserer volkseigenen Rundfunkindustrie findet man ferner eingebaute *Gehäuseantennen*. Dadurch ist ein guter Empfang auch ohne Hoch- oder Zimmerantenne möglich. Eine Antennenform für Sonderzwecke ist die sogenannte *Rahmenantenne* (Abb. **116**/2). Mit ihr kann man die Richtung eines Senders anpeilen. Sie ist drehbar gelagert und ergibt den stärksten Empfang, wenn die Ebene des Rahmens in die Richtung des Senders zeigt.

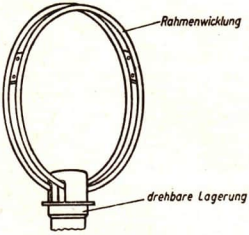


Abb. **116**/2. Rahmen-Peilantenne

3. Der Beginn der drahtlosen Nachrichtenübermittlung. Der russische Physiker *Popow* baute 1895 einen drahtlosen Empfänger für elektrische Entladungen in der Atmosphäre und erfand die Antenne. Bei jedem Blitz im Umkreis von mehreren Kilometern breiteten sich elektromagnetische Wellen durch den Raum aus, wurden von der Antenne aufgefangen und ließen im Empfänger eine Glocke ertönen. Weiter führte er mit einem Hertzschen Sender und seinem Empfänger die erste Nachrichtenübermittlung mittels elektromagnetischer Wellen durch.

Seine Veröffentlichungen setzten den Italiener *Marconi* in die Lage, 1897 eine Strecke von 6 km zwischen zwei Inseln im Ärmelkanal zu überbrücken und die drahtlose Telegrafie weiter auszubauen. Um die Jahrhundertwende wurde das erste Telegramm über den Atlantischen Ozean „gefunkt".

1905 rüstete man die ersten deutschen Ozeandampfer mit drahtlosen Telegrafiestationen aus. Ein Jahr später wurde die erste deutsche Großfunkstation Nauen erbaut, die größte in der Welt zur damaligen Zeit. Aber nicht nur in Deutschland, sondern in aller Welt errichtete man Funkstationen. Eine stürmische Entwicklung hatte begonnen, die auch heute noch nicht beendet ist. Sie brachte den *UKW-Empfang*, das *Fernsehen*, die *Radarmeßtechnik*

Alexander Stepanowitsch Popow (1859 bis 1905)

und die *Fernsteuerung* interplanetarischer Raumstationen über Hunderttausende von Kilometern hinweg. Wir dürfen auch in Zukunft noch weitere bedeutende Leistungen der Funktechnik erwarten.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Unter welchen Bedingungen arbeitet ein Stabdipol am günstigsten als Empfangsdipol?
2. Beschreiben Sie verschiedene Formen von Dipolantennen für UKW- und Fernsehempfang!
3. Beschreiben Sie Antennenformen für den Empfang von Lang-, Mittel- und Kurzwellen!
4. Begründen Sie die Behauptung, daß in einem Kraftwagen vom Typ P 50 ein Empfang mit einer Innenantenne möglich sei!
5. Ein Reisender ist sehr unzufrieden über die geringe Lautstärke, die sein mitgeführtes Kofferradio in einem Abteil eines D-Zuges entwickelt. Ein Mitreisender gibt ihm daraufhin einen Ratschlag. Nach dessen Ausführung zeigt das Gerät wieder die gewohnte Lautstärke. Welcher Ratschlag wurde gegeben?
6. Die in der Gesellschaft für Sport und Technik organisierten Amateurfunker führen „Fuchsjagden" durch, bei denen ein versteckter Sender mittels eines tragbaren Empfängers aufgespürt werden soll. Welche Antennenformen sind dazu geeignet?

29. Einige Eigenschaften Hertzscher Wellen

Die Hertzschen Wellen haben ähnliche Eigenschaften wie alle anderen Wellenarten, insbesondere wie die anderen Gruppen elektromagnetischer Wellen. In Einzelheiten unterscheiden sie sich jedoch von den anderen Wellen. Zur Untersuchung einiger Eigenschaften der Hertzschen Wellen benutzt man die Versuchsanordnung nach Abbildung **117**/1. Als Anzeigegerät verwendet man am Empfangsdipol eine Germaniumdiode und ein empfindliches Drehspulgerät.

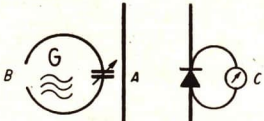


Abb. **117**/1
Sender und Empfänger zum Nachweis der Eigenschaften der Hertzschen Wellen

1. Abschirmung.

a) Hält man vor den Sendedipol (Stelle *A* in Abb. **117**/1) *Platten aus Pappe, Holz, Vinidur,* eine Glasscheibe und andere *nichtleitende Stoffe,* so wird der vom Meßgerät angezeigte Empfang nur wenig vermindert.

Isolierende Stoffe schwächen die Hertzschen Wellen nur in geringem Maße.

Hertzsche Wellen können daher auch mit Innenantennen empfangen werden.

b) Hält man an die gleiche Stelle vor dem Sendedipol Bleche aus *Eisen, Aluminium* und *anderen Metallen,* so zeigt das Meßinstrument überhaupt keinen Empfang an.

Metallbleche schirmen Hertzsche Wellen ab.

2. Reflexion.

a) Werden die Platten aus den isolierenden Stoffen hinter dem UKW-Generator hochgehalten (Stelle *B* in Abb. **117**/1), so ändert sich der Zeigerausschlag nur wenig.

Isolierende Stoffe reflektieren die Hertzschen Wellen nur in geringem Maße.

b) Hält man die Metallbleche hinter den Sendedipol, dann treten große Änderungen in der Empfangsanzeige auf.

Elektrische Leiter reflektieren Hertzsche Wellen sehr gut.

c) Hertzsche Wellen werden bereits an einem einfachen Metallstab reflektiert. Hält man zum Beispiel einen Stativstab von der ungefähren Größe des Sendedipols so hinter den Generator, daß der Stab parallel zum Dipol steht, so ändert sich ebenfalls der Ausschlag des Zeigers erheblich.

d) Sämtliche Reflexionsversuche führen zu den gleichen Ergebnissen, wenn man die reflektierenden Leiter hinter den Empfangsdipol bringt (Stelle *C* in Abb. **117**/1).

Die Hertzschen Wellen gehen durch isolierende Stoffe ohne wesentliche Schwächung hindurch und werden von ihnen auch nur in geringem Maße reflektiert. Metalle lassen die Hertzschen Wellen nicht hindurch und reflektieren sie vollständig. Leitende Stoffe eignen sich daher gut zur Abschirmung gegen Hertzsche Wellen. Hertzsche Wellen zeigen die Eigenschaften der Brechung, Beugung und Interferenz.

3. Stehende Wellen. Bei den mechanischen Wellen können sich durch Reflexion stehende Wellen ausbilden. Zum Unterschied gegenüber fortschreitenden Wellen sind stehende Wellen bekanntlich dadurch gekennzeichnet, daß an bestimmten Stellen des Raumes stets Schwingungsknoten und dazwischen ständig Schwingungsbäuche liegen.

Auch bei Hertzschen Wellen kann man stehende Wellen nachweisen. Man wiederholt die Reflexionsversuche und verändert dabei langsam die Entfernung des reflektierenden Metallkörpers, beispielsweise des Stativstabes, vom Empfangsdipol. Mit Hilfe des Meßinstrumentes findet man Stellen der maximalen Verstärkung beziehungsweise Schwächung.

Diese Beobachtungen beweisen die Bildung stehender Hertzscher Wellen. Die Vorgänge können wie folgt erklärt werden:

In den Raum zwischen dem reflektierenden Körper, dem *Reflektor*, und dem Empfangsdipol gelangen sowohl die Wellen des Sendedipols als auch die reflektierten Wellen. Beide überlagern sich, und es bilden sich stehende Hertzsche Wellen mit Schwingungsknoten und -bäuchen aus. Solange der Reflektor nicht verschoben wird, bleiben die Knoten und Bäuche im Raume fest. Bewegt man jedoch den Reflektor, so verschieben sie sich im Raume. Das ist schematisch in der Abbildung **118**/1 dargestellt.

Beim Annähern des Reflektors liegt dann am Empfangsdipol einmal ein Wellenbauch (Verstärkung – Abb. **118**/1a) und anschließend ein Wellenknoten (Schwächung – Abb. **118**/1b).

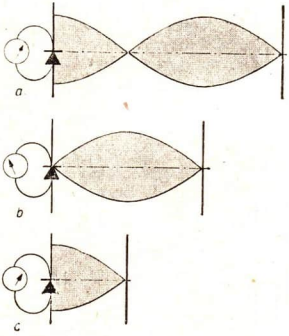


Abb. **118**/1
Die Verschiebung der Schwingungsknoten im Raum beim Bewegen des Reflektors in Richtung des Empfangsdipols

Werden Hertzsche Wellen reflektiert, so bilden sich durch Überlagerung mit den ankommenden Wellen stehende Wellen.
Die größte Verstärkung erhält man, wenn der Reflektor den Abstand $\frac{\lambda}{4}$ oder ein ungerades Vielfaches davon vom Empfangsdipol besitzt (Abb. 118/1 a und c).

Die Abbildung **118/1** veranschaulicht gleichzeitig ein einfaches Verfahren zur ungefähren Bestimmung der Wellenlänge von Ultrakurzwellen: Man ermittelt zwei Lagen des Reflektors im Raume hinter dem Empfangsdipol, bei denen das Meßinstrument jeweils den größten beziehungsweise den kleinsten Ausschlag zeigt. Der Abstand dieser beiden Lagen ist gleich der halben Wellenlänge.

4. Technische Ausnutzung der stehenden Wellen. Die beiden wichtigsten Grundformen des UKW-Empfangsdipols sind der gestreckte und der Faltdipol. Da jede Antenne nur einen geringen Teil der Energie aufnehmen kann, die der Sender in den Raum strahlt, ist man bestrebt, die Wirkung einer Dipolantenne zu erhöhen. Dazu nutzt man stehende Wellen aus, die man erzeugt, indem man einen *Reflektor* in einer Entfernung von $\frac{\lambda}{4}$ parallel zum Empfangsdipol anbringt. Durch den Reflektor erhöht sich die hochfrequente Wechselspannung, die im Faltdipol entsteht, um 25% bis 50%.

Die Wirkung kann noch dadurch verstärkt werden, daß man vor dem Dipol einen weiteren Stab, den sogenannten *Direktor*, anbringt. Bei richtiger Anordnung dieser Antennenelemente kann damit die empfangene Dipolwechselspannung gegenüber dem einfachen Faltdipol annähernd verdoppelt werden.

Es gibt Dipolantennen, die noch mehr Antennenelemente aufweisen. Mit ihnen wird der Anteil der Energie, den die Antenne aus dem elektromagnetischen Feld aufnimmt, noch gesteigert. Es ist hier jedoch nicht möglich, auf weitere Einzelheiten einzugehen. Abschließend sei darauf hingewiesen, daß für den UKW-Rundfunk und das Fernsehen eine *gute Antenne* die erste Voraussetzung für einen einwandfreien Empfang darstellt.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Wie verhalten sich verschiedene Stoffe bei der Abschirmung und Reflexion Hertzscher Wellen?
2. Begründen Sie, zu welchem Zweck *Heinrich Hertz* bei seinen Versuchen gegenüber dem Sender eine große Metallwand aufstellte und weshalb er den Raum davor mit einem Resonanzkreise absuchte! Welche Art von Wellen stellte er fest?
3. Wie kann man mit Hilfe eines Reflektors die Wellenlänge der von einem UKW-Sender ausgestrahlten Hertzschen Wellen annähernd bestimmen?
4. Welche Aufgaben haben die einzelnen Elemente eines UKW-Dipols, der sich aus mehreren Antennenelementen zusammensetzt?
5. Wie kann man einen Schwingkreis gegen hochfrequente Schwingungen abschirmen?

30. Die Ausbreitung Hertzscher Wellen in verschiedenen Wellenbereichen

Je nach der Frequenz des Senders entstehen Hertzsche Wellen verschiedener Wellenlänge. Man faßt sie nach internationaler Vereinbarung in *Wellenbereichen* zusammen. Diese unterscheiden sich durch die Art und Weise, wie die Wellen sich ausbreiten, und durch ihre Reichweite. Eine Grobeinteilung ergibt *lange, mittlere, kurze* und *ultrakurze Wellen* (s. Tabelle auf S. 121).

1. Arten der Ausbreitung. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ist je nach ihrer Wellenlänge sehr verschiedenartig. Auf die Ursachen kann jedoch nicht eingegangen werden.

a) Ausbreitung als Bodenwelle. *Erdet* man einen offenen Schwingkreis in der Mitte, so breitet sich die untere Hälfte des elektromagnetischen Feldes in der Erde aus. Die untere Antennenhälfte ist dann überflüssig geworden, so daß die Abmessungen der Sendeanlage kleiner sein können als ohne Erdung. Da die elektrischen Feldlinien immer senkrecht auf der Erdoberfläche enden, folgen die Wellen als sogenannte *Bodenwellen* der Krümmung der Erde (Abb. 120/1). Auf diese Weise breiten sich nur Hertzsche Wellen größerer Wellenlänge aus.

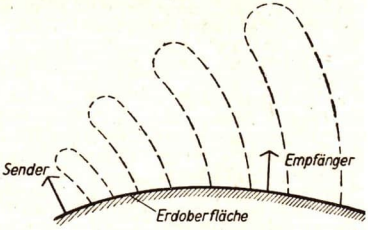


Abb. 120/1
Ausbreitung Hertzscher Wellen als Bodenwellen

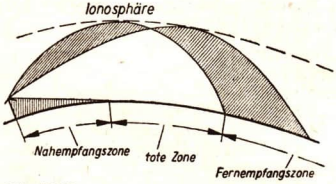


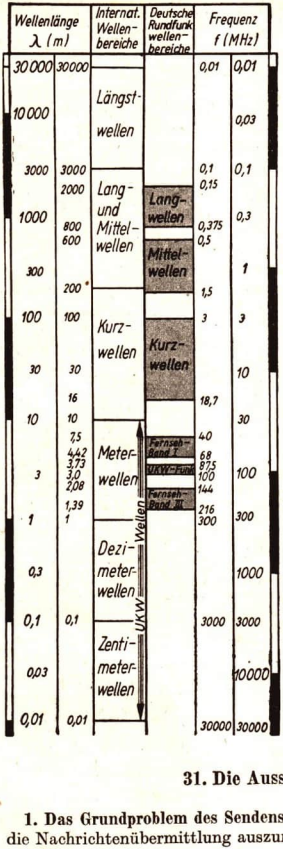
Abb. 120/2
Ausbreitung Hertzscher Wellen als Raumwelle

b) Ausbreitung als Raumwelle. Kürzere Hertzsche Wellen folgen der Krümmung der Erdoberfläche nicht in dem Maße wie die Langwellen. Sie werden nicht oder nur wenig gebeugt. Aus diesem Grunde ist die Zone des *Nahempfanges* mit der Bodenwelle verhältnismäßig klein. Ein Fernempfang ist mit ihr nicht mehr möglich. Neben der Bodenwelle breiten sich jedoch noch Hertzsche Wellen in den Raum hinaus aus. Man hat festgestellt, daß in Höhen von 100 km bis 400 km, in der sogenannten *Ionosphäre*, Schichten existieren, die Hertzsche Wellen durch Reflexion und Brechung wieder zur Erde zurückwerfen können. Elektromagnetische Wellen, die sich auf diese Art als *Raumwellen* ausbreiten, erzielen eine große Reichweite (Abb. 120/2).

Die Ionisierung der Luftschichten der Atmosphäre wird durch die Sonneneinstrahlung stark verändert. Infolgedessen treten große Unterschiede in der Ausbreitung durch Raumwellen zwischen Tag und Nacht auf.

c) Ausbreitung durch direkte Wellen. Ultrakurze Wellen können sich weder als Boden- noch als Raumwellen ausbreiten. Sie breiten sich ähnlich wie Lichtwellen durch *direkte Strahlung* aus. Die Reichweite liegt daher im wesentlichen innerhalb der optischen Sichtweite. Durch Beugung wird sie noch etwas erhöht.

2. Wellenbereiche und Ausbreitungseigenschaften. Die folgende Übersicht gibt einen Überblick über die Ausbreitung der Hertzschen Wellen in den einzelnen Wellenbereichen.



Sehr gleichmäßige Ausbreitung durch Boden- und Raumwellen; sicherste Nachrichtenverbindung; große Reichweite, aber nur bei hoher Senderleistung.

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 Lautstärke* kommen: große Reichweite bei starker Senderleistung; Empfang sehr störanfällig.

Bodenwelle nur bis höchstens 100 km; *Fernempfang nur durch Raumwelle* möglich; unter günstigen Umständen größte Reichweite bei kleiner Senderleistung;

große Unterschiede zwischen Tag und Nacht.

Ausbreitung durch direkte Wellen; kann 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;

kleine Senderleistungen;

mit kürzer werdender Wellenlänge treten die lichtähnlichen Eigenschaften noch stärker hervor;

insbesondere Dezi- und Zentimeterwellen lassen sich durch *scheinwerferartige Antennen* bündeln;

kleinste Senderleistungen erforderlich.

31. Die Aussendung von Funkwellen

1. Das Grundproblem des Sendens. Bei den Versuchen, die Hertzschen Wellen für die Nachrichtenübermittlung auszunutzen, ergaben sich grundsätzlich zwei Schwierigkeiten:

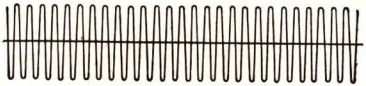
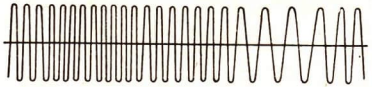
1. Die *hochfrequenten elektromagnetischen Schwingungen* können wohl als Hertzsche Wellen gesendet und empfangen werden, aber man kann sie *nicht ohne weiteres hörbar machen*, da die Membran des Lautsprechers diesen schnellen Schwingungen nicht folgen kann.

2. *Niederfrequente Schwingungen* der Sprache und der Musik können zwar *in entsprechende elektromagnetische Schwingungen umgewandelt werden*, sie erzeugen jedoch wegen der niedrigen Frequenz *keine Hertzschen Wellen* und können folglich *nicht gesendet werden*. Die Lösung dieser Probleme gelang nach vielen Versuchen, indem man beide Frequenzen in geeigneter Weise vereinigt hat. *Man prägt die tonfrequenten Schwingungen den hochfrequenten auf.* Bei der Aussendung „tragen" die HF-Schwingungen die Tonfrequenz. Deshalb bezeichnet man die so veränderte Hochfrequenz als *Trägerfrequenz.*

Den Vorgang des Aufprägens nennt man Modulation. Die Trägerfrequenz wird mit der Tonfrequenz moduliert.

2. Arten der Modulation. In der folgenden Tabelle werden nur die beiden wichtigsten Arten der Modulation gegenübergestellt: die *Amplituden-* und die *Frequenzmodulation.* Beim Modulieren verändert man die Amplitude oder die Frequenz der Hochfrequenz im Rhythmus der Niederfrequenz. In den folgenden Abschnitten wird nur die einfachere Amplitudenmodulation behandelt.

Arten der Modulation

Hochfrequenter Träger	
Tonfrequenz	
Amplitudenmodulation	
Frequenzmodulation	

Arten der Modulation	Amplitudenmodulation (AM)	Frequenzmodulation (FM)
Es bleibt konstant	Frequenz des Trägers	Amplitude des Trägers
Es verändert sich im Takt der Tonfrequenz	Amplitude des Trägers	Frequenz des Trägers
Anwendung	Rundfunk auf LW, MW, KW Bildübermittlung beim Fernsehen	UKW-Rundfunk, Tonübermittlung beim Fernsehen

3. Der Telegrafiesender. Im Kurzwellenbereich eines Rundfunkempfängers kann man Telegrafiesender leicht an ihren tönenden Morsezeichen erkennen. Diese kommen folgendermaßen zustande: Der Sender besitzt zwei Schwingungserzeuger: einen Tonfrequenz- und einen Hochfrequenzgenerator. Die Schwingungen jedes der beiden Generatoren werden in eigenen Verstärkerstufen verstärkt. In einer *Modulations- oder Mischstufe* wird die Sendefrequenz mit den tonfrequenten Schwingungen moduliert. Diese Modulation ist im Prinzip eine *Überlagerung*. Man kann nicht

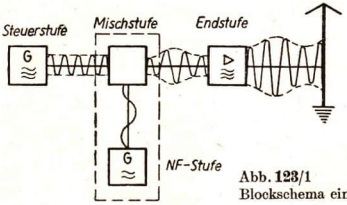


Abb. 123/1
Blockschema eines Telegrafiesenders

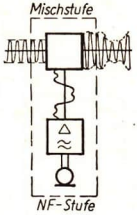


Abb. 123/2
NF- und Mischstufe eines Telefoniesenders (Blockschema)

nur bei mechanischen Schwingungen durch Überlagerung eine resultierende Schwingung erzeugen, sondern auch bei elektromagnetischen Schwingungen. Auf Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden. Nach einer weiteren Verstärkung in einer Endstufe überträgt man die modulierten hochfrequenten Schwingungen auf die Antenne. Die Ausstrahlung erfolgt im Takt der Morsezeichen.

Für einen Telegrafiesender der besprochenen Art ergibt sich das Blockschema der Abbildung 123/1.

4. Der Telefoniesender. Der Sender für *drahtlose Telefonie* ist ähnlich aufgebaut wie der Sender für tönende Telegrafie. Der wesentlichste Unterschied besteht darin, daß an die Stelle des Tonfrequenzgenerators ein *Tonfrequenzverstärker* tritt (vgl. S. 28). Ein Mikrofon wandelt die Schallschwingungen in Stromschwankungen um. Nach Verstärkung der Tonfrequenz wird damit ebenfalls die Trägerfrequenz moduliert.

Das Blockschema eines Telefoniesenders erhält man, indem man sich die in der Abbildung 123/1 durch gestrichelte Linien hervorgehobenen Stufen durch die entsprechenden Stufen der Abbildung 123/2 ersetzt denkt.

5. Der Rundfunksender. Der Aufbau eines *Rundfunksenders* ist grundsätzlich der gleiche wie beim Telefoniesender. Bei Musiksendungen muß jedoch ein wesentlich größerer Frequenzbereich der Schallschwingungen übertragen werden, damit die Eigenarten der verschiedenartigen Musikinstrumente nicht verloren gehen. Daher muß man besonders hochwertige Geräte verwenden. Außerdem nehmen die Anzahl der Stufen und die Ausmaße der Anlagen mit der viel höheren Ausgangsleistung beträchtlich zu. Die Abbildungen 124/1 und 124/2 geben einen Einblick in den Umfang solcher Anlagen.

Bei Kurzwellen und Ultrakurzwellen kommt man mit kleinerer Leistung aus. Das führt zu einer wesentlichen Verkleinerung der Sendeanlagen.

Abb. 124/1
Moderne Senderöhre mit Wasserkühlung

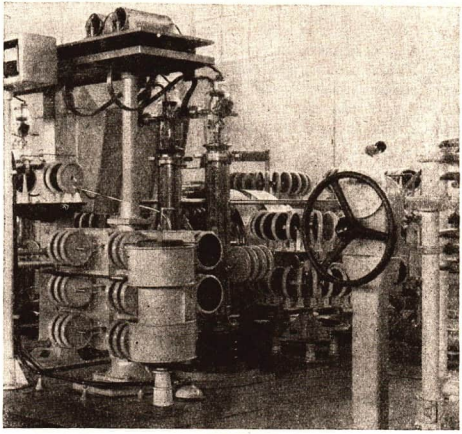


Abb. 124/2
HF-Endstufe eines Mittelwellensenders; Leistung 250 kW

6. Fragen und Aufgaben:

1. Unterscheiden Sie die Amplituden- und die Frequenzmodulation elektromagnetischer Schwingungen!
2. Zeichnen Sie eine graphische Darstellung amplitudenmodulierter Schwingungen!
3. Geben Sie das Grundsätzliche über Aufbau und Wirkungsweise
   a) eines Telegrafiesenders, b) eines Telefoniesenders an.

32. Der Empfang von Funkwellen

1. Die Grundprobleme des Empfanges. Auf die Antenne eines Empfängers wirken stets die Funkwellen vieler Sender ein. Beispielsweise senden allein in Europa etwa 500 Sender im Bereich der Mittelwellen. Würde man diese Vielzahl von Schwingungen nach entsprechender Umformung einem Lautsprecher zuführen, dann könnte man keinen Sender einzeln heraushören.

Daraus ergibt sich die erste Aufgabe: *Aus der großen Anzahl der einfallenden Funkwellen muß die eine gewünschte herausgesondert werden.* Dies geschieht durch Ausnutzung der Resonanz. Man führt das Gemisch der empfangenen Antennenwechselströme einem Schwingkreis zu, dessen Eigenfrequenz gleich der Frequenz des gewählten Senders ist. Dieser *Empfangs-* oder *Resonanzkreis* schwingt dann im Rhythmus der modulierten Trägerfrequenz des betreffenden Senders und unter-

drückt zum größten Teil alle anderen Frequenzen. Um viele Sender getrennt empfangen zu können, muß die Eigenfrequenz des Empfangskreises in einem großen Bereich veränderlich sein. Man muß den *Schwingkreis abstimmen können*. Dies geschieht mit Hilfe eines Drehkondensators beziehungsweise mit veränderlichen Spulen.

Die so ausgewählten modulierten hochfrequenten Schwingungen können jedoch immer noch nicht im Lautsprecher hörbar gemacht werden. Dafür gibt es zwei Gründe:

1. Die auf die Antenne übertragenen Wechselspannungen betragen meist nur einige Millivolt.
2. Die Membran des Lautsprechers kann nicht der Frequenz der hochfrequenten Schwingungen folgen.

Daraus ergeben sich die beiden nächsten Aufgaben:

Die Tonfrequenz muß durch den Vorgang der Demodulation wiedergewonnen und anschließend verstärkt werden.

2. Die Demodulation. Beim *Demodulieren* wird die Tonfrequenz vom hochfrequenten Träger abgetrennt. Das Prinzip der Demodulation von amplitudenmodulierten Schwingungen besteht darin, daß man *die hochfrequenten Wechselströme durch einen Einweggleichrichter in pulsierenden Gleichstrom verwandelt* (Abb. 125/1a und b). Die erhaltenen niederfrequenten Schwingungen werden im *Niederfrequenzteil verstärkt*. Obwohl der entstandene Gleichstrom noch im Rhythmus der Hochfrequenz pulsiert, spricht ein Lautsprecher darauf an. Wegen ihrer Trägheit können die beweglichen Teile des Lautsprechers den hochfrequenten Halbschwingungen nicht folgen. Wie der Zeiger eines Weicheisen-Meßinstrumentes folgen sie einem mittleren Wert zwischen Null und der Amplitude (c). Die Membran des Lautsprechers führt daher tonfrequente Schwingungen aus (d). Auf Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden.

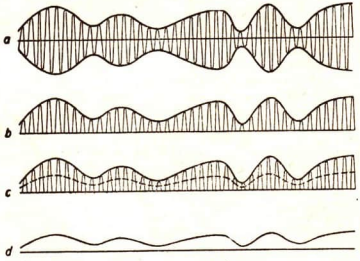


Abb. 125/1. Demodulation hochfrequenter amplitudenmodulierter Schwingungen

Als Gleichrichter finden unter anderen Verwendung:

a) *Germaniumdiode* (früher Detektor),

b) *HF-Diode*, eine spezielle Gleichrichterröhre,

c) *Audionschaltung*, in der eine Triode als HF-Gleichrichter wirkt.

3. Der einfache Rundfunkempfänger. In einem einfachen oder *Geradeausempfänger* durchläuft die empfangene Energie nacheinander folgende Stufen: Die von der *Antenne* aufgenommene Energie wird dem *Empfangskreis* zugeführt. Die von ihm *ausgewählten Schwingungen* der gewünschten Senderfrequenz werden im allgemeinen *zuerst verstärkt*, anschließend *gleichgerichtet*. Die so gewonnene *Tonfrequenz* muß *noch einmal verstärkt* werden, bevor sie im *Lautsprecher in mechanische Schallwellen*

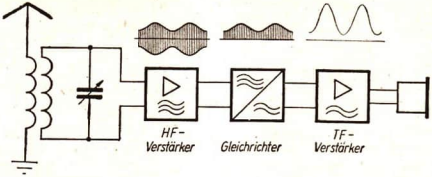


Abb. 126/1
Blockschema eines einfachen Rundfunkempfängers

umgewandelt wird. Die Abbildung 126/1 zeigt diesen Weg schematisch. Um die Qualität der empfangenen Sendungen zu steigern, hat man immer neue Verbesserungen ersonnen. Ein modernes Rundfunkgerät ist heute ein komplizierter Apparat aus vielen Einzelteilen.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Stellen Sie eine Detektorschaltung nach der Abbildung 126/2 zusammen! Welchen Zwecken dienen die Einzelteile dieser Schaltung?
2. Die einfachste Detektor-Empfangsschaltung zeigt die Abbildung 126/3. Versuchen Sie, mit einem Gerät dieser Art Rundfunksendungen zu empfangen! Welchen Nachteil hat diese Schaltung gegenüber der in Abbildung 126/2?
3. Was versteht man unter der Demodulation?

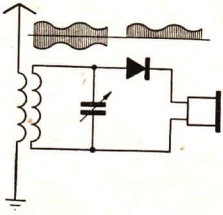


Abb. 126/2
Detektorschaltung mit induktiver Antennenankopplung

Abb. 126/3
Einfachste Detektor-Empfangsschaltung

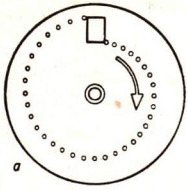
4. Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines Geradeausempfängers!
5. Berichten Sie über eigene Erfahrungen mit verschiedenen Empfangsgeräten!

33. Das Fernsehen

Viele Familien in unserer Republik besitzen ein *Fernsehgerät*. Mit ihm können sie die wichtigsten Ereignisse auf den Gebieten der Politik, der Kultur und des Sportes daheim miterleben. Auch an der Erhöhung des allgemeinen Bildungsniveaus der Werktätigen hat der Deutsche Fernsehfunk einen wesentlichen Anteil. Jahr für Jahr kommen Tausende neuer Fernsehteilnehmer dazu.

Während vor 20 Jahren die meisten Menschen noch nichts von den Vorgängen beim Fernsehen wußten, gehört es heute unzweifelhaft zur Allgemeinbildung eines Oberschülers, die wichtigsten technischen Probleme des Fernsehens zu kennen. Diese Forderung ergibt sich vor allem aus der wachsenden Bedeutung des industriellen Fernsehens für die moderne Produktion.

1. Die physikalischen Probleme bei der Übertragung eines Bildes. Einen Ton oder einen Klang zu übertragen, ist ein verhältnismäßig einfaches technisches Problem: Ein Mikrofon verwandelt die auftreffenden Schallwellen in entsprechende Stromschwankungen. Im Lautsprecher werden diese wieder in Schallschwingungen umgeformt.



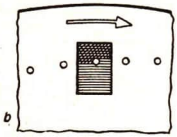


Abb. 127/1
Nipkowsche Lochscheibe zum zeilenweisen Abtasten eines Bildes

a) Die Aufnahme des Bildes. Für das Übertragen eines Bildes auf elektrischem Wege besteht ebenfalls nur die eine Möglichkeit der Umwandlung in Strom- oder Spannungsschwankungen. Zuvor muß das Bild aber in geeigneter Weise zerlegt werden. Betrachtet man den Abdruck einer Fotografie in einer Tageszeitung genauer, so erblickt man ein regelmäßiges Raster von einzelnen schwarzen und weißen Punkten. Jedes Bild kann in ähnlicher Form aus einzelnen Bildpunkten aufgebaut werden, die sich in ihrer Helligkeit unterscheiden. Diese verschiedenen Helligkeitswerte der einzelnen Bildpunkte werden mittels einer Fotozelle in winzige Stromimpulse umgeformt und weitergeleitet.

Am Beginn der Entwicklung des Fernsehens versuchte man, ein Bild auf *mechanische Weise* zu zerlegen. Der deutsche Ingenieur *Paul Nipkow* erhielt bereits 1884 ein Patent auf die von ihm erfundene *Lochscheibe* (Abb. **127**/1a). Die Abbildung **127**/1b zeigt ihre Wirkungsweise. Jedes Loch überstreicht eine Zeile des Bildes. Dabei geschieht, bildlich gesprochen, das gleiche, als ob man eine Fotografie mit einer Schere in schmale waagerechte Streifen gleicher Breite zerschneiden und sämtliche Streifen aneinander reihen würde (vgl. Abb. **129**/1, oben). Nach dem Abtasten der letzten Zeile hat die Lochscheibe gerade eine Umdrehung vollendet und wiederholt den Vorgang von vorn. Der so über das Bild geführte Lichtstrahl erregt eine Fotozelle und ruft in ihr einen Strom hervor, der entsprechend der Helligkeit der einzelnen Bildpunkte schwankt.

Auf diese Art wurde 1929 in Berlin die erste brauchbare Bildübertragung durchgeführt. Da aber das verwendete Raster von 30 Zeilen zu grob war, bemühte man sich in der Folgezeit, die Zeilenzahl zu erhöhen. Jedoch gelangte man mit der mechanischen Zerlegung bald an die Grenze der technischen Möglichkeiten, die eine weitere Verbesserung nicht mehr zuließen.

Eine wesentlich größere Zeilenzahl erhält man bei Benutzung der Katodenstrahlröhre. Nachdem er die Braunsche Röhre für diesen Zweck wesentlich verbessert hatte, konnte der deutsche Physiker *Manfred von Ardenne* damit 1930 in Berlin die erste *vollelektronische Bildübertragung* der Welt erfolgreich vorführen.

b) Die Wiedergabe des Bildes. Das zweite zu lösende Problem bestand in der *Bildwiedergabe*. Die übertragenen Strom- und Spannungsschwankungen müssen zunächst wieder in die Helligkeitsunterschiede der aneinandergereihten Bildpunkte übersetzt werden. Dazu benutzte man am Anfang des Fernsehens Glimmlampen. Die aneinandergereihten Bildpunkte müssen sodann wieder zu den einzelnen Zeilen zusammengefaßt und die Bildzeilen untereinander wiedergegeben werden. Dafür kann man grundsätzlich das gleiche Verfahren benutzen, mit dem die Abtastung des Bildes durchgeführt wurde.

Auch hier kam man erst zu wesentlichen Fortschritten in der Entwicklung des Fernsehempfängers, als man die Elektronenstrahlröhre auch für die Bildwiedergabe benutzen konnte. Der erste Versuch in dieser Richtung wurde durch Professor *Dieckmann* im Jahre 1906 in München durchgeführt.

c) Die Synchronisation. Für die Entwicklung unserer heutigen Fernsehtechnik war noch die Lösung eines dritten Problems entscheidend: Das Abtasten der Bildvorlage auf der Senderseite und das Zusammensetzen der Bildpunkte zum fertigen Bild im Empfänger müssen nicht nur mit der gleichen Geschwindigkeit ablaufen, sondern auch der Zeilenwechsel muß übereinstimmen. Bildzerlegung und Bildzusammensetzung müssen in einem *vollkommenen Gleichlauf* oder, wie man sagt, *synchron* erfolgen. Dies wird dadurch erreicht, daß der Sender außer den Bildsignalen noch zusätzliche Signale, die sogenannten *Synchronisierimpulse*, aussendet. Dadurch wird der Elektronenstrahl in der Empfängerröhre im gleichen Rhythmus wie der Elektronenstrahl bei der Bildaufnahme gesteuert.

d) Übertragung von Bewegungsvorgängen. Für die Übertragung von bewegten Vorgängen nutzt man wie beim Film die Trägheit der Netzhaut des Auges aus: Überträgt man in der Sekunde mehr als 16 Bilder, von denen jedes folgende sich um einen kleinen Bruchteil des Bewegungsablaufes vom vorhergehenden Bild unterscheidet, so vermag unser Auge die Eindrücke nicht mehr getrennt wahrzunehmen. Die Bilder fließen ineinander, und es entsteht der Eindruck einer fließenden Bewegung. Hier liegt wieder die oft zu beobachtende Beziehung zwischen einer quantitativen und einer qualitativen Veränderung vor. Durch Verkürzung der Zeit für eine Bildbetrachtung ergibt sich eine neue Eigenschaft, nämlich die fließende Bewegung. Für das Fernsehen ist die Zahl von 25 Bildern je Sekunde international festgelegt. Man bezeichnet diese Zahl als *Bildwechselfrequenz*. Das bedeutet, daß die Abtastvorrichtung auf der Senderseite sämtliche Zeilen eines Bildes im Zeitraum von $\frac{1}{25}$ s überstreicht.

2. Die Bildaufnahme durch eine moderne Fernsehkamera. Der Hauptbestandteil einer modernen Fernsehkamera ist eine Kombination von Braunscher Röhre und Fotozelle. Man nennt dieses Gerät ein *Ikonoskop* oder auch eine *Bildspeicherröhre*. Es geht auf ein Patent des russischen Ingenieurs *Vladimir Zworykin* zurück, das er 1918 in den Vereinigten Staaten erhalten hatte. Bis zum Jahre 1934 wurde es so weit entwickelt, daß es für den praktischen Sendebetrieb eingesetzt werden konnte. Durch eine Optik wird das zu übertragende Objekt auf einem Bildschirm besonderer Art im Innern des evakuierten Kolbens abgebildet (Abb. 128/1). Der Bildschirm besteht aus *drei Schichten:* Auf der Rückseite einer *Glimmerplatte* befindet sich eine *Metallfolie;* die Vorderseite besteht aus einem sehr dünnen *Belag von Caesium*. Infolge eines besonderen Herstellungsverfahrens bildet es keine zusammenhängende Schicht, son-

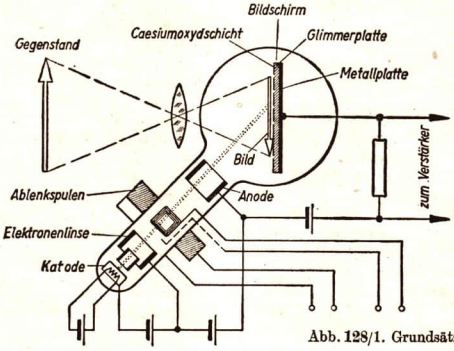


Abb. 128/1. Grundsätzlicher Aufbau eines Ikonoskops

dern ist aus vielen Millionen Einzelkörnchen zusammengesetzt, die elektrisch voneinander isoliert sind. Jedes Caesiumkörnchen für sich stellt eine winzige Fotozelle dar. Gleichzeitig bildet es aber mit der Glimmerschicht als Dielektrikum und der Metallfolie als der zweiten Platte einen Miniaturkondensator.

Aus jedem Caesiumkörnchen, auf welches Licht fällt, werden Elektronen ausgelöst und gelangen infolge der angelegten „*Saugspannung*" zur Anode. Die Elektronenabgabe ist von der Helligkeit des betreffenden Bildpunktes abhängig. Die Caesiumkörner, die am hellsten beleuchtet sind, werden am stärksten positiv geladen. Die verschiedene Stärke der Aufladung der vielen Millionen winziger Kondensatoren ist also ein getreues Abbild des Objektes, dessen Bild durch die Kameraoptik auf dem Spezialschirm entworfen wird.

Das projizierte Bild wird vom Elektronenstrahl der im Ikonoskop enthaltenen Braunschen Röhre abgetastet und dabei in 625 Zeilen mit je etwa 830 Bildpunkten zerlegt. Das bedeutet, daß der Elektronenstrahl in einer Sekunde

$$625 \cdot 25 \text{ Zeilen} = 15\,625 \text{ Zeilen}$$

abtasten muß. Die Frequenz, mit der er die Zeilen wechselt, die *Zeilenfrequenz*, beträgt bei unseren Fernsehgeräten 15 625 Hz.

Da der Strahl aus gebündelten Elektronen besteht, werden die mehr oder weniger positiv geladenen Miniaturkondensatoren wieder entladen. Die dabei entstehenden kleinen Entladeströme unterschiedlicher Stärke werden von der rückwärtigen Metallplatte abgenommen und einem Verstärker zugeführt. Damit sind die Helligkeitswerte der Bildpunkte des zu übertragenden Bildes in aufeinanderfolgende Stromimpulse umgewandelt.

3. Die wichtigsten Probleme der Aussendung. Mit den verstärkten elektrischen Impulsen wird nun eine hochfrequente Schwingung, der sogenannte *Bildträger*, moduliert. Man wendet hier die Amplitudenmodulation an, allerdings in einer Abwandlung, die man als *negative Amplitudenmodulation* bezeichnet. Die Abbildung **129/1** veranschaulicht die Bildzerlegung durch die zeilenweise Abtastung und die Übersetzung

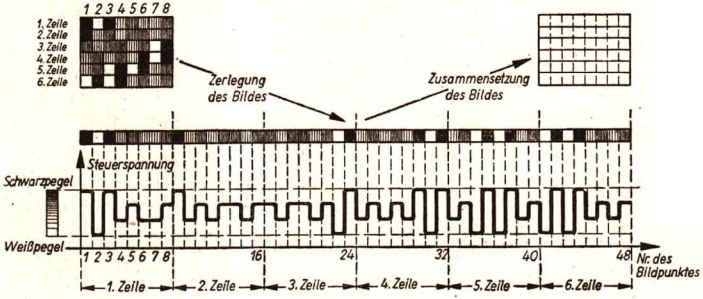


Abb. **129/1.** Schema der Bildzerlegung in Zeilen und der Umwandlung der Helligkeit der einzelnen Punkte in Spannungsschwankungen

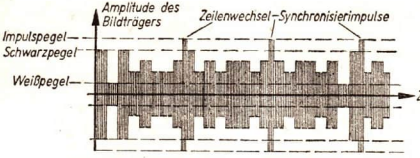


Abb. **130/1.** Hochfrequenter Bildträger in negativer Amplitudenmodulation mit Synchronisierimpulsen

der Helligkeitswerte der Bildpunkte in die elektrischen Werte der Steuerspannung, mit der man die negative Amplitudenmodulation des Trägers durchführt. Durch eine besondere Schaltung wird erreicht, daß einem *schwarzen* Bildpunkt die höchste und einem *weißen* Bildpunkt die niedrigste Steuerspannung entspricht.

Wegen der großen Anzahl der Bildpunkte, die je Sekunde zu übertragen sind, muß der Bildträger eine sehr hohe Frequenz besitzen. Deshalb benutzt der Fernsehfunk ultrakurze Wellen. Die Tabelle auf Seite 121 läßt die Einordnung der beiden hauptsächlich benutzten *Fernsehbänder I und III* in die gesamte Skale der Funkwellen erkennen. Jedes Band ist in mehrere *Kanäle* unterteilt. So enthält zum Beispiel das Fernsehband I die Kanäle 2 bis 4 und das Band III die Kanäle 5 bis 11. Zu jedem Kanal gehört sowohl die *Frequenz des Bildträgers* als auch die *Frequenz des Tonträgers* eines Fernsehsenders. Der Bildträger enthält neben dem Bildinhalt noch die Impulse für die Synchronisation des Empfängers. Die mit der Steuerspannung der Abbildung **129/1** modulierte Bildträger-Frequenz erhält dadurch die in der Abbildung **130/1** dargestellte Form.

4. Der Bildempfang. In jeder Dipolantenne, die im Ausstrahlungsbereich eines Fernsehsenders liegt, werden winzige Antennenwechselspannungen erzeugt. Um in größerer Entfernung vom Sender noch ein gutes Bild empfangen zu können, sind meist *mehrfach zusammengesetzte und gestockte Antennen* notwendig. Über *spezielle Antennenkabel* werden die in der Antenne erregten hochfrequenten elektromagnetischen Schwingungen dem Empfänger zugeführt (Abbildung **130/2**). Dort werden sie zunächst verstärkt. Dann wird die Frequenz des Tonträgers abgetrennt. Wie in einem Rundfunkgerät wird sie im Tonteil des Fernsehempfängers in Schallwellen umgewandelt (Abb. **131/1**).

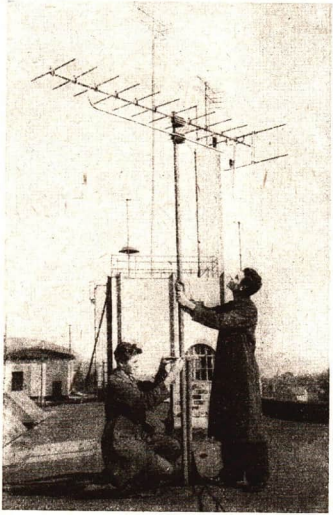


Abb. **130/2.** Gestockte 13-Elemente-Antenne wird montiert

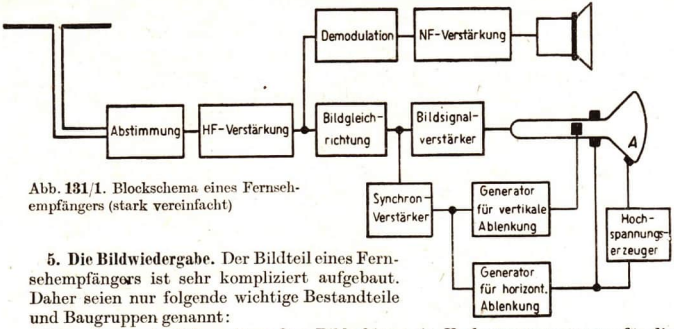


Abb. **131**/1. Blockschema eines Fernsehempfängers (stark vereinfacht)

5. Die Bildwiedergabe. Der Bildteil eines Fernsehempfängers ist sehr kompliziert aufgebaut. Daher seien nur folgende wichtige Bestandteile und Baugruppen genannt:

Eine *Braunsche Röhre* mit großem Bildschirm; ein *Hochspannungserzeuger* für die Anodenspannung der Bildröhre; zwei *Röhrengeneratoren* zum Erzeugen der Spannungen für die waagerechte beziehungsweise die lotrechte Ablenkung des Elektronenstrahls.

Der Weg der Frequenz des Bildträgers gabelt sich im Bildempfänger (Abb. **131**/1). *Ein Zweig* führt die Bildfrequenz zum Steuergitter der Bildröhre. Damit wird die Helligkeit des Leuchtpunktes auf der Bildröhre entsprechend der Helligkeit der zu übertragenden Bildpunkte gesteuert. Im *zweiten Zweig* werden die aufgesetzten Gleichlaufimpulse vom Bildinhalt wieder abgetrennt. Auch ihr Weg gabelt sich: Ein Teil der Impulse wirkt auf die waagerechte Ablenkung ein und verursacht den richtigen Zeilenwechsel des Elektronenstrahls. Der zweite Anteil der Synchronisierimpulse wirkt auf den Generator für die lotrechte Ablenkung des Elektronenstrahles ein, so daß der Bildwechsel zur rechten Zeit erfolgt. Auf diese Art wird der Gleichlauf von Bildaufnahme und Bildwiedergabe erreicht. Diese Aufgabe war bei der Entwicklung des Fernsehens das schwierigste Problem.

Jeder moderne Fernsehempfänger stellt eine Spitzenleistung auf dem Gebiete der Hochfrequenztechnik dar (Abb. **131**/2). Erfahrene Ingenieure wenden bei der Konstruktion die Ergebnisse der Wissenschaftler an, qualifizierte Arbeiter setzen die Pläne der Konstrukteure in die Wirklichkeit um.

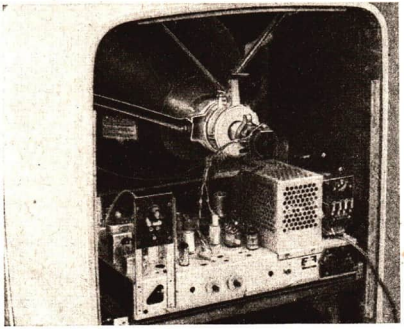


Abb. **131**/2. Blick in einen modernen Fernsehempfänger

6. Fragen und Aufgaben:

1. Schildern Sie die Zerlegung und den Aufbau eines Bildes mittels der Nipkowscheibe!
2. Beschreiben Sie den Bau und die Wirkungsweise eines Ikonoskops!
3. Wieviel Bildpunkte je Sekunde werden beim Fernsehen übertragen? Geben Sie den Zusammenhang zwischen dieser Zahl und der Wellenlänge beim Fernsehen an!
4. Was versteht man unter der Synchronisation von Sender und Empfänger und warum ist sie notwendig?
5. Erläutern Sie die Hauptfunktionen eines Fernsehempfängers an Hand seines Blockschemas!

34. Anwendungen Hertzscher Wellen

In den 70 Jahren, die seit den grundlegenden Entdeckungen von *Heinrich Hertz* vergangen sind, ist das große Gebiet der Hertzschen Wellen weitgehend für die Nutzung erschlossen worden. Einen Überblick über die wichtigsten Anwendungsgebiete gibt folgende Übersicht. Darin bedeuten: *LW* = Langwellen, *MW* = Mittelwellen, *KW* = Kurzwellen, *UKW* = Ultrakurzwellen, *DM* = Dezimeterwellen, *CM* = Zentimeterwellen.

1. Anwendungsgebiete Hertzscher Wellen.

Radio- und Nachrichtendienste

Rundfunkstationen	*LW*, *MW*, *KW*, *UKW*	Verbreitung von Nachrichten, Unterhaltungssendungen usw.
Fernsehfunkstationen	*UKW*	Bild- und Tonübertragung
Funktelegrafenverkehr	*LW*, *KW*	Übermittlung von Telegrammen, Briefen und Bildern auf drahtlosem Weg
Funksprechverkehr	*UKW*	Übermittlung von Telefongesprächen durch Richtfunkstrecken
Amateurfunkstationen	*KW*, *UKW*	Austausch von persönlichen Nachrichten in Morsezeichen oder Telefonie

Funkanlagen für unsere Nationale Volksarmee und Volkspolizei

Telegrafie- und Telefoniesender	*KW*	Verbindung zwischen Stäben und Truppe, zwischen Boden und Flugzeug, zwischen Land und Schiff
Kleingeräte für kurze Entfernungen (bis 2 km)	*DM*	Truppenverbindung, Flugzeug- und Panzerverbindung untereinander
Radaranlagen	*UKW*, *DM*, *CM*	Funkortung von Objekten (Schiffe, Flugzeuge usw.)
Funkstreifenwagen der Volkspolizei	*UKW*	Überwachung und Kontrolle des Verkehrs und Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit

Funkanlagen für wissenschaftliche Zwecke

Radioastronomie	*DM*	Untersuchungen elektromagnetischer Strahlungen der Sterne aus dem Weltenraum, insbesondere Sonnenforschung

Radaranlagen	*UKW*	Verfolgung von Meteoren, Wetterballons, Satelliten und Weltraumraketen
Fernsteuerungen	*UKW*	Steuerung von Raketen
Funkanlagen im Verkehrswesen und in der Industrie		
Dispatcheranlagen	*UKW*	Verständigung zwischen einer Zentralstelle und anderen Dienststellen in der Landwirtschaft, im Bergbau (Tagebau) usw.
Rangierfunk	*UKW*	Verbindung zwischen Leitstelle und Rangierlok
Funkortung	*KW, UKW*	Ortsbestimmung von Schiffen und Flugzeugen durch Peilung oder Radar

2. 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 später als Mitbenutzer der Klubstation oder als Sendeamateur einer eigenen Station die Verbindung zu Amateuren in aller Welt aufzunehmen. Mit geringer Sendeleistung, oft nur 10 W, überbrücken sie auf dem 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 Nationalen Volksarmee als Funker. Eine moderne Armee, wie unsere Nationale Volksarmee, benötigt viele qualifizierte Funker. Die Abbildung 133/1 zeigt Funker der Nationalen Volksarmee mit einem tragbaren Dezimeterwellengerät.

3. Rundfunk und Fernsehen. In der Deutschen Demokratischen Republik gibt es heute in 27 Orten Rundfunksender, die 6 verschiedene Programme ausstrahlen. Durch erhebliche staatliche Mittel ist unser Rundfunk in der Lage, seinen Hörern ein vielseitiges Programm zu bieten. *Unser Rundfunk ist die Stimme des ersten Arbeiter- und-Bauern-Staates der deutschen Geschichte.* Dementsprechend hat er vor allem die Aufgabe, die

Abb. 133/1. Funker der Nationalen Volksarmee mit einem tragbaren Funkgerät

Abb. **134**/1. Übertragungswagen

sozialistische Entwicklung in unserer Republik zu fördern. Daneben weist er aber auch den Hörern in Westdeutschland den Weg zu einer glücklichen Zukunft.

Viele westdeutsche Hörer erfahren so die Wahrheit über unseren Staat. Politische, kulturelle, sportliche und Wirtschaftssendungen dienen diesen Zielen und sorgen dafür, daß die Bevölkerung laufend informiert wird. Unterhaltungssendungen dienen der Entspannung unserer Werktätigen.

In den kapitalistischen Ländern ist der Rundfunk ebenso wie die Presse ein *Machtmittel der kapitalistischen Klasse*. Die Rundfunk- und Fernsehsender sind entweder direkt im Besitz der herrschenden Klasse oder dienen kapitalistischen Interessen.

Wie der Rundfunk ist auch das *Fernsehen* von den gesellschaftlichen Verhältnissen des betreffenden Landes abhängig. Der *Deutsche Fernsehfunk* der Deutschen Demokratischen Republik strahlt ein vielseitiges Programm aus, das frei von Kriegs- und Völkerhetze ist. Im Laufe des Siebenjahrplanes wird die Produktion von Fernsehempfängern in der DDR von 6,2 je 100 Haushaltungen im Jahre 1958 auf 77 je 100 Haushaltungen im Jahre 1965 erhöht. Dadurch wird jeder Werktätige die Möglichkeit haben, an politischen, kulturellen und sportlichen Ereignissen unmittelbar teilzunehmen. Der Deutsche Fernsehfunk Berlin verfügt über eine Anzahl von Übertragungswagen, so daß von wichtigen Ereignissen direkt berichtet werden kann (Abb. **134**/1). Auch auf dem Gebiete des Fernsehens arbeiten die sozialistischen Länder zusammen. Zwischen dem Fernsehfunk in Budapest, Prag, Warschau und Berlin besteht bereits ein *Austauschprogramm* mit einem Relaisnetz von etwa 3000 km. Der Aufbau eines internationalen Fernsehnetzes unter der Bezeichnung *Intervision* ist in Budapest beschlossen worden. An dieses Netz sollen die Sowjetunion, Albanien, Bulgarien und Rumänien angeschlossen werden. Im Rahmen des Siebenjahrplanes wird auch das Fernsehnetz unserer Republik weiter ausgebaut.

4. Fernsehen in Technik und Wissenschaft. In den letzten Jahren hat das sogenannte *industrielle Fernsehen* immer mehr an Bedeutung gewonnen. Man kann mit Hilfe einer *Fernsehkamera* von zentraler Stelle aus Produktionsvorgänge überwachen beziehungsweise Beobachtungen an schlecht zugänglichen Stellen durchführen. Die vom VEB Werk für Fernmeldewesen Berlin hergestellte *Fernbeobachtungsanlage* besteht aus einer Fernsehkamera, einem Zwischenverstärker und einem Fernbildschreiber, der eine Braunsche Röhre enthält. Die Entfernung zwischen Kamera und Empfänger wird

nicht durch drahtlosen Funk, sondern mittels eines Fernsehkabels überbrückt. Sie kann bis zu 200 m betragen.

Mit Hilfe einer Fernbeobachtungsanlage ist es möglich, Beobachtungen in Räumen mit gefährlicher radioaktiver Strahlung durchzuführen. In der Charité, einem großen Berliner Krankenhaus, erfolgt die Überwachung der Kobaltkanone mittels „Fernauge".

Bei Kränen bestehen für den Kranführer oft schlechte Sichtverhältnisse. Eine am Kranausleger angebrachte Fernsehkamera ermöglicht eine günstige Beobachtung (Abb. 135/1). Fernsehkameras können auch zur Kontrolle des Verkehrs an Knotenpunkten vorteilhaft eingesetzt werden. In *Dispatcherzentralen* wird man in Zukunft immer häufiger Fernsehempfänger finden, die zur Überwachung des Produktionsablaufes dienen.

Besondere Bedeutung hat das industrielle Fernsehen für die Beobachtung an nicht zugänglichen Stellen, zum Beispiel unter Wasser. Mit geringem Aufwand können schnell Untersuchungen an Talsperren, Brückenpfeilern, Schleusentoren und Schiffen vorgenommen werden.

Auch die Wissenschaft bedient sich der Fernsehkamera. In der Chirurgischen Klinik der Berliner Humboldt-Universität wurde 1958 eine Fernsehapparatur in Betrieb genommen, die es den Medizinstudenten im Hörsaal ermöglicht, eine im Operationssaal ausgeführte Operation zu verfolgen. Die Bildkamera befindet sich in der Leuchte über dem Operationstisch und kann fernbedient werden (Abb. 136/1). Durch einen besonderen Fernsehprojektor wird auf einen Bildschirm im Hörsaal ein 2 m · 3 m großes Bild projiziert.

Eine besonders eindrucksvolle Anwendung des Fernsehens ist auf S. 95 erwähnt worden: *die Übertragung der Aufnahmen von der Rückseite des Mondes zur Erde.* Die durch eine automatische Anlage aufgenommenen Bilder wurden nach dem Prinzip des

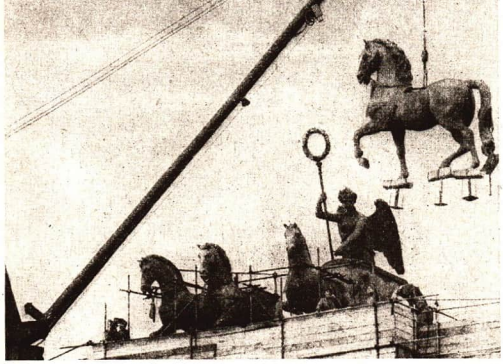
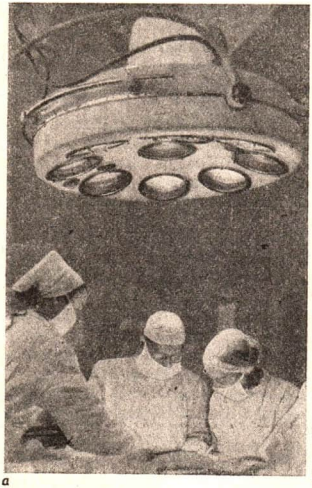
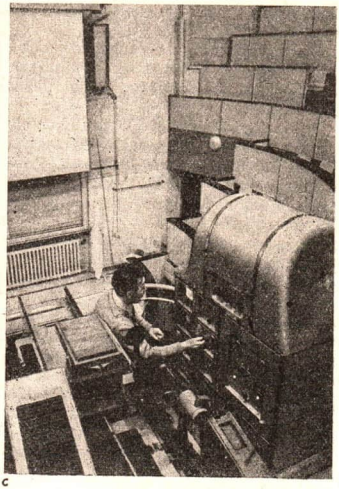


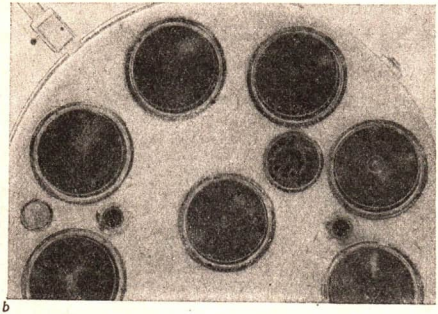
Abb. 135/1
Fernsehkamera an einem Kranausleger bei der Montage der Quadriga auf dem Brandenburger Tor in Berlin



a



c



b

Abb. **136**/1. Operationsleuchte mit Fernsehkamera

a) bei einer Operation.

b) Blick auf die Leuchte mit Kamera,

c) Projektor

Fernsehens zur Erde gefunkt (Abb. **137**/1). Dieser gewaltige Erfolg der sowjetischen Wissenschaft und Technik zeigt wieder einmal, daß immer neue Ziele erreicht werden, die noch vor wenigen Jahrzehnten für unerreichbar galten, und daß der menschlichen Erkenntnis keine Grenzen gesetzt sind.

