10

PHYSIK

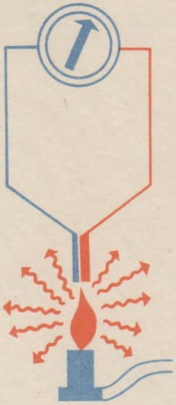
1798

Mechanischer Wärmeeffekt

Benjamin Thompson
1753 bis 1814

1821

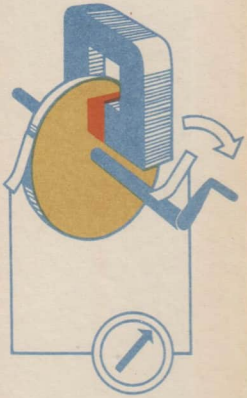
Thermoelektrischer Effekt



Thomas Johann Seebeck
1770 bis 1831

1831

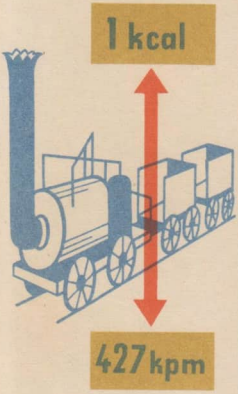
Elektrodynamischer Effekt



Michael Faraday
1791 bis 1867

1842

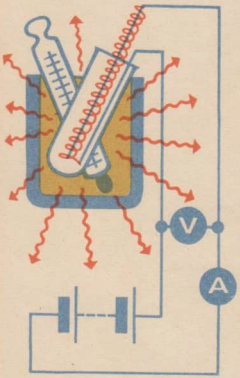
Mechanisches Wärmeäquivalent



Julius Robert Mayer
1814 bis 1879

1845

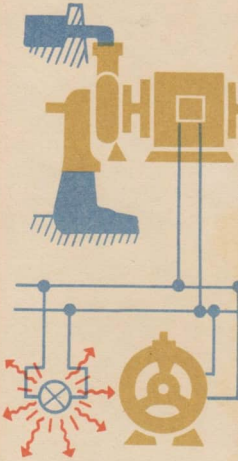
Stromwärmeeffekt



James Prescott Joule
1818 bis 1889

1862

Hauptsätze der Thermodynamik



Rudolf Clausius
1822 bis 1888

Physik

Lehrbuch für die Oberschule · Klasse 10

VOLK UND WISSEN
VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN
1967

Verfaßt von
Erich Fuchs (Lichtwellen, Röntgenwellen, elektromagnetisches Spektrum)
Rolf Grabow (Mechanische Schwingungen und Wellen)
Kurt Hähnel (Elektrizitätslehre)
Dipl.-Phys. Eva Held (Grundlagen der Automatisierung)
Edwin Kunert (Hertzsche Wellen)
Prof. Dr. Karl Werner (Atomphysik)
in Zusammenarbeit mit der Redaktion Physik des Verlages

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

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Schulbuch bestätigt.

Ausgabe 1965

Redaktion: Werner Golm · Ing. Günter Meyer
Einband: Axel Dehlsen
Vorsatz: Edgar Schellenberg nach einem Entwurf von Ing. Günter Meyer
Typografische Gestaltung: Manfred Behrendt
ES 11 H · Bestell-Nr. 021001—3 · Preis 2,85 · Lizenz-Nr. 203 · 1000/66 (UN)
Satz: LVZ-Druckerei „Hermann Duncker", Leipzig (III/18/138)
Druck und Buchbinderei: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft
Dresden (III/9/1)

Elektrizitätslehre

Leitungsvorgänge in Gasen 6
Die Elektronenemission 15
Leitungsvorgänge in Festkörpern 32

Mechanische Schwingungen und Wellen

Grundbegriffe der Schwingungslehre 46
Erzwungene Schwingungen 54
Grundbegriffe der Wellenlehre 58
Die Ausbreitung von Wellen 67

Elektromagnetische Wellen – Hertzsche Wellen

Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen 80
Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen 86
Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen 91
Die Entstehung von Hertzschen Wellen. 93
Eigenschaften Hertzscher Wellen 101
Die drahtlose Nachrichtentechnik 105
Anwendung der Nachrichtentechnik 115

Elektromagnetische Wellen – Lichtwellen

Lichtausbreitung 118
Reflexion des Lichts 121
Die Lichtbrechung 127
Optische Linsen 132
Das Licht als Wellenerscheinung 139
Dispersion 146
Die Entwicklung der Lichttheorie 154
Röntgenstrahlen 156
Das elektromagnetische Spektrum 158

Atomphysik

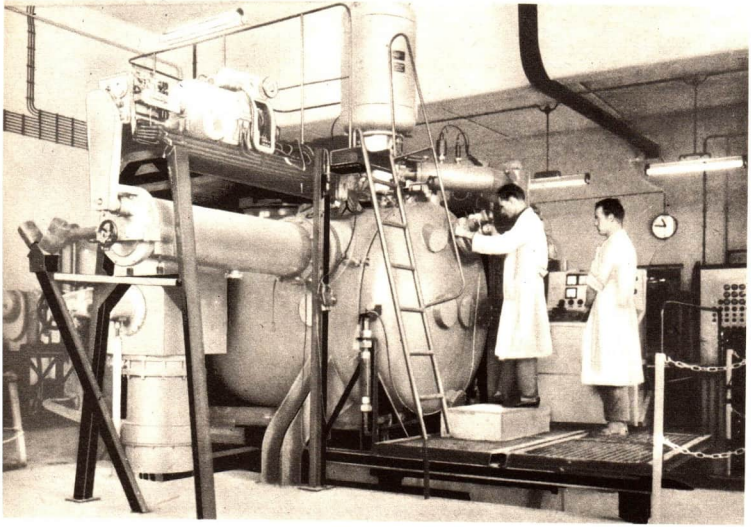
Das Atommodell 160
Der Bau des Atomkerns 167
Anwendung der Kernenergie 185
Die Anwendung radioaktiver Isotope 191
Frédéric und Irène Joliot-Curie 194

Grundlagen der Automatisierung

Steuerung 196
Regelung 205
Automatisierung 213

Anhang

Lösungen 219
Sachwortverzeichnis 221

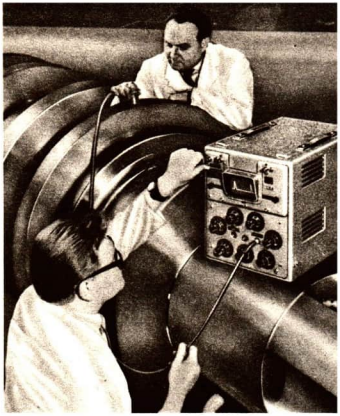


Elektrizitätslehre

Die schnelle Erhöhung der Arbeitsproduktivität ist eine bedeutungsvolle Aufgabe für alle Werktätigen in der DDR beim Aufbau des Sozialismus. Dazu werden moderne Produktionsverfahren, Maschinen und Geräte benötigt. Viele der dafür eingesetzten Anlagen und Maschinen enthalten elektronische Bauelemente, deren Wirkungsweise auf physikalischen Vorgängen beim Durchgang von elektrischem Strom durch Gase oder durch nichtmetallische feste Körper beruht.

Viele Wissenschaftler haben durch ihre Forschung auf diesem physikalisch-technischen Gebiet dazu beigetragen, daß die Arbeitsproduktivität gesteigert werden kann. Ein Beispiel für die Bedeutung der Wissenschaft als Produktivkraft zeigt der Elektronenstrahl-Mehrkammerofen aus dem Forschungsinstitut „Manfred von Ardenne". Dieser Schmelzofen und das Schmelzverfahren, die beide die Erzeugung von Metallwerkstoffen mit hohem Reinheitsgrad gestatten, wurden auf Grund der Ergebnisse wissenschaftlicher Forschungsmethoden entwickelt.

Leitungsvorgänge in Gasen



Das zerstörungsfreie Prüfen von Werkstücken ist ein weitverbreitetes Verfahren, um Werkstücke vor ihrer Verwendung zu untersuchen. Man benutzt dazu unter anderem Ultraschall-Prüfgeräte, deren Meßergebnisse durch einen Katodenstrahl-Oszillografen aufgezeichnet werden. Katodenstrahlröhren wie auch andere gasgefüllte oder evakuierte Röhren wurden auf der Grundlage physikalischer Gesetzmäßigkeiten gebaut, die bei elektrischen Leitungsvorgängen auftreten.

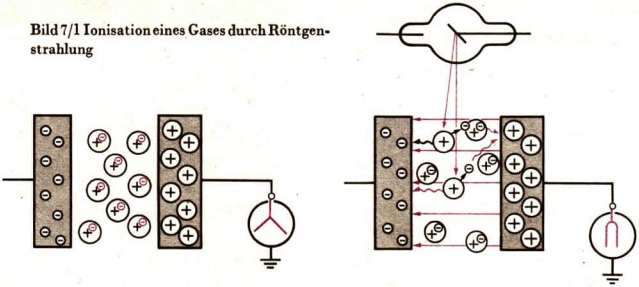
Ein elektrischer Strom stellt eine gerichtete Bewegung von Ladungsträgern dar. Solche Ladungsträger sind die Elektronen und die Ionen. Die Ursache ihrer Bewegung ist das elektrische Feld. Dieses entsteht zwischen zwei Elektroden, an die eine Spannung gelegt wird, und übt eine Kraft auf alle Ladungsträger zwischen den Elektroden aus. Sind die Ladungsträger beweglich, dann werden sie infolge der auf sie einwirkenden Kraft beschleunigt. Haben sie einen Widerstand zu überwinden, dann stellt sich nach einer anfänglichen Beschleunigung eine bestimmte Geschwindigkeit ein. Sie stellen den elektrischen Strom dar. In metallischen Leitern erfolgt die Leitung durch die Elektronen, in Elektrolytlösungen durch Ionen. Dabei ist die Leitung des elektrischen Stromes an Festkörper beziehungsweise Flüssigkeiten gebunden. Aber auch in Gasen oder sogar im Vakuum ist unter bestimmten Umständen eine Leitung möglich. Im allgemeinen wirkt ein Gas, zum Beispiel Luft, als Isolator. Beim Blitz, beim Leuchten der gasgefüllten Leuchtröhren oder der Blitzlampen der Fotoreporter treten jedoch ebenfalls Leitungsvorgänge auf, ohne daß ein metallischer Leiter oder eine Elektrolytlösung vorhanden sind.
In den nächsten Abschnitten soll deshalb untersucht werden, unter welchen Bedingungen in Gasen eine Leitung möglich wird.

1. Die unselbständige Leitung

Zur Untersuchung, unter welchen Bedingungen Luft den elektrischen Strom leitet, wird folgender Versuch durchgeführt:

V 1 Zwei Kondensatorplatten werden mit einem Elektroskop verbunden und elektrisch aufgeladen. Die trockene Luft wirkt zunächst als Isolator. Der Ladungsunterschied bleibt, wie

Bild 7/1 Ionisation eines Gases durch Röntgenstrahlung



man mit dem Elektroskop nachweisen kann, längere Zeit erhalten. Durch äußere Einflüsse (Wärmestrahlung, Flammengase, radioaktive Strahlung, Röntgenstrahlung usw.) läßt sich die Luft elektrisch leitend machen, so daß sich der Ladungsunterschied der beiden Kondensatorplatten ausgleicht. Der Raum zwischen den beiden Kondensatorplatten wird zum Entladungsraum.

● *Wie kann man den Ausgleich der Ladung nachweisen?*

Nach unseren bisherigen Erfahrungen nehmen wir an, daß auch an diesem Ausgleich Ladungsträger beteiligt sind, die durch die im Versuch genannten Einflüsse erzeugt werden. Genaue Untersuchungen haben ergeben, daß es Ionen der Luftmoleküle sind. Die Ionisierung erfolgt dadurch, daß von den vorher neutralen Gasatomen oder Molekülen einzelne Elektronen abgespalten werden, die sich an neutrale Moleküle oder Atome anlagern.
Teilchen, denen Elektronen fehlen, werden zu positiven Ionen. Teilchen, die Elektronen zuviel haben, werden zu negativen Ionen. Unter dem Einfluß des elektrischen Feldes wandern die negativen Ionen zur positiven Platte des Kondensators, die positiven Ionen wandern zur negativen Platte. Damit bilden diese Ionen den elektrischen Strom. Dieser Strom wird allerdings dadurch geschwächt, daß sich positive und negative Ladungsträger wieder vereinigen. Die meßbare Stromstärke wird durch einen Gleichgewichtszustand bestimmt, der sich ergibt aus der Anzahl der je Zeiteinheit gebildeten Ionen und der durch die Wiedervereinigung und Abwanderung zu den Elektroden verschwindenden Ladungsträger.
Mit empfindlichen Meßinstrumenten kann man feststellen, daß eine geringe Leitfähigkeit der Luft immer vorhanden ist. Der Grund liegt im wesentlichen in der Ionisation durch die natürliche Radioaktivität der Erde und durch die kosmische Strahlung.

In Gasen kommt eine unselbständige Leitung zustande, wenn durch äußere Einflüsse im Entladungsraum Ladungsträger erzeugt werden. Unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes übernehmen diese den Ladungstransport.

Die unselbständige Leitung wird z. B. ausgenutzt, um die radioaktive Strahlung mit der Ionisationskammer zu messen. Je stärker die Strahlung ist, desto mehr Ionen werden erzeugt. Je mehr Ionen sich zwischen den Platten eines Kondensators befinden, desto größer wird der Entladungsstrom. Der Entladungsstrom dient als Maß für die Radioaktivität eines Strahlers.

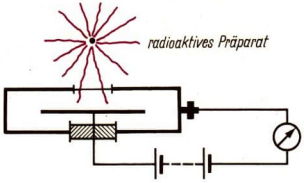
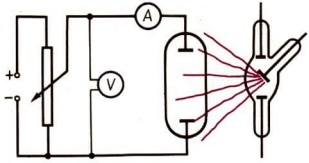


Bild 8/1 Ionisationskammer

2. Die selbständige Leitung

In Gasen ist auch ohne äußere Einflüsse eine Leitung möglich. Der Übergang zu dieser Art Leitung soll an Hand eines Versuches gezeigt werden.

V 2 Ein Entladungsgefäß mit zwei plattenförmigen Elektroden ist mit einem Gas, dessen Druck nur einige Torr beträgt, gefüllt. Der Stromdurchgang soll in Abhängigkeit von der Spannung untersucht werden.



Bilder 8/2a und 8/2b

Legt man eine Spannung an, so fließt ein Strom. Die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung ist im rechten Bild dargestellt. Man erkennt, daß die Stromstärke am Anfang annähernd proportional zur Spannung wächst, bis sie einen Wert annimmt, der bei steigender Spannung annähernd gleichbleibt. Sie hat einen Sättigungswert erreicht. Dieser Zustand tritt dann ein, wenn alle je Zeiteinheit gebildeten Ionen die Elektroden erreichen. In diesem Bereich hängt die Stromstärke von der Anzahl der Ionen ab, die durch äußere Einflüsse im Gas erzeugt werden.
Steigert man die Spannung weiter, dann steigt die Stromstärke plötzlich steil an und erreicht hohe Werte. Der Grund dafür wird im folgenden Abschnitt erläutert.

Durch das elektrische Feld, das sich zwischen den Elektroden ausbildet, wird auf Ladungsträger eine Kraft ausgeübt. Diese Kraft ruft eine Beschleunigung der geladenen Teilchen hervor. Erhöht man die Spannung zwischen den Elektroden, dann vergrößert sich die Kraft und somit auch die Beschleunigung. Je größer die Beschleunigung der Teilchen, desto größer wird auch die von ihnen erreichte Geschwindigkeit und damit

ihre kinetische Energie. Die durch die unselbständige Entladung abgespaltenen Elektronen lagern sich zum größten Teil nicht mehr an neutrale Atome oder Moleküle an. Durch die auf sie wirkende Beschleunigung erhalten sie so große kinetische Energie, daß sie beim Stoß auf neutrale Atome oder Moleküle aus diesen jeweils ein Elektron oder mehrere Elektronen herausschlagen können. Man nennt diesen Vorgang *Stoßionisation*. Die herausgeschlagenen Elektronen vermögen dann ihrerseits, nachdem sie im elektrischen Feld eine genügend große Energie aufgenommen haben, wiederum dieselben Vorgänge auszulösen. Das wiederholt sich längs des Weges von Elektrode zu Elektrode viele Male. Die Stoßionisation nimmt dann die Form einer Kettenreaktion an, wie im Bild 9/1 schematisch dargestellt ist.

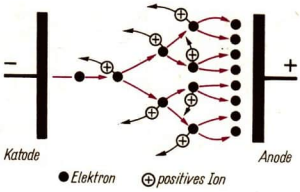


Bild 9/1 Schematische Darstellung einer Stoßionisation

Die Voraussetzung dafür ist, daß die Elektronen von Stoß zu Stoß einen Weg zurücklegen können, der groß genug ist, um die kinetische Energie aufzunehmen, die zur Ionisation eines Atoms oder Moleküls ausreicht. Einen Durchschnittswert dieses Weges gibt die mittlere freie Weglänge an. Diese nimmt zu, wenn man den Druck des Füllgases in der Entladungsröhre verringert, das heißt, wenn man die Anzahl der Atome bzw. Moleküle verringert.

Die positiven Ionen wandern zur Katode und lösen aus dem Katodenmaterial beim Aufprall Elektronen aus, die dann ebenfalls in der Lage sind, die beschriebene Stoßionisation auszulösen.

Im Entladungsraum kann es durch Stoß von Elektronen mit genügend großer kinetischer Energie auf die Moleküle oder Atome zur Auslösung von Elektronen aus den Atomen oder Molekülen kommen. Dieser Vorgang wird Stoßionisation genannt. Die Leitung erfolgt ohne äußere Einflüsse und wird als selbständige Leitung in Gasen bezeichnet.

3. Die Glimmentladung

Gasentladungsröhren werden für Beleuchtungs- und Reklamezwecke eingesetzt. Untersucht man eine solche Röhre, so findet man zwei einander gegenüberliegende Metallelektroden. Die Leuchterscheinungen müssen demnach zwischen den Elektroden entstehen. Bei dem umstehend beschriebenen Versuch erkennt man bei etwa 40 Torr eine fadenförmige Leuchterscheinung, bei etwa 1 Torr eine, die aus mehreren hellen und dunklen Räumen besteht. Bei etwa 0,01 Torr hört das Leuchten innerhalb des Entladungsraumes ganz auf, nur die Glaswand gegenüber der Katode zeigt ein hellgrünes Fluoreszenzleuchten.

3

V In einer etwa 0,5 m langen Glasröhre sind an den Enden scheibenförmige Elektroden eingeschmolzen. In der Mitte befindet sich ein Saugstutzen, der auf die Vakuumpumpe aufgesetzt werden kann.
An die Elektroden legt man eine Spannung von einigen Kilovolt an. Ist die Vakuumpumpe noch nicht in Betrieb, also bei normalem Luftdruck in der Röhre, dann tritt noch keine Entladung auf. Setzt man die Pumpe in Tätigkeit, dann treten, nachdem genügend Luft abgesaugt wurde, je nach Druck verschiedenartige Leuchterscheinungen auf.

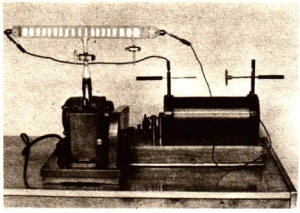


Bild 10/1 Versuchsanordnung zur Demonstration von Glimmentladungen

Die Entladungsvorgänge sind von verschiedenen Leuchterscheinungen begleitet, die vom Gasdruck abhängig sind.

Unter normalem Druck ist der Abstand der Gasmoleküle klein. Die durch die Kraft des elektrischen Feldes in Bewegung gesetzten Elektronen stoßen bereits nach einer sehr kurzen Wegstrecke auf Gasmoleküle und erreichen nicht die für die Stoßionisation notwendige kinetische Energie. Wird der Druck vermindert, dann vergrößert sich der Abstand der Gasmoleküle zueinander. Die elektrisch geladenen Teilchen können eine größere freie Weglänge zurücklegen, bevor sie mit Molekülen zusammenstoßen. Da ihre Bewegung beschleunigt ist, wächst die dabei erreichte Geschwindigkeit mit dem zurückgelegten Weg. Die kinetische Energie wird von einem bestimmten Druck an so groß, daß beim Zusammenstoß Ionisationsvorgänge ausgelöst werden.
Die Leuchterscheinungen gehen darauf zurück, daß Atome durch Elektronenstoß angeregt werden können, Licht auszusenden. Die stoßenden Elektronen geben dabei Bewegungsenergie ab. In den dunklen Räumen der Entladungsröhre erhalten sie wieder eine so große kinetische Energie, die sie wiederum befähigt, weitere Atome zur Lichtabgabe anzuregen. Beispiele zur Glimmentladung siehe S. 11.

4. Entladungserscheinungen in der Natur

Bei weit auseinandergezogenen Polen, an die eine hohe Spannung angelegt wird, kann man im Dunkeln an den Kanten und Spitzen der Elektroden eine Leuchterscheinung beobachten. Wird die Spannung erhöht, dann kann dieses als Korona- oder Spitzenentladung bezeichnete Leuchten die Form einer büschelförmigen Leuchterscheinung annehmen. Jeder Faden eines Büschels besteht aus einer Anzahl von Ionen und Elektronen, die durch Stoßvorgänge erzeugt werden. Gleichzeitig werden Atome bzw. Moleküle angeregt, Lichtquanten auszusenden, die wiederum in der Lage sind, Elektronen auszulösen (Fotoelektronen). Diese verstärken den Ionisationsvorgang. Bei weiterer

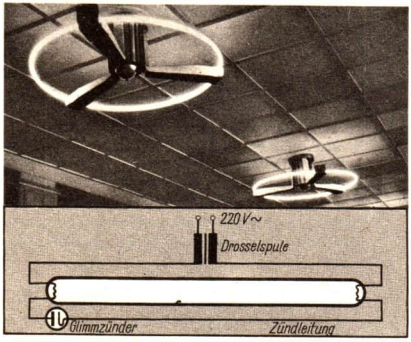
Anwendungsbeispiele zur Glimmentladung

Leuchtröhren

Leuchtröhren werden für Werbezwecke und Hinweiszeichen verwendet. Sie bestehen aus gasgefüllten Glasröhren (2 bis 6 Torr), in die Elektroden eingeschmolzen sind. Die Betriebsspannung beträgt 1 bis 6 kV.

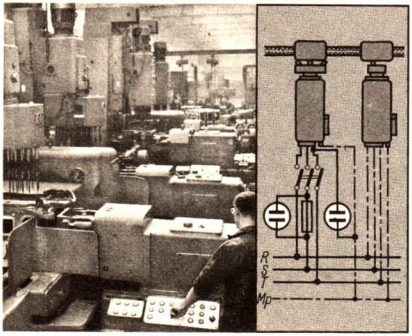
Leuchtstoffröhren

Leuchtstoffröhren wandeln die in der Röhre entstehende ultraviolette Strahlung mittels eines auf der Innenseite angebrachten Leuchtstoffbelages in sichtbares Licht um. Die Betriebsspannung beträgt 220 V ~. Gezündet wird die Röhre mit einem Glimmzünder, der nach dem Einschalten des Stromes diesen unterbricht. Dadurch entsteht mit Hilfe der Drosselspule ein Spannungsstoß, der die unselbständige Leitung in der Röhre auslöst.



Glimmlampen

Glimmlampen werden auch als Anzeigegeräte verwendet. Sie zeigen an, ob an einer Bearbeitungseinheit der Motor oder die Sicherungen ausgefallen sind.
Rechts außen sind zu sehen von oben nach unten die Werkstücke auf der Taktstraße, die Bearbeitungseinheiten und die Netzanschlüsse mit den Glimmlampen.



Spannungserhöhung bilden sich Teile der Büschel beider Pole so aus, daß sie sich vereinigen. Die Ionen bilden dann von Pol zu Pol eine Brücke, über die ein Ausgleich der Ladungen in Form eines Funkens erfolgen kann. Die Luft wird dabei kurzzeitig so stark erwärmt, daß eine Druckwelle entsteht, die als Knall zu hören ist.

In der Natur findet man die beschriebenen Erscheinungen der Korona- oder Spitzenentladung beim Elmsfeuer und die Funkenentladung beim Blitz. Das Elmsfeuer kann man an Turmspitzen und Schiffsmasten beobachten.
Nach unten fallende Regentropfen besitzen infolge der Influenz durch das Erdfeld eine unterschiedliche Ladungsverteilung (Bild 12/1). Bei dem in Gewitterwolken vorhandenen starken Wolkenaufwind ($v_{max} > 20\ m \cdot s^{-1}$) zerstäubt zuerst das Tropfenende, und die dort vorhandene negative Ladung wird mit den entstandenen kleinen Tröpfchen nach oben getragen. Der Ausgleich der Ladungen erfolgt im Gewitter als Blitz.

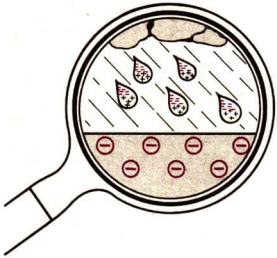


Bild 12/1 Ladungsverteilung auf Regentropfen im Erdfeld

In der angedeuteten Weise kann der Wissenschaftler die Erklärung für Naturerscheinungen geben, die noch nicht oder schwer der unmittelbaren Untersuchung zugänglich sind. Jahrtausendelang waren Blitz und Elmsfeuer Zeichen übernatürlicher Gewalten, von Göttern und Geistern. Sie konnten es deshalb sein, weil die Menschen sie nicht auf natürliche Weise erklären konnten. Die Wissenschaft hat aber im Laufe ihrer Entwicklung gezeigt, daß für alle Erscheinungen, mögen sie uns noch so rätselhaft sein, eine natürliche Erklärung zu geben ist. Es ist kein Grund, anzunehmen, daß dort, wo die Wissenschaft heute noch vor Rätseln steht, diese nicht eines Tages doch gelöst und auf natürliche Weise erklärt werden können.

5. Die Bogenentladung

Bei großen Entladungsströmen geht die Glimmentladung in eine Bogenentladung über. Die Katode wird durch den ständigen Aufprall einer großen Anzahl von Ionen stark erwärmt und emittiert zusätzlich durch den glühelektrischen Effekt Elektronen. Diese lösen durch Stoßionisation eine Lawine weiterer Elektronen aus den Luftmolekülen aus. Auf Grund der äußerst großen Anzahl von Ladungsträgern zwischen den Elektroden wird die Leitfähigkeit so groß, daß sie der der Metalle nahekommt. In Luft treten dabei unter normalem Druck Temperaturen von etwa 4000 °C auf. Das dabei entstehende Licht nennt man *Bogenlicht*. Der Lichtbogen wird als sehr helle kleinflächige Lichtquelle für die Projektion von Diapositiven und Filmen in der Kinotechnik verwendet. Neuerdings verwendet man auch Hochdruckbogenlampen (50 at, mit Hg- oder Xe-Füllung und Wolframkatoden) für die Straßenbeleuchtung, Flugplatzbefeuerung usw.

6. Die Katodenstrahlen

Die Glimmentladung läßt sich bis zu Drücken von etwa 0,1 Torr beobachten. Die Spannung zwischen den Elektroden der Röhre beträgt dabei einige Kilovolt. Wird die Entladungsröhre weiter evakuiert, dann zeigt sich bei 10^{-2} bis 10^{-4} Torr eine neue Erscheinung. Das Glimmlicht, das als letzte Leuchterscheinung noch verblieb, wird immer schwächer, und gegenüber der Katode entsteht, unabhängig von der Röhrenform, ein grünlicher Fluoreszenzfleck auf dem Glas.
Die Strahlen, die diesen Fluoreszenzfleck verursachen, nennt man *Katodenstrahlen.*
Die in Tabelle 1 aufgeführten Versuche, die alle erstmals Ende des vorigen Jahrhunderts durchgeführt wurden, und andere Versuche und Messungen waren es, die zu der Entdeckung führten, daß es kleine Teilchen der Materie mit ganz bestimmten Eigenschaften gibt. Diese Teilchen werden Elektronen genannt. Wenn wir heute ganz selbstverständlich von Atomen und Elektronen sprechen, so war es vor 50 Jahren für einige Naturforscher noch keine Selbstverständlichkeit, daß sie überhaupt existierten. Die vielfältigen Ergebnisse der Physik, die immer wieder die bekanntgewordenen Eigenschaften der Elektronen bestätigten sowie auch neue zutage förderten, sprachen aber gegen diese Naturforscher. Die Entdeckung der Elektronen ist ein Beispiel dafür, wie unseren Sinnen nicht unmittelbar zugängliche Naturobjekte erforscht werden können. Siehe Tabelle 1 auf Seite 14.
Die Ergebnisse der Versuche lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Katodenstrahlen bestehen aus kleinen Teilchen.
Masse und Ladung können durch die Ablenkung im elektrischen und magnetischen Feld bestimmt werden.

Aus dem Betrag der Ablenkung kann geschlossen werden, daß die Katodenstrahlen aus Elektronen großer Geschwindigkeit bestehen.

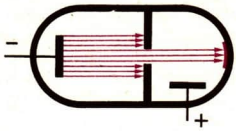
Die Anwendungsgebiete der Katodenstrahlen sind in den letzten Jahrzehnten beträchtlich angewachsen. So sind beispielsweise Fernsehaufnahme- und Wiedergaberöhren sowie die Oszillografenröhren besonders eingerichtete Katodenstrahlröhren. Katodenstrahlen werden auch zur Abbildung kleinster, mit dem Lichtmikroskop nicht mehr sichtbarer Körper im Elektronenmikroskop benutzt. Während das Lichtmikroskop nur eine etwa 2000fache Vergrößerung zuläßt, erreicht man mit dem Elektronenmikroskop eine 500 000fache Vergrößerung.

Versuche, Fragen, Aufgaben

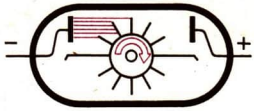
1. Erläutern Sie die elektrischen Leitungsvorgänge in Elektrolyten und in Gasen!
2. Wodurch unterscheiden sich die selbständige und die unselbständige Gasentladung?
3. Nennen Sie Anwendungsbeispiele für die selbständige Gasentladung!
4. Wodurch bilden sich die hohen Spannungen zwischen Gewitterwolken aus?
5. Eine Glimmlampe wird an eine Wechselspannung 50 Hz geschaltet.

5.1. Wieviel Lichtblitze je Sekunde liefert die Glimmlampe?
5.2. Ein Rad mit vier Speichen rotiert und wird mit dieser Glimmlampe belichtet. Bei welchen Drehzahlen scheint das Rad stillzustehen?

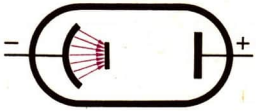
Tabelle 1: Katodenstrahlen



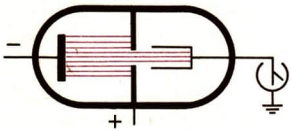
1. Katodenstrahlen treten senkrecht aus der Katodenoberfläche aus und breiten sich geradlinig aus.



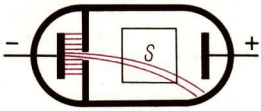
2. Katodenstrahlen üben eine mechanische Wirkung aus. Durch den Aufprall wird das Flügelrad bewegt.



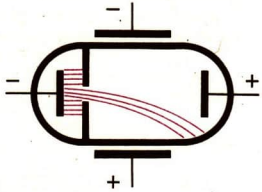
3. Katodenstrahlen üben beim Aufprall eine Wärmewirkung aus. Die kinetische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt.



4. Katodenstrahlen laden ein Elektroskop elektrisch negativ auf. Sie bestehen aus negativen Ladungsträgern.

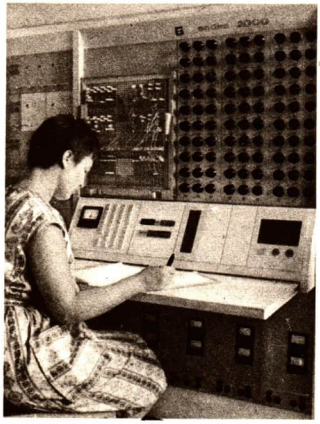


5. Katodenstrahlen werden im Magnetfeld abgelenkt.



6. Katodenstrahlen werden im elektrischen Feld zur positiv geladenen Platte hin abgelenkt.

Die Elektronenemission



Elektronenröhren stellen neben Halbleiterdioden und Transistoren für die Nachrichtentechnik, für Steuer- und Regelanlagen, für elektrische Rechenmaschinen usw. die wichtigsten Bauelemente dar. Die Automatisierung unserer Betriebe ist ohne elektronische Hilfsmittel, bei denen Elektronenröhren eine große Rolle spielen, nicht denkbar. Rundfunk- und Fernsehgeräte enthalten als wesentliche Bauelemente Elektronenröhren, von denen in neuester Zeit eine Anzahl durch Halbleiterbauelemente ersetzt werden können.

1. Die Glühemission

Im vorhergegangenen Abschnitt wurde gezeigt, daß unter bestimmten Bedingungen Gase unter normalem oder vermindertem Druck den elektrischen Strom leiten können. Jetzt soll untersucht werden, welche Voraussetzungen vorhanden sein müssen, damit auch im Vakuum eine elektrische Leitung möglich ist. Das Vakuum ist ein Isolator. Annäherndes Vakuum kann man erreichen, indem man ein Gefäß so weit auspumpt, daß nur noch eine sehr kleine Anzahl von Gasmolekülen oder Atomen zurückbleibt. Um eine Leitfähigkeit zu erreichen, müssen Ladungsträger in das Vakuum gebracht werden. Zu diesem Zweck werden in eine Vakuumröhre zwei Elektroden eingeschmolzen, von denen eine fähig ist, Elektronen zu emittieren.[1] Ein Versuch mit einer Kohlefadenglühlampe, in der außer dem Glühfaden noch eine Metallplatte als zweite Elektrode untergebracht ist, soll darüber

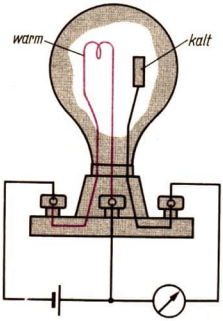


Bild 15/1 Kohlefadenlampe nach Edison mit heißer und kalter Elektrode

[1] emittieren (lat.): aussenden

Aufschluß geben. Die Metallplatte ist über ein Galvanometer mit dem positiven Pol einer Spannungsquelle verbunden.
Am Ausschlag des Galvanometers kann man feststellen, daß ein Strom fließt. Nähere Untersuchungen zeigen, daß die geheizte Elektrode Elektronen emittiert, die den Strom ermöglichen. Der gezeigte Versuch wurde erstmalig im Jahre 1883 von THOMAS ALVA EDISON durchgeführt.
Diese Erscheinung bezeichnet man als thermische Emission.

Bei der thermischen Emission treten aus der Oberfläche von glühenden Metallen Elektronen aus.

Die thermische Emission läßt sich folgendermaßen erklären: Offensichtlich sind die Leitungselektronen eines Metalles nicht in der Lage, ohne weiteres durch die Oberfläche des Metalles hindurchzutreten. Jedes austretende Elektron hinterläßt im Metall eine überschüssige positive Ladung, die nach dem elektrischen Anziehungsgesetz versucht, das Elektron wieder zurückzuziehen. Um ein Elektron aus dem Bereich der Anziehungskraft herauszuführen, muß eine Arbeit gegen diese Kraft, die Austrittsarbeit, verrichtet werden. Dem Elektron muß eine ganz bestimmte Energiemenge, die der Austrittsarbeit entspricht, zugeführt werden. Bei der thermischen Emission geschieht dieses durch eine Erwärmung des Metalles. Die zum Austritt notwendige Energie kann aber auch den Metallelektronen andersartig zugeführt werden, z. B. durch Stoß von positiven Ionen auf die Metalloberfläche (siehe Abschnitt 2 auf Seite 9) oder durch Bestrahlung mit Licht (Fotoemission).

2. Die Zweielektrodenröhre (Diode)

Die Entdeckung der Glühemission führte dazu, Vakuumröhren zu bauen, die mit einer kalten Elektrode und einer heizbaren Glühelektrode versehen sind. Durch die Glühelektrode werden die Elektronen in das Vakuum geschickt. Sie bilden als Träger negativer elektrischer Ladung bei ihrer Bewegung in einer Richtung den elektrischen Strom. Die zweite Elektrode dient zum Auffangen dieser Ladungsträger. Die Glühelektrode nennt man Katode[1] und die Auffangelektrode Anode[2]. Da die Vakuumröhre zwei Elektroden besitzt, bezeichnet man sie als *Diode*. Ganz allgemein nennt man Vakuumröhren, bei denen die elektrische Leitung durch Elektronen hervorgerufen wird, *Elektronenröhren*. Die Glühelektrode besteht aus einem Draht, der mit Hilfe eines elektrischen Stromes erwärmt wird. Verbindet man die Anode mit dem positiven und die Katode mit dem negativen Pol einer Spannungsquelle, dann kann man auf einem zwischengeschalteten Strommesser feststellen, daß ein Strom fließt.
Das Zustandekommen des Stromes kann man sich folgendermaßen erklären:

Durch die angelegte Spannung wird zwischen Anode und Katode ein elektrisches Feld erzeugt. Das elektrische Feld übt auf Ladungsträger eine Kraft aus. Die Elek-

[1] Katode (lat.): Hinabweg
[2] Anode (lat.): Hinaufweg

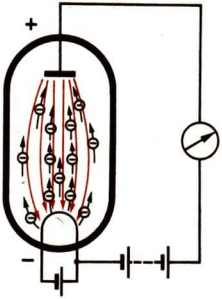


Bild 17/1 Vorgänge in einer Diode bei einer angelegten Spannung zwischen den Elektroden

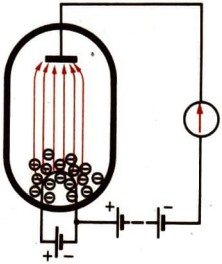


Bild 17/2 Diode in Sperrichtung gepolt (rot: Richtung des elektrischen Feldes)

tronen als negative Ladungsträger werden dadurch von der Katode zur Anode hin beschleunigt. Bei genügend hoher Anodenspannung werden von der Anode alle Elektronen aufgefangen, die die Katode emittiert.

Dieser **Elektronenstrom** geht vom Minuspol der Röhre (Katode) zum Pluspol (Anode).
Die **elektrische Stromrichtung** geht dagegen, wie früher vereinbart wurde, vom Pluspol zum Minuspol.

Polt man die Anschlüsse der Spannungsquelle um, so daß an die Katode der positive und an die Anode der negative Pol angeschlossen wird, dann fließt kein Strom durch die Röhre.

Die aus der Katode ausgetretenen Elektronen werden durch die Kraftwirkung des jetzt umgepolten elektrischen Feldes zur Katode zurückgetrieben. Sie umgeben diese wie eine Wolke und verhindern durch die von ihr gebildete Raumladung ein weiteres Austreten von Elektronen. Es fließt kein Strom. Eine Elektronenröhre mit Glühkatode läßt den Strom nur in einer Richtung zu. Diese Eigenschaft macht man sich zunutze bei der *Gleichrichtung* von Wechselströmen. Man unterscheidet die Durchlaßrichtung (von der Katode zur Anode) und die Sperrichtung (von der Anode zur Katode).

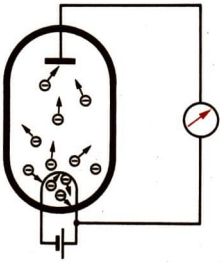
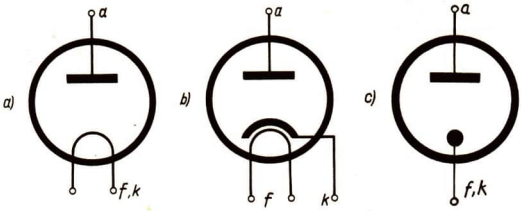


Bild 17/3 Diode ohne angelegte Spannung

Bild 18/1
Schaltzeichen einer Diode
a) direkt geheizte Katode,
b) indirekt geheizte Katode,
c) Kurzzeichen



V 4 Verbindet man die Elektroden (Bild 17/3) über ein empfindliches Strommeßgerät, ohne eine Spannung anzulegen, dann stellt man fest, daß ein sehr kleiner Strom von 10^{-7} bis 10^{-5} A fließt.

Daraus geht hervor, daß eine Anzahl von Elektronen vorhanden sind, die bereits beim Austreten aus der Katode eine genügend große Geschwindigkeit besitzen, um die Anode zu erreichen, auch wenn keine Anodenspannung angelegt ist.

2.1. Aufbau einer Diode

Heizung. Bei Elektronenröhren verwendet man zwei verschiedene Arten der Heizung. Bei der direkten Heizung wird als Katode ein Wolframdraht benutzt, der mit Hilfe eines elektrischen Stromes, des Heizstromes, zum Glühen gebracht wird. Bei der indirekten Heizung wird als Katode ein Nickelröhrchen verwendet und dieses durch einen isoliert im Inneren befindlichen Glühdraht geheizt. Der Vorteil besteht darin, daß über das Röhrchen eine große Katodenoberfläche geheizt werden kann.

● *Überlegen Sie, warum bei indirekter Heizung auch Wechselstrom benutzt werden kann!*

Die Anzahl der aus der Katode austretenden Elektronen ist von der Temperatur und dem Material der Katode abhängig. Je höher die Temperatur, desto mehr Elektronen treten aus.
Der Physiker WEHNELT machte 1903 die Entdeckung, daß die Oxide der Erdalkalimetalle schon bei relativ niedrigen Temperaturen Elektronen stark emittieren. Überzieht man die Katode mit einem Erdalkalioxid, dann erhält man bereits bei Temperaturen um 700 °C eine genügend große Elektronenemission. Das ist dadurch begründet, daß die Elektronen der Erdalkalimetalle eine etwas um die Hälfte kleinere Austrittsarbeit benötigen als die der meisten anderen Metalle. Heute werden deshalb die Katoden fast ausschließlich mit Bariumoxid überzogen.
Kennlinie der Diode. Um die elektrischen Eigenschaften einer Diode zu beschreiben, bedient man sich einer grafischen Darstellung, in der die aus einem Versuch ermittelten Meßwerte von Strom und Spannung eingetragen werden. Die die Punkte der einzelnen Meßwerte verbindende Kurve nennt man Diodenkennlinie.

V 5 Mißt man die Anodenstromstärke I_a unter veränderlichen Bedingungen, dann erkennt man, daß sie von der Anodenspannung U_a und von der Heizstromstärke I_h abhängig ist. Die Heizstromstärke ist für den jeweiligen Röhrentyp festgelegt. Der funktionelle Zusammenhang $I_a = f(U_a)$ läßt sich in einem Diagramm darstellen. Die veränderliche Anodenspannung wird mit Hilfe einer Potentiometerschaltung erzeugt. Man beginnt die Messung, indem man zunächst die Anode negativ polt und dann über die Anodenspannung $U_a = 0\,V$ zu positiven Werten übergeht.

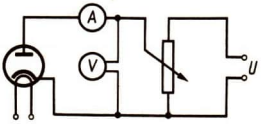


Bild 19/1 Versuchsanordnung zur Aufnahme der Kennlinie einer Diode bei indirekter Heizung

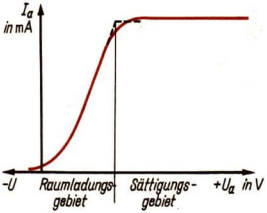


Bild 19/2 Kennlinie einer Diode
Die Anodenstromstärke ist in Abhängigkeit von der Anodenspannung aufgetragen

Aus Bild 19/2 erkennt man, daß im negativen Bereich bis zur Anodenspannung $U_a = 0\,V$ nur ein sehr geringer Strom fließt. Im positiven Bereich steigt die Stromstärke zunächst an, nähert sich dann einem Höchstwert, der nicht überschritten wird.