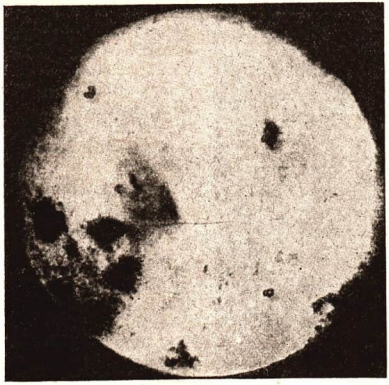


Abb. **137**/1. Bild von der Rückseite des Mondes, aufgenommen durch eine sowjetische Weltraumstation

5. Richtfunk. Eine *Richtfunkverbindung* besteht aus Empfangs- und Sendestation und dazwischenliegenden *Relaisstationen*, die einen Abstand von 50 km bis 60 km haben (Abb. **137**/2). Vom Richtfunksender werden mit einer großen *Parabolantenne*, deren Durchmesser bis 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 (Abb. **137**/3). Da Dezimeterwellen stark gebündelt werden können, werden mit sehr geringen Leistungen von etwa 2 W bis 5 W die

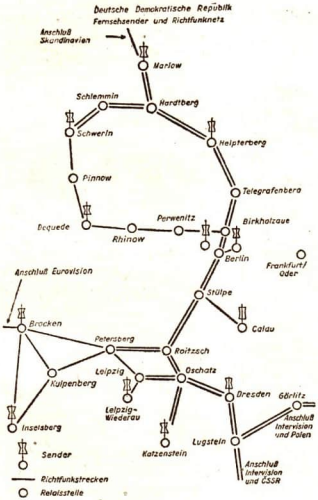


Abb. **137**/2. Richtfunkstationsnetz

Abb. **137**/3. Parabolantenne

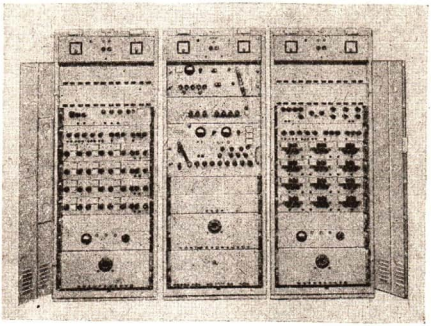


Abb. 138/1. Richtfunkverbindungsgerät RVG 934 vom VEB Rafena Radeberg

erforderlichen Entfernungen erreicht. Ein großer Vorteil einer Richtfunkstrecke gegenüber einer Kabelverbindung besteht in dem wesentlich geringeren Kosten- und Materialaufwand.

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 (Abb. 138/1). Im Fernmeldewesen werden gleichzeitig bis zu 23 Telefongespräche oder bis zu 550 Telegrafie- oder Fernschreibverbindungen übermittelt. Zwischen Berlin und einigen Bezirksstädten bestehen bereits *Richtfunkverbindungen der Deutschen Post.*

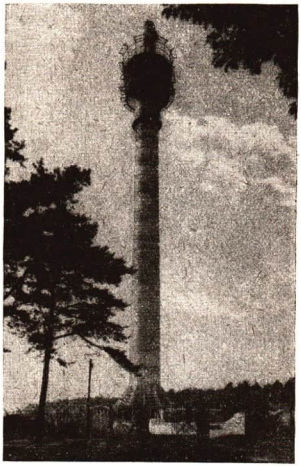


Abb. 138/2. Relaisturm bei Birkholzaue

Die Abbildung 138/2 zeigt die Relaisstation bei Birkholzaue. Sie dient als Zwischenstation für verschiedene *UKW*-, Fernseh- und Richtfunkverbindungen.

6. UKW-Verkehrsfunk. Für die drahtlose Nachrichtenübermittlung in der Industrie und in der Landwirtschaft, in der Schiffahrt und im Dienste der Eisenbahn und der Polizei benutzt man meist ultrakurze Wellen (UKW). Für Funkverbindungen im Umkreis von 10 km bis 15 km um die Sendestation werden *UKW-Funksprechanlagen* verwendet.

Je nach dem Verwendungszweck können zwei oder mehr Stationen, die ortsfest oder beweglich sind, miteinander im *Sprechverkehr* stehen. Da die Sendeleistung nur 10 W beträgt, genügen für die Stromversorgung der beweglichen Stationen 12-V-Batterien.

Abb. **139**/1. UKW-Rangierfunkanlage

Auf Rangierbahnhöfen, bei Industriebahnen und im Zugbetrieb von Tagebauen werden *Wechselsprechanlagen* eingesetzt. Bei diesen können die Teilnehmer nur abwechselnd sprechen. Die Abbildung **139**/1 zeigt die Zentrale einer *UKW-Rangierfunkanlage.* Im Führerstand der Lokomotive befindet sich ein Bedienungsteil und ein Druckkammerlautsprecher, der durch Betätigung einer Fußtaste auch als Mikrofon geschaltet werden kann. Die eigentlichen Sende- und Empfangsgeräte befinden sich davon getrennt an anderer Stelle. Die Lokantenne dient gleichzeitig als Empfangs- und Sendeantenne.

In der Landwirtschaft können sich Traktoristenbrigaden über UKW-Sprechfunk mit der MTS in Verbindung setzen (Abb. **139**/1). Der Dispatcher hat dadurch die Möglichkeit, den Einsatz der Großmaschinen und Traktoren zweckmäßig und schnell zu lenken und bei auftretenden Schwierigkeiten oder notwendigen Reparaturen für sofortige Hilfe zu sorgen.

Vielfach wird der UKW-Verkehrsfunk auch eingesetzt, um Feuerlöschzügen, Rettungswagen, Reparaturfahrzeugen und auch Taxis während der Fahrt neue Instruktionen von einer Leitstelle aus zu geben. Die Funkstreifenwagen der Volkspolizei sind ebenfalls mit UKW-Funkanlagen ausgerüstet.

Tragbare Funksprechgeräte werden als Sprechgeräte auch im Untertagebau eingesetzt. Der Anwendungsbereich ist allerdings auf etwa 1 km bis 2 km beschränkt. Die Antenne des Gerätes wird nahe an vorhandene metallische Leitungen, zum Beispiel Preßluft- und Wasserleitungen, gebracht. Die Funkwellen breiten sich dann entlang der Leitung aus. Bei Verschüttungen und anderen Grubenunglücken kann das Gerät auch als Sender und Empfänger für Notrufsignale verwendet werden.

Abb. **139**/2. UKW-Sprechfunkanlage einer Maschinen-Traktoren-Station

7. Radaranlagen. Hertzsche Wellen werden beim Auftreffen auf Hindernisse mehr oder weniger gut reflektiert. Besonders ausgeprägt ist die Reflexion bei kurzen Wellen. Entsprechend dem Verfahren des Echolotes (vgl. S. 90) kann man auch mit Hilfe von Hertzschen Wellen Entfernungen messen, indem man die Zeitdauer zwischen Aussendung und Empfang eines Impulses bestimmt. Solche Anlagen werden als *Radaranlagen* bezeichnet.

Ein *Richtstrahl-Radargerät* besteht aus Sender, Empfänger und Antenne. Mit Hilfe des Impulsgenerators strahlt der Sender in kurzen Zeitabständen elektromagnetische Wellen ab (Abb. 140/1a). In der Sekunde werden 500 bis 3000 Impulse ausgesendet. Die Impulsdauer bei Radargeräten liegt bei 0,000 0002 s ($2 \cdot 10^{-7}$ s). Der Antennendipol befindet sich im Brennpunkt eines Parabolreflektors. Im Augenblick des Aussendens wird durch den Antennenumschalter der Empfängereingang fast vollständig gesperrt. Anderenfalls würden durch den ausgestrahlten Impuls Beschädigungen des sehr empfindlichen Empfängers auftreten. Ein geringer Teil der

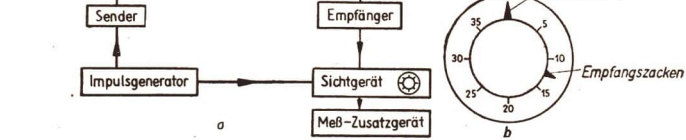


Abb. 140/1. Entfernungsmessung nach dem Radarverfahren a) Blockschema b) Schirmbild

ausgestrahlten Energie wird vom Empfänger aufgenommen und ergibt auf dem Bildschirm einer Braunschen Röhre einen Zacken, den sogenannten *Nullzacken*. Sofort nach Abstrahlung des Impulses wird die Antenne auf Empfang umgeschaltet. Gelangt die vom Hindernis reflektierte Welle wieder auf den Parabolspiegel, so wird sie auf dem Dipol gesammelt und dem Empfänger zugeführt. Nach Verstärkung wird das reflektierte Signal ebenfalls auf dem Bildschirm als *Meßzacken* sichtbar (Abb. 140/1b). Da die Ablenkung des Elektronenstrahls der Braunschen Röhre mit bekannter Geschwindigkeit erfolgt, *kann aus dem Abstand der beiden Meßzacken auf die Entfernung des Objektes geschlossen werden.* Der Bildschirm ist meist mit einer Entfernungsskale versehen. Bewegt sich der reflektierende Gegenstand nicht, dann bleibt bei den folgenden Impulsen die Lage des Reflexionszackens unverändert; anderenfalls verschiebt er sich langsam.

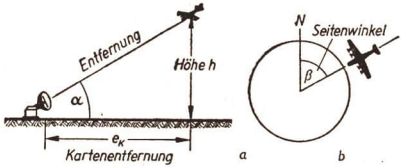


Abb. 140/2. Bestimmung des Ortes eines Flugzeuges mit Hilfe eines Richtstrahlradargerätes

Die Reichweite von Richtstrahlgeräten liegt bei den bisher bekannten Ausführungen zwischen 50 km und 600 km.

Der Parabolspiegel eines Radargerätes ist um zwei Achsen drehbar, so daß mit dem schmalen Strahlenbündel der gesamte Raum abgesucht werden kann. Aus dem Höhen- und Seitenwinkel und der direkten Entfernung kann so beispielsweise die genaue Position eines Flugzeuges bestimmt werden. Das Radarverfahren ist daher das genaueste Peilverfahren (Abb. **140**/2).

Panoramageräte sind im Prinzip gleich den Richtstrahlgeräten aufgebaut. Bei ihnen dreht sich aber die Antenne laufend um eine vertikale Achse. Auf dem nachleuchtenden Schirm der Braunschen Röhre wird dabei ein *landkartenähnliches Bild der Umgebung aufgezeichnet.* Panoramageräte werden vor allen Dingen auf Schiffen zur Vermeidung von Zusammenstößen verwendet. Alle größeren Schiffe der volkseigenen Seereederei Rostock sind mit Radaranlagen ausgerüstet.

Technische Angaben für ein Panoramagerät

Drehzahl der Antenne	20 U/min
Frequenz der abgestrahlten Wellen	9,375 GHz
Wellenlänge	3,2 cm
Impulsfrequenz	2 000 Hz
Impulsdauer	0,0000002 s
Impulsleistung	bis 40 kW
Entfernungsmeßbereich	bis 24 sm
Bildschirmdurchmesser	9 Zoll

Es können sechs verschiedene Bildbereiche eingestellt werden, so daß selbst bei geringen Entfernungen noch einwandfreie Beobachtung möglich ist.

Panoramageräte werden auch im Flugwesen verwendet, da mit ihnen der gesamte Luftraum um den Flugplatz beobachtet werden kann. Außerdem

Abb. **141**/1. Soldat der NVA am Radarschirm

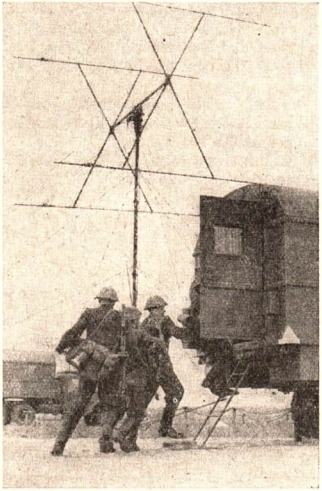


Abb. **141**/2. Funkmeßstation der NVA

wird die Radaranlage bei *Blindlandungen* eingesetzt.

Von erheblicher Bedeutung ist das Radarwesen für die Landesverteidigung. Unsere Staatsgrenzen werden durch Radargeräte überwacht, um etwaige unerlaubte Einflüge fremder Flugzeuge rechtzeitig erkennen zu können (Abb. **141**/1 und **141**/2).

Flugzeuge unserer Nationalen Volksarmee sind ebenfalls mit Radargeräten ausgerüstet. Mit Hilfe dieser Geräte kann man fremde Flugzeuge in der Luft auch ohne direkte Sicht verfolgen.

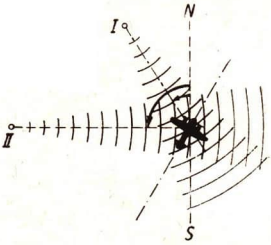


Abb. **142**/1. Eigenpeilung (schematisch)

8. Funknavigation. Für Standort- und Kursbestimmungen von Schiffen und Flugzeugen sind neben den bereits erwähnten Radareinrichtungen noch eine Reihe von Verfahren üblich, die ebenfalls auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beruhen.

Bei der *Funkpeilung* wird die Richtung bestimmt, aus der die Zeichen bekannter Sender im Empfänger eintreffen. Dazu wird eine Rahmenantenne verwendet. Wenn die Rahmenebene senkrecht zur Richtung zum Sender steht, so ist die Lautstärke am geringsten. Bei der sogenannten *Eigenpeilung* werden auf diese Weise die Winkel zwischen der Nordsüdrichtung und den Richtungen zu zwei bekannten Sendern ermittelt (Abb. **142**/1). Danach kann auf der Karte der eigene Standort bestimmt werden.

Bei der *Fremdpeilung* dagegen sendet das Flugzeug selbst Funksignale aus, die von zwei festen Stationen aufgenommen werden. Dort erfolgt die Bestimmung der Winkel und die Berechnung des Standortes des Flugzeuges. Das Ergebnis wird durch Funk mitgeteilt.

Für die Landung von Flugzeugen bei schlechter Sicht oder bei Nacht sind

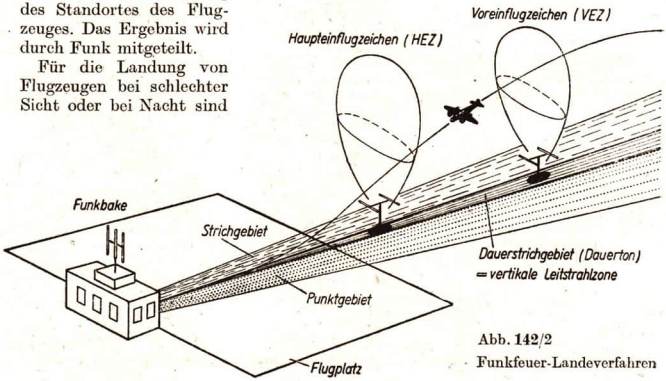


Abb. **142**/2
Funkfeuer-Landeverfahren

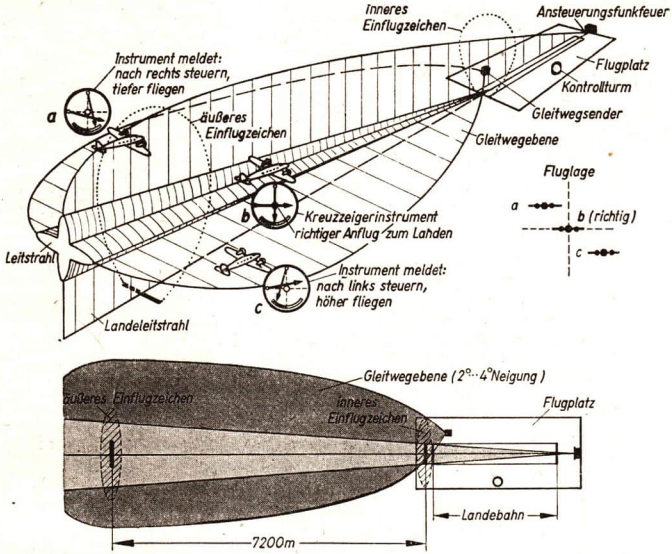


Abb. **143**/1. Kreuzanzeigegerät

ebenfalls Funkeinrichtungen geschaffen worden. Der Pilot kann daher das Flugzeug auch im Blindflug sicher auf die Landebahn aufsetzen. Ein UKW-Richtstrahlsender befindet sich in einer Funkbake am Rande des Flugplatzes und sendet entgegen der Einflugrichtung einen Dauerton. Gleichzeitig strahlt er in das links von der Einflugrichtung liegende Gebiet kurze Tonzeichen, „Punkte", und in das rechts davon liegende Gebiet längere, regelmäßig wiederkehrende Tonzeichen, „Striche" (Abb. **142**/2). Der Bereich des Dauertons bildet eine *Leitstrahlzone* mit einem Öffnungswinkel von etwa 5°, in die das Flugzeug einfliegen muß. Befindet sich das Flugzeug im Punktgebiet, so muß der Pilot eine Rechtskurve fliegen, um in die Leitstrahlzone zu gelangen. Umgekehrt ist es im Strichgebiet.

In der Längsrichtung der Leitstrahlzone strahlen noch zwei andere Einflugbaken geringer Reichweite senkrecht nach oben. Sie geben dem Piloten beim Einfliegen bestimmte Zeichen, so daß er eine grobe Entfernungsangabe vor dem Landevorgang bekommt.

Bei einer Weiterentwicklung dieses Verfahrens wird zusätzlich noch ein zweites Leitstrahlgebiet ausgestrahlt, durch das der Pilot auch in vertikaler Richtung geleitet wird. Im sogenannten *Kreuzanzeigegerät* erkennt er unmittelbar, ob die Maschine den richtigen Kurs und die notwendige Höhe aufweist (Abb. **143**/1).

35. Grundbegriffe der Optik

1. Das Licht. Die Werkhallen großer Betriebe werden durch Leuchtstoffröhren erhellt. Als Straßenbeleuchtung findet man neben elektrischen Glühlampen auch Gaslaternen. Ältere Beleuchtungsmittel sind Fackeln, Kerzen, Öl- und Petroleumlampen.

Diesen verschiedenartigen Lichtquellen ist eines gemeinsam: *Jede Lichtquelle sendet elektromagnetische Wellen verschiedener Frequenzen aus.* Die Entstehung dieser Wellen beruht auf Vorgängen in den Atomen, die bei der Behandlung der Atomphysik erklärt werden. Mit Hilfe des Auges können Menschen und Tiere elektromagnetische Wellen eines bestimmten Frequenzbereiches direkt wahrnehmen. Man bezeichnet solche Wellen als Licht. Dabei kann das Licht entweder direkt von einer Lichtquelle in das Auge gelangen oder auf dem Umweg über einen anderen Körper.

Die *Optik* oder die *Lehre vom Licht* untersucht die Erscheinungen, die vor allem bei dem durch das Auge wahrnehmbaren Bereich der elektromagnetischen Wellen auftreten. Dieser Frequenzbereich umfaßt Schwingungen von

$$f_1 = 3{,}85 \cdot 10^{14}\ \text{Hz} \quad \text{bis} \quad f_2 = 8{,}35 \cdot 10^{14}\ \text{Hz}.$$

Diesen Frequenzen entsprechen die Wellenlängen von $\lambda_1 = 780$ nm bis $\lambda_2 = 360$ nm.

Zu den in der Optik untersuchten Erscheinungen gehören auch die *Reflexion* und die *Brechung* der Lichtwellen. Das Licht ruft je nach seiner Wellenlänge einen bestimmten *Farbeindruck* hervor, beispielsweise Wellen mit $\lambda = 700$ nm den Eindruck „dunkelrot". Am empfindlichsten ist das menschliche Auge für den Bereich von $\lambda = 520$ nm (blaugrün) bis $\lambda = 620$ nm (orange). Hieraus erkennt man, daß sich die Lebewesen ihren Umweltsbedingungen angepaßt haben. Die Sonne strahlt nämlich gerade Licht dieser Wellenlängen am intensivsten ab.

Sichtbares Licht nennt man die elektromagnetischen Wellen, die im Auge einen Sinneseindruck hervorrufen.

2. Lichtstrahlen und Lichtbündel. Die meisten optischen Erscheinungen, wie Reflexion und Brechung, lassen sich in einfacher Weise unter Benutzung des Begriffes Lichtstrahl erklären. In der Wellenlehre werden aber die Erscheinungen ganz allgemein für alle Wellen erklärt. Der Lichtstrahl entspricht der Wellennormale der Wellenlehre (vgl. S. 72). Er läßt sich durch ein sehr schmales Lichtbündel, ein *Strahlenbündel*, veranschaulichen. In Zeichnungen gibt man Lichtstrahlen durch gerade Linien wieder, sie zeigen die Ausbreitungsrichtung der Lichtwellen an.

Je nachdem, wie die Begrenzungen eines Lichtbündels verlaufen, unterscheidet man *Parallelsirahlbündel* und *divergente* beziehungsweise *konvergente Strahlenbündel* (Abb. 144/1). Meist spricht man nur von *Parallelstrahlen*, *divergenten Strahlen* und *konvergenten Strahlen*. Es handelt sich aber immer um Lichtbündel.

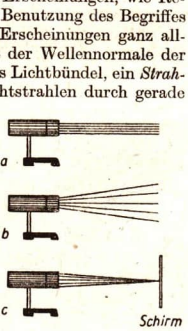


Abb. 144/1
Lichtbündel, a) parallele Strahlen, b) divergierende Strahlen, c) konvergierende Strahlen

Der Lichtstrahl ist ein zeichnerisches Hilfsmittel. Er ist die Wellennormale der Lichtwellen.

Wenn bei der Lichtausbreitung keine merklichen Beugungs- oder Interferenzerscheinungen auftreten, kann man die optischen Erscheinungen ohne Berücksichtigung der Wellennatur des Lichtes behandeln, indem man den Strahlenverlauf betrachtet. Dadurch ergibt sich eine einfachere Darstellung.

3. Die Lichtgeschwindigkeit. Da die Lichtgeschwindigkeit groß ist, war man bis in das 17. Jahrhundert der Ansicht, daß das Licht zu seiner Ausbreitung keine Zeit benötigt. Die notwendigen experimentellen Hilfsmittel zur Messung kleinster Zeiten standen damals noch nicht zur Verfügung.

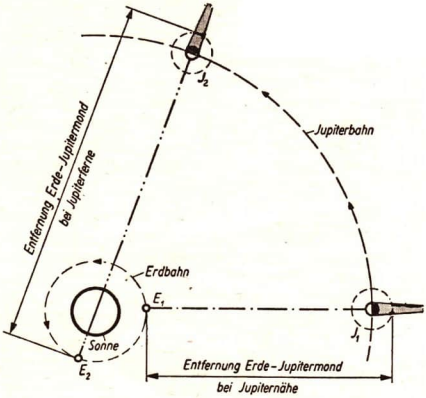


Abb. 145/1
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit durch Römer

Trotzdem konnte bereits 1675 der dänische Astronom *Olaf Römer* die Lichtgeschwindigkeit aus astronomischen Beobachtungen annähernd bestimmen. Er beobachtete regelmäßig den Beginn der Verfinsterung eines Jupitermondes, der bei jedem Umlauf einmal in den Schatten des Planeten eintritt und unsichtbar wird (Abb. 145/1). Gegenüber den bei der Stellung E_1 der Erde errechneten Werten trat die Verfinsterung in der Stellung E_2 der Erde um 1320 s später ein. *Römer* zog daraus die richtige Schlußfolgerung, daß das Licht bis zur Stellung E_2 eine längere Wegstrecke zurücklegen mußte. Der Durchmesser der Erdbahn wurde vom Licht in 1320 s zusätzlich durchlaufen. Da der Durchmesser bekannt war, berechnete Römer die Lichtgeschwindigkeit zu

$$c = \frac{s}{t} = \frac{3 \cdot 10^8}{1320}\ \mathrm{km \cdot s^{-1}} \approx 230\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}.$$

In Wirklichkeit beträgt die Lichtgeschwindigkeit etwa $300\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Trotz dieser Abweichung stellt aber die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit im Hinblick auf die damaligen Voraussetzungen eine große wissenschaftliche Leistung dar.

Der dänische Astronom hatte den Wert aus Beobachtungen eines Naturvorganges ermittelt. Die Naturforscher setzten später das Experiment an die Stelle der Naturbeobachtung. Ein Versuch läßt sich beliebig oft durchführen. Die Vorgänge können unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden.

Der französische Gelehrte *Fizeau* bestimmte 1849 zum ersten Male die Lichtgeschwindigkeit mit Hilfe einer irdischen Lichtquelle längs einer relativ kurzen Strecke von 8,633 km (Abb. 146/1). Sie wurde vom Licht zweimal durchlaufen. Durch eine Lücke eines schnellumlaufenden Zahnrades mit 720 Lücken und 720 ebenso breiten Zähnen lief das Lichtbündel zu einem Spiegel und wurde dort reflektiert. Bei einer

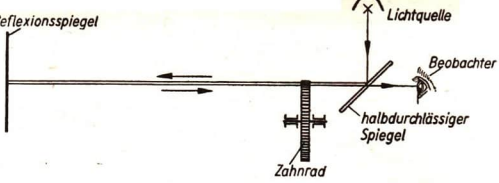


Abb. 146/1
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach Fizeau

Drehzahl von 12,6 Umdrehungen je Sekunde trat erstmalig Verdunklung ein; denn der am Reflexionsspiegel reflektierte Lichtstrahl traf statt der Ausgangslücke den ihr folgenden Zahn. Das Zahnrad hatte sich in der Laufzeit des Lichtstrahls um eine Lückenbreite weiter bewegt. Eine Umdrehung des Zahnrades dauerte $\frac{1}{12{,}6}$ s. Da der Umfang 1440 Lücken und Zähne aufweist, beträgt die Zeit für die Verschiebung um eine Lücken- oder Zahnbreite den 1440. Teil einer Umdrehungsdauer, also

$$\frac{1}{1440 \cdot 12{,}6}\,\mathrm{s} = \frac{1}{18144}\,\mathrm{s}.$$

Der Strahl benötigt demnach zum Durchlaufen der Strecke $2 \cdot l = 17{,}266$ km die Zeit $\frac{1}{18144}$ s. Die Lichtgeschwindigkeit errechnet sich daraus zu $c \approx 313\,274\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Auch dieser Wert weicht von dem heute mit modernsten technischen Mitteln bestimmten Wert ab.

Trotz des unterschiedlichen Versuchsaufbaues beruhten alle folgenden Versuchsanordnungen auf dem gleichen Prinzip wie beim Versuch von Fizeau (Abb. 146/2). Durch einen periodisch arbeitenden Verschluß wird das Licht einer Lichtquelle in einzelne Lichtsignale zerlegt. Diese Signale durchlaufen die Meßstrecke und werden von dem Spiegel zu dem Beobachter reflektiert. Da die Laufzeit der Signale sehr kurz ist, kann die Zeitmessung nicht direkt mit einer Uhr erfolgen. Man bestimmt die Laufzeit indirekt mit Hilfe des Verschlusses.

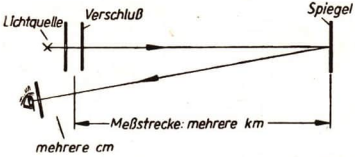


Abb. 146/2
Grundsätzlicher Aufbau einer Versuchsanordnung zur Messung der Lichtgeschwindigkeit

Bei neueren Versuchsanordnungen unterbricht man den Strahlengang nicht mechanisch, sondern durch elektrische Steuerungsvorgänge. Dadurch kann man die Meßstrecke sogar auf einige Meter verkürzen. Bringt man Flüssigkeiten oder durchsichtige Körper in die Meßstrecke, so kann auch die Lichtgeschwindigkeit in diesen Medien bestimmt werden.

Mit solchen Versuchsanordnungen wurden Tausende von Präzisionsmessungen ausgeführt. Um die Genauigkeit zu erhöhen, benutzt man auch bei den modernen Versuchsanordnungen Meßstrecken von einigen hundert Metern.

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt $(299\,790 \pm 6)\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

Der relative Fehler beträgt nur 0,002%. Wollte man eine Strecke von 1 km mit dieser Genauigkeit vermessen, so dürfte die Abweichung nur $\pm$ 2 cm betragen.

Die Lichtgeschwindigkeit in Luft ist nur wenig kleiner als im Vakuum. Für die meisten Rechnungen genügt als Näherungswert $c = 300\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Die Licht-

geschwindigkeit ist genauso groß wie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Hertzschen Wellen (vgl. S. 110).

In allen Stoffen ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als im Vakuum. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Lichtgeschwindigkeit in einigen Medien.

Man nennt das Medium mit der größeren Lichtgeschwindigkeit *optisch dünner*, das andere *optisch dichter*. Die *optische Dichte* darf nicht mit der *stofflichen Dichte* verwechselt werden. In der Tabelle ist jedes Medium gegenüber einem vorhergehenden optisch dichter. Alkohol ist optisch dichter als Wasser; Kronglas ist optisch dünner als Flintglas.

Lichtgeschwindigkeit für Natriumlicht

Medium	Lichtgeschwindigkeit $km \cdot s^{-1}$
Vakuum	299 790
Luft	299 710
Wasser	225 350
Äther	220 380
Alkohol	220 280
Benzol	198 490
Kronglas	197 180
Schwefelkohlenstoff	183 870
Flintglas	185 160
Diamant	121 340

4. Fragen und Aufgaben:

1. Überprüfen Sie mit Hilfe der Gleichung $c = \lambda \cdot f$ und der Frequenzwerte auf Seite 144 die Angaben der entsprechenden Wellenlängen des Lichtes!
2. Warum kann man Hertzsche Wellen mit dem Auge nicht wahrnehmen?
3. Erläutern Sie den Unterschied zwischen Lichtstrahlen und Lichtbündeln!
4. Bei einer Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit wurden 2885 Messungen durchgeführt. Welche Vorteile ergeben sich aus einer solchen großen Anzahl von Messungen?
5. Bei einer Sportveranstaltung befindet sich unmittelbar am Start ein Sportreporter, dessen Reportage direkt von einem 100 km entfernten Sender übertragen wird. Ein Zuschauer sitzt 200 m vom Start entfernt. Er hört außerdem mit einem Kofferempfänger die Radiosendung. In welcher Reihenfolge nimmt der Zuschauer beim Startschuß die folgenden Signale wahr?
   Knall der Startpistole (direkt);
   Knall der Startpistole in der Radiosendung;
   Rauch der Startpistole.
   Begründen Sie die Reihenfolge!

36. Die Reflexion des Lichtes

1. Reflexion an gewölbten Spiegeln. Im Gegensatz zu den Lichtquellen werden Körper, die selbst kein Licht aussenden, erst sichtbar, wenn sie auftreffendes Licht vollständig oder teilweise reflektieren. Bei ebener spiegelnder Oberfläche der Körper wird das Licht in ganz bestimmten Richtungen reflektiert. Für diese *regelmäßige Reflexion* gilt das **Reflexionsgesetz:**

Wird ein Lichtstrahl an einem ebenen Spiegel reflektiert, so sind Einfalls- und Reflexionswinkel gleich groß. Einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Einfallslot liegen in einer Ebene.

Das Reflexionsgesetz für Lichtquellen ist nur ein Sonderfall des allgemeinen Reflexionsgesetzes für Wellen (vgl. S. 84).

Kugelspiegel oder *sphärische Spiegel* sind Teile einer Kugelfläche. Eine außen spiegelnde Fläche heißt *erhabener Spiegel* oder *Konvexspiegel*. Die Rückspiegel bei Kraftfahrzeugen sind Konvexspiegel. Ein gewölbter Rasierspiegel ist dagegen Teil einer nach innen spiegelnden Kugelfläche. Solche Spiegel heißen *Hohlspiegel* oder *Konkavspiegel*.

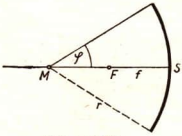


Abb. 148/1
Bezeichnungen beim Hohlspiegel

Läßt man auf einen Konkavspiegel ein Sonnenstrahlbündel fallen, so werden die Strahlen nach der Reflexion nahezu in einem Punkte gesammelt und divergieren dann wieder. Bringt man in diesen Punkt eine Zündholzkuppe, dann wird sie nach kurzer Zeit entzündet. Man nennt diesen Punkt den *Brennpunkt F* und seinen Abstand vom Spiegel die *Brennweite f* (Abb. 148/1). *M* ist der *Krümmungsmittelpunkt* der Kugel, aus der man sich den Spiegel herausgeschnitten denken kann. *S* ist der *Scheitelpunkt* des Kugelspiegels. Die Gerade, die durch *M*, *F* und *S* geht, heißt *optische Achse*. Als *Öffnungswinkel* wird der Winkel bezeichnet, den ein vom Krümmungsmittelpunkt *M* zum äußersten Spiegelrand verlaufender Strahl mit der optischen Achse bildet.

Mit Hilfe eines gewölbten Spiegelstreifens lassen sich die Gesetzmäßigkeiten der Reflexion an sphärischen Spiegeln untersuchen. Man kann sich die gekrümmte Fläche des Spiegelstreifens aus kleinsten ebenen Flächen zusammengesetzt denken. Auf jedes Flächenelement läßt sich dann das Reflexionsgesetz anwenden (Abb. 148/2).

Die achsenparallelen Strahlen verlaufen nach der Reflexion annähernd durch den Brennpunkt *F*. Er halbiert die Strecke zwischen Krümmungsmittelpunkt und Scheitel des Spiegels. Da *MS* der Kugelradius ist, besteht die Beziehung

$$f = \frac{r}{2}.$$

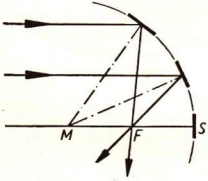


Abb. 148/2
Erklärung des Strahlenganges am sphärischen Spiegel mit Hilfe des Reflexionsgesetzes

Mit Hilfe der Geometrie kann man nachweisen, daß die Parallelstrahlen sich um so genauer im Brennpunkt schneiden, je geringer ihr Abstand von der Achse ist.

Am Hohlspiegel werden achsennahe, parallel zur optischen Achse auffallende Lichtstrahlen so reflektiert, daß sie einander annähernd im Brennpunkt schneiden.

Da der Strahlengang umkehrbar ist, werden Strahlen, die vom Brennpunkt ausgehen oder durch ihn hindurchgehen, am Hohlspiegel annähernd parallel zur optischen Achse reflektiert.

Bei einem *Parabolspiegel* werden alle parallel zur optischen Achse einfallenden Lichtstrahlen durch einen Punkt reflektiert (Abb. 148/3). Die Form dieses Spiegels entsteht durch die Rotation einer Parabel um ihre Achse.

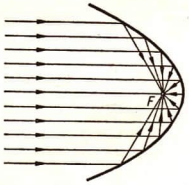


Abb. 148/3
Strahlengang bei einem Parabolspiegel

Alle achsenparallelen Strahlen werden beim Parabolspiegel durch den Brennpunkt reflektiert.

Befindet sich umgekehrt eine Lichtquelle im Brennpunkt eines Parabolspiegels, so werden *alle Strahlen parallel reflektiert*. Man benutzt daher Parabolspiegel für *Scheinwerfer*.

Läßt man paralleles Licht auf einen Konvexspiegel fallen, so werden die Strahlen so reflektiert, als kämen sie etwa von dem Punkt F, dem *Zerstreuungspunkt* (Abb. **149**/1) her. Die Entfernung Spiegelscheitel – Zerstreuungspunkt ist gleich der Brennweite f. Im Gegensatz zum Hohlspiegel gibt man hier die Brennweite mit negativen Werten an.

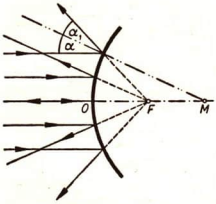


Abb. **149**/1
Reflexion achsenparalleler Strahlen am Konvexspiegel

Abb. **149**/2
Arzt beim Einführen eines Kehlkopfspiegels

1 Lichtquelle, *2* Reflektor, *3* Kopfband, *4* Kehlkopfspiegel mit Stiel

2. Anwendungen des Hohlspiegels. Hohlspiegel sind wichtige Hilfsmittel bei ärztlichen Untersuchungen der Mundhöhle, des Kehlkopfes und der Ohren. Abbildung **149**/2 zeigt einen Arzt bei einer Halsuntersuchung. Er trägt vor der Stirn an einem Kopfband einen Hohlspiegel als Reflektor. Durch das Loch in der Mitte blickt der Arzt hindurch. Der Reflektor wirft das Licht der Lampe in die Mundhöhle des Patienten und sammelt es. Durch den *Kehlkopfspiegel* wird das Licht auf die zu untersuchende Stelle hingelenkt.

Eine interessante Anwendung finden Hohlspiegel in sonnenreichen Ländern. In der Sowjetunion wurden Projekte entwickelt, bei denen man mit Hilfe der Sonnenenergie Wärmekraftwerke betreiben kann. Mehrere Hohlspiegel konzentrieren die Sonnenstrahlung auf einen Wasserkessel, so daß Dampf für Turbinensätze erzeugt wird. Die dadurch gewonnene Elektroenergie verwendet man vor allem zum Antrieb von Bewässerungspumpen.

3. Optische Bilder. Viele Beobachtungen zeigen, daß sich *das Licht geradlinig ausbreitet.* Der Ort einer Lichtquelle oder eines beleuchteten Körpers wird daher auf Grund der Erfahrung stets in der rückwärtigen Verlängerung der in das Auge eintretenden Lichtstrahlen gesucht (Abb. **149**/3).

Verlaufen jedoch die Lichtstrahlen auf Grund von Brechung oder Reflexion nicht geradlinig, so vermuten wir den Ort der Lichtquelle ebenfalls im Schnittpunkt der

Abb. **149**/3
Wegen des geradlinigen Verlaufs der Lichtstrahlen erblickt das Auge die Lichtquelle in L, wo sie sich auch befindet.

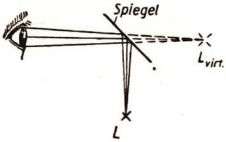


Abb. **150/1**
Lichtquelle
und virtuelles Bild
der Lichtquelle

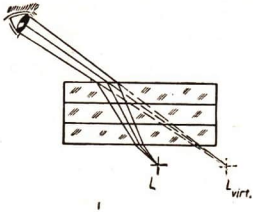


Abb. **150/2**
Das Auge erblickt die Lichtquelle im Punkt L_{virt}

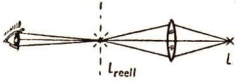


Abb. **150/3**
Entstehung eines reellen Bildes

rückwärts verlängerten Lichtstrahlen. Blickt man in einen ebenen Spiegel, so liegt das Spiegelbild, das *optische Bild*, genau so weit hinter dem Spiegel, wie man selbst vor dem Spiegel steht. Die Lichtstrahlen kommen aber nicht von diesem Bild her. Man bezeichnet solche optischen Bilder als *scheinbare* oder *virtuelle Bilder*. Es gelingt nicht, diese Bilder auf einem Bildschirm aufzufangen; man sagt, sie sind nicht wirklich, nicht reell. In Abbildung **150/1** werden die Lichtstrahlen von dem Spiegel abgelenkt. Das Auge erblickt die Lichtquelle im Punkt L_{virt}, aber nicht in L. L_{virt} ist das virtuelle Bild der Lichtquelle. Abbildung **150/2** zeigt den entsprechenden Vorgang bei mehrmaliger Brechung der Lichtstrahlen durch einen Glasplattensatz.

Ein ganz anderes Bild entsteht jedoch in Abbildung **150/3**. Die Lichtstrahlen werden durch die Linse abgelenkt. Das Auge erblickt die Lichtquelle in L_{reell}. Bringt man an die Stelle L_{reell} einen Schirm, so kann man dort wirklich das Bild auffangen. Ein solches Bild wird daher als *wirkliches* oder *reelles Bild* bezeichnet. Reelle Bilder werden beispielsweise von Filmprojektoren auf die Leinwand entworfen.

Ein reelles Bild entsteht im Schnittpunkt der Strahlen selbst; ein virtuelles Bild entsteht im Schnittpunkt der rückwärtigen Verlängerungen der Strahlen.

4. Bilder am sphärischen Spiegel. Stellt man eine brennende Kerze in großer Entfernung von einem Hohlspiegel auf, so entsteht in der Nähe des Brennpunktes auf einem weißen Pappschirm ein *umgekehrtes verkleinertes reelles Bild der Kerze* (Abb. **150/4**). Nähert man die Kerze dem Hohlspiegel, so rückt das Bild weiter vom Spiegel weg und wird größer. Ist die Entfernung Kerze–Spiegel gleich der doppelten Brennweite, dann ist das Bild ebenso weit vom Spiegel entfernt und so groß wie die Kerze. Bei weiterer Annäherung der Kerze an den Spiegel rückt das umgekehrte reelle Bild noch weiter vom Spiegel ab. Es ist jetzt

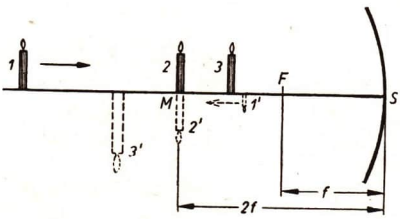
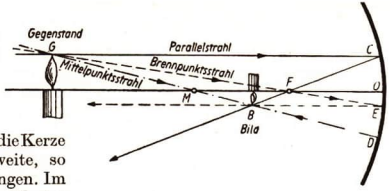


Abb. **150/4**
Reelle Bilder einer Kerze
an einem Hohlspiegel

Abb. 151/1
Grundpunktstrahlen am Hohlspiegel



größer als die Kerze. Befindet sich die Kerze innerhalb der einfachen Brennweite, so kann man kein Bild mehr auffangen. Im Hohlspiegel sieht man aber ein vergrößertes aufrechtes virtuelles Bild der Kerze. Bei diesem Vorgang tritt durch eine *quantitative Änderung*, nämlich durch die Verringerung des Abstandes der Kerze vom Spiegel, eine *neue Qualität* auf; statt eines reellen Bildes entsteht ein virtuelles.

An einem Hohlspiegel entstehen daher je nach dem Abstand des Gegenstandes vom Spiegel reelle und virtuelle Bilder. Die Art und Lage des Bildes wird mit Hilfe einer zeichnerischen Bildkonstruktion bestimmt. Von den sehr vielen Strahlen, die von jedem Punkt des Gegenstandes ausgehen, werden zur Konstruktion nur die sogenannten drei *Grundpunktstrahlen* benutzt (Abb. **151**/1), da deren Verlauf vor und nach der Reflexion besonders einfach zu zeichnen ist.

1. *Mittelpunktstrahlen werden in sich selbst reflektiert.*
2. *Brennpunktstrahlen werden als Parallelstrahlen reflektiert.*
3. *Parallelstrahlen werden als Brennpunktstrahlen reflektiert.*

Zwei dieser Grundpunktstrahlen genügen zur zeichnerischen Darstellung. Einen dritten kann man zur Kontrolle benutzen. Abbildung **151**/2 zeigt die Konstruktion des Bildes einer Kerze. Von einem Punkt der Kerzenspitze (G_1) aus werden ein Brennpunkt- und ein Parallelstrahl gezeichnet. Sie schneiden einander nach der Reflexion im zugehörigen Bildpunkt (B_1). Alle anderen von diesem Punkt der Kerze ausgehenden Strahlen schneiden einander nach der Reflexion ebenfalls im gleichen Bildpunkt.

Führt man die Konstruktion für viele Punkte des Gegenstandes durch, so ergibt sich aus den dazugehörigen Bildpunkten das Bild des Gegenstandes. Meistens braucht man zur Konstruktion des Bildes nur einige Bildpunkte zu konstruieren.

Befindet sich der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite, so wählt man zur Konstruktion einen Parallel- und einen Mittelpunktstrahl (Abb. **151**/3). Die reflektierten Strahlen divergieren, ihre rückwärtigen Verlängerungen schneiden sich im Punkt *B*. Das Bild ist daher virtuell und größer als der Gegenstand. Dieser Fall der Bildentstehung wird beim Rasierspiegel angewandt.

An einem Konvexspiegel entstehen nur virtuelle aufrechte Bilder, die kleiner als der Gegenstand sind. Wie die Abbildung **152**/1 zeigt, sind sie um so kleiner, je weiter

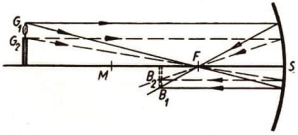


Abb. **151**/2. Konstruktion von 2 Bildpunkten am Hohlspiegel

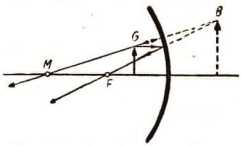


Abb. **151**/3. Der Gegenstand liegt innerhalb der einfachen Brennweite.

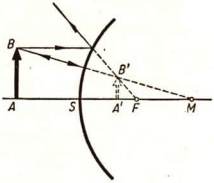


Abb. 152/1
Virtuelles Bild an einem Konvexspiegel

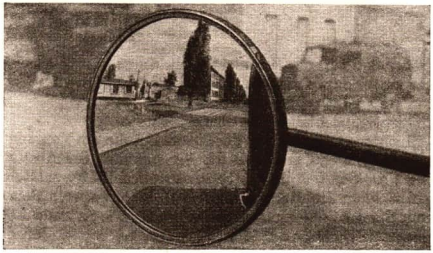


Abb. 152/2
Rückblickspiegel an einem Kraftfahrzeug

der Gegenstand vom Spiegel entfernt ist. Konvexspiegel werden als *Rückblickspiegel* an Kraftfahrzeugen und an unübersichtlichen Straßenkreuzungen benutzt (Abb. 152/2). Man erblickt in ihnen infolge der Verkleinerung einen großen Ausschnitt des hinter dem Fahrzeug liegenden Geländes.

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der charakteristischen Lagen von Gegenstand und Bild bei den sphärischen Spiegeln.

Bildentstehung an sphärischen Spiegeln

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
1. Konkavspiegel				
außerhalb der doppelten Brennweite	zwischen einfacher und doppelter Brennweite	reell	umgekehrt	verkleinert
im Krümmungsmittelpunkt	im Krümmungsmittelpunkt	reell	umgekehrt	ebenso groß wie der Gegenstand
zwischen doppelter und einfacher Brennweite	außerhalb der doppelten Brennweite	reell	umgekehrt	vergrößert
innerhalb der einfachen Brennweite	hinter dem Spiegel	virtuell	aufrecht	vergrößert
2. Konvexspiegel				
beliebig	hinter dem Spiegel	virtuell	aufrecht	verkleinert
bei zunehmender Entfernung	Annäherung an den Brennpunkt			Bild wird kleiner

An Konkavspiegeln entstehen reelle umgekehrte Bilder, wenn sich der Gegenstand außerhalb der einfachen Brennweite befindet. Je weiter der Gegenstand entfernt ist, desto kleiner ist das Bild. Bilder von Gegenständen innerhalb der einfachen Brennweite sind virtuell, aufrecht und vergrößert.

An Konvexspiegeln entstehen stets virtuelle, aufrechte und verkleinerte Bilder.

5. Die Abbildungsgleichungen des sphärischen Spiegels. Größe und Lage der Bilder an sphärischen Spiegeln kann man mit Hilfe von Abbildungsgleichungen bestimmen. Diese Gleichungen sind mathematische Beziehungen zwischen den in der folgenden Tabelle zusammengestellten Begriffen:

Begriff	*Bedeutung*	*Symbol*
Gegenstandsweite	Abstand des Gegenstandes vom Spiegelscheitel	s
Bildweite	Abstand des Bildes vom Spiegelscheitel	s'
Gegenstandsgröße	Länge einer bestimmten Ausdehnung des Gegenstandes	y
Bildgröße	Länge der dazugehörigen Ausdehnung des Bildes	y'
Brennweite	Abstand des Brennpunktes vom Spiegelscheitel	f

In Abbildung **153**/1 bilden Gegenstandsgröße, Gegenstandsweite und der Lichtstrahl G_1S das rechtwinklige Dreieck G_1SG_2. Der Lichtstrahl G_1S wird in S im gleichen Winkel reflektiert und geht durch B_1. Die anderen Seiten des Dreiecks B_1SB_2 sind die Bildgröße und die Bildweite. Da die beiden Dreiecke in allen Winkeln übereinstimmen, sind sie ähnlich:

$$\triangle G_1SG_2 \sim \triangle B_1SB_2.$$

Folglich gilt die Proportion:

$$\boxed{y : y' = s : s'}.$$

Bei der Bildentstehung am Hohlspiegel verhält sich die Gegenstandsgröße zur Bildgröße wie die Gegenstandsweite zur Bildweite.

Auch zwischen der Gegenstandsweite, der Bildweite und der Brennweite besteht eine mathematische Beziehung, die sich ähnlich wie obenstehende Proportion ableiten läßt. Man erhält:

$$\boxed{\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}}.$$

Man nennt diese Gleichung die **Hohlspiegelgleichung.** Mittels dieser Gleichung kann man eine der drei Größen f, s oder s' berechnen, wenn die zwei anderen gegeben sind.

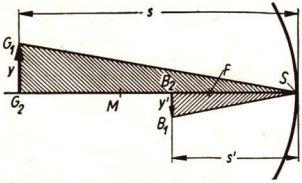


Abb. **153**/1. Geometrische Darstellung der Abbildungsverhältnisse beim Hohlspiegel

Bei der Bildentstehung am Konkavspiegel ist der Kehrwert der Brennweite gleich der Summe der Kehrwerte von Gegenstands- und Bildweite.

Das größte Spiegelfernrohr der Welt hat einen Hohlspiegel von 5 m Durchmesser. Seine Brennweite beträgt 16,70 m. Mit den Abbildungsgleichungen kann die Lage und Größe eines Bildes des Mondes bestimmt werden. Aus der Hohlspiegelgleichung folgt durch Umformung $s' = \frac{s \cdot f}{s - f}$. Setzt man für s die Mondentfernung ($s \approx 384\,400$ km) ein, so erhält man:

$$s' = \frac{s \cdot f}{s - f} = \frac{3{,}844 \cdot 10^8 \cdot 16{,}7}{3{,}844 \cdot 10^8 - 16{,}7}\ \text{m} \approx 16{,}7\ \text{m}.$$

Das Bild befindet sich praktisch in der Ebene des Brennpunktes. Setzt man in die Gleichung $\frac{y}{y'} = \frac{s}{s'}$ für y den Monddurchmesser ein ($y \approx 3476$ km), so ergibt sich:

$$y' = \frac{y \cdot s'}{s} = \frac{3{,}476 \cdot 10^6 \cdot 16{,}7}{3{,}844 \cdot 10^8}\ \text{m} \approx 0{,}15\ \text{m}.$$

Das Bild des Mondes ist etwa 15 cm groß. Es wird durch andere optische Einrichtungen vergrößert.

Die beiden Abbildungsgleichungen gelten für Konkav- und Konvexspiegel; man muß lediglich die Vorzeichen beachten. Befinden sich s', y' und f in Blickrichtung vor dem Spiegel, so werden ihre Werte positiv gesetzt, beim Konvexspiegel dagegen negativ. Die Gleichung stellt jedoch nur eine Näherungslösung dar (vgl. S. 148). Sie entspricht den tatsächlichen Verhältnissen um so genauer, je geringer die Krümmung des Spiegels ist.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Übertragen Sie die Abbildung **154**/1 in das Heft, und zeichnen Sie die reflektierten Strahlen! Benutzen Sie dazu die Darstellung der Abbildung **148**/2!
2. Stellen Sie aus einem großen Uhrglas einen Hohlspiegel her, indem Sie die Außenfläche des Glases mit schwarzem Lack überziehen! Wie erhalten Sie auf die gleiche Weise einen erhabenen Spiegel?
3. In welcher Entfernung vom Hohlspiegel muß sich das Gesicht befinden, wenn ein vergrößertes aufrecht stehendes Bild entstehen soll? Von welcher Art ist dieses Bild?

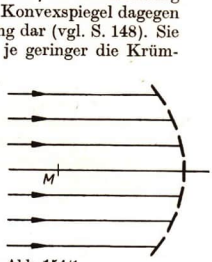


Abb. **154**/1

4. Die Brennweite eines Hohlspiegels ist $f = 20$ cm. In welcher Entfernung befindet sich ein Gegenstand, wenn dessen virtuelles Bild doppelt so groß wie der Gegenstand ist?
5. Warum verwendet man Konvexspiegel als Rückspiegel am Auto?
6. Der Beleuchtungsspiegel des Mikroskopes ist mit zwei spiegelnden Flächen versehen. Um welche Spiegel handelt es sich?
7. Stellen Sie die Unterschiede zwischen reellen und virtuellen Bildern zusammen! Wodurch entstehen beide Bilder?
8. Wie groß ist das Bild einer Kerze in einem Konvexspiegel ($y = 8$ cm, $s = 10$ cm, $s' = -15$ cm)? Was bedeutet das Minuszeichen bei s'?

37. Die Brechung des Lichtes

1. Das Brechungsgesetz. Fällt ein Lichtstrahl auf eine dicke Glasplatte, so beobachtet man, daß das Licht sowohl an der Oberfläche reflektiert wird als auch durch die Glasplatte hindurchgeht. Ein Lichtstrahl wird an der Grenzoberfläche zweier verschiedener Medien zum Teil reflektiert; der andere Teil dringt in das zweite Medium

ein (Abb. 155/1). Die dabei auftretende Richtungsänderung wird bekanntlich als *Brechung* bezeichnet. *Der einfallende Strahl, das Einfallslot und der gebrochene Strahl liegen in einer Ebene.*

Beim Übergang aus einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium werden die Lichtstrahlen *zum Einfallslot hin gebrochen*. Beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium werden die Lichtstrahlen *vom Einfallslot weg gebrochen*. Die Ablenkung ist um so größer, je größer der Einfallswinkel ist. Der senkrecht auftreffende Lichtstrahl wird nicht gebrochen.

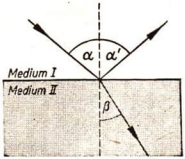


Abb. 155/1
Einfallswinkel
und Brechungswinkel

Lichtbrechung beim Übergang von Luft in Glas

Einfalls-winkel (α)	Brechungs-winkel (β)	sin α	sin β	$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$
20°	13,0°	0,34	0,22	1,55
30°	19,5°	0,50	0,33	1,51
40°	25,4°	0,64	0,43	1,49
50°	30,7°	0,77	0,51	1,51
60°	35,3°	0,87	0,58	1,50
70°	38,8°	0,94	0,63	1,49
80°	41,0°	0,98	0,66	1,48

Die Gesetzmäßigkeiten bei der Brechung werden auf Grund der Wellennatur des Lichtes erklärt. Das für alle Wellen gültige Brechungsgesetz gilt auch für die Lichtwellen (vgl. S. 88). An einer optischen Scheibe kann man das Brechungsgesetz nachweisen (Abb. 155/2). Obenstehende Tabelle gibt zusammengehörige Werte der verschiedenen Einfalls- und Brechungswinkel sowie die entsprechenden Sinuswerte an. *Der Quotient* $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$ *ist bei diesem Versuch konstant.* Die Abweichungen sind auf Meßfehler zurückzuführen.

Beim Übergang des Lichtes in andere Medien, zum Beispiel von Luft in Wasser, ist der Quotient aller zusammengehörigen Sinuswerte wiederum konstant. Er beträgt für den Übergang von Luft in Wasser 1,33. *Man bezeichnet die Konstante* $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$ *als Brechungszahl n.* Sie hängt von den Medien und außerdem von der Wellenlänge des Lichtes ab (vgl. Tabelle auf S. 156).

Diese Zusammenhänge wurden um das Jahr 1618 von dem holländischen Physiker *Snell van Royen* erkannt. Das **Snelliussche Brechungsgesetz** lautet:

Bei der Brechung eines Lichtstrahles ist der Quotient aus dem Sinuswert des Einfallswinkels und dem Sinuswert des Brechungswinkels konstant und wird als Brechungszahl bezeichnet.

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n}\,.$$

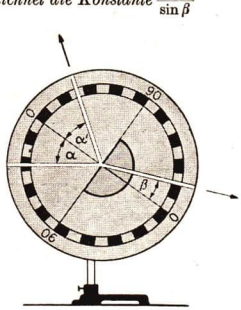


Abb. 155/2
Brechung und Reflexion an einem Halbzylinder aus Glas

Brechungszahlen für den Übergang des Lichtes von Luft in ein anderes Medium

($\lambda = 589$ nm)

Medium	n
Wasser	1,33
Kronglas	1,52
Flintglas F 3	1,61
schweres Flintglas SF 4	1,74
Benzol	1,51
Äthylalkohol	1,36
Schwefelkohlenstoff	1,63
Diamant	2,47

Da die Brechung des Lichtes auch von der Dichte eines Stoffes abhängt, ändern sich die Brechungszahlen mit der Dichte. Dies ist besonders bei Flüssigkeiten und Gasen häufig zu beobachten. Bekanntlich ist warme Luft dünner als kalte Luft. Daher werden Lichtstrahlen, die in erwärmte Luftschichten gelangen, gebrochen. Die aufsteigenden Luftströme ändern ständig ihre Lage und ihre Dichte, so daß sich auch der Brechungswinkel ständig ändert. Hinter den warmen Luftmassen liegende Gegenstände erscheinen daher in zitternder Bewegung; es bilden sich *Schlieren*. Beleuchtet man eine brennende Kerze mit einer Punktlampe, so sieht man auf einem Projektionsschirm deutlich die aufsteigende Warmluft durch Schlierenbildung.

2. Die Totalreflexion. Blickt man von unten schräg gegen die Wasseroberfläche eines Aquariums, so scheinen über dem Wasserspiegel sich ebenfalls Fische zu befinden. Der Wasserspiegel wirkt hier tatsächlich wie ein Spiegel. Ursache dieser Erscheinung sind die Besonderheiten beim Übergang eines Lichtstrahls *vom optisch dichten zum optisch dünnen Medium*. Der Brechungswinkel ist hierbei stets größer als der Einfallswinkel. Vergrößert man den Einfallswinkel nach und nach, so ergibt sich bei einem ganz bestimmten Einfallswinkel, dem *Grenzwinkel* $\alpha = \alpha_G$, ein Brechungswinkel von 90° (Abb. 156/1). Wird er überschritten, dann erfolgt keine Brechung mehr. Bei dieser quantitativen Veränderung einer Größe, nämlich des Einfallswinkels, tritt eine neue Qualität auf: *das gesamte Licht wird reflektiert*. Es tritt *vollständige* oder *totale Reflexion* ein. Der Grenzwinkel α_G ergibt sich aus der Beziehung

$$\frac{\sin \alpha_G}{\sin 90°} = \frac{1}{n}.$$

Dabei ist n die Brechungszahl beim Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium. Die Gleichung gilt nur für den Übergang von optisch dichteren Medien in optisch dünnere Medien. Je größer n ist, desto kleiner ist $\frac{1}{n}$, desto kleiner ist daher der Grenzwinkel (vgl. die untenstehende Tabelle).

Grenzwinkel für den Übergang in Luft

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

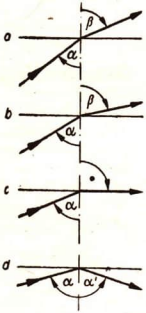


Abb. 156/1
Brechung und totale Reflexion an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft

Lichtstrahlen werden beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Stoff nur dann gebrochen, wenn der Einfallswinkel kleiner als der Grenzwinkel ist. Wird er überschritten, dann erfolgt Totalreflexion.

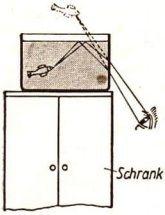


Abb. **157/1** Schematische Darstellung der Totalreflexion in einem Aquarium

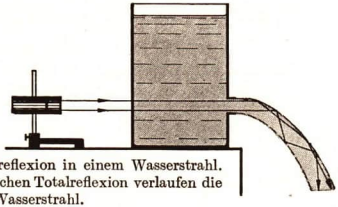


Abb. **157/2.** Totalreflexion in einem Wasserstrahl. Wegen der mehrfachen Totalreflexion verlaufen die Lichtstrahlen im Wasserstrahl.

Die Beobachtung am Aquarium ist also auf Totalreflexion zurückzuführen. Die Fische spiegeln sich an der Wasseroberfläche (Abb. **157**/1). Die mehrfache Totalreflexion des Lichtes kann man in gekrümmten Wasserstrahlen beobachten (Abb. **157**/2). Der Wasserstrahl glänzt im verdunkelten Raum, da er von innen beleuchtet wird. Bei der Aufspaltung des Wasserstrahls in Wassertröpfchen tritt eine helle Lichtwirkung auf. Man wendet diese Erscheinung bei Springbrunnen in Ausstellungen an.

Das „Feuer" geschliffener Diamanten und anderer Edelsteine und das Funkeln von Kronleuchtern aus Flintglas ist auf vielfache Totalreflexion infolge des kleinen Grenzwinkels zurückzuführen (Abb. **157**/3).

Die sogenannten *Luftspiegelungen* beruhen ebenfalls auf der totalen Reflexion. An heißen Tagen werden durch die von einer Asphaltstraße ausgehende Wärmestrahlung die unmittelbar auf der Straße liegenden Luftschichten stark erwärmt. *Sie sind infolgedessen optisch dünner als die darüberliegenden Luftschichten.* Das flach einfallende

Abb. **157/3.** Kristalleuchter in der Staatsoper Berlin

Abb. **157/4.** Luftspiegelung auf der Landstraße. Das total reflektierte Licht des blauen Himmels wird als Wasserfläche wahrgenommen.

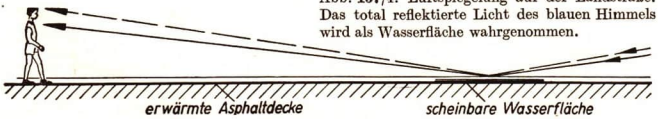


Abb. 158/1. Fata morgana. Der See ist in Wirklichkeit nicht vorhanden. Geht ein Mensch in diesen „See“ hinein, so scheint er auf einer Landzunge vorzugehen, wie dies im oberen Teil der Abbildung der Fall ist.

Licht des blauen Himmels wird an den Grenzschichten zwischen optisch dichter und optisch dünner Luft bei genügend großem Einfallswinkel total reflektiert (Abb. **157**/3). Die ursprünglich schräg abwärts gerichteten Strahlen werden nach der totalen Reflexion schräg aufwärts zurückgeworfen und gelangen dadurch in das Auge des Beobachters. Auch Autos, Radfahrer und Fußgänger können an der heißen Bodenluft gespiegelt werden. In ähnlicher Weise sind die Luftspiegelungen an der Küste und in Wüsten (*Fata morgana*) zu erklären (Abb. **158**/1).

3. Fragen und Aufgaben:

1. Nennen Sie weitere Beispiele für die Brechung des Lichtes in aufsteigender Warmluft!
2. Warum kann man die Beobachtung nach Abbildung **157**/1 nur dann machen, wenn man unter einem sehr kleinen Winkel gegen die Wasseroberfläche blickt?
3. In welchen beiden Fällen findet beim Übergang eines Lichtstrahls von einem Medium zum anderen keine Brechung statt?
4. Bestimmen Sie mit Hilfe der Tabelle auf Seite 147 die Brechungszahlen für den Übergang des Lichtes von Luft in folgende Medien: Wasser, Alkohol, Benzol, Schwefelkohlenstoff! (Anleitung: vgl. S. 88!) Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der Tabelle auf Seite 156!

38. Linsen und Linsenbilder

1. Strahlengang durch planparallele Platten und Prismen. Blickt man schräg von oben durch eine dicke Glasplatte, die als Briefbeschwerer ein beschriebenes Blatt Papier teilweise bedeckt, so sieht man die Textzeilen unter der Glasplatte in einer anderen Richtung als unmittelbar neben der Glasplatte. Die durch die Platte in

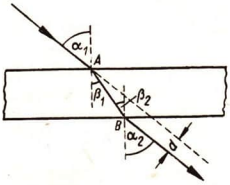


Abb. 159/1
Strahlengang durch eine planparallele Platte

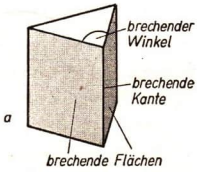
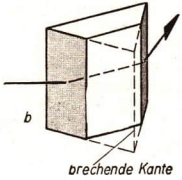


Abb. 159/2
Strahlengang bei Prismen

unser Auge gelangenden Lichtstrahlen müssen offensichtlich eine Richtungsänderung erfahren haben. Versuche haben ergeben: *Fällt ein Lichtstrahl schräg auf eine planparallele Glasplatte, so wird der austretende Strahl parallel verschoben* (Abb. 159/1). Die Parallelverschiebung ist um so größer, je dicker die Platte ist. Der Brechungswinkel β_1 an der ersten Grenzschicht ist gleich dem Einfallswinkel α_2 an der zweiten Grenzschicht. Daher tritt der Lichtstrahl parallel zu seiner Eintrittsrichtung aus.



Beim schrägen Durchgang durch eine planparallele Platte werden Lichtstrahlen parallel verschoben.

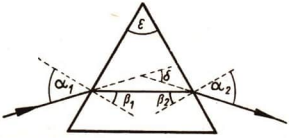


Abb. 159/3. Symmetrischer Strahlengang bei einem Prisma

Eine mehrmalige Brechung tritt auch bei *optischen Prismen* auf. Optische Prismen sind durchsichtige Körper mit ebenen, plangeschliffenen und polierten Flächen. Sie werden aus Glas, Polystyrol, Quarz oder Steinsalz hergestellt. Meist werden dreiseitige Prismen verwendet. Die beiden Flächen des Prismas, durch die der Strahl ein- beziehungsweise austritt, heißen *brechende Flächen* (Abb. 159/2). Sie schließen den *brechenden Winkel* ein. Die von den brechenden Flächen gebildete Kante wird als *brechende Kante* bezeichnet. Läßt man einen Lichtstrahl mit einer bestimmten Wellenlänge durch ein Prisma verlaufen, so wird er an jeder brechenden Fläche abgelenkt. Die Ablenkung erfolgt beim Übergang Luft-Glas-Luft immer von der brechenden Kante weg. In Abbildung 159/3 ist der sogenannte *symmetrische Strahlenverlauf* dargestellt: der Lichtstrahl läuft im Inneren des Prismas parallel zur Grundfläche. Versuche und Berechnungen ergeben, daß bei diesem Verlauf die Ablenkung (δ) den kleinstmöglichen Wert hat.

Beim Durchgang durch ein Prisma wird ein Lichtstrahl einer bestimmten Wellenlänge stets von der brechenden Kante fort gebrochen.

2. Strahlengang bei sphärischen Linsen. Analog den sphärischen Spiegeln nennt man Linsen, deren Begrenzungsflächen Teile von Kugelflächen sind, *sphärische Linsen*. Bekanntlich unterscheidet man zwei Gruppen von Linsen: die *Sammellinsen* und die *Zerstreuungslinsen*. Die nachstehende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Linsenformen.

Die wichtigsten Linsenformen

Gruppe	*Formen*			*Merkmal*
Konvexlinsen (Sammellinsen)	plan-konvex	bi-konvex	konkav-konvex	Die Linsenmitte ist *dicker* als der Rand. Bei Verwendung als Leseglas erscheint die Schrift vergrößert.
Konkavlinsen (Zerstreuungslinsen)	plan-konkav	bi-konkav	konvex-konkav	Die Linsenmitte ist *dünner* als der Rand. Bei Verwendung als Leseglas erscheint die Schrift verkleinert.

Die Linsen kann man sich aus Prismen und planparallelen Platten zusammengesetzt denken, deren brechende Flächen ineinander übergehen (Abb. **160**/1). Versuche mit solchen Linsenmodellen bestätigen die bereits bekannten Gesetzmäßigkeiten:

Konvexlinsen sammeln Parallelstrahlen annähernd im Brennpunkt. Konkavlinsen zerstreuen Parallelstrahlen so, als ob sie von einem Punkt ausgingen.

Abb. **160**/1.
Strahlengang an Linsenmodellen aus Polystyrol

Wie bei den sphärischen Spiegeln gelten diese Gesetze jedoch nur angenähert. Auch beim Durchgang von Lichtstrahlen durch Linsen verwendet man wie bei den sphärischen Spiegeln die bekannten Grundpunktstrahlen (Abb. **160**/2). Der Mittelpunktstrahl geht hier jedoch durch den Mittelpunkt der Linse. Abweichend vom wirklichen Strahlenverlauf

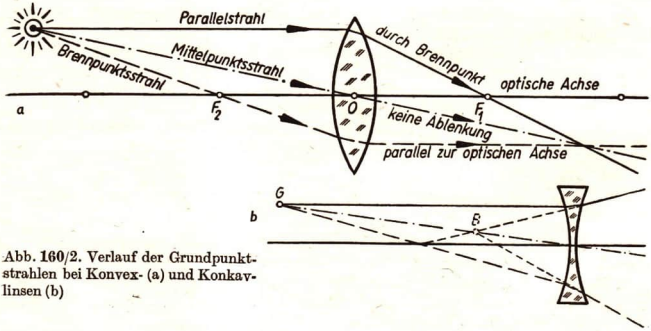


Abb. **160**/2. Verlauf der Grundpunktstrahlen bei Konvex- (a) und Konkavlinsen (b)

wird bei der zeichnerischen Darstellung nur *eine einmalige Richtungsänderung an der Hauptebene der Linse* gezeichnet. Unter der Hauptebene versteht man die Ebene senkrecht zur optischen Achse durch die Mitte der Linse. Diese Art der Konstruktion ist nur bei dünnen Linsen genau genug, das heißt bei Linsen, deren Dicke klein gegen ihren Durchmesser ist.

Bei dicken Linsen ist die Abweichung von dem in Abbildung **160**/1 dargestellten Strahlenverlauf größer als bei dünnen Linsen. Die Parallelstrahlen schneiden sich nach der Brechung nicht in einem Punkt, da die Randstrahlen stärker abgelenkt werden als achsennahe Strahlen. Auf Grund von komplizierten und langwierigen Berechnungen ist es gelungen, *Linsenkombinationen* zu finden und herzustellen, bei denen diese Abweichungen nicht mehr auftreten. Man erreicht dann beispielsweise eine Vereinigung der Strahlen in einem Punkt. Optische Geräte enthalten daher auch aus diesem Grunde Linsenkombinationen (vgl. S. 166). Im *VEB Carl Zeiss Jena* werden mit Hilfe großer *Rechenautomaten* die Konstruktionsunterlagen für derartige Linsenkombinationen in einer wesentlich kürzeren Zeit berechnet als früher.

Im Gegensatz zu den sphärischen Spiegeln ist der Krümmungsradius bei Linsen nicht gleich der doppelten Brennweite. Die Brennweite hängt von der Brechungszahl des Linsenmaterials und von den Krümmungsradien der beiden Kugelflächen ab, die die Linse begrenzen.

Bei einer Bikonvexlinse aus einem Glas mit $n = 1{,}5$ ist die Brennweite gleich dem Krümmungsradius, das heißt, die Brennpunkte der Linse liegen in den Krümmungsmittelpunkten.

3. Bilder bei sphärischen Linsen. Linsenbilder konstruiert man in ähnlicher Weise wie Spiegelbilder (vgl. S. 151). Die Abbildung **161**/1 gibt die wichtigsten Fälle der Bildkonstruktion an Konvexlinsen wieder. Die reellen Bilder liegen im Gegensatz zu denen bei Hohlspiegeln nicht auf derselben Seite wie der Gegenstand (Abb. **161**/1a bis c). Virtuelle Bilder erscheinen dagegen auf der gleichen Seite wie der Gegenstand (Abb. **161**/1d). Bei Konkavlinsen entstehen nur aufrechte virtuelle Bilder (Abb. **161**/2). Die Beziehungen zwischen der Bild- und der Gegenstandsgröße, der Gegen-

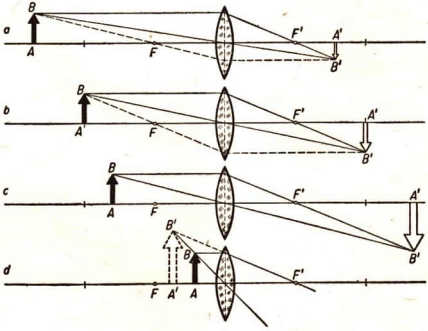


Abb. **161**/1
Konstruktion von Linsenbildern an einer Bikonvexlinse

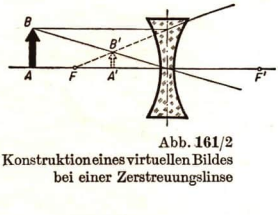


Abb. **161**/2
Konstruktion eines virtuellen Bildes bei einer Zerstreuungslinse

stands-, der Bild- und der Brennweite erkennt man aus Abbildung **162**/1. Die Dreiecke ABO und $A'B'O$ sind ähnlich. Daher gilt wie beim Hohlspiegel:

$$y : y' = s : s'$$

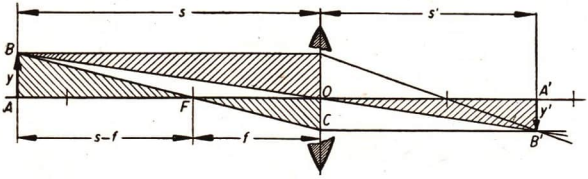


Abb. **162**/1. Herleitung der Beziehungen zwischen Gegenstands- und Bildgröße

Die Gegenstandsgröße verhält sich zur Bildgröße wie die Gegenstandsweite zur Bildweite.

Auch die schraffierten Dreiecke BAF und COF sind ähnlich. Es ergibt sich die Proportion:

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

Faßt man die beiden Proportionen zusammen, so erhält man die **Linsengleichung** (vgl. Aufgabe 5):

$$\boxed{\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}}.$$

Diese Gleichung gilt für Konvex- und für Konkavlinsen. Für die Bildweite virtueller Bilder und die Brennweite von Zerstreuungslinsen, die *Zerstreuungsweite*, sind wie bei den Konkavspiegeln stets negative Werte einzusetzen. Lage und Art der Bilder bei sphärischen Linsen sind in der Tabelle auf S. 163 zusammengestellt.
Wie bei den Hohlspiegeln hat auch bei den Konvexlinsen eine quantitative Änderung der Gegenstandsweite den Umschlag einer Qualität zur Folge: *statt eines reellen Bildes entsteht ein virtuelles.*

5. Fragen und Aufgaben:

1. Begründen Sie an Hand der Abbildung **159**/1, warum die Winkel α_1 und α_2 sowie β_1 und β_2 gleich sind!
2. Bestimmen Sie die Größe des reellen Bildes, das eine Sammellinse entwirft ($s = 4$ cm, $s' = 2$ cm, $y = 1$ cm)! Berechnen Sie die Brennweite dieser Linse und entscheiden Sie, welcher der in der Tabelle auf S. 163 zusammengestellten Fälle hier vorliegt!
3. Berechnen Sie die Brennweite einer Konvexlinse aus der Gegenstandsweite $s = 50$ cm und der dazugehörigen Bildweite $s' = 1{,}50$ m! In welchem Verhältnis stehen Gegenstands- und Bildgröße?
4. Wie läßt sich auf einfache Weise feststellen, ob eine Brille Sammellinsen oder Zerstreuungslinsen enthält?
5. Leiten Sie mit Hilfe der Abbildung **162**/1 die Linsengleichung ab!

Bildentstehung an sphärischen Linsen

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

39. Optische Geräte für die Nah- und Fernbeobachtung

1. Die Bildentstehung im menschlichen Auge. Unser Auge enthält eine Konvexlinse, die in Verbindung mit anderen optisch wirksamen Teilen des Auges auf der Netzhaut ein *verkleinertes reelles umgekehrtes Bild* der im Blickfeld liegenden Gegenstände erzeugt. Dieses Bild übt infolge der verschiedenartigen Lichteindrücke Reize auf die Stäbchen und Zäpfchen aus. Diese Reize werden dem Gehirn zugeleitet und hier in die dem Bild und dem Gegenstand entsprechenden Sinneseindrücke umgesetzt.

Die Bildweite ist bei der Bildentstehung im Auge konstant; sie ist gleich der Entfernung Linse—Netzhaut. Zur Abbildung von Gegenständen in verschiedener Gegenstandsweite wird *die Brennweite der Augenlinse verändert.* Das geschieht durch Veränderung der Krümmung der Augenlinse mit Hilfe von Muskeln. Diese Anpassungsfähigkeit des Auges an die jeweilige Entfernung des Gegenstandes nennt man *Akkommodation.*

Nach den Abbildungsgesetzen der Linsen sind die Netzhautbilder um so größer, je kleiner die Gegenstandsweite ist. Unterhalb einer bestimmten Mindestgegenstandsweite, die durch den sogenannten *Nahpunkt* bezeichnet wird, ist keine Akkommodation mehr möglich.

Durch krankhafte oder altersmäßig bedingte Veränderungen des Auges wird die Akkommodationsfähigkeit der Augenlinse beeinträchtigt. Zur Korrektur dieser Fehler benutzt man *Brillengläser.* Diese sind in den meisten Fällen sphärische Linsen.

Weitsichtige tragen *Konvex-Gläser*, Kurzsichtige *Konkav-Gläser* (Abbildung **164**/1).

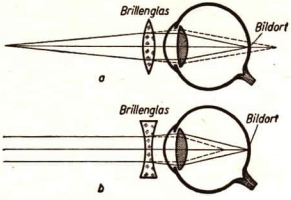


Abb. **164**/1 Ausgleich der Weit- und der Kurzsichtigkeit durch Brillengläser

2. Der Sehwinkel — Das Auflösungsvermögen. Wie groß uns ein Gegenstand erscheint, hängt vom Sehwinkel ab. Der Sehwinkel ist bedingt durch die Größe und die Entfernung eines Gegenstandes vom Auge (Abbildung **164**/2). Je größer der Gegenstand ist, desto größer ist bei gleicher Entfernung der Sehwinkel. Andererseits erscheinen gleich große Gegenstände um so kleiner, je weiter sie entfernt sind (Abb. **164**/3).

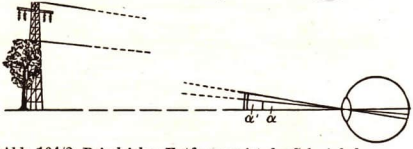


Abb. **164**/2. Bei gleicher Entfernung ist der Sehwinkel von der Größe des Gegenstandes abhängig

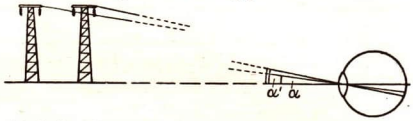


Abb. **164**/3. Gleich große Gegenstände erscheinen bei verschiedener Entfernung unter verschiedenen Sehwinkeln

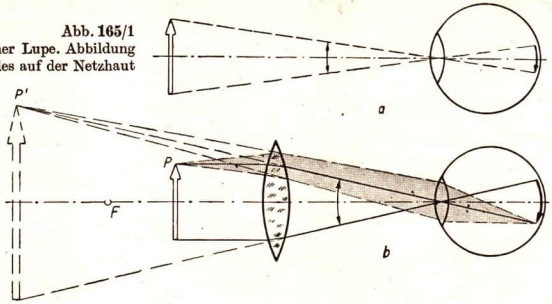
Die Beurteilung der wahren Größe eines Gegenstandes ist bei gleichem Sehwinkel nur unter Berücksichtigung der Entfernung möglich. Die Erfahrung spielt dabei eine große Rolle. Fehlt sie, so läßt sich nur schwer eine Aussage über die Größe des Gegenstandes machen. Beispielsweise erscheinen Sonne und Mond nahezu unter dem gleichen Sehwinkel von 0,5°; sie scheinen daher gleich groß zu sein; in Wirklichkeit ist der Durchmesser der Sonne etwa 400 mal so groß. Die Sonne ist aber auch etwa 400 mal so weit von der Erde entfernt.

Wird der Sehwinkel, unter dem man zum Beispiel die beiden Schienen eines Gleises sieht, kleiner, so scheinen die Schienen zusammenzurücken: Man kann die beiden Schienen nicht mehr getrennt wahrnehmen. Zwei oder mehr Bildpunkte werden vom Auge nur getrennt wahrgenommen, wenn mindestens zwei Rezeptoren der Netzhaut gereizt werden. Dazu müssen die beiden Lichtpunkte die Netzhaut im Abstand von 3 bis 5 μm treffen. Diesen Wert nennt man das *Auflösungsvermögen* des Auges.

Der dem Auflösungsvermögen des Auges entsprechende Sehwinkel beträgt etwa 1'. Das Netzhautbild hat dann eine Größe von 0,0114 mm. Bei diesem Sehwinkel wird ein 10-Pfennig-Stück in 70 m Entfernung gerade noch wahrgenommen. Eine Trennung der zusammenfallenden Punkte bei zu kleinem Sehwinkel wird durch eine Vergrößerung des Sehwinkels erreicht. Dies geschieht in den optischen Geräten *Lupe*, *Mikroskop* und *Fernrohr*.

3. Nahbeobachtungsgeräte. a) Die Lupe. Betrachtet man einen Gegenstand, beispielsweise eine Briefmarke, durch eine Sammellinse innerhalb ihrer einfachen Brennweite, so kann man das vergrößerte virtuelle Bild der Marke beobachten (Abb. **165**/1).

Abb. 165/1
Die Wirkung einer Lupe. Abbildung eines Gegenstandes auf der Netzhaut



Die Sammellinse wirkt als Lupe. Der Sehwinkel wird besonders groß, wenn man die Lupe dicht vor das Auge hält. Man kann dann den Gegenstand dichter als bis zum Nahpunkt des normalsichtigen Auges heranführen und sieht sein vergrößertes virtuelles Bild.

b) Das Mikroskop. Mit einer Lupe erreicht man im günstigsten Falle eine etwa 20fache Vergrößerung. Für wissenschaftliche Untersuchungen und für viele Arbeiten in Laboratorien benutzt man *Mikroskope*. Sie haben eine weit stärkere Vergrößerung. Die optisch wirksamen Hauptteile sind zwei Linsenkombinationen: das *Objektiv* ist dem Gegenstand, dem Objekt, zugekehrt und das *Okular* dem Auge.

Die Wirkungsweise eines Mikroskops wird durch einen einfachen Versuch veranschaulicht (Abb. 165/2). Das Objekt befindet sich zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite des Objektivs. Dieses entwirft daher vom Gegenstand ein *vergrößertes reelles Zwischenbild* B_1. Zum Nachweis kann man es auf einer Mattscheibe auffangen. Je näher der Gegenstand an den Brennpunkt herangebracht wird, um so größer wird das Zwischenbild. Man betrachtet es durch das Okular, das als Lupe wirkt. Statt B_1 sieht man ein stark vergrößertes Hauptbild B_2, auch wenn die Mattscheibe fehlt. B_2 ist dann sogar lichtstärker, da die Lichtstrahlen unmittelbar in das Okular gelangen.

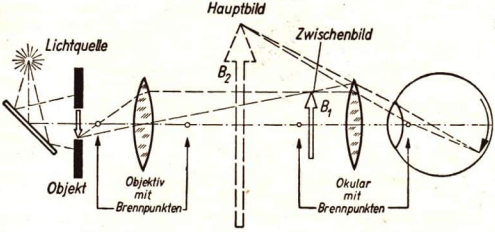


Abb. 165/2
Versuchsanordnung zur Wirkungsweise des Mikroskops

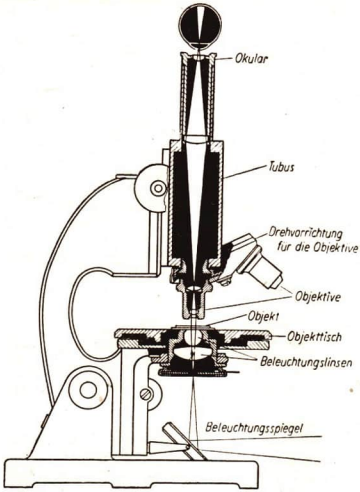


Abb. **166**/1
Achsenschnitt durch ein Geradsichtmikroskop

Abb. **166**/2. Mikroskopobjektiv

Die Abbildung **166**/1 stellt einen senkrechten Schnitt durch ein einfaches Mikroskop dar. Der *Tubus* kann durch eine *Triebschraube* auf und ab bewegt werden. In die obere Tubusöffnung wird das Okular eingesetzt. Am anderen Tubusende ist das Objektiv angebracht (Abb. **166**/2).

Die Objekte werden auf den *Objekttisch* gelegt und von unten her durch einen Spiegel beleuchtet. Zwischen Spiegel und Objekttisch ist zur Bündelung des Lichtes der *Kondensor* eingebaut.

Die Objektive von Mikroskopen haben Brennweiten von nur wenigen Millimetern. Das Objektiv muß daher sehr nahe an das Objekt herangebracht werden. Während man den Tubus von der Seite beobachtet, senkt man ihn vorsichtig so weit, bis sich der untere Rand des Objektivs dicht über dem Objekt befindet. Dann blickt man in das Okular und hebt den Tubus durch Drehen der Triebschraube, bis das Bild scharf erscheint. Dadurch verhindert man, daß das Deckglas zerstört und die Frontlinse des Objektivs beschädigt wird.

Die Gesamtvergrößerung (V_G) eines Mikroskops ist das Produkt aus den Vergrößerungen des Objektivs (V_1) und des Okulars (V_2):

$$V_G = V_1 \cdot V_2 .$$

Damit ein Mikroskop für unterschiedliche Vergrößerungen benutzt werden kann, sind Objektive und Okulare auswechselbar. Während die Okulare herausnehmbar sind, werden die Objektive oft durch eine Drehvorrichtung gewechselt.

Für viele Zwecke genügt eine 50- bis 200fache Vergrößerung. Bei stärkeren Vergrößerungen muß man einen großen Verlust an Bildhelligkeit in Kauf nehmen. Da ein kleiner Bildausschnitt betrachtet wird, gelangt nur wenig Licht in das Objektiv. Auch infolge der Totalreflexion an der Oberfläche des Deckgläschens wird die Helligkeit geringer. Bei Vergrößerungen

über 1000fach wird der Raum zwischen der äußeren Linse des Objektivs und dem Deckglas mit einem Tröpfchen Zedernholzöl oder einer anderen sogenannten *Immersionsflüssigkeit* ausgefüllt. Da das Öl die gleiche Brechungszahl wie das Glas hat, wird die Totalreflexion vermieden; es gelangt mehr Licht in das Objektiv.

Das *Auflösungsvermögen* beträgt bei den besten Mikroskopen etwa 160 nm, das heißt, zwei Punkte mit einem Abstand von 160 nm können gerade noch getrennt wahrgenommen werden. Die Vergrößerung eines Lichtmikroskopes übersteigt meist nicht den Wert 1500 : 1. Diese Grenze liegt in der Wellennatur des Lichtes begründet. Eine wesentlich stärkere Vergrößerung erreicht man mit *Elektronenmikroskopen*. In diesen Geräten verwendet man statt Lichtstrahlen Elektronenstrahlen. Die Vergrößerung beträgt bei dem Elektronenmikroskop „*Elmi D*" des *VEB Carl Zeiss Jena* 100 000 : 1 (Abb. **167**/1). Mit Hilfe dieser Mikroskope ist es zum Beispiel möglich, große Moleküle sichtbar zu machen.

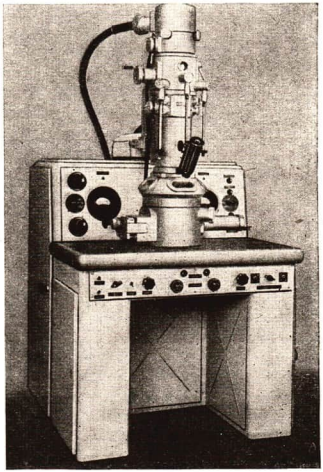


Abb. **167**/1. Elektronenmikroskop „Elmi D"

Damit kann man weitere Bereiche der Natur und der sich in ihnen abspielenden Vorgänge direkt beobachten.

4. Anwendungen des Mikroskops. Während das Mikroskop noch vor hundert Jahren ein verhältnismäßig seltenes und sehr teures optisches Gerät war, sind heute auch unsere Schulen mit Mikroskopen ausgerüstet. In Forschungsinstituten untersucht man medizinische und botanische Präparate oft mit *binokularen Mikroskopen* (Abb. **168**/1). Das Lichtbündel wird mit Hilfe von Prismen in zwei getrennte Strahlenbündel zerlegt (Abb. **168**/2). Es entstehen zwei getrennte, gleich große Bilder, die wie beim Theaterglas gesondert durch Okulare betrachtet und als ein Bildeindruck wahrgenommen werden.

Auf polierten und anschließend geätzten Metallflächen erkennt man bei mikroskopischer Beobachtung das Gefüge des Materials. Bei der Ätzung wird das Material an der Oberfläche teilweise abgetragen, so daß Struktur und Gefüge des Kristallaufbaues hervortreten. In Laboratorien von Stahl- und Eisenwerken und in großen Metallbetrieben führt man solche metallografischen Untersuchungen durch.

Im Maschinenbau produziert man vorwiegend in Form von Serien- oder Massenanfertigungen. Die Einzelteile müssen daher so hergestellt werden, daß sie, ein Teil wie das andere, ohne Nacharbeit beim Zusammenbau passen. Gewisse Abweichungen von den Nennmaßen sind innerhalb enger Grenzen zulässig. Am Unterrichtstag

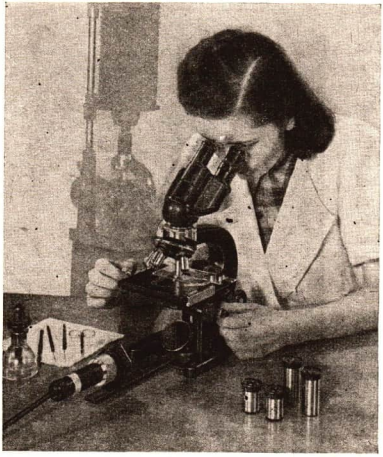


Abb. 168/1
Assistentin bei der Untersuchung an einem binokularen Mikroskop

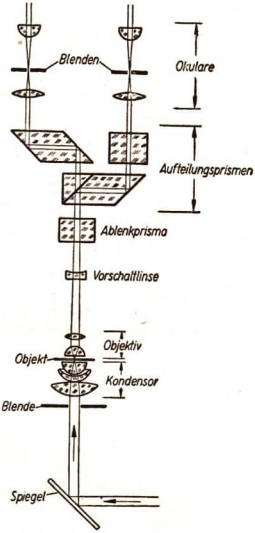


Abb. 168/2 Strahlenverlauf in einem binokularen Mikroskop

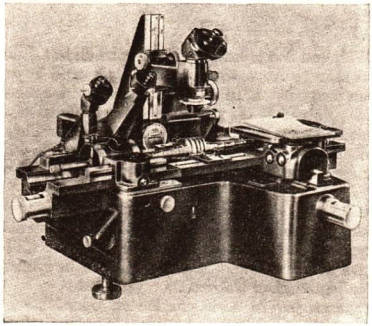


Abb. 168/3
Universalmeßmikroskop

in der Produktion wurden bereits *Toleranzen* erläutert. Sie betragen im Maschinenbau ungefähr 10^{-1} mm bis 10^{-2} mm, manchmal auch 10^{-3} mm.

Austauschbare Teile von Maschinen und Geräten müssen besonders sorgfältig auf Maßhaltigkeit innerhalb der Toleranzgrenzen geprüft werden. Für diese Prüfung verwendet man auch *optische* und *mechanisch-optische Feinmeßgeräte*. Zur Ablesung enthalten sie oft Lupen und Mikroskope. Mit *Meßmikroskopen* werden Längen und

Winkel gemessen. Mit dem *Universalmeßmikroskop* des *VEB Carl Zeiss Jena* können Präzisionsmessungen von Längen mit einer Genauigkeit von 1 µm und von Winkeln mit einer Genauigkeit von 1′ durchgeführt werden (Abb. 168/3).

Optische Geräte, insbesondere Mikroskope und Fernrohre, sind ein wesentliches Hilfsmittel bei der Erforschung der Welt. Während die Mikroskope den Aufbau der „Welt im kleinen" erkennen lassen, dienen Fernrohre zur Erforschung der „Welt im großen".

5. Optische Geräte für astronomische Beobachtungen. Mikroskop und astronomisches Fernrohr haben im Grunde den gleichen Aufbau. Beide enthalten in der einfachsten Form zwei Sammellinsen, das Objektiv und das Okular, die durch einen Tubus miteinander verbunden sind. In der Verwendung beider Geräte besteht aber ein wesentlicher Unterschied. Mit dem Mikroskop betrachtet man sehr kleine Gegenstände, die zwischen einfacher und doppelter Brennweite des Objektivs liegen. Die Bilder der Gegenstände sind vergrößert, so daß die Struktur der Objekte zu erkennen ist.

Im Fernrohr werden die Umrisse oder die Struktur von größeren Gegenständen deutlicher sichtbar, die sehr weit entfernt sind. Sie liegen weit außerhalb der doppelten Brennweite des Objektivs. Bei Beobachtung ohne Fernrohr ist der Sehwinkel wegen der großen Entfernung sehr klein, so daß Einzelheiten nicht mehr auflösbar sind.

a) Das astronomische Fernrohr. Abbildung 169/1 zeigt das Modell eines astronomischen Fernrohres. Von einem weit entfernten Gegenstand wird durch das Objektiv *in der Nähe des Brennpunktes ein umgekehrtes reelles verkleinertes Bild entworfen.* Dieses *Zwischenbild* wird mit Hilfe des Okulars betrachtet, das als Lupe wirkt. Man erhält ein *virtuelles Endbild*, das größer als das Zwischenbild ist. Gegenüber dem Gegenstand ist das Endbild umgekehrt und kleiner als dieser. Die Wirkung des Fernrohres beruht darauf, *daß das verkleinerte Zwischenbild nahe an das Auge gebracht werden kann.* Die Lage des Zwischenbildes ist von der Gegenstandsweite abhängig. Das Okular ist deshalb verstellbar, damit sich das Zwischenbild stets innerhalb der einfachen Brennweite des Okulars befindet. Um ein lichtstarkes Bild zu erhalten, wird der Objektivdurchmesser möglichst groß gewählt. Wenn nämlich viel Licht vom Gegenstand in das Fernrohr fällt, ist das Bild sehr hell. Da bei Erdbeobachtungen

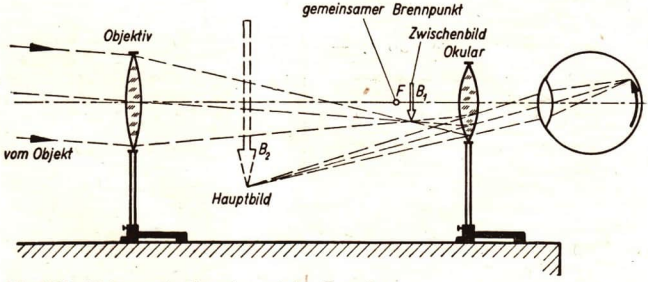


Abb. 169/1. Wirkungsweise des astronomischen Fernrohres

die umgekehrte Bildlage stört, verwendet man dieses Fernrohr vorwiegend für astronomische Beobachtungen. Das größte astronomische Fernrohr der Welt hat eine *Objektivbrennweite* von 19,4 m und einen *Objektivdurchmesser* von 1,02 m. Die Vergrößerung beträgt bei einer *Okularbrennweite* von 0,10 m etwa 194.

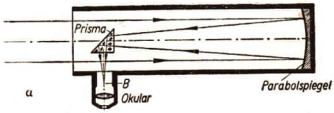
b) Spiegelfernrohre (Reflektoren). Bei den *Reflektoren* ist das Objektiv durch einen Parabolspiegel ersetzt (Abb. **170**/1). Die vom Spiegel reflektierten Strahlen werden vor ihrer Vereinigung durch ein Prisma um 90° abgelenkt. Das reelle Bild (*B*) wird durch ein Okular betrachtet. Linsenfernrohre mit sehr großem Objektivdurchmesser kann man nicht bauen, da sich das Glas unter der Eigenbelastung durchbiegt und derart große Glaskörper nicht genau hergestellt werden können. Bei Spiegelfernrohren besteht diese Begrenzung aus technischen Gründen nicht in dem Maße wie bei Linsenfernrohren, da man die Spiegel an der Rückseite unterstützen kann.

Große Spiegelfernrohre haben Parabolspiegel bis zu 5 m Durchmesser. Der Bau solcher Riesenteleskope erforderte einen sehr großen Kosten- und Zeitaufwand. Allein die Schleifarbeiten am Spiegel dauern mehrere Jahre.

c) Anwendung der Fernrohre in der astronomischen Forschung. Unsere heutigen weitreichenden Kenntnisse vom Bau des Weltalls sind vor allem auf den hohen Entwicklungsstand der Fernrohre zurückzuführen. Mit den derzeitigen Fernrohren kann man nur die Sonne, den Mond und die Planeten wesentlich größer als mit bloßem Auge beobachten. Die Fixsterne sind dagegen so weit entfernt, daß auch mit den leistungsfähigsten Fernrohren der Sehwinkel noch unter 1′ liegt. Die Fixsterne werden daher nur als Lichtpunkte wahrgenommen. Der große Vorteil der Fernrohrbeobachtung liegt aber darin, daß durch die große Öffnung des Fernrohres mehr Licht in unser Auge gelangt. *Die Fixsterne erscheinen daher heller.* Man erkennt somit um ein vielfaches mehr Sterne, als bei direkter Beobachtung sichtbar sind.

In allen Ländern der Erde arbeiten heute Tausende von Astronomen an der Erweiterung und Vervollkommnung der Kenntnisse über den Aufbau der Welt. In der Deutschen Demokratischen Republik werden unter anderem an den Sternwarten in Potsdam und Sonneberg umfangreiche astronomische Beobachtungen vorgenommen. Jede Sternwarte hat neben allgemeinen Aufgaben ein spezielles Forschungsgebiet.

Im *VEB Carl Zeiss Jena* wurde für die Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin ein Teleskop gefertigt, das zu



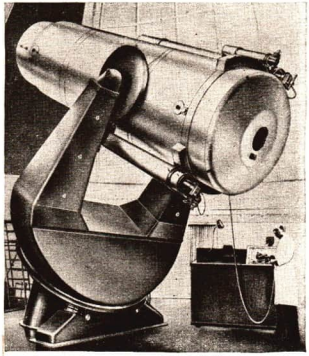


Abb. **170**/1. Spiegelfernrohr
a) Strahlengang,
b) Schmidt-Teleskop, hergestellt vom VEB Carl Zeiss Jena für Sternwarte Hamburg-Bergedorf

den größten seiner Art gehört (Abbildung **171**/1).

Wie bei allen modernen Groß-Teleskopen werden auch mit diesem Gerät nur photographische Aufnahmen der Gestirne, aber keine direkten Beobachtungen vorgenommen. Das Teleskop muß daher mit der scheinbaren Himmelsdrehung stets mitgeführt werden. Das Gewicht aller sich drehenden Teile beträgt 68 Mp. Der Spiegel wiegt allein 2400 kp (Abb. **171**/2). Die Lagerung des Gerätes muß daher besonders sorgfältig vorgenommen werden.

Kleinere Fernrohre findet man in unserer Republik vor allem in *Volks-* und *Schulsternwarten*. Die bekannteste Schulsternwarte befindet sich in *Rodewisch im Vogtland* (Abb. **171**/3). Sie verrichtete vor allem bei der Beobachtung der sowjetischen künstlichen Erdsatelliten eine sehr erfolgreiche Arbeit.

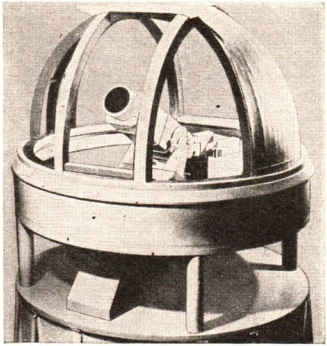


Abb. **171**/1. Schmidt-Teleskop der Deutschen Akademie der Wissenschaften, Tautenburger Forst b. Jena (Modell). Geräte dieser Art werden nach einem Optiker benannt, der diesen Teleskoptyp entwickelte

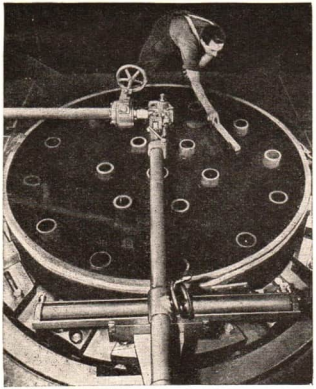


Abb. **171**/2. Schmidt-Spiegel in Jena beim Polieren

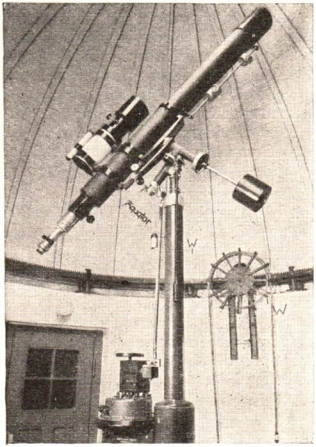


Abb. **171**/3. Schulsternwarte in Rodewisch

6. Prismenfernrohre. Astronomische Fernrohre können als Erdfernrohre nur dann verwendet werden, wenn man eine weitere Sammellinse zur Umkehrung des Zwischenbildes einschaltet. Das Fernrohr wird dadurch aber sehr lang und unhandlich, so daß es als transportables Gerät nicht zu verwenden ist.

Im Jahre 1893 wurde in Jena auf Grund der Arbeiten von *Ernst Abbe* das *Prismenfernrohr* als brauchbares Fernrohr für Erdbeobachtungen entwickelt. Es zeichnet sich durch Handlichkeit infolge geringer Länge, starke Vergrößerung und große Bildhelligkeit aus und gleicht in seinem optischen Aufbau dem astronomischen Fernrohr. Das Bild wird nicht durch eine Linse, sondern *durch zwei totalreflektierende Prismen umgekehrt*.

Nach ihrem Durchgang durch das Objektiv werden die Lichtstrahlen an den Kathetenflächen des ersten Prismas zweimal total reflektiert (Abb. **172**/1). Dabei wird ihre Richtung um 180° geändert. Die gleiche Richtungsänderung tritt bei der totalen Reflexion an den Kathetenflächen des zweiten Prismas auf. Die Strahlen verlaufen somit wieder in ihrer ursprünglichen Richtung, wenn sie in das Okular gelangen. Das erste Prisma bewirkt eine Vertauschung von oben und unten, das zweite Prisma eine Vertauschung von rechts und links. Man sieht infolgedessen durch das Okular ein aufrecht stehendes und seitenrichtiges Bild.

Bei den *Feldstechern* sind zwei gleichartig gebaute Fernrohre zu einem Gerät vereinigt. Dadurch ist es möglich, mit beiden Augen gleichzeitig zu beobachten.
Außerdem wird dadurch der räumliche Eindruck verstärkt.

7. Fernrohre für besondere Zwecke. Fernrohre verwendet man vielfach als *Visierrohre*. Sie enthalten dann meist ein Fadenkreuz als Visiermarke. Bei Landvermessungen benutzt man *Nivellierinstrumente* und *Theodolite* (Abb. **172**/2). Der Theodolit ist ein Winkelmeßgerät, mit dem man Höhen- und Seitenwinkel mißt.

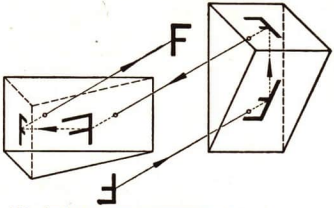


Abb. **172**/1. Bildumkehrung durch zwei totalreflektierende Prismen

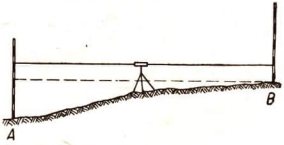


Abb. **172**/2. Nivellieren.
Die Höhendifferenz zwischen *A* und *B* ergibt sich als Differenz der Lattenablesung

Abb. **172**/3
Beobachtungsstelle der NVA mit Scherenfernrohr

Abb. 173/1
Soldat der NVA beim Visieren durch das Zielfernrohr

Mit *Fluchtungsfernrohren* überprüft man die Genauigkeit beim Ausrichten von großen Maschinen und Fundamentplatten. Auch Lokomotivrahmen werden auf diese Weise vermessen.

Eine besondere Bedeutung besitzen optische Geräte auch für die Landesverteidigung. Unsere Nationale Volksarmee ist mit modernen Waffen ausgerüstet, deren Zieleinrichtungen vorwiegend optische Geräte sind. Beobachtungsstellen verfügen oft über *Scherenfernrohre*, mit denen man aus einer geschützten Stellung beobachten kann (Abb. 172/3). Auch Feldstecher gehören zur Ausrüstung der Soldaten. Unter Zuhilfenahme von *Zielfernrohren* erreicht man wesentlich bessere Schießergebnisse (Abb. 173/1).

8. Die optische Industrie der Deutschen Demokratischen Republik. Von einer optischen Industrie in Deutschland kann man erst seit etwa 90 Jahren sprechen. Vorher wurden optische Geräte auf rein handwerklicher Grundlage hergestellt, wobei meist durch Probieren die günstigsten Linsenkombinationen ermittelt wurden.

Erst der Physiker *Ernst Abbe* begann um 1870 zusammen mit dem Universitätsmechaniker *Carl Zeiss* und dem Glaschemiker *Otto Schott*, optische Geräte serienmäßig in den von ihnen begründeten Werkstätten in Jena herstellen zu lassen. Dadurch konnten die Herstellungskosten für optische Geräte wesentlich gesenkt werden. Auf Grund der von *Abbe* geschaffenen Berechnungsgrundlagen wurden die Linsenzusammenstellungen sehr genau berechnet. Infolgedessen wurde die Qualität der Erzeugnisse erhöht. *Ernst Abbe* kann als Schöpfer der modernen Optik bezeichnet werden.

Ernst Abbe (1840 bis 1905)

Aber *Abbe* war nicht nur Wissenschaftler, sondern zugleich auch Unternehmer. Die „*Optischen Werkstätten von Carl Zeiss*“ und die Glaswerke „*Schott & Gen.*“ entwickelten sich bald zu Großbetrieben, die außerordentlich hohe Profite abwarfen. Der immer stärker werdenden Arbeiterbewegung um 1890 versuchte *Abbe* dadurch zu begegnen, daß er die Werke der „*Carl-Zeiss-Stiftung*“ übereignete. Er glaubte, durch diese Maßnahme könnten die Klassengegensätze beseitigt werden. Obwohl die Zeissarbeiter gegenüber den Arbeitern der übrigen Industrie bessergestellt waren, wurden sie nach wie vor ausgebeutet. So entstand in Jena eine Arbeiter-

aristokratie, die ihr Klassenbewußtsein verlor und sich weitgehend von den Kämpfen der deutschen Arbeiterklasse distanzierte. Der Versuch, die „Carl-Zeiss-Stiftung" als einen sozialistischen Betrieb hinzustellen, war eine grobe Verdrehung der Tatsachen. Im Gegensatz zu einem sozialistischen Betrieb hatten die Arbeiter keinerlei Einfluß auf die Leitung und kein Mitbestimmungsrecht. Die Verfügungsgewalt über die Produktionsmittel lag ausschließlich in den Händen der Geschäftsleitung, also in den Händen kapitalistischer Manager.

Mit Hilfe der erzielten Gewinne schluckten die Zeiss-Werke nacheinander eine größere Anzahl von optischen Betrieben und anderen Unternehmungen und entwickelten sich in den Jahren 1910 bis 1940 zu einem optischen Konzern größten Ausmaßes. In den beiden Weltkriegen hatten die Zeiss-Werke riesenhafte Gewinne. Das zeigen zum Beispiel die Umsätze in der Zeit des ersten Weltkrieges:

1914/15	23 000 000 Mark
1915/16	40 000 000 Mark
1916/17	57 000 000 Mark
1917/18	105 000 000 Mark

Diese Gewinne wurden nicht nur durch Lieferungen an die deutsche Armee erzielt. Über neutrale Länder lieferte Zeiss während des ersten Weltkrieges sogar Militär-Feldstecher an kriegführende Staaten auf der Seite des Gegners.

Während des zweiten Weltkrieges wurde der Umsatz auf 1,17 Milliarden Reichsmark gesteigert. Wieder verdiente der Zeiss-Konzern am Kriege und am Sterben von Millionen. Deshalb wurden die Werke auch 1945 durch Kontrollratsbeschluß demontiert.

Unter schweren Bedingungen begannen die Arbeiter und Wissenschaftler 1947 mit dem Neuaufbau des Betriebes. Zum ersten Mal in der Geschichte des Werkes bestimmten die Arbeiter über die Leitung und Entwicklung des Betriebes selbst. Trotz aller Störversuche des kapitalistischen Auslands und Westdeutschlands arbeiten im VEB Carl Zeiss Jena und seinen Fertigungsstätten in Saalfeld, Eisfeld und Dresden-Reick heute über 18 500 Betriebsangehörige. Er ist damit *der größte feinmechanisch-optische Betrieb der Welt* (Abb. **175**/1). Das hochwertige Glasmaterial liefert der *VEB Jenaer Glaswerk Schott und Genossen*. Hier wurden neue Glassorten entwickelt, die allen Anforderungen der optischen Industrie genügen.

Ganz besondere Bedeutung hat im VEB Carl Zeiss Jena in den vergangenen Jahren die Produktion von Geräten der Feinmeß-, Rechen-, Steuerungs- und Regelungstechnik gewonnen. Ein großer Teil dieser Erzeugnisse wird in die befreundeten sozialistischen Länder exportiert.

Höchste Präzision und peinlichste Sauberkeit der Ausführung sowie die wissenschaftliche Grundlage der Geräte machen die Zeiss-Erzeugnisse aus Jena zu einem Weltbegriff. Das beweisen die Exportverbindungen zu mehr als 80 Ländern. Die hervorragende Qualität der über 3000 verschiedenen Erzeugnisse des *VEB Carl Zeiss Jena* beruht vor allem auf der guten Zusammenarbeit von Arbeitern, Technikern, Ingenieuren, Wissenschaftlern und Kaufleuten.

Andere bedeutende Produktionsstätten der optischen Industrie unserer Republik sind der *VEB Rathenower Optische Werke* (*ROW*) und der *VEB Feinoptisches Werk Görlitz*. Die Kameraindustrie ist vor allem in Dresden konzentriert. Im Jahre 1959 wurden die volkseigenen Betriebe *Kamera-Werke Niedersedlitz, Kino-Werk Dresden, Altissa-Camera-Werk Dresden, Aspecta-Dresden* und *Welta-Kamera-Werke Freital*

Abb. 175/1. VEB Carl Zeiss Jena. Ansicht des Hauptwerkes mit dem Hochhaus

zu den volkseigenen *Kamera- und Kinowerken Dresden* zusammengeschlossen. Die Produktion konnte wesentlich verbessert werden, da sich die einzelnen Werke spezialisierten. Auch diese optischen Betriebe liefern Fotoapparate und andere Geräte in viele Länder Europas, Asiens, Afrikas und Amerikas. Wir können dafür wertvolle Rohstoffe importieren. Für eine einzige, nur wenige hundert Gramm wiegende Kamera vom Typ „Exakta Varex" erhalten wir zum Beispiel 118 kg Baumwolle für unsere Textilindustrie. Aus dieser Baumwolle kann man 590 m² Baumwollstoff weben, der zur Anfertigung von 260 Kleidern reicht. Da wir für unsere gesamte Wirtschaft viele Rohstoffe einführen müssen, ist der Export hochwertiger optischer Geräte von großer Bedeutung. Infolgedessen werden von unseren Werktätigen große Anstrengungen unternommen, um auch die Produktion optischer Geräte weiter zu steigern.

9. Fragen und Aufgaben:

1. Bei nebligem Wetter erscheinen entfernte Gegenstände verschwommen. Welchen Einfluß hat diese Tatsache auf die Entfernungsschätzung?
   Muß man auch klares Wetter entsprechend berücksichtigen?
2. Warum wird ein breites Gewässer oft zu schmal geschätzt?
3. Welche Anwendungen der Lupe sind Ihnen bekannt?
4. Vergleichen Sie Linsendurchmesser und Brennweite der Objektive bei Mikroskopen und Fernrohren miteinander! Worin besteht der wesentliche Unterschiede beider Geräte?

5. Warum erscheinen die Erdsatelliten bei einer Beobachtung mit Fernrohren nur als helle Punkte?
6. Welche Vorteile ergeben sich durch die Verwendung von Astrographen (vgl. Abbildung 170/1)?
7. Die Messung des Abtreibens von Wetterballonen erfolgt neuerdings mit Radargeräten. Welche Vorteile ergeben sich gegenüber der Beobachtung mit einem Theodoliten (vgl. S. 140)?
8. Wie kann man die Oberfläche undurchsichtiger Körper mikroskopisch untersuchen?
9. Um welche Strecke ist ein Prismenfernrohr kürzer als ein astronomisches Fernrohr mit sonst gleicher Ausstattung?

40. Die Interferenz der Lichtwellen

1. Kohärentes Licht. Alle bisher besprochenen Erscheinungen, die auf der Reflexion beziehungsweise der Brechung des Lichtes beruhen, können sowohl nach den Gesetzen der Wellenlehre als auch in vereinfachter Weise mit Hilfe der Ausbreitung von Lichtstrahlen erklärt werden (vgl. S. 144). Alle optischen Erscheinungen aber, bei denen Farben auftreten, können nur mit Hilfe der Wellennatur des Lichtes dargestellt werden. *Wie bei allen Wellen, gibt es auch bei Lichtwellen Interferenz- und Beugungserscheinungen.* Sie sind die Ursache vieler Farberscheinungen.

Da sich Wellen bei einem Gangunterschied von $\frac{\lambda}{2}$ auslöschen, muß dies auch bei Lichtwellen festzustellen sein. Bei bestimmten Gangunterschieden muß also die merkwürdige Tatsache zu beobachten sein:

Licht und Licht ergibt Dunkelheit.

Die erwartete Erscheinung ist jedoch nur bei Versuchen zu beobachten, bei denen die interferierenden Lichtwellen von einer Lichtquelle stammen.

Die Ursache liegt in der besonderen Art der Lichtaussendung. Lichtwellen breiten sich nicht als zusammenhängende Kugelwellen aus, wie etwa die Schallwellen von einer Schallquelle ausgehen. Das Licht setzt sich aus einer sehr großen Anzahl von *einzelnen Wellenzügen* zusammen, die von den einzelnen Atomen der Lichtquelle sehr kurzzeitig ausgesendet werden.

Man kann die Vorgänge bei der Überlagerung von Wellenzügen an Wasserwellen veranschaulichen (Abb. 177/1). *A* und *B* sind zwei Erregungszentren. Durch Eintauchen je eines Stabes werden in unregelmäßigem Zeitabstand Wellenzüge erregt. Wegen der begrenzten Länge der Wellenzüge kommt es in diesem Beispiel zu keiner Überlagerung. Die Aussendung der Wellenzüge kann aber auch so erfolgen, daß sie zusammentreffen und miteinander interferieren (Abb. 177/2).

Ob eine Interferenz zustande kommt, hängt von der Wegdifferenz der Wellenzüge, der Zeitdifferenz ihrer Erregung, von ihrer Phasenverschiebung und ihrer Länge ab.

Bei Lichtwellen sind Interferenzen nur zu beobachten, wenn sich zwei Lichtbündel überschneiden, die dauernd den *gleichen Gangunterschied* haben. Das ist praktisch nur möglich, wenn man *Licht einer* eng begrenzten *Lichtquelle zur Überlagerung mit Licht derselben Lichtquelle bringt.* Derartiges Licht bezeichnet man als *kohärent.*

Nur kohärente Wellenzüge können miteinander interferieren.

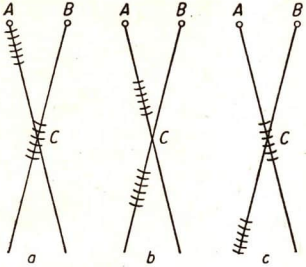


Abb. 177/1. Ausbreitung von Wellenzügen (schematisch). Der von A ausgehende Wellenzug erreicht die Beobachtungsstelle C erst, nachdem der Wellenzug von B sie bereits passiert hat.

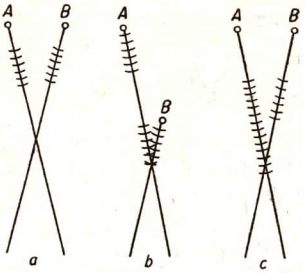


Abb. 177/2. Ausbreitung von verschiedenen Wellenzügen, bei denen es zu einer Überlagerung kommt (schematische Darstellung).

2. Interferenzerscheinungen bei der Beugung des Lichtes. Die *Beugung der Lichtwellen* führt meist zu Interferenzerscheinungen. In Abbildung **177/3** fällt das Licht einer Lichtquelle durch ein Rotfilter und einen Leuchtspalt auf einen schmalen Spalt, der etwa 0,2 mm breit ist. Dieser *Beugungsspalt* wird durch eine Linse auf einen etwa 2 m entfernten Bildschirm abgebildet. Nach dem Huygensschen Prinzip ist der Beugungsspalt Ausgangspunkt neuer Elementarwellen. Da sie mit gleicher Phase entstehen und demnach kohärent sind, interferieren diese Wellen. Auf dem Schirm beobachtet man einen hellen roten Streifen. Nach beiden Seiten schließen sich mehrere schwächer sichtbare rote Streifen an (Abb. **177/4**). Man bezeichnet diese Interferenzstreifen auch als *Beugungsstreifen*.