● *Wie kommt dieser Strom zustande?*

Man unterscheidet auf der Kennlinie zwei Gebiete, das Raumladungsgebiet und das Sättigungsgebiet. Erhält die Anode gegenüber der Katode positive Spannung, dann könnte man zunächst annehmen, daß alle von der Katode emittierten Elektronen auch schon bei sehr kleinen Anodenspannungen zur Anode gelangen würden. Das ist jedoch nicht der Fall. Die aus der Katode austretenden Elektronen bilden vor dieser eine negative Raumladung, die den Stromübergang zwischen Katode und Anode begrenzt. Erhöht man die Anodenspannung, dann erreicht man einen Grenzwert, die Sättigungsgrenze, an dem der Einfluß der Raumladung aufhört. Die Sättigungsgrenze ist dann erreicht, wenn alle von der Katode emittierten Elektronen zur Anode gelangen. Die Sättigungsgrenze hängt von der Temperatur der Katode ab. Je höher die Katodentemperatur ist, desto größer muß die angelegte Anodenspannung sein, um die Sättigung zu erreichen.
Die Heizstromstärken sind für jede Röhrentype genau vorgeschrieben. Eine willkürliche Veränderung dieser vorgeschriebenen Größen führt zur Zerstörung oder vorzeitigen Abnutzung der Elektronenröhren. Da eine genau festgelegte Heizleistung erforderlich ist, gibt man bei den Röhrenkennwerten die Heizspannung und die Heizstromstärke an.

Beispiel

Wie groß ist die Heizleistung der Röhre EY 81 für $U_f = 6{,}3$ V und $I_f = 0{,}82$ A?

$P = U \cdot I$; $P = 6{,}3\ \text{V} \cdot 0{,}82\ \text{A}$; $\underline{P \approx 5{,}17\ \text{W}}$

● *Welche Heizstromstärke würde eine Röhre mit gleicher Heizleistung, aber höherer Heizspannung benötigen?*

Die Anwendung der Diode. Bei der Anwendung der Diode wird deren „Ventilwirkung" ausgenutzt. Der Strom kann nur in einer Richtung fließen. Man benutzt die Diode deshalb zum Gleichrichten von Wechselströmen. Dioden als Gleichrichter werden in Rundfunk- und Fernsehempfängern, in elektronischen Rechenmaschinen und in vielen anderen technischen Anlagen verwendet. Legt man eine Wechselspannung an eine Diode, dann wird jeweils nur eine Halbperiode durchgelassen, während für die andere Halbperiode die Diode als Sperre wirkt.
Es entsteht ein pulsierender Gleichstrom, dessen Stromstärke zwischen Null und einem Höchstwert schwankt.

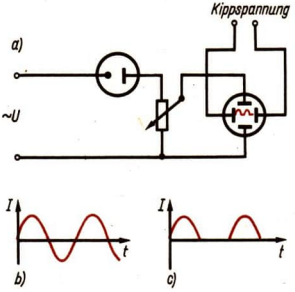


Bild 20/1 Demonstration der Gleichrichterwirkung einer Diode mit Hilfe eines Katodenstrahloszillografen. Siehe auch Bild 20/2

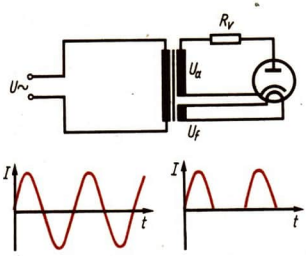


Bild 20/2 Einweggleichrichterschaltung
a) Schaltbild, b) vor dem Gleichrichten, c) nach dem Gleichrichten

3. Die Dreielektrodenröhre (Triode)

Während man die Zweielektrodenröhre, die Diode, hauptsächlich in Gleichrichterschaltungen verwendet, benutzt man die Dreielektrodenröhre, die Triode, in Verstärkerschaltungen. Man kann mit ihr kleinste Wechselspannungen verstärken. Sie ermöglicht es z. B. in Verbindung mit anderen Schaltelementen, die sehr schwachen, von einer Antenne eingefangenen hochfrequenten Rundfunk- oder Fernsehsignale so weit zu verstärken, daß sie im Lautsprecher hörbar bzw. auf dem Bildschirm sichtbar werden.

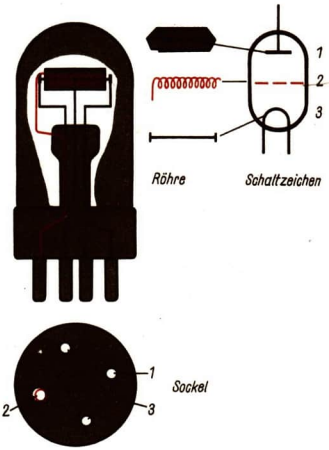


Bild 21/1 Aufbau einer Triode (schematisch)
1 Anode
2 Gitter
3 Katode

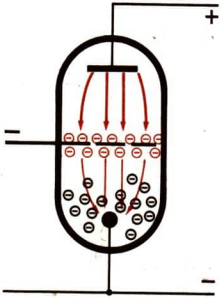


Bild 21/2 Sperrwirkung einer negativen Gitterspannung auf den Elektronenstrom (rot: Richtung des elektrischen Feldes)

Arbeitsweise und Aufbau einer Triode. Die Triode ist ähnlich aufgebaut wie eine Diode. Sie besitzt jedoch eine dritte Elektrode, die es ermöglicht, den zwischen Katode (3) und Anode (1) fließenden Elektronenstrom zu steuern. Diese Elektrode nennt man das *Steuergitter* (2).

Die **Steuerwirkung** des Gitters auf den Elektronenstrom kann man mit den Gesetzen des elektrischen Feldes erklären. An das Gitter legt man eine gegenüber der Katode negative Spannung. Zwischen Gitter und Katode bildet sich ein elektrisches Feld aus, welches dem Feld zwischen Katode und Anode entgegengesetzt gerichtet ist und dieses schwächt. Dadurch ist es möglich, mit Hilfe einer veränderlichen Gitterspannung den Elektronenstrom zwischen Katode und Anode zu steuern. Je nach der Größe der angelegten Gitterspannung gelangt nur noch ein Teil der von der Katode emittierten Elektronen zur Anode. Die negative Gitterspannung kann man so weit vergrößern, daß keine Elektronen mehr zur Anode gelangen. Der Elektronenfluß ist dann unterbrochen.

Mit Hilfe einer Spannung am Gitter kann der Elektronenstrom in der Triode gesteuert werden. Bei einer negativen Gitterspannung gelangen keine Elektronen auf das Gitter, es fließt kein Gitterstrom. Die Steuerung erfolgt damit leistungslos.

Um den Zusammenhang zwischen der Gitterspannung und der Anodenstromstärke

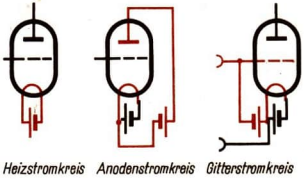


Bild 22/1 Die Stromkreise einer Triode Gitterkreis als Steuerkreis, Anodenkreis als gesteuerter Kreis

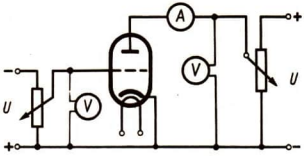


Bild 22/2 Schaltung zur Aufnahme der Trioden-Kennlinie

festzuhalten, nimmt man eine Kennlinie auf. Es soll die Abhängigkeit des Anodenstromes I_a von der Gitterspannung U_g in einem Diagramm dargestellt werden. Dazu verwendet man eine Schaltung wie in Bild 22/2.

6

V Die Gitterspannung sowie die Anodenspannung werden über Potentiometerschaltungen verändert. Die Heizspannung wird auf dem für die Röhre vorgeschriebenen Wert gehalten. Die Anodenspannung U_a ist für eine Meßreihe jeweils konstant zu halten. Die Meßwerte bekommt man durch stufenweises Ändern der Gittervorspannung U_g. In einem rechtwinkligen Koordinatensystem werden jeweils auf der Abszissenachse die Gitterspannung U_g und auf der Ordinatenachse die dazugehörige Anodenstromstärke I_a festgehalten. Verbindet man die erhaltenen Punkte, dann bekommt man eine Kurve, die man als I_a–U_g-Kennlinie der Triode bezeichnet.

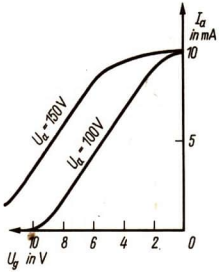


Bild 22/3 $I_a - U_g$—Kennlinien einer Triode bei zwei konstanten Anodenspannungen

Es gibt noch andere Kennlinien der Triode, z. B. die U_a—U_g-Kennlinie. Bei der Aufnahme der Kennlinie muß man jeweils die nicht betrachteten Größen konstant halten, z. B. U_a bei der I_a—U_g-Kennlinie bzw. I_a bei der U_a—U_g-Kennline. Das ist ein wichtiges methodisches Prinzip bei physikalischen Untersuchungen wie überhaupt in der Wissenschaft. Sobald man bestimmte Einflüsse kennt und die Gesetzmäßigkeiten ergründen will, muß man möglichst viele von ihnen konstant halten. So erkennt man die Gesetze, die für die nicht konstant gehaltenen Größen gelten. Nur so ist die Erkenntnis beim Wirken vieler Gesetzmäßigkeiten möglich.

Aus der Kennlinie für U_a = konst. = 100 V erkennt man, daß der Anodenstrom bei einer Gitterspannung von $U_g = -10$ Volt gesperrt ist. Die Kurve steigt erst langsam, dann

immer steiler an, bis sie angenähert in eine Gerade übergeht. Von $U_g = -3$ Volt an läßt die Steigung nach, der Anodenstrom erreicht einen Sättigungswert. Wählt man eine größere Anodenspannung, dann erhält man eine Kennlinie, die in der grafischen Darstellung (Bild 22/3) nach links parallel verschoben ist.

Steilheit der Triode. Die in der Praxis verwendeten Trioden unterscheiden sich durch Lage und Steigung ihrer Kennlinien. Die Steigung im geradlinigen Teil der Kennlinie gibt Aufschlüsse über die Verwendungsmöglichkeit einer Triode. Man nennt diese Steigung „Steilheit" der Triode. Die Steilheit S läßt sich bestimmen als Quotient aus der Änderung des Anodenstromes ΔI_a (in mA) und der Änderung der Gitterspannung ΔU_g (in V).

$\text{Steilheit} = \dfrac{\text{Anodenstromänderung}}{\text{Gitterspannungsänderung}}$	$S = \dfrac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$

Die Steilheit ist ein Maß für die Steuerwirkung der Gitterspannung auf den Anodenstrom. In Bild 23/1 sind die Kennlinien zweier Trioden mit Kennlinien verschiedener Steilheiten eingezeichnet.

Bei einer Triode mit großer Steilheit ist die Steuerwirkung des Gitters auf den Anodenstrom größer als bei einer mit kleiner Steilheit. Zwei unter gleichen Bedingungen arbeitende Verstärker mit Röhren verschiedener Steilheit zeigen eine unterschiedliche Verstärkerwirkung. Die Triode mit der größten Steilheit ergibt die größere Verstärkerwirkung (Bild 23/2). Die Verstärkung hängt allerdings nicht allein von der Steilheit ab.

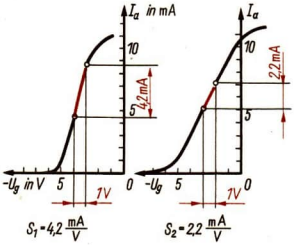


Bild 23/1 Kennlinien zweier Trioden mit verschiedener Steilheit

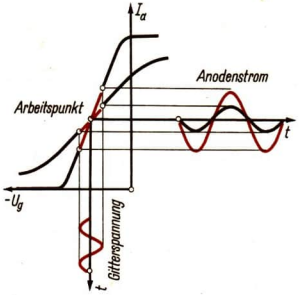
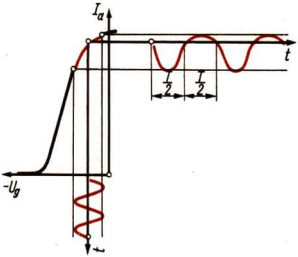


Bild 23/2 Vergrößerung des Anodenwechselstromes bei gleicher Gitterwechselspannung durch Röhren mit verschiedener Steilheit

Es spielen dabei noch andere Größen wie der Innenwiderstand und andere Röhrendaten, auf die hier allerdings nicht eingegangen wird, eine Rolle.

Die Triode in Verstärkerschaltungen. Verstärkerschaltungen werden überall dort benutzt, wo es gilt, kleine Wechselspannungen zu verstärken. Da mit Hilfe der Triode nur Spannungsänderungen im Gitterkreis in Stromstärkeänderungen im Anodenkreis umgewandelt werden, muß sie mit Schaltelementen, wie Ohmsche Widerstände, Kondensatoren oder Transformatoren, gekoppelt werden. So muß man mit diesen Schaltelementen je nach Bedarf den Eingangswechselstrom in eine am Gitter wirkende Wechselspannung umwandeln oder den Anodenwechselstrom in eine Ausgangswechselspannung.

Damit die Kurvenform der verstärkten Wechselspannung derjenigen der auf das Gitter gegebenen entspricht, darf die letztere nur so groß sein, daß sie im Höchstfall den geradlinigen Teil der Kennlinie überstreicht. Wird der geradlinige Teil überschritten, dann entspricht die Kurvenform der verstärkten Wechselspannung nicht mehr der ursprünglichen Form, sie wird mehr oder weniger verzerrt. Diese Verzerrungen sind z. B. im Lautsprecher deutlich zu hören, wenn der dem Lautsprecher vorgeschaltete Tonverstärker mit einer zu hohen Eingangswechselspannung betrieben wird (Übersteuerung).



Die Eingangswechselspannung wird einer konstanten negativen Gittervorspannung überlagert. Die negative Gittervorspannung ist so zu wählen, daß sie in der Mitte des geradlinigen Teils der I_a-U_g-Kennlinie liegt. Den damit auf der Kennlinie festgehaltenen Punkt nennt man den *Arbeitspunkt*. Im Ruhezustand fließt der zur negativen Gittervorspannung gehörige Anodenruhestrom. Durch die zusätzlich an das Gitter gelegte Wechselspannung schwankt die Gitterspannung. Dadurch schwankt der Anodenstrom in gleicher Weise mit. Der Anodenstrom besitzt dann einen Gleichstromanteil (Anodenruhestrom) und einen Wechselstromanteil. In einem Widerstand R_A im Anodenkreis wird deshalb ein Spannungsabfall erzeugt, der einen Gleich- und einen Wechselspannungsanteil besitzt. Der Wechselspannungsanteil kann mit Hilfe eines Kondensators abgetrennt werden.

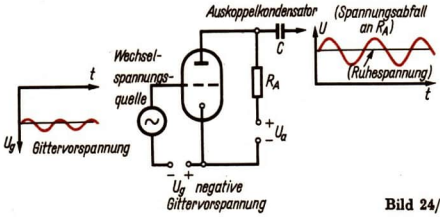


Bild 24/2 Triode in Verstärkerschaltung

4. Elektronenstrahlröhren

Durch eine auf den Physiker FERDINAND BRAUN zurückgehende Röhrenkonstruktion, die *Braunsche Röhre*, wurde es möglich, den zeitlichen Verlauf sehr schneller Stromstärke- und Spannungsschwankungen sichtbar zu machen.
Man benutzt dazu einen Elektronenstrahl, der über einen Leuchtschirm geführt wird. Beim Auftreffen der Elektronen auf das Leuchtschirmmaterial wird dieses angeregt, Licht auszusenden. Dazu enthält die Röhre

eine Glühkatode, welche die Elektronen emittiert,
Vorrichtungen, die den Elektronenstrahl erzeugen,
in seiner Stärke verändern,
bündeln,
ablenken
und einen Leuchtschirm, der seinen Auftreffpunkt sichtbar macht.

Wir wollen diese Vorrichtungen an Hand des Bildes 25/1 im einzelnen betrachten. Zunächst ist es nötig, die Stärke des Elektronenstrahls zu variieren. Das erreicht man durch den Wehneltzylinder (3)[1], den die Elektronen gleich nach Verlassen der Katode durchfliegen. Er hat gegenüber der Katode eine negative Spannung. Legt man an ihn eine wechselnde Spannung an, so schwankt die Intensität des Elektronenstromes im Rhythmus dieser Wechselspannung.

● *Vergleichen Sie die Wirkungsweise des Wehneltzylinders mit der des Gitters in einer Elektronenröhre!*

Wir sprechen von einer Elektronenstrahlröhre, weil der aus der Katode austretende Elektronenstrahl zu einem schmalen Bündel zusammengeschnürt wird, damit er auf dem Leuchtschirm einen scharfen kleinen Punkt aufzeichnet.

[1]ARTHUR WEHNELT (1871 bis 1944), deutscher Physiker

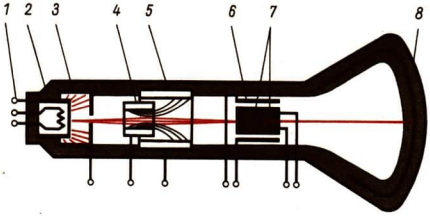


Bild 25/1 Längsschnitt durch eine Elektronenstrahlröhre
Zur Erzeugung des Elektronenstroms dient die indirekt geheizte Glühkatode (2). Eine Anodenspannung von etwa 1 kV, die zwischen die zylinderförmige Anode (5) und die Katode (2) gelegt wird, beschleunigt die aus der Katode austretenden Elektronen in Richtung auf den Leuchtschirm (8)

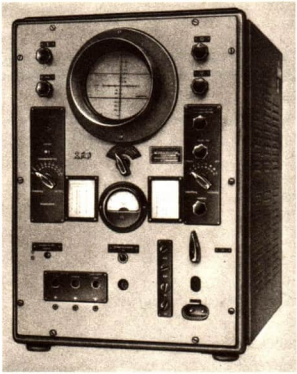


Bild 26/1 Elektronenstrahloszillograf

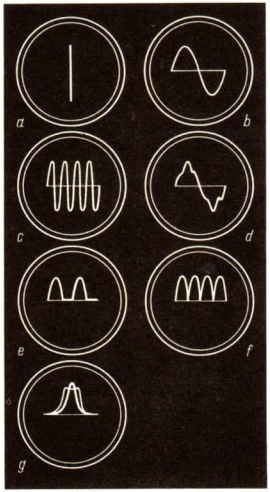


Bild 26/2 Beispiele für Aufzeichnungen im Elektronenstrahloszillografen
a) Wechselspannung, ohne Kippgenerator, b) Wechselspannung, eine Periode, c) desgleichen, 4 Perioden, d) nichtsinusförmige Wechselspannung, e) Einweg-Gleichrichtung, f) Zweiweg-Gleichrichtung, g) Resonanzkurve

Diese Bündelung des Elektronenstromes erreicht man durch eine Elektronenlinse, die aus den Anodenzylindern (4) und (5) besteht. Liegt zwischen beiden eine Spannung, so drängt das angedeutete elektrische Feld den Elektronenstrahl zu einem schmalen Bündel zusammen, so daß an der Auftreffstelle auf dem Schirm ein hell leuchtender Punkt sichtbar wird.
Die Ablenkung des Elektronenstrahls wird durch zwei senkrecht zueinander angeordnete elektrisch aufladbare Plattenpaare (6) und (7), d. h. durch zwei elektrische Felder hervorgerufen. Das der Katode gegenüberliegende Stück der Röhre wird möglichst eben geformt und ist innen mit einem Leuchtstoff (meist Zinksulfid) bedeckt, der beim Auftreffen des Elektronenstrahls aufleuchtet.

Ein Meßgerät, in dem die Elektronenstrahlröhre Anwendung findet, ist der Elektronenstrahloszillograf, auch Katodenstrahloszillograf genannt (Bild 26/1).
Legt man beispielsweise eine Wechselspannung an das Plattenpaar (6), so wird der vorher in der Mitte des Bildschirmes sichtbare Punkt abwechselnd nach oben und unten abgelenkt und zu einem senkrechten Strich auseinandergezogen (Bild 26/2a). Die Auslenkung ist der Spannung proportional.

Aus diesem Strich kann man jedoch noch keine Einzelheiten über den zeitlichen Verlauf der angelegten Wechselspannung ablesen. Das kann man erst, wenn man den Strahl gleichzeitig zeitlich periodisch auch horizontal ablenkt. Dann erhält man bei richtig gewählter Horizontalablenkung das Bild 26/2b.
Diese zusätzliche periodische Ablenkung wird im Oszillografen durch eine Kippspannung hervorgerufen. Sie hat die Eigenschaft, daß sie mit der Zeit linear anwächst, wobei sich der Leuchtpunkt gleichförmig von einer Seite des Bildschirms zur anderen bewegt. Dann bricht die Spannung plötzlich zusammen, wobei der Punkt in seine Ausgangsstellung zurückspringt, und der Vorgang beginnt von neuem. Die Frequenz dieses periodischen Vorgangs, die Kippfrequenz, muß auf die Frequenz des zu untersuchenden elektrischen Vorgangs abgestimmt sein. Das Bild 26/2b entsteht nur, wenn die Kippfrequenz gleich der Frequenz der angelegten Wechselspannung ist.

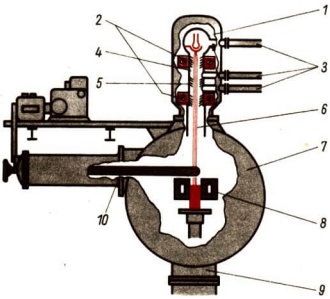
● *Versuchen Sie, die Bilder 26/2 zu deuten! Wie verhalten sich Kippfrequenz und Wechselstromfrequenz in Bild 26/2c?*
Bild 26/2d zeigt den Verlauf einer Wechselspannung, die mit einem Experimentiergenerator erzeugt wurde. Wie erzeugt man die Kurven in Bild 26/2e und f?

Die bekannteste Ausführung einer Elektronenstrahlröhre ist die Fernsehbildröhre.

5. Elektronenstrahlschmelzen

Ein Elektronenstrahl ruft bei seinem Auftreffen auf einen Körper infolge der kinetischen Energie der Elektronen eine beträchtliche Wärmewirkung hervor. Das nutzt man in den Elektronenstrahlöfen (Bild 27/1) aus.

Bild 27/1 Elektronenstrahl-Mehrkammerofen



1 Elektronenstrahler
2 Ringmagnete zur Bündelung des Elektronenstrahls
3 zur Vakuumpumpe ($p = 10^{-5}$ Torr)
4 Vakuumkammern
5 Lochblenden
6 Elektronenstrahl
7 Schmelzkammer
8 Strangziehanlage
9 Schmelzgutentnahme
10 Schmelzgut

Der Elektronenstrahl durchläuft erst einige Lochblenden (5), ehe er in den Schmelzraum (7) eintritt. Die Kammern (4) zwischen den Lochblenden sind an Vakuumpumpen angeschlossen, die für ein gleichbleibendes Vakuum von etwa 10^{-5} Torr sorgen

In diesen trifft ein kräftiger Elektronenstrahl auf das stabförmige Schmelzgut. Das abgeschmolzene Material fließt in einen gekühlten Tiegel mit absenkbarem Boden. Bei diesem Umschmelzen im Vakuum wird das Schmelzgut von Verunreinigungen getrennt. Die moderne Industrie hat einen großen Bedarf an Reinststoffen, die oft ganz andere Eigenschaften haben als die gleichen Stoffe mit den normalerweise enthaltenen Verunreinigungen. Damit Gasausbrüche aus dem Schmelzgut das Vakuum nicht beeinträchtigen, hat man den Elektronenstrahl-Mehrkammerofen konstruiert.
Der Elektronenstrahl wird heute in der vielfältigsten Weise zur Bearbeitung von Werkstoffen verwendet. Außer den geschilderten Schmelzöfen gibt es Anlagen zum Schweißen, Schneiden (Bild 28/1), Bohren usw. Man bohrt beispielsweise mit einem Elektronenstrahl die Löcher feinster Spinndüsen, deren Durchmesser etwa 0,08 mm beträgt. Diese Art der Werkstoffbearbeitung erhält immer größere Bedeutung.

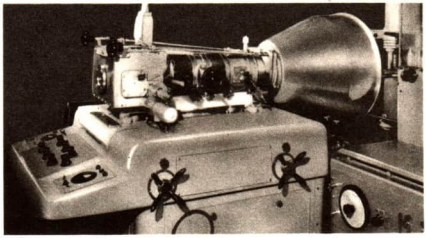


Bild 28/1
Anlage zum Feinstbohren und Schmelzschneiden mit fokussierten Elektronenstrahlen

6. Fotoemission

Eine bestimmte Gruppe von elektrischen Bauelementen, die in Taktstraßen, Sicherungsvorrichtungen u. a. eingebaut sind, ersetzen gleichsam das Auge des Menschen. Diese Bauelemente beruhen auf der technischen Ausnutzung der Fotoemission.

6.1. Grundversuche zur Fotoemission

Auf Seite 7 wurde festgestellt, daß die unselbständige Stromleitung durch Erwärmung und Bestrahlung beeinflußt werden kann. Bei derartigen Versuchen, die Heinrich Hertz 1887 durchführte, wurde die Strahlung nicht nur auf das Gas, sondern auch auf die Elektroden gerichtet. Bei einer an einen Induktor angeschlossenen Funkenstrecke, die so weit auseinandergezogen war, daß gerade kein Funken mehr überschlagen konnte, setzten sofort Überschläge ein, wenn die negative Elektrode mit ultraviolettem Licht bestrahlt wurde. Ähnliche Untersuchungen führten unabhängig voneinander Hallwachs und Stoletow um das Jahr 1888 aus. Sie erkannten, daß eine mit Licht bestrahlte negativ aufgeladene Platte ihre Ladung verliert. Befindet sich der negativ

geladenen Platte gegenüber eine positiv geladene Platte, so entsteht zwischen den Platten ein elektrischer Strom.

Diese Erscheinung, die meist Hallwachseffekt genannt wird, läßt sich wie folgt erklären: Die Energie der auftreffenden Strahlung wird teilweise auf die Metallelektronen übertragen, von denen einige so viel Energie gewinnen, daß sie der Austrittsarbeit entspricht. Die Elektronen können die Metalloberfläche verlassen. Wir bezeichnen diesen Vorgang als Fotoemission. Die emittierten Elektronen vermindern die negative Ladung der Platte und liefern einen Strom, wenn sie infolge der Kraft des elektrischen Feldes auf Ladungsträger zu einer positiven Platte wandern können. (Bild 29/1).

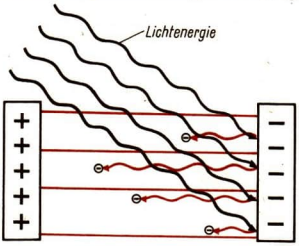


Bild 29/1 Durch die Lichtenergie ausgelöster Elektronenstrom im elektrischen Feld

● *Stellen Sie die drei Arten, nach denen Elektronen aus einer Katode herausgelöst werden können, gegenüber!*

Der Effekt ist besonders stark bei Röntgen- und Ultraviolett-Bestrahlung, aber auch sichtbare Strahlung genügt bei den Alkalimetallen zur Fotoemission.

Die Energie, die zur Abtrennung eines Elektrons benötigt wird, ist vom Stoff abhängig. Besonders wenig Energie ist bei den Alkalimetallen nötig (Natrium, Kalium, Rubidium, Cäsium). Für ein bestimmtes Katodenmaterial und eine bestimmte Strahlungsart gilt:

Die Stärke des Elektronenstromes ist proportional der Menge der einfallenden Strahlung.

6.2. Fotozellen

Der Hallwachseffekt wird in den Fotozellen technisch ausgenutzt (Bild 29/2). In ihnen wird die Strahlung (sichtbares Licht, ultraviolettes und z. T. ultrarotes Licht) in einen Strom, den man als Fotostrom bezeichnet, umgewandelt.

Diese Eigenschaft hat sie für die Technik unentbehrlich gemacht. Da die Stärke des Fotostromes von der Menge des einfallenden Lichtes abhängig ist, kann ein Lichtimpuls

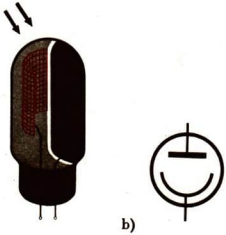


Bild 29/2 Fotozelle

a) Das Licht fällt in der Pfeilrichtung ein. Die Fotozelle besteht aus einem mit Sockel versehenen Glaskolben, auf dessen Innenwand etwa zur Hälfte eine Alkalischicht aufgedampft ist. Dieser Schicht gegenüber befindet sich eine Drahtschleife (oder ein Gitter), die die ausgelösten Elektronen „auffängt". Die Röhre ist entweder luftleer gepumpt (Vakuumfotozelle) oder mit einem Edelgas gefüllt (Edelgasfotozelle). b) Schaltbild zur Fotozelle

in einen Stromimpuls umgewandelt werden. Das nutzt man heute beim Betrieb von lichtelektrischen Relais, von Tastorganen, beim Lichttonverfahren in der Tonfilmtechnik usw.

Wie bereits erwähnt, gibt es Fotozellen, die weitestgehend evakuiert sind (Vakuumzellen) und solche, die mit einem Edelgas unter niedrigem Druck gefüllt sind. In der Vakuumzelle wird der Fotostrom nur von den durch Fotoemission ausgelösten Elektronen gebildet. In der gasgefüllten Zelle treffen die durch die Fotoemission ausgelösten Elektronen auf dem Weg zur Anode auf Gasatome und ionisieren diese (Stoßionisation). Elektronen und positive Gasionen verstärken wesentlich den Fotostrom. Eine gasgefüllte Zelle liefert demnach unter gleichen Bedingungen eine größere Stromausbeute als eine Vakuumzelle. Zum Nachweis des Fotostromes benutzt man folgende Schaltung:

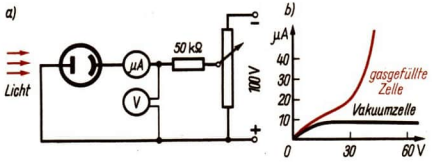


Bild 30/1 a) Schaltung zum Nachweis des Fotostromes. b) Kennlinie (die Vakuumzelle erreicht schon bei niedrigen Spannungen einen Sättigungswert)

Der in den Kreis geschaltete Widerstand von 50 k Ω ist nur bei der Verwendung von gasgefüllten Zellen notwendig. Er soll verhindern, daß beim Anlegen einer zu hohen Spannung der durch Ionisation verstärkte Fotostrom zu groß wird und die Zelle zerstört.

Anwendung von Fotozellen. In der Regel genügt der von der Fotozelle gelieferte Strom nicht, um ein Relais zu betätigen oder andere Vorgänge auszulösen. Der Fotostrom muß deshalb verstärkt werden.

Weitere Anwendungen finden Fotozellen in der Tonfilmtechnik. Auf einem Film wird eine Tonspur, das ist eine Spur variabler Lichtdurchlässigkeit, aufgezeichnet. Die Tonwiedergabeanlage arbeitet mit einer Fotozelle, die durch ein schmal eingeblendetes Lichtbündel beleuchtet wird. Zwischen Blende und Fotozelle läuft die Tonspur des Filmes. Sie läßt im Rhythmus der Schallwellen mehr

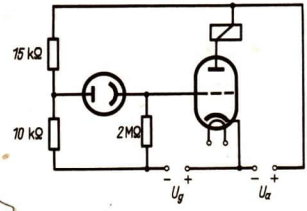


Bild 30/2 Fotozelle mit einstufigem Röhrenverstärker

Der Fotostrom erzeugt am Gitterwiderstand der Verstärkerröhre einen Spannungsabfall, der den Elektronenstrom in der Röhre steuert. Im Anodenkreis fließt dann über ein Relais der verstärkte Strom. Schaltet man statt des Relais ein elektromagnetisches Zählwerk in den Anodenkreis, dann kann man die Anlage zur Zählung von Werkstücken verwenden

Bild 31/1 Wiedergabeeinrichtung Tonfilm

1 Lampe
2 Kondensor
3 Blende
4 Film
5 Fotozelle
6 Verstärker
7 Lautsprecher

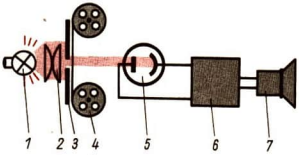
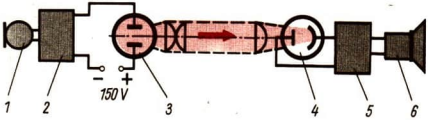


Bild 31/2 Sender und Empfänger für ein tonmoduliertes Lichtbündel

1 Mikrofon, 2 und 5 Verstärker, 3 Glimmlampe, 4 Fotozelle, 6 Lautsprecher



oder weniger Licht zur Fotozelle. Die Fotozelle setzt die Lichtschwankungen in Stromschwankungen um, die dann über einen Verstärker dem Lautsprecher zugeführt werden.
Mit verhältnismäßig einfachen Mitteln läßt sich ein Demonstrationsgerät bauen, mit dessen Hilfe die von einem Mikrofon oder Plattenspieler gelieferten Tonwechselströme in Lichtschwankungen umgewandelt werden. Mit einer Empfangsanlage kann man die Lichtschwankungen wieder in Tonwechselströme umwandeln und diese über einen Lautsprecher in Schallwellen. Die Sendeanlage besteht aus einer Glimmlampe, die mit Gleichspannung und einer überlagerten Tonwechselspannung betrieben wird.

Wenn es gelingt, durch die optische Einrichtung ein paralleles Lichtbündel zu erzeugen, dann kann man mit dieser Anlage leicht über Entfernungen von 10 m bis etwa 100 m sprechen.
Prinzipiell ähnlich arbeiten Lasergeräte, bei denen aber die Lichterzeugung anders als in den beschriebenen Beispielen erfolgt.

Der Einsatz von Lasergeräten ermöglicht eine Reichweite, die der optischen Sichtweite entspricht. Die Entwicklung dieser Übertragungstechnik wird Telefonkabel zu einem großen Teil überflüssig machen.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Welche Arten der Elektronenemission kennen Sie? Wie kommt die Elektronenemission zustande?
2. Erklären Sie den Aufbau und die Arbeitsweise einer Diode und einer Triode!
3. Nehmen Sie die Gitterspannung-Anodenstromkennlinie einer Triode auf und erklären Sie die Begriffe Steilheit und Arbeitspunkt.
4. Skizzieren Sie die Schaltung eines einstufigen Röhrenverstärkers und erklären Sie die Arbeitsweise.
5. Wie arbeitet eine Elektronenstrahlröhre?
6. Erklären Sie den Aufbau und die Arbeitsweise einer Fotozelle!
7. Skizzieren Sie die Schaltung einer Lichtschranke und erklären Sie die Arbeitsweise.

Leitungsvorgänge in Festkörpern

Die Industrie und die Wirtschaft sind ohne moderne Rechenautomaten zur Lösung wissenschaftlich-technischer und ökonomischer Aufgaben nicht mehr denkbar. In diesen Rechenautomaten befinden sich sehr viele elektronische Bauelemente, die auf der elektrischen Leitung in festen Körpern beruhen. Solche Bauelemente ersetzen immer mehr die Elektronenröhren, da sie kleiner, leichter und widerstandsfähiger sind und eine größere Lebensdauer besitzen.

1. Leitungsvorgänge in Metallen

Die elektrischen Eigenschaften der Metalle lassen sich aus dem kristallinen Aufbau und aus der metallischen Bindung erklären. Die letztere beruht darauf, daß zwischen positiv geladenen Atomrümpfen (Ionen) Valenzelektronen frei beweglich sind.
Man bezeichnet die Gesamtheit der freien Elektronen im Metall als *Elektronengas*.
Das Modell des Elektronengases ist ein Hilfsmittel, mit dem sich physikalische Vorgänge leichter erklären lassen. Es hat mit den Gasen die leichte Beweglichkeit gemein, unterscheidet sich von ihnen aber vor allem dadurch, daß die Elektronen des Modellgases das Metall nicht ohne weiteres verlassen können, denn die negativen und positiven Ladungen sind in gleicher Anzahl vorhanden. Die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle ist eine Folge der sehr großen Zahl von Leitungselektronen, die im metallischen Leiter vorhanden sind.
Gleich den Gasatomen eines wirklichen Gases vollführen die freien Elektronen eine ungeordnete Wärmebewegung. Legt man eine Spannung an den Leiter, dann entsteht in ihm ein elektrisches Feld, das auf die Elektronen eine Kraft ausübt. Eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung kann aber nicht stattfinden, da Zusammenstöße mit den infolge ihres Wärmezustandes schwingenden Gitterbestandteilen des Kristallgefüges erfolgen. Die Elektronen erhalten zusätzlich zu ihrer ungeordneten Wärmebewegung eine gleichförmige Bewegung entgegengesetzt zur Feldrichtung. Da die Elektronen dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie an die Gitterbestandteile abgeben (Überwindung eines Widerstandes), erwärmt sich das Metall (Stromwärme).
Die Elektronenabgabe bei der Glühemission läßt sich ebenfalls durch die starken

Schwingungen der Ionen erklären, die den Elektronen die zum Austritt nötige kinetische Energie erteilen. Da sich das elektrische Feld im Leiter nahezu mit Lichtgeschwindigkeit (300 000 km · s^{-1}) ausbreitet, verlaufen elektrische Schaltvorgänge sehr schnell.

Beispiel

Schaltet man eine Glühlampe in einen Stromkreis, so sieht man diese nach dem Einschalten sofort aufleuchten. Der Anstoß für die Bewegung breitet sich demnach mit einer außerordentlich hohen Geschwindigkeit aus. Die einzelnen Elektronen selbst bewegen sich mit einer verhältnismäßig kleinen Geschwindigkeit. Sie liegt in der Größenordnung von etwa 1 mm · s^{-1}.

Nachweis der Leitungselektronen. Den Nachweis, daß bewegte Elektronen die Grundlage der Leitung in Metallen sind, erbrachte der Physiker TOLMAN. Er ging von der Überlegung aus, daß Elektronen infolge ihrer Masse bei Verzögerungsvorgängen einer Trägheitswirkung unterliegen und sich in der ursprünglichen Bewegungsrichtung weiterbewegen mußten. Das müßte dann einen Spannungsstoß verursachen. TOLMAN verwendete eine Spule aus einem Draht von etwa 10 km Länge. Die Spule war drehbar gelagert und ihre Enden über Schleifringe mit einem Galvanometer verbunden. Versetzte er die Spule in schnelle Umdrehungen und bremste sie dann plötzlich ab, dann konnte er am Galvanometer den erwarteten Spannungsstoß ablesen.

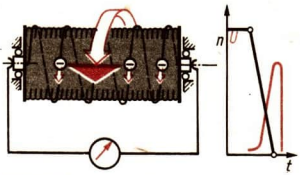


Bild 33/1 Versuch von TOLMAN zum Nachweis von Leitungselektronen

Aus dem Spannungsstoß kann die spezifische Ladung des Elektrons berechnet werden. Man erhält die gleichen Werte wie bei Elektronen im Vakuum. Damit war der Beweis erbracht, daß freibewegliche Elektronen die Ursache der metallischen Leitung sind.

Dieser Versuch TOLMANs ist ein gutes Beispiel dafür, wie sich der Erkenntnisfortschritt in der Wissenschaft vollzieht. Auf Grund von bekannten Eigenschaften der Elektronen, Trägheitsgesetze usw. wird eine Hypothese formuliert. („Im Metall sind freie Elektronen!") Zur Überprüfung der Hypothese wird der Aufbau einer Versuchsanordnung überlegt und geschaffen. Die Durchführung des Versuchs bestätigt die Hypothese oder bestätigt sie nicht. Im geschilderten Versuch war das erstere der Fall. Wenn die Hypothese nicht bestätigt wird, muß eine neue aufgestellt werden. Das Ergebnis bestätigt die Hypothese qualitativ („Es gibt freie Ladungsträger im Metall") und quantitativ („Die freien Ladungsträger sind Elektronen"). Zusammen mit vielen anderen theoretischen Überlegungen bildete sich so die Elektronentheorie der Metalle heraus.

2. Leitung in Halbleitern

Halbleiterbauelemente, wie Transistoren, Dioden und Fotoelemente, haben in den letzten Jahren eine immer größere Verbreitung gefunden. In Rundfunk- und Fernsehgeräten, in elektrischen Rechenmaschinen, in Steuer- und Regelanlagen usw. werden sie in

zunehmendem Maße statt der bisher gebräuchlichen Elektronenröhren verwendet. Um die Arbeitsweise dieser Bauelemente zu verstehen, ist es wichtig, die Leitungsvorgänge im Halbleiter zu untersuchen.

2.1. Leitungsvorgänge im Halbleiter

Halbleiter sind Stoffe, die sich in ihren elektrischen Eigenschaften von den Metallen und Isolatoren unterscheiden. Ihre Leitfähigkeit liegt zwischen der der Isolatoren und der der Metalle. Sie ist stark von der Temperatur abhängig. Im Gegensatz zu den Metallen nimmt die Leitfähigkeit mit wachsender Temperatur zu. Auch äußere Einflüsse wie die Bestrahlung mit Licht oder Röntgenstrahlung können die Leitfähigkeit stark erhöhen. Während bei den Metallen immer freie Elektronen vorhanden sind, ist dies bei den Halbleitern nicht der Fall. Alle Elektronen sind am Aufbau des Kristallgitters beteiligt. Es ist aber möglich, unter bestimmten Umständen Elektronen aus dem Atomverband zu lösen, die die Leitung übernehmen. Dazu ist eine bestimmte Energie nötig, die von außen zugeführt werden muß.

Die Energiezufuhr kann erfolgen durch Erhöhung der Temperatur, durch Lichteinstrahlung und durch Anlegen einer Spannung an den Halbleiterkristall. Bei Zimmertemperatur sind schon genügend Elektronen aus ihren Bindungen gelöst, so daß eine Leitung nachgewiesen werden kann. Aber nicht nur die Elektronen sind Träger des Stromes im Halbleiter, sondern auch die Stellen des Atomverbandes, an denen Elektronen herausgelöst wurden. Diese Stellen, an denen Elektronen fehlen, nennt man Fehlstellen oder Löcher.

Bevor aus einem Atom ein Elektron ausgelöst wird, ist das Atom elektrisch neutral. Nach der Auslösung ist es positiv geladen. Seine positive Ladung ist genauso groß wie die negative Ladung des Elektrons. Es wird damit zum positiven Ion. Die entstandene Fehlstelle besitzt den Charakter einer positiven Ladung. Springt ein Elektron in ein solches Loch, dann ist das Atom wieder neutral. Legt man eine Spannung an den Halbleiterkristall, dann wandern unter dem Einfluß des elektrischen Feldes die Elektronen, indem sie von Loch zu Loch springen, zum positiven Pol und die Löcher zum negativen Pol. Die Löcher verhalten sich dabei wie bewegliche positive Ladungen. Im Gegensatz zur elektrolytischen Leitung ist hier der Transport von positiven Ladungen nicht mit einem Stofftransport verbunden.

Die Atome bleiben an den Plätzen, die ihnen der Kristallaufbau zuordnet.