Mit Hilfe solcher Versuche kann man die Wellenlänge des jeweils verwendeten Lichtes bestimmen. *Alle diese Versuche sind eindeutige Beweise für die Wellennatur des Lichtes.*

In den Laboratorien der chemischen Industrie werden zur schnellen chemischen Analyse von Flüssigkeiten und Gasen oft optische Meßgeräte verwendet. Diese nutzen unter anderem Beugungserscheinungen aus. Beim *Laboratoriumsinterferometer* des *VEB Carl Zeiss Jena* wird durch eine Doppelblende ein Lichtbündel in zwei parallele kohärente Teilbündel zerlegt (Abb. **178/1** und **178/2**). Sie durchlaufen zwei Glaskammern und gelangen dann in ein Fernrohr, in dem sie vereinigt werden und interferieren. Das entsprechende Interferenzbild wird mit

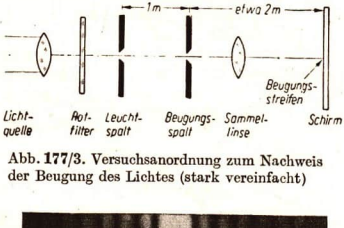


Abb. 177/3. Versuchsanordnung zum Nachweis der Beugung des Lichtes (stark vereinfacht)

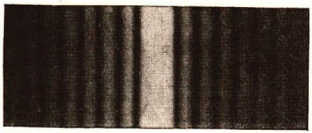


Abb. 177/4. Interferenzstreifen hinter einem beleuchteten Spalt

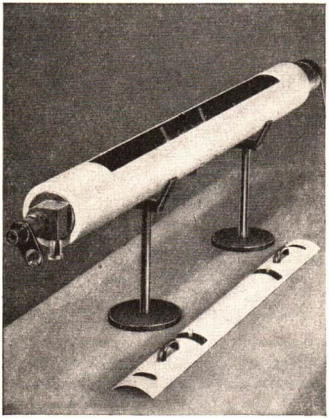


Abb. 178/1. Zeiss-Interferometer

einem gleichen Interferenzbild verglichen, das durch den Versuch nicht beeinflußt wird (Abb. **178/3**). Ist die Lichtbrechung der in beiden Kammerhälften befindlichen Medien verschieden groß, so tritt in den oberen Hälften der parallelen Lichtbündel eine Phasenverschiebung ein, die, je nach der Größe des Brechungsunterschiedes, ein völliges Verschwinden (a) oder eine geringere Verschiebung (b) des oberen Interferenzstreifensystems zur Folge hat. Indem man nun die Schräglage der Kompensatorplatte (vgl. Abb. **178/2**) ändert, wird der Lichtweg innerhalb derselben verkürzt oder verlängert und damit ein Ausgleich für die Verschiebung des oberen Streifensystems herbeigeführt (c).

Schon geringe Beimengungen eines anderen Stoffes verursachen einen Gangunterschied und damit eine Änderung des Interferenzbildes. An einer Meßtrommel

1 Lichtquelle,
2 Spalt,
3 Kollimator,
4 Doppelblende,
5 Gaskammer,
6 bewegliche Kompensatorplatte,
7 Hilfsplatte,
8 Meßtrommel,
9 Fernrohr,
10 Okular,
11 feste Kompensatorplatte,
12 Deckel

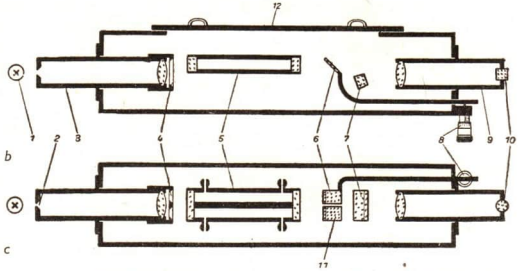
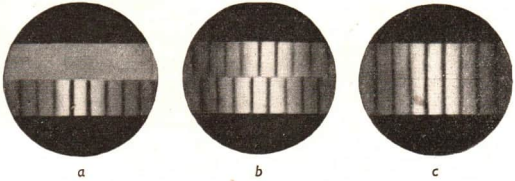


Abb. **178/2**. Schnittskizze durch ein Zeiss-Interferometer. a) von oben, b) von der Seite

Abb. **178/3**
Interferenzbilder beim Interferometer.
Die unteren Streifen sind das Vergleichssystem. Sie bleiben beim Versuch unverändert.



liest man die Verschiebung der Streifen ab. Mittels Tabellen kann der Prozentgehalt schnell und zuverlässig bestimmt werden. Es lassen sich beispielsweise noch 0,014 % Kohlendioxyd oder 0,0015 % Benzol in der Luft nachweisen.

3. Das optische Gitter. Bei der Beugung des Lichtes an einem einfachen Spalt gehen die hellen Streifen und die dunklen Streifen allmählich ineinander über. Die hellen Streifen nennt man *Maxima*, die dunklen *Minima*. Beide Streifensysteme sind nicht scharf.

Verwendet man an Stelle eines einfachen Spaltes einen *Doppelspalt*, so werden die Maxima schmaler und schärfer. Zwischen den hellsten Streifen sind schwächere helle Streifen zu sehen, die man *Nebenmaxima* nennt. Meist wird ein sogenanntes *optisches Gitter* verwendet. Es besteht beispielsweise aus einem System von vielen parallelen hellen und dunklen Streifen, die in gleichen Abständen auf einer Glasplatte aufgetragen sind. Die hellen Streifen wirken wie Spalte, die das Licht durchlassen. Durch eine Blende kann man die Anzahl der vom Licht durchstrahlten Spalte verändern. Verbreitert man die Blende vor dem Gitter, so wird dadurch die Anzahl der Spalte vergrößert. Die Interferenzstreifen bleiben an denselben Stellen, werden aber heller. Die Nebenmaxima werden immer lichtschwächer, so daß nur noch die scharfen hellen Hauptmaxima zu sehen sind (Abb. **179**/1 und **179**/2). Sie werden nach *Ordnungen* bezeichnet. Das in der Mitte liegende Maximum hat die Ordnung 0. Links und rechts davon erscheinen die beiden Streifen der 1. Ordnung. Anschließend die beiden Streifen der 2. Ordnung usw.

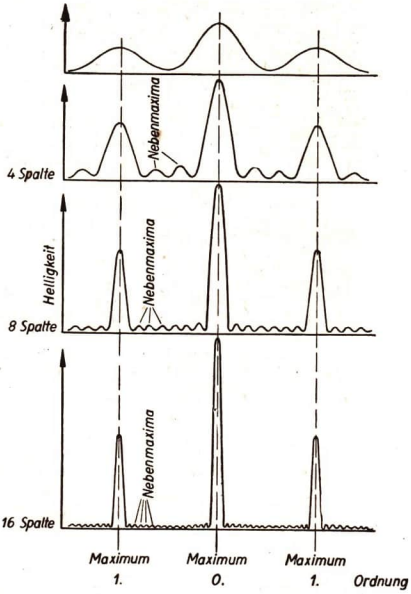


Abb. **179**/1
Beugungsstreifen bei 4, 8 und 16 Spalten.
Auf der Ordinate ist die Helligkeit abgetragen

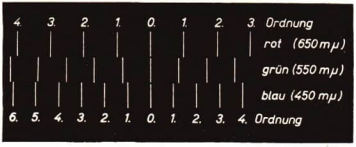


Abb. **179**/2
Beugungsstreifen hinter einem Beugungsgitter

Für wissenschaftliche Zwecke stellt man hochwertige Beugungsgitter her, indem durch eine Teilmaschine mit einem Diamanten parallele Striche in eine Glasplatte geritzt werden. Die unverletzten Glasstreifen sind die Spalte des Gitters (Abb. 180/1). Man hat die Dichte der Linien bis auf etwa 2000 Linien je Millimeter steigern können. Mit hochwertigen Gittern ist es möglich, Wellenlängen mit einer großen Genauigkeit zu bestimmen. Beugungsgitter werden daher vor allem in der Spektroskopie verwendet (vgl. S. 189).

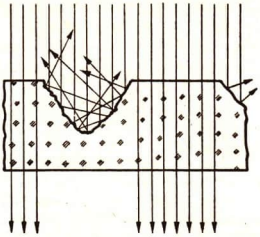


Abb. 180/1. Schnitt durch ein in Glas geritztes Beugungsgitter

4. Fragen und Aufgaben:

1. Wie kann man zwei kohärente Lichtwellenzüge zur Überlagerung bringen?
2. Beschreiben Sie die Wirkungsweise eines Interferometers!
3. Stechen Sie mit einer glühenden Nadelspitze ein Loch in ein Stück schwarzes Papier! Halten Sie das Papier vor eine helle Glühlampe und betrachten Sie das Loch durch eine Vogelfeder, durch ein Stück feinen Gewebes (Gaze), durch ein feines Küchensieb aus Draht oder Dederon, durch ein Beugungsgitter! Was beobachten Sie, und wie ist die Erscheinung zu erklären?
4. Betrachten Sie eine Kerze durch einen möglichst schmalen Spalt zwischen den Daumen oder durch die Wimpern der fast geschlossenen Augen! Wie ist die beobachtete Erscheinung zu erklären?
5. Fotografieren Sie einen Bogen Millimeterpapier, ein regelmäßig kariertes Papier oder ein Streifenmuster stark verkleinert und verwenden Sie das fotografische Negativ als Beugungsgitter!

41. Die Polarisation

1. Polarisation mechanischer Wellen. Die Frage, ob Lichtwellen transversale oder longitudinale Wellen sind, kann erst nach Kenntnis der Polarisationserscheinungen beantwortet werden. Der Begriff *Polarisation* soll durch den folgenden Versuch erläutert werden. Durch senkrechte Schlitze in zwei Brettchen ist ein Gummifaden geführt, der zu Transversalwellen angeregt wird (vgl. S. 70). Wegen der kreisförmigen Erregung schwingt der Faden vor dem ersten Spalt spindelförmig. Hinter dem ersten Schlitz schwingt die Seilwelle dagegen nur noch in ein und derselben Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Man sagt, die Seilwelle ist durch den Schlitz *linear polarisiert* worden. Der erste Schlitz stellt einen *Polarisator* dar.

Schwingen die Teilchen einer Welle in einer Ebene, dann heißt die Welle linear polarisiert.

Steht der zweite Schlitz parallel zum ersten, dann durchläuft ihn die polarisierte Seilwelle ungehindert. Stellt man den zweiten Schlitz dagegen quer, so durchläuft ihn die Welle nicht. Mit dem zweiten Schlitz läßt sich daher feststellen, ob die anlaufende Welle linear polarisiert ist. Dieser Schlitz heißt *Analysator*. Auf eine longitudinale Welle, beispielsweise auf den in der Längsrichtung schwingenden Gummi-

faden, würde die Stellung der beiden Schlitze keinen Einfluß haben. Die Polarisation ist daher nur bei Transversalwellen möglich. Longitudinalwellen lassen sich nicht polarisieren.

Die Polarisation ist ein Unterscheidungsmerkmal zwischen Transversal- und Longitudinalwellen.
Nur Transversalwellen lassen sich polarisieren.

2. Polarisation des Lichtes. Unser Auge kann nicht feststellen, ob Licht polarisiert ist oder nicht. Erst durch besondere optische Versuche kann man das Licht auf Polarisation untersuchen. Man läßt auf einen Spiegel ein paralleles Lichtbündel unter einem Winkel von 57° auftreffen. Es wird auf einen parallel dazu stehenden zweiten Spiegel reflektiert. Auch dort soll es unter einem Winkel von 57° einfallen. Der Winkel von 57° hat sich bei Versuchen mit Glas als besonders günstig erwiesen. Er hängt von dem jeweils anzuwendenden Stoff ab. Dreht man den zweiten Spiegel langsam um seine Achse, so wird das reflektierte Licht immer schwächer und verschwindet bei einem Drehwinkel von 90° vollständig. Bei 180° herrscht wieder Helligkeit, bei 270° Dunkelheit, bei 360° wieder Helligkeit. Diese Erscheinung läßt darauf schließen, daß das Licht polarisiert ist. Die Untersuchung dieser und ähnlicher Vorgänge hat ergeben: Das Licht besteht aus unzähligen linear polarisierten Wellenzügen der verschiedensten Schwingungsrichtungen, von denen meist keine vorherrscht (Abb. **181**/1). Beim Auftreffen auf den ersten Spiegel unter einem bestimmten Winkel wird das Licht linear polarisiert. Dieser Spiegel wirkt als Polarisator. *Das Licht schwingt nur noch senkrecht zur Einfallsebene.* Der zweite Spiegel wirkt als *Analysator*. Er reflektiert nur solche linear polarisierten Wellen, die senkrecht zur Einfallsebene schwingen (0° und 180°). Bei 90° und 270° liegen Schwingungsebene und Einfallsebene aber parallel, so daß kein Licht reflektiert wird. Weicht der Einfallswinkel von 57° ab, dann wird das Licht nur noch teilweise polarisiert.

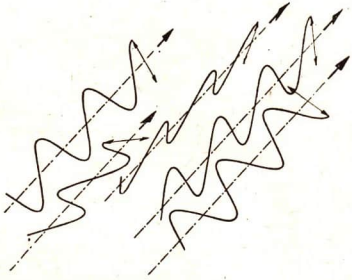
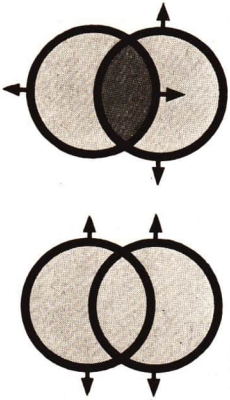


Abb. **181**/1
Schwingungsrichtungen bei natürlichem Licht

Licht läßt sich unter bestimmten Bedingungen polarisieren.
Die Lichtwellen sind Transversalwellen.

Für technische Zwecke werden heute als Polarisator und Analysator meist *Polarisationsfilter* verwendet. Sie bestehen aus einer dünnen Folie, in die kleine Kriställchen eingebettet sind, die das Licht linear polarisieren. Stehen die „Durchlaßrichtungen" der beiden Filter senkrecht zueinander, dann herrscht hinter dem Analysator Dunkelheit. Man sagt, *sie stehen gekreuzt* (Abb. **182**/1).



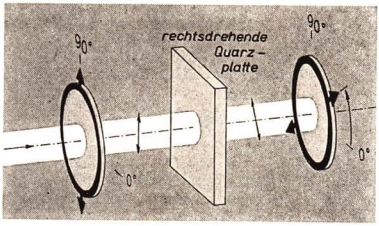


Abb. **182**/2
Drehung der Schwingungsebene polarisierten Lichtes durch eine Quarzplatte

Abb. **182**/1
Zwei aufeinandergelegte Polarisationsfilter (oben in gekreuzter Stellung)

3. Drehung der Schwingungsebene. Bringt man in den Strahlengang zwischen zwei gekreuzte Polarisatoren eine Quarzplatte oder eine Küvette mit einer Zuckerlösung, so tritt merkwürdigerweise eine Aufhellung ein (Abb. **182**/2).

Durch den Analysator gelangt wieder etwas Licht. Durch die Zuckerlösung muß die Schwingungsebene des Lichtes gedreht worden sein. Dreht man den Analysator daraufhin um einen bestimmten Winkel, so tritt wiederum Dunkelheit ein. Untersuchungen mit verschiedenen Stoffen ergaben: Die Größe und Richtung der Drehung der Schwingungsebene ist außer von der Art und Dicke des Stoffes auch von der Wellenlänge des Lichtes und von der Konzentration der Flüssigkeit abhängig. *Man kann aus dem Drehwinkel daher auf die Konzentration der Zuckerlösung schließen.* Für die Untersuchung solcher, wie man sagt, *optisch aktiver Stoffe* benutzt man *Polarimeter* (Abb. **182**/3). Eine 20 cm lange Porzellanröhre nimmt die zu untersuchende Flüssig-

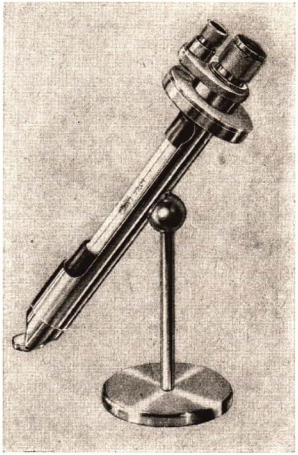


Abb. **182**/3
Taschenpolarimeter des VEB Carl Zeiss Jena

keit auf. Ehe das Licht in die Porzellanröhre eintritt, durchläuft es ein Polarisationsfilter. Der Analysator auf der anderen Seite der Röhre wird bei der Messung verstellt. Der Drehwinkel kann an einer sehr genauen Kreiseinteilung abgelesen werden.

Polarimeter werden besonders in der Landwirtschaft und in der zuckerverarbeitenden Industrie verwendet. Der Zuckergehalt von Zuckerrüben kann auf diese Weise schnell bestimmt werden. Ärzte untersuchen mit Polarimetern den Harn auf Zucker. Schon geringe Mengen lassen sich nachweisen.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Woraus schließt man, daß die Lichtwellen Transversalwellen sind?
2. Was versteht man unter einem optisch aktiven Stoff?
3. Warum läßt sich mit dem Analysator feststellen, ob die Wellen linear polarisiert sind?

42. Die Dispersion — Spektren

1. Die spektrale Zerlegung des Lichtes — Das Spektrum. Jeder hat schon einmal einen Regenbogen gesehen. Eine ähnliche Erscheinung läßt sich beobachten, wenn man bei Sonnenschein den Rasen sprengt. Die Sonne muß sich dabei im Rücken des Beobachters befinden. Der folgende Versuch erklärt das Prinzip dieser optischen Erscheinungen (Abb. **183**/1).

Man beleuchtet eine Spaltblende durch eine starke Lichtquelle. Eine Sammellinse entwirft auf einem Schirm ein weißes Bild des Spaltes. Bringt man in den Strahlengang ein Glasprisma, so wird das Licht, wie zu erwarten ist, von der brechenden Kante weg abgelenkt (vgl. S. 159). Auf dem Schirm ist aber *an Stelle des weißen Spaltbildes ein breiter farbiger Streifen* zu sehen. Ein solches Farbband heißt ein **Spektrum**. Die verschiedenen Farben gehen allmählich ineinander über, so daß sich die Zahl der Farbtöne nicht genau angeben läßt. Man nennt diese Farben *Spektralfarben*. Die auffallendsten, leicht zu unterscheidenden Farben sind *Rot*, *Orange*, *Gelb*, *Grün*, *Blau* und *Violett*. Sie werden als *Hauptfarben* bezeichnet.

Läßt man rote oder andere einfarbige Lichtstrahlen aus dem Spektrum durch ein zweites Prisma gehen, so werden sie zwar abgelenkt, aber nicht in andere Farben

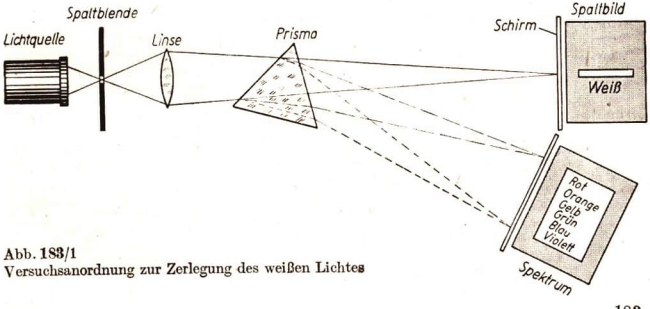


Abb. **183**/1
Versuchsanordnung zur Zerlegung des weißen Lichtes

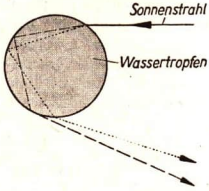


Abb. 184/1
Zerlegung des Lichtes in einem Wassertropfen

zerlegt. *Die Spektralfarben können daher nicht weiter zerlegt werden*; man nennt sie *Grundfarben*.

Die spektrale Zerlegbarkeit des Sonnenlichtes durch ein Prisma wurde erst Ende des 17. Jahrhunderts von dem englischen Physiker *Isaac Newton* genauer untersucht, obwohl sie bereits länger bekannt war.

Man beschäftigte sich in England damals besonders mit der Beobachtung der Himmelskörper, da die Kenntnisse über ihre Bewegung für die Schiffahrt sehr wichtig waren. Die für diese Beobachtung gebauten Fernrohrlinsen zeigten beim Durchgang des Lichtes farbige Ränder. Die Untersuchung dieser Erscheinungen führte Newton zu seinen Entdeckungen.

Weißes Licht kann durch ein Prisma in die Spektralfarben oder Grundfarben zerlegt werden. Die Hauptfarben sind Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett.

Die Entstehung eines Regenbogens ist auf diese Zerlegung des Lichtes zurückzuführen. Wenn es regnet, ist die Luft mit vielen Wassertröpfchen erfüllt. Die Sonnenstrahlen fallen auf diese Tröpfchen, dringen ein und werden an der Rückseite totalreflektiert. Beim Ein- und Austritt werden die Lichtstrahlen gebrochen und in Spektralfarben zerlegt (Abb. 184/1).

2. Die Entstehung des Spektrums. Der Versuch auf Seite 183 zeigt, daß die roten Anteile des weißen Lichtes nicht so stark gebrochen werden wie die violetten. Man hat festgestellt, daß die Brechungszahl für den gleichen Stoff von der Wellenlänge des Lichtes abhängt. Sie liegt beispielsweise bei Kronglas zwischen 1,53 und 1,51. Die Brechungszahl wird größer, wenn die Wellenlänge abnimmt; denn bei der Zerlegung des Lichtes wird Violett stärker abgelenkt als Rot. Die folgende Tabelle enthält die Wellenlängen für die Hauptfarben.

Wellenlängen des Lichtes (Mittelwerte)

Hauptfarbe	Rot	Orange	Gelb	Grün	Blau	Violett
Wellenlänge in nm	750...640	640...620	620...580	580...495	495...440	440...400

Die Entstehung des Spektrums ist darauf zurückzuführen, daß das *Brechungsverhältnis für jede Spektralfarbe einen bestimmten Wert hat.* Es nimmt von Rot über Grün nach Violett zu. Ein solches Spektrum ist daher eine lückenlose Folge von verschiedenfarbigen Spaltbildern. Da keine Lücken auftreten, müssen in dem beobachteten Spektrum sämtliche Wellenlängen des sichtbaren Lichtes vorhanden sein.

Solche Spektren bezeichnet man als *kontinuierliche Spektren*. Da man den Vorgang der Farbzerlegung durch die Brechung *Dispersion* nennt, spricht man auch von *Dispersionsspektren*.

Im kontinuierlichen Spektrum sind alle Spektralfarben in lückenloser Reihenfolge enthalten.

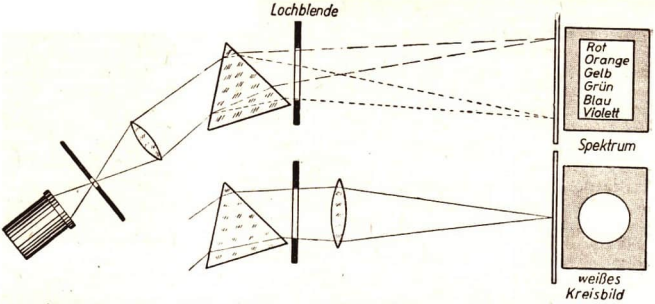


Abb. 185/1. Versuch zur Wiedervereinigung der Spektralfarben zu Weiß

3. Wiedervereinigung der Spektralfarben. Die Zerlegung des weißen Lichtes in die Spektralfarben durch Brechung läßt sich umkehren. Der folgende Versuch zeigt, daß man die Spektralfarben wieder zu weißem Licht vereinigen kann (Abb. 185/1). Dieser Vorgang ist eines von vielen Beispielen für die *Umkehrbarkeit physikalischer Vorgänge.*

Hinter das Prisma wird in den Strahlengang eine zylindrische Linse gebracht. Sie vereinigt alle vom Prisma ausgehenden Strahlen an einer Stelle. In unser Auge gelangen daher Strahlen verschiedener Wellenlänge. Sie ergeben in ihrer Gesamtheit im Auge den Farbeindruck „Weiß".

Auch bei einem weißglühenden festen Körper senden die einzelnen Atome eine sehr große Anzahl von Wellenzügen verschiedener Wellenlänge aus. Erst die Vereinigung im Auge ergibt den Eindruck „Weiß".

Weißes Licht besteht aus Strahlen verschiedener Wellenlänge des sichtbaren Bereiches.

4. Misch- und Ergänzungsfarben. Man hält zwischen Prisma und Zylinderlinse einen schmalen Kartonstreifen und führt ihn langsam durch das Spektrum. Dadurch wird jeweils ein bestimmter Farbton ausgeblendet, der bei der Vereinigung des Spektrums fehlt. Das Spaltbild ist in diesem Falle nicht weiß, sondern hat eine je nach der abgedeckten Spektralfarbe wechselnde Mischfarbe. Unter den Mischfarben tritt Purpur auf. Dieser Farbton ist in den Spektralfarben nicht enthalten. Nimmt man den Kartonstreifen weg, dann tritt zu der Mischfarbe des Restes die ausgeblendete Spektralfarbe. Man erhält wieder weißes Licht.

Man nennt solche Farbpaare, die sich zu Weiß ergänzen, *Komplementärfarben* oder Ergänzungsfarben (vgl. die nebenstehende Tabelle).

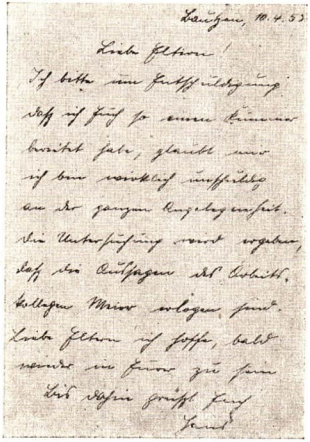
Komplementärfarben

Ausgeblendete Spektralfarbe	Mischfarbe
Rot	Blaugrün
Orange	Eisblau
Gelb	Ultramarinblau
Grüngelb	Violett
Grün	Purpur
Blaugrün	Rot
Eisblau	Orange
Ultramarinblau	Gelb
Violett	Grüngelb

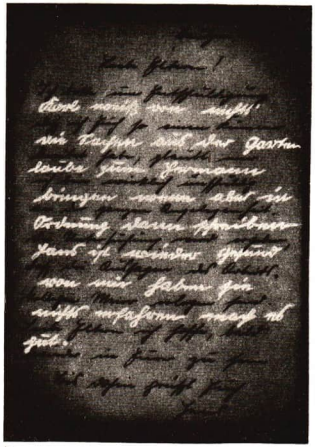
5. Das ultraviolette Spektrum. Erzeugt man auf einer fotografischen Platte das Spektrum des Lichtes einer Bogenlampe, so stellt man nach dem Entwickeln fest, daß die Platte weit über das sichtbare violette Ende hinaus geschwärzt wurde. Sie muß also an dieser Stelle von Strahlen getroffen worden sein, die eine ähnliche Wirkung wie das sichtbare Licht haben. Man bezeichnet diese unsichtbaren Strahlen als *ultraviolette Strahlen*, abgekürzt *UV-Strahlen*. Ihre Wellenlänge ist kleiner als die der violetten sichtbaren Strahlen.

Die UV-Strahlen haben neben der chemischen Wirkung auf die fotografische Platte die Eigenschaft, bestimmte Stoffe zur Fluoreszenz zu bringen. Auf diese Weise kann man zum Beispiel in der Kriminalistik Fälschungen aufdecken. Auf Schriftstücken vorgenommene Änderungen heben sich bei ultravioletter Bestrahlung durch ihre andersartige Fluoreszenz ab (Abb. **186**/1). Auch Lebensmittelfälschungen lassen sich auf diese Weise feststellen (Abb. **187**/1).

Gewöhnliches Glas und viele andere Stoffe absorbieren die UV-Strahlen verschieden stark. Quarz und Spezialglas, sogenanntes *Uviolglas*, dagegen lassen sie in einem bestimmten Wellenbereich gut hindurchgehen. Die Scheiben von Gewächshäusern und Speziallampen bestehen aus Uviolglas. Die sogenannten *Höhensonnen* enthalten Quarzfenster. Höhensonnen dienen zur Bestrahlung des menschlichen Körpers mit ultraviolettem Licht. Die belebende und heilende Wirkung der UV-Strahlung beruht vor allem auf einer besseren Durchblutung der Haut. Kleinkinder werden im Winter mit einer Höhensonne bestrahlt, da dadurch für den Körper lebenswichtige Vitamine

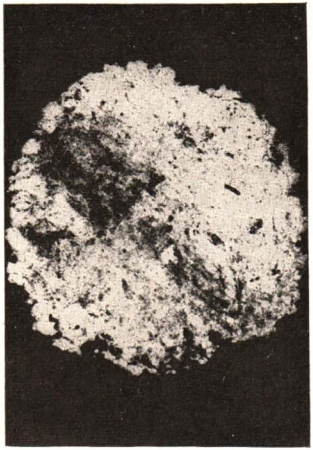


a



b

Abb. **186**/1. Mit Geheimtinte beschriebenes Schriftstück im normalen (a) und im UV-Licht (b)



a b

Abb. 187/1. Mit Gips gefälschtes Mehl, a) im normalen, b) im UV-Licht

gebildet werden. Im Sommer ist das nicht so notwendig, da im Sonnenlicht ein starker UV-Anteil enthalten ist.

Durch überstarke UV-Bestrahlung kann eine erhebliche Schädigung des Körpers eintreten. Der Sonnenbrand ist in seiner ausgeprägten Form eine schwere Hautschädigung. Im Gebirge und in der staubfreien Seeluft sind die UV-Strahlen besonders wirksam. Man muß sich daher dort besonders vor der intensiven Strahlung schützen.

6. Das ultrarote Spektrum. Untersucht man mit einem Thermoelement die Wärmeverteilung im Spektrum, so erreicht der Thermostrom jenseits des roten Endes des sichtbaren Spektrums seinen höchsten Stand und sinkt dann allmählich wieder. Es gehen demnach von einer Lichtquelle unsichtbare Strahlen aus, deren Wellenlänge größer als die der sichtbaren roten Strahlen ist. Man nennt sie *ultrarote*, auch *infrarote Strahlen*. Diese Strahlen haben eine große Wärmewirkung.

Die ultraroten Bestandteile des Sonnenlichtes durchdringen Dunst und Nebel besser als die sichtbaren Strahlen. Man kann daher mit fotografischen Filmen, die für Ultrarot besonders empfindlich sind, auch Fernaufnahmen trotz Dunstes vornehmen. Da alle Körper Wärmestrahlen aussenden, die mit den Ultrarot-Strahlen identisch sind, kann man auch bei völliger Dunkelheit fotografieren.

Für verschiedene Zwecke werden Speziallampen, die als *Infrarotstrahler* in den Handel kommen, gebaut. Sie werden hauptsächlich in der Industrie verwendet. Trockenprozesse können durch Infrarotstrahler außerordentlich beschleunigt werden.

7. Kontinuierliche Spektren. Läßt man das Licht einer Bogenlampe, einer Glühlampe, einer Kerze oder eines anderen glühenden festen Körpers durch ein Prisma fallen, so erhält man ein kontinuierliches Spektrum. Bei einer Stearinkerze senden die glühenden Rußteilchen Licht aus, bei der Bogenlampe der sehr heiße Krater der positiven Kohle. Kontinuierliche Spektren sind auch bei glühenden flüssigen Körpern zu beobachten, beispielsweise bei flüssigem Eisen.

Die Spektren glühender fester Körper und glühender Flüssigkeiten sind kontinuierlich.

Die Spektren sind um so lichtstärker, je höher die Temperatur des leuchtenden Körpers ist. Bei niedrigen Temperaturen, bei etwa 1000 °C bis 1500 °C, ist zuerst der rote Teil des Spektrums besonders ausgeprägt. Bei höheren Temperaturen treten auch die anderen Teile des Spektrums bis zum Violetten immer mehr hervor.

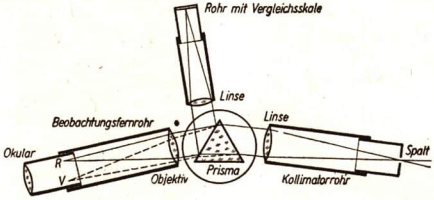


Abb. 188/1
Strahlengang im Spektralapparat

Zur Untersuchung der spektralen Zusammensetzung des Lichtes benutzt man *Spektralapparate* (Abbildung 188/1). Die Lichtstrahlen fallen durch das *Spaltrohr* auf das Prisma und werden spektral zerlegt. Mit einem kleinen *Fernrohr* wird das Spektrum beobachtet. Das dritte Rohr enthält eine *Vergleichsskale*, die auf eine Glasplatte gezeichnet ist. Wird sie beleuchtet, dann sieht der Beobachter gleichzeitig Skale und Spektrum. Dadurch ist es möglich, die im Spektrum auftretenden Wellenlängen zu bestimmen.

8. Nichtkontinuierliche Spektren. Ganz andere Spektren erhält man von glühenden Gasen. Verdampft man Salze der Alkalimetalle in einer nichtleuchtenden Bunsenbrennerflamme, dann färbt sich die Flamme. Betrachtet man die durch Natrium gelb gefärbte Flamme mit einem Spektralapparat, so sieht man an Stelle eines kontinuierlichen Spektrums nur *eine gelbe Linie*. Es wird nur Licht einer bestimmten Wellenlänge ausgestrahlt. Das Auftreten dieser gelben Linie ist kennzeichnend für das Natrium. Bereits die kleine Menge von $3 \cdot 10^{-7}$ mg Natrium ruft die Linie hervor. Verdampft man andere Salze oder Metalle in der Flamme, dann treten auch in diesen Fällen ganz charakteristische Linien auf. Man nennt diese Spektren *Linienspektren* (vgl. Abb. 190/1). Besonders viele Linien enthalten die Spektren von Eisen, Kupfer und Zink.

Auch mit verdünnten Gasen gefüllte Röhren (vgl. Abb. 10/2) strahlen beim Anlegen einer hohen Spannung nur Licht von bestimmten Wellenlängen ab. Jedes Gas hat ebenfalls auf Grund seiner Zusammensetzung ein charakteristisches Spektrum.

Jedes Element sendet im gas- oder dampfförmigen Zustand Licht ganz bestimmter Wellenlängen aus, wenn es zum Leuchten angeregt wird. Es entsteht ein Linienspektrum. Farbe und Lage der Linien sind für das Element kennzeichnend.

9. Absorptionsspektren. Das Sonnenspektrum scheint bei flüchtiger Betrachtung kontinuierlich zu sein. Untersucht man es aber genau, so beobachtet man in diesem Spektrum eine große Anzahl dunkler Linien. Sie wurden von *Fraunhofer* 1814 entdeckt und später nach ihm benannt. Die besonders stark hervortretenden Linien werden mit Buchstaben bezeichnet. Seither hat man im Sonnenspektrum einige tausend *Fraunhoferscher Linien* festgestellt.

Im Jahre 1859 gelang es *Bunsen* und *Kirchhoff*, im Laboratorium ähnliche Spektren zu erzeugen. Verdampft man in der Flamme ein Stück Natrium, so beobachtet man im gelben Teil des kontinuierlichen Spektrums der Bogenlampe eine schwarze Linie. Sie befindet sich an der gleichen Stelle, an der im Linienspektrum die gelbe Linie auftritt. Daraus folgt: *Geht weißes Licht vor der Zerlegung durch ein leuchtendes Gas, so fehlen im Spektrum diejenigen Linien, die das Gas selbst aussendet.* Sie werden absorbiert. Solche Spektren heißen *Absorptionsspektren.*

Ein Element absorbiert im gasförmigen Zustand diejenigen Farben, die in seinem Linienspektrum enthalten sind.

Auch das Sonnenspektrum ist ein Absorptionsspektrum. Eine Erklärung für das Entstehen der Absorptionslinien der Sonne wurde durch *Bunsen* und *Kirchhoff* gegeben. Die Sonnenoberfläche strahlt ein kontinuierliches Spektrum aus. Dieses Licht durchdringt eine Gashülle, die Chromosphäre der Sonne. Die dort leuchtenden Gase absorbieren die Linien, die sie selbst aussenden. Aus der Lage der Absorptionslinien kann man erkennen, welche Stoffe in der Chromosphäre vorhanden sind. Bis jetzt sind von allen Elementen, die auf der Erde vorkommen, auf der Sonne 63 nachgewiesen worden.

10. Anwendungen in Forschung und Technik. Die spektroskopische Untersuchung von festen, flüssigen und gasförmigen Körpern nennt man *Spektralanalyse.* Sie hat heute als Teilgebiet der chemischen Analyse eine große Bedeutung erlangt. Abbildung **189**/1 zeigt den *UV-Spektrographen Q 24* aus dem VEB Carl Zeiss Jena. Die zu untersuchende Metallprobe wird in Form von kleinen Stiften in ein Stativ eingespannt. Im zeitlichen Abstand von $\frac{1}{100}$ s springen zwischen den Metallstiften Funken über, die aus zum Leuchten angeregtem Metalldampf bestehen. Das Licht der Funken wird durch ein Prisma zerlegt, und das Linienspektrum wird mit einem besonderen Kamerateil fotografiert. Man erhält ein sogenanntes *Spektrogramm.* (Abb. **190**/1). Linsen und Prismen bestehen aus Quarz, so daß auch der ultraviolette Teil des Spektrums erfaßt wird. Das Eisenspektrum enthält bei diesem Spektrogramm zum Beispiel 9200 Linien im sichtbaren und unsichtbaren Teil des Spektrums.

Abb. **189**/1 UV-Spektrograph Q 24 mit Funkenstativ

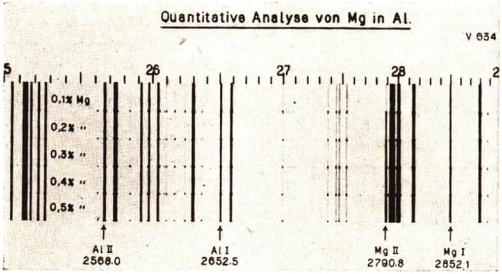


Abb. **190**/1
Spektrogramm

Das Spektrogramm wird nach dem Entwickeln etwa 20fach vergrößert projiziert und mit bekannten Spektren verglichen. *Aus der Lage der einzelnen Spektrallinien kann man auf das Vorhandensein bestimmter Elemente schließen.* Aus dem Grad der Schwärzung der Fotoplatten erkennt man den prozentualen Anteil. Neuerdings wurden Geräte entwickelt, mit denen eine unmittelbare Analyse möglich ist. Fotozellen oder Thermoelemente registrieren Lage und Intensität der einzelnen Linien. In der kurzen Zeit von 30 s können 1000 Linien aufgenommen werden. Die Genauigkeit der Spektralanalyse ist sehr groß, da auch sogenannte Spurenelemente einwandfrei nachgewiesen werden können. Für die Spektralanalyse genügen meist winzige Mengen des zu untersuchenden Stoffes.

Ein anderes Anwendungsgebiet ist die spektroskopische Untersuchung des Sonnen- und Sternlichtes. Im Einsteinturm des astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam wird durch zwei bewegliche Spiegel das Sonnenlicht in ein Fernrohr geworfen, das fest im Turminnern steht (Abb. **190**/2). Die Spiegel werden mit der scheinbaren Sonnenbewegung mitgeführt. Durch einen Umlenkspiegel wird im erschütterungsfreien Keller das 13 cm große Sonnenbild auf einen Spalt geworfen, der zu einem Spektralapparat gehört. Das Spektrum wird fotografisch registriert. Die Wissenschaftler ziehen daraus Rückschlüsse auf die Temperatur-, Druck- und elektromagnetischen Verhältnisse auf der Sonne.

Bbb. **190**/2. Einsteinturm des astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam

Durch diese Untersuchung der Spektren ist es gelungen, Einzelheiten über den Aufbau und die Vorgänge auf Sternen zu erforschen, während dies früher mit Hilfe der rein optischen Betrachtung mit Fernrohren nicht möglich war.

11. Fragen und Aufgaben:

1. Erläutern Sie die Begriffe Hauptfarben, Spektralfarben, Grundfarben, Ergänzungsfarben und geben Sie die Zusammenhänge zwischen ihnen an!
2. Ist der Spalt zwischen Lichtquelle und Prisma nach Abbildung **183/1** sehr breit, so erhält man kein Spektrum. Es ergibt sich ein Spaltbild, dessen Ränder rötlich und blau gefärbt sind. Wie kommt das?
3. Warum tritt beim Durchdringen des Lichtes durch die Fensterscheibe keine Farbzerlegung ein?
4. Wie verhält sich weißes Licht beim Durchgang durch ein Prisma?
5. Welche Anwendungen der Infrarotrsrahler sind Ihnen bekannt?
6. Warum darf man beim Lichtbogenschweißen nicht direkt beobachten? Welche Schutzmaßnahmen sind für die Schweißer erforderlich?
7. Erklären Sie nach Abbildung **188/1**, warum der Beobachter auch die Vergleichsskale sehen kann!
8. Welche Bedeutung hat die Spektralanalyse? Nennen Sie Anwendungen!
9. Unter welchen Bedingungen entstehen kontinuierliche Spektren, Linienspektren, Absorptionsspektren?

43. Die Farben

1. Körperfarben. Entwirft man ein kontinuierliches Spektrum auf weißem, rotem, blauem und schwarzem Papier, so kann man die folgenden Unterschiede beobachten:

Weißes Papier: Es werden alle Farben reflektiert.

Rotes Papier: Rot wird vollkommen reflektiert, Orange und Gelb nur schwach. Der grüne, blaue und violette Teil wird absorbiert. Diese Stellen erscheinen schwarz.

Blaues Papier: Blau wird vollkommen, Grün nur schwach reflektiert. Die restlichen Farben werden absorbiert; die entsprechenden Stellen erscheinen schwarz.

Schwarzes Papier: Alle Farben werden absorbiert.

Fällt weißes Licht auf gelbes Papier, so wird nur der gelbe Anteil reflektiert. Alle anderen Wellenlängen werden absorbiert. Die Farbe eines Körpers ergibt sich demnach aus der Reflexion beziehungsweise Absorption von Teilen des einfallenden weißen Lichtes. Beleuchtet man ein mit roter Stoffarbe gefärbtes Tuch mit blauem Licht, so erscheint es schwarz. Der im Gewebe befindliche rote Farbstoff absorbiert alle Farben außer Rot. Da diese aber im blauen Licht nicht enthalten ist, gelangt überhaupt kein Licht in unser Auge.

Aus diesen Untersuchungen geht hervor, daß die verschiedenen Stoffe in ganz verschiedener Weise das auftreffende Licht reflektieren.

Körperfarben entstehen dadurch, daß die Gegenstände bestimmte Teile des auftreffenden weißen Lichtes absorbieren, während der Rest reflektiert wird.

2. Additive und subtraktive Farbmischung. Für die Herstellung von Malerfarben und farbigen Drucken muß man wissen, wie bestimmte Farbmischungen entstehen. Einen bestimmten Farbton kann man durch zwei Verfahren erhalten.

1. Bei der *additiven Farbmischung* fällt verschiedenfarbiges Licht gleichzeitig auf dieselbe Stelle eines Bildschirmes oder in das Auge. Das verschiedenfarbige Licht mischt sich. Die einzelnen Anteile werden vom Auge addiert und als ein bestimmter Farbeindruck registriert.

2. Bei der *subtraktiven Farbmischung* fällt weißes Licht durch gefärbte Glasplatten, durch sogenannte *Farbfilter*. Dadurch werden verschiedene Farben absorbiert, so daß sich der Farbeindruck als Mischung der verbleibenden hindurchgehenden Anteile ergibt. Auch wenn weißes Licht auf kleine Teilchen eines Farbstoffes trifft, beispielsweise auf Malerfarbe, und bestimmte Anteile des weißen Lichtes von den Farbstoffteilchen, den *Pigmenten*, absorbiert werden, tritt eine Restfarbe auf.

a) Beispiele für additive Farbmischung.

1. Drei Taschenlampen mit einem roten, einem grünen und einem ultramarinblauen Filter werden auf eine weiße Fläche gerichtet. Die Lichtflecke überdecken einander zum Teil. Es entstehen als *Mischfarben* Purpur, Blaugrün und Gelb. Die Überlagerung in der Mitte ergibt nahezu Weiß.

2. Ein *Farbkreisel* wird in schnelle Rotation versetzt (Abb. 192/1). Die gleiche Stelle der Netzhaut unseres Auges wird in sehr kurzen Zeitabständen von den verschiedenfarbigen Lichtstrahlen getroffen. Im Auge erfolgt eine additive Mischung.

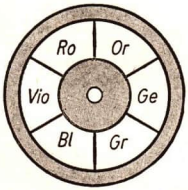


Abb. 192/1. Farbkreisel

b) Beispiele für subtraktive Farbmischung.

1. Drei *Farbfolien*, Gelb, Purpur und Blaugrün, liegen so in einem Diarähmchen, daß sie einander teilweise überlappen. Bei der Projektion entstehen durch Teilabsorption des weißen Lichtes die Mischfarben Rot, Grün und Ultramarinblau. Beim Durchgang des Lichtes durch alle drei Folien werden alle Farben absorbiert. Die Mitte erscheint nahezu schwarz.

2. Die gelben und blauen Pigmentfarben eines Wasserfarbkastens werden gemischt. Die blauen Farbstoffteilchen absorbieren Rot, Orange und Gelb, die gelben Farbstoffteilchen Rot, Blau und Violett. Da Grün von beiden Pigmenten gemeinsam reflektiert wird, ergeben die gemischten Farben Grün.

Außer den Anteilen des auffallenden Lichtes, die ihrer Farbe entsprechen, reflektieren oder absorbieren viele Körper auch einen gewissen Prozentsatz aller übrigen Farben. Dadurch entstehen die hellen oder dunklen Tönungen. Die Mischung von schwarzen, weißen und Orangepigmenten ergibt beispielsweise braun. Auf ähnliche Weise erhält man Oliv, Ocker und andere Tönungen.

3. Farbfotografie und Farbdruck. 1935 wurde in Deutschland das *Agfacolor-Verfahren* entwickelt, das auf der subtraktiven Farbmischung beruht. Durch unermüdliche Arbeit unserer Ingenieure und Chemiker im *VEB Filmfabrik Agfa Wolfen* ist es gelungen, die Empfindlichkeit und andere Qualitäten des Filmmaterials erheblich zu steigern. Besondere Verbreitung hat das *Agfacolor-Umkehrverfahren* gefunden.

Man erhält ein Diapositiv in den natürlichen Farben, das mit Hilfe eines Bildwerfers projiziert werden kann.

Der *Umkehrfilm* besteht aus einer schwer entflammbaren Unterlage aus Azetatzellulose und den drei *farbempfindlichen Schichten*. Sie sind für Blau, Grün und Rot empfindlich. Das Silberbromid der farbempfindlichen Schichten wird durch das einfallende Licht chemisch verändert. Gelbes Licht wirkt auf die rot- und grünempfindliche Schicht ein, Purpur auf die rot- und blauempfindliche Schicht. Weiß verändert alle Schichten, und fehlendes Licht (schwarz) hat natürlich auf keine Schicht einen Einfluß. Nach dem Belichten erfolgt eine normale Schwarz-Weiß-Entwicklung.

Das belichtete Bromsilber wird zu Silber reduziert. Danach setzt man den Film dem Licht aus. Das im Erstentwickler nicht zu Silber reduzierte Bromsilber wird dadurch völlig durchbelichtet. Nunmehr kommt der Film in einen Spezialentwickler. Das in der Zweitbelichtung belichtete Bromsilber wird zu Silber entwickelt. Zur gleichen Zeit entsteht an denselben Stellen in den einzelnen Schichten ein Farbstoff.

In der obersten Schicht bildet sich ein gelber Farbstoff, darunter ein Purpurfarbstoff und in der untersten Schicht ein blau-grüner Farbstoff. Diese Farbstoffe entstehen durch eine chemische Reaktion des Spezialentwicklers mit dem bereits im Film vorhandenen Farbstoffbildner. Nach der Zweitentwicklung wird das Silber in einem Bleich- und Fixierbad entfernt. Bei der Projektion erfolgt eine subtraktive Mischung, so daß die gleichen Farben wie bei der Aufnahme auftreten.

Die Farbfotografie hat vor allem für naturwissenschaftliche Zwecke eine große Bedeutung erlangt. Sie ermöglicht die farblich naturgetreue Wiedergabe von Mineralien, Pflanzen und Tieren.

Durch Farblichtbildervorträge können einem größeren Personenkreis Menschen und Landschaften anderer Länder nahegebracht werden. Auch die Kinofarbfilme sind nach dem gleichen Agfacolor-Verfahren hergestellt. Die Aufnahme erfolgt jedoch auf *Negativfilm*, bei dem die Farben komplementär vertauscht sind. Von diesem Negativ können dann beliebig viele Kopien angefertigt werden.

Ein anderes Anwendungsgebiet der Farbmischung ist der Druck farbiger Bilder. Um ein farbiges Bild zu erhalten, stellt man von der Vorlage drei *Farbauszüge* in Rot, Gelb und Blau her. Außerdem wird noch ein Schwarz-Weiß-Auszug angefertigt. Unter Verwendung gesonderter Druckplatten werden dann das gelbe, rote, blaue und schwarze Teilbild übereinandergedruckt. Jedes Teilbild besteht aus sehr vielen kleinen farbigen Pünktchen, die vom Auge nicht mehr getrennt wahrgenommen werden. Beim Übereinanderdruck liegen die verschiedenfarbigen Pünktchen nebeneinander beziehungsweise teilweise oder vollkommen übereinander. Es erfolgt zum Teil eine subtraktive Mischung der Druckfarben. Da die Pünktchen sehr eng beisammenliegen, können sie nicht mehr einzeln beobachtet werden. Der Farbeindruck im Auge beruht daher auf einer additiven Mischung.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Welcher Unterschied besteht zwischen Spektralfarben und Körperfarben?
2. Weshalb gibt die Mischung ultramarinblauer und gelber Wasserfarben Grün und nicht Weiß wie bei Spektralfarben?
3. Warum sehen die Körperfarben bei künstlichem Licht anders aus als bei Tageslicht?
4. Die menschliche Haut erscheint in schmutziggrauer, fahler Farbe, wenn sie von einer Bunsenflamme beleuchtet wird, in der ein Natriumsalz verdampft.
   Auch die meisten Farben anderer Körper erscheinen bei dieser Beleuchtung gänzlich geändert. Geben Sie die Ursache hierfür an!

44. Die Entwicklung der Lichttheorie

Die erste erfolgreiche Lichttheorie stellte der englische Gelehrte *Isaac Newton* im Jahre 1704 in seinem Buch „*Optics*" auf. Er versuchte, mit Hilfe dieser Theorie alle bis dahin bekannten optischen Erscheinungen zu erklären. Nach *Newtons* Auffassung besteht das Licht aus sehr kleinen Masseteilchen, *Korpuskeln* genannt, die mit großer Geschwindigkeit aus der Lichtquelle herausgeschleudert werden. Die Licht-Korpuskeln durchdringen nach *Newton* durchsichtige Körper fast ungehindert. Die verschiedenen Farben des Spektrums erklärte er mit der Annahme, daß die Korpuskeln verschieden groß sind. Rotes Licht besteht nach *Newton* aus größeren Korpuskeln, violettes Licht aus kleineren. Diese Auffassung des Lichtes als ein Strom kleiner Teilchen heißt *Korpuskulartheorie.*

Die geradlinige Ausbreitung des Lichtes, die Reflexion und die Brechung des Lichtes lassen sich nach der Korpuskulartheorie erklären. Die Reflexion der Lichtkorpuskeln erfolgt ähnlich wie beim elastischen Stoß von Billardkugeln gegen eine feste Wand. Die Lichtbrechung erklärte *Newton* durch die Annahme, daß das optisch dichtere Medium auf die Lichtkorpuskeln eine größere Anziehungskraft ausübt (Abb. **194**/1). Dann müßte aber im optisch dichteren Medium die Lichtgeschwindigkeit größer als im optisch dünneren Medium sein. Eine einwandfreie Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit im Glas oder in anderen Stoffen war damals noch nicht vorgenommen worden, so daß eine Entscheidung über die Richtigkeit dieser Auffassung nicht möglich war.

Bereits 1678 hatte der holländische Wissenschaftler *Christian Huygens* eine andere Lichttheorie aufgestellt, die sich aber zunächst nicht durchsetzte. Nach seiner Ansicht ist das Licht ein *Wellenvorgang;* die Wellen breiten sich in einem besonderen Medium aus. Dieser sogenannte *Lichtäther* sollte nach *Huygens* so fein und unwägbar sein, daß er alle Körper durchdringt und auch den gesamten Weltenraum erfüllt. Das Vorhandensein des Lichtäthers konnte *Huygens* allerdings nicht nachweisen.

Reflexion und Brechung des Lichtes ließen sich mit Hilfe dieser *Wellentheorie* in einfacher Weise erklären (vgl. S. 83). Im Gegensatz zur Korpuskulartheorie wurde jedoch die Lichtgeschwindigkeit im optisch dichteren Medium als geringer vorausgesetzt als im optisch dünneren. Erst 1862 wies *Foucault* durch Experimente nach, daß diese Annahme richtig war.

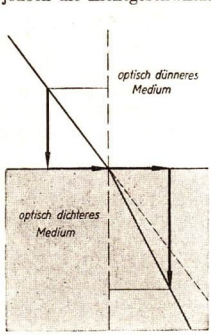


Abb. **194**/1. Erklärung der Brechung des Lichtes beim Übergang von einem optisch dünneren zu einem optisch dichteren Medium nach der Annahme Newtons

Bereits um 1800 hatte man eine Reihe von Beugungs- und Interferenzerscheinungen genauer untersucht, die sich ebenfalls mit der Auffassung des Lichtes als Teilchenstrom nicht in Einklang bringen ließen. Mit Hilfe dieser Erscheinungen hatte der englische Gelehrte *Young* 1801 die Wellenlänge des Lichts angenähert bestimmt. Besondere Bedeutung für die Bestätigung der Wellentheorie erlangte der Interferenzversuch des französischen Physikers *Fresnel.* Er überlagerte 1822 kohärentes Licht, das durch zwei Spiegel auf die gleiche Stelle

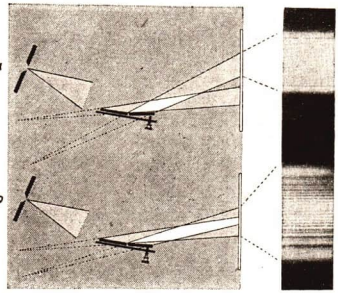


Abb. 195/1. Fresnelscher Spiegelversuch a) Die beiden Lichtflecke überdecken sich nicht. Es treten nur Beugungsstreifen auf. b) Die beiden Lichtflecke überdecken sich. Im Überdeckungsgebiet sind Interferenzstreifen zu erkennen

eines Schirms reflektiert wurde. Dabei traten *Interferenzstreifen* auf, die ohne Beugung zustande kamen (Abb. 195/1). Auch die Entdeckung der Polarisation des Lichtes durch *Malus* im Jahre 1809 ließ sich nur unter der Annahme erklären, *daß das Licht aus Transversalwellen besteht.*

Die Huygenssche Wellentheorie zeigte sich demnach der Korpuskulartheorie Newtons einwandfrei überlegen. Unklarheit bestand aber immer noch über den Träger der Wellen, den Lichtäther. Auch spätere Versuche, ihn nachzuweisen, blieben erfolglos.

Der große englische Physiker *James Clerk Maxwell* entwickelte in der Mitte des 19. Jahrhunderts eine Theorie über elektrische und magnetische Felder, die unter anderem auch die elektromagnetischen Wellen voraussagte (vgl. S. 108). Diese wurden erst 20 Jahre später durch *Heinrich Hertz* nachgewiesen. *Nach Maxwell besteht das Licht aus elektromagnetischen Wellen*, gleich den durch elektrische Schwingungen erzeugten Wellen. Elektromagnetische Wellen sind nicht an einen stofflichen Äther gebunden (vgl. S. 114). Die Richtigkeit dieser Ansicht wurde durch viele Versuche bestätigt.

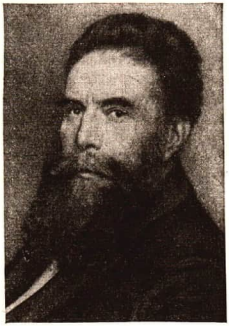
Das Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen. Von der Lichtquelle breiten sich elektrische und magnetische Felder mit Lichtgeschwindigkeit im Vakuum aus.

Verschiedene optische Erscheinungen, beispielsweise der *lichtelektrische Effekt*, die erst nach Aufstellung dieser Theorie entdeckt wurden, widersprechen jedoch dieser Auffassung. Eine naturwissenschaftliche Theorie darf aber keine Widersprüche mit der Wirklichkeit enthalten. Eine Theorie hat daher nur so lange Gültigkeit, bis neuere Forschungsergebnisse eine Änderung verlangen. Man muß die Theorie entweder ganz verwerfen oder ihren Gültigkeitsbereich einschränken. Das Licht zeigt nach unseren heutigen Ansichten eine *Doppelnatur*. Manche Erscheinungen lassen sich mit der Maxwellschen Theorie erklären, andere mit einer neuen Theorie, der Quantentheorie. Solche Widersprüche kommen in der Natur häufig vor. Sie sind eine Eigenschaft der objektiven Realität.

Die Erscheinungsformen der Materie, zu der auch das Licht zählt, sind außerordentlich mannigfaltig. Alle Vorgänge in der Natur verlaufen gesetzmäßig. Wir kennen einen großen Teil dieser Naturgesetze. Die ständige Weiterentwicklung der Wissenschaften bringt immer neue Erkenntnisse. Sie bestätigen die Richtigkeit der dialektisch-materialistischen Weltanschauung. Eine Grenze für die Erweiterung unserer Kenntnisse über die Natur ist nicht abzusehen. Der menschliche Forschungsgeist strebt immer neuen Erkenntnissen zu und deckt neue Zusammenhänge auf. Damit wird immer wieder bewiesen, daß die Welt erkennbar ist.

45. Die Eigenschaften der Röntgenwellen

1. Die Entdeckung der Röntgenstrahlen. Um das Jahr 1890 befaßten sich verschiedene Physiker mit Leitungsvorgängen in verdünnten Gasen, unter ihnen der Würzburger Universitätsprofessor *Wilhelm Conrad Röntgen*. Bei der Untersuchung der kurz vorher entdeckten Katodenstrahlen machte er 1896 eine Beobachtung, die zur Entdeckung einer neuen Strahlenart führte.



Wilhelm Conrad Röntgen (1845 bis 1923)

Röntgen hatte eine Hittorfsche Röhre mit schwarzem lichtdichten Papier umhüllt. Im verdunkelten Zimmer bemerkte er, daß einige auf dem Tisch liegende Kristalle aufleuchteten; sie *fluoreszierten*. Die Fluoreszenz konnte nicht von Katodenstrahlen herrühren, da diese die Glaswand nicht durchdringen. Von der Röhre ging anscheinend eine neuartige Strahlung aus, die ebenfalls Kristalle zum Fluoreszieren bringt. Er nannte sie X-Strahlen. In unermüdlicher Tag- und Nachtarbeit untersuchte Röntgen diese neuen Strahlen und ihre Eigenschaften und veröffentlichte bereits 8 Wochen später eine knappe, aber inhaltlich sehr umfassende Denkschrift unter dem Titel: „*Über eine neue Art von Strahlen*". *Röntgen* schrieb unter anderem: „Läßt man durch eine Hittorfsche Röhre ... die Entladung eines Funkeninduktors gehen und bedeckt die Röhre mit einem ... eng anliegenden Mantel aus dünnem, schwarzem Karton, so sieht man in dem vollständig verdunkelten Zimmer einen ... mit Bariumplatinzyanür angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten. ... Die Fluoreszenz ist noch in 2 m Entfernung bemerkbar ... Das an dieser Erscheinung zunächst auffallende ist, daß durch die schwarze Kartonhülse, welche keine sichtbaren oder ultravioletten Strahlen ... durchläßt, ein Agens (ein wirkendes Mittel) hindurchgeht, das imstande ist, lebhafte Fluoreszenz zu erzeugen. Man findet, daß alle Körper für dasselbe durchlässig sind. Papier ist sehr durchlässig: Hinter einem Buch von etwa 1000 Seiten sah ich den Fluoreszenzschirm noch deutlich leuchten ... Dicke Holzblöcke sind noch durchlässig: 2 bis 3 cm dicke Bretter aus Tannenholz absorbieren nur sehr wenig. Eine etwa 15 mm dicke Aluminiumschicht schwächte die Wirkung recht beträchtlich ... Hält man die Hand zwischen den Entladungsapparat und den Schirm, so sieht man die dunklen Schatten der Handknochen in dem nur wenig dunklen Schattenbild der Hand."

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 im Jahre 1901 mit dem ersten Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Röntgens großes Verdienst besteht darin, daß er eine zufällige Beobachtung in ihrer Be-

deutung richtig erkannte und durch zielstrebige Versuche die Eigenschaften der neuen Strahlen feststellte.

Nur einem scharfsinnigen Forscher mit großen Erfahrungen und einer sehr gründlichen Arbeitsmethode sind solche Entdeckungen möglich. Diese Eigenschaften besaß *Röntgen*, der zu den bedeutendsten Physikern des 19. Jahrhunderts gehört, in hohem Maße. *Röntgen* hat es auch abgelehnt, durch Patente seine Erfindung geschäftlich auszunutzen. Er stellte sie dem Allgemeinwohl zur Verfügung.

2. Die Entstehung der Röntgenstrahlen. Die ersten Röntgenröhren waren einer Braunschen Röhre mit kalter Katode ähnlich. Durch den Aufprall von Gasionen werden an der Katode Elektronen abgelöst. Es entstehen *Katodenstrahlen*. In modernen Röntgenröhren werden die Elektronen von *Glühkatoden* ausgestrahlt (Abb. **197**/1). Ein glühender Wolframdraht emittiert je nach der Höhe der Temperatur mehr oder minder viele Elektronen (vgl. S. 19). Diese Elektronen werden durch die angelegte Hochspannung, bis 300 kV, zur Anode beschleunigt. Durch eine hohlspiegelartige Krümmung der Katode erreicht man, daß sich *die Elektronen auf der Anode im sogenannten Brennfleck vereinigen. Beim Aufprall der Elektronen entstehen die Röntgenstrahlen.*

Die beschleunigten Elektronen sind, wie ein elektrischer Strom in einem Leiter, von einem Magnetfeld umgeben. Werden die Elektronen beim Aufprall plötzlich abgebremst, so verschwindet auch das Magnetfeld. Man sagt, das Magnetfeld bricht zusammen. Infolge der plötzlichen Änderung des Magnetfeldes entstehen elektromagnetische Wellen von sehr hohen Frequenzen, etwa von 10^{16} Hz bis 10^{20} Hz. Die Frequenzen sind um so höher, je größer die angelegte Röhrenspannung ist. Die auf diese Art erzeugte Röntgenstrahlung wird *Bremsstrahlung* genannt.

Beim Eindringen der Elektronen in die Atome der Anode kommt es unter Umständen zu einer zweiten Art von Röntgenstrahlung. Sie ist eine Folge der Wechselwirkung der eindringenden Elektronen mit den Hüllenelektronen der Atome. In dieser *charakteristischen Strahlung* sind, ähnlich wie bei einem Linienspektrum, nur einzelne Wellenlängen vorhanden, die allein vom Material der Anode abhängig sind. Die Bremsstrahlung enthält dagegen lückenlos alle Wellenlängen eines bestimmten Bereiches. Beide Strahlungen überlagern einander.

Die kinetische Energie der Elektronen wird zum größten Teil beim Aufprall auf die Anode in Wärme umgewandelt.

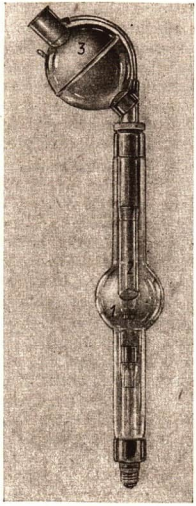


Abb. **197**/1
Glühkatoden-Röntgenröhre W 100, hergestellt im VEB Phönix-Röntgenröhrenwerk Rudolstadt. Die Röhre dient zur Röntgendiagnostik (vgl. S. 199).

1 Glühkatode, *2* Anode, *3* Kühlwasserzu- und abfluß

Die Untersuchungen der Röntgenstrahlen ergaben, daß sie wie die Lichtwellen und die Hertzschen Wellen *elektromagnetische Wellen* sind. Röntgenstrahlen haben jedoch bedeutend kleinere Wellenlängen als das Licht. Sie betragen etwa 10^{-9} mm bis 10^{-5} mm. Infolge dieser kleinen Wellenlängen sind die Röntgenstrahlen für unser Auge nicht sichtbar, und die Röntgenwellen haben zum Teil ganz andere Eigenschaften als die Lichtwellen.

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen hoher Frequenz. Sie entstehen beim Auftreffen beziehungsweise Eindringen schnell bewegter Elektronen in die Anode einer Röntgenröhre. Moderne Röntgenröhren sind Glühkatodenröhren.

3. Die Eigenschaften und Wirkungen der Röntgenstrahlen. a) Durchdringungsfähigkeit. Wie schon *Röntgen* feststellte, durchdringen Röntgenstrahlen mehr oder minder starke Schichten aller Körper. Die *Durchdringungsfähigkeit* der Röntgenstrahlen, auch *Strahlenhärte* genannt, ist von der Wellenlänge der Strahlen abhängig. Je höher die Anodenspannung, um so kürzer ist die Wellenlänge und um so durchdringender ist die Röntgenstrahlung (vgl. die nebenstehende Tabelle).

Härte der Röntgenstrahlen in Abhängigkeit von der Spannung

Bezeichnung	Erzeugungsspannung (kV)
Überweiche Röntgenstrahlen	5 ... 20
Weiche Röntgenstrahlen	20 ... 60
Mittelharte Röntgenstrahlen ...	60 ... 120
Harte Röntgenstrahlen	120 ... 250
Überharte Röntgenstrahlen ...	über 250

Die verschiedenen Stoffe zeigen eine unterschiedliche *Durchlässigkeit* für Röntgenstrahlen. Diese durchdringen die Knochen weniger stark als die anderen Teile des menschlichen Körpers. Metalle werden weniger durchdrungen als Holz oder andere organischen Stoffe. Besonders schwer durchdringlich ist Blei. Mit zunehmender Dicke eines Körpers nimmt auch die Absorption der Röntgenstrahlen zu.

b) Physikalische und chemische Wirkungen der Röntgenstrahlen. Die Röntgenstrahlen rufen wie die UV-Strahlen bei bestimmten Stoffen Fluoreszenz hervor. Zum Nachweis dieser Wirkung benutzt man Leuchtschirme. Auf die Luft wirken Röntgenstrahlen ionisierend, so daß die Luft dadurch leitend wird.

Röntgenstrahlen haben ebenso wie Lichtstrahlen die Eigenschaft, fotografische Schichten zu schwärzen. Sie wirken dabei durch das Papier oder durch Aluminium-Kassetten hindurch, in welche die Planfilme zum Schutz vor Lichtstrahlen eingelegt sind.

c) Biologische Wirkungen der Röntgenstrahlen. Von großer Bedeutung ist die Eigenschaft der Röntgenstrahlen, *lebendes Gewebe zu zerstören*. Hierauf beruhen viele Anwendungen der Röntgenstrahlen in der Medizin. Bei einer geringen Bestrahlungsmenge, man sagt auch *Dosis*, treten keine Zellschädigungen auf. Mit größeren Mengen bestrahlt man in der Medizin bösartige Geschwülste. Bei Überschreitung der zulässigen Dosis treten verbrennungsartige Hautschädigungen, unter Umständen krebsartige Röntgenschäden, auf. Da die zellschädigenden Wirkungen anfangs nicht genügend bekannt waren, kosteten derartige Verbrennungen einer Reihe von Röntgenforschern die Gesundheit und oft das Leben.

Beim Arbeiten mit Röntgenstrahlen muß man daher die Strahlenschutzvorschriften genauestens beachten. Vor allem Keimzellen sind gegen Röntgenstrahlen sehr

empfindlich. Ärzte und Röntgenassistentinnen, die der Röntgenstrahlung öfters ausgesetzt sind, schützen sich daher durch Bleischürzen (vgl. Abb. **199**/1). Bei den kurzzeitigen Durchleuchtungen oder Röntgenaufnahmen besteht aber für den Patienten keine Gefahr.

46. Anwendung der Röntgenwellen

1. Anwendungen der Röntgenstrahlen in der Medizin. Mit Hilfe von Röntgenstrahlen kann der Arzt sowohl Krankheiten erkennen als auch heilen. Im ersten Fall spricht man von *Röntgendiagnostik*, im zweiten von *Röntgentherapie*. Die Industrie hat für die verschiedenen Zwecke der Medizin eine große Anzahl von Röntgenröhren und Röntgenapparaten entwickelt. In unserem Staatshaushalt werden bedeutende Mittel für das Gesundheitswesen zur Verfügung gestellt. Dadurch war es möglich, neben den großen Röntgenabteilungen der Universitätskliniken, Krankenhäuser und Heilstätten auch alle größeren Landambulatorien und Betriebspolikliniken mit Röntgenapparaten auszurüsten. Auch hinsichtlich der medizinischen Betreuung gleichen sich die Verhältnisse auf dem Lande denen in der Stadt immer mehr an.

a) Röntgendiagnostik. Mit Hilfe der Röntgendiagnostik werden krankhafte Veränderungen im Körper oder die Lage eingedrungener Fremdkörper festgestellt. Man unterscheidet im wesentlichen drei Verfahren: die *Durchleuchtung*, die *Schirmbildaufnahme* und die *Röntgenaufnahme*.

Bei der Durchleuchtung beobachtet der Arzt das Röntgenbild auf einem Leuchtschirm. Der Schirm ist zum Schutze des Arztes vor Röntgenstrahlen mit einer dicken Bleiglasscheibe abgedeckt. Der Patient tritt zwischen Röntgenröhre und Leuchtschirm (Abb. **199**/1). Infolge ihrer verschiedenen Dicke und Dichte heben sich innere Organe und Knochen, Fremdkörper, krankhafte Ablagerungen und anderes im Röntgenbild auf dem Leuchtschirm verschiedenartig ab. Hohlorgane, wie Magen und Darm, werden dunkler abgebildet, wenn sie mit einem Kontrastmittel gefüllt werden. Dazu

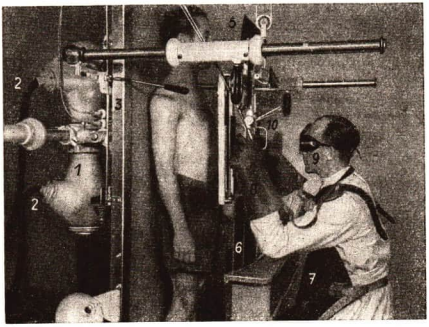


Abb. **199**/1
Anlage für Röntgendurchleuchtungen

1 Röntgenröhre
2 Zuleitungskabel
3 Stützplatte
4 Leuchtschirm
5 Hustenschutzschirm
6 Bleigummibahn
7 Bleigummischürze
8 Bleigummihandschuhe
9 Schutzbrille
10 Handgriff zum Bewegen des Leuchtschirmes

Der Raum muß abgedunkelt sein, da sonst die Fluoreszenz des Leuchtschirmes nicht sichtbar ist.

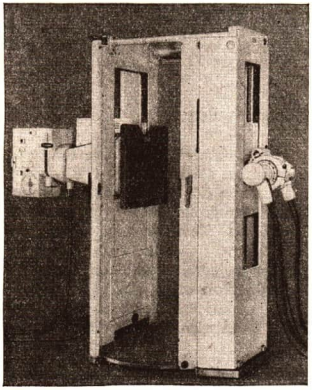


Abb. 200/1
Röntgenanlage für Schirmbildaufnahmen, hergestellt vom VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden.
Rechts außerhalb der Kabine die Röntgenröhre, links die Mittelformatkamera 63 mm × 63 mm

eignet sich eine Aufschlämmung von Bariumsulfat. Magen- und Darmverengungen, wie sie bei Krebs auftreten, kann man gut erkennen.

Große Bedeutung hat die Röntgendiagnostik für die *rechtzeitige Erkennung der Lungentuberkulose* erlangt. Bei einer tuberkulösen Erkrankung der Lunge bilden sich Hohlräume, die auf dem Röntgenleuchtschirm als helle Flecke hervortreten. Auch die abgeheilten Stellen sind auf dem Leuchtschirm als Schatten zu erkennen, da sich an ihnen Kalk absetzt.

Bei der Schirmbildaufnahme wird das große Leuchtschirmbild mit einer festangebauten Kamera fotografiert (Abb. 200/1). Die auf Feinkornfilm im Technikformat 31 mm × 31 mm oder neuerdings 63 mm × 63 mm aufgenommenen Negative werden zur Auswertung vergrößert projiziert oder durch eine Lupe betrachtet.

Die Schirmbildaufnahme spart Zeit und erfordert nur einen geringen Materialaufwand. Dieses Verfahren eignet sich deshalb hervorragend für die vorbeugenden *Reihenuntersuchungen* der gesamten Bevölkerung. Diese Reihenuntersuchungen werden in unserer Republik seit mehreren Jahren regelmäßig durchgeführt. Dadurch kann man den Gesundheitszustand unserer Bevölkerung hinsichtlich Lungenerkrankungen jährlich kontrollieren und gefährdete Personen rechtzeitig der ärztlichen Behandlung zuführen. Die Tuberkuloseerkrankungen sind daher bei uns in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Auch die Tuberkuloseschutzimpfungen haben hieran einen gewissen Anteil.

Bei der Röntgenaufnahme wird an die Stelle des Leuchtschirmes ein großer Planfilm gebracht, der sich in einem lichtsicheren Papierumschlag oder in einer dünnen Aluminiumkassette befindet. Die Röntgenaufnahme kann daher bei Tageslicht erfolgen. Knochenverletzungen, wie Brüche, erkennt man mit Hilfe der Röntgenstrahlen in allen Einzelheiten und kann sie

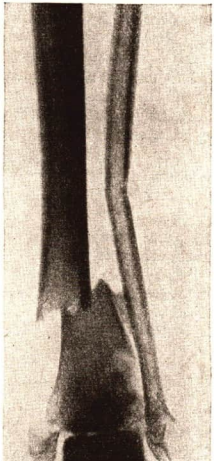


Abb. 200/2. Schirmbild eines Unterschenkelbruches

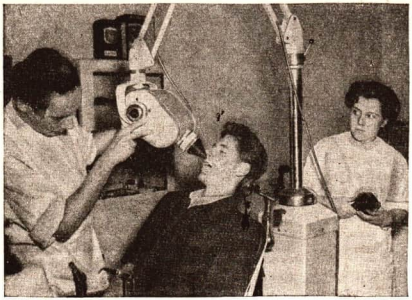


Abb. **201/1**
Röntgenapparatur
für Zahnaufnahmen.
Die Strahlen treten nur in der
Richtung des Plastkegels aus

im Heilprozeß verfolgen (Abb. **200**/2).

Der Zahnarzt fertigt *Röntgenaufnahmen der Zähne* und ihrer Wurzeln an. Ein nur wenige Quadratzentimeter großer in Papier eingewikkelter Film wird im Mund des Patienten innen an den zu durchleuchtenden Zahn gehalten. Die Röntgenröhre wird von außen her dicht an diese Stelle herangeführt (Abb. **201**/1).

b) Röntgentherapie. Röntgenstrahlen schädigen krankhaftes, besonders krebsartiges, Gewebe stärker als gesundes Gewebe. Durch Bestrahlung des krankhaften Gewebes ist daher häufig eine Heilung möglich. Voraussetzung ist aber meist, daß die Behandlung im Anfangsstadium der Krankheit vorgenommen wird.

Für Bestrahlungen der obersten Hautschichten werden besonders weiche Strahlen verwendet, die von der Haut vollständig absorbiert werden. Das darunterliegende gesunde Gewebe wird nicht geschädigt. Bei Bestrahlungen innerer Organe verwendet man sehr harte Röntgenstrahlen. Der Krankheitsherd wird von verschiedenen Seiten so bestrahlt, daß sich die Strahlenbündel erst am Krankheitsherd treffen. Man erreicht dadurch außer einer intensiven Bestrahlung und Vernichtung des krankhaften Gewebes eine möglichst große Schonung der Umgebung. Für spezielle Zwecke läßt sich bei der sogenannten *Nahbestrahlungs-Röntgenröhre* die Anode auch in Körperhöhlen einführen, so daß dadurch eine wirksamere Behandlung von Unterleibs- und Darmgeschwüren möglich ist (Abb. **201**/2).

In den letzten Jahren werden auch in der Deutschen Demokratischen Republik für strahlentherapeutische Zwecke immer mehr radioaktive Isotope verwendet.

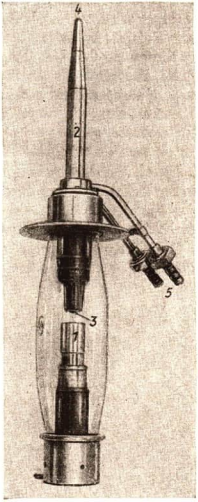


Abb. **201/2**
Nahbestrahlungs-Röntgenröhre S 60/5,
hergestellt im VEB Phönix-Röntgenröhrenwerk Rudolstadt.
1 Katode, *2* Hohlanode, *3* Eintrittsöffnung für die Elektronen, *4* Brennfleck, *5* Wasserkühlung

2. Anwendungen der Röntgenstrahlen in der Technik. — Grobstrukturuntersuchungen. Eine Voraussetzung für viele industrielle Produktionsprozesse sind die *Werkstoffprüfungen* und *-kontrollen*. Bei den mechanischen Prüfverfahren werden nur einzelne Probestücke der laufenden Fertigung geprüft und dabei meist so beansprucht, daß sie zerstört werden. Bei diesem Verfahren weiß man aber nicht, ob sich alle Werkstücke genau so verhalten. Bei Flugzeugteilen, Fahrzeugachsen und anderen hochbeanspruchten Bauteilen müssen unbedingt alle gefertigten Werkstücke fehlerfrei sein. Es können sonst schwere Unfälle auftreten.

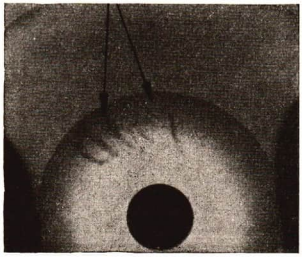


Abb. 202/1. Lunker in einem Werkstück

Man hat daher verschiedene Verfahren der *zerstörungsfreien Werkstoffprüfung* entwickelt. Neben dem Ultraschall (vgl. S. 91) und radioaktiven Isotopen lassen sich vor allem die Röntgenstrahlen zur Untersuchung von Werkstücken auf innere Fehlerstellen verwenden. Die Vorteile dieses Prüfverfahrens liegen hauptsächlich darin, daß *sämtliche Werkstücke zerstörungsfrei geprüft werden können*. Die Werkstoffprüfung mit Hilfe von Röntgenstrahlen beruht darauf, daß die Durchdringungsfähigkeit geringer wird, wenn die Schichtdicke des durchstrahlten Stoffes zunimmt. Zeigen sich zum Beispiel im Leuchtschirmbild durchstrahlter Gußstücke helle Flecken, dann sind an diesen Stellen Gaseinschlüsse oder unregelmäßig geformte hohle Stellen im Material, die man als *Lunker* bezeichnet (Abb. 202/1). Auch Schlacken und andere Abscheidungen sind gut zu erkennen.

Gußstücke, die einen langwierigen Bearbeitungsprozeß vor sich haben, werden vorteilhafterweise vorher einer solchen *Grobstrukturuntersuchung* unterzogen. Dadurch werden unnötige Kosten vermieden.

Durch Röntgenaufnahmen kann man das Prüfergebnis festhalten oder die Fehler besser erkennen. Auf dem Röntgenfilm, der ein fotografisches Negativ liefert, heben sich die Gaseinschlüsse dunkel von der Umgebung ab. Das Werkstück ist an diesen Stellen besonders der Bruchgefahr ausgesetzt.

Die Grobstrukturuntersuchung wendet man auch bei der *Prüfung von Schweißnähten* an. Man kann auf dem Röntgenbild erkennen, ob die beiden Metallteile einwandfrei verbunden sind oder ob noch spaltenartige Hohlräume zwischen ihnen geblieben sind (Abb. 202/2).

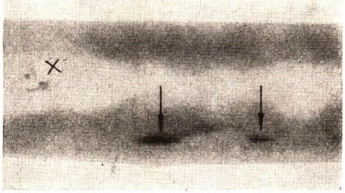


Abb. 202/2
Fehlerhafte Schweißnaht im Röntgenbild
× Lunker, ↓ schlechte Verbindung

Technische Röntgenanlagen für Grobstrukturuntersuchungen sind meist transportabel (Abb. **203**/1). Dadurch ist es möglich, auch Brückenkonstruktionen, Schweißnähte bei Hochseeschiffen, Druckgasleitungen und Großbehältern zu überprüfen.

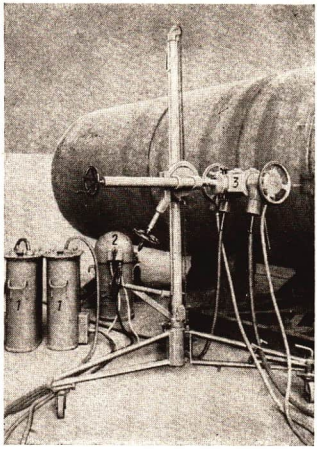


Abb. **203**/1. Röntgenanlage aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden für Grobstrukturuntersuchungen
1 Hochspannungserzeuger, *2* Ölkühlung, *3* Stativ mit Röntgenröhre

3. Fragen und Aufgaben:

1. Beschreiben Sie die Entstehung von Röntgenstrahlen in einer Glühkatodenröntgenröhre!
2. Wovon hängt die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen ab?
3. Warum ist es möglich, den Röntgenfilm während der Aufnahme in der lichtsicheren Papierumhüllung zu belassen? Ist dieses Verfahren auch bei der Schirmbildaufnahme möglich?
4. Bei Schirmbild-Röntgenanlagen werden vor der Aufnahme die Türen der Kabine geschlossen. Begründen Sie die Notwendigkeit dieser Maßnahme!
5. Auf welchen biologischen Wirkungen beruht die Röntgentherapie?
6. Welche Verletzungen und Erkrankungen lassen sich vorwiegend mit Hilfe der Röntgendiagnostik erkennen?
7. Warum verwendet man zur Tiefenbestrahlung Spannungen von 220 kV?
8. Welchem Zweck dient die Röntgen-Grobstrukturuntersuchung? Wo wird sie angewendet?
9. Vergleichen Sie die Abbildungen **202**/1 und **202**/2! Warum sind die fehlerhaften Stellen dunkel auf hellem Grund?

47. Das elektromagnetische Spektrum

Alle elektromagnetischen Wellen sind auf periodische Änderungen magnetischer und elektrischer Felder zurückzuführen. Die elektromagnetischen Wellen aller Frequenzen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus. Zwischen der Frequenz, der Wellenlänge und der Lichtgeschwindigkeit besteht die Beziehung:

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

Beim Übergang von einem Medium in ein anderes bleibt die Frequenz unverändert, während sich die Geschwindigkeit und die Wellenlänge ändern. Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die *Wellenbereiche der elektromagnetischen Wellen.*

Frequenzen und Wellenlängen der einzelnen Wellenbereiche

Wellenart		Frequenzen Hz	Wellenlängen
Technische Wechselströme		$16\frac{2}{3} \cdots 10^2$	18 000 km ··· 3000 km
Wechselströme der Leitungstelefonie		$10^2 \cdots 10^4$	3 000 km ··· 30 km
Hertzsche Wellen, insgesamt		$10^4 \cdots 10^{13}$	30 km ··· 0,03 mm
Rundfunk- und Fernsehwellen	Langwellen	$1{,}5 \cdot 10^5 \cdots 3 \cdot 10^5$	2000 m ··· 1000 m
	Mittelwellen	$0{,}5 \cdot 10^6 \cdots 2 \cdot 10^6$	600 m ··· 150 m
	Kurzwellen	$0{,}6 \cdot 10^7 \cdots 2 \cdot 10^7$	50 m ··· 15 m
	Ultrakurzwellen	$0{,}2 \cdot 10^8 \cdots 3 \cdot 10^8$	15 m ··· 1 m
	Mikrowellen	$3 \cdot 10^8 \cdots 10^{13}$	1 m ··· 0,03 mm
Ultrarotes Licht		$10^{12} \cdots 3{,}8 \cdot 10^{14}$	0,3 mm ··· 790 nm
Sichtbares Licht		$3{,}8 \cdot 10^{14} \cdots 7{,}7 \cdot 10^{14}$	790 nm ··· 390 nm
Ultraviolettes Licht		$7{,}7 \cdot 10^{14} \cdots 3 \cdot 10^{16}$	390 nm ··· 10 nm
Röntgenwellen		$3 \cdot 10^{16} \cdots 3 \cdot 10^{20}$	10 nm ··· 0,01 nm
Gammastrahlen		$10^{18} \cdots 10^{22}$	0,3 nm ··· 0,03 pm
Sekundäre Höhenstrahlen		$10^{22} \cdots 10^{24}$	0,03 pm ··· 0,0003 pm

Der bedeutende russische Physiker *Peter Nikolajewitsch Lebedew* führte um 1900 eine besondere Form der graphischen Darstellung für die elektromagnetischen Wellen ein, die man als *Wellenskale* bezeichnet (Abb. 205/1). Die einzelnen Bereiche werden dabei als Strecken dargestellt. Ihre Gesamtheit ergibt das sogenannte **elektromagnetische Spektrum.** Um die Länge der Wellenskale zu verkürzen und gleichzeitig einen besseren Überblick über die einzelnen Bereiche zu erhalten, verwendete *Lebedew* eine *logarithmische Teilung.* Der Abstand zweier Frequenzen, die sich wie 1 : 10 verhalten, wird durch Strecken gleicher Länge, beispielsweise 1 cm, dargestellt. Das gleiche gilt für die Skale der Wellenlängen. An den Stellen, an denen sich zwei benachbarte Wellenbereiche überdecken, beginnt wegen einer besseren Anschaulichkeit eine neue Stufe.

Die längsten Wellen werden als *elektrische Wellen* bezeichnet. Zu dieser Gruppe rechnet man den von Generatoren erzeugten *technischen Wechselstrom.* Es schließen sich die Wechselströme an, die im Telefonieverkehr Verwendung finden. Die *Hertzschen Wellen* umfassen einen größeren Frequenzbereich. Sie werden vor allem mit

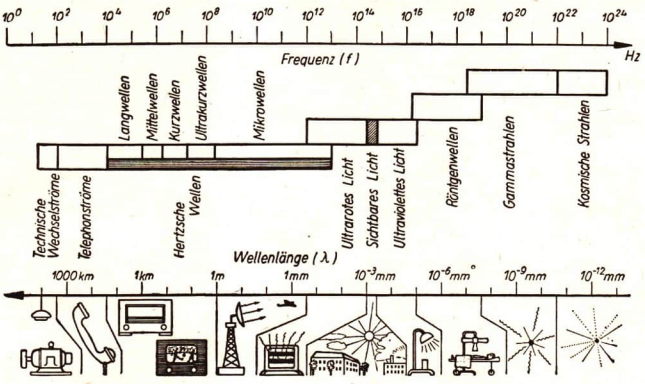


Abb. 205/1. Wellenskalen der elektromagnetischen Wellen nach Lebedew

Röhrengeneratoren erzeugt. Mit einem besonderen Sender erzeugte die sowjetische Forscherin *Glagolewa-Arkadiewa* im Jahre 1924 elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von 0,008 cm. Das ist bisher die kleinste elektrisch erzeugte Wellenlänge.

An die Hertzschen Wellen schließt sich das Gebiet der *Ultrarotstrahlung* an. Ihr langwelliger Teil wird meist als *Wärmestrahlung* bezeichnet. Ursache der Strahlung ist die Wärmebewegung der Moleküle. Mit Quecksilberdampflampen hat man im Bereich der Ultrarotstrahlung eine Wellenlänge von 0,04 cm nachgewiesen, die langwelliger als die obenerwähnte Mikrowelle ist. Die einzelnen Bereiche überschneiden sich demnach teilweise. Das trifft auch auf die anderen Arten der elektromagnetischen Wellen zu.

Mit seinen kürzesten Wellen grenzt das Ultrarot an das *sichtbare Licht*, das in das Gebiet des *Ultraviolett* übergeht. Man faßt diese drei Bereiche als *optisches Spektrum* zusammen.

Die sich anschließenden *Röntgenstrahlen* sind, wie alle Wellen hoher Frequenz, sehr energiereich, so daß ihre Durchdringungsfähigkeit größer als die der ultravioletten Strahlen ist. Beim Atomzerfall tritt eine noch härtere Strahlung auf, die als *γ-Strahlung* bezeichnet wird. Eine Strahlung kürzester Wellenlängen ist die *sekundäre Höhenstrahlung*. Ihre Ursache sind die aus dem Weltenraum kommenden *kosmischen Strahlen*. Die Aufstiege der künstlichen Erdsatelliten und der kosmischen Raketen dienen unter anderem auch der Erforschung dieser kosmischen Strahlen.

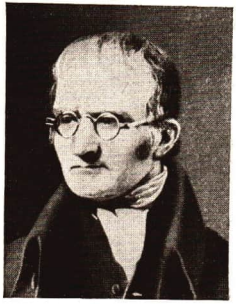
IV. Atomphysik

48. Der Weg zur wissenschaftlichen Untersuchung des Atoms

1. Der Atombegriff im Altertum. Schon im 5. und 6. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung beschäftigte sich in verschiedenen griechischen Stadtstaaten eine ganze Anzahl von Menschen mit Fragen der Philosophie, der Mathematik und des Zusammenhanges sowie der Entwicklung in der Natur. Die damals dort bestehende Sklavenhaltergesellschaft ermöglichte es vielen Angehörigen der herrschenden Klasse, ihre Zeit der Pflege von Wissenschaft und Kunst zu widmen.

Die griechischen Philosophen kamen aber lediglich durch Überlegungen, nicht durch Experimente zu bedeutenden Ergebnissen über die Natur und ihre Entwicklung. Einer der größten von ihnen war *Demokrit von Abdera*, der von 460 bis 390 vor unserer Zeitrechnung lebte. Er lehrte, daß alle Stoffe der Welt aus kleinsten Teilchen aufgebaut seien, die sich voneinander nicht unterscheiden. Diese Teilchen nannte er *Atome*; das griechische Wort „atomos" bedeutet „unteilbar". Ähnliche Vorstellungen vom Aufbau der Welt aus kleinsten Teilen hatte auch *Epikur*, ein etwas später lebender griechischer Philosoph.

Der Begriff des Atoms, wie er im Altertum gebraucht wurde, ist nur durch Überlegungen entstanden. Die Naturwissenschaft und die Technik waren damals noch nicht so weit entwickelt, daß man den Atombegriff wissenschaftlich herleiten konnte. Der Stand der Technik veränderte sich auch in den darauffolgenden Jahrhunderten nur wenig, und die Entwicklung der Naturwissenschaften wurde durch die gesellschaftlichen Verhältnisse stark behindert. — Erst gegen Ende des Mittelalters trat ein Umschwung in der industriellen Entwicklung ein, der auch Fortschritte in der Wissenschaft zur Folge hatte.



John Dalton (1766 bis 1844)

2. John Dalton. England war im 16. und 17. Jahrhundert das wirtschaftlich fortgeschrittenste Land. Dort ging man auf Grund der Erfindung der Dampfmaschine von der Handarbeit zu den Anfängen der industriellen Produktion über. Damit stiegen auch die Ansprüche, die man an die Güte der Werkstoffe stellen mußte. Die Fragen nach dem Aufbau und nach der Zusammensetzung der Stoffe wurden nunmehr bedeutungsvoll, und man ging daran, sie wissenschaftlich zu erforschen.

Der Engländer *John Dalton* untersuchte die Zusammensetzung chemischer Verbindungen. Er entdeckte, daß sich chemische Grundstoffe nur in einem

ganz bestimmten Massenverhältnis verbinden können. So verbinden sich zum Beispiel 32 Teile Schwefel immer nur mit 56 Teilen Eisen zu Schwefeleisen. Diese Zusammenhänge wurden in den *Gesetzen von den konstanten und multiplen Proportionen* formuliert. Sehr deutlich erkennt man die Gültigkeit dieser Gesetze bei den Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen. In den Verbindungen

Distickstoffmonoxyd (N_2O),	Distickstofftrioxyd (N_2O_3),
Stickstoffmonoxyd (NO),	Stickstoffdioxyd (NO_2),
	Distickstoffpentoxyd (N_2O_5)

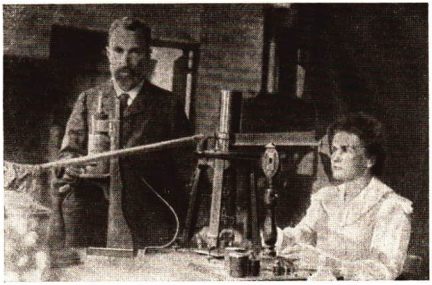
verhalten sich die Mengen Sauerstoff, die sich mit der gleichen Menge Stickstoff verbinden, wie 1 : 2 : 3 : 4 : 5.

Es verbinden sich: 24 g N mit 16 g O zu N_2O,
24 g N mit 32 g O zu NO,
24 g N mit 48 g O zu N_2O_3 usw.

Diese Gesetzmäßigkeiten können auf einfache Weise nur mit Hilfe des Atombegriffs erklärt werden. Die Verhältniszahlen führten später zur Bestimmung der *Atommassen*. Bei der wissenschaftlichen Entwicklung dieser Beziehungen hat sich dafür der Begriff *Atomgewicht* eingebürgert. *Dalton* bezog die Massenverhältnisse auf das leichteste Element, den Wasserstoff. Wasserstoff sollte das Atomgewicht 1 haben. Später jedoch bezog man die Atomgewichte auf die Masse des Sauerstoffatoms mit dem Wert 16. *Dalton* war der Ansicht, daß *jedes chemische Element aus arteigenen Atomen besteht*, die sich von denen der anderen Elemente unterscheiden.

3. Henri Becquerel — Marie und Pierre Curie. Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen hatte man festgestellt, daß einige Stoffe bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen fluoreszieren. Der französische Physiker *Becquerel* wollte im Jahre 1896 diese Vorgänge systematisch untersuchen. Er hatte Stücke eines Uransalzes, Pechblende genannt, in einem Schrank längere Zeit auf Fotoplatten liegenlassen, die gegen Lichteinwirkung durch schwarzes Papier geschützt waren. Beim Entwickeln der Fotoplatten stellte er zu seiner großen Verwunderung fest, daß alle Platten belichtet waren.

Becquerel schloß daraus, daß von der Pechblende Strahlen ausgegangen waren, die die fotografische Schicht wie Lichtstrahlen chemisch verändert hatten. Der Gedanke, daß die Ursachen dieser Veränderungen unsichtbare Strahlen waren, lag deshalb nahe,



Marie Curie-Sklodowska (1867 bis 1934) und Pierre Curie (1859 bis 1906)

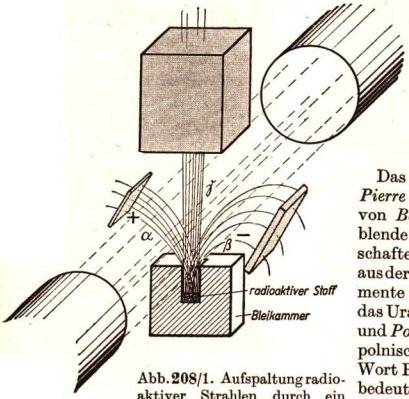


Abb. 208/1. Aufspaltung radioaktiver Strahlen durch ein magnetisches Feld

weil kurz vorher *Wilhelm Conrad Röntgen* unsichtbare Strahlen, die Röntgenstrahlen, entdeckt hatte, die Stoffe durchdringen können. So wurde als Folge der vielseitigen Untersuchungen zur Erforschung der Röntgenstrahlen eine neue Erscheinung entdeckt, die später als *Radioaktivität* bezeichnet wurde.

Das französische Forscherehepaar *Marie* und *Pierre Curie* beschäftigte sich eingehend mit der von *Becquerel* entdeckten Strahlung der Pechblende und untersuchte ihre Ursachen und Eigenschaften. Es gelang ihnen nach jahrelanger Arbeit, aus der Pechblende zwei bis dahin unbekannte Elemente zu gewinnen, die noch stärker strahlen als das Uran. Es sind dies die Elemente *Radium* (Ra) und *Polonium* (Po). Das Polonium wurde nach der polnischen Heimat von *Marie Curie* genannt, das Wort Radium stammt aus dem Lateinischen und bedeutet „das Strahlende".

Zur Gewinnung von 1 g Radium mußte das Ehepaar *Curie* 7 t Uranerz verarbeiten. Das geschah unter schwierigsten Arbeitsbedingungen: der Arbeitsraum war ein Schuppen und die Arbeitsgeräte waren völlig unzureichend. *Marie Curie* erlag im Jahre 1934 der schweren Gesundheitsschädigung, die sie sich durch ihre jahrelange Arbeit mit radioaktiven Stoffen zugezogen hatte. Sie hat ihr Leben ganz in den Dienst der Wissenschaft gestellt. Heute sind jedoch alle Menschen, die mit radioaktiven Strahlen arbeiten, gegen die gesundheitsschädigenden Wirkungen dieser Strahlen geschützt.

Da die radioaktive Strahlung sich allseitig ausbreitet, brachte man zu ihrer genauen Untersuchung ein Radiumpräparat in einen Bleiblock, der ein kleines Fenster hatte (Abb. 208/1). Die Strahlung konnte nur aus dem Fenster austreten, weil Blei bei genügender Dicke die Strahlen völlig absorbiert. Bei der Untersuchung dieser Strahlung in einem magnetischen Feld stellte man fest, daß zwei Anteile aus dem Strahlenbündel nach entgegengesetzten Seiten abgelenkt wurden. Man bezeichnet diese Strahlen als **α- und β-Strahlen**. Auch in einem elektrischen Feld wurden diese Strahlen aufgespalten. Ein dritter Teil, der durch elektrische und magnetische Felder nicht beeinflußbar ist, wurde **γ-Strahlung** genannt. Aus der Richtung der Ablenkung der α- und β-Strahlen konnte man schließen, daß die α-Strahlen *positiv elektrisch* und die β-Strahlen *negativ elektrisch* geladen sind. Später stellte man fest, daß die α- und die β-Strahlen aus kleinen Masseteilchen, aus *Korpuskeln*, bestehen.

4. Fragen:

1. Woher stammt das Wort „Atom" und welche Vorstellung hatte man damals vom Atom?
2. Warum kam man gerade in England im 18. Jahrhundert zu wesentlich neuen Erkenntnissen über den Atombegriff?
3. Wie stellte man zuerst fest, daß es die drei unterschiedlichen radioaktiven Strahlenarten gibt?

49. Die Radioaktivität

1. Die Wirkungen der radioaktiven Strahlen. Bei ihren Untersuchungen stellten *Marie* und *Pierre Curie* folgende Wirkungen der radioaktiven Strahlen fest:

1. *Radioaktive Strahlen ionisieren Gase.* Bringt man ein radioaktives Präparat zwischen die Platten eines aufgeladenen Kondensators, so sinkt die Ladung des Kondensators schneller als ohne Präparat. Die Luft ist durch die Ionisation leitend geworden.
2. *Durch die radioaktive Strahlung wird die Umgebung des Präparates erwärmt.* Die Energie der Strahlen wird in Wärmeenergie umgewandelt.
3. *Die radioaktive Strahlung schwärzt Fotoplatten.* Durch diese Wirkung hatte Becquerel die radioaktive Strahlung entdeckt.
4. *Die radioaktiven Strahlen üben eine zerstörende Wirkung auf lebende Zellen aus.* Infolge dieser biologischen Wirkungen erkrankten in der ersten Zeit nach der Entdeckung der Strahlen viele Forscher. Manche von ihnen, wie auch *Marie Curie,* starben an den Folgen dieser Erkrankungen.

2. Die Eigenschaften und die Zusammensetzung der radioaktiven Strahlen. Nach der Entdeckung der Wirkungen der radioaktiven Strahlen konnten nach und nach die wichtigsten Eigenschaften der Strahlen festgestellt werden. Dabei ergab sich, daß die drei Arten der Strahlen, die α-, β- und γ-Strahlen, völlig verschiedenartig sind.

a) **Die α-Strahlen.** Die *Masse eines geladenen Teilchens* läßt sich aus der Ablenkung des bewegten Teilchens in elektrischen und magnetischen Feldern bestimmen. Auf Grund entsprechender Messungen hat man festgestellt: *Ein α-Teilchen hat die vierfache Masse eines Wasserstoffkerns und ist zweifach positiv geladen.* Dieselbe Masse und die gleiche Ladung hat aber auch ein doppelt positiv geladenes Heliumion. *α-Teilchen sind also Heliumkerne.* Tatsächlich findet man immer in der Umgebung eines α-Strahlers Heliumionen und neutrale Heliumatome, die durch Aufnahme von zwei Elektronen aus den α-Teilchen entstehen. Bei Versuchen mit α-Teilchen stellte man fest, daß diese bei ihrer Bewegung durch flüssige, feste und gasförmige Körper *je nach Art und Dicke des Stoffes verschieden stark gebremst werden.* Sie legen einen gewissen Weg in geradliniger Bewegung zurück und sind danach nicht mehr nachzuweisen. Die Länge dieses Weges bezeichnet man als Reichweite. So beträgt zum Beispiel die Reichweite von α-Teilchen aus Uran in der Luft 2,7 cm, aus Radium 3,4 cm. In festen und flüssigen Körpern ist die Reichweite bedeutend geringer.

Die Geschwindigkeit der α-Teilchen aus Uran ist etwa $1 \ldots 2 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Aus der Geschwindigkeit und der Masse eines α-Teilchens läßt sich seine kinetische Energie berechnen. Man erhält etwa 10^{-12} J.

Da bei kleinen Teilchen, wie den α-Teilchen, die kinetische Energie selbst bei hoher Geschwindigkeit noch relativ klein ist, verwendet man zweckmäßigerweise in der Atom- und Kernphysik eine kleinere Energieeinheit als das Joule. Diese Einheit ist das **Elektronenvolt** (eV). 1 Elektronenvolt ist die kinetische Energie eines Elektrons, das in einem elektrischen Feld bei einem Spannungsunterschied von 1 V beschleunigt wird und damit eine bestimmte Geschwindigkeit

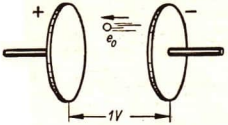


Abb. 209/1. Schematische Erläuterung der Größe 1 eV

erreicht (Abb. 209/1). 10^6 eV nennt man **Megaelektronenvolt** (MeV). Das Elektronenvolt ist bedeutend kleiner als die Energieeinheiten J beziehungsweise kWh:

$$1\ \text{eV} \mathrel{\widehat{=}} 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \mathrel{\widehat{=}} 4{,}44 \cdot 10^{-26}\ \text{kWh}$$
$$1\ \text{MeV} \mathrel{\widehat{=}} 1{,}6 \cdot 10^{-13}\ \text{J} \mathrel{\widehat{=}} 4{,}44 \cdot 10^{-20}\ \text{kWh}$$

Der Energie eines α-Teilchens von 10^{-12} J entspricht also 6 MeV.

b) Die β-Strahlen. Aus der Ablenkung der β-Strahlung konnte festgestellt werden, daß *die β-Teilchen* ***Elektronen*** *mit großer Geschwindigkeit und damit auch mit hoher Energie sind.* Da die Geschwindigkeit der Elektronen bei ein und demselben Element sehr unterschiedliche Werte hat, ist auch die Energie der β-Strahlen ganz verschieden groß. Sie kann bis zu 16 MeV betragen. Die β-Teilchen haben ein größeres Durchdringungsvermögen als die α-Teilchen, da einerseits ihre Masse bedeutend geringer, andererseits ihre Energie größer ist. Auch Katodenstrahlen bestehen aus schnellen Elektronen. Man hat Entladungsröhren auf der der Katode gegenüberliegenden Seite mit mehreren kleinen Öffnungen versehen, die mit sehr dünnen Aluminiumfolien von etwa 10 ... 20 μm Dicke verschlossen wurden (Abb. 210/1).

Es wurde festgestellt, daß viele der von der Katode senkrecht ausgehenden Elektronen die Metallfolie ohne Ablenkung durchdringen. Diese und ähnliche Versuche führten zu ersten Vorstellungen über den Aufbau der Atome (vgl. S. 214).

Abb. 210/1. Entladungsröhre mit Lenardfenster

c) Die γ-Strahlen. Während die α- und β-Strahlen aus Masseteilchen, aus sogenannten Korpuskeln, bestehen, sind *die γ-Strahlen elektromagnetische Wellen* mit noch kürzeren Wellenlängen als Röntgenstrahlen. Die Wellenlängen liegen im Gebiet von $10^{-10} \ldots 10^{-9}$ cm.

Man hat festgestellt, daß die Energie einer elektromagnetischen Welle der Frequenz proportional ist (vgl. S. 218). Daher haben die γ-Strahlen eine größere Energie als die Lichtwellen und die Röntgenwellen. Wegen dieser verhältnismäßig großen Energie haben γ-Strahlen ein hohes Durchdringungsvermögen. Eine weitere Folge der großen Energie ist die schädigende Wirkung der γ-Strahlen. Alle Menschen, die mit γ-Strahlen arbeiten, müssen sich daher gegen die unmittelbare Einwirkung der Strahlen schützen. Bevor man diese Wirkung kannte, haben sich viele Forscher gesundheitliche Schäden zugezogen.

Die γ-Strahlen schwärzen Fotoplatten. Diese Tatsache führte bekanntlich zur Entdeckung der Radioaktivität.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Berechnen Sie aus der Geschwindigkeit und der Masse eines α-Teilchens ($v = 1{,}5 \cdot 10^9\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$, $m = 6{,}64 \cdot 10^{-24}$ g) seine kinetische Energie in J und MeV!
2. Welche Geschwindigkeit hat ein Elektron, wenn seine kinetische Energie 12 MeV beträgt ($m = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g)?
3. Welcher grundsätzliche Unterschied besteht zwischen α- beziehungsweise β-Strahlen und γ-Strahlen?
4. Nennen Sie Wirkungen der radioaktiven Strahlen, bei denen man eine Energieumwandlung feststellen kann!

50. Geräte zum Nachweis der radioaktiven Strahlen

Zur Beobachtung und Untersuchung der radioaktiven Strahlen und zum Schutze der Menschen vor diesen Strahlen hat man besondere Geräte entwickelt. Die wichtigsten sind das *Geiger-Müller-Zählrohr*, die *Wilsonsche Nebelkammer*, die *Diffusionsnebelkammer* und der *Szintillationszähler*. Diese Geräte beruhen unter anderem auf der ionisierenden Wirkung radioaktiver Strahlen.

1. Die ionisierende Wirkung der radioaktiven Strahlen. Fliegen geladene Teilchen, α-Teilchen und Elektronen, durch ein Gas, so *ionisieren sie Gasmoleküle beziehungsweise Gasatome*. Ein geladenes Teilchen kann aus der Elektronenhülle eines Gasmoleküls ein oder mehrere Elektronen herausreißen. Anstelle des neutralen Gasmoleküls sind nach der Ionisation zum Beispiel ein positiv geladenes Ion und ein Elektron vorhanden. Beide Teilchen können auf ihrer weiteren Bahn ebenfalls wieder ionisieren. Ein ionisierendes Teilchen verliert bei jeder Ionisation Energie und fliegt daher immer langsamer, bis es schließlich nur noch die gleiche ungeordnete Wärmebewegung ausführt wie die anderen Gasmoleküle auch. Auf dieser Ionisation von Gasmolekülen durch geladene Teilchen beruht die Wirkungsweise verschiedener Nachweisgeräte.

γ-Strahlen können ebenfalls ionisieren. Dabei wird ihre kinetische Energie vollständig zur Ionisierung verwendet. Das herausfliegende Elektron hat fast die gesamte Energie der γ-Strahlung aufgenommen und kann nun seinerseits Gasmoleküle ionisieren.

2. Das Geiger-Müller-Zählrohr. In der Achse eines Metallrohres ist isoliert ein Draht gespannt (Abb. 211/1). Das Rohr wird luftdicht verschlossen, ausgepumpt und mit einem Gas, beispielsweise mit Argon, gefüllt. Über einen hohen Widerstand von etwa $10^6\ \Omega$ wird eine Hochspannung zwischen Zylinder und Draht gelegt, wobei der positive Pol am Draht liegt. Zylinder und Draht bilden einen Kondensator, den man wegen seiner Form Zylinderkondensator nennt. Da das Gas im Zählrohr ein Isolator ist, fließt zunächst über den Widerstand kein Strom. Bringt man aber in die Nähe des Zählrohres ein radioaktives Element, das beispielsweise β-Teilchen aussendet, so dringen die Elektronen in das Zählrohr ein, wenn die Zählrohrwand genügend dünn ist. Sie ionisieren im Zählrohr Moleküle des Gases. Im elektrischen Feld zwischen Zylinder und Draht bewegen sich die Elektronen zum positiv geladenen Draht, der Anode, und die positiven Ionen zur negativ geladenen Zylinderwand, zur Katode.

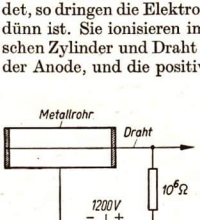


Abb. 211/1. Geiger-Müller-Zählrohr

In der Nähe des Drahtes haben die Elektronen eine so hohe Geschwindigkeit, daß sie nun selbst Gasmoleküle ionisieren können. Dieser Vorgang steigert sich, so daß man von einer *Ionenlawine* sprechen kann. Infolgedessen fließt ein Strom, bis sämtliche Ladungsträger die Katode beziehungsweise die Anode erreicht haben. Dieser kurzzeitig fließende Strom erzeugt am Widerstand einen *Spannungsstoß*, einen sogenannten *Impuls*. Jedes in das Zählrohr fliegende Teilchen verursacht einen solchen Spannungsimpuls. Die Impulse zählt man mit Hilfe elektronischer Geräte und kann dadurch die Anzahl der in das Rohr eingedrungenen Teilchen feststellen (Abb. 212/1 und 212/2).

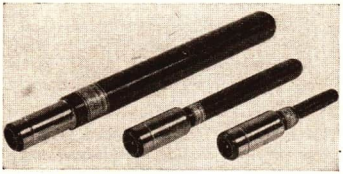


Abb. 212/1. Zählrohre, hergestellt im VEB Vakutronik Dresden

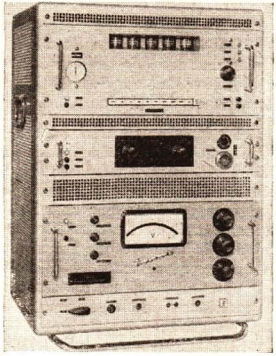


Abb. 212/2. Strahlenmeßplatz, hergestellt im VEB Vakutronik Dresden

Zum Nachweis von γ-Strahlen besteht die Zählrohrwand aus Elementen hoher Ordnungszahl, damit möglichst viele Fotoelektronen erzeugt werden, die dann Spannungsimpulse verursachen. Geigerzähler werden heute in sehr verschiedenen Größen vielseitig eingesetzt.

Zur Kontrolle der radioaktiven Strahlung werden von den Menschen, die in Forschungsinstituten mit radioaktiven Stoffen zu tun haben, *Dosimeter* und andere Strahlenmeßgeräte getragen (Abb. 212/3). Diese zeigen an, wann die Stärke der Strahlung einen Wert erreicht, der gesundheitsschädlich ist.

3. Die Wilsonsche Nebelkammer. Eine zylindrische Kammer ist mit einem beweglichen Kolben verschlossen und enthält Luft oder ein anderes Gas. Bringt man eine Schale mit Wasser in diese Kammer, so verdunstet das Wasser, bis der gesamte Innenraum mit Wasserdampf gesättigt ist. Wird dann durch Herausziehen des Kolbens das Gas ausgedehnt, so muß es bei der Ausdehnung Arbeit verrichten und kühlt sich ab. Das abgekühlte Gas kann nun nicht mehr soviel Wasserdampf aufnehmen wie vorher. Es ist daher mit Wasserdampf übersättigt. Befinden sich im Gas Staubteilchen, so schlägt sich der Wasserdampf an diesen Teilchen nieder und bildet feine Wassertröpfchen, ähnlich wie bei der Nebel-

Abb. 212/3. Dosimeter

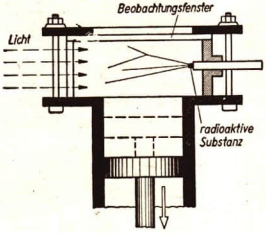


Abb. 213/1. Wilsonsche Nebelkammer

bildung. Man bezeichnet Teilchen, an denen Wasserdampf kondensiert, als *Kondensationskerne.*

Der englische Physiker *Wilson* beobachtete, daß auch Ionen als Kondensationskerne wirken. Bringt man ein radioaktives Präparat, das beispielsweise α-Strahlen aussendet, einen α-Strahler, in die Nebelkammer, so ionisieren die α-Teilchen längs ihrer Bahn das Gas in der Kammer. Wird nun das Gas durch Herausziehen des Kolbens abgekühlt, so wird der Raum mit Wasserdampf übersättigt, und längs der Bahn der α-Teilchen bilden sich an den Ionen feine Wassertröpfchen (Abb. 213/1). Bei geeigneter Beleuchtung ist diese Tröpfchenspur sichtbar und kann fotografiert werden. Bei einem stark strahlenden Präparat liegen die Bahnen so dicht wie etwa die Haare eines Rasierpinsels. Mit Hilfe von *Nebelkammeraufnahmen* wurden für die Forschung entscheidende Beobachtungen gemacht. Auf einer Nebelkammeraufnahme beobachteten die Mitarbeiter *Rutherfords* die erste Kernumwandlung (vgl. S. 221).

4. Die Diffusionsnebelkammer. Da man mit der Nebelkammer oft Vorgänge beobachten will, die verhältnismäßig selten eintreten, sind für genaue Untersuchungen sehr viele fotografische Aufnahmen notwendig. Dies erfordert bei einer Wilsonschen Nebelkammer immer wieder eine Ausdehnung des Gases, um eine Wasserdampfübersättigung hervorzurufen. Vorteilhafter ist es, wenn in der Kammer ein Gebiet ständig mit Dampf übersättigt ist. Dies wird bei der *Diffusionsnebelkammer* erreicht.

Eine zylindrische Kammer ist mit Luft oder einem Gas gefüllt. Während der Kammerboden durch flüssiges Kohlendioxyd auf einer Temperatur von $-70\,°C$ gehalten wird, hat der obere Teil der Kammer Zimmertemperatur, etwa $20\,°C$. In ihm befindet sich ein Gefäß mit Alkohol, der verdampft. Die im Gas befindliche Dampfmenge hängt von der Gastemperatur ab. Die Alkoholdampfmoleküle führen ständig eine unregelmäßige Wärmebewegung aus und gelangen dadurch auch in den unteren Teil der Kammer, sie diffundieren. Da der Alkoholdampf im oberen Teil ständig gesättigt ist, breitet er sich durch Diffusion auch nach unten aus. Im unteren Teil herrscht jedoch eine niedrigere Temperatur, so daß der Dampf dort übersättigt ist. Daher gibt es in der Diffusionsnebelkammer ein Gebiet ständiger Übersättigung, in dem die Bahnen ionisierender Teilchen durch Tröpfchenbildung sichtbar werden.

5. Der Szintillationszähler. Eines der ersten Nachweisgeräte für radioaktive Strahlen war der *Szintillationsschirm.* Treffen geladene Teilchen mit großer Geschwindigkeit auf eine Schicht aus Zinksulfid, so entsteht an der Stelle des Auftreffens ein Lichtblitz. Mischt man Zinksulfid oder ähnlich wirkende Stoffe, sogenannte Phosphore, mit einer winzigen Menge eines radioaktiven Stoffes, so werden die Phosphore ständig zum Leuchten angeregt. Eine derartige Mischung benutzt man beispielsweise zur Herstellung der Leuchtziffern auf Uhren.

Bei der Anwendung der Szintillation für den Teilchennachweis werden die Lichtblitze mit Hilfe eines Mikroskops beobachtet und gezählt. Mit einem solchen Szintillationsschirm wies bereits *Rutherford* die α-Teilchen nach (vgl. S. 221).

Diese Methode hat aber große Nachteile. Um nämlich eine fehlerfreie Zählung zu ermöglichen, dürfen nicht mehr als ein bis zwei Teilchen je Sekunde auf den Schirm treffen. Außerdem erfordert der Teilchennachweis eine große Übung des Beobachters und wirkt auf die Dauer ermüdend. Daher verdrängten andere Methoden der Teilchenzählung diese Szintillationsmethode.

Heute benutzt man statt eines Mikroskops einen *fotoelektrischen Vervielfacher*, kurz *Fotovervielfacher* genannt. In diesem Gerät werden die Lichtblitze in elektrische Impulse umgewandelt. Die Impulse werden, ebenso wie beim Zählrohr, durch elektronische Geräte nachgewiesen und gezählt. Der *Szintillationszähler* ist in der modernen Kernphysik eines der wichtigsten Nachweisgeräte.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Welche Wirkung der radioaktiven Strahlen nutzt man in den Geräten zu ihrem Nachweis aus? Beschreiben Sie die entsprechenden Vorgänge!
2. Welchen Vorteil hat die Diffusionsnebelkammer gegenüber der Wilsonschen Nebelkammer?
3. Erläutern Sie am Beispiel des Szintillationszählers, wie man auf der Grundlage eines alten Prinzips ein modernes Gerät entwickelt hat!

51. Der Aufbau der Atome – Die Atommodelle

1. Der zusammengesetzte Aufbau der Atome. Die Erforschung der Katoden- und Röntgenstrahlen führte um die Jahrhundertwende zu völlig neuartigen Kenntnissen über die Atome.

Da man zur Erzeugung der Katodenstrahlen beliebiges Katodenmaterial benutzen kann, müssen die Elektronen offensichtlich in allen Atomen vorkommen. Diese Hypothese wurde später durch viele andere Erscheinungen bestätigt, beispielsweise durch die Vorgänge der Elektrolyse.

Die Elektronen sind ein Bestandteil der Atome. Mithin sind die Atome nicht die kleinsten Teilchen.

Man hat durch zahlreiche Versuche festgestellt, daß *alle vorkommenden Ladungsmengen ganze Vielfache einer kleinsten Ladung sind*; beim Auf- und Entladen eines Körpers ändert sich die Ladung nicht stetig, sondern in kleinen Portionen. Das Elektron besitzt diese kleinste, in der Natur vorkommende Ladung. Man nennt sie die **elektrische Elementarladung** (e). Die Elementarladung wurde zuerst von *Millikan* im Jahre 1909 gemessen; sie ist unvorstellbar klein:

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

(vgl. Aufgabe 1 auf S. 221).