Diese Art von Leitung nennt man **Eigenleitung.** Da die Eigenleitung unter dem Einfluß von Wärme und Licht stark anwächst, verwendet man Halbleiterkristalle als Fühler für Widerstandsthermometer und Lichtmeßgeräte.

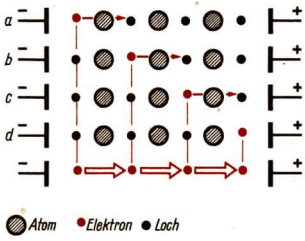


Bild 34/1 Leitung im Halbleiter (zeitlicher Ablauf von a nach d)

2.2. Die Störstellenleitung

Fügt man einem Halbleiter, wie z. B. Germanium, drei- oder fünfwertige Fremdatome zu, dann erhöht sich dessen Leitfähigkeit stark. Hierzu genügt bereits ein Fremdatom auf etwa 10 Millionen Germaniumatome. Messungen haben ergeben, daß man je nach Art der Fremdatome entweder vorwiegend eine Elektronenleitung oder eine Löcherleitung erhält. Bei Germanium erzeugt eine kleine Indiumzugabe vorherrschend Löcherleitung, Antimonzugabe dagegen Elektronenleitung. Das kommt daher, daß dem dreiwertigen Indium für die Bindung mit dem vierwertigen Germanium ein Elektron fehlt. An der Fehlstelle entsteht ein positives Loch.
Antimon bringt ein Elektron zuviel mit. Dieses läßt sich unter sehr kleiner Energiezufuhr (Zimmertemperatur) vom Antimonatom lösen und zur Leitung verwenden.

Die durch die Fremdatome hervorgerufene Leitung, die entweder als Löcher- oder als Elektronenleitung auftreten kann, nennt man Störstellenleitung.

Auf Grund ihrer Ladung nennt man die Elektronenleitung n-Leitung und die Löcherleitung p-Leitung (n – negativ, p – positiv).

2.3. Anwendung von Halbleitern

Gleichrichter. Wie mit Elektronenröhren, kann man mit Halbleiterdioden Wechselströme gleichrichten. Die Gleichrichterwirkung von Halbleitern soll in einer stark vereinfachten Form betrachtet werden. Zum Bau von Halbleitergleichrichtern und Transistoren werden Halbleitereinkristalle[1] verwendet. Diese Kristalle werden mit einer Ziehvorrichtung aus einer Schmelze gezogen. Für die Halbleitergleichrichter benötigt man Einkristalle, die aus einer p-leitenden und einer n-leitenden Schicht bestehen. Zwischen beiden Schichten bildet sich eine Grenzschicht aus. Diese entsteht dadurch, daß infolge der unterschiedlichen Ladungen einige Löcher in das n-Gebiet und einige Elektronen in das p-Gebiet eindringen.

Um sich die Gleichrichtereigenschaften zu erklären, betrachtet man die Vorgänge in der Grenzschicht.
An den (p, n)-Kristall wird über ein Strommeßgerät eine Spannungsquelle angeschlossen. Zwischen den Anschlußelektroden besteht ein elektrisches Feld. Je nach der Feldrichtung werden die Ladungsträger des Kristalls entweder in die Grenzschicht hineingedrückt oder in das n- oder p-Gebiet zurückgezogen.

[1] Einkristall: einheitlicher Kristall, dessen Kristallaufbau nicht durch Unregelmäßigkeiten gestört ist.

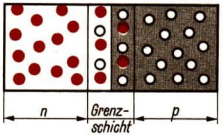


Bild 35/1 Halbleitereinkristall
rote Punkte: Elektronen
weiße Hohlflächen: Löcher

7

V Zunächst ist der Halbleiterkristall so anzuschließen, daß der Minuspol der Spannungsquelle an das p-Gebiet und der Pluspol an das n-Gebiet angelegt wird.
Infolge der durch das elektrische Feld auf die Ladungsträger wirkenden Kraft werden diese aus der Grenzschicht herausgedrückt, die Elektronen in das n-Gebiet und die Löcher in das p-Gebiet. Die Grenzschicht verarmt an Ladungsträgern. Ohne Ladungsträger kann aber kein Strom fließen. Der mit einem empfindlichen Meßgerät noch meßbare kleine Strom ist auf die Eigenleitung zurückzuführen.

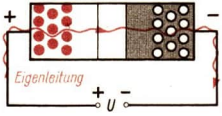


Bild 36/1
Halbleiterdiode in Sperrichtung

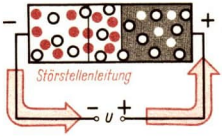


Bild 36/2
Halbleiterdiode in Durchlaßrichtung

Legt man den Minuspol der Spannungsquelle an das n-Gebiet und den Pluspol an das p-Gebiet, dann drückt das elektrische Feld die Ladungsträger in die Grenzschicht.
Die Elektronen aus dem n-Gebiet gelangen in das p-Gebiet, springen in die dort vorhandenen Löcher und bewegen sich von Loch zu Loch weiter. Dadurch tritt gleichzeitig eine dauernde Verlagerung von Löchern in Richtung auf den Minuspol ein. Die Löcher verhalten sich dabei ähnlich wie selbständige positive Ladungsträger. Da die Grenzschicht bei dieser Polung ständig von Ladungsträgern überflutet wird, fließt ein elektrischer Strom.

Aufbau von Halbleiterflächengleichrichtern. Ein n-leitender Germaniumkristall wird auf eine Blechunterlage aufgelötet. Auf den Kristall gibt man eine kleine Indiumperle und erwärmt das Ganze auf etwa 500 °C. Das flüssige Metall diffundiert durch die Oberfläche des Germaniums, das heißt Indiumatome dringen in den Germaniumkristall ein und bilden dort eine dünne Schicht mit vorwiegender p-Leitung. Angelötete Drähte sorgen für die Stromzuleitung bzw. Ableitung.

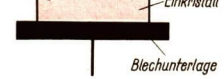
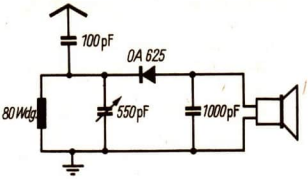


Bild 36/3 Aufbau einer Flächendiode (schematisch)

Bild 36/4 Germaniumdiode

Bild 37/1 Schaltung eines einfachen Rundfunkempfängers mit Diodengleichrichtung



In der Technik werden Halbleitergleichrichter für die Gleichrichtung von Strömen von einigen Mikroampere bis einigen 100 Ampere gebaut. Das Bild 36/4 zeigt einen Germaniumgleichrichter, wie er zur Gleichrichtung kleiner hochfrequenter Wechselströme verwendet wird.
Gleichrichter für große Stromstärken erwärmen sich stark und werden deshalb mit einer Kühleinrichtung versehen. Die Blechunterlage, auf die der Germaniumkristall aufgelötet ist, wird mit einer größeren Blechplatte fest verschraubt. Diese nimmt die Wärme auf und gibt sie an die Umgebung weiter.
Neben Germanium eignen sich auch andere Halbleiterwerkstoffe, wie z. B. Silizium oder Selen, zum Aufbau von Gleichrichtern.

Anwendung von Halbleiterdioden. Halbleiterdioden eignen sich genau wie Röhrendioden zum Aufbau von Gleichrichteranlagen. Sie sind den Röhrendioden in vieler Hinsicht überlegen, weil sie keinen Heizstrom benötigen und eine längere Lebensdauer besitzen. Ihr Nachteil ist, daß sie gegen Überspannungen empfindlich sind. Bei den meisten Halbleiterdioden liegt die zulässige Spannungsgrenze unter 100 V. Einige Kleinstausführungen werden vor allem in der Rundfunk- und Fernsehtechnik zum Gleichrichten von hochfrequenten Wechselströmen benutzt. Ein einfachster Rundfunkempfänger, der mit einer solchen Diode ausgerüstet ist, wird in Bild 37/1 beschrieben.

Transistoren. Im Jahre 1948 wurde durch die Amerikaner BARDEEN, BRATTAIN und SHOKLEY ein Patent angemeldet, das einen Halbleiterverstärker, den Transistor, zum Inhalt hatte. Darauf setzte in der ganzen Welt eine intensive Forschungsarbeit ein, deren Ergebnis eine ganz neue Technik, die Halbleitertechnik, ist. Es wurde eine große Anzahl von reinen Stoffen und deren Verbindungen auf Halbleitereigenschaften untersucht. Man fand, daß man neben Germanium auch Silizium und andere Stoffe für die Fertigung von Halbleiterbauelementen verwenden kann. Technologische Verfahren zur Reinstherstellung der Grundstoffe mußten entwickelt werden. Heute ist man bereits in der Lage, Reinststoffe herzustellen, bei denen auf etwa 10^8 bis 10^{10} Atome der Grundstoffe 1 Fremdatom kommt. Das Zahlenverhältnis der zulässigen Fremdatome zu den Grundstoffatomen ist dabei etwa vergleichbar mit dem Zahlenverhältnis eines Menschen zur gesamten Menschheit. Es sind bereits so viele Transistoren mit verschiedenen Eigenschaften und Leistungen in der Fertigung, daß viele elektronische Geräte, die früher nur mit Elektronenröhren ausgestattet waren, heute fast restlos Halbleiterbauelemente enthalten. Elektronische Rechenmaschinen werden fast nur noch mit Halbleiterbauelementen bestückt. Die Rechenmaschinen, die früher etwa den Raum eines Einfamilienhauses eingenommen hätten, beanspruchen, mit Halbleiterelementen aufgebaut, nur noch die Größe eines mittleren Kleiderschranks. Dazu kommt eine wesentliche Einsparung an elektrischer Energie, denn Transistoren brauchen im Gegensatz zu den Elektronenröhren keine Heizung.

Auch ihre Lebensdauer und ihre mechanische Festigkeit ist um ein Vielfaches größer. Ein vollständiger Ersatz der Elektronenröhren durch Halbleiterbauelemente wird allerdings nicht möglich sein, da beide in Arbeitsweise und Eigenschaften zu stark voneinander verschieden sind und infolgedessen auch verschiedene Anwendungsgebiete haben.

Aufbau von Transistoren. Der Transistor besteht aus einem Einkristall, der drei Schichten besitzt. Die äußeren Schichten sind in bezug auf ihre Leitfähigkeit gleichartig, die mittlere Schicht besitzt die entgegengesetzte Art der Störstellenleitung. So werden Transistoren gebaut, die aus pnp-Schichten, und solche, die aus npn-Schichten bestehen. Auf Grund der einfacheren technischen Herstellung wird der pnp-Typ bevorzugt.

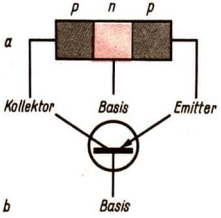


Bild 38/1 a) Aufbau eines Flächentransistors (schematisch), b) Schaltzeichen

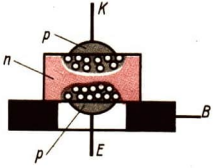


Bild 38/2 Aufbau eines Flächentransistors (Abmessungen des Kristalls: etwa 10^{-1} mm dick, Kantenlänge etwa 2 bis 4 mm)

Die beiden äußeren Anschlüsse nennt man Emitter E und Kollektor K, den mittleren Anschluß die Basis B. Der technische Aufbau ist ähnlich dem einer Halbleiterdiode. Auf eine Metallunterlage, die gleichzeitig den Basisanschluß bildet, wird ein n-leitender Germaniumkristall aufgelötet. Auf beide Seiten des Kristalls bringt man je eine Indiumperle. Diese bilden die Anschlüsse für den Emitter und den Kollektor. Erwärmt man das Ganze auf etwa 500 °C, dann diffundiert das Indium in das Germanium.
Es entsteht im Eindringbereich eine vorwiegend p-leitende Zone. Um den Transistor gegen Licht, Luft und Feuchtigkeit abzuschließen, bekommt er eine Hülle aus Metall oder geschwärztem Glas. Beim Einbau von Transistoren muß man darauf achten, daß sie nicht durch die Lötwärme zerstört werden.
An der p-Schicht des Emitters und der p-Schicht des Kollektors bilden sich jeweils gegenüber der Basisschicht Grenzschichten aus, die sich einzeln wie die Grenzschicht einer Diode verhalten. Man kann deshalb den Transistor auch wie zwei hintereinandergeschaltete Dioden betrachten.

Arbeitsweise von Transistoren. Die Arbeitsweise von Transistoren kann mit der Arbeitsweise von Röhrentrioden verglichen werden. Genau wie bei diesen gibt es einen Steuer- und einen Arbeitskreis. Während bei der Elektronenröhre ein Strom mit Hilfe

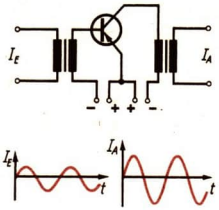


Bild 40/1 Transformatorgekoppelter Transistorverstärker

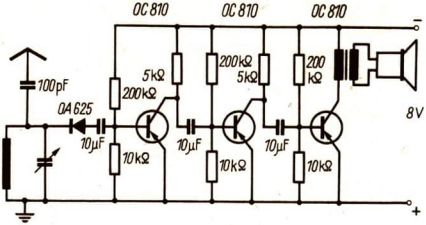


Bild 40/2 Einfacher Transistorenempfänger

Anwendung von Transistoren. Transistorverstärker lassen sich ähnlich aufbauen wie Röhrenverstärker. Sie unterscheiden sich durch die Art ihrer Koppelelemente. Sehr einfach lassen sich transformatorgekoppelte Verstärker herstellen. Ein zu verstärkender Wechselstrom wird über einen Transformator auf den Basis-Emitter-Kreis gegeben. Der verstärkte Wechselstrom wird über einen Transformator dem Kollektor-Emitter-Kreis entnommen.

Dieser Verstärkertyp benötigt verhältnismäßig viel Raum. Wesentlich kleiner lassen sich Widerstand-Kondensator-gekoppelte Verstärker aufbauen. Diese haben dazu noch den Vorteil, mit geringerer Verzerrung zu arbeiten und ein breiteres Frequenzband zu übertragen. Die Stromversorgung für die Transistoren erfolgt im allgemeinen nicht über gesonderte Basis- und Kollektorspannungsquellen, sondern über Spannungsteiler, so daß man für die Speisung von mehreren Transistoren mit einer Spannungsquelle auskommt.

Bei R-C-gekoppelten Verstärkern gelangt der zu verstärkende Wechselstrom über einen Kondensator auf die Basis des Transistors. Der verstärkte Wechselstrom wird ebenfalls über einen Kondensator aus dem Kollektorkreis ausgekoppelt. Zur weiteren Verstärkung kann er einer zweiten Verstärkerstufe zugeführt werden. Statt des Arbeitswiderstandes kann man die Primärspule eines Lautsprechertransformators in den Kollektorkreis schalten. Bei einem solchen Verstärker hängt die Verstärkung von den Transistordaten und den Widerstands- und Kondensatorgrößen ab. Solch eine Verstärkeranordnung kann man verwenden, um einen einfachen Rundfunkempfänger zu bauen (Bild 40/2).

3. Die Thermoelektrizität

3.1. Die Kontaktspannung

Im Jahre 1793 entdeckte der italienische Physiker Alessandro Graf Volta, daß bei der Berührung zweier verschiedener Metalle eine elektrische Spannung zwischen den Metallen auftritt. Heute können wir diese Erscheinung erklären. Bei Metallen, die einander berühren, treten freie Elektronen von einem Metall in das andere über. An der Berührungsstelle treten Elektronen vom Metall mit der kleineren Austrittsarbeit in das Metall

mit der größeren Austrittsarbeit. Die Austrittsarbeit ist die Arbeit, die ein Elektron verrichten muß, um durch die Oberfläche hindurch das Metall zu verlassen. Das erste Metall wird dadurch positiv und das zweite negativ geladen. Dabei entsteht eine Spannung zwischen beiden Metallen, die man als Kontaktspannung bezeichnet.
Untersucht man eine Anzahl verschiedener Metalle, dann kann man sie auf Grund der verschiedenen Kontaktspannungen in einer Spannungsreihe so einordnen, daß jedes Metall im Kontakt mit dem folgenden der Reihe positiv wird und mit dem vorhergehenden negativ.
Man nennt diese Reihe nach dem Entdecker der Berührungsspannung die *Voltasche Spannungsreihe* oder auch galvanische Spannungsreihe.

3.2. Die Thermoelektrizität

Stellt man aus zwei verschiedenen Metallen einen offenen Ring her (Bild 41/1), dann besteht zwischen den freien Enden ein elektrisches Feld.
Bringt man auch die beiden freien Enden in Berührung (Bild 41/2), so daß ein geschlossener Ring entsteht, dann erhält man an der zweiten Berührungsstelle ebenfalls eine Kontaktspannung. Diese ist genauso groß wie die an der ersten Berührungsstelle, aber entgegengesetzt gerichtet. Deshalb kann in dem geschlossenen Ring kein Strom fließen. Das gilt allerdings nur, wenn beide Berührungsstellen die gleiche Temperatur haben. Bringt man die Berührungsstellen auf verschiedene Temperaturen, dann fließt in dem aus beiden Metallen gebildeten Kreis ein Strom, der *Thermostrom*. Die Ursache des Thermostroms ist die Thermospannung, die durch die unterschiedliche Erwärmung der Berührungsstellen auftritt.

Bild 41/1 Zur Kontaktspannung zwischen zwei sich berührenden Metallen

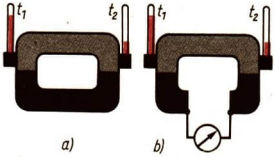


Bild 41/2 a) Ausbildung des Thermostromes in einem aus zwei Metallen gebildeten Metallring
b) Meßanordnung zur Messung der Thermospannung

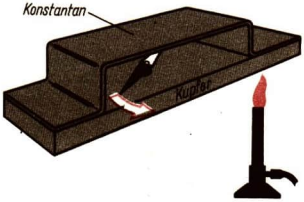
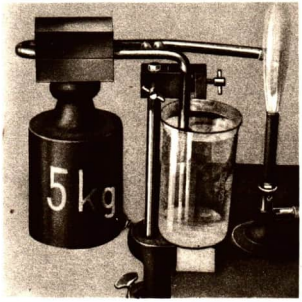


Bild 41/3 Modell eines geschlossenen Leiterkreises aus zwei Metallen. Auf die Magnetnadel wirkt ein Drehmoment, wenn die eine der beiden Verbindungsstellen erwärmt wird

Bild 42/1 Thermoelektrischer Elektromagnet. In der einen, kurzgeschlossenen Stromwindung fließt eine Stromstärke von über 100 A!



Zum Messen der Thermospannung schaltet man ein empfindliches Spannungsmeßgerät in den Stromkreis. Um eine möglichst innige Verbindung zu bekommen, werden die Berührungsstellen verlötet, verschweißt oder vernietet. Wählt man verhältnismäßig kurze und dicke Metallstäbe, dann fließt trotz der kleinen Thermospannung infolge des geringen Ohmschen Widerstandes ein großer Thermostrom.

Die Thermospannung wird um so größer, je größer die Temperaturdifferenz zwischen den Berührungsstellen ist.

3.3. Die thermoelektrische Spannungsreihe

Ähnlich wie die galvanische Spannungsreihe kann man eine thermoelektrische Spannungsreihe aufstellen. Das vorangestellte Metall ist dann gegen jedes nachfolgende Metall thermoelektrisch positiv bzw. das nachfolgende gegen jedes vorangehende negativ. Die einzelnen Metallkombinationen weisen verschiedene Thermospannungen auf. So liefert Wismut-Antimon eine Thermospannung von etwa 10^{-4} V je Grad Temperaturunterschied. Statt reiner Metalle verwendet man heute vielfach Legierungen wie Konstantan-Kupfer, Konstantan-Eisen und Platin-Platinrhodium. Auf Grund der hohen Schmelztemperatur des Platins wird die letztere Kombination hauptsächlich dort verwendet, wo mit hohen Temperaturen (bis 1600 °C) gearbeitet wird.

3.4. Anwendung der Thermoelektrizität

Ein Gerät zur Erzeugung und Ausnutzung einer Thermospannung heißt *Thermoelement*. Es gibt viele Anordnungen, bei denen Thermospannung erzeugt wird, was dort aber nur eine vernachlässigbare Nebenerscheinung darstellt. Wie aus dem vorangegangenen Abschnitt zu ersehen ist, wandeln Thermoelemente Wärmeenergie ohne weitere Hilfsmittel in elektrische Energie um. Sie sind

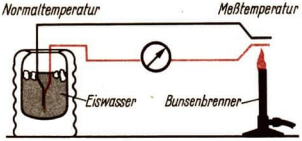
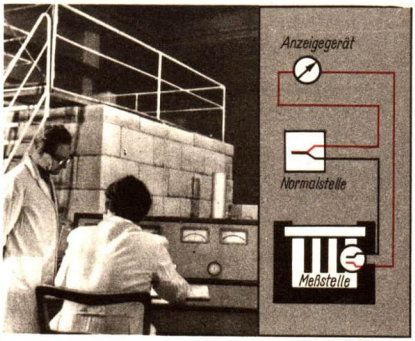


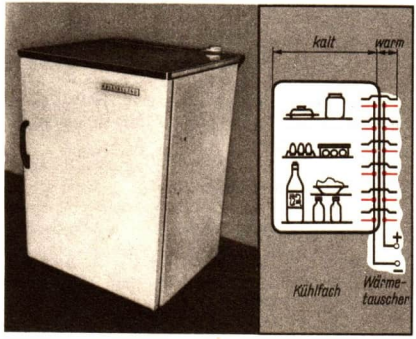
Bild 42/2 Temperaturmessung mit einem Thermoelement

Anwendungsbeispiele zur Thermoelektrizität



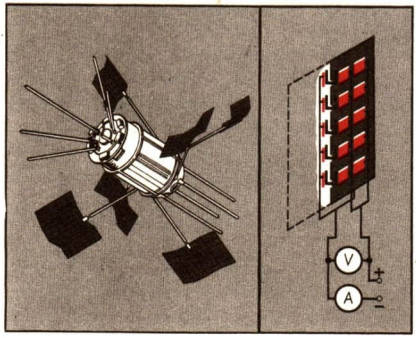
Fernanzeige

Thermoelemente werden zur Fernanzeige infolge ihrer großen Einstellgeschwindigkeit und der leichten Übertragbarkeit der Meßwerte für Temperaturen bis etwa 1600 °C benutzt.



Kühlelement

Thermobatterien können für den Betrieb von Klimaanlagen und Kühlanlagen verwendet werden. Hierbei wird ein umgekehrt zum Thermoeffekt verlaufender Prozeß unter Zufuhr von Elektroenergie dazu benutzt, um die Abkühlung einer Verbindungsstelle der Thermoelemente herbeizuführen (Peltiereffekt).



Energiequelle

Bei der Weltraumforschung werden Satelliten eingesetzt, von denen durch Funksignale die Meßwerte zur Erde übermittelt werden. Als Energiequellen werden u. a. auch Thermobatterien, die aus einer Vielzahl hintereinandergeschalteter Thermoelemente bestehen, verwendet.

deshalb besonders für die Temperaturmessungen geeignet. Man verwendet Drähte, die aus den bereits genannten Metallen bestehen, und verschweißt oder verlötet sie. Eine Lötstelle wird an die Temperaturmeßstelle gebracht, die andere hält man auf Normaltemperatur. Als Anzeigegerät verwendet man einen empfindlichen Spannungsmesser, dessen Skale in Temperaturgraden eingeteilt werden kann.

● *Warum wird bei physikalischen Experimenten die zweite Lötstelle (wie im Bild 42/2) auf 0 °C gehalten, während bei Thermoelementen zum Messen der Temperaturen am Siemens-Martin-Ofen die zweite Lötstelle lediglich auf Außentemperatur gehalten wird?*

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Erklären Sie den elektrischen Leitungsmechanismus a) im Metall, b) im Halbleiter.
2. Vergleichen Sie die Arbeitsweisen der Halbleiterdiode und des Transistors mit denjenigen der entsprechenden Elektronenröhren.
3. Zeichnen Sie das Schaltbild eines einstufigen Transistorverstärkers, und erklären Sie die Arbeitsweise.
4. Bauen Sie ein Thermoelement aus Eisen-Kupfer oder Kupfer-Konstantan-Drähten auf, und messen Sie die Thermospannung. (Eine Lötstelle in kaltes Wasser, die andere in die Flamme eines Bunsenbrenners.)
5. Wie kommt es zu einer Verarmung der Grenzschicht an Ladungsträgern?
   Wie kommt es zu einer Überflutung von Ladungsträgern durch die Grenzschicht?

ZUSAMMENFASSUNG

Die Stromleitung in Metallen wird von frei beweglichen Leitungselektronen getragen.

In welcher Weise hängt der Strom von der Temperatur des Leiters ab und warum?

Die Eigenleitung in Halbleitern beruht darauf, daß infolge von Gitterschwingungen freie Elektronen entstehen.

In welcher Weise hängt die Eigenleitung von der Temperatur ab?

Die Störstellenleitung beruht auf dem Vorhandensein von Ladungsträgern in verunreinigten Halbleitern.

Wieso entstehen durch Verunreinigungen Ladungsträger?

Eine n-p-Halbleiterkombination wirkt als Gleichrichter.

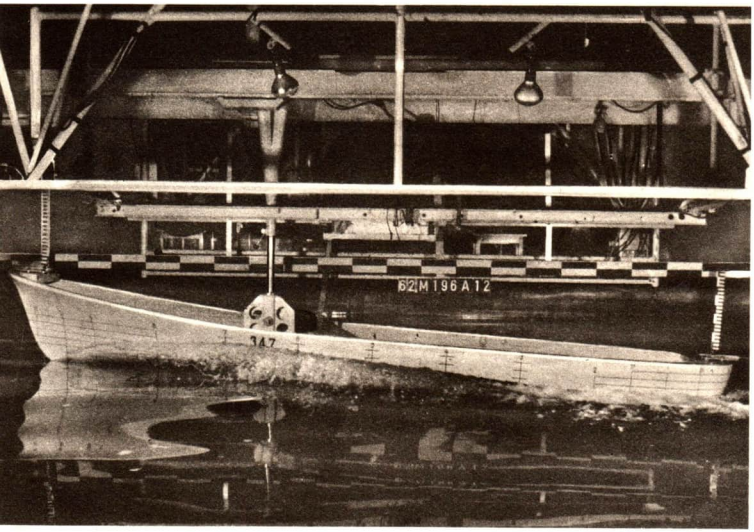
Was ist ein n-, was ist ein p-Halbleiter? Welche Vorgänge treten in der Grenzschicht auf?

Transistoren enthalten zwei p-n-Halbleiterübergangsstellen.

Welche Aufgaben kann ein Transistor erfüllen?

Beim thermoelektrischen Effekt kommt zwischen zwei verschiedenen Metallen ein Strom zum Fließen.

Welche Ursache hat der thermoelektrische Effekt?



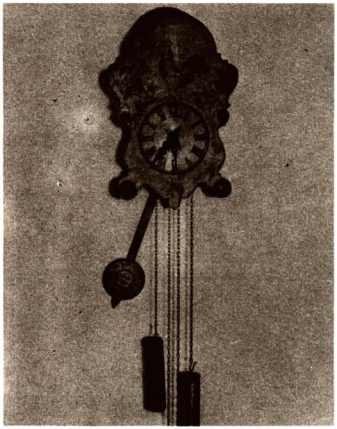
Mechanische Schwingungen und Wellen

Die Musik gehört von jeher zum Kulturgut der Menschheit. Die Ursache der Töne und Klänge sind die in mechanische Schwingungen versetzten Teile der Musikinstrumente. Auf unser Gehör werden die erzeugten Schwingungen in Form von mechanischen Wellen übertragen, die sich im stofferfüllten Raum ausbreiten.

Im Maschinenbau nimmt die Untersuchung von Schwingungserscheinungen einen breiten Raum ein, um Ermüdungsbrüche in Maschinenteilen zu vermeiden oder um mit Hilfe von Berechnungen den erforderlichen Mindestquerschnitt der durch Schwingungen beanspruchten Teile zu ermitteln.

Auch im Schiffbau müssen die Gesetze der Schwingungs- und Wellenlehre berücksichtigt werden. Deshalb untersucht man an Modellen der projektierten Schiffskörper deren Verhalten bei der Bewegung durch das Wasser und die dabei auftretende Wellenbildung.

Grundbegriffe der Schwingungslehre



Die Zeitmessung ist die Grundlage vieler physikalischer Messungen. Obwohl es bereits seit dem Mittelalter Räderuhren gibt, benutzte noch Galilei die genauer „gehende" Wasseruhr. An der Räderuhr fehlte zu dieser Zeit noch eine Vorrichtung, die für einen gleichmäßigen Gang sorgte. Erst durch das Uhrenpendel wurde die Räderuhr zu einem brauchbaren Zeitmeßgerät. Das Uhrenpendel hat eine besondere Bewegungsform: es führt mechanische Schwingungen aus.

1. Mechanische Schwingungen

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

1. Das Pendel schwingt um seine Ruhelage und durchläuft eine bestimmte Bahn.
2. Das Durchlaufen der Bahn wiederholt sich jeweils in gleichen Zeitabständen, es erfolgt periodisch.
3. Die Geschwindigkeit an einem bestimmten Bahnpunkt ist immer gleich groß.

Die Bewegung eines Körpers um eine Ruhelage, die sich in ihren Einzelheiten wiederholt, bezeichnet man als mechanisches Schwingen.

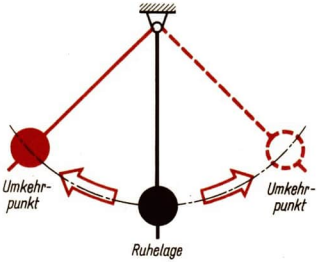


Bild 46/1 Ein sich hin- und herbewegendes Pendel führt eine mechanische Schwingung aus

Die Schwingungslehre untersucht alle Vorgänge, die beim Auftreten von Schwingungen zu beobachten sind. Sie beschränkt sich aber nicht auf die Mechanik. Man spricht auch dann von Schwingungen, wenn sich eine beliebige physikalische Größe periodisch ändert. So kann auch der elektrische Wechselstrom als „Schwingung" aufgefaßt werden.

● *Welche physikalischen Größen ändern sich beim elektrischen Wechselstrom periodisch?*

2. Physikalische Ursachen der Schwingung

Ein Körper ist zwischen zwei Schraubenfedern befestigt. Er wird durch einen sehr langen Faden gehalten (Bild 47/1). Diese Anordnung heißt horizontaler Federschwinger.
Um den Körper nach links zu ziehen, ist eine bestimmte Kraft erforderlich. Dadurch wird die rechte Feder gedehnt und die linke zusammengedrückt. Die aufzuwendende Kraft hängt vom Abstand des Körpers von der Ruhelage ab; sie wächst mit zunehmender Entfernung.
Die zum Spannen der Feder aufgewendete Arbeit ist als potentielle Energie in den Federn gespeichert. Gibt man den Körper frei, so wird die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt.

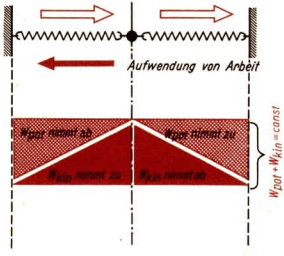


Bild 47/1 Energieumwandlungen beim horizontalen Federschwinger

● *Beschreiben Sie den weiteren Vorgang des mechanischen Schwingens!*

Diese festzustellende laufende Umwandlung zweier Energieformen ineinander ist das Kennzeichen aller Schwingungen, so daß für diese gesagt werden kann:

Die mechanische Schwingung ist ein zeitlich periodischer Vorgang, bei dem sich ständig potentielle und kinetische Energie ineinander umwandeln.

3. Kenngrößen einer Schwingung

Will man die Schwingungen eines Körpers beschreiben, so sind bestimmte, für die Schwingung charakteristische Angaben notwendig. Man bezeichnet sie als **Kenngrößen.**

Die Kenngrößen sollen am Beispiel eines vertikalen Federschwingers erläutert werden:
Zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet sich ein Körper mit seinem Schwerpunkt 2 cm von der Ruhelage entfernt (Bild 47/2). Gibt man den Abständen von der Ruhelage aus nach oben ein positives, nach unten ein negatives Vorzeichen, so beträgt im genannten Beispiel die Elongation + 2 cm. Die größte Entfernung, die der Körper von der Ruhelage einnimmt, ist die Amplitude, zum Beispiel 5 cm.

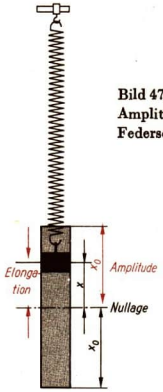
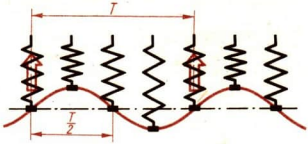


Bild 47/2 Elongation und Amplitude am vertikalen Federschwinger

Bild 48/1 Nach jeweils einem Zeitabschnitt T erfolgt ein gleichgerichteter Durchgang des Körperschwerpunktes durch einen bestimmten Punkt der Bahn



Die Periode T kann aus einer beliebigen Anzahl von Schwingungen n und der dabei verflossenen Zeitdauer t bestimmt werden:

$T = \frac{t}{n}$. Sie ist gleich der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichgerichteten Durchgängen durch einen beliebigen Punkt der Bahn (Bild 48/1).

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

$$T = \frac{t}{n}, \quad T = \frac{40}{50}\,\text{s}, \quad T = \frac{4}{5}\,\text{s}.$$

Die Frequenz f eines Schwingers ist der Quotient aus der Anzahl n der vollen Schwingungen und der dabei verflossenen Zeit.

Das gewählte Zahlenbeispiel ergibt:

$$f = \frac{n}{t}, \quad f = \frac{5}{4}\,\text{s}^{-1}, \quad f = 1{,}25\ \text{Hz}.$$

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

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

Zu Ehren des großen deutschen Physikers Heinrich Hertz benutzt man für die Einheit s^{-1} die Bezeichnung **Hertz** (Hz).

$1\ \text{Hz} = 1\ \text{s}^{-1}$ Größere Frequenzeinheiten sind das

Kilohertz: $1\ \text{kHz} = 10^3\ \text{Hz}$

Megahertz: $1\ \text{MHz} = 10^6\ \text{Hz}$

Gigahertz: $1\ \text{GHz} = 10^9\ \text{Hz}$

Diese Einheiten werden meist in der Hochfrequenztechnik verwendet.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Beschreiben Sie die Energieumwandlungen am Federschwinger!
2. Stellen Sie aus einem Gummifaden und einem Wägestück einen vertikalen Federschwinger her!

2.1. Ermitteln Sie dessen Periode und Frequenz (Sekundenzeiger der Armbanduhr)!

2.2. Wie ändern sich diese Kenngrößen, wenn Sie den Gummifaden verkürzen?

2.3. Wie ändern sich diese Kenngrößen, wenn Sie den Gummifaden unverändert lassen und unterschiedliche Wägestücke verwenden?

3. Eine Stimmgabel hat die Frequenz 440 Hz. Wie lange dauert eine Schwingung?

Tabelle 2: Kenngrößen der Schwingung

Kenngröße	Formelzeichen	Merkmal	Beziehungen
Elongation[1] oder Ausschlag	x	Jeweiliger Abstand des schwingenden Körpers von der Ruhelage	—
Amplitude[2] oder Schwingungsweite	x_0	Größter Abstand des schwingenden Körpers von der Ruhelage	—
Periode oder Schwingungsdauer	T	Zeitdauer einer vollen Schwingung, d. h. eines vollständigen Hin- und Herganges[4]	$T = \frac{t}{n}$ $T = \frac{1}{f}$
Frequenz[3] oder Schwingungszahl	f oder ν	Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde	$f = \frac{n}{t}$ $f = \frac{1}{T}$
Phase[5]		Schwingungszustand zur Zeit t, gegeben durch Bewegungsrichtung und Elongation	

4. Die Darstellung von Schwingungen

4.1. Experimentelle Darstellung von Schwingungen

Um Art und zeitlichen Verlauf von Schwingungen genauer zu erkennen, ist eine Aufzeichnung notwendig. Das Verfahren läßt sich an einem Versuch erläutern:

V 8 Ein Sandpendel ist an zwei Fäden oder, wie man auch sagt, bifilar aufgehängt, damit es nur in einer Ebene schwingen kann (Bild 49/1). Wird die Unterlage mit gleichbleibender Geschwindigkeit unter dem Pendel hinweggezogen, so entsteht auf der Unterlage eine Wellenlinie.

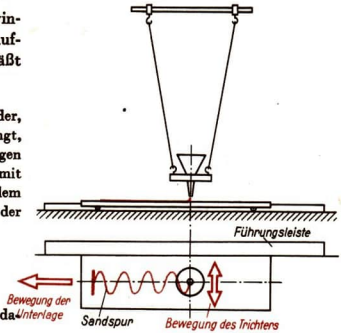


Bild 49/1 Sandpendel

[1] elongatio (lat.): Ausweichung
[2] amplitudo (lat.): die Weite
[3] frequentia (lat.): häufige Wiederholung
[4] n: beliebige Anzahl von Schwingungen, t: dazugehörige Zeit
[5] phasis (griech.): Erscheinung

V Auch mit einer Stimmgabel kann man Schwingungen aufzeichnen. Dazu befestigt man an einer Zinke der Stimmgabel ein dünnes, vorn zugespitztes Federstahlblech. Die Spitze zieht man nach dem Anschlagen der Stimmgabel gleichförmig über eine berußte Glasplatte. Es entsteht wiederum eine Wellenlinie (Bild 50/1).

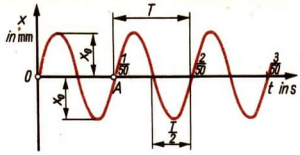


Bild 50/1 Zeichnerische Wiedergabe einer Stimmgabelschwingung

Die Bewegungsrichtung der Stimmgabel soll mit der positiven Richtung der Abszissenachse zusammenfallen. Beträgt die Frequenz der Stimmgabel 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 periodisch mit der Zeit.

Die Elongation einer Schwingung ist eine periodische Funktion der Zeit.

$x = f(t)$

4.2. Grafische Darstellung von Schwingungen

Projiziert man die Bewegung eines Fadenpendels, das einen Kegelmantel beschreibt, mit Hilfe von Lichtstrahlen auf eine Wand, so erkennt man, daß die Bewegung des Kugelschattens der Bewegung eines in einer Ebene schwingenden langen Pendels entspricht (Bild 50/2).

Der Vergleich zwischen der Bewegung eines Fadenpendels und dem Projektionsbild des schwingenden Kegelpendels bietet eine einfache Möglichkeit, den zeitlichen Verlauf einer Schwingung grafisch darzustellen:

Man zeichnet einen Kreis mit der Amplitude x_0 als Radius und teilt seinen Umfang in gleiche Abschnitte (Bild 51/1). Der waagerechte Durchmesser des Kreises wird verlängert und dient als Zeitachse.

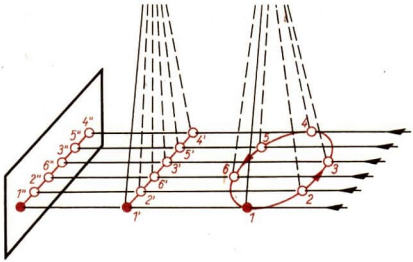


Bild 50/2 Projektion eines Kegelpendels und eines in einer Ebene schwingenden Fadenpendels

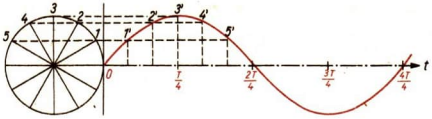


Bild 51/1 Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer Schwingung

Senkrecht dazu werden die Elongationen für verschiedene Zeitpunkte abgetragen. Bei entsprechender Einteilung der Achsen (die Strecke vom Ursprung 0 bis T sei gleich dem Kreisumfang $2\pi x_0$) ergibt die grafische Darstellung ein Weg-Zeit-Diagramm in Form einer Sinuskurve, wie wir es schon bei der Schwingung einer Stimmgabel kennenlernten (vgl. Bild 50/1).

Die grafische Darstellung einer Schwingung ergibt eine Sinuskurve.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Bauen Sie sich ein Sandpendel! Der Trichter ist anfangs mit einem Rundholz von oben zu verschließen und wird mit trockenem Sand gefüllt.
   Der Pendelkörper soll möglichst schwer sein (zusätzliche Beschwerung).
2. Zeichnen Sie nach dem in Bild 51/1 beschriebenen Verfahren den zeitlichen Verlauf einer Schwingung mit $x_0 = 2{,}5$ cm! Teilen Sie den Kreis mit dem Zirkel in 12 gleiche Teile ein!
3. Welche Elongation besitzt ein Pendel zu den Zeitpunkten $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{2}$, 2 s, wenn die Periode 1 s und die Amplitude 20 cm betragen?
   Zum Zeitpunkt Null sei die Elongation Null!

5. Gedämpfte Schwingungen

Bei allen Schwingungen, die bisher betrachtet wurden, setzten wir voraus, daß die Amplituden unabhängig von der Zeit immer gleich groß blieben. Solche Schwingungen nennt man ungedämpfte Schwingungen. Alle im Abschnitt 4.1. beschriebenen Schwingungen sind jedoch genau betrachtet gedämpft.
Die Ursache der Dämpfung ist eine Kraft, die zusätzlich zur rücktreibenden aus der Erdbeschleunigung oder von der Feder herrührenden Kraft am Pendel hemmend in Erscheinung tritt.

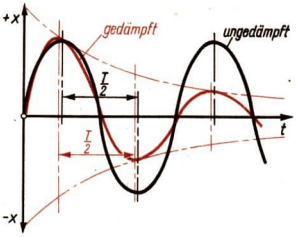


Bild 51/2 Gedämpfte Schwingung

● *Welche zusätzlichen Kräfte können eine mechanische Schwingung dämpfen?*

Schwingungen, deren Amplituden abnehmen, heißen gedämpfte Schwingungen.

Die Dämpfung hat einen wesentlichen Einfluß auf den Schwingungsverlauf, wie man einem Versuch nach Bild 52/1 entnehmen kann.

● *Welchen Einfluß hat die Eintauchtiefe der Dämpfungsscheibe?*

Befindet sich das Pendel vollständig in der Luft, so ist die Dämpfung gering. Die Schwingungsamplitude nimmt nur langsam ab (Bild 52/2a).
Taucht man die Dämpfungsscheibe vollständig in die Flüssigkeit ein, so ist die Dämpfung sehr groß. Das ausgelenkte Pendel kehrt nur ganz langsam in die Ruhelage zurück, ohne diese zu überschreiten. Man bezeichnet diese Art der Bewegung als **aperiodisch**[1]. Es kommt keine Schwingung mehr zustande (Bild 52/2b). Infolge der quantitativen Änderung einer Größe, in diesem Falle der Dämpfung, wird eine Eigenschaft, eine Qualität, geändert, das heißt, es findet keine Schwingung mehr statt.

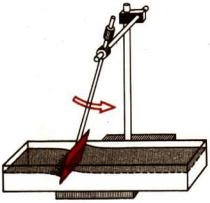


Bild 52/1 Pendel mit Dämpfungsscheibe

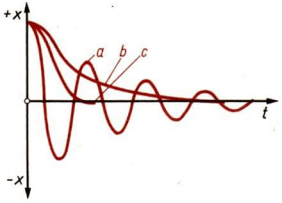


Bild 52/2

Bei einer mittleren Dämpfung, wenn das Pendel nur zum Teil in die Flüssigkeit eintaucht, erfolgt die aperiodische Rückkehr in die Ruhelage am schnellsten. Man spricht dann von dem **aperiodischen Grenzfall** (Bild 52/2c).

● *Welche Flüssigkeiten eignen sich besonders gut zur Dämpfung?*

Versuche, Fragen, Aufgaben

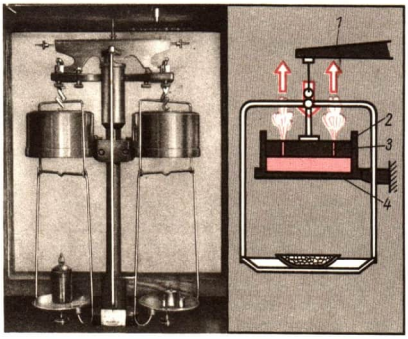
1. Beschreiben Sie die Art der Bewegung, die eine Haustür ausführt, wenn der Türschließer mit einer Öldämpfung versehen ist.
2. Untersuchen Sie die Dämpfung eines vertikalen Federschwingers in Luft, Wasser oder Öl! Befestigen Sie zu diesem Zweck auf dem schwingenden Körper eine Kreisscheibe aus dünnem Blech!
3. Beschreiben Sie die gedämpfte Schwingung unter Berücksichtigung des Energieerhaltungssatzes!

[1] aperiodisch: nicht periodisch

Anwendungsbeispiele zur Dämpfung

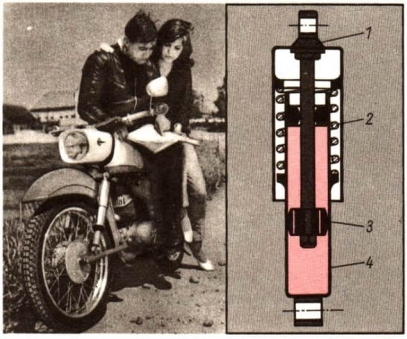
Analysenwaage

Um ein lang währendes Pendeln einer Analysenwaage zu vermeiden, werden die Schwingungen gedämpft. Ein Kolben (2), der am Waagebalken (1) befestigt ist, gleitet mit geringem Spiel in einem Zylinder (4). Es erfolgt eine Luftdämpfung, hervorgerufen durch den Widerstand beim Durchströmen der kleinen Öffnung (3).



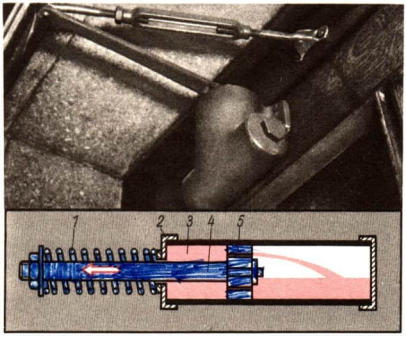
Stoßdämpfer

Durch Unebenheiten in der Fahrbahn werden beim Fahren Stöße verursacht. Beim Stoßdämpfer dämpft das durch den Kolben (3) strömende Öl die Schwingungen des beweglichen Teils (4) gegenüber dem feststehenden Teil (1), während die Feder (2) die Stoßenergie speichert.



Türschließer

Um eine Tür selbsttätig zu schließen, wird beim Öffnen die Feder des Türschließers (1) zusammengedrückt. Damit das Schließen nicht schlagartig erfolgt, ist die hydraulische Dämpfung, bestehend aus Zylinder (2), Ölfüllung (3) und Dämpfungskolben (5) mit Kolbenstange (4), eingebaut.



Erzwungene Schwingungen

Druckluftkompressoren und Druckluftwerkzeuge sind starke Lärmquellen. Deshalb werden diese Maschinen mit besonderen Schall„dämpfern" ausgestattet.
Der entstehende Lärm rührt her von den Schwingungen einzelner Körper (Fensterscheiben, Hauswände, Luftmassen), die durch Druckschwankungen im Auspuff und in den Ansaugkanälen der Kompressoren und Werkzeuge entstehen. Man bezeichnet diese Schwingungen als erzwungene Schwingungen.

1. Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen

Ein Federschwinger kann durch einen einmaligen Anstoß in Schwingungen versetzt werden. Er hat 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.

Ein schwingungsfähiger Körper führt nach einmaligem Anstoß Eigenschwingungen aus. Die dabei auftretende Frequenz heißt Eigenfrequenz f_0.

Eine Erregung des Federschwingers ist auch auf andere Weise möglich (Bild 54/1):
Mit Hilfe einer Morsetaste kann die unter dem Eisenkörper befindliche Spule periodisch ein- und ausgeschaltet werden. Der Eisenkörper wird dadurch im Rhythmus der Erregung angezogen; er führt erzwungene Schwingungen aus.

Die Frequenz einer erzwungenen Schwingung stimmt mit der Erregerfrequenz überein.

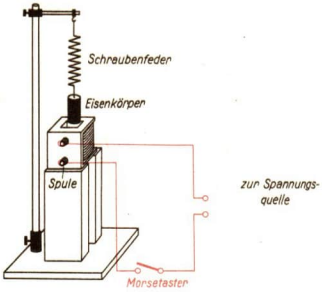


Bild 54/1 Federschwinger mit magnetischer Anregung

2. Die Resonanz

Erregt man einen Federschwinger mit einer gegenüber der Eigenfrequenz kleinen Erregerfrequenz f_E, so ist die Amplitude der Schwingung nur klein. Vergrößert man die Erregerfrequenz, so wird die Amplitude größer. Bei einer bestimmten Frequenz wird die Amplitude am größten. Dies ist der Fall, wenn $f_E \approx f_0$ ist. Bei weiterer Erhöhung der Erregerfrequenz nimmt die Amplitude wieder ab. Das starke Mitschwingen des Federschwingers bei übereinstimmender Eigen- und Erregerfrequenz heißt Resonanz[1]. Der Federschwinger ist in diesem Fall der Resonator.

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

Die Resonanzamplitude ist um so größer, je geringer die Dämpfung ist. Bei fehlender Dämpfung würde die Amplitude immer weiter anwachsen, wenn der Schwinger nicht vorher zerstört würde. Das ist aber stets der Fall. Man spricht dann von einer Resonanzkatastrophe. Sie tritt zum Beispiel ein, wenn ein Sprungbrett im Schwimmbad durch Aufschaukeln bis zum Bruch beansprucht wird.

● *Welche Beispiele zur Resonanz kennen Sie?*

3. Akustische Resonanz

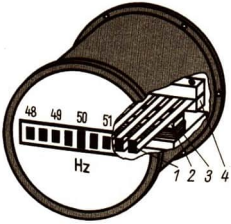
Bild 55/1

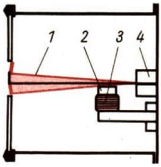
V 10 Resonanz läßt sich auch an Schallschwingungen nachweisen. Nach Bild 55/1 wird ein Glasrohr in einen hohen, mit Wasser gefüllten Zylinder eingetaucht. Die schwingende Stimmgabel dient als Erreger. Durch Heben und Senken der Röhre kann die Länge der einseitig abgeschlossenen Luftsäule geändert werden. Bei einer bestimmten Länge wird der Stimmgabelton sehr laut: Die Luftsäule schwingt mit der Stimmgabel in Resonanz.

Wenn man eine schwingende Stimmgabel mit dem Stiel auf eine Tischplatte aufsetzt, so vernimmt man einen lauteren Ton, als wenn man die Stimmgabel frei in der Hand hält. In diesem Falle wird die Unterlage zu erzwungenen Schwingungen angeregt und die Schallenergie daher von einer größeren Fläche abgestrahlt. Die Dämpfung der Stimmgabel ist jedoch dabei groß, so daß die Stimmgabel schneller zur Ruhe kommt. Es handelt sich bei diesem Beispiel nicht um Resonanz; denn die Eigenfrequenzen der Stimmgabel und der Tischplatte stimmen nicht überein.
Von dieser Schallverstärkung macht man bei vielen Musikinstrumenten Gebrauch. Schwingende Saiten übertragen auf Grund ihrer geringen Masse und kleinen Berührungsfläche die Schwingungsenergie nur sehr schlecht auf die umgebende Luft. Bei allen Saiteninstrumenten werden deshalb die Saiten auf einer hölzernen Unterlage, dem sogenannten Resonanzboden, ausgespannt.

[1] resonare (lat.): widerhallen

Anwendungsbeispiele zu Schwingungen

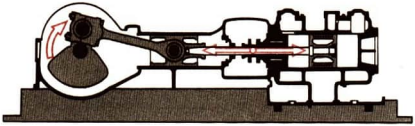




Frequenzmessung

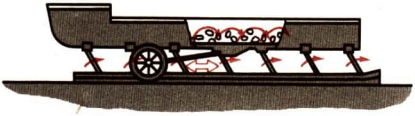
Ein Wechselstrom erzeugt zwischen den Polen eines Elektromagneten ein wechselndes Magnetfeld gleicher Frequenz, das mit dem Zungenfrequenzmesser nachgewiesen werden kann. Er besteht aus einer Reihe elastischer Stahlzungen unterschiedlicher Eigenfrequenz. Bei Resonanz einer bestimmten Zunge kann die entsprechende Frequenz des Wechselstromes abgelesen werden.

1 Zunge, 2 Magnet, 3 Spule, 4 Zungeneinspannstelle



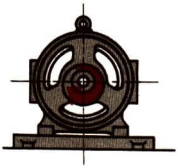
Schwingungen an Maschinen

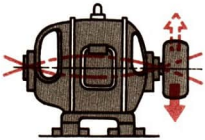
Bei vielen Maschinen wird eine Kreisbewegung in eine Schwingung umgewandelt. Das Schwungrad eines Kompressors bewegt über Kurbelwelle und Pleuelstange den Kolben hin und her, das heißt, der Kolben führt eine Schwingung aus.



Schwingförderrinne

Die Rinne mit dem Fördergut wird vorwärts bewegt und dabei angehoben. Beim Rückgang senkt sich die Rinne, und das Fördergut fliegt infolge der Trägheit jeweils ein kleines Stück weiter vorwärts.





Störende Schwingungen

Die bei vielen Maschinen auftretenden Schwingungen können unter bestimmten Bedingungen schwerwiegende Folgen haben. Stimmt die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz eines Bauteils der Maschine überein, so können durch Resonanz diese Teile so stark zum Mitschwingen angeregt werden, daß sie zu Bruch gehen oder sich die Verbindungsstellen lockern.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Setzen Sie das Hinterrad eines herumgedrehten Fahrrades in sehr schnelle Drehungen! Welche Beobachtung machen Sie? Warum werden vor allem Rennräder zentriert? Wie geschieht das?
2. GALILEO GALILEI schreibt in seinen Untersuchungen über die Pendelschwingungen: „. . . einem ruhenden, noch so schweren Pendel können wir durch bloßes Anblasen eine Bewegung erteilen, und zwar eine recht beträchtliche, wenn wir . . .“ Setzen Sie den Gedankengang fort!
3. Warum sollen Marschabteilungen über leichte Brücken, vor allem über Hängebrücken, nicht im Gleichschritt marschieren?
4. Einer Stimmgabel mit der Frequenz $f = 440$ Hz wird eine Stimmgabel mit der Frequenz $f = 280$ Hz gegenübergestellt und angeschlagen. Erfolgt ein Mitschwingen? Begründen Sie Ihre Antwort!
5. Untersuchen Sie in Ihrem Ausbildungsbetrieb, auf welche Weise die Ausbreitung störender Schwingungen auf die Gebäudeteile vermindert wird!
6. Warum müssen Kfz.-Räder sorgfältig ausgewuchtet sein? Welche Gefahren ergeben sich durch nicht ausgewuchtete Räder?

ZUSAMMENFASSUNG

Die Schwingung ist ein periodischer Vorgang, bei dem sich ständig Energieformen ineinander umwandeln.

Erläutern Sie den Satz am Beispiel eines schwingenden Fadenpendels!

Elongation, Amplitude, Periode, Frequenz und Phase sind Kenngrößen einer Schwingung.

Wie sind diese Kenngrößen definiert?

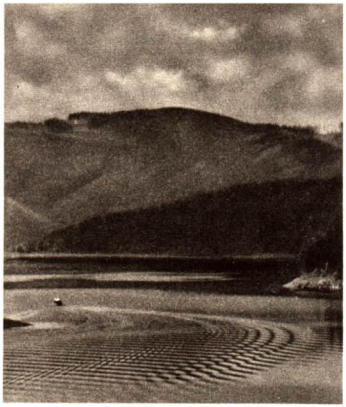
Schwingungen, deren Amplituden abnehmen, heißen gedämpfte Schwingungen.

Welche Voraussetzungen sind notwendig, damit eine Schwingung wenig gedämpft oder ungedämpft verläuft?

Ein schwingungsfähiger Körper wird durch regelmäßige Anstöße in Schwingungen sehr großer Amplitude versetzt, wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des Körpers übereinstimmt (Resonanz).

Welche Bedeutung hat die Resonanz in der Technik?

Grundbegriffe der Wellenlehre



In schneller Fahrt durchschneidet das Motorboot den glatten Wasserspiegel auf der Saaletalsperre. Dabei hinterläßt es weithin sichtbare Wellen. Außer solchen Wasserwellen gibt es noch andere Beispiele für Wellen.
Der Startschuß beim sportlichen Wettkampf dringt durch *Schallwellen* an unser Ohr. *Elektromagnetische Wellen* übertrugen die Bilder der sowjetischen Kosmonauten zur Erde.

1. Entstehung von Wellen

Neben Wasserwellen, Schallwellen und anderen mechanischen Wellen sind vor allem elektromagnetische Wellen von besonderer Bedeutung. Sie können im allgemeinen von unseren Sinnesorganen nicht unmittelbar wahrgenommen werden. Licht- und Wärmewellen bilden eine Ausnahme. Man erklärt deshalb die bei elektromagnetischen Wellen (Lichtwellen, Rundfunkwellen, Röntgenwellen usw.) auftretenden Erscheinungen oft am Beispiel mechanischer Wellen, wobei jedoch zu beachten ist, daß die Wellenvorgänge nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden dürfen. Man benutzt die Erscheinungen der mechanischen Welle nur als Modell. Die allen Wellen gemeinsamen Merkmale und Erscheinungen werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

1.1. Mechanische Kopplung schwingungsfähiger Systeme

Damit ein Schwingungserreger auf einen anderen Körper einwirken kann, muß zwischen beiden eine Verbindung bestehen. Sie müssen miteinander gekoppelt sein.

Beispiel

Hängt man zwei Fadenpendel gleicher Länge nebeneinander auf und stößt das eine an, so bleibt, wie zu erwarten, das andere in Ruhe. Nun werden die Fadenpendel miteinander elastisch verbunden (Bild 59/1). Man bezeichnet eine solche Verbindung als Kopplung. Stößt man jetzt das eine Pendel an, so gerät auch das zweite Pendel in Schwingungen. Die Ampli-

tude des zuerst erregten Pendels nimmt dabei immer mehr ab. Dagegen wird die Amplitude des anderen Pendels größer. Ist das ursprünglich erregte Pendel zur Ruhe gekommen, dann hat die Amplitude des anderen Pendels ihren größten Wert erreicht.
Die Energie des ersten Schwingers (Pendel) ist auf den anderen Schwinger übertragen worden. Danach kehrt sich der Vorgang um, und das erste Pendel beginnt wieder zu schwingen. Die wechselnde Energieübertragung dauert so lange an, bis sich durch Dämpfung die gesamte Schwingungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt hat.

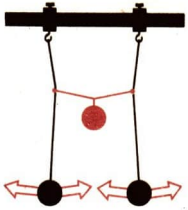


Bild 59/1 Kopplung zweier Fadenpendel

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

Belastet man den Verbindungsfaden mit einem kleinen Wägestück, so wird die Energie auf das andere Pendel in kürzerer Zeit übertragen. Man spricht von fester Kopplung, wenn die Energieübertragung schnell vor sich geht, und von loser Kopplung, wenn sie langsam verläuft. Je weniger elastisch die Verbindung ist, um so fester ist die Kopplung.

Wenn man eine größere Zahl gleich langer Fadenpendel so aufhängt, daß alle Pendel durch gespannte Fäden elastisch gekoppelt sind (Bild 59/2), dann läßt sich an dieser Anordnung erkennen, wie eine Schwingung übertragen werden kann. Wird das Pendel am linken Ende dieser Pendelkette einmalig angestoßen, so führt es um die Ruhelage Schwingungen aus. Durch die Kopplung werden die Schwingungen auf die benachbarten Pendel übertragen; der Schwingungsvorgang wandert von links nach rechts. Die zugeführte Energie wird durch Reibung allmählich in Wärme umgewandelt bzw. auf die umgebende Luft übertragen. Ähnlich verhält sich auch eine Federschwingerkette (Bild 59/3).

Einen Vorgang, bei dem Energie durch die Bewegung gekoppelter Schwinger gleicher Frequenz übertragen wird, bezeichnet man als Welle.

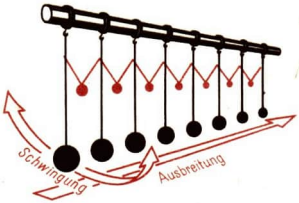


Bild 59/2 Pendelkette zur Erzeugung einer Welle

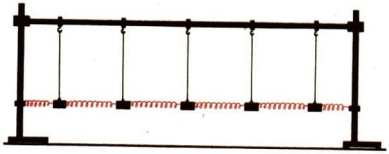


Bild 59/3 Federschwingerkette als Beispiel einer anderen Kopplung

Wird die linke Feder einmalig gespannt oder zusammengedrückt und dann freigegeben, so läuft eine Welle durch die Kette

1.2. Wellenarten

Zwischen den Wellen in den dargestellten beiden Schwingerketten (Pendel, Federschwinger) besteht ein wesentlicher Unterschied:
Die Pendel schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Bild 59/2); bei den Federschwingern fallen dagegen Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung zusammen.
Man unterscheidet deshalb Transversalwellen[1] und Longitudinalwellen[2].

Eine Welle, bei der sich die gekoppelten Schwinger senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle bewegen, nennt man eine Transversal- oder Querwelle.
Eine Welle, bei der sich die gekoppelten Schwinger in der Ausbreitungsrichtung der Welle bewegen, nennt man eine Longitudinal- oder Längswelle.

Ähnliche Vorgänge wie in Schwinger- und Pendelketten treten auch in festen, flüssigen und gasförmigen Körpern auf. Die Schwinger, man nennt sie auch Oszillatoren[3], sind hierbei die kleinsten Teilchen der Stoffe selbst. Zwischen den Molekülen wirken elastische Kopplungskräfte, die die Schwingungen übertragen.
Es kann allgemein gesagt werden: Voraussetzung für das Entstehen einer fortschreitenden Welle ist eine Anzahl von Oszillatoren, die miteinander gekoppelt sind. Ihre Gesamtheit nennt man das Medium[4] der Welle.

In einem Medium entsteht eine fortschreitende Welle dadurch, daß gekoppelte Oszillatoren zeitlich nacheinander gleichartige Schwingungen ausführen.

11

V Schlägt man mit einem Hammer gegen die Endfläche eines Stahlstabs, der an einem Stativ festgeklemmt ist, so läuft eine Longitudinalwelle durch den Stab. Eine vor der anderen Stirnfläche des Stabes aufgehängte Stahlkugel wird weggeschleudert.

Die Vorgänge im Stab können durch einen Modellversuch (Bild 60/1) veranschaulicht werden.
Da die Pendel nicht miteinander gekoppelt sind, entsprechen die im folgenden beschriebenen Vorgänge nur in ihrer äußeren Erscheinung den Longitudinalwellen.
Alle Pendel werden nacheinander angestoßen, so daß eine Stelle durch die Reihe hindurchläuft, an der sich die Pendelkörper zusammendrängen. Ihr folgt eine Stelle, an der der Abstand der Pendelkörper stark vergrößert ist. Es laufen also Verdichtungen und Verdünnungen hintereinander durch die Reihe.

[1] transversus (lat.): quer
[2] longitudo (lat.): Länge
[3] oscillare (lat.): pendeln
[4] medium (lat.): das Mittel

Bild 60/1 Modellversuch zur Longitudinalwelle

1.3. Energieübertragung durch Wellen

Im Jahre 1963 wurde das von der Sowjetunion vorgeschlagene Abkommen über die Einstellung von Kernwaffenversuchen von der Mehrzahl aller Staaten unterzeichnet. Zur Kontrolle über die Einhaltung eines solchen Abkommens sind unter anderem automatische Stationen vorgesehen, die die von einer Atomwaffenexplosion herrührende Erschütterung des Erdballs registrieren können.
Diese Erschütterungen laufen als Druckwellen, deren Ursache die bei der Explosion freiwerdende Energie ist, durch den Erdball und auch durch die Luft.
Im Zentrum der Detonation[1] entsteht ein gewaltiger Überdruck, der sich auszugleichen sucht. Dadurch wird die umgebende Luft komprimiert. Diese Zone hohen Druckes breitet sich mit Schallgeschwindigkeit aus. Auf die Druckwellenfront folgt ein Gebiet geringeren Druckes, die Unterdruckzone.
Noch in großer Entfernung vom Detonationszentrum kommt es durch die Druckwelle zu Zerstörungen. Es gelangen aber nicht etwa Gasteilchen vom Detonationszentrum bis zu diesem Ort. Es wird nur die Energie mit der Welle vom Zentrum aus übertragen.

Mit der Ausbreitung von Wellen ist eine Energieübertragung verbunden.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Welcher Vorgang wird durch einen Versuch nach Bild 61/1 modellmäßig wiedergegeben?
2. Erklären Sie die Begriffe Transversalwelle, Longitudinalwelle, Oszillator, Kopplung!
3. Von zwei Konservenbüchsen werden Deckel und Boden entfernt. Die Büchsen werden einseitig durch gespanntes Pergamentpapier verschlossen. Führen Sie damit einen Versuch nach Bild 61/2 aus.
4. Was beobachten Sie, wenn Sie gegen eine Membran schlagen? Geben Sie eine Erklärung! Welches Merkmal einer Welle fehlt bei einem windbewegten Ährenfeld? Mit welchem Versuch läßt sich der Vorgang vergleichen?

[1] Detonation: Entzündung

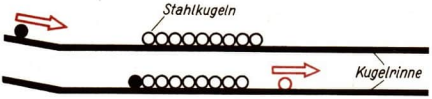


Bild 61/1

Bild 61/2

2. Grafische Darstellung von Wellen

In einer Pendelkette lassen sich Wellen hervorrufen, wenn man das erste Pendel zu Schwingungen anregt (Bild 62/1).
Bild 62/2 zeigt die Pendelkette zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten in der Draufsicht. Es handelt sich gewissermaßen um Momentbilder der Welle in sehr kurzen Zeitabständen.

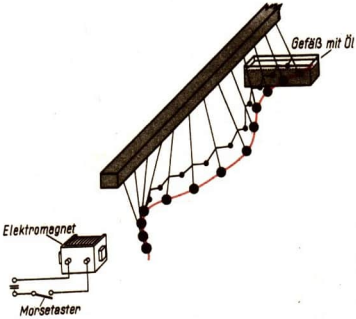


Bild 62/1 Die Pendelkörper bestehen aus Eisenkugeln. Die Anregung erfolgt durch einen Elektromagneten. Damit die Wellen vom anderen Ende der Pendelkette nicht zurückkehren, werden die letzten Pendel stark gedämpft, indem man sie in einem ölgefüllten Gefäß schwingen läßt

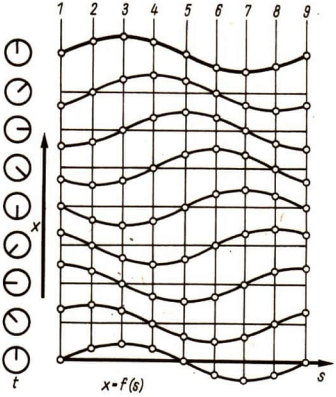


Bild 62/2 zeigt die Pendelkette zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten in der Draufsicht. Es handelt sich gewissermaßen um Momentbilder der Welle in sehr kurzen Zeitabständen. Allen Einzelbildern ist zu entnehmen, daß sich die Oszillatoren auf einer Wellenlinie anordnen, die sinusförmig ist. Diese Wellenlinie verschiebt sich außerdem nach rechts

Jedes Pendel führt eine Schwingung aus, d. h. die Elongation jedes Oszillators ändert sich periodisch mit der Zeit. Vergleicht man weiterhin die Elongationen aller Pendel eines Momentbildes miteinander, so sieht man, daß sich in gleichen Abständen ein bestimmter Schwingungszustand (hinsichtlich Elongation und Richtung) wiederholt. Den verschiedenen Einzelbildern ist außerdem zu entnehmen, daß sich die einzelnen Oszillatoren auf einer Wellenlinie anordnen, die sich nach rechts verschiebt.

Eine Welle ist ein Vorgang, bei dem sich die Elongation der Oszillatoren örtlich und zeitlich periodisch ändert und bei dem Energie übertragen wird.

Wellen lassen sich in einem einzigen, zweidimensionalen Diagramm nicht vollständig darstellen, da die Elongation von zwei anderen Größen abhängt. Meist gibt man Transversalwellen durch Momentaufnahmen zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder.

Wasserwellen könnte man auf den ersten Eindruck hin ebenfalls für Transversalwellen halten. Die Wasserteilchen an der Oberfläche der Flüssigkeit führen jedoch kreisende Bewegungen aus (Bild 63/1), es entstehen *Oberflächenwellen.*

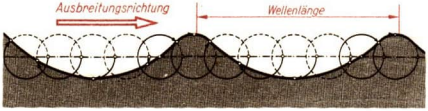


Bild 63/1 Oberflächenwelle im senkrechten Schnitt

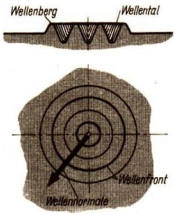


Bild 63/2 Zeichnerische Darstellung einer Oberflächenwelle (Momentbild, vereinfacht)

Bei Transversalwellen erfolgen dagegen die Bewegungen der Teilchen in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Man benutzt Wasserwellen, um bestimmte Gesetzmäßigkeiten darzustellen, die bei allen Wellen auftreten. Bild 63/2 zeigt einen Schnitt durch eine Wasserwelle. Alle Teilchen mit gleichem Abstand vom Erregungszentrum weisen zu einem bestimmten Zeitpunkt der Beobachtung den gleichen Schwingungszustand auf. Die Linien, die phasengleich schwingende Teilchen miteinander verbinden, heißen **Wellenfronten.** Wellenfronten stellt man zeichnerisch dar, indem man sie auf eine Ebene projiziert.
Die auf der Wellenfront errichtete Senkrechte gibt die Richtung an, in der sich die Welle ausbreitet. Sie heißt **Wellennormale.**

Auf einer Wellenfläche oder in 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.

3. Kenngrößen einer Welle

Die Wellen werden ebenso wie die Schwingungen durch bestimmte Größen charakterisiert. Es sind dies die *Frequenz*, die *Amplitude*, die *Wellenlänge* und die *Ausbreitungsgeschwindigkeit.*
Die **Frequenz** f einer Welle ist gleich der Schwingungsfrequenz der einzelnen Teilchen. Sie wird ebenfalls in Hertz gemessen.

Die **Amplitude** x_0 einer Welle ist die größte Elongation der einzelnen schwingenden Teilchen.

Mit der Entfernung vom Entstehungsort nimmt die Amplitude der fortschreitenden ebenen Welle allmählich ab. Die Abnahme ist von der Dämpfung abhängig. Bei großer Dämpfung nimmt die Amplitude der Welle sehr schnell ab.

Die Amplitude ist ein Kennzeichen der übertragenen Energie. Eine große Amplitude der fortschreitenden Welle bedeutet die Übertragung eines großen Energiebetrages.

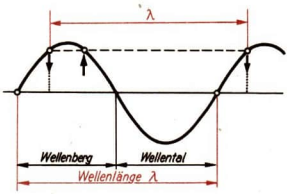


Bild 64/1 Wellenlänge einer fortschreitenden Welle

Die **Wellenlänge** λ bezeichnet den Abstand zweier benachbarter Punkte in Ausbreitungsrichtung der Welle, die sich im gleichen Schwingungszustand befinden (Bild 64/1). Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** c gibt an, wie schnell sich eine bestimmte Phase (eine **Wellenfront**) im Medium ausbreitet. Beachten Sie auch hier: Nicht die Oszillatoren bewegen sich fort, sondern der Schwingungszustand wird übertragen!

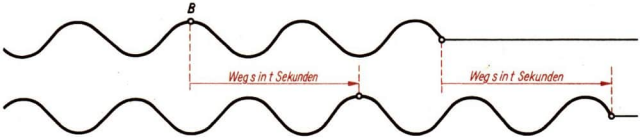


Bild 64/2 Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle

Wie bei der Bestimmung der Geschwindigkeit eines gleichförmig bewegten Fahrzeuges stellt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit dadurch fest, daß man die Wegstrecke s mißt, um die sich ein bestimmter Schwingungszustand in der Zeit t verschiebt, und den Quotienten aus s und t bildet (Bild 64/2):

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

4. Gesetz der Wellenausbreitung

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

Im Bild 62/2 verschiebt sich die Wellenfront in der Zeit zwischen der ersten und letzten Momentaufnahme um eine Wellenlänge nach rechts. Diese Zeit ist gleich der Schwingungs-

dauer T jedes Teilchens des Mediums. Man erkennt das daran, daß die Momentbilder 1 und 9 völlig übereinstimmen. Ersetzt man in der Gleichung $c = \frac{s}{t}$ die beliebige Strecke s durch die Strecke λ, so ist die Zeit t gleich der Schwingungsdauer T:

$c = \frac{\lambda}{T}$. Mit $T = \frac{1}{f}$ 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.

Beispiele

1. Bei einem Wellengerät nach JULIUS (Bild 65/1) beträgt die Wellenlänge 25 cm. Ein angestoßener Querstab führt 8 Schwingungen in 5 Sekunden aus. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit?

Gegeben:

$\lambda = 25$ cm

$t = 5$ s

$n = 8$

Gesucht:

Ausbreitungsgeschwindigkeit c in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

Lösung:

$c = \lambda \cdot f$

$c = \lambda \cdot \frac{n}{t}$

$c = 25\ \text{cm} \cdot \frac{8}{5}\ \text{s}$

$c = 40\ \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wellengerät beträgt 40 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

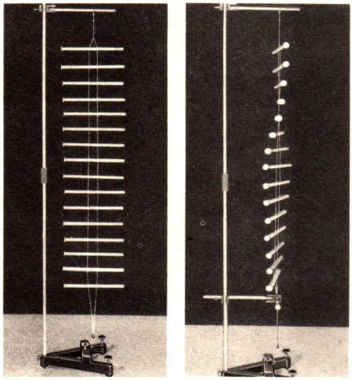


Bild 65/1 Wellengerät nach JULIUS
Die Querstäbe sind mit den Schnüren verknüpft und tragen an ihren Enden je eine kleine Scheibe. Jeder Querstab führt Drehschwingungen aus, wenn er seitlich angestoßen wird. Durch die Kopplung werden alle Querstäbe in Schwingungen versetzt

2. Welche Frequenz hat eine Ultraschallwelle[1] im Wasser, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit 1460 $m \cdot s^{-1}$ und die Wellenlänge 24 mm betragen?

Gegeben:	*Lösung:*
$c = 1460\ m \cdot s^{-1}$	$f = \frac{c}{\lambda}$
$\lambda = 24 \cdot 10^{-3}\ m$	$f = \frac{1460\ m}{24 \cdot 10^{-3}\ s \cdot m}$
Gesucht:	$f \approx 60{,}8 \cdot 10^{3}\ s^{-1}$
Frequenz f in kHz	$\underline{\underline{f \approx 60{,}8\ kHz}}$

Die Welle hat eine Frequenz von 60,8 kHz.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Einem Kinde ist ein Ball in einen Teich gefallen. Es wirft Steine hinter dem Ball ins Wasser. Warum wird der Ball auf diese Weise im allgemeinen nicht an das Ufer gelangen?
2. Wie groß ist die Wellenlänge einer Oberflächenwelle, deren Frequenz 13,5 Hz beträgt und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit zu 23 $cm \cdot s^{-1}$ bestimmt worden ist?
3. Welche Frequenz hat eine Schallwelle, deren Wellenlänge in Luft 77 cm beträgt? ($c_{Luft} \approx 340\ m \cdot s^{-1}$).
4. Durch ein Erdbeben in Chile wurde 1922 im Pazifik eine Flutwelle erzeugt, bei der $c = 750\ km \cdot h^{-1}$ und $T = 30$ min betrugen. Welche Wellenlänge hatte die Flutwelle?

ZUSAMMENFASSUNG

In einem Medium entstehen Wellen, wenn die Oszillatoren im Erregungszentrum durch ständige Energiezufuhr zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden.

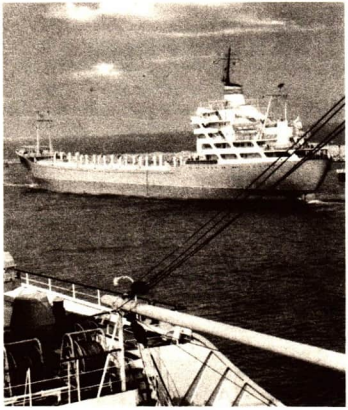
Welche Wellenarten können auftreten und wodurch unterscheiden sie sich?

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

Welche Größen ändern sich beim Übergang einer Welle von einem Medium in ein anderes (vgl. Abschnitt „Brechung einer Welle", Seite 70)?

[1] Ultraschall: Schallwellen, deren Frequenzen oberhalb von 20 kHz liegen und daher vom menschlichen Gehör nicht wahrgenommen werden. Ultraschallwellen werden für viele technische Zwecke genutzt.

Die Ausbreitung von Wellen



Mit der modernen Technik erleichtert sich der Mensch die Arbeit immer mehr. Früher mußte der Lotse mit dem Handlot[1] die Fahrwassertiefe bestimmen, heute dagegen benutzt man auf allen modernen Schiffen dazu das Echolot. Ein vom Schallgeber erzeugter Ultraschallwellenimpuls durchläuft das Wasser, wird am Meeresboden reflektiert und vom Empfänger aufgenommen. Das Schiff braucht dabei seine Fahrgeschwindigkeit nicht zu mindern. Die Reflexion tritt bei allen Wellenarten auf.

1. Das Huygenssche Prinzip

Alle wesentlichen Fortschritte unserer Naturerkenntnis sind so entstanden, daß bestimmte Vorstellungen über die Erscheinungen entwickelt wurden. Eine solche Hypothese[2] war beispielsweise anfangs die Annahme, daß die Wärme nichts anderes ist als die Bewegung der kleinsten Teilchen eines Körpers.
Die Hypothese dient als Richtschnur für weitere Überlegungen und für den Aufbau von Versuchsreihen. Sie nimmt größere Wahrscheinlichkeit an, wenn sie durch die Versuchsergebnisse immer wieder bestätigt wird. Besteht kein Zweifel mehr an der Richtigkeit einer solchen Annahme, so wird die Hypothese zur Theorie. Das ist bei der Wärmebewegung der Fall. Wir sprechen daher von der kinetischen Wärmetheorie. Stehen jedoch einzelne Versuche im Widerspruch zur Annahme, so muß die Hypothese geändert oder sogar fallengelassen werden.

Die Reflexion, die Brechung und andere Erscheinungen, die bei der Ausbreitung von Wellen auftreten können, lassen sich mit Hilfe einer Theorie erklären, die der bedeutende niederländische Physiker CHRISTIAN HUYGENS schon vor 300 Jahren entwickelt hat. HUYGENS stellte 1678 folgende Behauptung auf:

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

[1] Lot: Leine mit Knoten in bestimmten Abständen, die mit einem Bleistück ins Wasser gelassen und nach dem Auftreffen auf dem Grund schlaff wird.
[2] Hypothese: unbewiesene wissenschaftliche Annahme

So entstehen beispielsweise an der äußersten Linie, die eine fortschreitende Welle erreicht, in jedem Augenblick unzählig viele solcher Elementarwellen. Diese treten aber nicht einzeln in Erscheinung. Die Elementarwellen löschen sich teilweise aus und setzen sich zu einer gemeinsamen Wellenfront zusammen. Das zeigt folgender Versuch:

V 12
In einer Wellenwanne wird eine Kreiswelle hervorgerufen. Das Erregungszentrum ist von einem Ring umgeben, der mehrere Öffnungen besitzt. Aus jeder Öffnung treten Wellen heraus. Sie überlagern einander so, daß sie in einer bestimmten Entfernung vom Ring wieder zu einer gemeinsamen Wellenfront verschmelzen. Diese neue, aus den Elementarwellen entstandene Wellenfront ist identisch[1] mit der Wellenfront, die ohne Behinderung durch den Ring fortwandern würde (Bild 68/1).

Bild 68/1 Zusammensetzung von Elementarwellen zu einer neuen Frontwelle

Die Huygenssche Erklärung der Wellenausbreitung gilt für transversale und longitudinale Wellen. Daher lautet die grundlegende Theorie der Wellenlehre, das Huygenssche Prinzip:

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

Christian Huygens. In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts verschob sich das Zentrum der wissenschaftlichen Entwicklung von Italien nach Westeuropa (England, Frankreich, Niederlande). Das aufstrebende Bürgertum hatte in diesen Ländern bereits wichtige politische und ökonomische Machtpositionen inne und war sehr daran interessiert, den Handel und die Schiffahrt zu fördern und die Manufakturen zu erweitern.
Auch die Stellung der Wissenschaftler in der Gesellschaft änderte sich. Waren sie vorher vor allem Universitätslehrer oder Hofmathematiker, Hofastronomen usw. gewesen, so traten jetzt an ihre Stelle Angehörige freier Berufe, wie Advokaten und Geistliche, und Landbesitzer, die oft über ein bedeutendes Vermögen verfügten. Zu ihnen gehörte auch Christian Huygens (Bild 68/2).
Bekannt wurde Huygens durch seine Arbeiten auf optischem und astronomischem Gebiet, vor allem durch seine

Bild 68/2 Christian Huygens

[1] identisch: übereinstimmend, völlig gleich

Entdeckungen des Saturnringes und eines Saturnmondes. 1665 wurde HUYGENS als Mitglied an die neu gegründete Akademie der Wissenschaften nach Paris berufen, wo er bis 1681 blieb. In dieser Zeit entstanden seine wichtigsten Schriften. Bereits 1657 hatte HUYGENS die Pendeluhr erfunden. 1690 erschien „Traité de la lumière" (Abhandlung über das Licht). In diesem bereits 1678 verfaßten Buch formulierte HUYGENS das nach ihm benannte Huygenssche Prinzip: „Hinsichtlich der Fortpflanzung dieser Wellen ist ... zu bedenken, daß jedes Teilchen des Stoffes, in welchem eine Welle sich ausbreitet, ... seine Bewegung ... allen übrigen davon abgibt, welche es berühren ... Daher muß sich um jedes Teilchen eine Welle bilden, deren Mittelpunkt dieses Teilchen ist."
Die sehr klaren und einfachen Gedankengänge HUYGENS' bilden noch heute in anderer Formulierung die beste Modellvorstellung und theoretische Grundlage für viele Wellenerscheinungen. Mit Recht gilt daher HUYGENS, der 1695 verstarb, neben NEWTON und LEIBNIZ als einer der bedeutendsten Wissenschaftler des 17. Jahrhunderts.

2. Reflexion einer Welle

Mit Hilfe des Huygensschen Prinzips läßt sich die Reflexion von Wellen erklären (Bild 69/1):

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 nach allen Seiten um die Strecke λ ausgebreitet. Die fortschreitende Wellenfront erreicht dann den Punkt C, um den eine weitere Elementarwelle entsteht. Der Radius der Wellen um A und B beträgt zu diesem Zeitpunkt $2 \cdot \lambda$ beziehungsweise λ. 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 Frontwelle. Auf diese Weise entsteht die reflektierte Wellenfront.

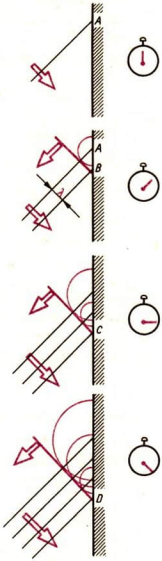


Bild 69/1 Konstruktion der reflektierten Wellen mit Hilfe von Elementarwellen

Zwischen der Richtung der einfallenden und der reflektierten Wellenfront bestehen gesetzmäßige Zusammenhänge. Aus Bild 70/1 ist zu erkennen, daß die einfallende und die reflektierte Wellenfront den gleichen Winkel mit dem ebenen Hindernis einschließen. Es ist üblich, die Gesetze der Reflexion unter Verwendung der Begriffe Wellennormale und Einfallslot darzustellen.
Die **Wellennormale** gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an; sie steht senkrecht auf der Wellenfront. Das **Einfallslot** ist die im Auftreffpunkt der Wellennormale auf dem ebenen Hindernis errichtete Senkrechte.

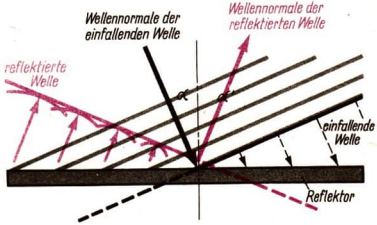


Bild 70/1 Schematische Darstellung zum Reflexionsgesetz. Der Reflexionswinkel α' ist gleich dem Einfallswinkel α

Die Richtung der auftreffenden Welle wird durch den Einfallswinkel α festgelegt, den man zwischen dem Einfallslot und der Wellennormale mißt (Bild 70/1). Den vom Einfallslot und der Wellennormale der reflektierten Welle gebildeten Winkel nennt man Reflexionswinkel α'. Beide Winkel sind gleich groß.

Woher ist Ihnen diese Gesetzmäßigkeit der Reflexion schon bekannt?

Es ergibt sich das Reflexionsgesetz:

Bei der Reflexion einer ebenen Welle an einem ebenflächigen Hindernis ist der Reflexionswinkel α' gleich dem Einfallswinkel α.

Ein Beispiel, wie man das Reflexionsgesetz anwenden kann, zeigt folgender Versuch:

V 13

Man legt eine tickende Taschenuhr auf den Boden eines langen Glaszylinders (Bild 70/2). Hält man über die Öffnung eine glatte Scheibe, so kann man in einem ruhigen Raum den Schall auch seitlich wahrnehmen.

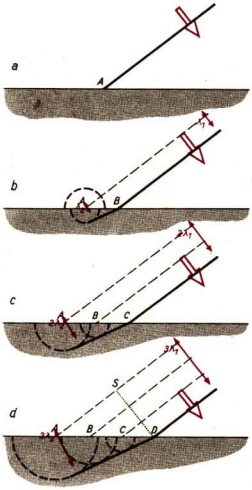
Bild 70/2

3. Brechung einer Welle

Das Huygenssche Prinzip ermöglicht auch eine Erklärung der Brechung. Um zu vereinfachen, wird die Darstellung auf eine einzige Wellenfront beschränkt (Bild 71/1).

Die Wellenfront trifft im Punkte A auf die Grenzlinie zwischen zwei Medien (Bild 71/1a). Um A entsteht eine neue Elementarwelle, die jedoch in beiden Medien eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hat.
Der Radius der gezeichneten Welle ist daher im wellenmäßig dichteren Medium kleiner als im wellenmäßig dünneren Medium. Bei weiterem Vorrücken der einfallenden Wellenfronten entstehen um jeden Punkt der Grenzlinie Elementarwellen.
In den Bildern 71/1c und 71/1d sind die Elementarwellen im wellenmäßig dünneren Medium nicht mitgezeichnet worden, um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten.