Auch die *Masse des Elektrons* (m_e) ist sehr klein. Man hat sie aus der Ablenkung der Katodenstrahlen in elektrischen und magnetischen Feldern bestimmt. Es ergab sich folgender Wert:

$$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-28}\ \mathrm{g}.$$

Diese Masse verhält sich zur Masse eines 10-Pfg.-Stückes wie diese zur Masse der Erde. Die Masse des leichtesten Atoms, des Wasserstoffatoms, ist 1837,3 mal so groß wie die eines Elektrons. Sie beträgt:

$$m_H = 1{,}67 \cdot 10^{-24}\ \text{g}.$$

Nachdem man die Anwesenheit der Elektronen im Atom festgestellt hatte, ergab sich die Frage: Wie läßt sich die elektrische Neutralität der Atome nach außen hin erklären? Offenbar müssen die Atome außer den Elektronen noch Teilchen enthalten, die eine der Ladung der Elektronen entsprechende positive Ladung haben. Man nahm daher an, daß sich im Atom außer einer bestimmten Anzahl von Elektronen eine gleiche Anzahl einfach positiv geladener Teilchen befinde.

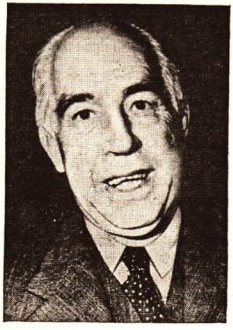
2. Das Atommodell von Rutherford. Der deutsche Physiker *Lenard* untersuchte im Jahre 1903 den Durchgang von Katodenstrahlen durch dünne Metallblättchen, sogenannte *Folien* (vgl. S. 210). Er fand, daß die meisten Elektronen eine Folie ohne Ablenkung passieren. Da ein Atom sehr klein ist, sind auch noch in der dünnsten Folie viele Atome aneinander und übereinander geschichtet. Das Elektron muß also bei seinem Durchgang durch eine Folie eine große Anzahl von Atomen passieren. Wenn nun jedes Atom eine kompakte Masse aus positiv geladenen Teilchen und Elektronen wäre, dann müßten viele Elektronen mit den Atomteilchen zusammenstoßen und dadurch ihre ursprüngliche Richtung ändern; denn die Abstände zwischen den Atomen sind verhältnismäßig gering. Da man derart viele Richtungsänderungen jedoch nicht beobachtete, folgerte man, *daß im Atom selbst viel freier Raum vorhanden sein müßte. Rutherford* benutzte in seinen Versuchen anstelle der Katodenstrahlen α-Teilchen. Er fand, daß die meisten α-Teilchen die Folie ohne Richtungsänderung durchdringen, daß jedoch einige um große Winkel abgelenkt werden; man sagt, sie werden gestreut.

Rutherford vermutete, daß die relativ wenigen abgelenkten α-Teilchen von positiv geladenen Atomteilchen abgestoßen würden. Die Seltenheit dieser Ablenkung erklärte er mit der Annahme, daß die positiven Teilchen in einem sehr geringen Raumteil des Atoms konzentriert sind. In den meisten Fällen durchqueren die α-Teilchen die Atome, ohne in unmittelbare Nähe des positiven Abstoßungszentrums, des sogenannten Kerns, zu kommen.

Die Durchmesser der Atomkerne lassen sich aus den Versuchen *Rutherfords* bestimmen und sind etwa 10^{-13} cm groß. Dagegen betragen die Durchmesser der Atome 10^{-9} bis 10^{-8} cm, sie sind also etwa 100 000 mal so groß. Die Größenverhältnisse zwischen Atom und Atomkern kann man sich angenähert durch Vergleiche anschaulich machen. Vergleicht man den Atomkern mit einem Fußball von 22 cm Durchmesser, dann hat das Atom einen Durchmesser von etwa 22 km (vgl. Aufgabe 3 auf S. 221). Befindet sich der Atomkern, der Fußball, in der Mitte zwischen Erfurt und Weimar, so gehen die Elektronenbahnen durch die genannten Städte.

Ernest Rutherford (1871 bis 1937)

Rutherford faßte seine Erkenntnis in einer Modellvorstellung zusammen, die man das *Rutherfordsche Atommodell* nennt. Solche Modellvorstellungen sollen physikalische Erkenntnisse verständlich und anschaulich machen, können aber die Wirklichkeit meist nur teilweise wiedergeben. Sie müssen stets unter bestimmten Einschränkungen verstanden werden. *Rutherford* nahm als *Gestalt des Atoms die Kugel* an, da sie der einfachste Körper ist. Die positiven Teilchen bilden den Atomkern, der sich im Mittelpunkt der Atomkugel befindet und fast die gesamte Masse des Atoms in sich vereinigt. Da die Elektronen negativ geladen sind und daher vom Atomkern angezogen werden, müssen sie sich um den Kern bewegen, ähnlich wie die Planeten um die Sonne; denn sonst müßten sie in den Kern stürzen. Dieser Vergleich mit dem Planetensystem gibt aber, wie die ganze Modellvorstellung, nur einen Teil der Erkenntnisse wieder. So sind zum Beispiel die Anziehungskräfte in beiden Fällen völlig verschieden; die Bewegung der Himmelskörper wird durch die Gravitationskraft, die der Elektronen im Atom durch die Anziehungskraft zwischen verschiedenen elektrischen Ladungen bestimmt.



Niels Bohr (1885 bis 1962)

3. Das Bohrsche Atommodell. Mit dem Fortschreiten der Erkenntnisse führte das Rutherfordsche Atommodell zu Widersprüchen zwischen den theoretischen Überlegungen und den praktischen Versuchsergebnissen. Die Erforschung der Spektren glühender Elemente im gasförmigen Zustand ergab, daß jedes Element Lichtwellen bestimmter Wellenlängen aussendet. Die Spektren bestehen infolgedessen aus einzelnen Linien, den sogenannten *Spektrallinien*. Der dänische Physiker *Niels Bohr* legte 1912 dar, daß jene für die einzelnen Elemente charakteristischen Spektrallinien ihre Ursache in den Bewegungen der Elektronen um den Atomkern haben. Nach *Bohr* kreisen *die Elektronen nicht auf beliebigen Bahnen, sondern nur auf ganz bestimmten* (vgl. Abb. 218/1). Diese Elektronenbahnen nennt man auch *Schalen*. Ihre Durchmesser lassen sich auf Grund bestimmter Bedingungen berechnen. Man bezeichnet diese Schalen von innen nach außen als *K*-, *L*-, *M*, . . ., *Q*-*Schale* (vgl. Abb. 220/1).

Da jede Lichtaussendung mit einer Energieabgabe verbunden ist, müßten sich die Elektronen infolgedessen immer mehr dem Kern nähern und sich schließlich mit ihm vereinigen. Das steht aber im völligen Widerspruch zu den bekannten Tatsachen. Diesen und andere Widersprüche zwischen dem Rutherfordschen Atommodell und den Versuchsergebnissen löste *Bohr* dadurch, daß er ein *Atommodell mit gewissen Bedingungen für die Bahnen der Elektronen* aufstellte. *Bohr* benutzte dabei aber die Grunderkenntnisse *Rutherfords*. Neuartig sind die folgenden Annahmen, mit denen *Bohr* die Entstehung der Linienspektren erklärte (Abb. 217/1):

1. *Die Elektronen bewegen sich im Atom auf bestimmten kreisförmigen Bahnen um den Kern.* Dabei werden keine elektromagnetischen Wellen, also auch keine Lichtwellen, ausgesandt.
2. *Jedes Elektron hat je nach seiner Bahn, auf der es sich bewegt, eine bestimmte Energie* (E_1, E_2, E_3). Diese ist um so größer, je größer der Bahnradius ist.

3. *Unter bestimmten Bedingungen springen Elektronen von einer Bahn auf eine andere.* Dabei wird beim Sprung eines Elektrons von einer Bahn mit höherer Energie, das heißt mit größerem Radius, auf eine Bahn mit niedrigerer Energie, das heißt mit kleinerem Radius, eine elektromagnetische Welle ausgesandt (Abb. **217**/2). Auch der umgekehrte Übergang ist möglich, er ist die Folge einer Energieaufnahme, beispielsweise durch die Absorption einer elektromagnetischen Welle.

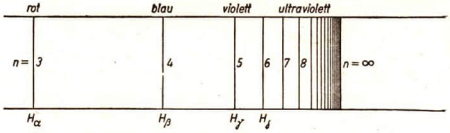


Abb. **217**/1. Atomlinienspektrum

Abb. **217**/2. Bei einem Elektronensprung wird eine elektromagnetische Welle ausgesandt, beziehungsweise absorbiert

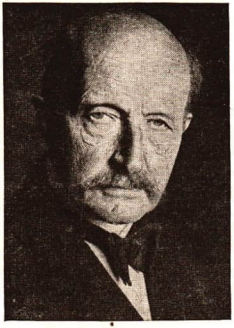
4. *Die ausgesandten oder absorbierten elektromagnetischen Wellen haben ganz bestimmte Wellenlängen beziehungsweise Frequenzen.* Die Frequenz ν einer solchen Welle ist der Energiedifferenz der Bahnen, zwischen denen der Elektronenübergang erfolgte, proportional:

$$\nu \sim E_2 - E_1.$$

Den Proportionalitätsfaktor h für diese Beziehung fand im Jahre 1900 der deutsche Physiker *Max Planck*. h ist eine Konstante, die als **Plancksches Wirkungsquantum** bezeichnet wird. Unter Verwendung von h wird aus der obenstehenden Proportion die Gleichung:

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu.$$

Nach dieser Gleichung hat eine elektromagnetische Welle mit der Frequenz ν eine Energie von $E = h \cdot \nu$.



Max Planck (1858 bis 1947)

Zahlreiche Forschungsergebnisse haben bewiesen, daß mit Hilfe der rein theoretischen Bohrschen Annahmen viele Einzelheiten des Atombaus, der Spektren der Atome und der chemischen Eigenschaften der Elemente erklärt werden können. Aber auch dieses Atommodell und eine später erweiterte Form reichen zur Erklärung neuester Forschungsergebnisse nicht mehr aus. Wiederum treten Widersprüche zwischen Atommodellen beziehungsweise Hypothesen und den Versuchsergebnissen auf. Mit neuartigen Atommodellen versucht man auch diese Widersprüche zu lösen und neue Beobachtungen zu erklären. Zur Erklärung grundlegender Erkenntnisse über den Bau der Atome ist das *Bohrsche Atommodell* auch heute noch geeignet. Die Forschung hat aber ergeben, daß manche Erscheinungen

im Atom nur mit Hilfe sehr komplizierter mathematischer Gleichungen beschrieben werden können.

4. Das Wasserstoffatom und sein Spektrum. Das Wasserstoffatom ist am einfachsten aufgebaut. Es besteht nur aus einem positiv geladenen Kernteilchen, einem **Proton,** und einem Elektron, das um das Proton kreist. Der kleinstmögliche Bahnradius dieses Elektrons beträgt nach dem Bohrschen Atommodell

$$r_0 = 0{,}53 \cdot 10^{-8}\ \text{cm}.$$

In diesem Zustand kann das H-Atom keine elektromagnetische Strahlung aussenden, da es keine Elektronenbahn gibt, die dem Kern noch näher ist. Man sagt, *das* H-*Atom befindet sich im Grundzustand,* wenn das Elektron auf der kernnächsten Bahn kreist. Das Wasserstoffatom kann elektromagnetische Wellen nur dann aussenden, wenn sich das Elektron auf einer zweiten oder auf einer höheren, das heißt, weiter vom Kern entfernten Bahn bewegt (Abb. 218/1). Man sagt in diesem Falle, *das* H-*Atom befindet sich in angeregtem Zustand.* Dazu muß dem Atom ein gewisser Energiebetrag zugefügt werden, der mindestens dem Energieunterschied zwischen der ersten und der zweiten Elektronenbahn entspricht. Danach kann das Atom unter Aussendung einer Lichtwelle beziehungsweise einer nicht sichtbaren elektromagnetischen Welle wieder in den Grundzustand zurückgehen. Die Frequenz dieser Welle ergibt sich im einfachsten Falle aus der Beziehung $h \cdot \nu = E_2 - E_1$. Ein H-Atom kann zum Beispiel bei Gasentladungen durch den Zusammenstoß mit Elektronen in einen angeregten Zustand übergehen. Beim Zusammenstoß übertragen die Elektronen den Atomen einen Teil ihrer kinetischen Energie; dadurch werden die Atome angeregt.

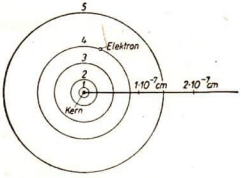


Abb. 218/1. Bohrsches Modell eines Wasserstoffatoms

Entsprechend der Beziehung $h \cdot \nu = E_2 - E_1$ werden beispielsweise beim Übergang eines Elektrons im Wasserstoffatom

von der 3. zur 2. Bahn eine Lichtwelle der Frequenz $\nu_1 = 457{,}1 \cdot 10^{12}$ Hz,
von der 4. zur 2. Bahn eine Lichtwelle der Frequenz $\nu_2 = 617{,}2 \cdot 10^{12}$ Hz,
von der 5. zur 2. Bahn eine Lichtwelle der Frequenz $\nu_3 = 691{,}2 \cdot 10^{12}$ Hz

ausgesandt. Man erkennt aus der Größe dieser Frequenzen die Beziehung $\nu \sim E_2 - E_1$: *Je größer die Energiedifferenz ist, desto höher ist die Frequenz.* Alle drei Spektrallinien, die den obengenannten Frequenzen entsprechen, liegen im sichtbaren Gebiet des Spektrums, und zwar die erste im roten, die beiden anderen Linien im blauen Teil des Spektrums. Alle Spektrallinien, bei denen der Endzustand der Elektronen nach dem Sprung gleich ist, faßt man zu einer *Serie* zusammen. Entsprechend anderen gemeinsamen Endzuständen gibt es für jedes Element solche Serien von Spektrallinien. Übergänge auf die 1. Bahn und damit zum Grundzustand haben wegen der höheren Energiedifferenz Spektrallinien im ultravioletten Gebiet zur Folge. Andere Übergänge ergeben Spektrallinien im ultraroten Gebiet des Spektrums.

Zur Veranschaulichung dieser Beziehung wendet man, wie oft in den Naturwissenschaften, die graphische Darstellung an. Jeder Energiewert, der einem kreisenden

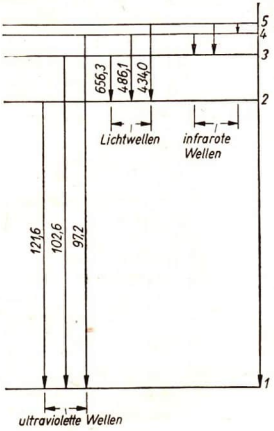


Abb. **219**/1. Energieniveauschema des Wasserstoffatoms mit eingezeichneten Serien von Spektrallinien

Elektron in einem bestimmten Atom zukommt, wird durch eine horizontale Gerade dargestellt. Die Energiewerte bezeichnet man auch als *Energieniveaus*. Bei der graphischen Darstellung zieht man zuerst eine horizontale Linie und nimmt diese als *Grundniveau* an. Diesem Niveau entspricht die Energie eines Elektrons auf der kernnächsten Bahn, wenn sich das Atom also im Grundzustand befindet (Abb. **219**/1). Oberhalb der ersten horizontalen Geraden zeichnet man weitere horizontale Geraden ein, die den *Energieniveaus auf den höheren Bahnen* entsprechen. Die Abstände werden maßstäblich entsprechend dem Energieunterschied zum Grundniveau gewählt. Mit vertikalen Linien, die zwei Niveaus verbinden, werden Elektronensprünge angedeutet. Jeder solchen Linie entspricht dann auch eine Spektrallinie.

5. Elektronenhülle und Spektren der übrigen Atome. Aus dem Chemieunterricht ist bekannt, daß die Atome der anderen chemischen Elemente komplizierter als das Wasserstoffatom aufgebaut sind. Sie haben mehrere Elektronen, die sich auf verschiedenen Bahnen um den Kern bewegen. Die Bahnebenen sind gegeneinander geneigt. Bahnen mit annähernd gleichem Durchmesser faßt man zu einer Schale zusammen.

Aus der Ablenkung von α-Teilchen beim Durchgang durch Folien fand man unter anderem eine Gesetzmäßigkeit über die Ladung der Atomkerne. Danach ist *die Anzahl der positiven Elementarladungen eines Atomkerns*, die sogenannte **Kernladungszahl** Z gleich der **Ordnungszahl** N des betreffenden Elements im Periodensystem. Wegen der elektrischen Neutralität der Atome muß aber auch die Anzahl der Elektronen gleich der Kernladungszahl sein. Daher gilt die wichtige Beziehung:

Ordnungszahl = Kernladungszahl = Elektronenzahl.

Außer seiner Bewegung um den Kern hat aber jedes Elektron noch verschiedene andere Eigenschaften, durch die es sich von anderen Elektronen unterscheidet. Man fand, daß niemals zwei Elektronen in allen Eigenschaften übereinstimmen. Sie unterscheiden sich wenigstens durch eine Eigenschaft. Aus dieser Tatsache erklärt sich die höchstmögliche Anzahl der Elektronen in den einzelnen Schalen, die schon aus dem Chemieunterricht bekannt ist. Numeriert man die Schalen von innen nach außen mit 1, 2, . . ., n so ist die Anzahl der Elektronen $2 \cdot 1^2$, $2 \cdot 2^2$, . . ., $2 \cdot n^2$ (Abb. **220**/1).

Aus dem Periodensystem ist bekannt, daß diese Gesetzmäßigkeit nur bis zur 4. Schale, der N-Schale, festzustellen ist; die Atome der heute bekannten Elemente haben nicht so viele Elektronen, daß die 5. Schale voll besetzt werden kann.

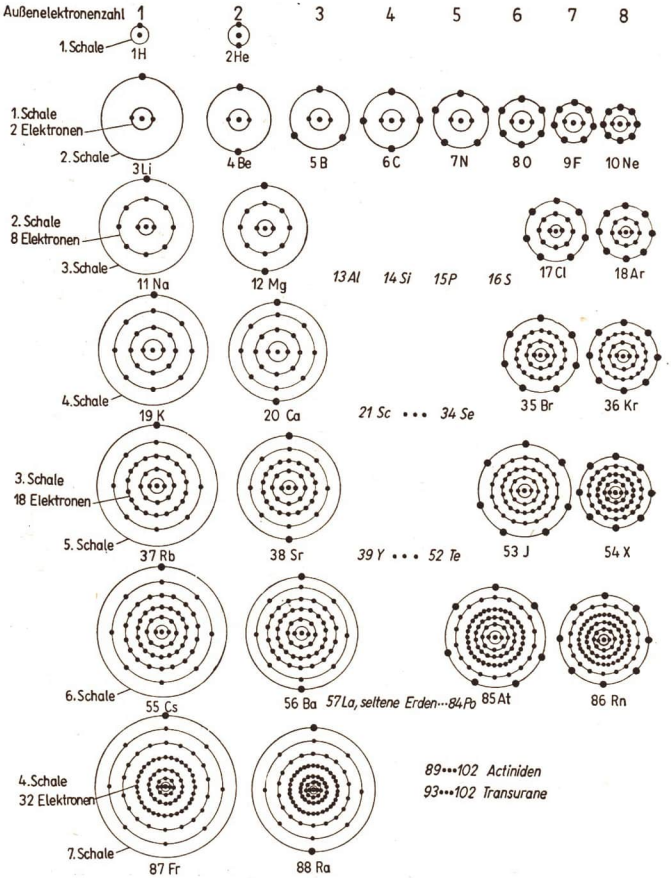


Abb. 220/1. Schalenaufbau der Atome

6. Fragen und Aufgaben:

1. Die Ladung einer Taschenlampenbatterie beträgt 3600 C. Wieviel Elektronen haben zusammen die gleiche Ladung?
2. Wodurch unterscheidet sich das Bohrsche Atommodell vom Rutherfordschen?
3. Bilden Sie einen anschaulichen Vergleich für die Größenverhältnisse zwischen Atomkern und Atom in der Größenordnung des Klassenzimmers!
4. Erklären Sie mit Hilfe des Bohrschen Atommodells die Entstehung eines Linienspektrums! Warum faßt man bestimmte Spektrallinien zu einer Serie zusammen?
5. Aus welchen Angaben kann man die Anzahl der Elektronen eines neutralen Atoms und die Ladung des Atomkerns bestimmen? Nennen Sie Beispiele aus dem Periodensystem!

52. Der Bau der Atomkerne — Die Isotope

1. Die Protonen. Die ersten Erkenntnisse über den Aufbau der Atomkerne gewann *Rutherford* im Jahre 1919 auf Grund des folgenden Versuchs. Er ließ α-Teilchen, die von Radon ausgestrahlt wurden, durch Stickstoff hindurchgehen (Abb. 221/1). *Rutherford* beobachtete, daß aus dem Stickstoffbehälter durch ein Fenster aus Silber Strahlen austraten, die noch in 40 cm Entfernung vom radioaktiven Präparat einen Szintillationsschirm zum Leuchten brachten. Diese Szintillationen konnten aber nicht durch die α-Teilchen des Radon ausgelöst worden sein, da deren Reichweite nur etwa 6,3 cm beträgt.

Die Aufnahmen der Spuren der α-Teilchen in einer mit Stickstoff gefüllten Wilsonschen Nebelkammer zeigten die geradlinigen dicken Spuren der α-Teilchen, die nach einer für alle Teilchen fast gleichen Strecke in der Gasfüllung endeten (Abb. 221/2). Lediglich

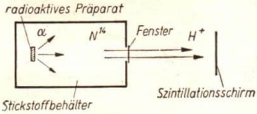


Abb. 221/1
Der Versuch von Rutherford

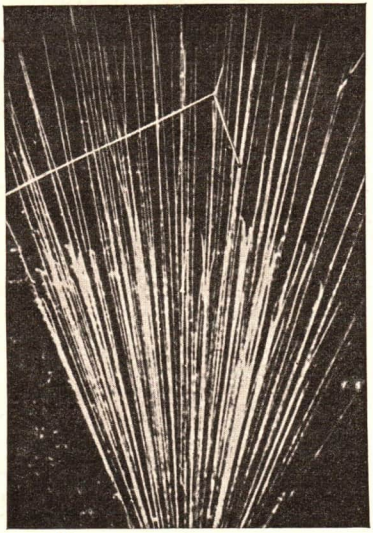


Abb. 221/2. Nebelkammeraufnahme der ersten Kernreaktion

am Ende der Bahn traten manchmal Änderungen in der Flugrichtung auf, die eine Ablenkung der doppelt positiv geladenen α-Teilchen infolge eines kurzzeitigen Zusammenstoßes mit einem Stickstoffkern anzeigten. Unter Tausenden von Aufnahmen waren jedoch auch einige, auf denen eine Gabelung der Nebelspur zu sehen war. Unter verschiedenen Winkeln zur ursprünglichen Bahn des α-Teilchens liefen von einem Punkt dieser Bahn zwei verschiedene geradlinige Spuren aus; die ursprüngliche Bahn gabelte sich in zwei Äste. Der eine Ast war kurz und dick wie eine Spur schwerer Teilchen; der andere war stärker als die Spur eines Elektrons, gegenüber der Spur des α-Teilchens aber relativ dünn und sehr lang. Durch weitere Versuche in elektrischen und magnetischen Feldern konnte man die Masse und die Ladung dieses Teilchens bestimmen. Es hatte vermutlich die Lichtblitze auf dem Schirm verursacht. Man fand, daß es sich um den leichtesten Atomkern, den Wasserstoffkern, handelte. Man bezeichnet ihn als **Proton** und gibt ihm das Symbol p.

Die Masse des Protons beträgt etwa $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-24}$ g. Sie ist 1836,3 mal so groß wie die des Elektrons. Das Proton hat eine positive Elementarladung (+e).

Rutherford deutete das Ergebnis dieser Versuche folgendermaßen: Die α-Teilchen haben eine hohe Geschwindigkeit und damit eine große kinetische Energie. Diese Energie ist so groß, daß ein α-Teilchen trotz der abstoßenden Kräfte zwischen ihm und dem positiv geladenen Kern in einen Bereich eindringen kann, in dem andersartige Kraftwirkungen auftreten als in der weiteren Umgebung des Kerns. Wie überall in der Natur führt auch hier eine quantitative Änderung, nämlich die Änderung des Abstandes vom Kern, zu einer qualitativen Änderung, zur Änderung der Kraftwirkung. Statt abgestoßen zu werden, wird das Teilchen jetzt vom Kern aufgenommen; man sagt, *es wird vom Kern eingefangen*. Der dadurch neugebildete Kern zerfällt in dem erwähnten Beispiel in außerordentlich kurzer Zeit unter Aussendung eines Protons, das die lange dünne Spur verursacht. Es entsteht wiederum ein neuer Kern, der in der Nebelkammer die kurze dicke Spur hinterläßt. Den gesamten Vorgang bezeichnet man als **Kernreaktion** (vgl. S. 235). Durch solche Kernreaktionen gelang es, auch aus anderen Kernen leichter Elemente Protonen frei zu machen. Daraus folgerte man:

Alle Atomkerne enthalten Protonen.

Zu der Erkenntnis, daß das Atom nicht unteilbar ist, kam nun die neue Feststellung, daß auch *der Atomkern teilbar ist* und sich aus einzelnen Teilchen zusammensetzt.

2. Die Entdeckung des Neutrons. Wenn im Atomkern Teilchen mit gleichartigen Ladungen vorhanden sind, müssen sich diese Teilchen nach den bisherigen Kenntnissen abstoßen. Andererseits halten aber die Atomkerne der nicht radioaktiven Stoffe fest zusammen. Infolge dieses Widerspruchs ergab sich die Frage: wodurch halten die Atomkerne trotz gleichartig geladener Teilchen so außerordentlich fest zusammen? Man vermutete, daß die Atomkerne nicht nur aus Protonen zusammengesetzt sein können.

Irène und *Frédéric Joliot-Curie* untersuchten das Verhalten von Atomen beim Beschuß mit α-Teilchen. Sie ließen α-Strahlen aus Polonium auf ein Beryllium-Präparat fallen. Dabei ergab sich, daß außer einer bei diesem Prozeß schon bekannten γ-Strahlung noch weitere, besonders intensive Strahlen ausgesandt wurden; die ionisierende Wirkung der Gesamtstrahlung war nämlich größer, als es bisher bekannt war. Die neuen Strahlen unterschieden sich von den α- und β-Strahlen hauptsächlich

durch ihr hohes Durchdringungsvermögen. Sie gingen zum Beispiel durch Bleischichten hindurch, welche die α-Strahlen und β-Strahlen vollständig absorbierten. Da man die neuen Strahlen im Magnetfeld nicht ablenken konnte, hielt man sie zunächst für γ-Strahlen sehr kurzer Wellenlänge, also mit hoher Energie. Diese Annahme war aber nicht mit den weiteren Versuchsergebnissen in Einklang zu bringen, die man mit den Strahlen gewann. So lösten sie beispielsweise aus Paraffin Protonen aus, was durch γ-Strahlen nicht möglich sein konnte.

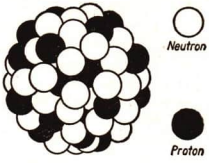


Abb. 223/1
Modell eines Atomkerns

Der englische Physiker *Chadwick* wies 1932 auf Grund von Berechnungen nach, daß die unbekannte Strahlung aus jenen ungeladenen Teilchen besteht, nach denen bereits *Rutherford* im Jahre 1920 vergeblich gesucht hatte. Man nennt diese Teilchen **Neutronen**, ihr Symbol ist n.

Das Neutron ist ungeladen und hat die Masse $m_n = 1{,}67 \cdot 10^{-24}$ g. Seine Masse ist etwa 0,15 Prozent größer als die des Protons.

Auf Grund der Versuche *Rutherfords* und des Ehepaares *Joliot-Curie* stellten *Iwanenko* und *Heisenberg* 1932 unabhängig voneinander die Hypothese auf, daß *die Atomkerne aus Neutronen und Protonen zusammengesetzt sind.* Heute steht fest:

Neutronen und Protonen sind die Bausteine der Atomkerne (Abb. 223/1).

Für beide Teilchen verwendet man auch die Bezeichnung **Nukleonen.**

3. Allgemeine Eigenschaften des Atomkerns. Zu den wichtigsten Eigenschaften eines Atomkerns gehören seine *Masse* und seine *Ladung.* Die Kernladung wird bekanntlich durch die Anzahl der Protonen bestimmt, die der Kern enthält. Die Protonenzahl im Kern heißt Kernladungszahl (Z). *Die Kernladung ist daher das Produkt aus der Elementarladung e und der Kernladungszahl Z.*

Die Masse des Kerns wird durch die Anzahl der Nukleonen bestimmt. Sie wird meistens nicht in Gramm, sondern im Vergleich zu der Masse eines Sauerstoffatoms angegeben. Man erhält dadurch eine Reihe von Vergleichszahlen für die Kernmasse, die auch als relatives Atomgewicht (kurz Atomgewicht) bezeichnet werden.

Die Einheit der Kernmasse ist gleich $\frac{1}{16}$ der Masse des Sauerstoffatoms, dessen Kern aus 8 Protonen und 8 Neutronen besteht. (1 Einheit $= 1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g.)

Eine Einheit ist also etwas geringer als die Masse eines Protons beziehungsweise eines Neutrons:

$$m_n = 1{,}00898 \text{ Einheiten} \quad \text{und} \quad m_p = 1{,}00759 \text{ Einheiten.}$$

Die Massen einiger anderer Kerne sind in der Tabelle auf S. 224 zusammengestellt. *Atommassen und Atomkernmassen unterscheiden sich um die Masse der Elektronen.*

Die auf eine ganze Zahl abgerundete Kernmasse bezeichnet man als Massenzahl A des Kerns. Sie ist gleich der Anzahl der Nukleonen.

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}

Die Massenzahl A ist die Summe der Neutronen- und Protonenzahl. Die Differenz zwischen der Massenzahl A und der Kernladungszahl Z ist die Neutronenzahl N.

$$A = N + Z, \quad N = A - Z.$$

Die beiden Werte A und Z charakterisieren den Aufbau eines Kerns (vgl. die obenstehende Tabelle).

Da sich über die äußere Gestalt der Kerne nur wenige Aussagen machen lassen, nimmt man für sie die Gestalt an, aus der sich die geringsten Folgerungen ergeben: die Kugel. Die Kugel ist der einfachste und regelmäßigste Körper. Bei jeder anderen Gestalt würden sich sofort Folgerungen ergeben, die man z. Z. noch nicht genügend überprüfen kann. Der Radius der Kerne hängt von der Massenzahl A ab. Je größer A ist, um so größer ist auch der Kernradius. Der einfachste Kern, das Proton, hat einen Radius von $r_p = 1{,}3 \cdot 10^{-13}$ cm. Der Radius des U^{238}-Kerns mit 238 Nukleonen beträgt $r_U = 8 \cdot 10^{-13}$ cm.

Da der Atomkern auf engstem Raum fast die ganze Masse des Atoms enthält, ist *seine Dichte sehr groß*. Die mittlere Dichte der Atomkerne hat den unvorstellbar hohen Wert von $2 \cdot 10^{14} \frac{g}{cm^3}$ (siehe Aufgabe 5 auf S. 226).

4. Die Isotope. Nach unseren bisherigen Erkenntnissen müßten die Massen der Atome nahezu ganzzahlige Werte sein. Die „Atomgewichte" der chemischen Elemente weichen aber meist erheblich von ganzen Zahlen ab. Die Atomkerne eines Elementes haben nämlich *nicht alle die gleiche Anzahl von Neutronen*, sondern stimmen nur in der Anzahl der Protonen überein. So gibt es zum Beispiel Eisenatome mit 29 Neutronen, aber auch solche mit 28 und 30 Neutronen. Man nennt solche Atome des gleichen Elementes, die sich nur durch ihre Neutronenzahl unterscheiden, **Isotope**. Isotope sind Elemente, die auf Grund gleicher Protonenzahl beziehungsweise Kernladungszahl an derselben Stelle des Periodischen Systems stehen. Sie haben verschiedene physikalische Eigenschaften, verhalten sich aber chemisch gleichartig.

Isotope sind Elemente mit Kernen gleicher Protonenzahl, aber verschiedener Neutronenzahl. Sie unterscheiden sich in ihren chemischen Eigenschaften nicht.

Mehr als ein Drittel aller in der Natur vorkommenden Elemente sind Gemische aus verschiedenen Isotopen mit einem bestimmten Mischungsverhältnis. Chlor zum Beispiel besteht aus zwei Isotopen mit den Massenzahlen 35 und 37, die in einem Häufigkeitsverhältnis von ungefähr 3 : 1 stehen. Für Chlor ergibt sich daher ein Atomgewicht von 35,457. Von Zinn sind sogar 10 Isotope bekannt.

Weil es sich bei den meisten Elementen um Isotopengemische handelt, führt die Bestimmung der Atomgewichte auf chemischem Wege zu großen Abweichungen von ganzen Zahlen. Die Atomgewichte hängen davon ab, mit welcher relativen Häufigkeit die verschiedenen Isotope eines Elements in dem Gemisch enthalten sind.

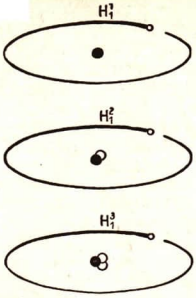


Abb. 225/1. Die Isotope des Wasserstoffs

Auch der Wasserstoff hat 3 Isotope: H_1^1, H_1^2 und H_1^3 (Abb. 225/1). In der Natur kommt in der Hauptsache der *leichte Wasserstoff* (H_1^1) vor. In sehr geringen Mengen findet man *schweren Wasserstoff* (H_1^2). Man bezeichnet ihn auch als *Deuterium* (D). In dem natürlichen Wasser (H_2O) sind stets geringe Mengen des sogenannten *schweren Wassers* (D_2O) enthalten. Beide Arten lassen sich durch Elektrolyse trennen. Aus 5000 l Wasser kann man etwa 1 l schweres Wasser gewinnen. Schweres Wasser hat andere physikalische Eigenschaften, beispielsweise einen höheren Gefrierpunkt (3,8 °C) und einen höheren Siedepunkt (101,0 °C). Es gibt noch ein drittes Wasserstoffisotop (H_1^3), das man als *Tritium* (T) bezeichnet. In geringen Spuren kommt es in der Erdatmosphäre vor. Die Kerne der schweren und überschweren Wasserstoffatome bezeichnet man als *Deuteronen* und *Tritonen*.

Alle Isotope lassen sich trennen. Zur *Isotopentrennung* gibt es verschiedene Verfahren, die auf den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Isotope beruhen. Das älteste und bekannteste Gerät zur Isotopentrennung ist der *Massenspektrograph*, der bereits 1919 von dem englischen Physiker *Aston* entwickelt wurde (Abb. 225/2). Dieses Gerät beruht auf der Tatsache, daß bewegte Teilchen gleicher Ladung, aber unterschiedlicher Masse in elektrischen und magnetischen Feldern verschieden stark abgelenkt werden. Aus einem starken Ionenstrom des zu untersuchenden Isotopengemisches wird durch ein Blendensystem ein schmaler Strahl ausgesondert. Die Ionen treten in das elektrische Feld eines Kondensators und werden beschleunigt. Dabei wird der Strahl aus seiner ursprünglichen Richtung parabelförmig abgelenkt. Bei Teilchen gleicher Masse hängt die Größe der Ablenkung von der *Länge des Weges* der Ionen im Feld, von *der Stärke des Feldes* und der

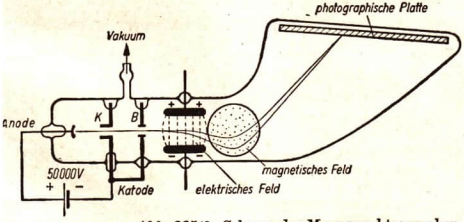


Abb. 225/2. Schema des Massenspektrographen

Geschwindigkeit der Ionen ab. Teilchen mit hoher Geschwindigkeit werden weniger stark abgelenkt als Teilchen mit niedriger Geschwindigkeit. Nach Passieren des elektrischen Feldes tritt der ausgesonderte Strahl in ein Magnetfeld ein. Die Feldlinien des Magnetfeldes stehen senkrecht auf den Feldlinien des elektrischen Feldes und bewirken eine fächerförmige Aufspaltung der Bahnen. An der Austrittsstelle des Strahls aus den Feldern befindet sich eine Fotoplatte. Besteht nun der Strahl aus Teilchen unterschiedlicher Masse, dann kann man durch eine geeignete Abmessung und Anordnung der Felder und der Fotoplatte erreichen, daß Ionen unterschiedlicher Geschwindigkeit, aber gleicher Masse auf den gleichen Punkt der Fotoplatte auftreffen. Man erhält Aufnahmen, die mit den optischen Linienspektren vergleichbar sind.

Sowohl radioaktive als auch stabile Isotope werden in Wissenschaft und Technik häufig angewendet. Dazu braucht man sie unvermischt oder wenigstens in einem Mischungsverhältnis, das man gegenüber dem natürlichen Verhältnis als *angereichert* bezeichnet. Außerdem müssen die Isotope in genügender Menge zur Verfügung stehen. Der Massenspektrograph liefert zwar Isotope in reinster Form, aber nicht in genügender Menge. Man erhält mit ihm nur geringe Mengen, zum Beispiel einige Zehntel Gramm je Stunde. Da man aber größere Mengen von Isotopen in kurzer Zeit benötigt, hat man zahlreiche andere Methoden der Isotopentrennung ausgearbeitet. Professor *Gustav Hertz*, Nobel- und Leninpreisträger, hat eine Diffusionsmethode entwickelt, die bei gasförmigen Isotopen angewendet wird.

Diese Diffusionsmethode beruht darauf, daß leichte Gase durch geeignete Filter schneller diffundieren als schwere Gase. Durch Hintereinandersetzen sehr vieler Diffusionsstufen kann man zum Beispiel aus dem Isotopengemisch Uran der Verbindung Uranhexafluorid (UF_6) die Isotope U^{235} und U^{238} gewinnen (Abb. 226/1).

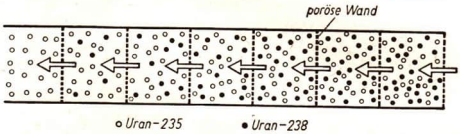


Abb. 226/1. Schematische Darstellung einer Stufendiffusion

5. Fragen und Aufgaben:

1. Der natürliche Sauerstoff der Luft besteht aus drei Isotopen: zu 99,76 % aus O^{16}, zu 0,04 % aus O^{17} und zu 0,20 % aus O^{18}. Beschreiben Sie den Aufbau der Sauerstoffkerne und unterscheiden Sie die Nukleonen! Erklären Sie an diesem Beispiel, woraus sich das chemische Atomgewicht des Sauerstoffes ergibt!
2. Beschreiben Sie den Aufbau der folgenden Atomkerne:
$$H^1_1,\ C^{12}_6,\ N^{13}_7,\ Co^{60}_{27},\ Ni^{60}_{28},\ Au^{197}_{79},\ H^2_1,\ Hg^{197}_{80},\ Hg^{204}_{80},\ C^{13}_6!$$
Stellen Sie Kerne gleicher Ordnungs- beziehungsweise Massenzahl zusammen und erklären Sie die Unterschiede!
3. Schildern Sie die Versuche, die zur Entdeckung der Neutronen führten!
4. Erklären Sie die große Dichte der Atomkerne! Warum ist die Dichte aller Stoffe wesentlich kleiner?
5. Die jährliche Weltproduktion an Eisen beträgt zur Zeit etwa $4 \cdot 10^8$ t. Wie groß ist der Würfel, in dem alle Atomkerne dieser Eisenmenge, dicht neben- und übereinander gepackt, Platz haben? Die Masse der Elektronen ist zu vernachlässigen.

53. Der natürliche radioaktive Zerfall der Atomkerne — Die künstliche Radioaktivität

1. Die Gesetzmäßigkeiten des Zerfalls. Da die α- und β-Strahlen aus Masseteilchen bestehen, müssen die Atomkerne der radioaktiven Stoffe Teilchen aussenden und sich verändern. Man spricht daher von einem *radioaktiven Zerfall der Atomkerne.* Mit den neuen veränderten Kernen entstehen auch neue Elemente. Schon *Marie* und *Pierre Curie* stellten bei ihren Untersuchungen fest, daß außer dem ursprünglichen radioaktiven Element neue, vorher nicht vorhandene Elemente nachweisbar sind (s. S. 208).

Alle Elemente, deren Atomkerne selbständig radioaktiv zerfallen, nennt man **natürliche radioaktive Elemente.** Außer den zuerst bekannten Elementen *Uran, Radium, Polonium* und *Thorium* wurden noch andere radioaktive Elemente entdeckt, die am Ende des Periodensystems stehen. Dazu kamen später noch einige Elemente mit mittleren beziehungsweise kleinen Atomgewichten. Heute kennt man etwa 50 natürliche radioaktive Elemente.

Bald nach der Entdeckung der Radioaktivität beschäftigten sich die Forscher mit der Frage, ob es beim radioaktiven Zerfall eine Gesetzmäßigkeit gibt. Viele Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß *von einer bestimmten Menge eines radioaktiven Elements in gleichen Zeitabschnitten immer der gleiche Anteil zerfällt.* So zerfällt beispielsweise von 1 g Ra innerhalb von 1590 Jahren $\frac{1}{2}$ g; innerhalb der nächsten 1590 Jahre zerfällt von dem restlichen $\frac{1}{2}$ g wieder die Hälfte, also $\frac{1}{4}$ g usw. Man hat es nun für zweckmäßig gehalten, die Zeit, in der jeweils die Hälfte der vorhandenen Atome eines radioaktiven Elements zerfallen, als charakteristische Größe für den Zerfall festzulegen. Man nennt sie die **Halbwertszeit.** Wie aus der nachstehenden Tabelle hervorgeht, sind die Halbwertszeiten verschiedener radioaktiver Stoffe sehr unterschiedlich. Sie umfassen die verschiedensten Zeitabschnitte zwischen etwa 10^{-6} s und 10^{9} Jahren.

Einige Halbwertszeiten (vgl. Abb. 228/1)

Element	Halbwertszeit
U	$4{,}5 \cdot 10^{9}$ Jahre
Ra	1590 Jahre
Rn	3,82 Tage
RaC′	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$ s

2. Die radioaktiven Zerfallsreihen. Bald nach der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität untersuchte man die chemischen Eigenschaften der Zerfallsprodukte. Man fand, daß je nach der Art des radioaktiven Zerfalls neue Elemente entstehen.

1. Ein α-Teilchen hat etwa die Masse von vier Atomgewichtseinheiten und die Ladung von zwei positiven Ladungseinheiten. *Daher nimmt bei einem α-Zerfall die Ordnungszahl des zerfallenden Elements um zwei Einheiten ab, während sich das Atomgewicht um vier Einheiten verringert.* Es entsteht also ein neues Element, das im Periodensystem um zwei Stellen weiter links steht als das ursprüngliche.

2. *Bei einem β-Zerfall nimmt die Ordnungszahl um eine Einheit zu, während die Masse fast unverändert bleibt.* Da nämlich das β-Teilchen aus dem Kern stammt, wird damit dem Kern eine negative Ladung entzogen, oder anders ausgedrückt, die Kernladungszahl steigt um 1. Beim β-Zerfall entsteht ein Element, das um eine Stelle weiter rechts steht als das ursprüngliche.

3. Die γ-Strahlung tritt beim radioaktiven Zerfall nur in Verbindung mit dem α- oder β-Zerfall auf. Der β-Zerfall ist die häufigste Form der Radioaktivität. Bei jedem Zerfallsprozeß werden jeweils nur ein α-Teilchen oder ein β-Teilchen, in seltenen Fällen beide Teilchen gleichzeitig von einem Kern ausgesendet.

Da aus einem radioaktiven Kern sehr oft wieder ein radioaktiver Kern entsteht, gibt es mehrere Reihen radioaktiver Elemente, sogenannte *radioaktive Zerfallsreihen*, auch *Familien* genannt. In diesen Reihen entsteht, abgesehen vom ersten Glied, jedes Element aus einem vorhergehenden. Im Gebiet der schweren Atome gibt es vier Reihen, bei denen jeder Kern, ausgehend von einem Stammatomkern, durch natürliche Radioaktivität aus dem vorhergehenden entsteht. Das Ende einer solchen Familie ist ein stabiler, das heißt nicht radioaktiver Kern. In Abbildung 228/1 sind jeweils die Art des Zerfalls und die entsprechende Halbwertszeit vermerkt. In den Kreisen sind die Atome eingezeichnet.

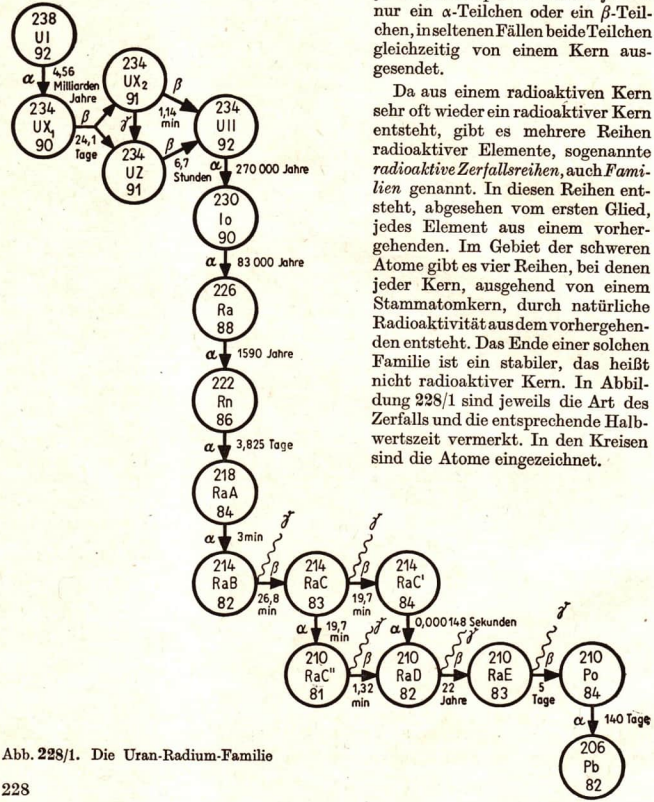
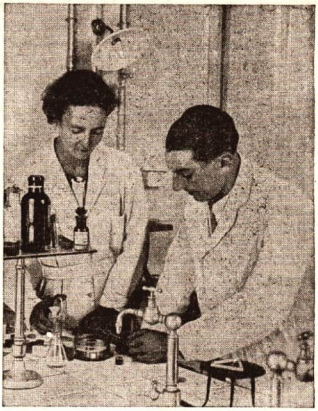


Abb. 228/1. Die Uran-Radium-Familie

Irène (1897 bis 1956) und
Frédéric Joliot-Curie (1900 bis 1958)



3. Die künstliche Radioaktivität. Im Jahre 1932 ließ das französische Forscherehepaar *Irène* und *Frédéric Joliot-Curie* α-Teilchen von einem Poloniumpräparat auf Aluminiumatome einwirken. Dabei stellten sie zunächst eine starke Neutronenstrahlung fest. Der Vorgang läßt sich durch die folgende Reaktionsgleichung, ähnlich wie in der Chemie, darstellen:

$$Al_{13}^{27} + He_2^4 \rightarrow P_{15}^{30} + n_0^1.$$

Außerdem beobachteten sie in der Nebelkammer dünne Bahnen, wie sie von Elektronen erzeugt werden. Die Ablenkung in einem elektrischen Feld ergab jedoch, daß diese Teilchen positive Ladung hatten. Solche Teilchen hatte man kurz vorher in der aus dem Weltraum stammenden *Höhenstrahlung* mit Hilfe von Nebelkammeraufnahmen entdeckt. Jetzt waren sie erstmalig bei einem Kernumwandlungsprozeß auf der Erde festgestellt worden. Man nennt diese Teilchen **Positronen** (e_{+1}^0 oder e^+).

Das Positron hat die gleiche Masse, aber die entgegengesetzt gleiche Ladung wie das Elektron. Beide Teilchen werden auch als positive beziehungsweise negative Elektronen bezeichnet (β^+, β^-).

Nach Entfernen des radioaktiven Präparats hörte zwar, wie zu erwarten war, die Neutronenstrahlung sofort auf, die Positronenstrahlung aber dauerte an. Ihre Intensität nahm wie bei der natürlichen radioaktiven Strahlung ab. Die Halbwertszeit betrug 130,6 s. Das aus Al_{13}^{27} durch den Beschuß mit α-Teilchen entstandene Phosphorisotop P_{15}^{30} ist instabil. Es zerfällt unter Aussendung eines Positrons in einen stabilen Siliziumkern:

$$P_{15}^{30} \rightarrow Si_{14}^{30} + e_{+1}^0.$$

In dem Phosphorkern muß sich also *ein Proton in ein Neutron und ein Positron verwandelt haben*:

$$p_1^1 \rightarrow n_0^1 + e_{+1}^0.$$

Bei Kernreaktionen können radioaktive Kerne entstehen. Diese Erscheinung heißt künstliche Radioaktivität. Man kennt bisher rund 1000 verschiedene künstlich radioaktive Kerne.

Beim Vergleich der Zusammensetzung radioaktiver und nicht radioaktiver Kerne stellt man fest, daß *nur Kerne mit einem bestimmten Verhältnis der Protonen- (Z) zur Neutronenzahl (N) stabil sind.* Wird durch eine Kernreaktion die Zahl der

Protonen oder Neutronen und damit das Verhältnis $Z : N$ geändert, so kann ein instabiler Kern entstehen. Bei diesem Kern ändert sich das Verhältnis dann wieder: *Bei Protonenüberschuß wandelt sich ein Proton in ein Neutron um, bei Neutronenüberschuß umgekehrt ein Neutron in ein Proton.* Dabei wird jeweils ein Positron beziehungsweise ein Elektron ausgesendet. Man sagt, die Kerne sind β^+-aktiv beziehungsweise β^--aktiv.

Kerne mit einem Überschuß (Mangel) an Protonen sind β^+-aktiv (β^--aktiv). Nur künstlich radioaktive Isotope sind β^+-aktiv.

Wenn beim Übergang eines instabilen Kerns in einen stabilen die frei werdende Energie nicht vollständig auf das ausgestrahlte Teilchen übertragen wird, gibt der entstehende Kern die restliche Energie in Form von γ-Strahlung ab.

Bei vielen radioaktiven β-Strahlern ist die Umwandlung in ein stabiles Isotop von einer γ-Strahlung begleitet.

Damit ist es den Wissenschaftlern gelungen, die früher unerklärbaren Vorgänge bei der natürlichen und künstlichen Radioaktivität zu erklären.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Geben Sie für den Zerfall von 1 g bis zu $\frac{1}{16}$ g Rn die einzelnen Zerfallszeiten an und erläutern Sie daran den Begriff der Halbwertszeit (vgl. Tabelle auf S. 227)!
2. Stellen Sie die Thorium-Zerfallsreihe nach dem Beispiel der Abbildung 228/1 auf! Ausgangskern ist Th^{232}_{90}. Die zu den einzelnen Gliedern der Reihe führenden Strahlenarten sind:

$$\alpha, \beta, \beta, \alpha, \alpha, \alpha, \begin{cases} \alpha - \beta - \alpha - \beta \\ \beta - \alpha - \beta - \alpha \end{cases}$$

   Der Endkern ist Pb^{208}_{82}. Zu welchen Elementen gehören die einzelnen Glieder der Reihe?
3. Das radioaktive Wasserstoffisotop H^3_1 wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 12,46 Jahren unter Aussendung eines Elektrons in He^3_2 um. Geben Sie die Reaktionsgleichung an und zeigen Sie, daß sich dabei ein Neutron in ein Proton verwandelt!
4. Welcher grundsätzliche Unterschied besteht zwischen der natürlichen und der künstlichen Radioaktivität, und worin stimmen sie überein?

54. Beschleuniger

1. Das Zyklotron. Zur Durchführung von Kernumwandlungen werden energiereiche Teilchen als Geschosse benötigt. Zur Gewinnung energiereicher geladener Teilchen wurden im Laufe der Entwicklung der Kernphysik eine große Anzahl sinnreicher Geräte gebaut, die zum Teil gewaltige Ausmaße angenommen haben.

Solche *Beschleunigungsanlagen* beruhen unter anderem darauf, daß man geladene Teilchen in einem elektrischen Feld beschleunigen kann. Die kinetische Energie bewegter Teilchen ist bekanntlich dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional. Wenn daher genügend hohe Spannungen zur Verfügung stehen, kann man energiereiche Teilchen erhalten. Die Erzeugung sehr hoher Spannungen ist aber durch Isolationsschwierigkeiten begrenzt. Die Erzeugung einer Spannung von 3 bis 4 Millionen Volt erfordert bereits einen beträchtlichen Materialaufwand. Derartig hohe Span-

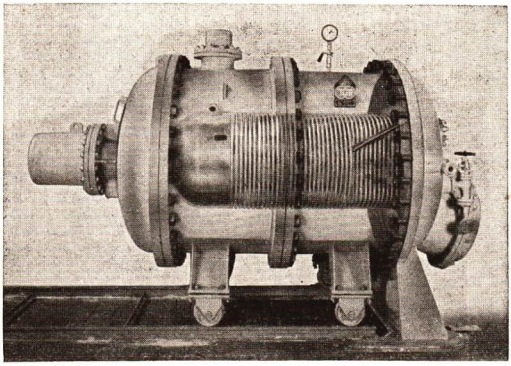


Abb. 231/1
Van de Graaf-scher Generator für 1,5 Millionen Volt, entwickelt im Forschungsinstitut „Manfred von Ardenne", Dresden

nungen erzeugt man mit einem *van de Graafschen Generator* (Abb. 231/1). Bei dieser Spannung erhält man zum Beispiel Protonen mit einer Energie von 3 bis 4 MeV. Diese Energie ist etwa halb so groß wie die von α-Strahlen aus einem natürlichen radioaktiven Zerfall.

Da die Erhöhung der Energie mit Hilfe sehr hoher Spannungen technisch sehr schwierig ist, *beschleunigt man die Teilchen in mehreren Stufen.* Dabei sind keine sehr großen Beschleunigungsspannungen erforderlich. Dieses Prinzip der mehrmaligen Beschleunigung ist zum Beispiel beim *Zyklotron* verwirklicht. In einer Vakuumkammer befinden sich in horizontaler Lage zwei Elektroden, die die Form der Hälften einer in der Mitte getrennten Schuhkremdose haben (Abb. 231/2). An diesen beiden Dosenhälften, den sogenannten *Duanten* oder *D's*, liegt eine Wechselspannung. Sie verursacht im Raum zwischen den beiden D's ein elektrisches Feld, das sich in der Richtung periodisch ändert. Durch einen großen Elektromagneten wird außerdem ein unveränderliches Magnetfeld erzeugt, dessen Richtung vertikal verläuft. Die Ionen, die man beschleunigen will, läßt man aus einer Öffnung in der Mitte des Spaltes zwischen den Duanten in den Ionenraum eintreten. Dort wird zum Beispiel Heliumgas eingelassen und ionisiert, so daß die zu beschleunigenden α-Teilchen entstehen.

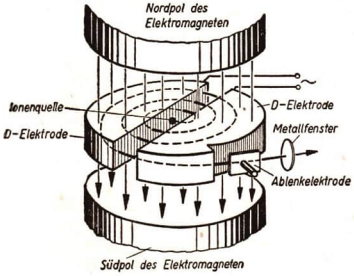


Abb. 231/2
Anordnung eines Zyklotrons (schematisch)

Diese α-Teilchen werden von dem elektrischen Feld zwischen den beiden D's

beschleunigt und gelangen in den Raum innerhalb der D's. Dort wirkt auf die Teilchen nur das Magnetfeld. Da sich die Ionen senkrecht zum Magnetfeld bewegen, werden sie so abgelenkt, wie ein elektrischer Strom in einem Magnetfeld. Die Ionen bewegen sich daher innerhalb der D's auf einer Kreisbahn. Dabei ergibt sich eine Zentrifugalkraft, die gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet ist wie die durch das Magnetfeld bedingte Kraft. Da die Größe der Zentrifugalkraft von der Geschwindigkeit der Teilchen abhängt, wird der Radius der Teilchenbahn durch die Geschwindigkeit festgelegt. Die Umlaufdauer eines Teilchens ist konstant. Das bedeutet, daß die Zeit zwischen zwei Durchgängen durch den Beschleunigungsspalt gleichbleibt. Die Teilchen lassen sich daher beschleunigen, wenn die an den D's liegende Wechselspannung im gleichen Zeitabstand ihr Vorzeichen wechselt. Die Umlaufsfrequenz der Teilchen und die Frequenz der beschleunigten Wechselspannung müssen übereinstimmen.

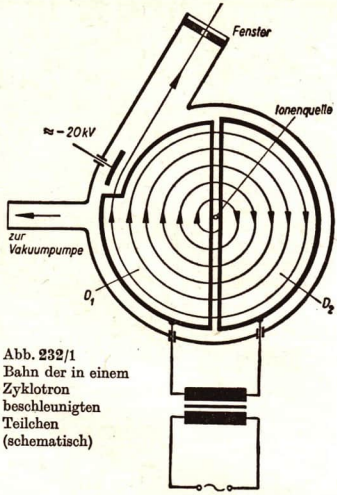


Abb. 232/1
Bahn der in einem Zyklotron beschleunigten Teilchen (schematisch)

Bei jedem Durchgang durch die Beschleunigungsstrecke, den Spalt, nimmt die Geschwindigkeit eines Teilchens zu. Dadurch wächst auch der Radius der Umlaufbahn, so daß sich das beschleunigte Teilchen auf einer spiralenähnlichen Bahn von innen nach außen bewegt (Abb. 232/1).

Bringt man in eine äußere Teilchenbahn eine Materialprobe, so treffen die energiereichen Teilchen auf diese Probe und können darin Kernumwandlungen hervorrufen.

Die energiereichen Teilchen können aber auch mittels einer elektrisch geladenen Platte, einer sogenannten *Ablenkelektrode*, aus der Zyklotronkammer herausgelenkt werden und durch ein dünnes Metallfenster in die Luft eintreten. Da die Teilchen Luftmoleküle ionisieren, entsteht am Austrittsfenster des Zyklotrons ein leuchtendes Strahlenbündel (Abb. 233/1). Außerhalb des Zyklotrons werden dann die energiereichen Teilchen für weitere Versuche verwendet. Der Elektromagnet des ersten Zyklotrons unserer Republik hat ein Gewicht von 120 Mp. Der größte Teilchenbahnradius beträgt 105 cm. α-Teilchen können mit diesem Zyklotron so beschleunigt werden, daß sie eine Energie von 25 MeV haben. Die mit einem Zyklotron erreichbare Teilchenenergie ist nach oben begrenzt.

Eine Abwandlung des Zyklotrons ist das *Synchrozyklotron* oder *Phasotron*. Bei diesem Gerät wird die Frequenz des elektrischen Wechselfeldes in einem bestimmten Rhythmus geändert, oder wie man sagt, moduliert. Man hat nämlich festgestellt, daß Teilchen bei sehr hoher Geschwindigkeit eine größere Masse als im Ruhezustand haben. Daher muß man die Frequenz des Wechselfeldes dieser Masseänderung anpassen, damit die Richtungsänderung des Feldes immer im richtigen Zeitpunkt erfolgt.