Bild 71/1 Konstruktion der gebrochenen Welle mit Hilfe von Elementarwellen beim Übergang vom wellenmäßig dünneren zum wellenmäßig dichteren Medium



Die Elementarwellen im wellenmäßig dichteren Medium setzen sich zu einer gemeinsamen Frontwelle zusammen. Diese bleibt gegenüber dem Teil zurück, der im wellenmäßig dünneren Medium verläuft. Die Wellenfront weist infolgedessen an der Grenzlinie einen Knick auf.

In einer Wellenwanne kann man beobachten, daß Wellen mit geradlinigen Wellenfronten, die aus dem Bereich des tiefen Wassers kommen und schräg auf die Grenzlinie zwischen tiefem und flachem Wasser treffen, beim Übertritt in das Flachwassergebiet aus ihrer Richtung abgelenkt werden. Die Richtungsänderung bezeichnet man als Brechung.
Im flachen Wasser macht sich der Einfluß des Grundes auf die Wasserwellenbewegung hemmend bemerkbar. Die Wasserwellen haben hier eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit als im tiefen Wasser. Das Medium, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit größer ist, wird wellenmäßig dünner genannt. Im wellenmäßig dichteren Medium breitet sich die Welle langsamer aus (vgl. die folgende Tabelle).

Tabelle 3: Ausbreitungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien

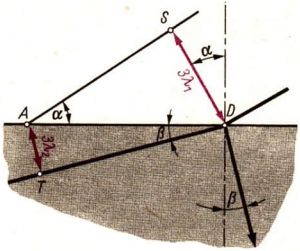
Wellenart	Medium ist wellenmäßig	
	dichter (geringere Geschwindigkeit)	dünner (größere Geschwindigkeit)
Oberflächenwellen	Wasser, flach Wasser von 4 °C Petroleum	Wasser, tief Wasser von 20 °C Wasser
Raumwellen	Luft von 0 °C Kohlendioxid	Luft von 20 °C Luft

Ändert sich in der Gleichung $c = \lambda \cdot f$ die Ausbreitungsgeschwindigkeit c, so müssen sich auch die Größen auf der rechten Seite der Gleichung ändern. Aus Versuchen entnimmt man, daß die Frequenz f konstant bleibt, während sich λ ändert.

● *Woran erkennt man das in Bild 71/1?*

Die für Wellen charakteristische Größe ist demnach die Frequenz.

Bild 73/1 Ableitung des Brechungsgesetzes



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 Wellengeschwindigkeit. 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.

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

Hier haben wir ein Beispiel dafür, wie man ohne Experiment ein Naturgesetz finden kann. Aus drei als richtig angenommenen oder als richtig erkannten Voraussetzungen (Huygenssches Prinzip, verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien, Grundgesetz der Wellenlehre) wird durch die angeführten Überlegungen das Brechungsgesetz abgeleitet. Solches Vorgehen nennt man theoretische Ableitung; es wird häufig in der Wissenschaft benutzt. Die theoretischen Überlegungen müssen nicht immer – wie in unserem Fall – zu richtigen Ergebnissen führen. Deshalb muß man die Ergebnisse (nicht jeden Schritt der Überlegung) in der Praxis, d. h. am Experiment überprüfen. Stimmen Ergebnis von theoretischer Ableitung und Experiment nicht überein, so muß man jeden logischen Schritt der Ableitung kontrollieren, und wenn kein Fehler zu finden ist, die Voraussetzungen überprüfen. Es kann sein, daß in den Voraussetzungen etwas steckt, was uns bisher noch nicht bewußt ist, das Ergebnis aber beeinflußt. Als Beispiel sei hier erwähnt, daß wir in dem Huygensschen Prinzip, wie wir es benutzten, die Annahme vorausgesetzt haben, daß sich zwei Wellensysteme so überlagern, daß keines das andere irgendwie in seiner Ausbreitung stört. Das ist eine Annahme, die bei genauerem Hinsehen gar nicht selbstverständlich ist, sich aber als richtig erwiesen hat.

4. Beugung einer Welle

Nach dem Huygensschen Prinzip breiten sich Wellen hinter einem Hindernis auch in das abgeschirmte Gebiet aus (Bild 74/1). Von der Kante des Hindernisses gehen die Elementarwellen aus, die sich kreisförmig, also auch in das abgeschirmte Gebiet hinein, aus-

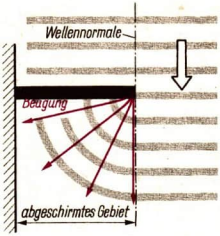


Bild 74/1 Beugung an einer Kante

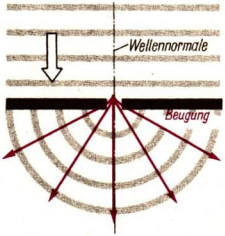


Bild 74/2 Beugung an einem Spalt

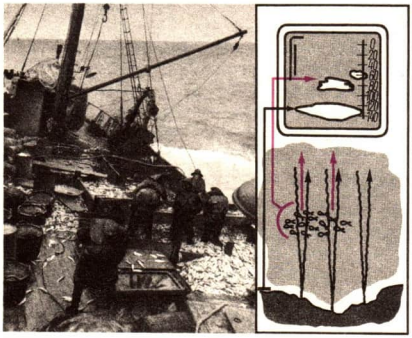
breiten. Diese Erscheinung nennt man Beugung. Sie tritt stets dann auf, wenn eine Welle an einem scharf begrenzten Hindernis vorbeiläuft oder eine sehr schmale Öffnung durchläuft (Bild 74/2).

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

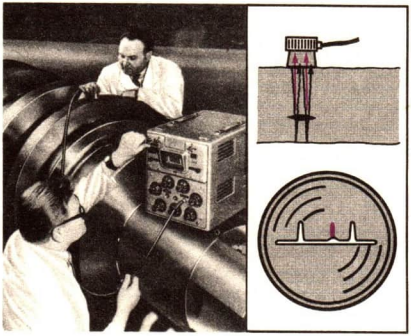
Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Das Echolotgerät eines Schiffes registriert eine Gesamtlaufzeit des Ultraschallimpulses von 0,04 s. Wie groß ist die Wassertiefe? (Die Breite des Schiffes wird vernachlässigt, die Schallgeschwindigkeit in Wasser beträgt $1460\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.)
2. Erklären Sie die Werkstoffprüfung mit Hilfe des Ultraschallverfahrens!
3. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Sprachrohres!
4. Warum müssen international anzuerkennende Schwimmrekorde in Schwimmbecken mit vorgeschriebener, gleichmäßiger Wassertiefe geschwommen werden?
5. Welche Wellenlänge hat eine Wasserwelle der Frequenz 13 Hz in tiefem Wasser, in dem sie sich mit einer Geschwindigkeit von $23\ \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$ fortbewegt? Welche Wellenlänge hat diese Welle nach dem Übertritt in ein Flachwassergebiet bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von $20\ \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$?
6. Warum ändern Wasserwellen an den Ufern von Teichen und Flüssen ihre Richtung?
7. Wie groß ist das Brechungsverhältnis beim Übergang von Schallwellen aus der Luft in Kohlendioxid?
   ($c_{\mathrm{Luft}} = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, $c_{\mathrm{CO_2}} = 258\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$).
8. Zeichnen Sie einen Kreis mit dem Radius 50 mm als Momentbild einer Kreiswelle! Legen Sie um eine größere Anzahl von Punkten auf der Peripherie kleine Kreise mit dem Radius 10 mm als Bilder der Elementarwellen! Zeichnen Sie ohne Hilfsmittel die Frontwelle!
9. Untersuchen Sie an Schallwellen die Beugung hinter einem Hindernis (Hausecke, Türspalt und Heuschober).

Anwendungsbeispiele zum Ultraschall



In der Fischerei wird zum Aufsuchen von Fischschwärmen der Echograf benutzt. Auch hier dient ein Ultraschall-Impuls zur Aufzeichnung auf dem Bildschirm. Durch die Verwendung dieses Gerätes wird die Arbeitsproduktivität im Fischereiwesen gesteigert.



Bei der Ultraschall-Werkstoffprüfung wird auf Grund der Reflexion und der Laufzeit des Ultraschall-Impulses festgestellt, ob sich im Werkstück reflektierende Stellen befinden. Diese Stellen sind meist Fehlerquellen im Werkstoff. Der erste Zacken auf dem Bildschirm stammt vom ausgesendeten Impuls, der letzte Zacken (rechts) stammt von dem an der Werkstückgegenseite reflektierten Impuls, der rot gezeichnete Zacken ist durch Reflexion an einer Fehlerstelle entstanden.

5. Interferenz

Bei Großveranstaltungen werden oft mehrere Lautsprecher aufgestellt. Trotzdem gibt es Stellen, an denen man die von den Lautsprechern ausgestrahlten Schallwellen nur sehr schlecht hören kann. An solchen Stellen kommt es zu einer Überlagerung der Schallwellen, die von zwei verschiedenen Punkten (Lautsprechersäulen) ausgehen.

5.1. Interferenz von Oberflächenwellen

Ähnliche Beobachtungen über das Verhalten von Wellen kann man machen, wenn man das Wellengebiet hinter zwei Motorbooten betrachtet. Die von den Booten ausgehen-

den Wellen bilden durch Überlagerung Gebiete mit sehr unterschiedlichen Amplituden der Oberflächenwellen (Bild 76/1).
Man bezeichnet diese Überlagerung zweier Wellensysteme als Interferenz.
Im engeren Sinne versteht man unter Interferenz die zur Auslöschung führende Überlagerung von Wellen.

Bild 76/1 Interferenz von Oberflächenwellen

14

V Wenn man die Wasseroberfläche in einer Wellenwanne gleichzeitig an zwei Stellen periodisch anstößt, entstehen Kreiswellen, die sich gleichmäßig ausbreiten und dabei überlagern. Das Ergebnis zeigt Bild 76/2.

Die dunkel scheinenden Wellenfronten sind dabei von Streifen ruhigen Wassers durchzogen. Zwischen den Streifen ruhigen Wassers liegen Gebiete mit kräftiger Wellenbewegung. Dort überlagern sich Wellenberge bzw. Wellentäler beider Wellensysteme bzw. Wellentäler.
Die zu beobachtenden Streifen ruhigen Wassers heißen *Interferenzstreifen*. Hier trifft ein Wellenberg des einen Systems mit einem Wellental des anderen Systems zusammen.

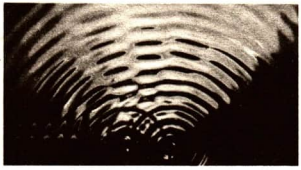


Bild 76/2

5.2. Reflexion von Seilwellen am festen und am losen Ende — Stehende Wellen

Ein besonders einfaches Beispiel von Interferenz kann man an Seilwellen beobachten.
Ein Seil wird an einem Wandhaken befestigt, das freie Ende mit einer Hand gefaßt und ruckartig einmal auf und nieder bewegt. Dadurch entsteht ein Wellenberg, der durch das Seil zur Wand läuft. Dort wird er als Wellental reflektiert; es tritt Phasenumkehr auf. Man bezeichnet einen solchen Reflexionsvorgang als Reflexion am festen Ende.
Wird das Seil unter Zwischenschaltung eines langen dünnen Fadens an der Wand befestigt, so tritt bei der Reflexion keine Phasenumkehr auf. Das Seil kann ausschwingen, so daß der Wellenberg als Wellenberg reflektiert wird. Man spricht von einer Reflexion am losen Ende.

Bei periodischer Bewegung des freien Seilendes entsteht auf Grund der Überlagerung der hinlaufenden und der reflektierten Wellen eine besondere Schwingungsform (Bild 76/3). Im gleichen Abstand sind Stellen vorhanden, die sich ständig in Ruhe befinden. Dazwischen befinden sich Stellen maximaler Amplitude.

Bild 76/3 Erzeugung einer stehenden Seilwelle

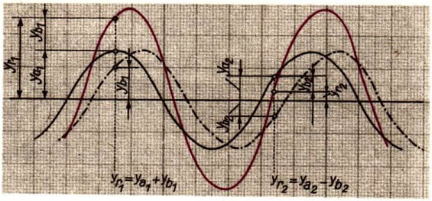


Bild 77/1 Zeichnerische Darstellung der Überlagerung zweier Wellen. Welle I Vollstrich, Welle II strichpunktiert, resultierende Welle rot gezeichnet

Im Gegensatz zu einer fortschreitenden Seilwelle bezeichnet man eine solche Welle als *stehende Welle.* Stehende Wellen sind bei allen Wellenarten möglich.
Die ständig in Ruhe bleibenden Stellen heißen *Schwingungsknoten*, die Stellen maximaler Amplitude nennt man *Schwingungsbäuche.*

Die Überlagerung zweier Wellen, wie sie hier auftritt, stellt man grafisch so dar, daß man die Elongationen an jeder Stelle geometrisch addiert (Bild 77/1).
An jeder Stelle ist dabei die Summe bzw. die Differenz der Einzelelongationen zu bilden, je nachdem, ob die Einzelwellen an der betreffenden Stelle in gleicher oder in entgegengesetzter Richtung schwingen. Die Verbindungslinie der sich durch Überlagerung ergebenden Ausschläge heißt die resultierende Welle.

Bei der stehenden Welle haben die hinlaufende und rücklaufende Welle gleiche Wellenlänge und gleiche Amplitude. Die Überlagerung läßt sich in einer Reihe von Momentbildern darstellen (Bild 77/2).

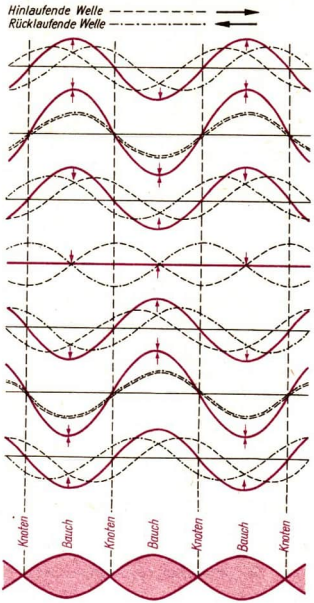


Bild 77/2 Zeichnerische Darstellung einer stehenden Welle

Von Bild zu Bild ist jede der beiden Teilwellen um eine Achtelwellenlänge weitergeschoben, und zwar die eine nach links, die andere nach rechts. Auf der Zeichnung sieht man, daß die resultierende Welle überhaupt nicht fortschreitet. Der Abstand zweier Knoten ist konstant und beträgt jeweils $\frac{\lambda}{2}$

6. Die Bedeutung der Wellenlehre

In den voranstehenden Abschnitten haben Sie an vielen Beispielen und Modelldarstellungen die Grundbegriffe der Wellenlehre kennengelernt. Die Bedeutung dieser Gesetzmäßigkeiten und Erscheinungen geht jedoch weit über das Gebiet der mechanischen Schwingungen und Wellen hinaus. So lassen sich viele optische und elektrische Erscheinungen mit Hilfe der Wellenlehre erklären.

Die Untersuchung mechanischer Wellen ist für verschiedene technische und wissenschaftliche Zwecke besonders wichtig.
In der Bau- und Raumakustik sucht man beispielsweise nach immer neuen Möglichkeiten, um die durch Schallwellen hervorgerufene Lärmbeeinflussung in Arbeits- und Wohnräumen zu vermindern bzw. die Schallwirkung von Musik und Sprache in Konzert-, Theater- und Vortragsräumen zu verbessern. Der Lärmbekämpfung muß besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, weil dauernder Lärm das Nervensystem der Menschen schädigt und damit die Arbeitskraft herabsetzt.
Neben direkter Dämpfung an der Schallquelle selbst werden in lärmerfüllten Räumen vor allem schallschluckende Wände und Decken eingebaut. Durch schallschluckende Stoffe und eine entsprechende architektonische Gestaltung der Räume läßt sich in Kinos, Konzertsälen usw. eine unerwünschte Reflexion (Nachhall) vermeiden und dadurch die Akustik der Räume verbessern.

● *Betrachten Sie unter diesem Gesichtspunkt einmal einen Kinosaal!*

Mit Hilfe von Ultraschall werden Emulsionen von Stoffen hergestellt, die sich sonst kaum emulgieren lassen. Bei der Reinigung von verschmutzten Gegenständen hilft der Ultraschall ebenfalls, die Schmutzteilchen abzulösen, ähnlich wie beim Löten von Aluminium die sich bildende Oxidhaut abgelöst wird. Durch Ultraschall-Erosion ist es möglich, Hartmetalle und metallkeramische Werkstoffe zu bearbeiten. In der Heilkunde wird der Ultraschall zur Behandlung von Nervenentzündungen und Gelenkerkrankungen benutzt.
Im Schiffbau müssen die Gesetzmäßigkeiten der Wellenlehre ebenfalls berücksichtigt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

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

Welcher Zusammenhang besteht zwischen einer Wellenfront und den durch diese hervorgerufenen Elementarwellen?

Jeder Punkt, den eine Wellenfront erreicht, ist Ausgangspunkt einer neuen Welle. Diese Elementarwellen setzen sich zu einer gemeinsamen Frontwelle zusammen.

Welcher Unterschied besteht zwischen den Elementarwellen und der Wellenfront?

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

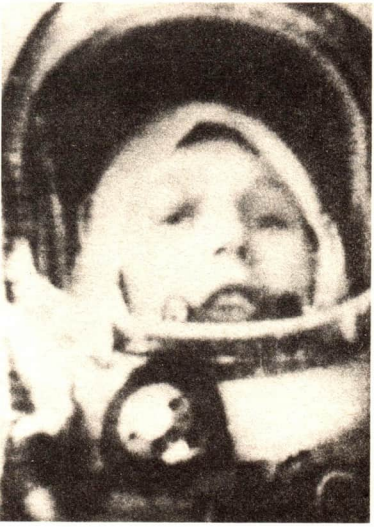
Was ist eine Wellennormale?

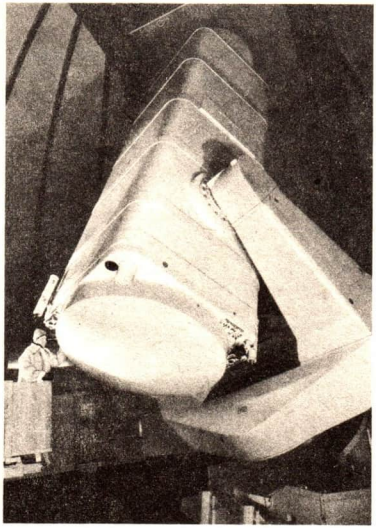
An der Grenzfläche zwischen zwei Medien von wellenmäßig unterschiedlicher Dichte werden Wellen gebrochen.

Welcher Zusammenhang besteht zwischen Brechung und Reflexion einer Welle?

Die Wellennormale wird an scharf begrenzten Hindernissen gebeugt.

Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Elementarwellen und der Beugung?





Elektromagnetische Wellen
Hertzsche Wellen – Lichtwellen

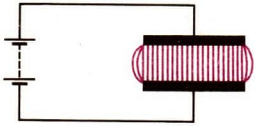
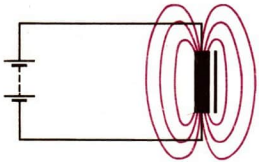
Seit Jahrhunderten stellten die Forscher die Frage nach der Natur des Lichts, und es dauerte lange, bis man erkannte, daß das Licht Welleneigenschaften besitzt. Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Hertzschen Wellen (Funkwellen) und die Röntgenstrahlen entdeckt. All diesen Erscheinungen ist gemeinsam, daß sie Eigenschaften elektromagnetischer Wellen zeigen, die sich nur durch ihre Wellenlänge voneinander unterscheiden. Der Anwendungsbereich der Hertzschen Wellen in Technik und Forschung ist außerordentlich vielseitig. Mit ihrer Hilfe war es möglich, Bilder von der Rückseite des Mondes zur Erde zu funken, und auch das historische Gespräch der ersten Kosmonautin Valentina Tereschkowa mit der Leitzentrale in Baikonur kam mit Hilfe der Hertzschen Wellen zustande. In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Grundlagen der elektromagnetischen Schwingungen und Wellen dargeboten.

Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen

Mechanische Wellen sind mit mechanischen Schwingungen verknüpft. Ebenso besteht ein Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Schwingungen und elektromagnetischen Wellen. In allen Geräten, in denen elektromagnetische Schwingungen entstehen oder verarbeitet werden, wie zum Beispiel in dem Sender einer Amateurfunkstation der GST, spielen die Schaltelemente Kondensator und Spule eine entscheidende Rolle.

1. Eigenschaften von Kondensator und Spule

Um die Entstehung der elektromagnetischen Schwingungen verstehen zu können, ist es notwendig, einige wichtige Eigenschaften von Kondensator und Spule zu wiederholen und zu vertiefen.

	
Kondensator	**Spule**
1. Zwischen den Platten eines geladenen Kondensators besteht ein elektrisches Feld.	Eine stromdurchflossene Spule ist von einem magnetischen Feld umgeben.
2. Die elektrische Energie wird im elektrischen Felde eines geladenen Kondensators gespeichert.	Die elektrische Energie wird in einer stromdurchflossenen Spule fast vollständig in die Energie des Magnetfeldes umgewandelt und gespeichert.

Kondensator	Spule
3. Die kennzeichnende physikalische Größe eines Kondensators ist die Kapazität C. Bei konstanter Ladespannung ist die Energie des elektrischen Feldes der Kapazität proportional.	Die kennzeichnende physikalische Größe einer Spule ist die Induktivität L. Bei konstanter Stromstärke ist die Energie des Magnetfeldes der Induktivität proportional.
4. Beim Anlegen einer Spannung wird das elektrische Feld aufgebaut. Der Ladestrom fließt so lange, bis die Kondensatorspannung den Wert der Ladespannung erreicht hat.	Beim Einschalten des Stromes wird das Magnetfeld aufgebaut. Die dadurch erzeugte Selbstinduktionsspannung verzögert das Anwachsen der Stromstärke.
5. Beim Entladen wird das elektrische Feld abgebaut. Der dem Ladestrom entgegengesetzt gerichtete Entladestrom fließt so lange, bis die Kondensatorspannung auf Null abgesunken ist.	Beim Ausschalten des Stromes wird das Magnetfeld abgebaut. Die Selbstinduktion verzögert das Abfallen der Stromstärke.
6. Das elektrische Feld ist praktisch trägheitslos.	Das durch den elektrischen Strom hervorgerufene Magnetfeld ist träge.

2. Der Schwingkreis

Bei jeder Entladung zeichnet der Elektronenstrahl-Oszillograf das in Bild 81/1 dargestellte Stromstärke-Zeit-Diagramm. Es stellt einen *Wechselstrom mit abnehmender Amplitude* dar.

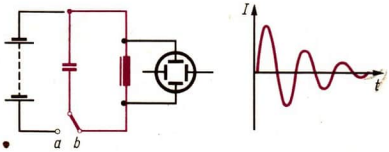


Bild 81/1 Versuchsanordnung zum Erzeugen elektromagnetischer Schwingungen. Bei Schalterstellung a wird der Kondensator geladen, bei Stellung b wird er über die Spule entladen. Der Entladungsvorgang wird mit einem Elektronenstrahl-Oszillografen untersucht

Aus dem Versuch ergeben sich folgende *Erkenntnisse:*

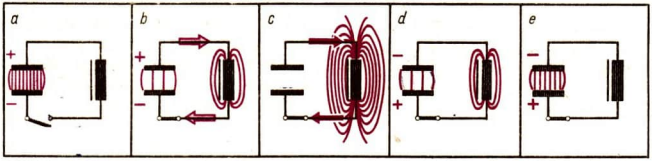
Die Entladung eines Kondensators über eine Spule erfolgt nicht in einem einmaligen kurzen Stromstoß, sondern schwingend.
Der Kondensator wird nach der ersten Entladung durch die Wirkung der Selbstinduktion mit entgegengesetzter Polarität wieder aufgeladen. Anschließend entlädt er sich wieder. Diese Vorgänge wiederholen sich fortwährend. Das elektrische Feld des Kondensators wechselt periodisch seine Stärke und Richtung, es ist ein *elektrisches Wechselfeld.*

Der Strom durch die Spule und mit ihm das Magnetfeld wechseln periodisch Stärke und Richtung. Der Strom ist ein *Wechselstrom*, das Spulenfeld ein *magnetisches Wechselfeld*.
Die periodischen Änderungen des Magnetfeldes der Spule sowie des elektrischen Feldes des Kondensators nennt man *elektromagnetische Schwingungen*.
Ein aus Spule und Kondensator bestehender Stromkreis wird als *elektrischer Schwingkreis* bezeichnet.
In einem elektrischen Schwingkreis entstehen nach einmaligem Aufladen des Kondensators *gedämpfte* elektromagnetische Schwingungen.

3. Die Vorgänge im Schwingkreis

In der folgenden Übersicht wird dargestellt, wie das Zusammenwirken von Kondensator und Spule zum Entstehen der elektromagnetischen Schwingungen führt.

3.1. Die Entstehung elektromagnetischer Schwingungen



Der Kondensator ist geladen, Schalter geöffnet. Es fließt kein Strom (Bild 82/1a).
Der Entladestrom beginnt zu fließen, die Kondensatorspannung nimmt ab, und das elektrische Feld wird abgebaut. Dabei wird das Magnetfeld aufgebaut. Wegen der verzögernden Wirkung der Selbstinduktion erreichen der Entladestrom und sein Magnetfeld erst allmählich ihre volle Stärke (Bild 82/1b).
Der Entladestrom und sein Magnetfeld haben ihren höchsten Wert. Die Kondensatorspannung ist auf Null abgesunken – der Kondensator ist entladen (Bild 82/1c).
Die Stärke des Entladestromes nimmt ab, das Magnetfeld wird abgebaut. Durch die verzögernde Wirkung der Selbstinduktion wird das Abfallen des Stromes verzögert, der Strom fließt nach dem Entladen in der alten Richtung weiter und lädt den Kondensator mit entgegengesetzter Polarität wieder auf (Bild 82/1d).
Die Kondensatorspannung hat ihren (negativen) Höchstwert erreicht. Der Ladestrom ist auf Null abgesunken und das Magnetfeld vollständig abgebaut. Die Aufladung in umgekehrter Richtung ist beendet (Bild 82/1e).

Damit ist im wesentlichen der gleiche Zustand wie zu Anfang erreicht, nur daß die Kondensatorplatten jetzt entgegengesetzt aufgeladen sind. Es beginnen wieder die gleichen Vorgänge, wie sie in der Tabelle beschrieben wurden, jedoch in umgekehrter Richtung.

- *Beschreiben Sie die umgekehrt ablaufenden Vorgänge an Hand von Skizzen nach Bild 82/1a bis e!*

Infolge der verzögernden Wirkung der Selbstinduktion fließt der Elektronenstrom nach jeder beendeten Entladung weiter. Dadurch wird der Kondensator jeweils wieder mit entgegengesetzter Polarität aufgeladen. Im Schwingkreis folgen Lade- und Entladevorgänge periodisch aufeinander.

3.2. Energieumwandlungen im Schwingkreis

- *Geben Sie Beispiele für umkehrbare und nichtumkehrbare Energieumwandlungen aus der Mechanik an!*

Die einem Kondensator beim Laden zugeführte elektrische Energie wird zwischen dem elektrischen Feld des Kondensators und dem Magnetfeld der Spule periodisch ausgetauscht. Die dabei erfolgenden periodischen Energieumwandlungen zwischen dem elektrischen Feld des Kondensators und dem Magnetfeld der Spule sind *umkehrbar*. Außerdem erfolgen im Schwingkreis auch *nichtumkehrbare* Energieumwandlungen. Dadurch nimmt die elektrische Energie im Schwingkreis ständig ab; die Schwingungen sind *gedämpft*. Hauptursache für die Dämpfung ist die Umwandlung der elektrischen Energie in Wärmeenergie am Ohmschen Widerstand der Spule und der Leitungen.

4. Die Eigenfrequenz eines Schwingkreises

4.1. Die Kennzeichen der elektromagnetischen Schwingungen

Das Oszillogramm in Bild 81/1 gleicht den Aufzeichnungen der mechanischen Schwingungen durch ein Sandpendel (siehe Bild 49/1). Deshalb kann man die Kenngrößen der mechanischen Schwingungen auf die elektromagnetischen Schwingungen übertragen.

Elektromagnetische Schwingungen werden durch die Kenngrößen Amplitude (Spannungs- oder Stromamplitude), Schwingungsdauer und Frequenz quantitativ beschrieben.

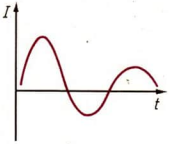
- *Nennen Sie Frequenzeinheiten! Welche Beziehung besteht zwischen Schwingungsdauer und Frequenz?*

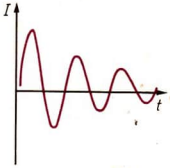
4.2. Die Beeinflussung der Eigenfrequenz eines Schwingkreises

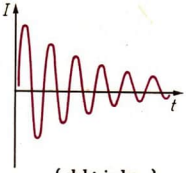
Elektromagnetische Schwingungen entstehen in einem Schwingkreis durch das Zusammenwirken von Kondensator und Spule. Der zeitliche Ablauf der Lade- und Entladevorgänge und damit die Frequenz der Schwingungen hängen davon ab, wie groß die Kapazität des Kondensators und die Induktivität der Spule sind.

Bild 84/1 **Vergrößerung** der $\left\{\begin{array}{l}\text{Kapazität}\\ \text{Induktivität}\end{array}\right.$

Verkleinerung der $\left\{\begin{array}{l}\text{Kapazität}\\ \text{Induktivität}\end{array}\right.$







Das $\left\{\begin{array}{l}\text{elektrische}\\ \text{magnetische}\end{array}\right\}$ Feld kann eine *größere* Energiemenge aufnehmen – die Entladungen und Aufladungen brauchen mehr Zeit

Das $\left\{\begin{array}{l}\text{elektrische}\\ \text{magnetische}\end{array}\right\}$ Feld kann nur eine *kleinere* Energiemenge aufnehmen – die Entladungen und Aufladungen brauchen weniger Zeit

Die durch Kapazität und Induktivität eines Schwingkreises bestimmte Frequenz heißt seine **Eigenfrequenz.**
Schwingungen in der Eigenfrequenz, die nach einmaliger Aufladung des Kondensators ohne weitere Energiezufuhr von außen erfolgen, nennt man **freie elektromagnetische Schwingungen.**
Freie elektromagnetische Schwingungen sind immer gedämpft.

● *Wie kann man die Kapazität eines Kondensators und die Induktivität einer Spule verändern?*

In Bild 81/1 ist der Einfluß der Kapazität und der Induktivität auf die Eigenfrequenz eines Schwingkreises schematisch dargestellt:

Vergrößert man die Kapazität oder die Induktivität eines Schwingkreises, so vermindert sich die Eigenfrequenz. Sie wird vergrößert durch Verkleinern der Kapazität oder Induktivität.

Die Eigenfrequenz eines Schwingkreises wird berechnet mit der **Thomsonschen Schwingungsgleichung:** $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$ (streng gültig nur für ungedämpfte Schwingungen).

4.3. Frequenzbereiche

Die elektromagnetischen Schwingungen haben einen sehr großen Frequenzumfang. Er reicht von sehr kleinen Frequenzen (in der Größenordnung von 1 Hz) bis zu außerordentlich hohen Frequenzen von Milliarden Hertz (Gigahertz). Deshalb ist eine Untergliederung in Frequenzbereiche zweckmäßig:

Tabelle 4: Frequenzbereiche

Bezeichnungen	Frequenzumfang	Symbol
Techn. Wechselstrom	$16^2/_3$ bis 50 Hz	~
Tonfrequente Schwingungen (Ton- oder Niederfrequenz)	16 bis 16 000 Hz	≈
Hochfrequente Schwingungen (Hochfrequenz)	10 kHz bis 30 MHz	≋
Ultrahochfrequente Schwingungen (Höchstfrequenz)	über 30 MHz	≋≋

Tabelle 5: Vergleich mechanischer und elektromagnetischer Schwingungen Ergänzen Sie!

Gegenstand des Vergleichs	Federschwinger	elektrischer Schwingkreis
Einander entsprechende Energieformen	Potentielle Energie der gespannten Feder	
	Kinetische Energie des schwingenden Körpers im Zustand der Bewegung	
Einmalige Energiezufuhr	Spannen der Feder	
Voraussetzung für das Entstehen der Schwingungen	Trägheit des schwingenden Körpers, gekennzeichnet durch seine Masse	
Ursache der Dämpfung	Umwandlung mechanischer Energie in Wärme durch Reibung	
Erhöhung der Eigenfrequenz	Kleinere Masse Stärkere Feder	

ZUSAMMENFASSUNG

Wird ein Kondensator über eine Spule entladen, so entstehen gedämpfte elektromagnetische Schwingungen; Spule und Kondensator bilden einen elektrischen Schwingkreis.

Durch welche Eigenschaften von Kondensator und Spule ist die Entstehung elektromagnetischer Schwingungen bedingt?

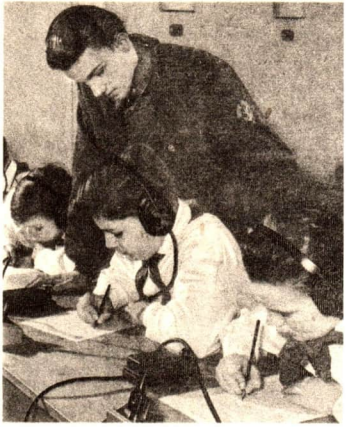
In einem Schwingkreis erfolgen umkehrbare und nichtumkehrbare Energieumwandlungen.

Um welche Energieumwandlungen handelt es sich in den beiden Fällen?

Die Eigenfrequenz eines Schwingkreises ist durch die Kapazität des Kondensators und die Induktivität der Spule bestimmt.

Durch welche Maßnahmen kann man die Eigenfrequenz eines Schwingkreises vergrößern.

Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen



Nachrichtensportler der GST bei der Ausbildung im Morsen. Der dabei benutzte Morsesummer erzeugt tonfrequente Wechselströme. Sie sind, den Zeichen des Morsealphabets entsprechend, vom Funklehrer getastet, in den Kopfhörern als lange oder kurze Töne (Striche oder Punkte) zu hören. Diese elektromagnetischen Schwingungen sind ungedämpft. Der Morsesummer enthält unter anderem einen Schwingkreis, der *entdämpft* wurde.

1. Die Entdämpfung

Um einen Schwingkreis zu ungedämpften Schwingungen anzuregen, ist es notwendig, den Teil der elektrischen Energie, der infolge der Dämpfung in Wärme umgewandelt wird, ständig zu ersetzen. Man bezeichnet diese Energiezufuhr als *Entdämpfung*. Die Energie zur Entdämpfung darf nicht willkürlich zugeführt werden. Dies zeigt das mechanische Beispiel einer Schaukel.

Ungedämpfte Schwingungen einer Schaukel	Erkenntnis
Wird die Schaukel einmalig angestoßen, so führt sie Schwingungen aus. Nach einiger Zeit kommt sie zur Ruhe.	Der Schwinger führt freie gedämpfte Schwingungen in seiner Eigenfrequenz aus.
Soll die „Schaukelamplitude" konstant bleiben, so muß die Schaukel immer wieder angestoßen werden.	Zur Entdämpfung muß periodisch Energie zugeführt werden. Es ist eine Erregerquelle erforderlich. Schwinger und Erregerquelle müssen miteinander gekoppelt sein.
Erfolgen die Anstöße jeweils zum richtigen Zeitpunkt, so kann man eine große konstante Schaukelamplitude erhalten.	Stimmt die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des Schwingers überein, so erreicht die konstante Amplitude der Schwingungen ihren größten Wert. Es besteht **Resonanz.**

Diese Erkenntnisse lassen sich auf den Schwingkreis übertragen:

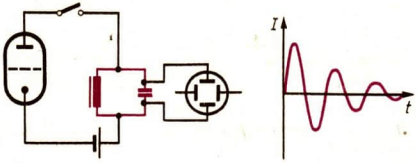
Um einen Schwingkreis zu entdämpfen, muß der Teil der elektrischen Energie ersetzt werden, der sich in Wärme umwandelt. Die Energiezufuhr muß periodisch geschehen – es ist eine Erregerquelle erforderlich, die eine Wechselspannung liefert. Erregerquelle und Schwingkreis müssen miteinander gekoppelt sein. Schwingungen mit größter Amplitude treten im Resonanzfalle ein, wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz des Schwingkreises übereinstimmt.

Der Schwingkreis des Bildes 81/1 kann zu ungedämpften Schwingungen angeregt werden, indem man den Umschalter im Rhythmus der Eigenfrequenz des Schwingkreises betätigt. Das ist aber nur bei sehr kleinen Eigenfrequenzen möglich. Bei tonfrequenten und hochfrequenten Schwingungen sind als praktisch trägheitslose Schalter die Elektronenröhre bzw. der Transistor geeignet.

2. Der Röhrengenerator

15

V Ein Schwingkreis ist in den Anodenstromkreis einer Triode geschaltet. Der Anodengleichstrom fließt durch die Schwingkreisspule. Jeweils beim Ein- und Ausschalten des Anodenstromes wird der Schwingkreis zu je einem Zug gedämpfter Schwingungen angeregt. Ist die Stärke des Anodenstromes null oder konstant, so bleibt der Schwingkreis in Ruhe.



Ungedämpfte Schwingungen können nur entstehen, wenn die Stärke des Anodenstromes periodisch geändert wird. Am günstigsten ist es, wenn dies im Rhythmus der Eigenfrequenz des Schwingkreises geschieht.

Diese Aufgabe löste im Jahre 1913 der deutsche Ingenieur ALEXANDER MEISSNER. Er kam auf den Gedanken, den Anodenstrom mit Hilfe des Gitters durch den Schwingkreis selbst steuern zu lassen. Bild 88/1 zeigt die *Meißnersche Rückkopplungsschaltung.*

Erklärung der Wirkungsweise eines Meißnergenerators:

Beim Einschalten des Anodenstromes entstehen im Schwingkreis Schwingungen. Durch sie wird in der Gitterspule eine Wechselspannung induziert.

Infolge dieser Gitterwechselspannung erzeugt die Röhre Schwankungen der Anodenstromstärke im Rhythmus der Eigenfrequenz des Schwingkreises.

Durch diese Schwankungen der Anodenstromstärke wird der Schwingkreis zu ungedämpften Schwingungen in der Eigenfrequenz angeregt. Dabei wird der Teil der elek-

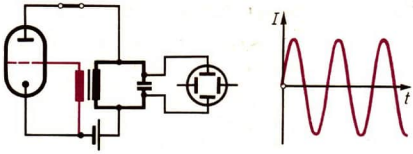


Bild 88/1 Meißnersche Rückkopplungsschaltung (Meißnergenerator). Schwingkreis und Steuergitter der Triode sind miteinander gekoppelt. Die Kopplung erfolgt hier induktiv, d. h. durch das Magnetfeld der Spulen

trischen Energie, der beim Schwingkreis infolge Dämpfung verlorengeht, aus dem Anodenstromkreis ersetzt.

Da bei der Meißnerschaltung der Schwingkreis über Gitter und Anodenstromkreis auf seine eigenen Schwingungen zurückwirkt, nennt man sie eine *Rückkopplungsschaltung*.

In der Starkstromtechnik bezeichnet man eine Maschine, die eine Wechselspannung erzeugt, als einen Generator. Entsprechend nennt man eine Röhrenschaltung, in der ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen entstehen, einen *Röhrengenerator*.

● *Begründen Sie, warum man die Begriffe „Wechselstrom" und „elektromagnetische Schwingungen" oft gleichbedeutend nebeneinander gebraucht!*

Der Meißnergenerator war die erste und einfachste Form eines Röhrengenerators. Alle später entwickelten Schwingschaltungen beruhen ebenfalls auf dem Rückkopplungsprinzip.

● *Das Pendel einer Uhr schwingt ungedämpft. Vergleichen Sie die Uhrenteile mit den Schaltelementen der Meißnerschen Rückkopplungsschaltung!*

3. Anwendung der ungedämpften elektromagnetischen Schwingungen

Für die Anwendung des Röhrengenerators in der Praxis ist wichtig, daß die Amplitude, vor allem aber die Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen konstant bleiben. Dazu ist günstig, wenn man die vom Generator erzeugten Schwingungen auf einen zweiten Schwingkreis überträgt (Bild 88/2).

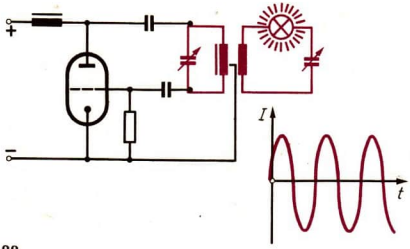


Bild 88/2 Röhrengenerator für hochfrequente Schwingungen in induktiver Dreipunktschaltung. Hier wird an einer Anzapfung der Schwingkreisspule ein Teil der Wechselspannung abgegriffen und dem Gitter zugeführt

3.1. Die Übertragung elektromagnetischer Schwingungen auf einen Resonanzkreis

Neben dem Generator ist ein solcher zweiter Schwingkreis angeordnet (Bild 88/2). Beide Schwingkreise sind miteinander gekoppelt (vgl. mechanische Kopplung, S. 58).

● *Warum bezeichnet man die hier angewandte Energieübertragung als induktive Kopplung?*

Die Eigenfrequenz des zweiten Schwingkreises kann mit dem Drehkondensator verändert und auf die Generatorfrequenz abgestimmt werden. Dann leuchtet das als Stromanzeiger dienende Lämpchen hell auf, und beide Schwingkreise stehen in Resonanz. Wie das Oszillogramm zeigt, sind die Schwingungen im angekoppelten Kreise ebenfalls ungedämpft. Ihre Amplitude hat bei Resonanz ein Maximum.

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

Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen werden vor allem in der *Funktechnik*, ferner in der *Ton-*, *Ultraschall-* und *Wärmetechnik* angewandt.

3.2. Der Ultraschallgenerator

Die rein mechanische Erzeugung des Ultraschalls, zum Beispiel durch Ultraschallpfeifen, liefert nur Schallwellen *niedriger Frequenz* und *sehr geringer Energie*. Mit Hilfe elektromagnetischer Schwingungen kann man jedoch Ultraschall *beliebiger Frequenz* und *hoher Energie* erzeugen. 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 Abmessungen periodisch ändern, wenn sie sich in einem elektrischen oder magnetischen Wechselfeld befinden.

3.3. Induktive Hochfrequenzerwärmung

Der Kern eines Transformators erwärmt sich, weil durch das magnetische Wechselfeld in den Blechen des Eisenkerns Ströme induziert werden. In viel stärkerem Maße werden Metalle erwärmt, wenn sie in das hochfrequente Wechselfeld eines Röhrengenerators großer Leistung gebracht werden.
Bei der induktiven Hochfrequenzerwärmung werden elektrische Leiter oder Halbleiter im Magnetfeld der Hochfrequenzspule eines Hochfrequenzgenerators erhitzt. Die Spule besteht aus wenigen Windungen dicken Kupferrohres. Wird ein Stab aus leitendem oder halbleitendem Material eingebracht, so werden in ihm sehr starke, hochfrequente Wechselströme induziert, die den Stab in wenigen Sekunden zum Glühen bringen können.

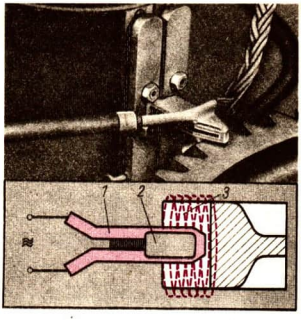


Bild 90/1 Oberflächenhärten von Zahnrädern
1 Leiterschleife, 2 Wasserkühlung, 3 Zahnrad

Anwendungsbeispiele:

1. *Hochfrequenzschmelzofen* zur Gewinnung von Edelstahlsorten;
2. *Härten der Oberflächen* von Zähnen bei Zahnrädern und Sägeblättern (Bild 90/1);
3. *Ausglühen der Elektrodensysteme* von Elektronenröhren, um eingeschlossene Gasreste aus dem Metall auszutreiben;
4. *Zonenschmelzen* zur Darstellung von reinem Germanium.

3.4. Kapazitive Hochfrequenz-Erwärmung

Im hochfrequenten elektrischen Wechselfeld zwischen den Platten eines vom Hochfrequenzgenerator gespeisten Kondensators können Isolierstoffe erwärmt werden. Beispiele für die Anwendung der kapazitiven Hochfrequenz-Erwärmung:

1. *Schnelltrocknen* von Holzverleimungen;
2. *Schnellzubereitung* von Speisen, die heute technisch grundsätzlich möglich ist;
3. *Schweißen* von Verbindungsnähten zwischen Folien aus Thermoplasten;
4. *Diathermie* (Wärmebehandlung) in der Medizin. Das hochfrequente elektrische Wechselfeld vermag tief im Innern des Körpers liegende Organe zu erwärmen.

Vorteile der Hochfrequenz-Erwärmung. Beide Arten der Hochfrequenz-Erwärmung weisen gegenüber anderen Methoden, Stoffe zu erwärmen, wesentliche Vorteile auf:

Das Erwärmen geht außerordentlich schnell vor sich. Die Erwärmung kann auf bestimmte Teile begrenzt werden, zum Beispiel nur auf die Oberfläche, auf das Innere oder nur auf eine bestimmte Zone des Querschnittes.

Schlechte Wärmeleiter lassen sich wie gute Wärmeleiter von außen erwärmen.

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen muß ein Schwingkreis entdämpft werden.

Was versteht man unter Entdämpfung und wie kann man einen Schwingkreis entdämpfen?

Mit einem Meißnergenerator lassen sich ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen erzeugen.

Beschreiben Sie an Hand einer Schaltskizze den Aufbau und die Wirkungsweise eines Meißnergenerators!

Bei allen Röhrengeneratoren wird das Rückkopplungsprinzip angewandt.

Was versteht man unter den Begriffen Kopplung und Rückkopplung?

An den Schwingkreis eines Röhrengenerators kann ein Resonanzkreis angekoppelt werden.

Wie kann man feststellen, daß der Schwingkreis eines Hochfrequenzgenerators und ein angekoppelter Schwingkreis in Resonanz zueinander stehen?

Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen

Aus elektromagnetischen Schwingungen können elektromagnetische Wellen entstehen. Auf Grund unserer Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen den mechanischen Schwingungen und Wellen und auf Grund unserer Erfahrungen mit Rundfunk- und Fernsehgeräten scheint uns dies heute fast als selbstverständlich. Die physikalische Forschung mußte jedoch bis zur Entdeckung dieser Wellen umfangreiche und mühevolle Vorarbeiten verrichten. Um so mehr ist bemerkenswert, daß die Existenz elektromagnetischer Wellen bereits 20 Jahre vor ihrem experimentellen Nachweis vorausgesagt wurde.

1. Die Voraussage elektromagnetischer Wellen

Der englische Wissenschaftler JAMES CLERK MAXWELL verallgemeinerte die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen FARADAYs über die Felder und baute sie zu einer neuen Theorie aus. Auf Grund seiner Überlegungen und Rechnungen sagte MAXWELL 1868 das Vorhandensein von elektromagnetischen Wellen voraus, mit denen eine Übertragung elektromagnetischer Energie in den Raum verbunden sein müsse. Darüber hinaus kam er zu der Folgerung, daß auch das Licht solche Eigenschaften elektromagnetischer Wellen haben müsse.
Mit diesen theoretischen Ergebnissen war MAXWELL der experimentellen Forschung seiner Zeit um zwei Jahrzehnte voraus.

2. Der experimentelle Nachweis der elektromagnetischen Wellen

Elektromagnetische Schwingungen sind seit dem Jahre 1862 bekannt. Der Physiker B. W. FEDDERSEN hatte nachgewiesen, daß der elektrische Funke keine einfache, nur in einer Richtung vor sich gehende Entladungserscheinung ist, sondern aus einer Folge hin- und hergehender Ent-

JAMES CLERK MAXWELL
(1831 bis 1879)

HEINRICH HERTZ
(1857 bis 1894)

ALEXANDER STEP. POPOW
(1859 bis 1905)

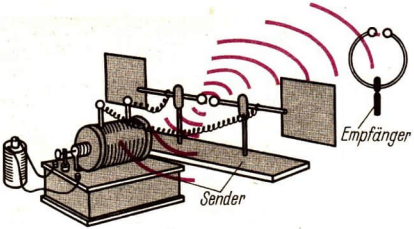


Bild 92/1 Hertzscher Sender und Empfänger

ladungen besteht. Aus dieser Entdeckung ergab sich erst die Möglichkeit, nach den elektromagnetischen Wellen zu suchen. Dem deutschen Physiker HEINRICH HERTZ gelang es mit elektrischen Funken, die Richtigkeit der Voraussagen MAXWELLs durch das Experiment nachzuweisen.

HERTZ benutzte einen Funkeninduktor mit angeschlossener Funkenstrecke als Erreger für elektromagnetische Schwingungen sehr hoher Frequenz. Als Resonanzkreis diente ein kreisförmiger Drahtbügel mit einer winzigen Funkenstrecke an den Enden (Bild 92/1). Mit diesen Vorrichtungen konnte er nachweisen, daß sich elektromagnetische Schwingungen an ausgespannten Drähten wellenartig mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Sein Ziel, die Ausbreitung von Wellen in den freien Raum nachzuweisen, erreichte er 1888. Als er den Raum vor einer Metallwand absuchte, zeigten sich in bestimmten Entfernungen winzige Funken in der Funkenstrecke des Resonanzkreises. Damit war nachgewiesen, daß *von der Funkenstrecke des Induktors elektromagnetische Wellen ausgesandt, von der Metallwand reflektiert und vom Resonanzkreis aufgefangen wurden.*

Durch weitere Experimente konnte HEINRICH HERTZ später zeigen, daß die von ihm gefundenen elektromagnetischen Wellen neben der Reflexion noch weitere Eigenschaften des Lichts, wie die Brechung und Interferenz, zeigen. Damit war auch die zweite Behauptung MAXWELLs bestätigt.

3. Der Beginn der Anwendung der elektromagnetischen Wellen

Der russische Physiker POPOW baute 1895 einen 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 mit elektromagnetischen Wellen durch.

Seine Veröffentlichungen setzten den Italiener MARCONI in die Lage, 1897 eine Strecke von 6 km zwischen zwei Inseln im Ärmelkanal drahtlos zu überbrücken. Um die Jahrhundertwende wurde das erste Telegramm über den Atlantischen Ozean „gefunkt".

1906 wurde von „Telefunken" die erste deutsche Großfunkstation in Nauen erbaut. Die Möglichkeit für die Kriegsministerien und die Reedereien, mit ihren Schiffen laufend Verbindung halten zu können, und das Interesse an einer schnellen und sicheren Nachrichtenübermittlung zwischen den Kolonialstaaten und den Kolonien führte zu einer stürmischen Entwicklung der Funktechnik und zu einem erbitterten Konkurrenzkampf, vor allem zwischen der britischen MARCONI- und der deutschen TELEFUNKEN-Gesellschaft.

Die Entstehung von Hertzschen Wellen

Die Nachrichtenmittel einer modern ausgerüsteten Armee müssen drahtlos, leicht transportabel, betriebssicher und leistungsfähig sein. Das tragbare Funkgerät der NVA enthält einen Röhrensender, der hochfrequente elektromagnetische Schwingungen erzeugt. Die Sendeantenne hat die Aufgabe, die elektromagnetischen Schwingungen in elektromagnetische Wellen umzuwandeln und in den Raum abzustrahlen.

1. Der offene Schwingkreis

Im Bild 88/2 werden die vom Generator erzeugten elektromagnetischen Schwingungen auf den Resonanzkreis durch das magnetische Wechselfeld zwischen den Spulen übertragen. Dagegen könnte man die beiden Schwingkreise nicht miteinander koppeln, wenn man ihre Drehkondensatoren nebeneinanderstellte. Während das magnetische Wechselfeld auch in der Umgebung der Spulen wirksam ist, bleibt das elektrische Wechselfeld auf den Raum zwischen den Kondensatorplatten konzentriert. Man nennt solche Schwingkreise wie in Bild 88/2 *geschlossene Schwingkreise.*

Bei einem geschlossenen Schwingkreis kann nur vom magnetischen Wechselfeld Energie an die Umgebung außerhalb des Schwingkreises abgegeben werden. Die Reichweite ist daher gering.

● *Beschreiben Sie die Funktionen der Schaltelemente eines geschlossenen Schwingkreises!*

Will man elektromagnetische Schwingungen auf eine größere Entfernung übertragen, das heißt, will man elektromagnetische Wellen abstrahlen, so muß auch das elektrische Feld in den Raum hinauswirken können. Das erreicht man bei folgendem Versuch.

16

V Die Kondensatorplatten eines Schwingkreises (Bild 94/1 links) werden auseinandergezogen (Bild 94/1 rechts). Dadurch verkleinert sich die Kapazität und infolgedessen erhöht sich die Eigenfrequenz. Um wieder Resonanz zu erhalten, muß man die Generatorfrequenz ebenfalls erhöhen. Dann zeigt die Lampe wieder ein Helligkeitsmaximum.

Daraus ergeben sich folgende Erkenntnisse:
Das Aufleuchten der Lampe zeigt, daß nach wie vor ein hochfrequenter Wechselstrom zwischen den beiden Platten fließt. Dadurch werden sie mit wechselnder Polarität aufgeladen und jeweils wieder entladen. Aus dem geschlossenen Schwingkreis entstand ein **offener Schwingkreis.** Ändert man die Generatorfrequenz am Drehkondensator, so zeigt die Lampe bei maximaler Helligkeit eine Resonanzstelle an. Das bedeutet, daß auch der offene Schwingkreis eine Eigenfrequenz besitzt, die durch seine Induktivität und Kapazität bestimmt wird.
Das elektrische Wechselfeld ist jetzt auch außerhalb der Platten wirksam. Es verläuft etwa, wie es Bild 94/1 rechts zeigt. *Neben dem magnetischen wirkt jetzt auch das elektrische Wechselfeld in den Raum hinaus.*

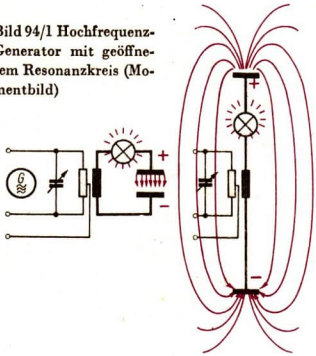


Bild 94/1 Hochfrequenz-Generator mit geöffnetem Resonanzkreis (Momentbild)

In einem offenen Schwingkreis können die elektromagnetischen Schwingungen in elektromagnetische Wellen (Hertzsche Wellen) umgewandelt werden.

2. Die Wellenlänge der Hertzschen Wellen

Die *Hertzschen Wellen breiten sich* wie alle elektromagnetischen Wellen *mit der Lichtgeschwindigkeit von rund 300 000* km · s^{-1} *aus.* Um elektromagnetische Schwingungen in ebensolche Wellen umzusetzen, braucht man eine Antenne, die um so länger sein muß, je niedriger die Frequenz ist. Daher liegt eine praktische untere Grenze bei etwa 15 kHz, doch werden solche niedrigen Frequenzen heute kaum mehr angewendet.

Die Grundgleichung der Wellenlehre gilt auch für elektromagnetische Wellen. Man kann deshalb die Wellenlänge der Hertzschen Wellen berechnen, wenn die Frequenz bekannt ist. Es gilt dann $\lambda = \frac{c}{f}$. Setzt man die obengenannte Mindestfrequenz ein, so erhält man als größte benutzte Wellenlänge für Funkzwecke 20 km.
Die Hertzschen Wellen werden nach ihrer Wellenlänge in verschiedene Wellenbereiche eingeteilt. Man unterscheidet *Längst-, Lang-, Mittel-, Kurz-, Ultrakurz- und Mikrowellen.* Über die zugehörigen Wellenlängen und Frequenzen gibt die Übersicht auf Seite 104 Auskunft.

3. Der Höchstfrequenz-Generator

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

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

Diese zugelassene Wellenlänge gestattet die Untersuchung der Eigenschaften Hertzscher Wellen in Klassenräumen, wobei ein Ausstrahlen von Funksignalen nach außerhalb durch die Abschirmwirkung der Gebäudeteile verhindert wird. Der dazu benötigte Generator ist ein *Höchstfrequenz-Generator.*

Elektromagnetische Schwingungen der erforderlichen sehr hohen Frequenz kann man nur dann erzeugen, wenn Kapazität und Induktivität des Schwingkreises sehr klein gewählt werden. Das erreicht man dadurch, daß man die Schwingkreisspule zum einfachen Leiterbügel „entarten" läßt. Die benötigte Kapazität besteht bereits zwischen Gitter und Anode einer Elektronenröhre in der Größenordnung von 1 pF. Deshalb ist ein besonderer Schwingkreiskondensator überflüssig. Die Schaltung des Höchstfrequenz-Generators nach Bild 95/2 ist aus dem in Bild 88/2 dargestellten Hochfrequenz-Generator hervorgegangen.

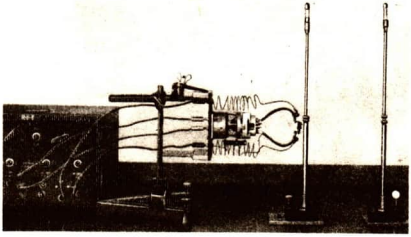


Bild 95/1 Höchstfrequenz-Generator für Demonstrationszwecke. Der Generator erzeugt Hertzsche Wellen mit einer Wellenlänge von 1 m. An den Generator ist ein offener Schwingkreis für Höchstfrequenz, ein Stabdipol, angekoppelt

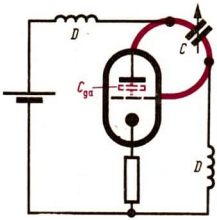


Bild 95/2 Prinzipschaltbild eines Höchstfrequenz-Generators

Auch der angekoppelte Resonanzkreis muß der Höchstfrequenz angepaßt werden. Der offene Schwingkreis in Bild 94/1 entartet dabei zu einem geraden Leiter. Kondensator und Spule können nicht mehr voneinander unterschieden werden. Der Leiter besitzt eine über seine ganze Länge verteilte Induktivität und Kapazität. Man nennt einen solchen offenen Schwingkreis für ultrahochfrequente Schwingungen einen **Dipol.**

4. Die Vorgänge im Dipol

Ein Dipol besitzt wie jeder Schwingkreis eine bestimmte *Eigenfrequenz.* Diese hängt von seiner *Länge* ab:

Bei Verlängerung vermindert sich die Eigenfrequenz;
Bei Verkürzung vergrößert sich die Eigenfrequenz.

Nach der Grundgleichung der Wellenlehre entspricht der Eigen- oder Resonanzfrequenz eine zugehörige *Resonanzwellenlänge.* Durch Längenänderung kann man daher die Resonanzwellenlänge eines Dipols verändern. Berechnungen ergeben, daß ein Dipol dann auf die Generatorfrequenz abgestimmt ist, wenn seine Länge ungefähr der halben Wellenlänge der vom Generator erzeugten Wellen entspricht.

Die Länge eines Stabdipols stimmt ungefähr mit seiner halben Resonanzwellenlänge überein. Man bezeichnet ihn als $\frac{\lambda}{2}$-Dipol.

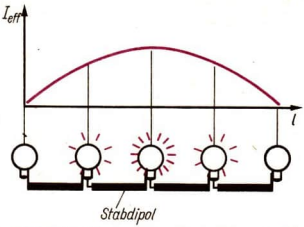


Bild 96/1 Schematische Darstellung der Verteilung der Stromstärke des höchstfrequenten Wechselstromes über die Dipollänge

Ist ein Dipol in seiner Länge auf die Generatorfrequenz abgestimmt und wird durch die Kopplung vom Generator genügend Energie auf ihn übertragen, so kann man

die *Stromstärkeverteilung* mit einer *Glühlampe* und

die *Spannungsverteilung* mit einer *Glimmlampe* untersuchen.

Die Glühlampe (Bild 94/1 rechts) weist als *Anzeiger für die effektive Stromstärke* darauf hin, daß in einem stabförmigen Dipol ebenso ein Wechselstrom fließt wie in einem geschlossenen Stromkreis. In einem einfachen Gleichstromkreis ist die Stromstärke an allen Stellen gleich. Beim Dipol trifft das nicht zu. An den verschiedenen Stellen des Dipols zeigt die Glühlampe eine unterschiedliche Stromstärke an. Die Lampe leuchtet an den Enden des Dipols gar nicht, in der Mitte am stärksten (Bild 96/1).

In der Mitte des Dipols ist die Stromstärke des höchstfrequenten Wechselstromes am größten, nach außen nimmt sie ab, und an den Enden ist sie null.

Fährt man mit einer *Glimmlampe als Spannungsanzeiger* an einem schwingenden Dipol entlang, so leuchtet sie ebenfalls nicht an allen Stellen gleich hell. Das Glimmlicht ist dabei an den Dipolenden am stärksten. Aus der Darstellung im Bild 96/2 ist zu entnehmen:

Die höchstfrequente Wechselspannung ist an den Dipolenden am größten, nimmt nach innen ab und beträgt in der Mitte null.

● *Erklären Sie, wieso die Glimmlampe aufleuchtet, obwohl nur eine Elektrode den Dipol berührt!*

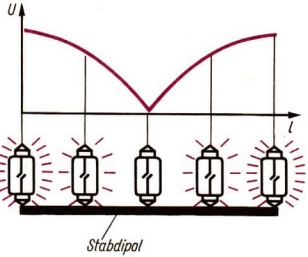


Bild 96/2 Schematische Darstellung der Verteilung der Spannung des höchstfrequenten Wechselstromes über die Dipollänge

5. Das elektromagnetische Wechselfeld

Die vom Dipol erzeugten Wellen bestehen aus einem elektrischen und aus einem magnetischen Feldanteil. Beide Felder sind miteinander verknüpft. Zum besseren Verständnis sollen sie jedoch nachfolgend getrennt beschrieben werden.

5.1. Der magnetische Anteil des Dipolfeldes

Die Elektronen schwingen im Dipol hin und her. Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem magnetischen Felde umgeben, dessen Kraftlinien als konzentrische Kreise um den Draht dargestellt werden können. So ist auch das Magnetfeld eines Dipols aufgebaut. Es bestehen aber wesentliche Unterschiede zum Magnetfeld eines von Gleichstrom durchflossenen Leiters.

Das magnetische Feld ist in der Mittelebene des Dipols am stärksten und nimmt nach seinen Enden hin ab (Bild 97/1). Es ist ein magnetisches Wechselfeld, das heißt, das Feld wechselt ständig seine Richtung (Bild 97/2), da der Strom im Dipol periodisch seine Richtung ändert.

Das magnetische Wechselfeld breitet sich radial vom Dipol aus.

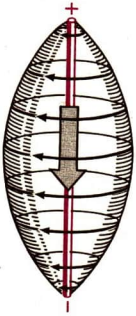


Bild 97/1 Verteilung der magnetischen Feldlinien am Dipol (schematisch)

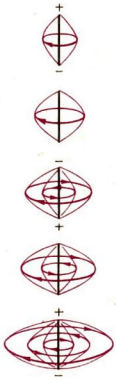


Bild 97/2 Die Richtung des magnetischen Wechselfeldes am Dipol und seine Ausbreitung in den Raum (schematisch). Im Unterschied zu Bild 97/1 sind nur die Kraftlinien in der Mittelebene gezeichnet

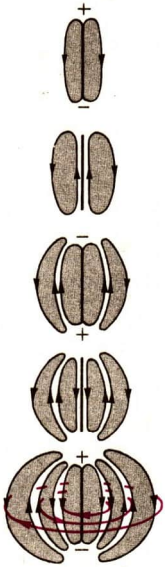
5.2. Der elektrische Anteil des Dipolfeldes

In den Dipolenden wechseln periodisch die Ladungen. Die elektrischen Feldlinien verlaufen von einem Dipolende zum anderen. Das elektrische Feld eines Dipols ist ein elektrisches Wechselfeld, das heißt, die Feldlinien wechseln periodisch ihre Richtung, da die Dipolenden ihre Ladungen ständig austauschen (Bild 98/1). Die elektrischen Feldlinien breiten sich radial vom Dipol aus und lösen sich dabei vom Dipol ab. Dadurch bilden sich geschlossene elektrische Feldlinien aus.

5.3. Das elektromagnetische Feld eines Dipols

Entscheidend für das Ablösen elektromagnetischer Wellen vom Dipol ist die Tatsache, daß das magnetische und das elektrische Wechselfeld sich gegenseitig durchdringen und miteinander verknüpft sind. Die magnetischen Kraftlinien umschlingen die elektrischen und umgekehrt (letzte Phase des Bildes 98/1). Beide Wechselfelder können nicht für

Bild 98/1 Die Richtung der elektrischen Kraftlinien eines Dipols und ihre Ausbreitung in den Raum (schematische Schnittzeichnung, letzte Phase mit magnetischem Feld dargestellt)



sich allein existieren, sondern **nur in ihrem Zusammenwirken.** Elektromagnetische Wellen entstehen aus einer derartigen Verknüpfung von elektrischen und magnetischen Wechselfeldern, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.
Da magnetische und elektrische Felder nicht eines stofflichen Trägers bedürfen, breiten sich die elektromagnetischen Wellen auch im Vakuum aus.

● *Was beweisen die Funkverbindungen zwischen den Kosmonauten bei den sowjetischen Gruppenflügen?*

Auch ein schwingender Dipol ist gedämpft. Hauptursache der Dämpfung ist bei einem offenen Schwingkreis die Abstrahlung der Energie, die durch das elektromagnetische Feld in den Raum hinaus übertragen wird.
Das Gebiet der elektromagnetischen Wellen umfaßt alle Erscheinungen, bei denen ein Energietransport durch Wellen erfolgt und wobei als Medium kein fester, flüssiger oder gasförmiger Körper vorhanden sein muß. Dazu zählen u. a. Lichtwellen, Röntgenwellen, Wärmewellen und Hertzsche Wellen.

● *Welche Wellen übertragen Energie nur durch ein Medium?*

Die Hertzschen Wellen stellen also nur ein Teilgebiet aus dem gesamten Gebiet der elektromagnetischen Wellen dar.

Unter elektromagnetischen Wellen versteht man Schwingungen von elektrischen und magnetischen Feldern, die miteinander verknüpft sind und die sich mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum ausbreiten. Dabei wird Energie übertragen. Ihre Ausbreitung erfolgt auch im Vakuum.

6. Der UKW-Empfangsdipol

Der Dipol in Bild 94/1 ist als Sendedipol wenig geeignet, da er durch die Lampe zusätzlich stark gedämpft wird. Man verwendet deshalb als Sendedipol besser einen einfachen Stabdipol (Bild 99/1). Stellt man in einiger Entfernung parallel zu ihm einen Lämpchendipol auf, so zeigt der angeschlossene Oszillograf, daß vom Sendedipol Wellen ausgestrahlt und vom Empfangsdipol aufgenommen werden. Die Lampe würde allerdings erst dann leuchten, wenn man einen Generator hoher Leistung verwendete. Der Grund dafür ist, daß der Empfangsdipol nur einen sehr kleinen Teil der in den Raum um den Sendedipol

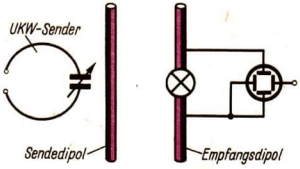


Bild 99/1 UKW-Generator mit angekoppeltem Sendedipol und einem zweiten Dipol als Empfangsantenne. Der Oszillograf zeigt den durch die Lampe fließenden geringen Strom an

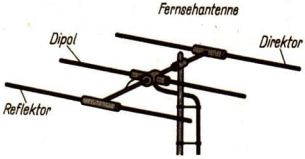


Bild 99/2 Offener oder gestreckter Dipol Reflektor und Direktor verbessern auf Grund der Reflexion den Empfang der Hertzschen Wellen

ausgestrahlten Energie erhält. Die elektromagnetischen Wellen werden im Empfangsdipol wieder in elektromagnetische Schwingungen, d. h. in einen hochfrequenten Wechselstrom umgewandelt. Die Stromstärke ist aus dem obengenannten Grunde sehr klein, so daß man am Oszillografen eine hohe Verstärkung einstellen muß.

Antennen für UKW-Rundfunk- und Fernsehempfänger sind Dipolantennen. Die einfachste Antennenform bildet der *offene* oder *gestreckte Dipol*.

Für einen guten Rundfunk- oder Fernsehempfang ist es besonders wichtig, daß bei der Konstruktion und beim Aufstellen einer Dipolantenne die von den Wissenschaftlern erkannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten beachtet werden.
Für einen *gestreckten Dipol* gelten folgende *Regeln*:

1. Seine Länge muß auf die Wellenlänge der zu empfangenden Wellen abgestimmt sein, das heißt, er soll ein $\frac{\lambda}{2}$-Dipol sein.
2. Er muß parallel zum Sendedipol stehen.

Fragen und Aufgaben

1. Unterscheiden Sie zwischen einem geschlossenen und einem offenen Schwingkreis!
2. Wovon hängt die Eigenfrequenz eines offenen Schwingkreises ab?
3. Berechnen Sie die Wellenlängen, auf denen folgende Sender ihr Programm ausstrahlen:
   3.1. Deutschlandsender, Sender Berlin: $f = 185$ kHz,
   3.2. Deutscher Fernsehfunk, Sender Brocken – Kanal 6: $f = 182{,}25$ MHz.
4. Berechnen Sie die Sendefrequenz für folgende Sender:
   4.1. Berliner Rundfunk, Sender Karl-Marx-Stadt: $\lambda = 498$ m,
   4.2. Deutscher Fernsehfunk, Sender Inselsberg – Kanal 5: $\lambda = 1{,}71$ m.
5. Berechnen Sie die Länge eines gestreckten Dipols für den Empfang des Fernsehsenders Mahrlow (Kanal 8, $f = 196{,}25$ MHz)!
6. Die Länge eines gestreckten Dipols für Fernsehempfang beträgt etwa 81 cm. Bestimmen Sie seine Resonanzfrequenz!
7. Mit welchen Geräten kann man die Spannungs- bzw. die Stromstärkeverteilung in einem schwingenden Dipol untersuchen?

8. Erläutern Sie, was man unter elektromagnetischen Wellen versteht!
9. Begründen Sie die Unterschiede in der Dämpfung zwischen einem geschlossenen und einem offenen Schwingkreis!
10. Welche physikalischen Erscheinungen gehören zu den elektromagnetischen Wellen?
11. Begründen Sie nach Bild 100/1 mit den Gesetzmäßigkeiten der Induktion, in welcher Stellung die Rahmenpeilantenne (1) ein Minimum der vom Sender (2) ausgestrahlten Energie aufnimmt.

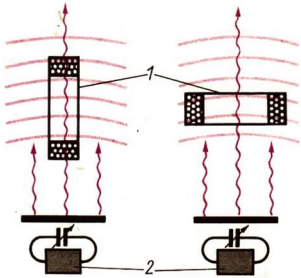


Bild 100/1

ZUSAMMENFASSUNG

Durch einen offenen Schwingkreis werden elektromagnetische Schwingungen in elektromagnetische Wellen umgewandelt.

Beschreiben Sie, wie sich die Wirkung des magnetischen und des elektrischen Feldes beim Übergang vom geschlossenen zum offenen Schwingkreis verändert!

Für die elektromagnetischen Wellen gilt die Grundgleichung der Wellenlehre.

Nennen Sie die Wellenbereiche der Hertzschen Wellen und ordnen Sie diese nach steigenden Frequenzen!

Bei höchstfrequenten Schwingungen wird der offene Schwingkreis zu einem Stabdipol.

Wie kann man die Eigenfrequenz eines Stabdipols verändern?

Die Werte der Spannung beziehungsweise der Stromstärke sind beim schwingenden Stabdipol nicht an allen Stellen gleich.

Beschreiben Sie an Hand einer Skizze, an welchen Stellen des Dipols die Spannung und die Stromstärke null sind beziehungsweise ein Maximum besitzen!

Das elektrische Feld eines Dipols besteht aus einem elektrischen und aus einem magnetischen Anteil.

Demonstrieren Sie an einem Stab, in welche Richtungen sich bei einem waagerecht liegenden Stabdipol die elektrischen und magnetischen Kraftlinien in den Raum ausbreiten!

Der Stabdipol kann sowohl als Sendeantenne wie auch als Empfangsantenne für ultrakurze Wellen dienen.

Welche Bedingungen sind bei der Aufstellung eines gestreckten Dipols als UKW-Empfangsantenne zu beachten?

Eigenschaften Hertzscher Wellen

Im VEB Funkwerk Berlin-Köpenick wurde eine dreh- und schwenkbare Kurzwellenrichtantenne entwickelt. Sie dient in Verbindung mit einem Sender von 150 kW Leistung zur Ausstrahlung von Kurzwellensendungen. Da die Hauptstrahlrichtungen der Antenne in vertikaler und horizontaler Richtung verstellbar sind, kann mit ihr praktisch jedes Gebiet der Erde mit Kurzwellenprogrammen versorgt werden.

Auf Seite 92 wurde erwähnt, daß bereits Heinrich Hertz einige Welleneigenschaften der von ihm entdeckten Wellen experimentell nachweisen konnte. Neben Eigenschaften, in denen die Hertzschen Wellen mit anderen elektromagnetischen Wellenformen übereinstimmen, zeigen sie auch abweichende Merkmale.

● *Beschreiben Sie die Eigenschaften mechanischer Wellen: Reflexion, Interferenz, stehende Wellen.*

1. Die Absorption

Hält man zwischen den Sende- und den Empfangsdipol (Bild 101/2) Platten aus Pappe, Holz, Vinidur oder anderen nichtleitenden Stoffen, so wird der vom Oszillografen angezeigte Empfang nur wenig vermindert.
Hertzsche Wellen können daher auch mit Innenantennen empfangen werden.
Hält man an die gleiche Stelle zwischen die beiden Dipole Bleche oder Drahtnetze aus Stahl, Aluminium oder anderen Metallen, so wird der Empfang sehr stark geschwächt.

Hertzsche Wellen durchdringen Isolatoren und werden von Leitern absorbiert[1].

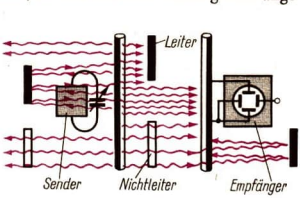


Bild 101/2 Sende- und Empfangsdipol zum Nachweis einiger Eigenschaften der Hertzschen Wellen

[1] absorbieren (lat.): aufsaugen, einsaugen

2. Reflexion

Werden die Platten aus den isolierenden Stoffen hinter dem Sende- oder dem Empfangsdipol angeordnet, so wird der Empfang nur wenig verändert.

Isolierende Stoffe reflektieren die Hertzschen Wellen nur in geringem Maße.

Hält man die Metallbleche hinter den Sende- oder den Empfangsdipol, dann treten große Änderungen in der Empfangsstärke auf.

Elektrische Leiter reflektieren die Hertzschen Wellen sehr gut.

Zum Verständnis der Wirkungsweise zusammengesetzter Dipolantennen ist folgender **Reflexionsversuch** geeignet:

17

V Man faßt einen Metallstab (z. B. einen Stativstab) von der ungefähren Länge des Sendedipols in der Mitte und hält ihn nacheinander an die gleichen Stellen wie die Bleche parallel zum jeweiligen Dipol. Man stellt eine etwa gleich starke Wirkung wie mit dem Metallblech fest.

Ein Metallstab wirkt an einem Sende- oder Empfangsdipol als Reflektor.

● *Erläutern Sie die Wirkung eines parabolischen Drahtnetzes, in dessen Brennpunkt ein Dipol steht!*

3. Die Ausbreitung Hertzscher Wellen

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

3.1. Ausbreitung als Bodenwelle

Erdet man einen offenen Schwingkreis in der Mitte, so nimmt die Erde die untere Hälfte des elektromagnetischen Feldes auf. Die untere Antennenhälfte ist dann überflüssig geworden, so daß die Abmessungen der Antennenanlage kleiner sein können als ohne Erdung. Die elektrischen Feldlinien enden senkrecht auf der Erdoberfläche und die Wellen folgen als sogenannte *Bodenwellen* der Krümmung der Erde (Bild 102/1). Auf diese Weise breiten sich nur Funkwellen größerer Wellenlänge aus.

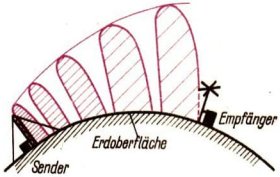


Bild 102/1 Ausbreitung Hertzscher Wellen als Bodenwelle

3.2. Ausbreitung als Raumwelle

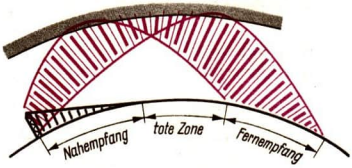


Bild 103/1 Ausbreitung Hertzscher Wellen als Raumwelle

Hertzsche Wellen mit einer kürzeren Wellenlänge folgen der Krümmung der Erdoberfläche nicht in dem Maße wie die langwelligeren. Aus diesem Grund ist die Zone des *Nahempfangs* mit der Bodenwelle ziemlich klein. Ein *Fernempfang* ist mit ihr nicht mehr möglich. Neben der Bodenwelle werden jedoch noch Hertzsche Wellen in den Raum hinausgestrahlt. Man hat festgestellt, daß in den Höhen von 100 km bis 400 km, in der *Ionosphäre*, elektrisch leitende Schichten existieren, die Hertzsche Wellen durch *Reflexion* und *Brechung* wieder zur Erde zurückwerfen können. Wellen, die sich auf diese Art als *Raumwellen* ausbreiten, erzielen eine große Reichweite (Bild 103/1).
Der Grad der Ionisierung der Luftschichten der Atmosphäre wird durch die Sonneneinstrahlung stark verändert. Infolgedessen treten zwischen Tag und Nacht große Unterschiede in der Ausbreitung durch Raumwellen auf.

3.3. Ausbreitung durch direkte Wellen

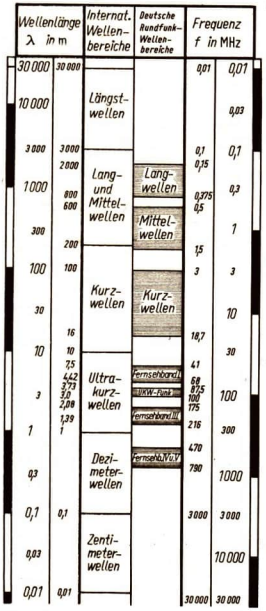
Ultrakurze Wellen können sich im allgemeinen weder als Boden- noch als Raumwelle ausbreiten. Sie breiten sich ähnlich wie Licht durch *direkte Strahlung* aus. Die Reichweite liegt daher im wesentlichen innerhalb der optischen Sichtweite. Durch Beugung kann sie noch etwas erhöht werden.

Fragen und Aufgaben

1. Der Besitzer eines Kofferempfängers berichtet, daß sein Gerät im Innern eines „Wartburg" und eines „Trabant" unterschiedlichen Empfang zeigt. Erklären Sie diese Beobachtung!
2. Welche Stoffe eignen sich zur Abschirmung von Schwingkreisen gegenüber hochfrequenten und gegenüber niederfrequenten Schwingungen?
3. Worauf sind „Geisterbilder" beim Fernsehen zurückzuführen?
4. Erklären Sie, wie es möglich ist, daß man mit einer Kurzwellenantenne praktisch jedes Gebiet der Erde erreichen kann!
5. Stellen Sie fest, in welchen Wellenbereichen die in den Aufgaben 3. und 4. auf Seite 99 aufgeführten Sender ausstrahlen!

4. Wellenbereiche und Ausbreitungseigenschaften

Die folgende Übersicht gibt einen Überblick über die Frequenzen und die Wellenlängen der einzelnen Wellenbereiche und über die charakteristischen Ausbreitungseigenschaften.



Ausbreitungseigenschaften
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.

ZUSAMMENFASSUNG

Isolierende Stoffe beeinflussen die Ausbreitung der Hertzschen Wellen wenig, leitende Stoffe stark.
Geben Sie Beispiele an für die Wirkung verschiedener Stoffe auf die Ausbreitung von Hertzschen Wellen!

Hertzsche Wellen können sich als Bodenwelle, als Raumwelle und als direkte Welle ausbreiten.
Wie ist die Art der Ausbreitung von der Wellenlänge abhängig?

Die Wellenbereiche der Hertzschen Wellen zeigen unterschiedliche Ausbreitungseigenschaften.
Geben Sie einen Überblick über die Abhängigkeit der Reichweite von der Wellenlänge!

Die drahtlose Nachrichtentechnik

Funkraum auf dem Fährschiff „Saßnitz". Für die Sicherheit in der Schiffahrt sind die Hertzschen Wellen von besonderer Bedeutung. Sie erlauben einen ständigen Nachrichtenaustausch zwischen Land und Schiff und von Schiff zu Schiff. Er wird entweder als Telegrafieverkehr oder als Sprechfunkverkehr durchgeführt. Vollautomatische Alarmzeichenempfänger überwachen die internationale Seenotfrequenz 500 kHz und lösen bei Empfang des Notzeichens SOS selbsttätig Alarm aus.

1. Das Grundproblem des Sendens

Will man die Hertzschen Wellen für die Nachrichtenübermittlung ausnutzen, ergeben sich zwei grundsätzliche 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 eines Lautsprechers diesen schnellen Schwingungen nicht folgen kann und das menschliche Ohr derartig hohe Frequenzen auch nicht wahrnimmt.
2. *Niederfrequente mechanische Schwingungen* der Sprache und der Musik können in entsprechende *elektromagnetische Schwingungen umgewandelt* werden. Diese erzeugen jedoch wegen der niedrigen Frequenz keine Hertzschen Wellen und können folglich nicht gesendet werden.

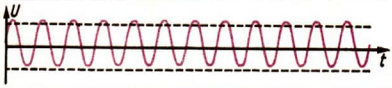
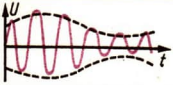
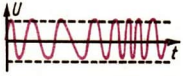
Die Überwindung dieser Schwierigkeiten gelingt, wenn man diese beiden Frequenzen in geeigneter Weise vereinigt. *Man prägt die tonfrequenten Schwingungen den hochfrequenten auf.* Bei der Aussendung „tragen" die Hf-Schwingungen die Tonfrequenz. Deshalb bezeichnet man die Hochfrequenz als *Trägerfrequenz.*

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

Man kennt in der Funktechnik mehrere Arten der Modulation. In der folgenden Tabelle werden die beiden häufigsten Arten gegenübergestellt – die *Amplituden-* (AM) und die

Frequenzmodulation (FM): Bei ihnen *verändert man die Amplitude oder die Frequenz im Rhythmus der Niederfrequenz.* In den später folgenden Abschnitten wird nur die einfachere Amplitudenmodulation betrachtet.

Tabelle 6: Arten der Modulation

Trägerfrequenz		
Tonfrequenz		
Arten der Modulation	Amplitudenmodulation	Frequenzmodulation
Schematische Darstellung		
Es bleibt konstant	Frequenz des Trägers	Amplitude des Trägers
Es verändert sich im Takt der Niederfrequenz	Amplitude des Trägers	Frequenz des Trägers
Anwendung	Rundfunk auf LW, MW, KW; Bildsignal beim Fernsehen	UKW-Rundfunk

2. Sender für Telegrafie und Telefonie

2.1. Der Telegrafiesender

Im Kurzwellenbereich eines Rundfunkempfängers kann man manche 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 Trägerfrequenz mit den tonfrequenten Schwingungen moduliert. Nach weiterer Verstärkung in einer *Endstufe* führt man die modulierte Trägerfrequenz der *Antenne* zu. Die Ausstrahlung erfolgt im Takt der Morsezeichen. Für einen Telegrafiesender der besprochenen Art ergibt sich das Blockschema nach Bild 107/1.

2.2. Der Telefoniesender

Der Sender für *drahtlose Telefonie* ist ähnlich aufgebaut wie der auf S. 106 beschriebene Telegrafiesender. Der wesentlichste Unterschied besteht darin, daß an die Stelle des Tonfrequenzgenerators ein Tonfrequenzverstärker tritt. In ihm werden die vom Mikrofon erzeugten Stromschwankungen verstärkt, bevor man sie der Modulationsstufe zuführt.

Das Blockschema eines Telefoniesenders geht aus dem Blockschema eines Telegrafiesenders hervor, wenn man die in Bild 107/1 eingerahmte Stufe durch die Stufe des Bildes 107/2 ersetzt.

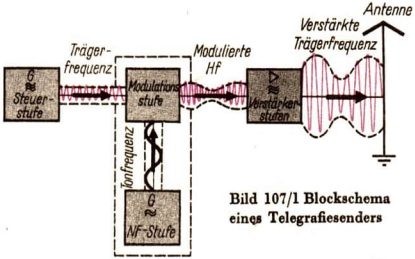


Bild 107/1 Blockschema eines Telegrafiesenders

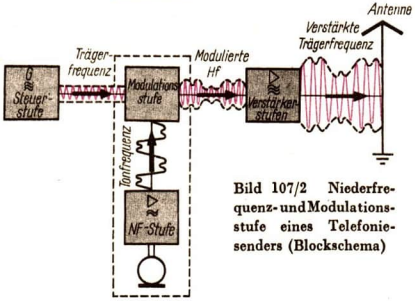


Bild 107/2 Niederfrequenz- und Modulationsstufe eines Telefoniesenders (Blockschema)

Der Aufbau eines *Rundfunksenders* ist grundsätzlich der gleiche wie beim Telefoniesender. Bei Musiksendungen muß jedoch ein wesentlich größerer Frequenzbereich der tonfrequenten Schwingungen übertragen werden, damit die Eigenarten in der Klangfarbe bei den verschiedenen Musikinstrumenten nicht verlorengehen. Daher muß man Geräte mit komplizierteren Schaltungen verwenden. Außerdem nehmen die Anzahl der Stufen und die Ausmaße der Anlagen mit der viel höheren Ausgangsleistung beträchtlich zu. Die Bilder 107/3 und 107/4 geben eine Vorstellung von der Größe der Geräte und Anlagen.

Bei Kurzwellen und Ultrakurzwellen kommt man mit kleineren Sendeanlagen aus, da die erforderliche Ausgangsleistung nicht so groß zu sein braucht.