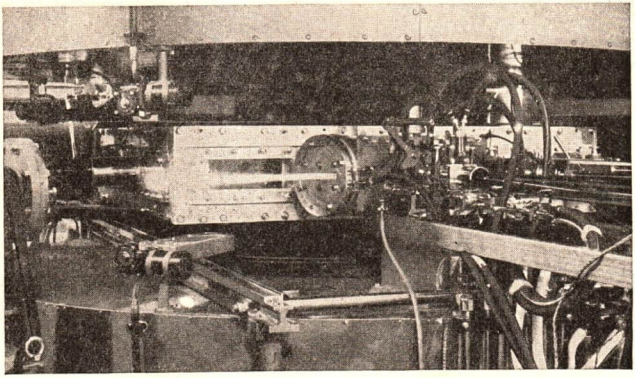


Abb. 233/1. Deuteronenstrahl

Abbildung 233/2 zeigt das größte Synchrozyklotron der Welt, das Protonen mit einer Energie von 680 MeV liefert. Der große Elektromagnet, der das Magnetfeld erzeugt, wiegt 7000 Mp. Das entspricht etwa dem Gewicht von 7 Güterzügen.

Aber noch größere Anlagen zur Beschleunigung geladener Teilchen wurden in den letzten Jahren gebaut. Abbildung 234/1 zeigt als eine der größten Anlagen das sowjetische *Synchrophasotron* in Dubna, auch *Protonensynchrotron* genannt. Mit Hilfe dieser Anlage erhält man Protonen mit einer Energie von 10000 MeV. Die Protonen laufen in einer ringförmigen Vakuumkammer auf einer Kreisbahn um, die einen Durchmesser von 56 m hat. Der Magnet hat einen Durchmesser von 60 m und wiegt 36000 Mp; er ist damit über fünfmal so schwer wie der des Synchrozyklotrons. Dieser riesige Magnet muß mit größter Präzision in die richtige Lage gebracht werden, damit die Protonen ihre kreisförmige Bahn einhalten. Abb. 234/2

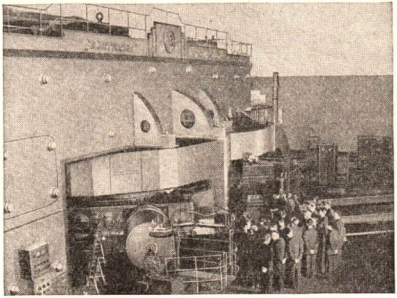


Abb. 233/2. Synchrozyklotron im Kernforschungsinstitut in Dubna bei Moskau

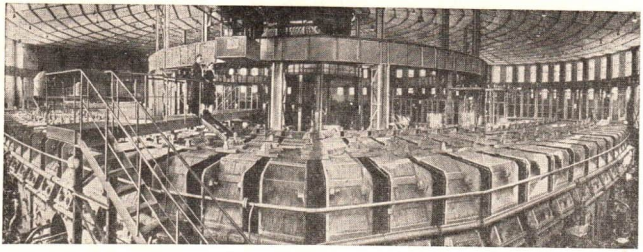


Abb. 234/1. Synchrophasotron

zeigt das Steuerpult der Anlage.

2. Das Betatron. Elektronen werden in einem *Betatron* beschleunigt. Das Betatron ähnelt im Prinzip einem Transformator. Schickt man durch die Primärspule eines

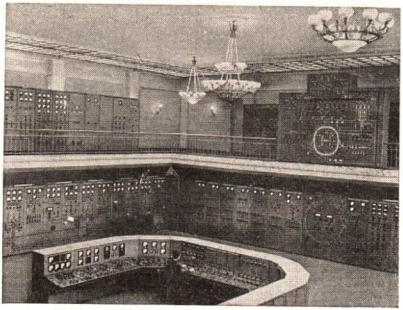


Abb. 234/2. Zentrale Steuerungsanlage des Synchrophasotrons in Dubna. Die Steuerung ist in einem besonderen Gebäude untergebracht.

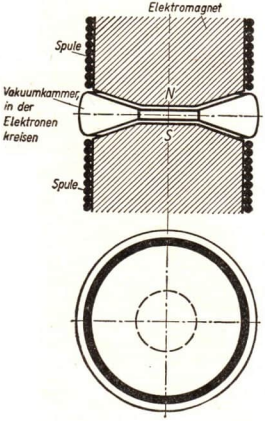


Abb. 234/.3 Schematische Darstellung eines Betatrons

Transformators einen Stromstoß, so wird in der Sekundärwicklung eine Induktionsspannung erzeugt. Ist die Sekundärwicklung geschlossen, so fließt ein elektrischer Strom.

Auch beim Betatron ist eine Primärspule vorhanden (Abb. 234/3). Der Induktionsstrom wird durch einen Strom geladener Teilchen, durch Elektronen, gebildet, die sich in einem ringförmigen Gefäß bewegen. Damit sich dieser Ringstrom ungestört ausbilden kann, muß das Gefäß luftleer sein. Durch ein soge-

nanntes *magnetisches Führungsfeld* werden die Elektronen ständig auf eine Kreisbahn gezwungen. Am Ende des Beschleunigungsvorganges kann man die energiereichen Elektronen dann für Versuche verwenden. Betatrons werden in sehr unterschiedlichen Größen gebaut, sowohl als sogenannte Tischgeräte wie auch als große Anlagen.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Vergleichen Sie die Energie von α-Teilchen aus einer natürlichen α-Strahlung mit der Energie von Teilchen aus Beschleunigungsanlagen!
2. Warum wendet man bei Beschleunigungsanlagen das Prinzip der mehrmaligen Beschleunigung an? Schildern Sie dieses Prinzip am Beispiel des Zyklotrons!
3. Welche grundsätzlichen Unterschiede bestehen zwischen der Wirkungsweise eines Zyklotrons und eines Betatrons?
4. Im Kernforschungsinstitut in Dubna arbeiten die Kernphysiker verschiedener sozialistischer Länder und benutzen unter anderem die großen Beschleunigungsanlagen gemeinsam. Welche Bedeutung hat diese gemeinsame Arbeit auch für unsere Republik?

55. Gewinnung der Kernenergie

1. Begriff und Ablauf einer Kernreaktion. Bei der natürlichen und künstlichen Radioaktivität beobachtet man einen Kernzerfall, wobei unter Aussendung von Strahlen neue Kerne entstehen. Auch bei von Natur aus stabilen Kernen kann man durch geeignete Mittel Kernumwandlungen erreichen. Diese Tatsache wurde im Jahre 1919 von *Rutherford* entdeckt (vgl. S. 221). Nach den Arbeiten dieses Forschers gingen die Physiker der Frage nach, ob man nicht auch mit anderen Geschoßteilchen bei anderen Elementen ebenfalls Kernumwandlungen durchführen kann. Es zeigte sich, daß dies zwar möglich, jedoch häufig mit sehr großen Schwierigkeiten bei der praktischen Durchführung verbunden ist.

Die Vorgänge, die sich ereignen, wenn ein Teilchen in den Wirkungsbereich eines Kernes gerät, bezeichnet man als Kernreaktion.

In den Versuchen von *Rutherford* drang ein α-Teilchen in den Kern ein; dabei entstand ein neuer Kern, und ein Proton wurde ausgesendet. Als Geschoßteilchen lassen sich außer α-Teilchen auch Protonen, Neutronen und die Kerne des schweren Wasserstoffisotops H^2_1, des Deuteriums, verwenden. Bei Kernreaktionen mit positiv geladenen Teilchen, zum Beispiel Protonen, müssen die Abstoßungskräfte zwischen dem zu treffenden Kern und dem Geschoßteilchen überwunden werden; denn gleichnamige elektrische Ladungen stoßen sich ab. Das ist aber nur möglich, wenn die Teilchen eine genügend große Geschwindigkeit und damit eine entsprechende kinetische Energie besitzen. Dann können sie in den nächsten Bereich des Kerns, in das *Kernfeld*, gelangen. Dort werden zwischen den gleichnamig geladenen Teilchen Kräfte wirksam, die zu einem Zusammenstoß mit dem Kern führen. Die Protonen haben infolge ihrer großen kinetischen Energie den sogenannten *Potentialwall*, das heißt die Grenze des Abstoßungsbereichs des Kerns, überwunden. Die dafür notwendige Energie muß um so größer sein, je größer die Kernladung des umzuwandelnden Elements ist. Bei Kernreaktionen mit Protonen, zum Beispiel an einem Element der Ordnungszahl 70 müssen die Protonen eine Energie von 12,5 MeV haben, α-Teilchen,

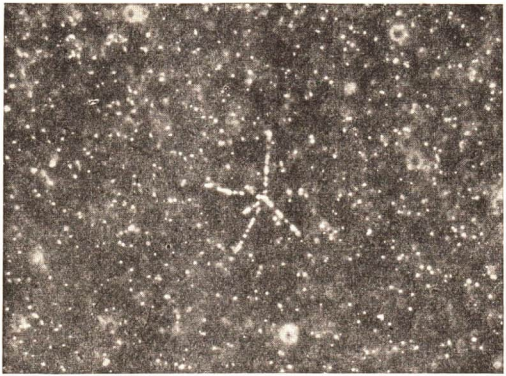


Abb. 236/1
Aufnahme eines von einem Höhenstrahlteilchen getroffenen Atomkerns

deren Masse größer ist, sogar 25 MeV. Da aber α-Teilchen beim radioaktiven Zerfall eine Energie von beispielsweise 6 MeV haben, müßten sie noch zusätzlich beschleunigt werden. Neutronen eignen sich besonders gut für Kernreaktionen, da sie elektrisch neutral sind. Abb. 236/1 zeigt die Spuren der nach verschiedenen Richtungen auseinanderfliegenden Bruchstücke eines Atomkerns. Der Kern wurde von einem Teilchen getroffen, das aus einer in großen Höhen auftretenden Strahlung stammt.

2. Die Kernspaltung. Bei allen bisherigen Versuchen, Atomkerne durch Bestrahlung mit Neutronen zu verändern, entstanden Elemente, deren Ordnungszahlen sich nur wenig von der des Ausgangsstoffes unterschieden. Diese Kernumwandlungen führten zu einer großen Anzahl von Isotopen und bisher unbekannten Elementen mit höheren Ordnungszahlen als Uran. Man nennt sie *Transurane.* Die bei Beschuß mit α-Teilchen und anderen Geschossen getroffenen Kerne sandten Neutronen, Protonen oder α-Teilchen aus. Im Vergleich zu den bestrahlten Kernen waren das nur sehr kleine Teilchen, die man als *Kernsplitter* bezeichnen könnte. Im Jahre 1934 ließ der italienische Physiker *Fermi* Neutronen auf Urankerne treffen. Dabei stellte er fest, daß sich eine große Anzahl neuartiger radioaktiver Kerne gebildet hatte, die er für Transurane hielt. Als die deutschen Forscher *Hahn* und *Straßmann* 1939 die Versuche von *Fermi* wiederholten, kamen sie zu völlig anderen überraschenden Ergebnissen. Durch vielfältige und komplizierte chemische Untersuchungen fanden sie, daß bei dem Beschuß der Urankerne mit Neutronen Kerne entstehen, deren Kernladungszahlen den in der Mitte des Periodensystems stehenden Elementen entsprechen, also etwa die Hälfte der des Urankernes betragen. Nach mühevollen Untersuchungen konnten sie diese als *Krypton* (Kr^{94}_{36}) und *Barium* (Ba^{139}_{56}) bestimmen.

Otto *Hahn*, geboren 1879, ist Professor der Physik in Göttingen und Präsident der Max-Planck-Gesellschaft. Fritz *Straßmann*, geboren 1902, ist Professor der Chemie in Mainz. Beide Forscher haben im April 1957 den Appell gegen die atomare Auf-

rüstung in Westdeutschland mit unterzeichnet. In diesem Appell haben berufene Wissenschaftler dagegen protestiert, daß ihre Forschungsergebnisse mißbraucht werden.

Die österreichische Physikerin *Lise Meitner* vermutete, daß bei den Versuchen von *Hahn* und *Straßmann* zum ersten Mal *eine Kernspaltung nachgewiesen* worden sei. Weitere Untersuchungen bestätigten die Richtigkeit dieser Vermutung. Die Auswertung vieler gleichartiger Versuche ergab, daß außer bei Uran auch noch bei anderen schweren Kernen, wie Thorium- und Plutonium-Kernen, nach einem Neutroneneinfang eine Kernspaltung eintritt. Das Neutron führt dabei dem Kern die zur Spaltung notwendige Energie zu.

Bei der Kernspaltung zerfällt ein Kern in zwei etwa gleich große Bruchstücke, die meistens radioaktiv sind.

Bei manchen Kernen reicht die bei Neutroneneinfang aufgenommene Energie aus, um die Spaltung herbeizuführen. Bei diesen Kernen ist eine Spaltung durch relativ *langsame Neutronen* möglich. Solche Neutronen haben eine Geschwindigkeit von etwa $2000\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Dem entspricht eine Energie von etwa $\frac{1}{40}$ eV. Man nennt diese langsamen Neutronen *thermische Neutronen*. Neutronen mit einer Energie größer als $\frac{1}{40}$ eV heißen *schnelle Neutronen*.

Bereits durch thermische Neutronen spaltbar sind die Kerne U^{235}, U^{233}, Pu^{239}, während die Kerne U^{238} und Th^{232} nur durch schnelle Neutronen gespalten werden.

3. Die Kettenreaktion. Bei der Kernspaltung läuft noch ein anderer wichtiger Vorgang ab, der ebenfalls im Jahre 1939 von *Irène* und *Frédéric Joliot-Curie* entdeckt wurde. Sie stellten fest, daß außer den beiden Bruchstücken noch ein bis drei Neutronen frei werden. Man bezeichnet sie als *Spaltneutronen*. Eine häufig beobachtete Kernspaltung ist die folgende (Abb. 237/1):

$$U^{235}_{92} + n^{1}_{0} \rightarrow Kr^{94}_{36} + Ba^{139}_{56} + 3n^{1}_{0}.$$

So wie bei diesem Beispiel ist bei allen diesen Kernspaltungen die Summe der Ordnungszahlen der entstandenen Atomkerne gleich der des gespaltenen Kernes. Auch die Summe der Massenzahlen ist auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung gleich. Die frei werdenden Neutronen können nun weitere Spaltungsvorgänge auslösen. Es kommt zu einer Kette von Kernspaltungen, die sich nicht nur von selbst immer weiter

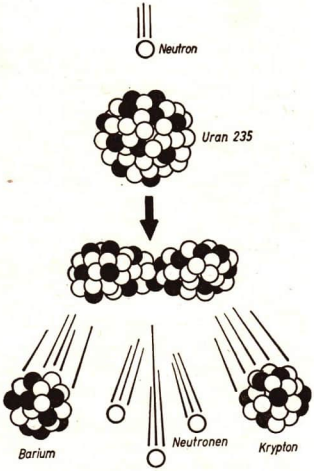


Abb. 237/1
Schematische Darstellung der Uranspaltung

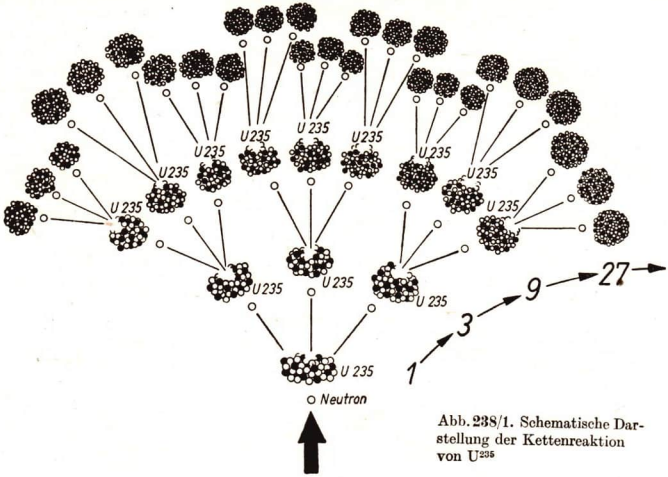


Abb. 238/1. Schematische Darstellung der Kettenreaktion von U^{235}

fortsetzt, sondern auch in kurzer Zeit lawinenartig anschwellen kann (Abb. 238/1). Einen Vorgang, der sich bei einmaligem Anstoß von selbst fortpflanzt, bezeichnet man als **Kettenreaktion**. Beispiele dafür sind das Anzünden eines Gasofens und die Entstehung einer Feuersbrunst.

Die Kettenreaktion kann sich lawinenartig fortsetzen wie die Explosion einer Sprengstoffmenge. Nimmt man an, daß zum Beispiel nach jeder Kernspaltung jeweils drei Neutronen Kerne spalten, so wächst die Zahl der Kernspaltungen wie die Potenzen von 3: 3, 9, 27, 81, 243 . . .

Aber nicht alle frei werdenden Neutronen lösen eine Reaktion aus. Ein Teil von ihnen entweicht nach außen und verläßt das spaltbare Material. Andere Neutronen werden von den Beimischungen des Spaltmaterials absorbiert. Viele haben außerdem zu hohe Geschwindigkeiten. Es müssen daher einige Voraussetzungen erfüllt sein, damit bei der Uranspaltung eine Kettenreaktion entstehen kann:

1. *Es muß genügend spaltbares Material vorhanden sein,* damit nicht zu viele Neutronen wirkungslos entweichen. Man bezeichnet die Mindestmenge als *kritische Masse.* In einer kleineren Menge, einer *unterkritischen Masse,* kann keine Kettenreaktion entstehen. Wird die Masse größer, das heißt, wird eine Quantität verändert, so ändert sich bei einer bestimmten Menge, der kritischen Masse, auch die Qualität der Vorgänge: es kommt zu einer Kettenreaktion. Eine größere Menge wird *überkritische Masse* genannt.
2. *Die frei werdenden Neutronen müssen die für die Kettenreaktion notwendigen Geschwindigkeiten haben.*

4. Der Energieumsatz bei Kernreaktionen. Die Kernumwandlungen sind ebenso wie die sich in der Atomhülle abspielenden chemischen Reaktionen mit Energieumsetzungen verbunden. Man unterscheidet in der Chemie bekanntlich *endotherme Reaktionen*, bei denen Energie, meist in Form von Wärme, zugeführt werden muß, und *exotherme Reaktionen*, bei denen Energie frei wird. Eine exotherme Reaktion ist zum Beispiel die Oxydation des Kohlenstoffs:

$$12\,\mathrm{g\,C} + 32\,\mathrm{g\,O_2} \rightarrow 44\,\mathrm{g\,CO_2}; \quad Q = 96{,}36\,\mathrm{kcal}.$$

Eine weitere wichtige Erfahrung war, daß bei Kernumwandlungen *immer Massenveränderungen auftreten*. Die Summen der Massen auf beiden Seiten einer Kernreaktionsgleichung sind stets verschieden. Vergleicht man die Masse eines Atomkerns, die Kernmasse, mit der Summe der Masse der einzelnen Nukleonen, so stellt man bei allen Kernen die merkwürdige Tatsache fest, daß die Kernmasse kleiner als die Summe der Massen der Nukleonen ist.

Diese *Massendifferenz* soll am Beispiel des Heliumkerns deutlich werden. Ein Heliumkern besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen.

Die Summe der einzelnen Protonen- und Neutronenmassen beträgt	4,0338 Einh.
die Kernmasse des gesamten Heliumkernes dagegen beträgt	4,0038 Einh.
daraus ergibt sich eine Differenz von	0,0300 Einh.

Diese Differenz nennt man den **Massendefekt** (Δ m). Alle Atomkerne zeigen einen Massendefekt.

Da sich die Atomkerne bei den Kernreaktionen ändern, müssen hierbei auch Massendefekte auftreten, ebenso bei der Spaltung des Urankerns. Unter den vielen Möglichkeiten der Spaltung eines Urankerns U^{235}_{92} ergeben sich als Endprodukte auch die beiden Kerne Mo^{95}_{42} und La^{139}_{57}. Die radioaktiven Zwischenprodukte sollen hier nicht berücksichtigt werden.

$$U^{235}_{92} + n^1_0 \rightarrow U^{236}_{92} \rightarrow \cdots \rightarrow Mo^{95}_{42} + La^{139}_{57} + 2 \cdot n^1_0.$$

Vergleicht man die Summe der Masse des Urankerns und der Masse des eingefangenen Neutrons mit der Summe der Massen der Spaltprodukte und der frei werdenden Neutronen, so stellt man eine Differenz fest.

Masse von $U^{235} + n\,(U^{236})$	236,134 Einh.
Masse von Mo^{95}	94,946 Einh.
Masse von La^{139}	138,953 Einh.
Masse von 2 n	2,018 Einh.
Summe der Einzelmassen	235,917 Einh.
Massendifferenz	0,217 Einh.

Die Masse der Spaltprodukte und Spaltneutronen ist also um 0,217 Einh. geringer als die Masse des Ausgangskerns U^{236}.

Der bedeutende Physiker *Albert Einstein* hat eine mathematische *Beziehung zwischen Masse und Energie* aufgestellt, nach der jeder Masse ein ganz bestimmter Energiebetrag entspricht. Die berühmte **Einsteinsche Gleichung** lautet:

$$\boxed{W = m \cdot c^2.}$$

Hierbei bedeuten W die Energie, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit. Gibt man die Masse in kg an und setzt für die Lichtgeschwindigkeit den gerundeten Wert

$$c = 300000\ \mathrm{km} \cdot \mathrm{s}^{-1} = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1},$$

so ist die Energie, die 1 g Masse entspricht:

$$W = 0{,}001\ \mathrm{kg} \cdot (3 \cdot 10^8\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1})^2 = 0{,}001\ \mathrm{kg} \cdot 9 \cdot 10^{16}\ \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-2},$$
$$W = 9 \cdot 10^{13}\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2} \cdot \mathrm{m} = 9 \cdot 10^{13}\ \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}.$$

N · m ist die Arbeitseinheit Newtonmeter (Nm) oder Wattsekunde (Ws). Daher erhält man

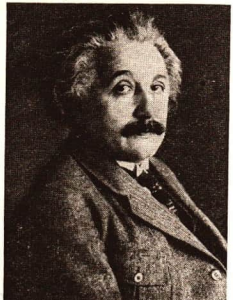
$$W = 9 \cdot 10^{13}\ \mathrm{Ws} = 25 \cdot 10^6\ \mathrm{kWh}.$$

Diese große Energiemenge wird bei einem Massendefekt von 1 g frei. Dieselbe Energiemenge wird beispielsweise als elektrische Energie in einer Großstadt von 100000 Haushaltungen in zwei bis drei Monaten für den Hausbedarf verbraucht. Man kann diesen Energiebetrag auch als Wärmeenergie in Kalorien umrechnen (vgl. Aufgabe 3 auf S. 242).

Die bei Kernreaktionen frei werdende Energie ist im Vergleich zur chemischen Energie, beispielsweise zur Verbrennungswärme, sehr groß. Ein Massendefekt von etwa 1 g würde bei der vollständigen Spaltung von etwa 1 kg U^{235} entstehen. Dabei wird die oben berechnete Energie frei. Jedoch ist es technisch nicht möglich, 1 kg Uran so vollständig zu spalten, daß diese Energiemenge erreicht wird.

Unter Ausnutzung der Kernenergie kann man aus verhältnismäßig geringen Mengen spaltbaren Materials sehr große Energiemengen gewinnen.

Albert Einstein war einer der bedeutendsten Physiker der Neuzeit. Durch die von ihm entwickelte *Relativitätstheorie* wurde er zum Mitbegründer eines neuen physikalischen Weltbildes. Einstein hat von 1914 bis 1933 in Berlin und Potsdam gewirkt. Schon seit Beginn des ersten Weltkrieges hat er sich für Frieden und Völkerverständigung eingesetzt und ist gegen jede Rassen- und Kriegshetze aufgetreten. Nach dem Beginn der faschistischen Diktatur mußte er Deutschland verlassen. Er emigrierte nach Amerika und setzte seine Forschungen als Professor an der Universität in Princeton fort. Auch hier nahm er, besonders durch Vorträge, mutig gegen den Mißbrauch der Atomenergie für kriegerische Zwecke Stellung.



Albert Einstein (1879 bis 1955)

Die Frage nach der Herkunft der bei der Kernspaltung festgestellten Energiemenge führte zu der Erkenntnis, daß Energie, die bisher zum Zusammenhalt des Atomkerns notwendig war, frei wird. Diese Energie bezeichnet man als *Bindungsenergie*. Sie ist gleich dem Massendefekt. Bei allen Kernreaktionen, bei denen ein Massendefekt auftritt, wird Energie frei, im umgekehrten Falle wird Energie verbraucht. *Man unterscheidet daher in der*

Kernphysik wie in der Chemie exotherme und endotherme Reaktionen. Der Massendefekt tritt bei leichten Kernen bei ihrer Bindung auf, jedoch bei schweren Kernen bei ihrer Spaltung (s. S. 239). Während ein Kern gegenüber der Summe seiner Bestandteile einen Massendefekt aufweist, der seiner Bindungsenergie entspricht, wird bei der Spaltung eines Kerns seine Bindungsenergie frei, die der oben genannten Massendifferenz entspricht.

Die Spaltprodukte geben bei Zusammenstößen mit anderen Atomen ihre kinetische Energie ab. Diese Energie wandelt sich daher in Wärmeenergie um.

Bei der Spaltung eines Urankerns U^{235} wird eine Energie von etwa 200 MeV frei, die sich als Wärmeenergie äußert.

Da 1 g U^{235}_{92} über 2500 Trillionen Atome hat, wird — theoretisch — bei der vollständigen Spaltung von 1 g U^{235}_{92} eine Energie von

$$5 \cdot 10^{23}\,\text{MeV} \mathrel{\widehat{=}} 8 \cdot 10^{10}\,\text{J} \mathrel{\widehat{=}} 22300\,\text{kWh}$$

frei (vgl. S. 210). Diese Energie entspricht dem täglichen Elektroenergieverbrauch der Haushaltungen einer Kleinstadt.

5. Die Kernfusion. Außer bei der Spaltung von Atomkernen ergibt sich auch bei der Verschmelzung leichter Atomkerne zu schwereren eine Möglichkeit, Kernenergie freizumachen. Man bezeichnet diese Verschmelzung als **Kernfusion.** Es tritt ein Massendefekt auf. Zur Entdeckung der Kernfusion kamen die Wissenschaftler durch die Beschäftigung mit der Frage nach dem Energiehaushalt der Sonne. Die Strahlung der Sonne hat die unvorstellbar große Leistung von etwa $3{,}72 \cdot 10^{23}$ kW. Das bedeutet, daß die Sonne in jeder Sekunde eine Energie von etwa 10^{20} kWh in den Weltraum ausstrahlt. Davon entfällt auf die Erde in jeder Sekunde eine Energie von 46000000 kWh, das sind etwa $\frac{1}{2}$ Billionstel der Gesamtenergie. Diese Energie entspricht etwa der im Wasserkraftwerk *W. I. Lenin* bei Kuibyschew, dem größten Wasserkraftwerk der Welt, innerhalb von 22 Stunden gewonnenen Energie.

Eingehende theoretische Untersuchungen führten zu der Erkenntnis, daß diese Energie der Sonne bei der Verschmelzung von je 4 Wasserstoffkernen, Protonen, zu einem Heliumkern frei wird. Dieser Prozeß geht im Sonneninneren bei einer Temperatur von rund 20 Millionen Grad vor sich. Erst bei dieser hohen Temperatur erreichen die gleichartig geladenen Kerne eine genügend hohe Geschwindigkeit, so daß sie den Potentialwall überwinden und in den Wirkungsbereich des Kernfeldes eindringen können. Solche Reaktionen bezeichnet man auch als *thermonukleare Reaktionen.* Die Verschmelzung kann auf verschiedenen Wegen in sogenannten *Reaktionszyklen* erfolgen.

Vergleicht man insgesamt bei allen Reaktionsgleichungen eines solchen Zyklus die auf beiden Seiten auftretenden Kerne miteinander, so stellt man fest, daß letztlich vier Protonen zu einem Heliumkern vereinigt worden sind, wobei noch zwei Positronen ausgestrahlt wurden:

$$4\,H^1_1 \rightarrow He^4_2 + 2\,e^0_1.$$

Bei dieser Verschmelzung ergibt sich ein Massendefekt, da die Summe der Massen auf der rechten Seite der Reaktionsgleichung kleiner ist als die auf der linken Seite.

Der Massendefekt bei der Umwandlung von 1 kg Wasserstoff in Helium beträgt 6,45 g. Diesem Massendefekt entspricht eine Energie von

$$6{,}45 \cdot 25 \cdot 10^6\ \text{kWh} \approx 160 \cdot 10^6\ \text{kWh} \mathrel{\widehat{=}} 138 \cdot 10^9\ \text{kcal}.$$

Diese Energie entspricht der Verbrennungswärme von etwa 50000 t Rohbraunkohle bei einem Heizwert von $2800\,\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Unterscheiden Sie eine Kernumwandlung bei einem natürlich radioaktiven Kern eine Kernreaktion nach Art des berühmten Rutherfordschen Versuches und eine Kernspaltung hinsichtlich der Auslösung der Reaktion und der Größe der auftretenden Teilchen!
2. Was versteht man unter einer Kettenreaktion, und unter welchen Voraussetzungen entsteht bei der Kernspaltung eine Kettenreaktion?
3. Rechnen Sie die Energie, die nach der Einsteinschen Gleichung 1 g Masse entspricht, in Wärmeenergie, gemessen in kcal, um! Benutzen Sie dazu die Beziehung 1 cal $\mathrel{\widehat{=}}$ 4,187 Ws! Wieviel Liter Wasser von 18 °C könnte man mit dieser Wärmeenergie in Dampf von 100 °C verwandeln?
4. Bei der Verbrennung von 12 g Kohlenstoff mit 32 g Sauerstoff wird eine Wärmeenergie von 96,36 kcal frei (vgl. S. 239). Berechnen Sie den Massendefekt, der dieser Energie entspricht! Vergleichen Sie ihn mit dem bei der Spaltung eines Urankerns auftretenden Massendefekt (vgl. S. 239)!
5. Bei der Spaltung eines Urankerns U^{235} treten Spaltprodukte mit Ordnungszahlen zwischen 30 und 63 auf. Bilden Sie nach Art der Reaktionsgleichung auf S. 239 selbst ein Beispiel! Benutzen Sie dazu das Periodensystem!
6. Wie erklärt man heute die Tatsache, daß die Fixsterne, zum Beispiel unsere Sonne, seit vielen Hunderttausenden von Jahren riesige Energiemengen ausstrahlen? Erklären Sie mit Hilfe einer Reaktionsgleichung den betreffenden Vorgang!

56. Die Ausnutzung der Kernenergie

1. Das Energieproblem. Der Energiebedarf der sozialistischen Länder steigt ständig, da die Erfüllung der umfangreichen Wirtschaftspläne bedeutende Energiequellen erfordert. So wird zum Beispiel in der Deutschen Demokratischen Republik nach dem Siebenjahrplan durch den Bau neuer Kraftwerke und die Erweiterung bestehender Anlagen die Kraftwerksleistung bis 1965 auf 196% erhöht. Andererseits sind, auf lange Sicht gesehen, die Vorräte an Kohle, die bei gleichbleibendem Energieverbrauch noch einige hundert Jahre ausreichen würden, begrenzt. Ebenso ist es mit den Reserven an Wasserkraft, die man zur Energieerzeugung ausnutzen kann. Die Braunkohle ist aber neben anderen auch ein wichtiger Rohstoff für die chemische Industrie, die uns, ebenfalls im Rahmen des Siebenjahrplans, in steigendem Maße unentbehrliche synthetische Werkstoffe liefert, so daß die Kohlevorräte geschont werden müssen. Deshalb ist es für die Zukunft notwendig, neue Energiequellen zu erschließen, um die weitere Entwicklung von Technik und Wirtschaft zu sichern. Wissenschaftler und Techniker haben aber bereits einen Ausweg gefunden. Die Ausnutzung der Kernenergie ist eine Möglichkeit, das Energieproblem zu lösen. Die Kern-

spaltung und die Kernverschmelzung, die Fusion, sind Prozesse, bei denen die Energie der Atomkerne frei gemacht werden kann.

Um die Kernenergie für die Energieversorgung nutzbar zu machen, muß man die Vorgänge der Kernspaltung beziehungsweise die der Kernverschmelzung unter Kontrolle bringen. Das ist bisher lediglich bei der Kettenreaktion in spaltbaren Materialien gelungen. Wissenschaftler und Techniker haben in gemeinsamer Arbeit dieses schwierige Problem gelöst. Viel schwieriger erscheint die Aufgabe, auch die Energie der Kernverschmelzung für friedliche Zwecke nutzbar zu machen. Aber auch hier sind schon, besonders von sowjetischen Forschern, die ersten Schritte getan worden. Man kann die Fusion bereits in kleinem Maßstab im Laboratorium durchführen.

2. Bauelemente und Wirkungsweise eines Kernreaktors. Sehr schwierig war die technische Lösung des Problems, die bei Kernspaltungen frei werdende Energie wirtschaftlich nutzbar zu machen. *Dazu muß man die Kettenreaktion steuern können.*

Eine abgeschlossene Anlage, in der eine gesteuerte Kettenreaktion abläuft, heißt Reaktor.

Der erste, von dem italienischen Physiker *Fermi* gebaute Reaktor wurde 1942 in Chikago in Betrieb genommen. Seitdem sind zahlreiche andere Reaktortypen entwickelt worden, die verschiedenen Zwecken dienen. Ein Reaktor besteht aus folgenden Hauptteilen (Abb. 244/1):

1. Spaltbares Material (Brennstoff, s. „Kanal für Uranstab")
2. Bremssubstanz (Moderator, s. „Graphitblock")
3. Regelstäbe (s. „Kanal für Regulierstab")
4. Kühlsystem (s. „Kühlaggregat")
5. Strahlenschutzmantel (s. „seitliche Schutzschicht" und äußere Begrenzung).

Die Kettenreaktion läuft in den sogenannten *Brennelementen* ab, die meistens die Form von Stäben haben. Als Brennstoffe werden natürliches Uran, an U^{235} angereichertes Uran oder auch die reinen Isotope U^{235}, U^{233} und Pu^{239} verwendet.

Als *Moderatoren* benutzt man meist gewöhnliches oder schweres Wasser, Graphit oder Beryllium. Diese Bremssubstanzen sind zwischen den Brennstäben angeordnet und bremsen die schnellen Spaltneutronen auf die für die Spaltvorgänge günstige thermische Geschwindigkeit.

Die *Regelstäbe*, auch *Absorberstäbe* genannt, bestehen aus Stoffen, die thermische Neutronen in hohem Maße einfangen, absorbieren. Hierfür eignen sich die Elemente Cadmium und Bor.

Mit Hilfe der Regelstäbe kann man die Zahl der Neutronen im spaltbaren Material regulieren und so die Kettenreaktion steuern.

Will man den Ablauf der Kettenreaktion hemmen, dann schiebt man die Absorberstäbe tiefer zwischen die Brennelemente ein. Dadurch werden viele Neutronen eingefangen, so daß sie für die Kettenreaktion verlorengehen. Damit umgekehrt die Kettenreaktion nicht zum Erliegen kommt, muß man die Regelstäbe weiter herausziehen.

Mit Hilfe des *Kühlsystems* wird die bei der Kettenreaktion frei werdende Energie abgeführt. Als *Kühlmittel* verwendet man meist gewöhnliches Wasser (H_2O), schweres Wasser (D_2O) oder auch flüssiges Metall, zum Beispiel Natrium.

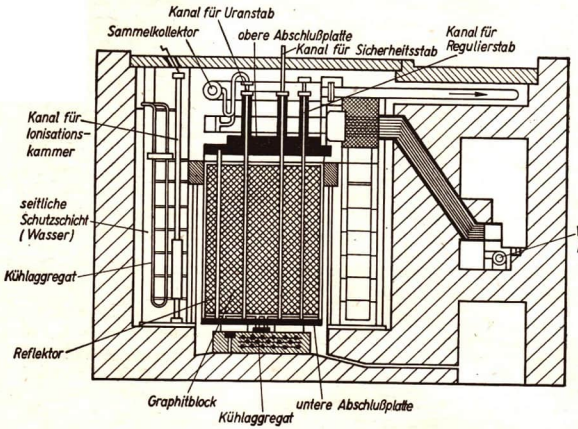


Abb. **244**/1. Kernreaktor (schematisch)

Ein zwei bis drei Meter dicker *Strahlenschutzmantel* aus Beton verhindert das Austreten von Neutronen und α-Strahlen aus dem Reaktor. Dadurch ist es überhaupt erst möglich, daß Menschen in der Nähe des Reaktors ohne Gefahr für ihre Gesundheit arbeiten können.

Die gesamte Reaktoranlage wird von einem zentralen *Schaltraum* aus gesteuert und automatisch überwacht. Bei diesen Steuerungsanlagen werden die modernsten Geräte der Steuerungs- und Regelungstechnik angewendet. Ohne die Entwicklung dieses Gebietes wäre die Steuerung eines Reaktors nicht möglich. Die Fernsteuerung und die Überwachung eines Reaktors sind außerdem wegen der Gesunderhaltung der ständig am Reaktor arbeitenden Menschen nötig.

3. Reaktortypen — Der Rossendorfer Reaktor. Nach ihrem Verwendungszweck teilt man die Reaktoren in Forschungsreaktoren, die zur Grundlagenforschung benutzt werden, und Energiereaktoren, die zur Energiegewinnung dienen, ein. Bei vielen Reaktoren kann man die im Reaktor frei werdenden Neutronen dazu verwenden, durch Kernreaktionen künstlich radioaktive Isotope zu erzeugen. Die Erzeugung dieser sogenannten Radioisotope in großen Mengen ist heute für verschiedene Gebiete der Wissenschaft und Technik notwendig (vgl. S. 253).

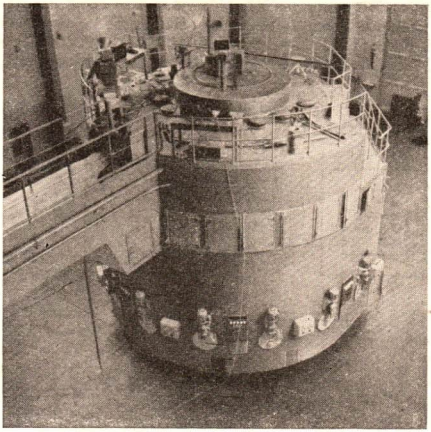
Je nach der Geschwindigkeit der Neutronen, die die Kernspaltung im spaltbaren Material hervorrufen, unterscheidet man *thermische* und *schnelle Reaktoren*.

In thermischen Reaktoren erzeugen thermische Neutronen die Spaltung. Arbeitet ein Reaktor mit schnellen Neutronen, die eine Energie von über 0,1 MeV haben, so bezeichnet man ihn als schnellen Reaktor.

Schnelle Reaktoren arbeiten nur mit angereichertem Uran, reinem U^{235} oder U^{239} und ohne Moderator. Reaktoren, in denen durch die Kettenreaktionen spaltbares Material erzeugt wird, zum Beispiel Plutonium, nennt man *Brutreaktoren*.

Der Reaktor des Zentralinstituts für Kernphysik in Rossendorf bei Dresden ist ein *Forschungsreaktor* (Abb. 245/1). Sein Bau wurde durch die großzügige Hilfe der Sowjetunion ermöglicht. Nicht nur wichtige Bauteile stellten uns die sowjetischen Wissenschaftler zur Verfügung, sondern sie halfen auch beim Aufbau. Dadurch erhielten die Atomwissenschaftler in der Deutschen Demokratischen Republik die Möglichkeit, sich an der internationalen Forschungsarbeit auf diesem Gebiet aktiv zu beteiligen. Das war ohne einen eigenen Reaktor vorher nicht möglich. Außerdem sind wir dadurch in der Lage, selbst Radioisotope herzustellen (vgl. S. 253).

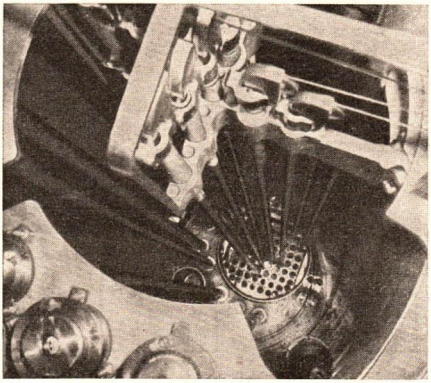
Der Brennstoff im Rossendorfer Reaktor ist Uran, das auf 10% an U^{235} angereichert ist. Als Moderator und Kühlmittel wird gewöhnliches, destilliertes Wasser verwendet. Die Brennstäbe



a) Gesamtansicht

Abb. 245/1. Der Rossendorfer Reaktor

b) Blick in das Innere des Reaktors



sind mit Aluminium verkleidet und haben einen Durchmesser von 1 cm und eine Länge von 60 cm. 16 Brennstäbe sind in einer Kassette vereinigt. Die kritische Masse des Rossendorfer Reaktors beträgt 3,2 kg U^{235}. Die Kernspaltung wird durch thermische Neutronen erzeugt. Die erreichte Leistung beträgt 2000 kW.

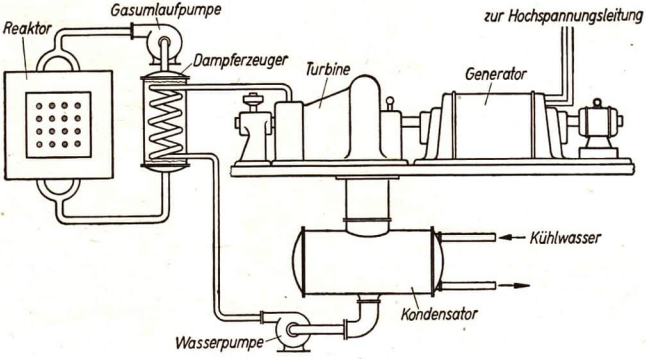


Abb. 246/1. Schematische Darstellung eines Reaktorkraftwerkes (stark vereinfacht)

4. Das Reaktorkraftwerk. Man gewinnt beim Atomreaktor Energie durch die Ausnutzung der bei der Uranspaltung entstehenden Wärme. Durch die Kühlmittel wird diese Wärme einem sogenannten *Wärmeaustauscher* (Dampferzeuger) zugeführt (Abb. 246/1). Da das aus dem Reaktor kommende Kühlmittel radioaktiv ist, kann es nicht unmittelbar zum Antrieb von Wärmekraftmaschinen verwendet werden. Deshalb ist noch ein zweiter, vom ersten getrennter Kreislauf notwendig, in dem zugleich hochgespannter Wasserdampf entsteht. Über eine Turbine und einen Generator wird dann elektrische Energie erzeugt. Sie ist das Endglied mehrfacher Energieumwandlungen:

Massendefekt durch Kernspaltung — Bewegungsenergie durch Spaltprodukte — — Wärmeenergie des Kühlmittels — Wärmeenergie des Austauschmittels — — mechanische Energie der Dampfturbine — elektrische Energie am Generator.

Eine vereinfachte Darstellung der Energieumwandlung zeigt Abb. 246/2.

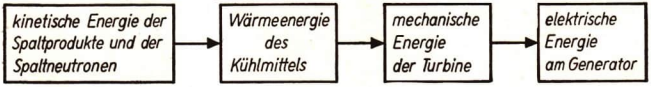


Abb. 246/2. Energieumwandlungen in einem Reaktorkraftwerk

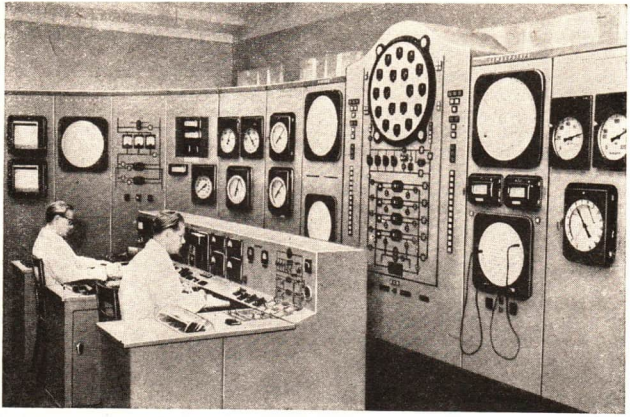


Abb. 247/1. Zentrales Schaltpult des ersten sowjetischen Reaktorkraftwerkes

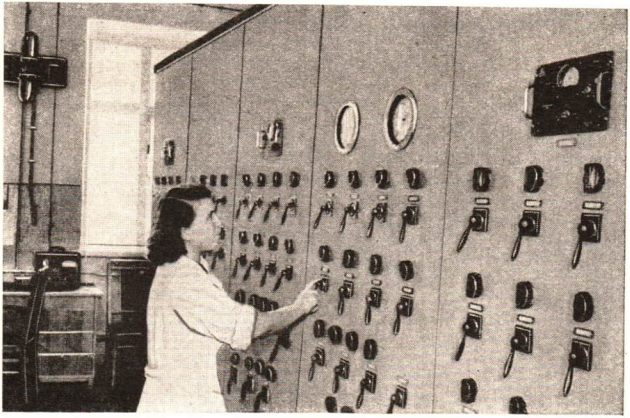


Abb. 247/2. Überwachung der radioaktiven Strahlung in den Räumen eines Reaktorkraftwerkes

Bei allen Energieumwandlungen treten sogenannte Verluste auf. Infolge dieser Tatsache und besonders wegen der noch in der Entwicklung stehenden technischen Anlagen ist der vom Reaktorkraftwerk erzeugte Strom gegenwärtig noch teurer als der Strom von anderen Elektrizitätswerken.

In den Reaktorkraftwerken nutzt man im großen Maßstab die modernen Möglichkeiten der Fernsteuerung und Fernüberwachung aus. Die Entwicklung der Reaktorkraftwerke stellte der Steuerungs- und Regelungstechnik neue Aufgaben und führte zu einer schnellen Entwicklung dieses Gebietes. Von einem *zentralen Schaltpult* aus können sämtliche Vorgänge im Kraftwerk überwacht werden, so daß ein Betreten der gefahrbringenden Räume nicht notwendig ist (Abb. 247/1). Im Schaltraum kann außerdem festgestellt werden, ob in irgendeinem Raum der gesamten Anlage radioaktive Strahlung vorhanden ist und welche Stärke sie hat. Das geschieht durch in den Räumen angebrachte Geigerzähler (Abb. 247/2). Für einen ausreichenden Schutz der im Kraftwerk arbeitenden Menschen ist dadurch gesorgt.

Das erste Reaktorkraftwerk der Welt, das nur der Erzeugung von elektrischer Energie dient, wurde am 27. Juni 1954 in der Sowjetunion in Betrieb genommen (Abb. 248/1). Es erreicht eine elektrische Leistung von 5000 kW. Sein Reaktor läuft mit bis zu 5% an U^{235} angereichertem Uran als Brennstoff und Graphit als Moderator. 1958 wurde in der Sowjetunion der erste Bauabschnitt (100 000 kW) des größten Reaktorkraftwerkes der Welt mit einer Gesamtleistung von 600 000 kW fertiggestellt. Der Bau eines Reaktorkraftwerkes ist jedoch sehr viel teurer und dauert wesentlich länger als der Bau eines mit Kohle oder Öl betriebenen Kraftwerkes. Da die Sowjetunion noch über reiche Vorräte an Erdöl, Braun- und Steinkohle verfügt, die mit verhältnismäßig geringen Mitteln erschlossen werden können, werden gegenwärtig vorwiegend Kraftwerke errichtet, die mit solchen Brennstoffen betrieben werden. Außerdem hat der Bau von diesen sogenannten Wärmekraftwerken den Vorteil, daß in verhältnismäßig kurzer Zeit neue große Energiemengen zur Verfügung stehen. Dies ist für die schnelle Entwicklung der Volkswirtschaft in der Sowjetunion besonders wichtig.

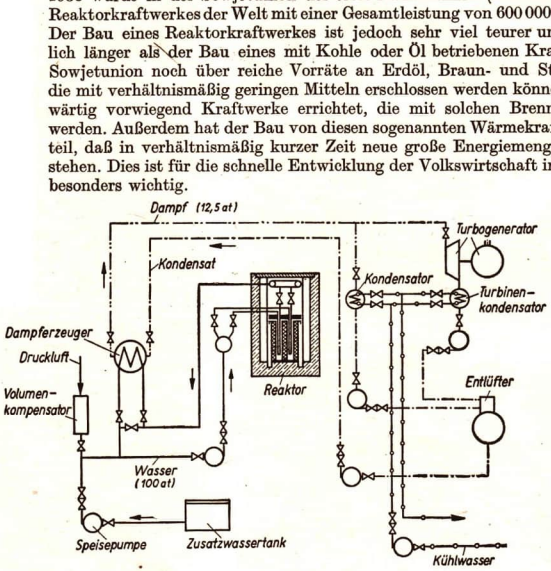


Abb. 248/1. Schema des ersten Reaktorkraftwerkes der Welt

Auch in der Deutschen Demokratischen Republik entsteht bis 1962 am Großen Stechlinsee bei Berlin mit tatkräftiger Unterstützung sowjetischer Wissenschaftler das erste Reaktorkraftwerk Deutschlands. Es wird eine Leistung von 70000 kW haben und in einem zweiten Bauabschnitt auf die doppelte Leistung erweitert werden. Damit wird unsere Republik zu den wenigen Ländern gehören, die bereits Reaktorkraftwerke haben. Im Rahmen des Siebenjahrplans werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Anwendung der Atomenergie für friedliche Zwecke verstärkt fortgeführt.

5. Anwendung der Kernenergie zum Antrieb von Schiffen. Die Kernenergie wird bereits heute zum *Antrieb von Schiffen* ausgenutzt. In der Sowjetunion wurde im September 1959 der erste durch Kernenergie angetriebene Eisbrecher fertiggestellt. Der Eisbrecher *Lenin* hat eine Länge von 134 m, eine Breite von 27,6 m und eine Wasserverdrängung von 16000 BRT. Er ist damit der größte Eisbrecher der Welt. Eisbrecher müssen eine sehr starke Maschinenleistung haben. Da die üblichen Eisbrecher täglich etwa 50 t Heizöl verbrauchen, nehmen die notwendigen Vorräte an Brennstoff etwa ein Drittel des gesamten Schiffsraumes ein.

Der Atomeisbrecher ist mit drei unabhängig voneinander arbeitenden Reaktoren ausgerüstet, die mit angereichertem Uran arbeiten und Wasser als Moderator und Kühlmittel verwenden. Zu einer Wärmeleistung von 150000 kW kommt noch eine mechanische Leistung von 32000 kW. Die bei der Kühlung des Reaktors außerdem anfallende Wärme wird zur Heizung des Schiffes verwendet. Zum Brechen des Eises wird ein neues Verfahren angewandt. Heißes Wasser wird mit einem Druck von über 1000 Atmosphären gegen die Eismassen geschleudert und macht diese nicht nur infolge der Erwärmung brüchig, sondern zerteilt sie außerdem mechanisch. Ein Schiff dieser Größe verbraucht bei ununterbrochenem Betrieb im Laufe eines Jahres nur ungefähr 80 kg Uran, während ein gleich großes, ölbetriebenes Schiff annähernd 100000 t Rohöl benötigt. Der Eisbrecher kann ohne Brennstoffaufnahme 1 bis 2 Jahre fahren.

Es ist anzunehmen, daß die Atomenergie später auch als *Antriebsmittel für Landfahrzeuge und Flugzeuge* beziehungsweise *Raumschiffe* verwendet wird. Es liegen bereits erste Entwürfe für eine Atomlokomotive vor. Die Spurweite müßte jedoch gegenüber der heute üblichen wesentlich größer sein. Für Atomflugzeuge gibt es mehrere sehr verschiedenartige Entwürfe. Die Schwierigkeiten liegen unter anderem in dem notwendigen Strahlenschutz, der bei dem heutigen Stand der Technik noch ein sehr hohes Gewicht haben müßte.

6. Die Atombombe. Als sichtbar wurde, welche gewaltigen Energiemengen bei der Kernspaltung frei werden, begannen in den imperialistischen Ländern Versuche, diese Energie für Kriegszwecke auszunutzen. Besonders in den USA wurde die technische Verwirklichung der ungesteuerten Kettenreaktion vorangetrieben.

Zunächst wurde reines Uran (U^{235}) verwendet. 1 kg U^{235} spaltet sich, sofern die Kettenreaktion nicht gehemmt wird, in weniger als $\frac{1}{1000}$ s. Die bei der vollständigen Spaltung von 1 kg U^{235} frei werdende Energie entspricht der Energie, die bei der Explosion von etwa 23000 t *Trotyl* frei wird. Trinitrotoluol (Trotyl) ist ein viel verwendeter Sprengstoff.

Die überall vorhandenen freien Neutronen lösen in reinem Uran, sofern die kritische Masse vorhanden ist, eine Kettenreaktion aus. Das Uran muß also in einer

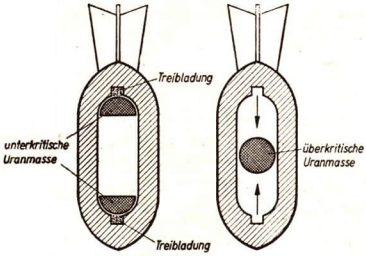


Abb. 250/1. Schematische Darstellung einer Uran-Atombombe

Atombombe in voneinander abgeschirmten unterkritischen Massen angeordnet werden. Die Bombe wird dadurch gezündet, daß zwei unterkritische Massen durch eine Zündvorrichtung aufeinandergeschossen werden (Abb. 250/1).

Mit welcher Absicht die USA-Imperialisten Atomwaffen entwickelt haben, wurde zu Ende des zweiten Weltkrieges deutlich. Der Krieg gegen Japan war durch den Vormarsch der sowjetischen Truppen bereits entschieden, da explodierte am 6. August 1945 über *Hiroshima* eine amerikanische *Uran-Atombombe*. 80000 Menschen waren sofort tot, viele Tausende wurden durch Brand- oder Strahlenwirkung so verletzt, daß sie langsam dahinsiechen mußten. Noch heute sterben japanische Menschen, teilweise unter Qualen, an den Folgen dieser Bombe. Außerdem waren 90 Prozent der Gebäude von Hiroshima zerstört, und die Umgebung der Stadt war radioaktiv verseucht. Die amerikanischen Nachrichtenbüros meldeten am nächsten Tag lakonisch, daß über der japanischen Stadt Hiroshima eine Atombombe abgeworfen worden sei. Drei Tage später wurde die Stadt *Nagasaki* das Opfer einer amerikanischen *Plutonium-Atombombe*.

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.

Die Entwicklungsarbeiten an diesen furchtbaren Massenvernichtungsmitteln gingen weiter und führten zur *Wasserstoffbombe*. Sie wird mit Hilfe einer Uran- oder Plutoniumbombe gezündet (Abb. 250/2). Dann setzt die thermonukleare Reaktion ein. Es bilden sich schwerer Wasserstoff und Helium, wobei ungeheure Energiemengen frei werden.

Für die Wasserstoffbomben, auch H-Bomben genannt, gibt es keine Größenbeschränkung, da bei ihnen keine kritische Masse existiert. In ihrer Wirkung übertreffen die H-Bomben die „einfachen" Atombomben um ein hundertfaches; so hat bereits eine mittelgroße Wasserstoffbombe die 600- bis 800fache Wirkung der Uranbombe von Hiroshima.

Die verheerende Wirkung der Atombombe ergibt sich aus drei Faktoren: Druck, Hitze, radioaktive Strahlung. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Wirkung einer mittelgroßen H-Bombe. Die schwerwiegenden Folgeerscheinungen, zum Beispiel Auswirkungen der radioaktiven Bestrahlung bei Überlebenden, gehen aus der Tabelle auf S. 251 nicht hervor.

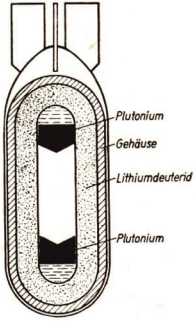


Abb. 250/2. Schematische Darstellung einer Wasserstoffbombe

Bei Kettenreaktionen von derartigen Ausmaßen treten Faktoren auf, die heute noch nicht theoretisch errechnet werden können; deshalb wurden für die Entwicklung von Atomwaffen Versuche durchgeführt. Die Wirkung einer auf den Marshall-Inseln gezündeten H-Bombe übertraf zum Beispiel die vorausberechnete Wirkung um das Sechsfache (Abb. 251/1).

Allein diese Versuche sind eine große Gefahr für die Bevölkerung der Erde, da bei der Explosion *radioaktive Partikel* mit verschiedenen Halbwertszeiten entstehen. Dieser radioaktive Staub kann durch Luftströmungen über weite Strecken getragen werden und sich dort schädigend auf die Lebewesen auswirken. Dadurch besteht nicht nur die Gefahr, daß sich ein so gefährliches Massenvernichtungsmittel in den Händen der Imperialisten befindet, sondern auch die, daß weitere Experimente mit Atomwaffen die radioaktive Verseuchung unserer Erde nach sich ziehen.

Abb. 251/1. Explosionspilz einer Wasserstoffbombenexplosion

Die Wirkung einer mittleren H-*Bombe (unmittelbare Explosionswirkung)*

Abstand vom Explosionszentrum	15 km	30 km	60 km	120 km
Wirkung der Wärmestrahlung	tödliche Verbrennungen, Totalbrände	schwere bis tödliche Verbrennungen, Entflammung aller leicht entzündlichen Gebäude, Anlagen usw.	noch leichte bis schwere Verbrennungen, Brände möglich	leichte Hitzedefekte
Wirkung der radioaktiven Strahlung	absolut tödlich	noch tödlich, schwere Hautschäden	noch Schädigungen bei entsprechenden Windverhältnissen	
Wirkung der Druckwelle	völlige Zerstörung von Gebäuden usw.	mittlere bis schwere Zerstörung		

Solange Atomwaffen in den Händen von imperialistischen Machthabern sind, müssen wir uns und die Errungenschaften unserer Arbeit vor einem überraschenden Überfall schützen.

Angesichts vor allem der verheerenden Strahlenwirkung von Atomwaffen hat sich bei einigen Menschen die Meinung gebildet, im Falle eines Atombombenwurfs gäbe es keinen wirksamen Schutz.

Im Zentrum einer Atombombenexplosion gibt es natürlich keinen Schutz; dieses Zentrum macht jedoch nur ein Prozent der Fläche aus, die von einem Atombombenabwurf in Mitleidenschaft gezogen wird. Mit der weiteren Entfernung vom Zentrum nehmen die Aussichten auf einen wirksamen Schutz ständig zu; zum Beispiel schützen Erdlöcher und Gräben weitgehend gegen die Druck- und Hitzewelle. Da die γ-Strahlung mit der Entfernung vom Zentrum der Explosion wesentlich abnimmt, können Erdwälle und dicke Mauern einen wirksamen Schutz dagegen bieten. Je besser wir die Wirkungen dieser scheußlichen Waffe kennen und je gründlicher wir uns mit Schutzmaßnahmen befassen, desto besser können wir uns schützen.

Ein besserer Schutz gegen den Atomkrieg aber, an dem jeder Mensch mitarbeiten kann, ist der aktive weltweite Kampf dafür, daß keine Atombombe mehr gebaut wird, die Atombombenversuche aufhören und die vorhandenen Bestände an Atomwaffen vernichtet werden. Das haben viele Menschen in allen Teilen der Erde erkannt und sich zur großen Weltfriedensbewegung zusammengeschlossen, die eine starke Kraft in der Auseinandersetzung mit den Atomkriegern darstellt.

In der gegenwärtigen Lage ist jedoch die wirksamste Waffe gegen die Gefahren des Atomkrieges die Tatsache, daß die Sowjetunion ebenfalls Atomwaffen besitzt. Sie hat rechtzeitig erkannt, welche Gefahr die Atomwaffen in der Hand der Imperialisten für die Menschheit bedeuten. Da die Sowjetunion außerdem im Besitz interkontinentaler ballistischer Raketen ist und mit ihnen zu jeder Zeit jeden beliebigen Ort der Erde erreichen kann, hat sie die wirkliche Überlegenheit auf dem Gebiet der Atombewaffnung.

Das erfüllt uns mit Stolz über die wissenschaftlichen und technischen Leistungen der sowjetischen Menschen und gibt uns zugleich die Zuversicht, daß die Imperialisten einen Atomkrieg nicht ohne weiteres auslösen werden. Daß die Sowjetunion diese Atomwaffen nur zum Schutz des sozialistischen Lagers und der gesamten Menschheit entwickelt hat, geht u. a. aus dem Vorschlag von Ministerpräsident Chruschtschow anläßlich seiner Amerikareise im September 1959 vor der Vollversammlung der Vereinten Nationen hervor: „Alle im Besitz der Staaten befindlichen Atom- und Wasserstoffbomben werden vernichtet, ihre weitere 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 noch Transportzwecken und der Erschließung des Weltraumes zum Wohle der ganzen Menschheit."

7. Frédéric und Irène Joliot-Curie. In den Reihen der Kämpfer für Frieden und Fortschritt stehen viele der Wissenschaftler, die die Atomenergie entdeckt und weiter erforscht haben. Zu ihnen gehören auch *Frédéric* und *Irène Joliot-Curie*, die zu den bedeutendsten Atomforschern zählen. Frédéric Joliot-Curie hat ein Verfahren zur Messung der Halbwertszeit von sehr kurzlebigen Substanzen entwickelt. Seine

Untersuchungen bereiteten das Auffinden des Neutrons vor. Ihre Krönung fanden diese Arbeiten darin, daß er gemeinsam mit seiner Frau die *künstliche Radioaktivität* entdeckte. Im Jahre 1935 erhielt das Ehepaar Joliot-Curie den *Nobelpreis für Chemie*. Frédéric Joliot-Curie hat auch Möglichkeiten zur Ausnutzung der bei der Spaltung von U^{235} frei werdenden Energie entwickelt. Es ist sein Verdienst, daß am 15. Dezember 1948 der *erste französische Atomreaktor „Zoë"* in Betrieb genommen worden ist.

Frédéric Joliot-Curie hat schon während seines Studiums am chemisch-physikalischen Institut in Paris entschieden gegen jeden Krieg Stellung genommen. Als Praktikant kam er dann unmittelbar mit Arbeitern in Berührung und lernte hierbei ihre sozialen Probleme kennen. Dieser Einfluß wurde mitbestimmend für seine spätere politische Entwicklung, die ihren Höhepunkt fand, als er 1942 der *Kommunistischen Partei Frankreichs* beitrat. Er nahm am Kampf gegen die faschistische Besetzung Frankreichs teil. 1946 wurde er *Hoher Kommissar für Atomenergie* in Frankreich. Da er es ablehnte, Ergebnisse der Atomforschung kriegerischen Zwecken dienstbar zu machen, wurde er einige Jahre später seines Postens enthoben.

Als die *Weltfriedensbewegung* immer mehr erstarkte und 1949 der *Weltfriedensrat* gegründet wurde, wählte man Frédéric Joliot-Curie zum Präsidenten. In dieser Eigenschaft wurde er Initiator des *Stockholmer Appells* zur Ächtung der Atombombe, zu dem sich über 500 Millionen Menschen aller Erdteile durch ihre Unterschrift bekannten. Seine Arbeit für den Frieden wurde 1951 durch die Verleihung des Leninpreises gewürdigt. Am 14. August 1958 starb Frédéric Joliot-Curie an den Folgen einer Krankheit, die er sich durch seine Forschungsarbeit zugezogen hatte.

Der Präsident des Deutschen Friedensrates, Dr. Dr. h. c. *W. Friedrich*, sagte in seinen Gedenkworten über Frédéric Joliot-Curie: „Er gehört zu den Großen, die der Menschheit das Tor in das Atomzeitalter aufgestoßen haben, und er gehört zugleich zu den Ersten, die erkannten, daß diese neue Epoche gebieterisch neue Formen des internationalen Lebens und der zwischenmenschlichen Beziehungen verlangt."

57. Die Anwendung radioaktiver Isotope

1. Die Erzeugung von Radioisotopen. Die in der Atomphysik gewonnenen Erkenntnisse werden nicht allein für die Energieerzeugung angewandt. Sie leisten der Menschheit auch auf andere Weise große Dienste. Besondere Bedeutung für die Wissenschaft und Praxis haben die *radioaktiven Isotope*, die *Radioisotope*, erlangt.

Man kann Radioisotope grundsätzlich in jedem Reaktor gewinnen, sowohl in den ausschließlich der Forschung dienenden Versuchs- oder Forschungsreaktoren als auch in den Reaktoren der Atomkraftwerke. Will man von einem Element, z. B. von Kobalt, ein radioaktives Isotop erhalten, so bringt man es in den Moderator eines Reaktors. Die zahlreichen Neutronen, die den Moderator durchdringen, vereinigen sich zum Teil mit den Kobaltkernen und bilden dadurch andere radioaktive Kerne:

$$Co^{59}_{27} + n^{1}_{0} \rightarrow Co^{60}_{27}.$$

Co^{60}_{27} ist radioaktiv und geht unter Aussendung von β- und γ-Strahlen in den Nickelkern Ni^{60}_{28} über:

$$Co^{60}_{27} \rightarrow Ni^{60}_{28} + e^{0}_{-1}.$$

Die Halbwertszeit für Co^{60} beträgt 5,3 Jahre. Co^{60} ist zur Zeit der stärkste γ-Strahler. Die intensive γ-Strahlung wird in der Technik und in der Medizin weitgehend ausgenutzt (vgl. S. 256 und 258).

Auf diese Weise kann man verhältnismäßig billig und in vielen Fällen auch einfach Radioisotope der verschiedensten Elemente herstellen. Beim Arbeiten mit Radioisotopen sind besondere Schutzmaßnahmen notwendig. Die radioaktiven Stoffe befinden sich hinter strahlensicheren Wänden und Fenstern. Mit Hilfe eines besonderen Übertragungsmechanismus, den man *Manipulator* nennt, kann der Wissenschaftler die Bewegungen seiner Hand auf Greifwerkzeuge im Innern des Arbeitsraumes übertragen (Abb. 254/1).

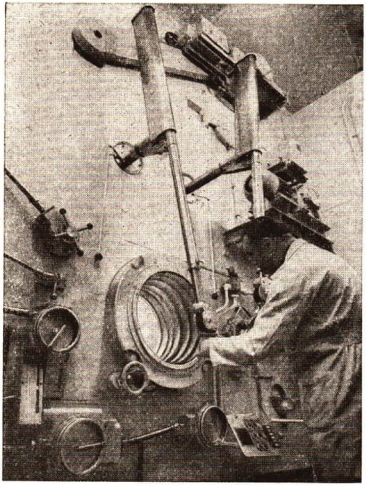


Abb. 254/1. Wissenschaftler bei der Arbeit mit dem Manipulator

2. Die Methode der markierten Atome — Anwendungen in der Medizin. In ihrem chemischen und biologischen Verhalten zeigen die Radioisotope die gleichen Eigenschaften wie die entsprechenden stabilen Atome. Sie machen aber, im Gegensatz zu den stabilen Atomen, ihre Anwesenheit jeweils durch die von ihnen ausgesandte Strahlung kenntlich. Man kann sie daher, auch in geringsten Mengen, mit Hilfe von Fotoplatten, Fluoreszenzschirmen und Geiger-Müller-Zählrohren nachweisen. In dieser Nachweisbarkeit liegt eine große und vielseitige Bedeutung der Radioisotope. Man spricht daher von *markierten Atomen*.

Injiziert man beispielsweise in eine Armvene eine Kochsalzlösung (NaCl), die eine geringe Menge radioaktives Natrium enthält, so kann man den Weg dieser markierten Atome im Blutkreislauf verfolgen. Nach etwa einer Minute lassen sich die radioaktiven Atome bereits im anderen Arm nachweisen. Ungefähr eine Stunde später haben sie sich im gesamten Blutkreislauf verteilt. Daraus kann der Arzt wichtige Rückschlüsse auf den Blutkreislauf ziehen.

Der wichtigste Bestandteil im Farbstoff der roten Blutkörperchen, dem Hämoglobin, ist das Eisen. Mit radioaktiven Eisenatomen läßt sich die Lebensdauer der roten Blutkörperchen und damit eine unter Umständen vorhandene Blutkrankheit feststellen. Gleichzeitig kann der gesamte Blutkreislauf kontrolliert werden. Hierauf beruhen wichtige Erkenntnisse der medizinischen Forschung.

Viele Vorgänge im menschlichen Körper, die bisher der medizinischen Wissenschaft unbekannt geblieben waren, sind mit Hilfe von Radioisotopen erforscht

worden. So hat man beispielsweise für den Stoffwechsel folgendes nachgewiesen: Die mit der Nahrung dem Körper zugeführten Stoffe werden nicht unmittelbar für die Aufrechterhaltung der Lebensvorgänge verwendet, sondern zunächst gespeichert. Abgebaut werden immer nur die vorhandenen Reserven. In dem Fett unserer Nahrung ist Wasserstoff enthalten. Man hat durch Zugabe von radioaktivem Wasserstoff, von Tritium, festgestellt, daß das neu zugeführte Fett zunächst an bestimmten Stellen des Körpers gespeichert wird. Dasselbe konnte man beim Eiweiß mit Hilfe von radioaktivem Stickstoff nachweisen. Auch über den Weg und Verbleib aller übrigen dem Körper zugeführten Stoffe kann man durch diese Methode Aufschluß erhalten. Das Ergebnis dieser Versuche war die Feststellung, daß sich der größte Teil unseres Körpers im Verlauf eines Jahres erneuert.

Radioisotope sind zu unentbehrlichen Hilfsmitteln bei der Diagnose, das heißt bei der Feststellung von inneren Erkrankungen geworden. Andererseits kann man Radioisotope auch in vielen Fällen zur Heilung von Krankheiten, zur Therapie, verwenden. Große Schwierigkeiten bereitet die frühzeitige Feststellung von bösartigen Geschwulstkrankheiten, zum Beispiel von Krebs. Das wuchernde krankhafte Gewebe nimmt Phosphor schneller auf als das gesunde. Führt man dem Körper mit der Nahrung radioaktiven Phosphor zu, so kann man mit Hilfe der Fotoplatte einen Krankheitsherd und die evtl. schon vorhandenen Tochtergeschwülste, die sogenannten Metastasen, erkennen (Abb. 255/1). Die Behandlung kann deshalb schon rechtzeitig einsetzen und sich auch auf die Metastasen erstrecken, die besonders gefährlich sind, weil sie bisher nicht erkannt werden konnten. Zum Nachweis von Schilddrüsenkrebs und den bereits vorhandenen Tochtergeschwülsten verwendet man das radioaktive Jod (J^{132}). Radioaktives Xenon, in sehr geringen Mengen der Atmungsluft beigemischt, kann nach neuesten Forschungen die frühzeitige und einwandfreie Erkennung des Lungenkrebses ermöglichen. Gerade die rechtzeitige Diagnose und Therapie sind bei diesen Krankheiten besonders wichtig.

Es ist schon seit langer Zeit bekannt, daß Radiumstrahlen je nach ihrer Intensität jedes Gewebe, besonders aber das Gewebe bösartiger Geschwülste zerstören oder im Wachstum hemmen (vgl. S. 210). Eine umfassende Anwendung in den Krankenhäusern aber scheiterte daran, daß Radium nicht in beliebig großer Menge zur Verfügung stand und sehr teuer war. Seit der Entdeckung der künstlichen Radioaktivität lassen sich radioaktive Isotope in beliebiger Menge herstellen. Besonders geeignet ist für die Therapie das Kobaltisotop Co^{60}

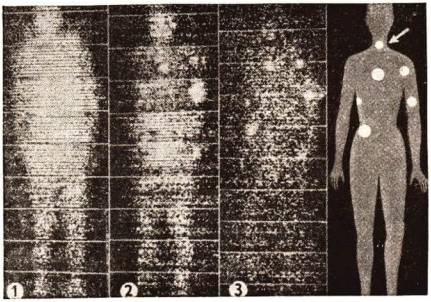


Abb. 255/1. Drei Fotoplatten zeigen die zunehmende Konzentration von J^{131}_{53} an krebskranken Körperstellen

(vgl. S. 254). Bei der Anwendung ist der Arzt nicht mehr auf Bruchteile von einem Gramm beschränkt, sondern es steht in größerer Menge zur Verfügung. Für die Behandlung hat man ein besonderes Gerät entwickelt, die sogenannte *Kobaltkanone* (Abb. 256/1).

Aus einem abgeschirmten Kanal treten die γ-Strahlen gebündelt aus und lassen sich auf eine engbegrenzte Stelle des Körpers richten. Wegen der großen Energie der γ-Strahlen können nicht nur oberflächlich, sondern auch tiefer liegende Geschwülste radioaktiv behandelt werden. Damit das darüberliegende gesunde Gewebe geschont wird, bestrahlt man den Krankheitsherd durch ständiges Schwenken des Gerätes aus verschiedenen Richtungen (Abb. 256/2). Zur Schonung des gesunden Gewebes kann man das radioaktive Präparat, zum Beispiel Chromphosphat, auch in die Geschwulst einführen. Da bestimmte Organe gewisse Stoffe bevorzugt aufnehmen, wie zum Beispiel die Schilddrüse Jod aufnimmt, führt man Radioisotope unmittelbar dem Stoffwechsel durch Injektion oder mit der Nahrung zu. Die Isotope gelangen dann auf Grund dieser bevorzugten Aufnahme vorwiegend in das kranke Organ und werden dort wirksam. Diese Methode wendet man beispielsweise bei der Behandlung des Schilddrüsenkrebses an. Dem Körper des Patienten wird hierbei radioaktives Jod zugeführt. Weil die Radioisotope, im Gegensatz zum Radium, verhältnismäßig kurze Halbwertszeiten haben, klingt ihre Wirkung bald ab. Eine Schädigung durch eine Dauerwirkung tritt daher nicht ein.

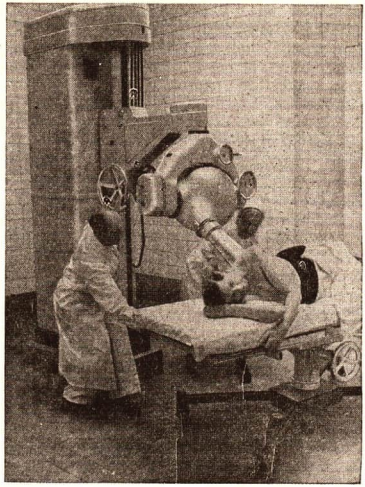


Abb. 256/1. Gerät zur Bestrahlung krebskranker Körperteile, sogenannte Kobaltkanone

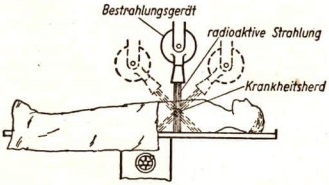


Abb. 256/2. Bestrahlung mit schwenkbarem Kobaltpendelgerät

3. Anwendungen in Biologie und Landwirtschaft. In der Biologie und in der Landwirtschaft macht man von der Methode der markierten Atome sehr vielseitigen

Gebrauch. Mit Hilfe markierter Atome läßt sich feststellen, an welcher Stelle und innerhalb welcher Zeit eine Pflanze die mit dem Dünger zugeführten Nährstoffe ablagert. Radioaktiver Phosphor, der dem phosphorhaltigen Düngemittel beigemischt war, wurde bei den verschiedenen Arten der Versuchspflanzen nicht an den gleichen Stellen nachgewiesen. Bei Tomaten fand er sich besonders in den Wurzeln und Blatträndern, bei den Erbsen sammelte er sich ebenfalls in den Wurzeln, in der Spitze des Triebes und in den Blättern. Durch solche Untersuchungen kann festgestellt werden, in welchem Entwicklungsstadium der Pflanzen Dünger zu geben ist, wie tief er in den Boden gebracht werden muß, welche Körnung besonders günstig ist u. a. Die Auswertung und praktische Anwendung dieser Ergebnisse steigert den Ertrag und führt zu einer rationellen Ausnutzung der Düngemittel. Solche Untersuchungen werden planmäßig u. a. in den Instituten der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften durchgeführt.

In der Pflanze werden aus anorganischen Stoffen mit Hilfe der aus der Sonnenstrahlung stammenden Energie organische Stoffe aufgebaut. Dieser Vorgang wird als Fotosynthese bezeichnet. Früher nahm man zum Beispiel an, daß der zum Aufbau der Kohlenhydrate notwendige Kohlenstoff ausschließlich aus der Luft von den Blättern aufgenommen wird. Sowjetische Forscher haben mit Hilfe markierter Kohlenstoffatome nachgewiesen, daß im Durchschnitt etwa 10% bis 15% des assimilierten Kohlenstoffes den Karbonaten des Bodens durch die Wurzeln entnommen werden.

Von großer Bedeutung ist die Methode der markierten Atome auch für die Schädlingsbekämpfung. Für die Erforschung der Verbreitung von Insekten hat man beispielsweise Fliegen Zuckersirup verabreicht, der radioaktiven Phosphor enthält. Die Fliegen verbreiteten sich in wenigen Stunden über einen ganzen Häuserkomplex. Am nächsten Tag konnte man sie schon in zwei bis drei Kilometer Entfernung nachweisen.

Radioaktive Strahlen wirken besonders stark auf die Keimzellen. Sie verursachen dadurch Erbänderungen, sogenannte Mutationen. Nach den verbrecherischen Bombenabwürfen auf Hiroshima und Nagasaki hat die Zahl der Mißgeburten in den verseuchten Gebieten erschreckend stark zugenommen.

Die künstliche Erzeugung von Mutationen nützt man bei der Pflanzenzüchtung aus. Bestrahlt man Pflanzen oder Samen mit γ- oder Neutronenstrahlen, so werden unter der Vielzahl der Mutationen einige mit wertvollen Eigenschaften auftreten. Die Arbeit der Züchter, die sich sonst über Jahrzehnte erstreckte, kann auf eine verhältnismäßig kurze Zeit beschränkt werden. Große Erfolge hat man auf diesem Gebiet besonders in der Sowjetunion erzielt. Man hat auf diese Art Getreidesorten, die gegen bestimmte Pilzkrankheiten immun sind, und Obstsorten mit kürzeren Reifezeiten gezüchtet.

Die radioaktiven Strahlen können auch zur Lebensmittelkonservierung benutzt werden, da durch die Strahlen Bakterien und andere Fäulniserreger abgetötet werden. Bei Kartoffeln wird durch die Strahlen das frühzeitige Keimen verhindert. Rüben, Zwiebeln und andere Früchte konnten längere Zeit frisch erhalten werden. Sowjetische Wissenschaftler haben ein Verfahren entwickelt, um eingelagertes Getreide und Mehl durch Bestrahlung vor Schädlingsbefall zu schützen.

4. Anwendungen in der Technik. a) Werkstoffprüfung. Bevor man Werkstücke aus Guß- oder Schmiedeeisen bearbeitet oder in Maschinen und Geräte einbaut,

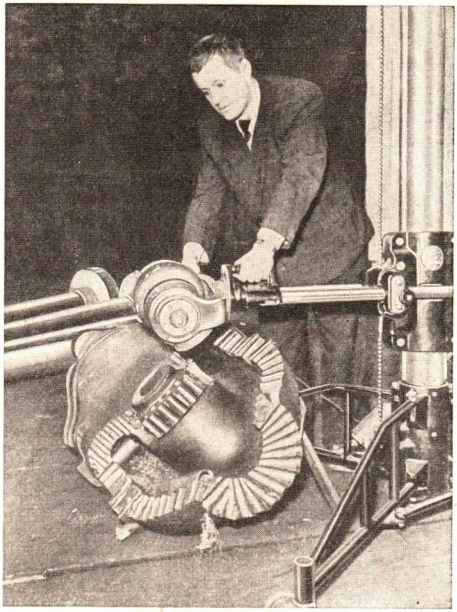


Abb. 258/1
Durchleuchtung eines Werkstückes mit γ-Strahlen

müssen sie auf innere Fehler genau kontrolliert werden. Das kann durch Röntgenstrahlen geschehen. Für eine Durchleuchtung großer und dicker Metallteile sind aber Strahlen mit sehr starker Durchdringungsfähigkeit erforderlich. Dazu braucht man umfangreiche und sehr kostspielige Röntgenanlagen. Man verwendet darum in zunehmendem Maße die von radioaktiven Isotopen ausgesandten γ-Strahlen. Mit Co^{60} kann man Materialien bis zu einer Dicke von 200 mm durchleuchten (Abb. 258/1). Dieses Verfahren nennt man *Gammagraphie*. Auf dieselbe Weise können auch Schweißnähte geprüft werden, was besonders für den Schiffbau wichtig ist.

b) Untersuchung von Verschleißvorgängen. Kolbenringe, Lager und andere durch Reibung beanspruchte Maschinenteile unterliegen einer ständigen Abnutzung. Wenn man diese Teile vor dem Einbau mit Neutronen bestrahlt, bildet sich etwas radioaktives Eisen. Durch den Verschleiß gelangen Teilchen in das Schmiermittel. Aus der Größe der radioaktiven Strahlung des Schmiermittels kann man auf den Grad der Abnutzung des entsprechenden Maschinenteiles schließen. Dasselbe erreicht man, wenn bei der Herstellung der Maschinenteile etwas Co^{60} hinzugefügt

wird. Durch diese Methode kann man Werkstoffe und Schmiermittel finden, bei denen die Abnutzung möglichst gering ist. Auf die gleiche Art läßt sich auch die Abnutzung der Meißel bei der Zerspanung nachweisen. Hier wird der abfallende Span auf seine Radioaktivität untersucht. Auch Autoreifen können mit Hilfe von Radioisotopen auf ihre Abnutzung untersucht und ständig kontrolliert werden. So kann man statt in bisher langwierigen Versuchen in wesentlich kürzerer Zeit für jeden Zweck die geeigneten Werkstoffe finden.

c) **Kontaktfreie Dickenmessung.** Radioaktive Strahlen werden von den Stoffen, die sie durchdringen, absorbiert. Die Absorption hängt u.a. von der Dicke der durchstrahlten Schicht ab. Daher lassen sich radioaktive Strahlen zur Dickenmessung verwenden. Die zu prüfende Schicht, meist eine dünne Folie, gleitet über einen γ-Strahler. Mit Hilfe eines auf der anderen Seite der Folie angebrachten Meßgerätes kann man aus der Stärke der Absorption die Dicke des Materials mit einer Genauigkeit von einem tausendstel Millimeter bestimmen.

Beim Walzen von Stahlblechen läßt sich die Dicke der Bleche in ähnlicher Weise kontrollieren. Stahlplatten und -rohre bis zu einer Dicke von 100 mm können durch diese sogenannte *kontaktfreie Dickenmessung* mit einer Meßgenauigkeit bis zu 0,01 mm Stahldicke geprüft werden. Außerdem läßt sich mit diesem Verfahren die Einhaltung einer bestimmten Dicke der Bleche automatisch regeln. Für die Erzeugung hochwertiger Produkte ist es wichtig, daß eine bestimmte Dicke von Folien oder Platten garantiert werden kann. Eine automatische Regelung von Walzvorgängen erreicht man durch folgendes Verfahren: Ein Stück der Folie oder Platte, das genau die vorgeschriebene Dicke aufweist, wird dauernd von einer Strahlenquelle durchstrahlt. Dabei ergibt sich ein bestimmter Betrag der Absorption, der von einem Meßgerät angezeigt wird. Werden die Strahlen einer zweiten Strahlenquelle, die in den Produktionsprozeß eingeschaltet ist, in der gleichen Stärke absorbiert, so ist die vorgeschriebene Dicke gewährleistet. Abweichungen werden sofort durch den Ausschlag des Meßinstrumentes erkennbar. Die Veränderungen der Meßwerte werden in Veränderungen der Stärke des Walzendruckes übersetzt (Abb. 259/1). Auf diese Weise wird weitgehend Ausschuß vermieden.

So wird zum Beispiel im *VEB Kaltwalzwerk Oranienburg* die Dicke von kaltgewalztem Stahlband mit Radioisotopen gemessen. Während das moderne Walzgerät mit 100 m · min^{-1} arbeitet, ist bei einer Messung der Dicke mit Handmikrometerschrauben nur eine Produktion von 30 m Stahlband je Minute möglich. Mit Hilfe der modernen Dickenmeßgeräte kann die Leistung einer modernen Walzanlage erst voll ausgenutzt werden. Diese Dickenmeßgeräte haben zwar etwa 30000 DM gekostet, bringen aber eine Einsparung von jährlich 85000 DM. Die Mehrproduktion an Stahlband macht in diesem Falle einen bisher notwendigen Import überflüssig.

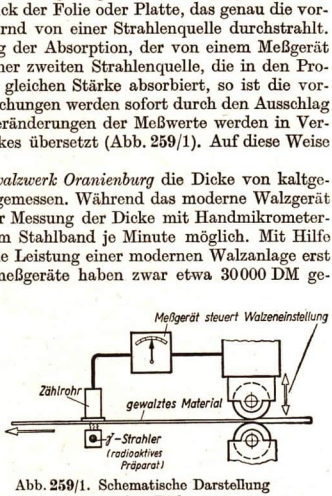


Abb. 259/1. Schematische Darstellung einer automatischen Dickenmessung

d) **Hochofenkontrolle.** Das Innere der Hochöfen ist mit einer dicken Schicht von feuerbeständigem Material, mit Schamotte, ausgekleidet, damit die glühenden Massen nicht mit den Außenwänden in Berührung kommen. Mit der Zeit wird aber diese Schutzschicht

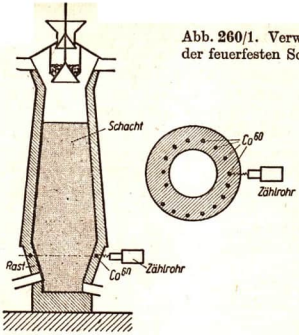


Abb. 260/1. Verwendung von Co^{60} zur Kontrolle des Ausbrennens der feuerfesten Schicht (waagerechter und senkrechter Schnitt)

durch Ausbrennen so dünn, daß der Ofen stillgelegt und überholt werden muß. Das muß rechtzeitig geschehen, sonst können schwerste Schäden entstehen. Andererseits will man aber die Öfen möglichst lange ohne Reparatur in Betrieb halten, um unnötigen Produktionsausfall zu vermeiden. Die bisher sehr schwierige Kontrolle des Ausbrennens der feuerfesten Schicht wird durch Verwendung von Co^{60} bedeutend vereinfacht. Man mauert in verschiedenen Abständen von der Innenwand kleine Mengen von Co^{60}, die in Stahlkapseln eingeschlossen sind, ein (Abb. 260/1). In bestimmten Zeitabständen mißt man mit Hilfe von Zählrohren die Stärke der von Co^{60} ausgesandten γ-Strahlung, die mit nur geringer Schwächung Mauerwerk von 0,5 m Stärke durchdringen kann. Das Zählrohr wird an die Stelle der Außenwand gebracht, an der sich im Innern ein Stück Kobalt befindet, und die ausgesandte Gammastrahlung gemessen. Sobald die Schutzschicht bis zu der innersten Co^{60}-Kapsel ausgebrannt ist, wird an dieser Stelle keine Strahlung mehr nachzuweisen sein. Dagegen ist das ausfließende Roheisen jetzt etwas radioaktiv, da beim Ausbrennen das Kobalt in die Schmelze übergegangen ist. Dadurch läßt sich die jeweilige Dicke der feuerfesten Schicht feststellen und ihr allmähliches Ausbrennen kontrollieren.

Nach dieser Methode hat man zum Beispiel im *VEB Eisenhütten-Kombinat „Ost“* in Eisenhüttenstadt an einem Hochofen Untersuchungen über den Mauerwerksverschleiß in verschiedenen Bereichen des Hochofens durchgeführt. Die Auswertung dieser Untersuchungen führte dazu, daß man Hochöfen mit besserer Haltbarkeit und höchster Sicherheit bauen kann.

Die Höhe der Schmelze im Hochofen kann ebenfalls durch radioaktive Strahlung bestimmt werden. Man bringt an der einen Seite des Hochofens eine senkrecht verschiebbare Strahlenquelle mit Co^{60} an. Ihr gegenüber kann eine Meßvorrichtung für die radioaktiven Strahlen in gleicher Weise bewegt werden. Da das flüssige Roheisen die γ-Strahlung stärker absorbiert als die ungeschmolzene Mischung aus Erzen, Koks und Zuschlägen, läßt sich die Höhe der Schmelze feststellen.

e) Füllstandsmessungen. Durch ein ähnliches Verfahren wie bei der Hochofenkontrolle läßt sich der Stand von Flüssigkeiten in geschlossenen Behältern und Kesseln messen (Abb. 260/2). Sinkt die Oberfläche der Flüssigkeit unter ein bestimmtes Niveau, das durch ein radioaktives Präparat und ein Zählrohr gekennzeichnet ist, so steigt die

Abb. 260/2. Füllstandsmessung mit Hilfe von γ-Strahlen

Intensität der Strahlung sprunghaft an; die Absorption durch das Füllgut fällt plötzlich fort.

Die Höhe der Flüssigkeit läßt sich auch dadurch messen, daß man das radioaktive Präparat am Boden des Behälters und das Meßgerät an der Decke anbringt. Die gemessene Strahlungsintensität nimmt mit dem Steigen der Flüssigkeit ab.

Mit Isotopenfüllstandsmessern wird zum Beispiel im *VEB Braunkohlenwerk Gustav Sobottka* in Röblingen der Füllstand von Braunkohlenbunkern gemessen. Die Meßwerte werden zu einer automatischen Regelung der Füllung benutzt. Diese Füllstandsmesser können weitgehend in der chemischen Industrie benutzt werden.

5. Die Altersbestimmung durch Radioaktivität. Schon bald nach der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität hat man die neuen Erkenntnisse zur Altersbestimmung von Gesteinen und damit der Erde benutzt. Das natürliche Uran U^{238} hat eine Halbwertszeit von etwa 4,5 Milliarden Jahren und verwandelt sich schließlich in das stabile Bleiisotop Pb^{206} (vgl. Abb. 228/1). Uranerz enthält darum stets Blei, das aus Uran entstanden ist. Aus dem Verhältnis des noch nicht zerfallenen Urans zu dem schon vorhandenen Blei kann man auf die Dauer des Zerfallsprozesses schließen. Dadurch läßt sich zum Beispiel abschätzen, wie lange die Erde schon in dem gegenwärtigen Zustand existiert. Nach den jetzt vorliegenden Ergebnissen dieser sogenannten Uran-Blei-Methode sind die ältesten bekannten Gesteine der Erde etwa 2,5 Milliarden Jahre alt.

Zur Altersbestimmung organischer Reste nutzt man die radioaktive Strahlung des in der Natur vorkommenden radioaktiven Isotops C^{14} aus. Kohlenstoff ist bekanntlich ein wesentlicher Bestandteil aller organischen Verbindungen. Kohlendioxyd (CO_2), das die Pflanzen zu ihrem Aufbau benutzen, enthält neben dem stabilen Isotop C^{12} immer etwas radioaktiven Kohlenstoff C^{14}. Durch die Pflanzen gelangt der radioaktive Kohlenstoffanteil auch in den tierischen und in den menschlichen Körper. Solange ein Organismus lebt, wird der Kohlenstoff laufend ergänzt. Mit dem Tode hört aber der Nachschub von neuem radioaktivem Kohlenstoff auf. Sein Zerfall, der mit einer Halbwertszeit von 5600 Jahren vor sich geht, wird nun nachweisbar. Je älter ein organischer Rest ist, desto weniger radioaktiven Kohlenstoff enthält er. Man prüft deshalb die alten Holz- und Knochenreste auf die Stärke ihrer β-Strahlung und vergleicht diese mit der Strahlung der entsprechenden frischen Substanzen. Aus der Stärke der radioaktiven Strahlung läßt sich dann das Alter mit guter Genauigkeit feststellen. Mit dieser Methode hat man zum Beispiel das Alter einer ägyptischen Königsmumie zu 2200 Jahre bestimmen können. Für die Feuerstätten von Höhlenbewohnern aus der Dordogne in Frankreich ergab sich aus Holzkohlenresten ein Alter von 15000 Jahren. Diese Methode der Altersbestimmung hat bei etwa 40000 Jahren ihre Grenze, da die Halbwertszeit des C^{14} relativ klein ist und seine Radioaktivität daher verhältnismäßig schnell abnimmt.

6. Anwendungen in der Chemie. In der chemischen Industrie und Forschung werden radioaktive Isotope vielseitig und erfolgreich angewandt. Bei der quantitativen Analyse müssen oft Stoffe aus einer Lösung ausgeschieden werden. Dabei ist es wichtig, daß die Ausfällung restlos geschieht. Das läßt sich prüfen, wenn man dem Lösungsmittel radioaktive Isotope des auszufällenden Stoffes zusetzt. Weist dann nach Beendigung der Ausfällung das Lösungsmittel bei einer Prüfung mit dem Zählrohr keine radioaktive Strahlung mehr auf, so ist der betreffende Stoff vollstän-

dig abgeschieden worden. Um festzustellen, ob nicht auch geringe Mengen eines anderen gelösten Stoffes mit ausfallen, fügt man radioaktive Isotope dieses Stoffes zu und prüft jetzt den Niederschlag auf Radioaktivität.

Eine wichtige Anwendung finden die Radioisotope bei der Kontrolle chemischer Prozesse. In chemischen Betrieben können die Abgase auf den Gehalt an bestimmten Stoffen kontrolliert werden. So werden beispielsweise die fluorhaltigen Abgase, die bei der Aluminiumgewinnung durch Elektrolyse entstehen, vor dem Ausströmen aus den Schornsteinen durch besondere Anlagen weitgehend gereinigt. Diese Gase können bei einer bestimmten Konzentration in der Land- und Forstwirtschaft Schaden anrichten. Durch Zusetzen von radioaktivem NaF kann man in der Umgebung des Betriebes prüfen, wie groß der Anteil der giftigen Verbindungen ist.

Auch die Eigenschaften vieler Plaste lassen sich durch geeignete radioaktive Bestrahlung in günstiger Weise verändern. Polyäthylen zum Beispiel wird dadurch zerreißfester und elastischer. Da es auch wärmebeständig ist, das heißt bei hoher Temperatur nicht so schnell weich wird, eignet sich so behandeltes Polyäthylen zur Umhüllung von Starkstromkabeln besonders gut. Diese können dann etwa mit der doppelten Stromstärke belastet werden wie gewöhnliche Kabel. Hieraus ergibt sich eine wesentliche Einsparung an Kupfer.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Warum spricht man bei der Anwendung von Radioisotopen von markierten Atomen? Schildern Sie die Methode der markierten Atome an einem Beispiel!
2. Wie kann man mit Hilfe von Radioisotopen Krankheiten erkennen beziehungsweise heilen? Geben Sie Beispiele dafür an!
3. Wie kann man die Aufnahme von Nährstoffen durch Pflanzen beobachten? Welche Folgerungen zieht man daraus für die Düngung?
4. Welche wirtschaftlichen Vorteile hat die Anwendung der Radioisotope bei der Werkstoffprüfung?
5. Welche Bedeutung haben Radioisotope für den Betrieb von Hochöfen?
6. Nennen Sie Anwendungen von Radioisotopen bei der Arbeit des Chemikers!

Formelzeichen

nach TGL Blatt 0-1304 (Auszug)

Das an erster Stelle angegebene Zeichen ist bevorzugt anzuwenden.

	Geometrische Größen		Masse
l, L	Länge	m	Masse
h, H	Höhe	ϱ, d	Dichte
b, B	Breite	A	Atomgewicht*)
r, R	Halbmesser, Radius	M	Molekulargewicht*)
d, D	Durchmesser		**Zeit**
λ	Wellenlänge	t, τ, z	Zeit (Zeitpunkt oder Zeitspanne)
s	Weglänge (Kurvenlänge)	T	Periodendauer
A, S, F	Fläche (auch Querschnitt, Grenzfläche, Oberfläche)	φ	Vor- oder Nacheilwinkel, Phasenverschiebungswinkel. Nullphasenwinkel
α, β, γ	ebene Winkel		
ω, Ω	Raumwinkel		
V, τ	Rauminhalt, Volumen		* Verhältniszahl, keine Masse

n	Umlauffrequenz (Drehzahl, Umlaufzahl)
ω, Ω	Winkelgeschwindigkeit
f, ν	Frequenz
ω	Kreisfrequenz
v, u, w	Geschwindigkeit
a, b	Beschleunigung
g	Fallbeschleunigung
	Kraft und Druck
F, P, K	Kraft
G	Gewicht
M, T	Moment einer Kraft, Drehmoment
p	Druck
μ, f	Reibungszahl
	Temperatur
t, ϑ, y	Celsius-Temperatur
T, Θ, Y	Kelvin-Temperatur (thermodynamische Temperatur — absolute Temperatur)
α	Längsausdehnungs-Koeffizient
γ, β	Raumausdehnungs-Koeffizient
	Wärme, Arbeit, Energie
W, Q	Wärmemenge
W, A	Arbeit
W, E	Energie
c	spezifische Wärme
P, N	Leistung
η	Wirkungsgrad
	Elektrische Größen
Q, q	Elektrizitätsmenge, Ladung
e	Elementarladung
E	Elektrische Feldstärke
U	Elektrische Spannung
I	Elektrische Stromstärke
R	Elektrischer Widerstand
ϱ	spezifischer elektrischer Widerstand
ε	Dielektrizitätskonstante
C	Elektrische Kapazität
N, w	Windungszahl
L	Induktivität
	Licht
c	Lichtgeschwindigkeit
n, μ	Brechungszahl
f	Brennweite

Quellenverzeichnis der Abbildungen

Kurt Böttger, Berlin: Abbildung 15/1 · Rudolf Brandt, Sonneberg: Abbildung 236/1 · Werner Bunschuh, Berlin: Abbildungen 44/2, 131/2 · Charité Berlin: Abbildung 200/2 · Dewag Berlin: Abbildung 149/2 · Werkfoto VEB Elektrokohle Lichtenberg, Berlin: Abbildung 9/1 · Forschungsinstitut Manfred v. Ardenne, Dresden: Abbildung 231/1 · Werkfoto VEB Funkwerk Dresden: Abbildung 139/2 · Werkfoto VEB Funkwerk Köpenick: Abbildungen 90/2, 106/2, 107/1, 124/2 · Werkfoto VEB Geräte- und Regler-Werke Teltow: Abbildung 66/2 · Gesellschaft zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse „Entschleierte Geheimnisse": Abbildung 255/1 · Rudolf Girke, Berlin: Abbildung 59/2 · Carl Hühner, Auerbach i. Vo.: Abbildung 171/3 · Institut für Röntgenographie der Technischen Hochschule Dresden: Abbildungen 202/1, 202/2 · Helmut Körner, Dresden: Abbildung 139/1 · Kriminaltechnisches Institut, Berlin: Abbildungen 186/1, 187/1 · Photokino Krütgen, Halle: Abbildungen 50/4, 57/3, 59/1, 60/3, 84/3, 89/1, 152/2 · Werkfoto VEB (K) Metallbau und Labormöbelwerk Apolda: Abbildungen 76/1, 76/2 · Helmut Mucke, Dresden: Abbildungen 77/1, 80/1, 80/2, 82/3, 86/1, 177/4 · Werkfoto VEB Phönix Röntgenröhrenwerk, Rudolstadt: Abbildungen 197/1, 201/2 · Werkfoto VEB Rafena-Werke, Radeberg: Abbildung 138/1 · Staatliches Rundfunkkomitee, Deutscher Fernsehfunk, Berlin: Abbildungen 134/1, 137/2, 137/3, 138/2 · B. G. Teubner, Leipzig: Abbildungen 8/1, 83/1 · Werkfoto VEB Transformatoren- und Röntgenwerk, Dresden: Abbildungen 93/2, 94/1, 94/2, 107/2, 200/1, 203/1 · Werkfoto VEB Vakutronik, Dresden: Abbildungen 212/1, 212/2 · Verlag des Ministeriums für Nationale Verteidigung, Berlin: Abbildungen 133/1, 141/1, 141/2, 172/3, 173/1 · Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin, Bildarchiv: Abbildungen 45/2a, 199/1 · Werkfoto VEB Werk für Fernmeldewesen, Berlin: Abbildung 124/1 · Werkfoto VEB Werkzeugmaschinenwerk „Hermann Schlimme", Berlin: Abbildungen 92/3, 106/1 · Werkfoto VEB Carl Zeiss Jena: Abbildungen 92/2, 166/2, 167/1, 168/1, 168/3, 170/1b, 171/1, 171/2, 175/1, 178/1, 178/2, 178/3, 182/3, 189/1, 190/1 · Zentralbild Berlin: Abbildungen 66/1, 67/1, 68/1, 92/1, 130/2, 135/1, 136/1, 137/1, 157/3, 158/1, 190/2, 201/1, 212/3, 233/2, 234/1, 234/2, 245/1a, 247/1, 247/2, 251/1, 254/1, 256/1, 258/1 · Zentralinstitut für Kernphysik, Dresden-Rossendorf: Abbildungen 233/1, 245/1b · Heinz Zimmermann, Jüterbog: Abbildung 68/2.

Physiker-Bildnisse: Dewag-Berlin: Heinrich Hertz · Sokolow, „Lehrgang für Physik": Alexander Stepanowitsch Popow · B. G. Teubner, Leipzig: Ernst Abbe · Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin, Bildarchiv: Christian Huygens · Zentralbild Berlin: Niels Bohr, Marie Curie-Sklodowska und Pierre Curie, John Dalton, Albert Einstein, Michael Faraday, Irene und Frederic Joliot-Curie, James Clerk Maxwell, Max Planck, Wilhelm Conrad Röntgen, Ernest Rutherford.

Schaltzeichen

Stromarten

— Gleichstrom

~ Wechselstrom

≃ Gleichstrom oder Wechselstrom

Leitungen

Leitungskreuzung

a) ohne Verbindung

b) mit fester Verbindung

Leitungsabzweigung

a) mit fester Verbindung

b) mit lösbarer Verbindung

Sicherung, allgemein

Feinsicherung

Erdung

Widerstände

Ohmscher Widerstand

a) allgemein

b) mit Anzapfungen

c) stufig verstellbar

d) stetig verstellbar

e) Spannungsteiler

Induktiver Widerstand, Drosselspule

a) allgemein

b) mit Eisenkern

c) mit Anzapfungen

wahlweise Darstellung

d) allgemein

e) mit Eisenkern

f) mit Anzapfungen

Kapazitiver Widerstand, Kondensator

a) allgemein

b) stetig verstellbar

c) Elektrolyt-Kondensator, gepolt

Transformator

Transformator

a) allgemein

b) mit Kern

c) wahlweise Darstellung

Schaltgeräte

Schalter

a) allgemein

b) mit Handbetätigung

Relais

Meßgeräte

Meßinstrument, allgemein

a) ohne Kennzeichnung der Meßgröße

b) ohne Kennzeichnung der Meßgröße mit beidseitigem Ausschlag

Strommesser mit Angabe der Einheit

A a) Ampere

mA b) Milliampere

Spannungsmesser mit Angabe der Einheit

V a) Volt

mV b) Millivolt

Statisches Voltmeter

Stromquellen

Galvanische Stromquelle

a) allgemein

20 V

b) mit Angabe der Spannung und der Polarität

n

c) Batterie mit *n* Zellen

Steckdose

Steckdose mit Schutzkontakt

Buchsen mit Steckern

Generatoren

G

Gleichstromgenerator

G ~

Wechselstromgenerator

Röhren

Diode, Einweggleichrichter

a) allgemein

b) mit direkt geheizter Katode

c) mit indirekt geheizter Katode

Duodiode, Zweiweggleichrichter mit indirekt geheizter Katode

Triode

a) allgemein

b) mit direkter Heizung

c) mit indirekter Heizung

Fotozelle

Halbleiterbauelemente

Fotoelement

Trockengleichrichter

Transistor, pnp-Typ

Sonstige Schaltzeichen

Glühlampe

Glimmlampe

Wärmegerät

Mikrofon

Telefon

Lautsprecher

Antenne, allgemein

Dipol-Antenne

Ventil

NAMEN- UND SACHVERZEICHNIS

Abbe, Ernst 173
Abdera, Demokrit von 206
Absorptionsspektrum 189
Agfacolor-Verfahren 192 u. f.
Akkommodation 163
Alkali-Fotozelle 34
α-Strahlen 208f., 222f., 227
α-Teilchen 227, 231
Altersbestimmung 261
Amplitude 55, 58, 74, 98
Amplitudenmodulation 122, 129f.
Analysator 180
Anodenspannung 25ff.
Anodenstrom 24ff.
Antenne 115f., 130
Antennenkreis 110
Aperiodische Kriechbewegung 59
Aperiodischer Grenzfall 60
Arbeitspunkt einer Triode 29
Aston, Francis, William 225
Astronomisches Fernrohr 169
Atombombe 250ff.
Atomgewicht 207
Atommasse 207
Auflösungsvermögen 164, 167
Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle 74f.
— elektromagnetischer Wellen 110

Becquerel, Henri 207f.
Beschleunigungsanlagen 230ff.
β-Strahlen 208, 210, 222f., 227
β-Strahler 230
β-Teilchen 228ff.
Betatron 234f.
Beugung 81ff., 177, 179f.
Bildspeicherröhre 128f.
Bildträger 129
Bildwechselfrequenz 128
Bildweite 153, 162.
Bindungsenergie 240f.
Bodenwellen 120f.
Bogenentladung 9
Bohr, Niels 216
Bohrsches Atommodell 216f.
Braun, Ferdinand 30
Braunsche Röhre 30f., 131
Brechung von Wellen 86ff.
Brechungsgesetz 88, 155
Brechungsverhältnis 88
Brechungswinkel 87, 155, 159
Brechungszahl 88, 155
Bremsstrahlung 197
Brennelemente 243
Brennpunkt 148
Brennpunktstrahlen 151, 160
Brennweite 148, 153
Brillengläser 164f.
Brutreaktor 245
Bunsen, Robert Wilhelm 189

Chadwick, James 223
Charakteristische Strahlung 197
Collektor 47f.
Curie, Marie und Pierre 208f., 228

Dalton, John 206f.
Demodulation 125
Deuterium 225
Deuteronen 225
Dickenmessung 259
Diffusionsnebelkammer 211, 213
Diode 18ff.
Diodengleichrichter 22ff.
Dipol 111ff.
Direktor 119
Dispersion 184
Dispersionsspektrum 184
Dosimeter 212
Dreielektrodenröhre 24ff.
— als Verstärker 27ff.
Dreipunktschaltung 104f.
Duanten 231
Dunkelraum, Hittorfscher 10
—, Faradayscher 10
Durchleuchtung 199

Echograf 91
Echolotung 90f.
Edison, Thomas Alva 17f.
Edison-Versuch 18
Eigenfrequenz 61, 103
Eigenleitung 41ff.
Eigenpeilung 142
Einfallslot 83, 147, 155
Einfallswinkel 83, 87, 147, 155f., 159
Einstein, Albert 239f.
Einsteinsche Gleichung 239
Elektronen 210, 214, 218f.
Elektronenmikroskop 17, 167
Elektronenröhre 18ff.
Elektronenstrom 5, 19f., 39
Elektronentheorie 38f.
Elektronenvolt 209
Elementarladung, elektrische 214
Elemente, künstlich radioaktive 229f.
—, natürlich radioaktive 227f.
Elmsfeuer 8
Elongation 55, 58, 73
Emitter 47f.
Energieniveau 219
Energiereaktor 244
Entdämpfung 101
Epikur aus Samos 206
Erregerfrequenz 61f., 101, 114

Faraday, Michael 108
Farbenmischung, additive 192
—, subtraktive 192
Farbfilter 192
Farbfotografie 192f.
Farbkreisel 192
Fata morgana 158
Fehlstelle 41ff.
Fehlstellenleitung 41ff.
Feldstecher 172
Fermi, Enrico 236, 243
Fernbeobachtungsanlage 134f.
Fernsehbänder 130
Fernsehen, industrielles 134f.
Fernsehgerät 126, 131
Fischlupe 91
Fizeau, Armand Hippolyte 145f.
Forschungsreaktor 244f.
Fotodiode 37
Fotoeffekt 32ff.
Fotoelement 37f.
Fotoemission 33ff.
Fotostrom 33ff.
Fotosynthese 257
Fotovervielfacher 214
Fotowiderstand 37
Fotozelle 34ff.
Foucault, Léon 194
Fraunhofer, Joseph von 189
Fraunhoferscbe Linien 189
Fremdpeilung 142
Frequenz 55, 73, 98
Frequenzbereiche 100
Frequenzmodulation 122
Fresnel, Jean Augustin 194f.
Funkenentladung 8
Funkpeilung 142

Gammagraphie 258
γ-Strahlung 208, 210, 222, 223, 228, 230
Gegenstandsgröße 153, 161ff.
Gegenstandsweite 153, 161ff.
Geiger-Müller-Zählrohr 211
Geigerzähler 212
Geißler, Heinrich 15
Geißlersche Röhren 15
Germaniumflächendiode 43f., 125
Gesetze von den Konstanten und multiplen Proportionen 207f.
Gitter 24f.
Gitterspannung 24ff.
Gitterstrom 24f.
Glagolewa-Arkadiewa 205
Gleichrichtersäule 45
Glimmentladung 10ff.
Glimmlampe 11ff.
Glühemission 18, 33
Glühkatodengleichrichter 23ff.
Glühkatodenröhre 18ff.
van de Graafscher Generator 231
Grenzwinkel 156
Grobstrukturuntersuchung 202f.
Grundfarben 184
Grundniveau 219
Grundpunktstrahlen 151, 160

Hahn, Otto 236f.
Halbleiter 40ff.
Halbwertszeit 227
Hallwachs, Wilhelm 32f.
Hauptfarben 183f.
Heisenberg, Werner 223
Heizung, direkte 20
—, indirekte 20
Heizstrom 21 ff., 24f.
Hertz, Gustav 226
Hertz, Heinrich 16, 32, 55, 108f., 195
Hertz (Hz) 55
Hertzsche Wellen 95ff., 114, 117ff., 132ff.
Hittorf, Wilhelm 15ff., 36
Hochfrequenz-Erwärmung, induktive 106
—, kapazitive 106f.
Höchstfrequenzgenerator 111
Höhensonne 186f.
Höhenstrahlung 229
Hohlspiegelgleichung 153
Huygens, Christian 80, 194
Huygenssches Prinzip 81, 177

Ikonoskop 128f.
Immersionsflüssigkeit 167
Impuls 211
Induktivität 99f.
Interferenz 76ff., 176ff.
Interferenzstreifen 77, 82, 177, 195
Interferometer 177f.
Intervision 134
Ionenlawine 211
Ionenstrom 5
Ionisation 6f.
Isotope 225
—, radioaktive 253f.
Isotopentrennung 225
Iwanenko, Dmitri Dmitrijewitsch 223

Joliot-Curie, Irène und *Frédéric* 222f., 237, 252f.

Kapazität 99f.
Katodenstrahlen 15ff., 197
Katodenstrahl-Oszillographenröhre 31f.
Katodenstrahlrohr 15
Kehlkopfspiegel 149
Kennlinie der Diode 21f.
— der Triode 25ff.
Kernfeld 235
Kernfusion 241
Kernladungszahl 219
Kernmasse 239
Kernreaktion 222, 243
Kernreaktor 243 ff.
Kernsplitter 236
Kettenreaktion 238, 243
Kippgerät 32
Kirchhoff, Gustav Robert 189
Kohärentes Licht 176, 194
Komplementärfarben 185
Konkavlinse 160ff.
Konkavspiegel 160ff.
Konvexlinse 160ff.
Konvexspiegel 160ff.
Kopplung 63
Koronaentladung 7f.
Körperfarben 191
Korpuskulartheorie 194f.
Kreuzanzeigegerät 143
Kühlsystem 243

Lebedew, Peter Nikolajewitsch 204
Leglerungstransistor 48f.
Leitstrahlzone 143
Leitung in Gasen, selbständige 7ff.
—, unselbständige 7
Leuchtröhre 14
Leuchtstoffröhre 10, 13f.
Lichtelektrischer Effekt, äußerer 32ff., 195
—, innerer 36ff.
Lichtgeschwindigkeit 145f.
Lichtschranke 35f.
Linienspektrum 188
Linsengleichung 162
Linsenkombination 161, 165
Longitudinalwelle 70f., 181
Löschspannung 13
Luftspiegelung 157f.
Lupe 165

Malus, Etienne Louis 195
Marconi, Guglielmo 116
Masse, kritische 238, 246
—, überkritische 238
—, unterkritische 238
Massendefekt 239ff.
Massendifferenz 242
Masseneinheiten, physikalische 223
Massenspektrograph 225
Maxwell, James Clerk 108f., 195
Megaelektronenvolt 210
Meißner, Alexander 102
Meißner-Generator 103f.
Meißnersche Rückkopplungsschaltung 103
Meitner, Lise 237
Mikroskop 165f.
Mischfarben 185, 192
Mittelpunktstrahlen 151, 160
Moderatoren 243
Modulation 122f.

Nahbestrahlungs-Röntgenröhre 201
Nahpunkt 163
Nebelkammeraufnahmen 213
Negativfilm 193
Neutronen 223f.
—, langsame 237
—, schnelle 237
—, thermische 237
Newton, Isaac 194
Nipkow, Paul 127
Nipkowsche Lochscheibe 127
Nukleonen 223

Objektiv 165f.
Okular 165f.
Öffnungswinkel 148
Optisches Bild, reelles 150, 161ff.
—, virtuelles 150, 161ff.
Optisches Gitter 179f.
Optische Primsen 159f., 172
Ordnungszahl 219

Panoramagerät 141
Parabolantenne 137f.
Parabolspiegel 148, 170
Parallelstrahlen 144, 151
Periode 55
Phase 56, 74
Phasenverschiebung 75, 77f.
Phasotron 232

Planck, Max 217
Plancksches Wirkungsquantum 217
Plücker, Julius 15, 30
Plutonium-Atombombe 250
Polarimeter 182f.
Polarisation 180ff.
Polarisationsfilter 181
Polarisator 180
Popow, Alexander Stepanowitsch 116
Positronen 229f.
Potentialwall 235
Prismenfernrohr 172
Proton 218, 223f.
Protonensynchroton 233

Quecksilberdampflampe 15

Radaranlage 140f.
Radioisotope 253ff.
Raumwellen 120f.
Reaktion, thermonukleare 241
Reaktoren, schnelle 244
—, thermische 244
Reaktorkraftwerk 248f.
Reflektor 118f., 170f.
Reflexion von Wellen 82ff., 117f.
Reflexion, regelmäßige 147
—, totale 156ff.
Reflexionsgesetz 84, 147
Reflexionswinkel 84, 147
Relaisstation 137f.
Relativitätstheorie 240
Resonanz 62
Resonanzkreis 105, 124
Resonanzkurve 62
Resonanzwellenlänge 114
Richtfunkverbindung 137ff.
Richtstrahl-Radargerät 140f.
Römer, Olaf 145
Röntgen, Wilhelm Conrad 196f., 208
Röntgenaufnahme 199ff.
Röntgendiagnostik 199f.
Röntgenröhre 197, 201
Röntgenstrahlen 196ff.
Röntgentherapie 199, 201
Rückblickspiegel 152
Rückkopplung 64, 103
Rundfunkempfänger 125f.
Rundfunksender 123f.
Rutherford, Ernest 213ff., 221ff., 235
Rutherfordsches Atommodell 216
Rüttelformmaschine 67

Sammellinse 159ff.
Sättigungsgrenze 21
Schalen 216f.
Scherenfernrohr 172
Schirmbildaufnahme 199f.
Schott, Otto 173
Schwingkreis, elektrischer 95ff., 109ff.
Schwingtisch 67
Schwingungen, elastische 54
—, elektromagnetische 97ff., 104ff.
—, erzwungene 61
—, freie elektrische 95ff.
—, gedämpfte 59f., 97
—, harmonische 56f.
—, mechanische 53ff.
—, ungedämpfte elektrische 101
Schwingungsbauch 84f., 118
Schwingungsknoten 84f., 118
Schwinkel 164f.
Selenelement 37f.
Selen-Flächengleichrichter 45f.
Snell van Royen, Willebrord 155
Spaltneutronen 237
Spannungsstoß 211
Spektralapparat 188
Spektralfarbe 183ff.
Spektrogramm 189f.
Spektrograph 189
Spektrum 183f.
—, kontinuierliches 184, 188
—, elektromagnetisches 204f.
Sperrschicht 45f.
Sphärische Linse 159
Sphärischer Spiegel 148ff.
Spiegelfernrohr 170f.
Spitzenentladung 8
Steilheit 26f.
Stoletow, Alexander Grigorewitsch 33
Stoletowsches Prinzip 33
Stoßionisation 7
Strahlenbündel 144
Strahlenhärte 198
Strahlung, radioaktive 209, 211
Straßmann, Fritz 236f.
Synchronisierimpuls 128
Synchrophasotron 233
Synchrozyklotron 232
Szintillationszähler 211, 213f.

Telefoniesender 123
Telegrafiesender 123
Thermische Emission 18, 33
Thermobatterie 52
Thermoelektrische Spannungsreihe 51
Thermoelement 50ff.
Thermostrom 50f.
Thomsonsche Schwingungsgleichung 99
Tolman, Richard 39
Tonfrequenz 122, 125
Totalreflexion 156ff.
Trägerfrequenz 122
Transistor 46ff.
Transurane 236
Transversalwelle 70, 73, 181
Triode 24ff.
— als Verstärker 27ff.
Tritium 225
Tritonen 225

UKW-Funksprechanlage 138f.
UKW-Ranglerfunkanlage 139
Ultrarote Strahlen 187, 205
Ultraschall 89ff., 105
Ultraschallerosion 93
Ultraschallötung 92f.
Ultraschallgenerator 105
Ultraschall-Therapie 93f.
Ultraschalltopf 92
Ultraviolette Strahlen 186f., 205
Umkehrfilm 193
Universalmeßmikroskop 169
Unwucht 65f.

Vervielfacher, fotoelektrischer 214
Volta, Alessandro 49
Voltasche Spannungsreihe 49

Wärmeaustauscher 246
Wasser, schweres 225
Wasserstoffbombe 250f.
Wasserwellen 71
Wehnelt, Arthur 221
Wehnelt-Zylinder 232
Wellen, elektromagnetische 108ff., 114ff., 144, 195, 198
—, fortschreitende 69
—, stehende 84f., 118f.
Wellenbereiche 119ff., 204f.
Wellenfläche 72
Wellenfront 72, 81, 86f.
Wellenlänge 74
Wellennormale 72, 83, 145
Wellenskale 203f.
Wellentheorie 194f.
Werkstoffprüfung, zerstörungsfreie 91f., 202, 257f.
Wilsonsche Nebelkammer 211f.

Young, Thomas 194

Zeiss, Carl 173
Zerfallsreihen, radioaktive 228
Zerstreuungslinse 159ff.
Zerstreuungspunkt 149
Zerstreuungsweite 162
Zielfernrohr 173
Zündspannung 13
Zungenfrequenzmesser 64
Zworykin, Vladimir 128
Zyklotron 231f.

02 10 33-4