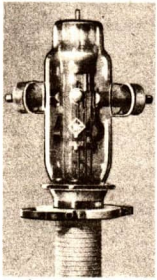


Bild 107/3 Wassergekühlte Senderöhre

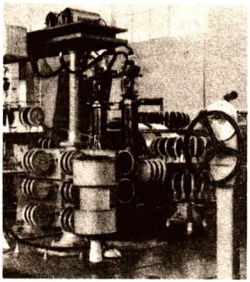


Bild 107/4 Hf-Endstufe eines Mittelwellensenders von 250 kW Leistung

3. Die Grundprobleme des Empfanges

Auf die Antenne eines Empfängers wirken stets die Funkwellen vieler Sender ein. Führte man diese Vielzahl von Schwingungen nach entsprechender Umformung einem Lautsprecher zu, dann würde man die Programme aller Sender, die an dem betreffenden Ort empfangen werden können, gleichzeitig hören. Daraus ergibt sich die erste Aufgabe:

> Aus der großen Zahl der einfallenden Funkwellen muß die gewünschte Wellenlänge herausgesondert werden.

Dies geschieht durch Ausnutzung der Resonanz. Man führt das Gemisch der empfangenen Antennenwechselströme einem Schwingkreis zu, dessen Eigenfrequenz auf die Frequenz des gewählten Senders abstimmbar ist. Dieser *Resonanz-* oder *Empfangskreis* schwingt dann im Rhythmus der modulierten Trägerfrequenz des betreffenden Senders und unterdrückt zum größten Teil alle anderen Frequenzen. Um viele Sender getrennt empfangen zu können, muß die Eigenfrequenz des Empfangskreises in einem großen Bereich veränderlich sein – man muß den *Schwingkreis abstimmen* können. Dies geschieht mit Hilfe eines Drehkondensators oder auch mit Spulen veränderlicher Induktivität.

Die so ausgewählten modulierten hochfrequenten Schwingungen können jedoch immer noch nicht im Lautsprecher hörbar gemacht werden. Dafür gibt es zwei Gründe:

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

Daraus ergibt sich die nächste Aufgabe:

> Die Tonfrequenz, die im Sender dem hochfrequenten Träger aufmoduliert wurde, muß wiedergewonnen und anschließend verstärkt werden.

Den Vorgang der Abtrennung der Tonfrequenz von der Trägerfrequenz nennt man *Demodulation*.

Das *Prinzip der Demodulation* von amplitudenmodulierten Schwingungen besteht darin, daß man den *hochfrequenten Wechselstrom* (Bild 108/1a) *durch einen Einweggleichrichter in pulsierenden Gleichstrom* verwandelt. Obwohl der erhaltene Gleichstrom noch im Rhythmus der Hochfrequenz pulsiert (Bild 108/1b), spricht ein Lautsprecher darauf an. Wie der Zeiger eines Weicheisen-Meßinstrumentes folgen die beweglichen

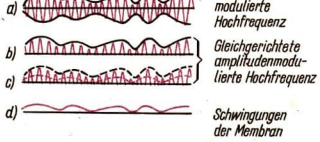


Bild 108/1 Prinzip der Demodulation von amplitudenmodulierten Schwingungen

Teile des Lautsprechers einem mittleren Werte zwischen Null und der Amplitude (Bild 108/1c). Die Membran führt daher tonfrequente Schwingungen aus (Bild 108/1d). Als Gleichrichter zur Demodulation amplitudenmodulierter Schwingungen finden unter anderem Verwendung:

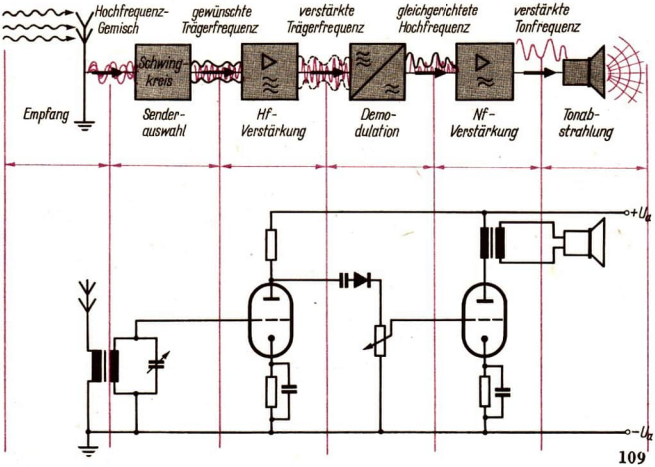
Germaniumdiode (früher Kristalldetektor), vergleiche Abschnitt Leitungsvorgänge in Festkörpern (S. 32);
Hochfrequenz-Diode, eine spezielle Gleichrichterröhre;
Audionschaltung, in der eine Triode als Hf-Gleichrichter wirkt.

4. Beispiel eines einfachen Empfängers

In einem einfachen oder *Geradeausempfänger* durchläuft die empfangene Energie nacheinander folgende Stufen (Bild 109/1):

Die von der *Antenne* aufgenommene Feldenergie wird dem *Empfangskreis* zugeführt.
Die *ausgewählten Schwingungen* der gewünschten Senderfrequenz werden im allgemeinen zuerst *verstärkt* und anschließend *gleichgerichtet*.
Die gewonnene *Tonfrequenz* muß noch einmal verstärkt werden, bevor sie im Lautsprecher in mechanische Schwingungen umgewandelt werden kann.

Bild 109/1 Blockschema und Schaltbild eines einfachen Rundfunkempfängers



Ein moderner Rundfunkempfänger (Überlagerungsempfänger) ist wesentlich komplizierter aufgebaut. Er enthält u. a. Einrichtungen zur Verbesserung der Trennschärfe, zur Erleichterung der Abstimmung, zur Verbesserung des Klanges und zur Erhöhung der abgegebenen Leistung.

5. Die Bildaufnahme beim Fernsehen

5.1. Das physikalische Grundproblem

Zwischen der elektrischen Übertragung eines Tones und eines Bildes besteht ein grundlegender Unterschied. Beim Hören eines Tones empfängt unser Ohr zeitlich aufeinanderfolgende Schwankungen des Luftdruckes. Durch ein Mikrofon lassen sich diese sofort in aufeinanderfolgende Stromstärkeschwankungen umwandeln.
Beim Betrachten eines Bildes empfängt unser Auge alle Bildeindrücke gleichzeitig. Will man den Bildinhalt in Stromstärkeschwankungen umwandeln, dann ist es am günstigsten, ihn zuvor wie beim Lesen eines Textes in eine zeitliche Aufeinanderfolge von Bildpunkten zu zerlegen (Bildzerlegung). Dazu ist das Bild in Zeilen zu zerlegen. Jede Zeile besteht aus einer Folge von hellen und dunklen Bildpunkten. Um einen guten Bildeindruck zu erhalten, muß die Zeilenzahl möglichst hoch sein. Die Zeilen werden nacheinander abgetastet.

5.2. Die Entwicklung des Fernsehens

Am Anfang des Fernsehens verwendete man zur Bildabtastung mechanische Methoden. Die erste Fernseh-Bildübertragung wurde 1924 durch den britischen Fernsehpionier I. L. BAIRD durchgeführt. In Berlin wurden die ersten Fernsehbilder 1928 übertragen. Man benutzte hierbei die schon 1884 von dem deutschen Ingenieur PAUL NIPKOW erfundene Lochscheibe (Bild 110/1). Es wurde zunächst mit 30 Zeilen gearbeitet. Das wiedergegebene Bild war noch sehr grob, zu klein und sehr lichtschwach. Bald war man in dem Bemühen, die Bildqualität durch Erhöhen der Zeilenzahl zu verbessern, an der Grenze der technischen Möglichkeiten der mechanischen Bildabtastung angelangt.
Nachdem er die Fleckhelligkeit der Katodenstrahlröhre entscheidend gesteigert hatte, gelang dem deutschen Physiker MANFRED VON ARDENNE am 14. Dezember 1930 in Berlin-Lichterfelde die erste vollelektronische Bildübertragung der Welt mit je einer Elektronenstrahlröhre auf der Sender- und Empfängerseite. Im Oktober 1931 wurde dieses aussichtsreiche Verfahren auf der Funkausstellung in Berlin der Öffentlichkeit zum ersten Male mit großem Erfolg vorgeführt. Auf Grund dieser Vorführungen stellten sich alle am Fernsehen interessierten Kreise in den europäischen Ländern innerhalb eines Jahres auf die elektronische Bildzerlegung um. 1936 auf der Olympiade in Berlin wurden zum ersten Male große Sportveranstaltungen im Fernsehen übertragen. Durch den zweiten Weltkrieg wurden in Deutschland die Arbeiten an der Vervollkommnung des zivilen Fernsehens unterbrochen.

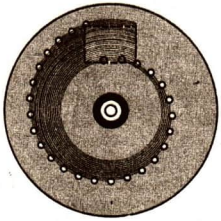


Bild 110/1 NIPKOW-Lochscheibe zur mechanischen Bildabtastung

5.3. Die Bildaufnahme durch eine moderne Fernsehkamera

Der Hauptbestandteil einer Fernsehkamera ist die *Bildaufnahmeröhre*, eine Kombination von Braunscher Röhre und Fotozelle. Das erste derartige Gerät war das von dem russischen Ingenieur VLADIMIR ZWORYKIN 1918 in den USA erfundene *Ikonoskop*, das ab 1934 für den praktischen Sendebetrieb eingesetzt werden konnte. Im Laufe der Zeit wurden noch weitere Arten von Bildaufnahmeröhren entwickelt. Man sucht die Röhren immer weiter zu verkleinern, sowie lichtempfindlicher und robuster zu machen. Das ist vor allem für das industrielle Fernsehen wichtig.
Die Wirkungsweise einer Bildaufnahmeröhre soll am Beispiel des *Endicons* erläutert werden (Bild 111/1 und 111/2).

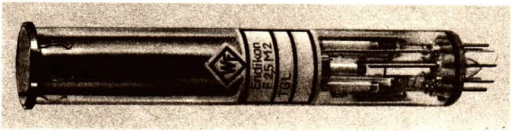


Bild 111/1 Endicon für eine industrielle Fernsehkamera

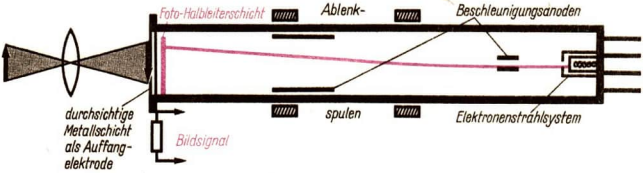


Bild 111/2 Endicon im Schnitt (schematisch). Auf der Stirnfläche ist innen eine dünne, noch lichtdurchlässige Metallschicht-Auffangelektrode aufgedampft. Darauf befindet sich eine in viele kleine Zellen zerlegte Schicht eines Halbleiterstoffes, der bei Belichtung seinen elektrischen Widerstand verringert

Das zu übertragende Bild wird auf die Halbleiterschicht geworfen. Sie leitet an den hellen Stellen sehr gut, an den dunklen Bildstellen nur wenig. Dadurch gelangen bei der zeilenweisen Abtastung der Halbleiterschicht durch einen Elektronenstrahl unterschiedliche Ladungsmengen zur Auffangelektrode. Diese Stromstärkeschwankungen entsprechen den Helligkeitswerten der Bildpunkte.

6. Die Bildwiedergabe

6.1. Physikalische Probleme

Die übertragenen Stromstärke- und Spannungsschwankungen müssen im Empfänger wieder in Helligkeitsunterschiede der Bildpunkte umgesetzt werden. Dazu benutzte man zu Beginn des Fernsehens Glimmlampen. Die Bildpunkte müssen außerdem wieder zu Zeilen und die Bildzeilen zum Bild zusammengesetzt werden. Dafür kann man grundsätzlich das gleiche Verfahren benutzen, mit dem man auf der Senderseite die Bildabtastung durchführt. Heute arbeitet man nur noch mit der Braunschen Röhre.
Das Abtasten der Bildvorlage in der Bildaufnahme-Röhre und das Zusammensetzen der Bildpunkte zum fertigen Bild müssen nicht nur mit der gleichen Geschwindigkeit ablaufen, sondern auch die Zeitpunkte des Zeilen- und Bildwechsels müssen genau übereinstimmen. Man sagt, Bildzerlegung und Bildzusammensetzung müssen in einem *vollkommenen Gleichlauf* oder *synchron* erfolgen. Dies wird dadurch erreicht, daß der Fernsehsender außer den Bildsignalen noch zusätzliche Signale, die *Gleichlauf-* oder *Synchronisierimpulse* aussendet. Dadurch wird der Elektronenstrahl in der Empfängerröhre im gleichen Takt wie der Elektronenstrahl bei der Bildaufnahme gesteuert.
Für die Übertragung bewegter Vorgänge nutzt man wie beim Film die Trägheit des Auges aus. Man überträgt in der Sekunde 25 Bilder. Dadurch kann unser Auge die Einzelbilder nicht mehr getrennt wahrnehmen, sondern es entsteht der Eindruck einer fließenden Bewegung. Die Bildwechselfrequenz von 25 Hz ist in vielen Ländern einheitlich festgelegt, ebenso die Zeilenzahl von 625 Zeilen. Dadurch wird der internationale Programmaustausch erleichtert (z. B. INTERVISION der sozialistischen Länder).

6.2. Der Bildteil eines Fernsehempfängers

Neben einem gemeinsamen Höchstfrequenzteil besteht ein Fernsehempfänger aus einem *Ton-* und aus einem *Bildteil*. Der Tonteil gleicht im wesentlichen einem normalen Empfänger für frequenzmodulierte ultrakurze Wellen.
Der Bildteil ist wesentlich komplizierter. Daher seien lediglich folgende *Hauptbestandteile* genannt:

> *Braunsche Röhre* mit großem Bildschirm; *Hochspannungserzeuger* für die Anodenspannung der Bildröhre; *2 Generatoren* zur Erzeugung der Ablenkspannungen für die waagerechte (Zeilen-) bzw. senkrechte (Bild-) Ablenkung des Elektronenstrahls.

Der Weg der von der Antenne aufgenommenen Signale wird in Bild 113/1 veranschaulicht.
Das Bildsignal steuert über den WEHNELT-Zylinder der Braunschen Röhre die Helligkeit des Leuchtflecks.
Die Gleichlaufimpulse steuern die beiden Ablenkgeneratoren und sorgen dafür, daß der Elektronenstrahl der Empfänger-Bildröhre vollkommen synchron mit dem Elektronenstrahl der Bildaufnahmeröhre im Studio geführt wird.

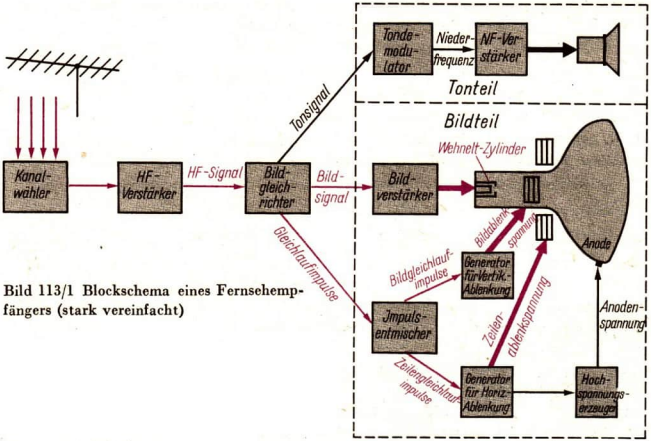


Bild 113/1 Blockschema eines Fernsehempfängers (stark vereinfacht)

Fragen und Aufgaben

1. Unterscheiden Sie Amplituden- und Frequenzmodulation!
2. Beschreiben Sie an Hand einer grafischen Darstellung die Amplitudenmodulation!
3. Erläutern Sie den wesentlichsten Unterschied zwischen Telegrafie- und Telefoniesender!
4. Erläutern Sie das Prinzip der Demodulation amplitudenmodulierter Schwingungen!
5. Welche Eigenschaften der Katodenstrahlen werden bei einer Bildröhre angewendet?
6. Welcher Unterschied besteht bei der elektrischen Übertragung eines Bildes und eines Tones?
7. Vergleichen Sie Vor- und Nachteile der mechanischen und der elektronischen Bildabtastung!
8. Beschreiben Sie den Bau und die Wirkungsweise eines Endicons!
9. Geben Sie die heute übliche Zeilenzahl und die Bildwechselfrequenz an und berechnen Sie die Zeilenfrequenz!
10. Wie kommt der Eindruck bewegter Bilder zustande?
11. Aus welchen Hauptbauteilen besteht ein Fernsehempfänger?
12. Beschreiben Sie den Weg der verschiedenen Signale in einem Fernsehempfänger!

ZUSAMMENFASSUNG

Beim Modulieren werden die tonfrequenten Schwingungen dem hochfrequenten Träger aufgeprägt.

Begründen Sie die Notwendigkeit der Modulation!

In einem Funksender werden hochfrequente Schwingungen erzeugt, moduliert, verstärkt und von der Antenne in Hertzsche Wellen umgewandelt und abgestrahlt.

Beschreiben Sie die Aufgaben der einzelnen Stufen in Telegrafie- und in Telefoniesender!

Die wichtigsten Vorgänge in einem Rundfunkempfänger sind: Auswahl der gewünschten Senderfrequenz, Wiedergewinnung und Verstärkung der Tonfrequenz.

Beschreiben Sie die Vorgänge im einfachen Rundfunkempfänger an Hand eines Blockschemas!

Bei der Bildzerlegung wird das räumliche Nebeneinander der Bildpunkte zu einer zeitlichen Folge von Stromstärkeschwankungen umgewandelt.

Beschreiben Sie Verfahren zur Bildzerlegung!

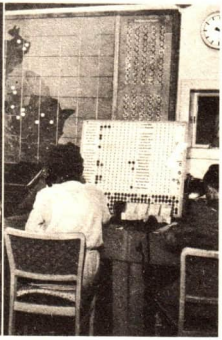
Bei der Bildwiedergabe wird die zeitliche Folge der Stromstärkeschwankungen des Bildsignals in ein räumliches Nebeneinander der Bildpunkte umgewandelt.

Beschreiben Sie, wie in einer Bildröhre die Zeilen und das Bild entstehen!

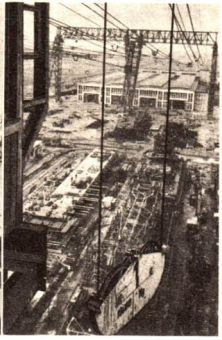
Bildzerlegung und Bildwiedergabe müssen vollkommen synchron geschehen.

Erläutern Sie, was der Begriff bedeutet und wie man beim Fernsehen die synchrone Führung des Elektronenstrahls erreicht! Warum ist sie notwendig?

1. Verkehrsfunk



Die Fahrzeuge der Deutschen Volkspolizei, des Deutschen Roten Kreuzes und der Feuerwehr sind durch Sprechfunk ständig von ihrer Leitstelle aus zu erreichen. Die Fahrzeuge und ihre Besatzungen können dadurch schnell an jeden Ort geleitet werden.

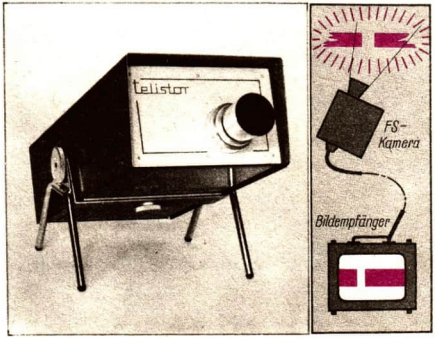


In der Industrie, bei der Montage schwerer, nur mit Kränen zu hebender Teile und bei Arbeiten an schwer zugänglichen unübersichtlichen Stellen werden Kranführer und andere Arbeitskräfte über Sprechfunk eingewiesen.

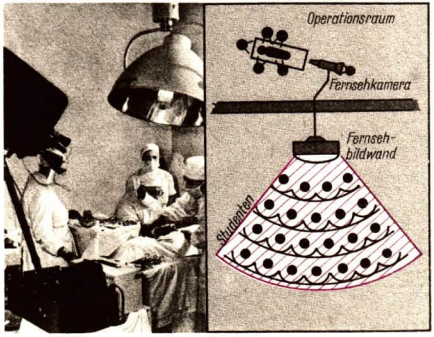
Anwendung der Nachrichtentechnik

In den Jahren, die seit den grundlegenden Entdeckungen von Heinrich Hertz, Alexander Popow, Alexander Meissner, Manfred von Ardenne und vieler anderer vergangen sind, ist das Gebiet der Hertzschen Wellen weitgehend für die technische Nutzung erschlossen worden. Heute wird überall dort, wo es auf eine schnelle, sichere und ortsunabhängige Nachrichtenübermittlung ankommt, der Funkverkehr mit Ultrakurzwellen und Kurzwellen erfolgreich angewendet.

2. Industrielles Fernsehen



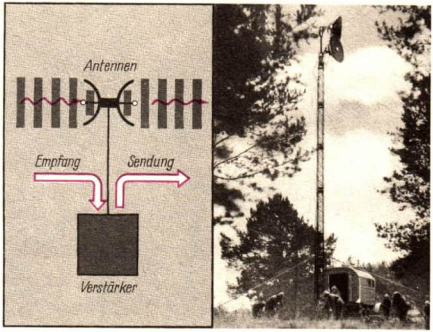
Beim industriellen Fernsehen wird nach den gleichen Prinzipien wie beim Fernsehfunk gearbeitet. In den meisten Fällen werden die Bildsignale jedoch über ein Kabel direkt zum Empfangsverstärker geleitet. Ein Begleitton wird nur in besonderen Fällen übertragen.



In der Medizin nutzt man bei der Ausbildung von Ärzten besonders vorteilhaft das industrielle Fernsehen. Der Zuschauerkreis bei einer Operation wird durch den Einsatz einer Fernsehkamera und das in den Hörsaal übertragene Fernsehbild um ein Vielfaches vergrößert.

3. Richtfunk

Die drahtlose Übertragung von gleichzeitig eintausend Telefongesprächen oder Fernschreiben, mehreren Rundfunksendungen oder Fernsehsendungen ermöglicht eine Richtfunkstrecke. Unser Bild zeigt einen Ausschnitt aus einer Fernsehrichtfunkstrecke.

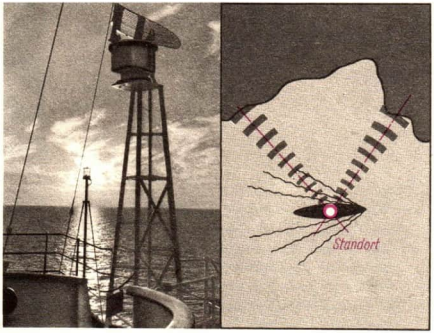


Relaisstationen, in denen das über die Richtfunkstrecke gesendete Programm aufgenommen und verstärkt weitergegeben wird, liegen in einem Abstand von 50 bis 60 km. Durch die Verwendung von stark gebündelten (gerichteten) Dezimeterwellen kommt man mit einer niedrigen Sendeleistung von 2 W bis 5 W aus. Über Relaisstationen, die im Schwerefeld der Erde schweben, werden Programme um den Erdball gesendet.

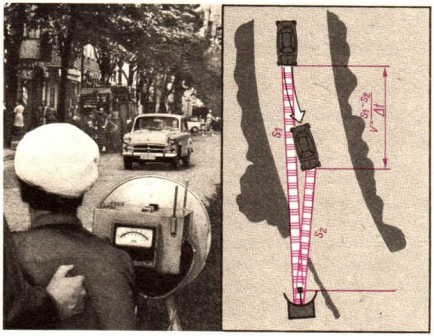
Von einem Sender wird das über die Relaisstrecke gesendete Programm ausgestrahlt. Dadurch ist eine Funkverbindung über weite Strecken unter geringem Energie- und Materialaufwand möglich. Fernsehen und Rundfunk, die Post, Staatsorgane und NVA benutzen zahlreiche Richtfunkstrecken.

4. Funkmeßverfahren

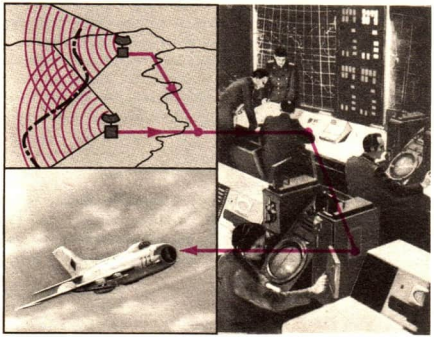
Hertzsche Wellen werden beim Auftreffen auf Hindernisse mehr oder weniger gut reflektiert. Mit Hilfe der Zeitdauer und der Ausbreitungsgeschwindigkeit kann man die von einem Wellenimpuls durchlaufene Strecke bestimmen. Dieses Verfahren wird *Richtstrahl-Radar-Verfahren* genannt. Standortbestimmungen und Entfernungsmessungen werden damit durchgeführt.



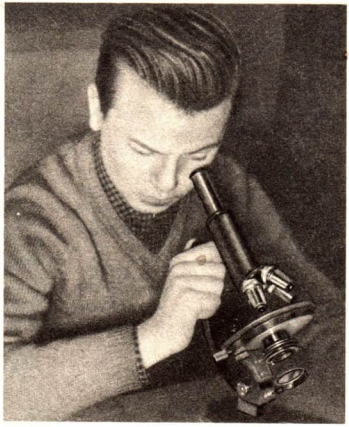
Das Richtstrahl-Radar-Verfahren wird auch bei bewegten Meßzielen angewendet, vor allem für Zwecke der Luftraumverteidigung, Satellitenvermessung und in der Verkehrsüberwachung. Die Differenz zwischen den Laufzeiten zweier ausgesendeter Wellenimpulse ist dabei der Maßstab der Geschwindigkeit, die auf dem Bildschirm angezeigt wird.



Panorama-Radar-Verfahren werden angewendet, um auf einem Bildschirm die gesamte Umgebung abzubilden. Die Wellenimpulse werden dabei von einer sich drehenden Antenne ausgesendet. Der Einsatz dieses Verfahrens erfolgt vorwiegend in der Seefahrt, im Luftverkehr und bei der militärischen Überwachung des Luftraumes.



Lichtausbreitung



Wenn man die Struktur der Stoffe untersucht, kann man sehr oft interessante physikalische Einzelheiten feststellen. Das Mikroskop ist uns bei solchen Untersuchungen ein unentbehrliches Hilfsmittel geworden, das wir im Unterricht und in der Arbeitsgemeinschaft benutzen. Im folgenden sollen die wichtigsten Gesetze der Lichtstrahlen und daran anschließend der Lichtwellen erörtert werden, die der Wirkungsweise vieler optischer Geräte zugrunde liegen.

Aus dem Physikunterricht sind uns bereits die geradlinige Ausbreitung, die Reflexion und die Brechung des Lichts bekannt. Diese Erscheinungen und die Wirkungsweise einiger optischer Geräte lassen sich mit der Modellvorstellung vom **Lichtstrahl** ausreichend und verständlich beschreiben. Man bezeichnet deshalb diesen Teil der Optik als das Gebiet der **Strahlenoptik.** Diese vereinfachte Darstellung versagt aber beispielsweise beim Erklären von Farberscheinungen. Deshalb erfassen wir die Wirklichkeit umfassender, wenn wir das Licht als Wellenerscheinung und zwar ebenso wie die Hertzschen Wellen als elektromagnetische Wellen betrachten.

1. Lichtquellen

Wir können Körper nur sehen, wenn von ihnen Licht ausgeht, das in unser Auge gelangt. Durch Reizung der Sehnerven wird die optische Wahrnehmung hervorgerufen. Dabei ist es gleichgültig, ob der Körper selbst leuchtet oder ob er das Licht reflektiert.
Wird ein Körper erwärmt, beginnt er bei Temperaturen über 500 °C zu glühen. Solche Lichtquellen bezeichnet man als **Temperaturstrahler.** Es gibt aber auch Stoffe, die bereits weit unterhalb ihrer Glühtemperatur zum Leuchten angeregt werden können. Man bezeichnet diese Lichtquellen als **Kaltstrahler.**

● *Welche Beispiele für Kaltstrahler kennen Sie?*

Die Planeten sind beleuchtete Körper. Sie reflektieren einen Teil des Sonnenlichts, von dem sie getroffen werden. Die Sonne, alle übrigen Fixsterne und die Kometen sind natürliche Lichtquellen. Aus der Farbe des von ihnen ausgestrahlten Lichts und aus dessen Zusammensetzung kann man auf die Temperatur und den stofflichen Aufbau der Sternkörper schließen.

2. Die geradlinige Ausbreitung des Lichts

In einem *einheitlichen (homogenen) Medium* breitet sich das Licht nach allen Seiten geradlinig aus.

● *Bei welchen Erscheinungen beobachten wir die geradlinige Lichtausbreitung?*

Stellt man vor eine Lichtquelle eine Blende mit einer kleinen kreisförmigen Öffnung, so wird ein **Lichtbündel** ausgeblendet.
Bei optischen Versuchen benutzt man immer Lichtbündel, wenn der Verlauf einzelner **Lichtstrahlen** veranschaulicht werden soll.
Lichtstrahlen werden durch eine Gerade dargestellt. Damit können viele optische Erscheinungen zeichnerisch einfach beschrieben werden. Sie besitzen keine räumliche Ausdehnung, was man in der Praxis natürlich nie erreichen kann. Jedes Lichtbündel besteht aus unendlich vielen Lichtstrahlen. Wenn wir das Licht als Wellenerscheinung betrachten, gibt der Lichtstrahl als Wellennormale die Ausbreitungsrichtung der Energie an (vgl. S. 63, mech. Wellen).

3. Die Lichtgeschwindigkeit

Früher glaubte man, daß das Licht zur Ausbreitung keine Zeit benötige bzw. daß die Lichtgeschwindigkeit so groß sei, daß sie außerhalb der Grenze der menschlichen Beobachtungsfähigkeit liege.
Im Jahre 1675 berechnete der dänische Astronom OLAF RÖMER erstmals die Lichtgeschwindigkeit aus astronomischen Beobachtungen. Der französische Physiker FIZEAU bestimmte 1849 zum ersten Mal die Lichtgeschwindigkeit auf der Erde. An die Stelle der reinen Naturbeobachtung trat damit ein Experiment. In beiden Fällen ergab sich innerhalb der Fehlergrenzen das gleiche Ergebnis.

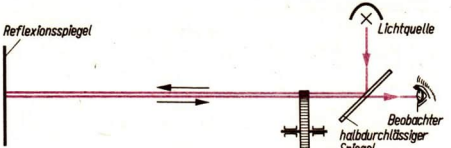


Bild 119/1 Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach FIZEAU (schematisch)

Die Fizeausche Methode zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts ist im Prinzip im Bild 119/1 wiedergegeben. FIZEAU benutzte eine Meßstrecke von 8,633 km. Durch eine Lücke eines rotierenden Zahnrades mit 720 Zähnen und 720 ebensobreiten Lücken lief das Lichtbündel zu einem Spiegel und wurde dort reflektiert. Es fiel zunächst durch dieselbe Lücke des Zahnrads in das Auge des Beobachters. Nun wurde die Drehzahl allmählich gesteigert, und bei 12,6 Umdrehungen je Sekunde trat erstmalig Verdunkelung ein; denn der vom Spiegel reflektierte Strahl traf statt der Ausgangslücke den ihr folgenden Zahn. FIZEAU errechnete daraus die Lichtgeschwindigkeit zu 313 274 km · s^{-1}.

In der Folgezeit wurden die Meßverfahren immer mehr verfeinert. In Tausenden von Präzisionsmessungen wurde als heute gültiger Wert ermittelt:

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt
$c = (299\,790 \pm 6)\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$.

In allen Stoffen ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als im Vakuum. Dabei unterscheidet sich der Wert für die Lichtgeschwindigkeit in Luft kaum von dem im Vakuum. Für praktische Bedürfnisse wird in beiden Fällen mit dem **Näherungswert** $c = 300\,000\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$ gerechnet.
Wenn man zwei verschiedene Medien vergleicht, so ist dasjenige *optisch dichter*, in dem die Lichtgeschwindigkeit kleiner ist. Das Vakuum ist das optisch dünnste Medium.
Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist eine Naturkonstante und stellt die größte Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtenergie dar. Auch alle anderen elektromagnetischen Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Die Länge einer Lochkamera beträgt 25 cm. In ihr wird ein Gegenstand abgebildet, der sich 75 cm vor der Lochkamera befindet und dessen Bild eine Höhe von 5 cm aufweist. Wie hoch ist der Gegenstand? (Bild 120/1)
2. In welcher Zeit legt das Licht folgende Entfernungen zurück?
   a) Mond–Erde (rund 385 000 km)
   b) Sonne–Erde (rund $15 \cdot 10^7$ km)
3. In der Astronomie werden große Entfernungen in Lichtjahren angegeben. Ein Lichtjahr ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegen würde. Geben Sie ein Lichtjahr in Kilometern an!

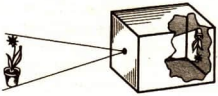


Bild 120/1

4.1. Wie oft könnte ein Lichtstrahl die Erde am Äquator in einer Sekunde umkreisen?
4.2. Warum kann er es nicht?
5. Berechnen Sie an Hand der Angaben zur Fizeauschen Methode auf Seite 119 die Lichtgeschwindigkeit, und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem dort angegebenen.

ZUSAMMENFASSUNG

Ein Körper ist sichtbar, wenn von ihm Licht ausgeht oder reflektiert wird, das in unser Auge gelangt.

Wie kann man ein Lichtbündel beim Experimentieren für zahlreiche Zuschauer sichtbar machen?

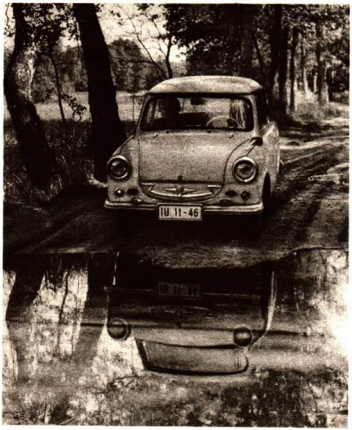
Das Licht breitet sich in einem homogenen (einheitlichen) Medium nach allen Seiten geradlinig aus.

Was versteht man unter einem Lichtstrahl?

Die Lichtgeschwindigkeit beträgt im Vakuum und in der Luft rund 300 000 km · s^{-1}.

Wie hat FIZEAU die Lichtgeschwindigkeit bestimmt?

Reflexion des Lichts



Lichtstrahlen werden an ebenen Flächen, wie zum Beispiel der Wasseroberfläche, polierten Metallplatten oder Glasscheiben reflektiert. Solche Flächen werden als Spiegel benutzt. Die Gesetzmäßigkeiten der Reflexion gelten nicht nur für ebene, sondern auch für gekrümmte Flächen. Das soll im folgenden Abschnitt untersucht werden.

1. Reflexion am ebenen Spiegel

Trifft Licht auf die Grenzfläche zweier Medien verschiedener optischer Dichte, wird es teilweise oder vollständig zurückgeworfen.
Das Reflexionsgesetz (Bild 121/2) lautet:

Wird ein Lichtstrahl reflektiert, so liegen der einfallende Strahl, der reflektierte Strahl und das Einfallslot in einer Ebene. Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

● *Für welche anderen physikalischen Vorgänge gilt ebenfalls das Reflexionsgesetz?*

Ein Lichtstrahl, der von C aus (Bild 121/2) in entgegengesetzter Richtung nach A läuft, wird ebenfalls im Punkt B am Spiegel reflektiert. Das ist ein Sonderfall eines wichtigen Prinzips der Strahlenoptik:

Der Lichtweg ist umkehrbar.

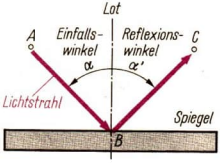


Bild 121/2 Reflexion eines Lichtstrahls
Bei ebener, spiegelnder Oberfläche eines Körpers wird das auftreffende Licht in ganz bestimmter Richtung reflektiert. Das Reflexionsgesetz für Lichtstrahlen ist nur ein Sonderfall des allgemein für Wellen gültigen Reflexionsgesetzes

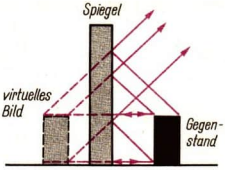


Bild 122/1 Entstehung des virtuellen Spiegelbildes

Von jedem Punkt eines Gegenstandes (Bild 122/1) gehen unendlich viele Lichtstrahlen aus, von denen ein Teil auf den ebenen Spiegel trifft und dort reflektiert wird.
Zur Festlegung der Bildpunkte verlängern wir jeweils zwei der von einem Gegenstandspunkt ausgehenden reflektierten Strahlen nach rückwärts; im Schnittpunkt der beiden Strahlen liegt der gesuchte Bildpunkt. Das aus diesen Bildpunkten zusammengesetzte Bild ist ein *scheinbares* oder *virtuelles* Bild.
Ein virtuelles Bild ist an seinem Entstehungsort nicht auffangbar, da an diese Stelle keine Lichtenergie gelangt.

● *Welche Eigenschaften weist das Spiegelbild bei einem ebenen Spiegel auf?*

2. Reflexion an gekrümmten Spiegeln

In der Praxis verwendet man gekrümmte Spiegel hauptsächlich in drei Formen (Bild 122/2).
Im folgenden sollen nur die Hohlspiegel untersucht werden. Zum Beschreiben der Abbildung eines Gegenstandes durch einen sphärischen[1] Hohlspiegel benutzt man folgende Bezeichnungen (Bild 122/3):

[1] Sphäre (griech.): Kugelschale

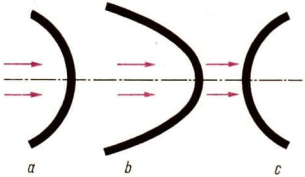


Bild 122/2 a sphärischer Hohlspiegel, b Parabolspiegel, c sphärischer, erhabener Spiegel

Bild 122/3

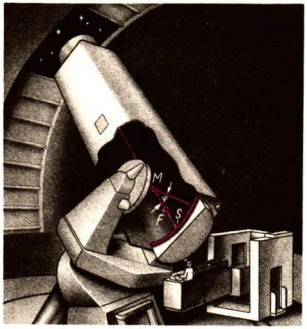
M Krümmungsmittelpunkt. Mittelpunkt der Kugel, aus der man sich den Spiegel herausgeschnitten denken kann.

S Scheitelpunkt. Mittelpunkt der spiegelnden Fläche.

F Brennpunkt. Auf der optischen Achse in der Mitte zwischen Krümmungsmittelpunkt und Scheitelpunkt.

$\overline{MS}$ *Optische Achse.* Gerade durch Krümmungsmittelpunkt und Scheitelpunkt.

φ *Öffnungswinkel.* Winkel, den ein vom Krümmungsmittelpunkt zum äußersten Rand des Spiegels gezogener Strahl mit der optischen Achse bildet



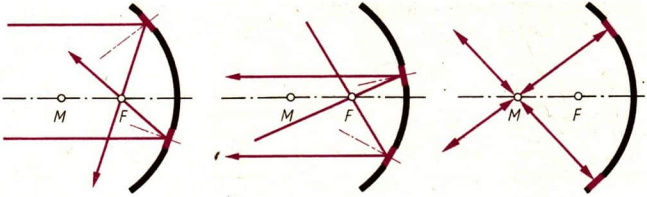


Bild 123/1
a) Parallelstrahlen verlaufen nach der Reflexion durch den Brennpunkt *F*

b) Brennpunktstrahlen verlaufen nach der Reflexion parallel zur optischen Achse

c) Mittelpunktstrahlen verlaufen nach der Reflexion durch den Krümmungsmittelpunkt *M*

Von den unzähligen Lichtstrahlen, die von einem Gegenstand ausgehen und auf den Hohlspiegel treffen, zeigen drei Strahlen für die zeichnerische Darstellung einen besonders einfachen Verlauf (Bild 123/1).

● *Inwiefern bestätigt der Verlauf dieser Strahlen das Prinzip von der Umkehrbarkeit des Lichtweges?*

Wie Bild 123/2 zeigt, haben bei einem sphärischen Hohlspiegel nur die achsennahen Parallelstrahlen annähernd einen gemeinsamen Brennpunkt. Bei einem Parabolspiegel haben alle Parallelstrahlen einen gemeinsamen Brennpunkt. Deshalb benutzt man in der Praxis sphärische Hohlspiegel nur, wenn man mit kleinen Öffnungswinkeln auskommt. Im anderen Falle müssen Parabolspiegel verwendet werden (Bild 126/2).

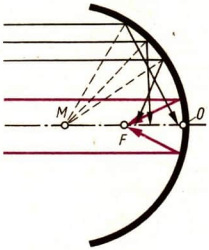


Bild 123/2 Achsenparallele Strahlen am Hohlspiegel

3. Bildentstehung am Hohlspiegel[1]

Der Mann auf dem Bild 124/1 hält eine Kerze in seiner Hand. Das Spiegelbild zeigt etwas sehr Eigenartiges. Die Kerze steht aufrecht, während der Experimentierende umgekehrt zu sehen ist. Außerdem erscheinen die Kerze vergrößert und der Mann verkleinert. Wie kommt das? (Siehe hierzu Bild 126/1.)

[1] Im folgenden wird nur der sphärische Hohlspiegel betrachtet.

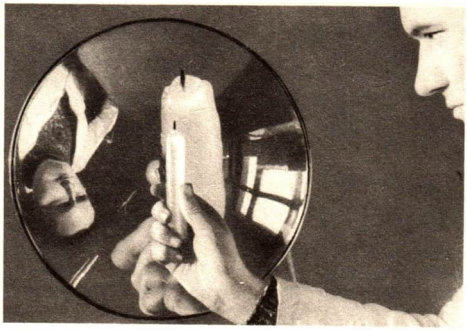


Bild 124/1 Spiegelbild am Hohlspiegel

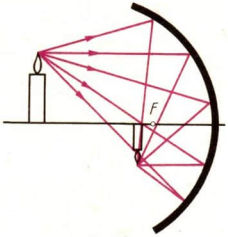


Bild 124/2 Abbildung eines Gegenstandes im Hohlspiegel

Die geometrische Konstruktion zeigt (Bild 124/2), daß sich alle vom Hohlspiegel reflektierten Strahlen eines Gegenstandspunktes im Bildpunkt schneiden. Für die zeichnerische Festlegung eines Punktes reichen zwei Strahlen aus.

Weiterhin wird die Bildkonstruktion vereinfacht, wenn sich der Fußpunkt des Gegenstandes auf der optischen Achse befindet, da dann auch der des Bildes auf der optischen Achse liegen muß. Wenn wir diese Vereinfachung nicht treffen können, müssen wir auch den Fußpunkt zeichnerisch ermitteln.

Je nach der Lage des Gegenstandes in bezug auf den Hohlspiegel ergeben sich Bilder mit verschiedenen Eigenschaften (Bild 124/3 und Bild 124/4).
Wie das Bild 124/3 zeigt, ergeben sich umgekehrte Bilder, wenn sich der Gegenstand außerhalb der einfachen Brennweite befindet. Diese Bilder sind auf einem Schirm auffangbar, da sich die Lichtstrahlen in einem Bildpunkt schneiden. Wir bezeichnen sie deshalb als *wirkliche* oder *reelle* Bilder.

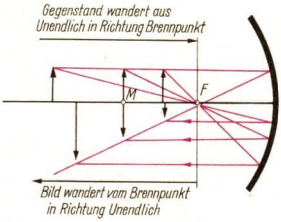


Bild 124/3 Die Entstehung reeller Bilder

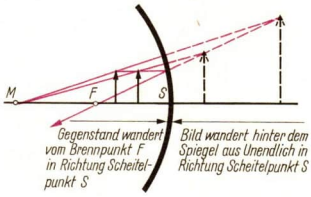


Bild 124/4 Die Entstehung virtueller Bilder

Andere Voraussetzungen liegen vor, wenn sich der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite befindet (124/4). In diesem Falle können wir nur die rückwärts verlängerten reflektierten Strahlen zum Schnitt bringen, wie wir es bereits beim ebenen Spiegel taten. Diese Bilder sind stets aufrecht und vergrößert, lassen sich aber nicht auf einem Schirm auffangen. Es handelt sich also um *scheinbare* oder *virtuelle* Bilder.

● *Stellen Sie in einer Tabelle die vier unterschiedlichen Abbildungsfälle bezüglich der Bildeigenschaften zusammen!*
Anleitung: Die Tabelle soll enthalten: Ort des Gegenstandes, Ort des Bildes sowie Art, Lage und Größe des Bildes.

Das Auftreten von reellen und virtuellen Bildern beim Hohlspiegel zeigt uns eine wichtige Erscheinung. Wenn wir einen Gegenstand einem Hohlspiegel nähern, so stellt der Brennpunkt den Umschlagspunkt vom reellen zum virtuellen Bild dar. Während wir eine physikalische Größe, nämlich die Entfernung des Gegenstandes vom Spiegel, gleichmäßig änderten, hat sich die Qualität des Spiegelbildes beim Überschreiten des Brennpunktes sprunghaft gewandelt, aus einem reellen Bild wurde ein virtuelles Bild, also ein Bild mit einer ganz neuen Eigenschaft.

Nachdem uns die Abbildungskonstruktionen vertraut sind, können wir allgemein formulieren:

Ein reelles Bild entsteht, wenn sich alle vom Hohlspiegel reflektierten Strahlen, die von einem Gegenstandspunkt ausgehen, in einem Bildpunkt schneiden. Entsprechend schneiden sich bei einem virtuellen Bild die rückwärtigen Verlängerungen der reflektierten Strahlen in einem Bildpunkt.

Bild 125/1 zeigt uns einen Zusammenhang zwischen Gegenstandsgröße y, Bildgröße y', Gegenstandsweite s und Bildweite s'. Aus der Ähnlichkeit der beiden rechtwinkligen Dreiecke folgt für achsennahe Strahlen die Proportion:

$$y : y' = s : s'$$

Bei der Abbildung eines Gegenstandes am Hohlspiegel verhält sich die Gegenstandsgröße zur Bildgröße wie die Gegenstandsweite zur Bildweite.

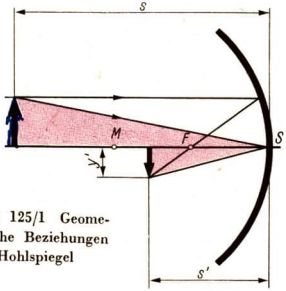


Bild 125/1 Geometrische Beziehungen am Hohlspiegel

Vorgänge, Fragen, Aufgaben

1. Warum verwendet man beim Mikroskop als Beleuchtungsspiegel gewöhnlich einen Hohlspiegel?
2. Vor einem Hohlspiegel befindet sich in einer Entfernung von 400 mm vom Scheitelpunkt S auf der optischen Achse ein Gegenstand, der 100 mm hoch ist. Sein Spiegelbild besitzt eine Höhe von 30 mm. In welcher Entfernung vom Hohlspiegel entsteht dieses Bild?
3. Kann man ein virtuelles Bild fotografieren?

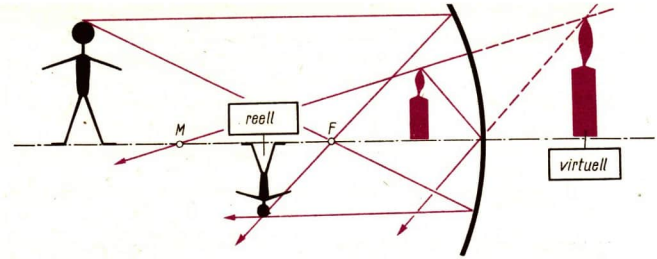


Bild 126/1 Wenn sich der Mann außerhalb der doppelten Brennweite und die Kerze innerhalb der Brennweite des Hohlspiegels befinden (siehe auch Seite 123 und 124), dann entstehen die hier konstruierten Bilder

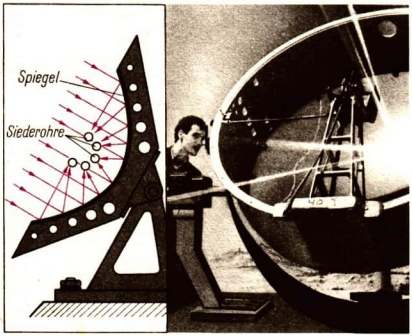


Bild 126/2 Bei einem Sonnenkraftwerk wird das parallel einfallende Sonnenlicht nach dem Dampfkessel im Brennpunkt des Parabolspiegels reflektiert. Der Spiegel muß möglichst groß sein, damit er viel Lichtenergie sammelt

ZUSAMMENFASSUNG

Die Reflexion der Lichtstrahlen erfolgt nach einem allgemeingültigen Reflexionsgesetz.

Wie lautet das Reflexionsgesetz?

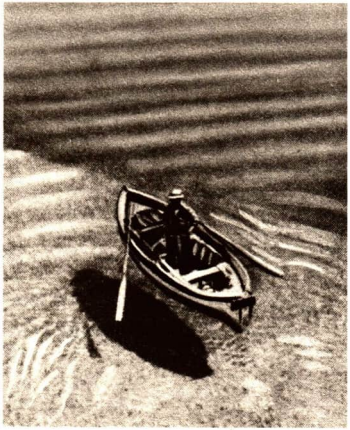
Das am sphärischen Hohlspiegel erzeugte Bild läßt sich durch bestimmte Strahlen zeichnerisch besonders einfach konstruieren.

Wie verlaufen diese Strahlen?

Die Eigenschaften eines Bildes am sphärischen Hohlspiegel werden durch die Lage des Gegenstandes bestimmt.

Was für Eigenschaften können Hohlspiegelbilder aufweisen?

Die Lichtbrechung



Beim Abschätzen der Wassertiefe eines klaren Gewässers täuscht man sich meist sehr stark. Der auf dem Bild deutlich sichtbare und anscheinend kaum mehr als einen Meter tief unter dem Wasserspiegel liegende ebene Meeresgrund befindet sich in Wirklichkeit mehrere Meter tief unter der Wasseroberfläche. Diese Täuschung kann einem Nichtschwimmer zum Verhängnis werden. Ursache dieser Erscheinung ist die Brechung des Lichtes.

1. Das Brechungsgesetz

Das Experiment zeigt, daß ein Lichtstrahl gebrochen wird, wenn er von einem Medium in ein anderes übertritt und diese Medien eine verschiedene optische Dichte aufweisen. Außerdem wird ein Teil des Lichtes an der Grenzfläche der beiden Medien reflektiert.

● *Wonach beurteilen wir die optische Dichte eines Stoffes? Inwiefern bestätigt Bild 127/2 die Umkehrbarkeit des Lichtweges?*

Wie bei der Reflexion liegen *einfallender Strahl, gebrochener Strahl* und *Einfallslot* in einer Ebene. Zwischen dem *Einfalls-* und dem *Brechungswinkel* besteht eine Gesetzmäßigkeit, die an der optischen Scheibe überprüft werden kann. Beim Übergang von Luft in Glas ergaben sich beispielsweise die Werte der Tabelle 7.

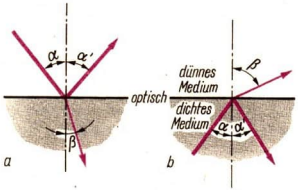


Bild 127/2 Brechung des Lichtes

Ein Lichtstrahl wird an der Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Medien zum Teil reflektiert; der andere Teil dringt in das zweite Medium ein.

Lichtstrahl wird

a) zum Einfallslot gebrochen
b) vom Einfallslot weg gebrochen

Tabelle 7: Lichtbrechung beim Übergang von Luft in Glas

Einfallswinkel α	Brechungswinkel β	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$
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

Der Quotient $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ ist bei dieser Versuchsreihe – bis auf Meßfehler – konstant. Dieser Quotient wird *Brechungsverhältnis* oder *Brechungszahl* n genannt, und wir schreiben:

$$\text{Brechungszahl} = \frac{\text{Sinus des Einfallswinkels}}{\text{Sinus des Brechungswinkels}} \qquad n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Bei der Brechung des Lichtes steht der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in einem konstanten Zahlenverhältnis, das man Brechungszahl n nennt.[1]

Dieses Gesetz wurde um das Jahr 1618 von dem holländischen Physiker SNELL VAN ROYEN erkannt und wird **Snelliussches Brechungsgesetz**[2] genannt.

Für die Brechung des Lichtes beim Übergang von Luft in Glas entnehmen wir der Tabelle 8 den Wert[3] für n mit $1{,}5 = \frac{3}{2}$. Beim Übergang von Luft in Wasser ergaben Versuche für n ungefähr den Wert $\frac{4}{3}$. Dafür schreiben wir

$$n_{\text{Luft/Glas}} = \frac{3}{2}, \quad n_{\text{Luft/Wasser}} = \frac{4}{3}.$$

Wenn wir das hier gefundene Brechungsgesetz mit dem für mechanische Wellen $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$ vergleichen (Seite 73), stellen wir den gleichen mathematischen Aufbau fest. Wir haben die optische Dichte eines Mediums nach der Lichtgeschwindigkeit in diesem beurteilt. Deshalb können wir annehmen, daß die Brechungszahl n das Verhältnis der

[1] Als Materialkonstante wird die Brechungszahl n für den Übergang des Lichts aus dem Vakuum oder der Luft in den betreffenden Stoff angegeben.

[2] SNELL VAN ROYEN: Die Wissenschaftler gaben früher ihrem Namen eine lateinische Form, in unserem Falle SNELLIUS.

[3] Die Brechungszahl n ist für verschiedene Glassorten etwas unterschiedlich.

Lichtgeschwindigkeiten in zwei verschiedenen Medien wiedergibt. Für den Übergang des Lichtes von Luft in Glas ergäbe dies beispielsweise

$$n_{\text{Luft/Glas}} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}} .$$

Direkte Messungen der Lichtgeschwindigkeit bestätigten diese Beziehung.

Tabelle 8: Brechungszahlen für den Übergang von Luft in ein anderes Medium

Medium	n
Wasser	1,33
Äthylalkohol	1,36
Benzol	1,51
Kronglas	1,52
Schwefelkohlenstoff	1,63
Diamant	2,42

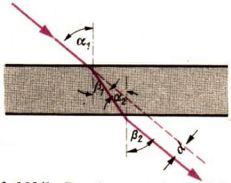


Bild 129/1 Durchgang eines Lichtstrahls durch eine planparallele Platte

● *Wie kommt die Parallelverschiebung eines Lichtstrahls zustande, der eine planparallele Platte durchsetzt (Bild 129/1)?*

Bei einem optischen Prisma wird ein Lichtstrahl zweimal gebrochen. Die Gesamtablenkung ist deshalb von der *brechenden Kante*, der Schnittlinie der brechenden Flächen, weggerichtet (Bild 129/2).

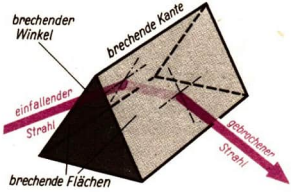


Bild 129/2 Strahlenverlauf durch ein optisches Prisma

2. Die Totalreflexion

Blickt man von unten schräg gegen die Wasseroberfläche eines Aquariums, so scheinen sich über dem Wasserspiegel ebenfalls Fische zu befinden (Bild 129/3).

● *Wie ist diese Erscheinung zu erklären?*

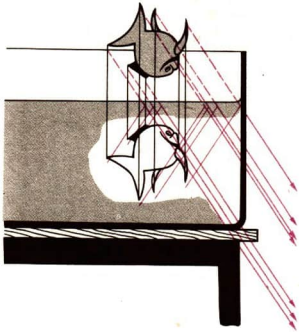
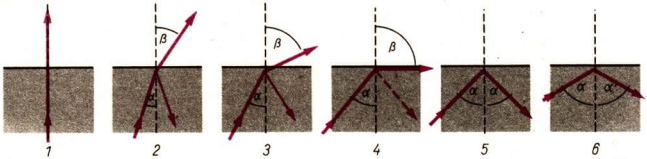


Bild 129/3 Schematische Darstellung der Totalreflexion bei einem Aquarium



Brechung Totalreflexion

Bild 130/1 Änderung des Brechungswinkels bei allmählicher Vergrößerung des Einfallswinkels und Auftreten der Totalreflexion

Beim Übergang des Lichtes von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium wird ein Teil des Lichtes an der Grenzfläche reflektiert. Der Hauptteil des Lichtes tritt in das dünnere Medium, wobei der Einfallswinkel α stets kleiner ist als der Brechungswinkel β. Wenn man den Einfallswinkel stetig vergrößert, tritt der Fall ein, daß der Brechungswinkel gleich 90° wird. Bei weiterer Vergrößerung des Einfallswinkels (Bild 130/1) wird das gesamte Licht an der Grenzfläche reflektiert, und wir sprechen von *Totalreflexion*. Der Einfallswinkel α, der zum Brechungswinkel $\beta = 90°$ gehört, wird *Grenzwinkel der Totalreflexion* genannt.

● *Warum tritt Totalreflexion nur auf, wenn das Licht vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium übertritt?*

Auch bei der Erscheinung der Totalreflexion beobachten wir einen Qualitätsumschlag. Während sich eine physikalische Größe, nämlich der Einfallswinkel, stetig ändert, wird von einem bestimmten Winkel ab, dem Grenzwinkel der Totalreflexion, alles Licht in das dichtere Medium reflektiert.

Die Tabelle 9 enthält einige Grenzwinkel der Totalreflexion α_G für den Übergang in Luft. Diese lassen sich nach dem Brechungsgesetz berechnen, wenn der Brechungswinkel β mit 90° angenommen wird.

Beispiel

Wie groß ist der Grenzwinkel der Totalreflexion α_G für den Übergang des Lichtes von Wasser in Luft?

Gegeben: $n_{Wasser/Luft} = \frac{3}{4}$

$\beta = 90°$

$\sin 90° = 1$

Gesucht: α_G

Lösung:

$$\frac{\sin \alpha_G}{\sin \beta} = \frac{3}{4}$$

$$\sin \alpha_G = 0{,}75$$

$$\underline{\underline{\alpha_G = 48{,}6°}}$$

Tabelle 9: Grenzwinkel für den Übergang in Luft

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

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Erklären Sie, warum ein teilweise in Wasser eingetauchter Stab geknickt erscheint!
2. Legen Sie eine Münze auf den Boden eines leeren Gefäßes. Blicken Sie so über den Gefäßrand, daß die Münze durch ihn gerade noch verdeckt wird. Füllen Sie das Gefäß mit Wasser, ohne dabei die Stellung des Kopfes zu verändern!
   Was beobachten Sie? Geben Sie eine Erklärung dafür!
3. Wie groß ist die Parallelverschiebung eines Lichtstrahls, die beim Durchgang durch eine 60 mm dicke, planparallele Glasplatte bei einem Einfallswinkel von 60° hervorgerufen wird? (Lösen Sie die Aufgabe zeichnerisch, nachdem Sie den Brechungswinkel berechnet haben!)
4. Berechnen Sie die Grenzwinkel der Totalreflexion für folgende Stoffe beim Übergang nach Luft: Kronglas, Diamant (Tabelle 8)!
5. Stellen Sie ein Reagenzglas oder größeres Tablettenröhrchen, in dem sich ein kleiner Gegenstand (Nagel oder Knopf) befindet, in ein Gefäß mit Wasser und betrachten Sie es schräg von oben!
   Warum erscheint der im Wasser befindliche Teil spiegelnd, wie mit Quecksilber gefüllt? Warum wird der kleine Gegenstand im Reagenzglas oder Tablettenröhrchen erst sichtbar, wenn auch dieses mit Wasser gefüllt wird?

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Brechung des Lichtes steht der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in einem konstanten Zahlenverhältnis. $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$.

Wie läßt sich die Brechungszahl aus den Lichtgeschwindigkeiten in den beteiligten Medien berechnen?

Totalreflexion tritt ein, wenn beim Übergang des Lichts aus einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel ist.

Warum findet beim Grenzwinkel der Totalreflexion ein Umschlag in eine neue Qualität statt?

Optische Linsen

In den Fotozirkeln an unseren Schulen lernen die Schüler die Handhabung der Kamera kennen. Was auf frohen Wanderungen durch die schöne Heimat, beim Sportfest oder im Experimentierraum im Bild oder auf dem Filmstreifen festgehalten wurde, das findet an der Wandzeitung, in der Schulchronik oder im Laborprotokoll seine sichtbare Verwendung. Zu den wichtigsten Teilen der Kamera gehört das Objektiv, das meist aus einer Kombination mehrerer Linsen besteht.

1. Strahlenverlauf durch eine Sammellinse

Die verschiedenen Linsen, die sich im Objektiv eines Fotoapparates befinden, lassen sich auf 6 Grundformen zurückführen. Entsprechend dem Brechungsgesetz ergibt sich:

Sammellinsen sammeln Parallelstrahlen im Brennpunkt. Zerstreuungslinsen zerstreuen Parallelstrahlen so, als ob sie von einem Punkt ausgingen.

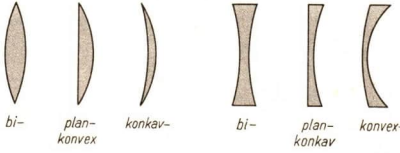
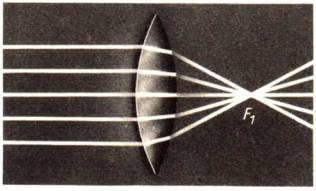
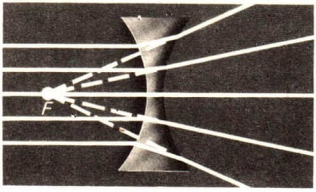


Bild 132/2 Linsenformen
Sammellinsen (Konvexlinsen) sind in der Mitte dicker als an den Rändern
Zerstreuungslinsen (Konkavlinsen) sind in der Mitte dünner als an den Rändern

Bild 132/3





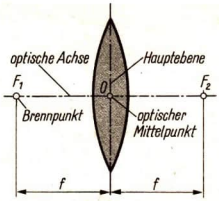


Bild 133/1 Bezeichnungen an der Sammellinse
f Brennweite

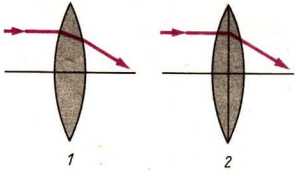


Bild 133/2 Strahlenverlauf durch eine Sammellinse 1 tatsächlicher Verlauf 2 vereinfachte Darstellung

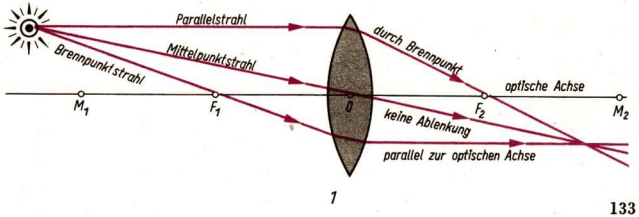
Bei den folgenden Betrachtungen wollen wir uns auf Sammellinsen beschränken, wobei wir bei den zeichnerischen Darstellungen bikonvexe Linsen verwenden (Bild 133/1). Eine Linse besitzt zwei *Brennpunkte*, da das Licht von beiden Seiten einfallen kann. Ein Lichtstrahl wird durch eine Linse zweimal gebrochen. Bei dünnen Linsen vereinfacht man die Konstruktion des Strahlenganges, indem man nur eine einmalige Richtungsänderung an der Hauptebene der Linse zeichnet (Bild 133/2).
Auch bei der Sammellinse – ähnlich wie beim sphärischen Hohlspiegel – kann der gebrochene Strahl in drei Fällen sehr einfach konstruiert werden (Bild 133/3).

2. Die Bildentstehung an der Sammellinse

Ein Gegenstand kann mit Hilfe einer Sammellinse abgebildet werden, wenn die von den einzelnen *Gegenstandspunkten* ausgehenden und durch die Linse gebrochenen Lichtstrahlen sich in jeweils einem Punkt schneiden. Diese Schnittpunkte nennt man *Bildpunkte*.
Zur Konstruktion des Strahlenverlaufs verwendet man wie beim Hohlspiegel von den vielen möglichen Strahlen möglichst nur die folgend genannten (Bild 133/3):

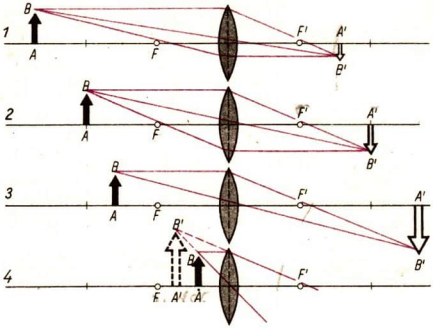
1. Die *Parallelstrahlen*. Sie treffen parallel zur optischen Achse auf die Linse.
2. Die *Brennpunktstrahlen*. Sie gehen vor ihrem Auftreffen auf die Linse durch den Brennpunkt.
3. Die *Mittelpunktstrahlen*. Sie gehen durch den optischen Mittelpunkt der Linse.

Bild 133/3 Strahlenverlauf bei einer Sammellinse



1

Bild 134/1
Die Bildentstehung an einer Konvexlinse bei verschiedenen Gegenstandsweiten
1. Der Gegenstand befindet sich außerhalb der doppelten Brennweite
2. Der Gegenstand befindet sich in der doppelten Brennweite
3. Der Gegenstand befindet sich zwischen der doppelten und der einfachen Brennweite
4. Der Gegenstand befindet sich innerhalb der einfachen Brennweite



Den Strahlenverlauf durch Linsen oder Linsensysteme konstruiert man ähnlich dem Strahlenverlauf an einem Hohlspiegel (vgl. S. 124!). Die reellen Bilder liegen im Gegensatz zu denen beim Hohlspiegel nicht auf derselben Seite wie der Gegenstand. Steht der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite, dann treffen die gebrochenen Strahlen hinter der Linse nicht mehr aufeinander; es entsteht ein virtuelles Bild des Gegenstandes.

Der Brennpunkt der Sammellinse ist – wie beim Hohlspiegel – der Umschlagpunkt vom reellen zum virtuellen Bild. Bei allmählicher Änderung der Gegenstandsweite ergibt sich bei diesem Punkt sprunghaft ein Bild mit einer neuen Qualität.

Nach Bild 135/1 kann man eine geometrische Beziehung zwischen Gegenstandsgröße y, Gegenstandsweite s, Bildgröße y' und Bildweite s' aufstellen. Aus der Ähnlichkeit der beiden roten, rechtwinkligen Dreiecke ergibt sich folgende Proportion:

$$\boxed{\frac{y}{y'} = \frac{s}{s'}}$$

Die Gegenstandsgröße verhält sich zur Bildgröße wie die Gegenstandsweite zur Bildweite.

Wichtig ist auch eine Beziehung zwischen der Brennweite f, der Gegenstandsweite s und der Bildweite s'. Zur Herleitung dieser Gleichung benutzen wir Bild 135/2, in dem ebenfalls eine Ähnlichkeit zweier roter, rechtwinkliger Dreiecke vorliegt; diese ergibt die Proportion

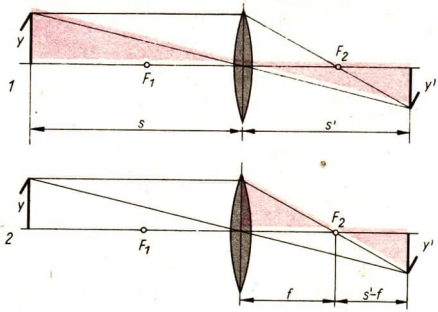
$$y : y' = f : (s' - f)$$

Aus beiden Gleichungen folgt die gewünschte Beziehung

$$s : s' = f : (s' - f),$$

die noch umgeformt werden soll.

Bild 135/1 Beziehung zwischen Gegenstandsgröße und Bildgröße
Bild 135/2 Beziehung zur Herleitung der Linsengleichung



$$s \cdot (s' - f) = s' \cdot f$$
$$ss' - sf = s' \cdot f$$
$$ss' = s'f + sf \quad | : fss'$$

Wenn wir beide Seiten der Gleichung durch $f \cdot s \cdot s'$ dividieren, erhalten wir die einprägsamste Form der *Abbildungsgleichung für Linsen*, kurz **Linsengleichung** genannt.

$$\boxed{\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}}$$

Der Kehrwert der Brennweite ist gleich der Summe der Kehrwerte von Gegenstandsweite und Bildweite.

Beispiel

Durch eine Sammellinse wird von einem 80 cm von der Hauptebene der Linse entfernten Gegenstand auf einem 20 cm hinter der Linse stehenden Schirm ein Bild erzeugt. Wie groß ist die Brennweite der Sammellinse?

Gegeben:

Gegenstandsweite $s = 80$ cm

Bildweite $s' = 20$ cm

Gesucht:

Brennweite f in cm

Lösung:

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

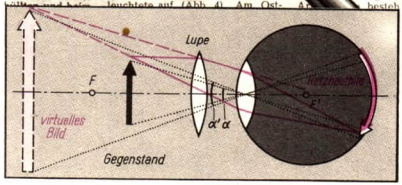
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{80\text{ cm}} + \frac{1}{20\text{ cm}} = \frac{1}{80\text{ cm}} + \frac{4}{80\text{ cm}}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{16\text{ cm}}$$

Die Brennweite der Linse beträgt 16 cm. $\underline{\underline{f = 16\text{ cm}}}$

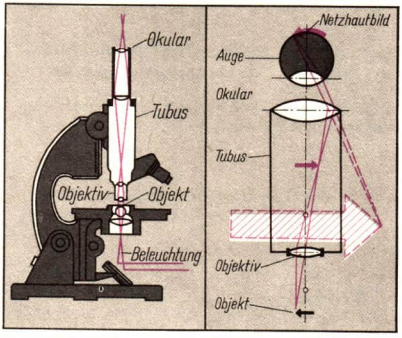
Bei Anwendung der Linsengleichung auf die Sammellinse ist zu beachten, daß die Bildweite virtueller Bilder mit negativen Werten einzusetzen ist.
Die Linsengleichung ist nicht uneingeschränkt anwendbar. Sie gilt nur für dünne Linsen mit relativ großer Brennweite bei achsennahen Strahlen einfarbigen Lichtes. In allen anderen Fällen entstehen in den Bildern Unschärfen und Abweichungen, die als Linsenfehler bezeichnet werden. Diese Fehler werden bei optischen Geräten durch Linsenkombinationen behoben, deren Berechnungen sehr umfangreich und schwierig sind. Deshalb wurde für diese Zwecke im VEB Carl Zeiss Jena erstmalig für die DDR ein Rechenautomat entwickelt.

Anwendungsbeispiele für Sammellinsen



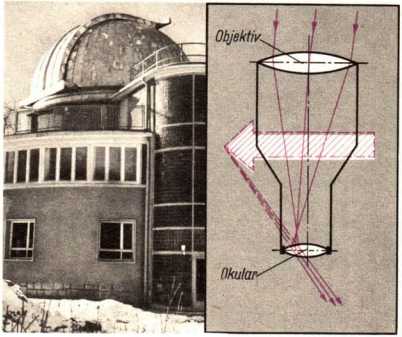
Die Lupe

Wenn man Einzelheiten eines Gegenstandes erkennen will, bringt man ihn möglichst nahe an das Auge heran. Hierdurch werden der Sehwinkel und damit das Netzhautbild größer. Reicht diese Vergrößerung nicht aus, so benutzt man eine Konvexlinse als Lupe.



Das Mikroskop

Das optische System des Mikroskops besteht aus einem dem Gegenstand zugewandten Objektiv und einem dem Auge zugewandten Okular. Das Objektiv ist ein Linsensystem mit kleiner Brennweite, das als Sammellinse wirkt und ein vergrößertes, reelles Bild des Gegenstandes erzeugt. Dieses Bild entsteht innerhalb der einfachen Brennweite des Okulars, das als Lupe wirkt. Es entsteht ein stark vergrößertes, virtuelles Bild.

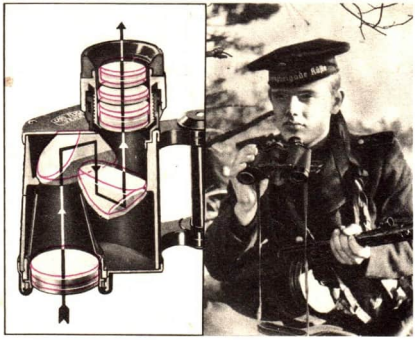


Das astronomische Fernrohr

Das Objektiv entwirft ein reelles, verkleinertes, umgekehrtes Bild. Dieses Bild wird durch ein als Lupe wirkendes Okular betrachtet. Das Auge sieht ein umgekehrtes, virtuelles Bild des Gegenstandes unter großem Sehwinkel.
Aus diesem Grund benutzt man solche Fernrohre ausschließlich für astronomische Beobachtungen.

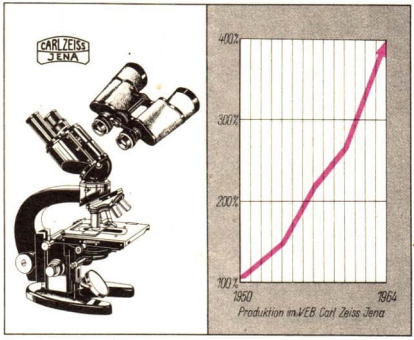
Das Prismenfernrohr

Bei Erdbeobachtungen ist ein aufrechtes, seitenrichtiges Bild erstrebenswert. Das wird durch zwei totalreflektierende Prismen erreicht, die in den Strahlengang eingefügt werden.
Infolge mehrfacher Knickung des Strahlenganges ist die Baulänge verhältnismäßig kurz.



Die optische Industrie in der DDR

Ein wichtiger Zweig unserer Produktion befaßt sich mit der Herstellung von optisch-mechanischen Meßgeräten. Im Maschinenbau, in der Medizin, in Wissenschaft und Volksbildung werden diese Geräte benötigt. Die Erzeugnisse aus dem VEB Carl Zeiss Jena und den anderen optischen Werken gehen in mehr als 80 Länder und ermöglichen einen umfangreichen Handelsaustausch. Trotz aller Störversuche kapitalistischer Länder arbeiteten 1964 nahezu 18000 Werktätige im VEB Carl Zeiss Jena als dem größten feinmechanisch-optischen Betrieb der Welt. Durch ständige Vervollkommnungen ihrer Qualitätserzeugnisse stärken sie auch ständig das Ansehen unserer Deutschen Demokratischen Republik.
Andere Produktionsstätten unserer optischen Industrie sind der VEB Rathenower Optische Werke (ROW), der VEB Feinoptisches Werk Görlitz und die Kameraindustrie in Dresden.



Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Konstruieren Sie das Bild eines senkrecht stehenden Gegenstandes, der 40 mm groß ist, in der Mitte von der optischen Achse geschnitten wird und 30 mm von der Hauptebene einer Sammellinse entfernt ist, deren Brennweite 60 mm beträgt!
   Welche Eigenschaften besitzt das Bild?
2. Eine Sammellinse entwirft ein reelles Bild. Es sind bekannt: Gegenstandsweite $s = 80$ mm, Bildweite $s' = 40$ mm, Gegenstandsgröße $y = 30$ mm. Berechnen Sie die Bildgröße und die Brennweite der Sammellinse!
3. Der Heimprojektor „Aspectar" hat ein Objektiv mit einer Brennweite von 80 mm. Wie groß wird ein Farbdia von 24 mm · 36 mm in einer Entfernung von 3 m abgebildet?
   Anleitung: Es ist zunächst die Gegenstandsweite zu berechnen!
4. Betrachten Sie mit einer Lupe einen Maßstab! Wie läßt sich in diesem Falle die Vergrößerung bestimmen, die mit der Lupe erreicht wird?
5. Um welche Länge ist ein Prismenfernrohr kürzer als ein astronomisches Fernrohr bei gleicher Ausstattung?

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Bildkonstruktion an der Sammellinse benutzt man Parallel-, Brennpunkt- und Mittelpunktstrahlen.

Wie unterscheidet sich der Verlauf dieser Strahlen an der Sammellinse von denen beim sphärischen Hohlspiegel?

Die Eigenschaften eines Bildes an der Sammellinse werden von der Lage des Gegenstandes bestimmt.

Welche Eigenschaften können die Bilder an der Sammellinse aufweisen?

Für die Bildentstehung an der Sammellinse gelten:

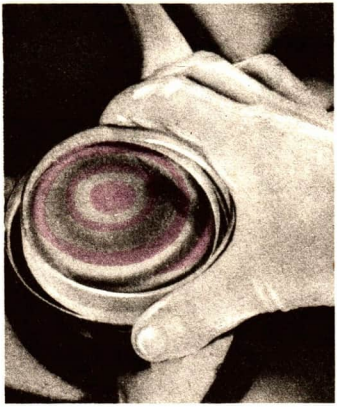
$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$ **und** $y : y' = s : s'$.

Erläutern Sie den Sachverhalt dieser Gleichungen!

Beim Mikroskop und beim astronomischen Fernrohr entwirft das Objektiv ein reelles Bild, das mit dem Okular als Lupe betrachtet wird.

Worin besteht der Unterschied im praktischen Aufbau zwischen Mikroskop und Fernrohr?

Das Licht als Wellenerscheinung



Die schillernden Farben mancher Insekten und auch die farbigen Ringe im Probeglas des Linsenschleifers im nebenstehenden Bild, durch die eine Abweichung der geschliffenen Linse von der endgültigen Form angezeigt wird, sind optische Erscheinungen, die ihre Erklärung in der Wellennatur des Lichtes finden. Man nennt sie wellenoptische Erscheinungen zum Unterschied von den strahlenoptischen Erscheinungen, bei deren Erklärung man mit der Vorstellung von Lichtstrahlen auskommt.

1. Interferenzerscheinungen bei Beugung des Lichtes

Den Nachweis der Interferenz bei Lichtwellen wollen wir mit einer Versuchsanordnung durchführen. Überlagern sich Wellen, die von zwei Erregungszentren ausgehen, dann müssen wir bei gleicher Wellenlänge und gleicher Amplitude (siehe auch „Mechanische Schwingungen und Wellen", S. 76) erwarten:

Maximale Helligkeit *(Verstärkung)* bei einem Gangunterschied von λ oder einem Vielfachen davon,

maximale Dunkelheit *(Auslöschung)* bei einem Gangunterschied von $\frac{\lambda}{2}$ oder einem *ungeraden* Vielfachen davon.

Im letzteren Falle führt das zu einer merkwürdigen Tatsache, die grob formuliert besagt:

Licht und Licht ergibt Dunkelheit.

Da wir Lichtwellen nicht unmittelbar sehen, können wir Verstärkungen und Auslöschungen nur als helle beziehungsweise dunkle Streifen auf einem Schirm wahrnehmen. Diese erscheinen dort, wo die jeweiligen Interferenzkurven auf den Schirm treffen. Wir benutzen eine Versuchsanordnung (Bild 140/1a), wie sie der englische Arzt und Physiker Young 1807 zum ersten Mal angab.

Der Beleuchtungsspalt S_0 und die beiden Beugungsspalte S_1 und S_2 haben eine Breite von einigen zehntel Millimetern. Wir wollen diesen Versuch in 3 Schritten ausführen, indem wir zu-

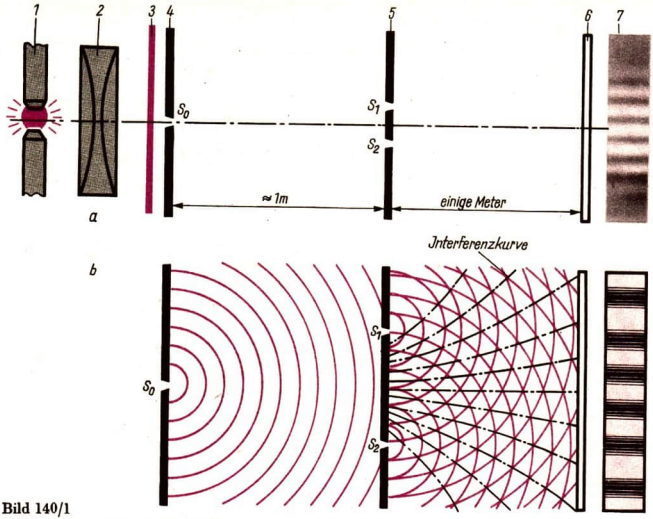


Bild 140/1

a) Interferenz, erzeugt durch einen Doppelspalt (Versuchsanordnung nur schematisch)
1 Lichtquelle, 2 Kondensor, 3 Filter, 4 Spaltblende, 5 Doppelspaltblende, 6 Schirm, 7 Interferenzbild

b) Schematische Darstellung zur Entstehung der Interferenzstreifen (es sind nur die positiven Amplituden eingezeichnet)

erst ein Rotfilter vor den Beleuchtungsspalt setzen, dann ein Blaufilter benutzen und schließlich ohne Filter das weiße Licht der Bogenlampe verwenden.

Rotfilter: In der Mitte des Schirmbildes erscheint ein heller roter Streifen. Nach beiden Seiten schließen sich mehrere, immer schwächer sichtbare, rote Streifen an, die durch dunkle Streifen unterbrochen werden.

Blaufilter: Das Erscheinungsbild ist ähnlich wie beim ersten Versuch. Allerdings sind die blauen und dunklen Streifen jeweils dichter nach der Mitte zusammengedrängt.

Ohne Filter: In der Mitte des Schirmbildes erscheint ein heller, weißer Streifen. Nach beiden Seiten schließen sich weiße Streifen an, die farbige Ränder zeigen beziehungsweise vollständig in farbige Streifen aufgespalten sind.

Zur Erklärung der Versuchsergebnisse ziehen wir Bild 140/1b heran. Die Interferenzkurven geben uns an, wo auf dem Schirm helle beziehungsweise dunkle Streifen erscheinen, die wir auch als *Beugungsstreifen* bezeichnen, da hier eine Lichtbeugung vorliegt. Die Beobachtung, daß die blauen Streifen dichter nach der Mitte zusammen-

gedrängt sind als die roten, können wir nur so deuten, daß die Wellenlänge des blauen Lichtes kleiner ist als die des roten.

● *Weisen Sie zeichnerisch – entsprechend Bild 140/1b – nach, daß bei kleinerer Wellenlänge die Interferenzkurven näher am Zentrum auf den Schirm treffen!*

Bei weißem Licht müssen wir auf Grund der farbigen Streifen schließen, daß dieses aus mehreren Farben zusammengesetzt ist. Diese Farben müssen von verschiedener Wellenlänge sein, da ihre jeweiligen Beugungsstreifen in verschiedener Entfernung vom Zentrum auf dem Schirm erscheinen. Der helle, breite, weiße Streifen in der Mitte des Schirmbildes deutet darauf hin, daß sich hier alle Farben wieder zu Weiß überlagern, da für keine Farbe ein Gangunterschied vorliegt. Eine nähere Erklärung dieses Sachverhaltes folgt im nächsten Kapitel, da bei dem dort beschriebenen Versuch diese Erscheinung deutlicher sichtbar ist.

Zusammenfassend können wir feststellen:

Die Wellennatur des Lichtes läßt sich durch Beugung an einem Doppelspalt nachweisen.
Bei einfarbigem Licht kann aus der Lage der hellen und dunklen Beugungsstreifen auf dem Schirmbild die Wellenlänge des verwendeten Lichtes bestimmt werden.
Weißes Licht ist aus Licht verschiedener Farben zusammengesetzt und zeigt deshalb farbige Beugungsstreifen.

● *Welcher Widerspruch besteht zwischen der Modellvorstellung vom Lichtstrahl und den Beugungserscheinungen des Lichtes?*

Beugungserscheinungen kann man auch beobachten, wenn man an Stelle des Doppelspaltes einen einfachen Spalt oder ein schmales Hindernis, z.B. einen dünnen Draht, verwendet.

2. Das optische Gitter

Die Beugungsstreifen auf dem Schirm werden lichtstärker und schärfer, wenn man den Doppelspalt durch viele dicht nebeneinanderliegende Spalte ersetzt. Dies erreicht man mit einer Glasplatte oder einer durchsichtigen Folie, auf der schwarze, parallele Striche in geringem Abstand gezogen sind. Die Zwischenräume wirken dann wie Spalte. Man bezeichnet eine solche Anordnung als *optisches Gitter* oder *Beugungsgitter*. Je mehr Spalte dabei auf einen Millimeter entfallen, desto größer ist die Güte des Beugungsgitters.

Für wissenschaftliche Zwecke stellt man Beugungsgitter her, indem man auf einer Teilmaschine mit einem Diamanten parallele Striche in eine Glasplatte ritzt. Die unversehrten Glasstreifen wirken wie Spalte, während die „Furchen" das Licht diffus (zerstreut) reflektieren. Man hat Gitter hergestellt, die bis zu 2000 Linien je Millimeter besitzen, um die Lichtwellenlängen mit großer Genauigkeit bestimmen zu können.

Wir wollen nunmehr den Doppelspalt (Bild 140/1) durch ein Beugungsgitter ersetzen und wieder der Reihe nach rotes, blaues und weißes Licht durch das Gitter schicken. Die hellen Beugungsstreifen auf dem Schirm bezeichnen wir als *Maxima*, die dunklen als *Minima*. Die Maxima sind jetzt heller und schmaler als beim Doppelspalt, während

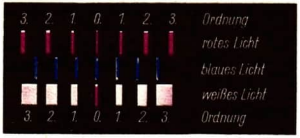


Bild 142/1 Beugungsbild hinter einem optischen Gitter

die Minima breiter geworden sind. Es ist üblich, die Maxima – beziehungsweise die dazwischenliegenden Minima – nach Ordnungen zu bezeichnen. Das in der Mitte liegende Maximum hat die Ordnung 0, und nach beiden Seiten schließen sich die Maxima höherer Ordnung an.
Im Bild 142/1 sind die Beugungsbilder der Versuchsreihe untereinander gezeichnet. Daraus ist zu ersehen, daß die entsprechenden Maxima des blauen Lichtes näher am Zentrum liegen als die des roten. Bei weißem Licht erkennt man beim Maximum 1. Ordnung am deutlichsten ein Farbband, dessen Grenzen blau beziehungsweise rot erscheinen. Diese Grenzfarben liegen an den Stellen, wo sie bei dem entsprechenden einfarbigen Licht erschienen. Bei höheren Ordnungen überlappen sich diese Farbbänder, und die dunklen Streifen der Minima verschwinden. In der Mitte überlagern sich beim Maximum 0. Ordnung alle Farben zu Weiß.

Die bei der Beugung weißen Lichtes entstehenden Farbbänder bezeichnet man als *Spektren*[1], die im nächsten Abschnitt näher erläutert werden. Die Zerlegung weißen Lichtes ergibt verschiedene Farben, und deren Vereinigung führt wieder zu Weiß.

3. Die Polarisation

Durch Interferenz und Beugung wird die Wellennatur des Lichtes nachgewiesen. Da diese Erscheinungen sowohl bei Längs- als auch bei Querwellen auftreten, muß eine weitere Untersuchung über die Art der Lichtwellen Aufschluß geben. Geeignet dafür ist die *Polarisation.*

3.1. Polarisation mechanischer Wellen

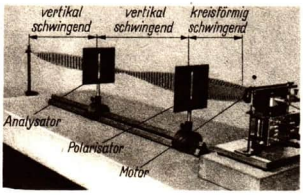
Die Erscheinung der Polarisation soll durch einen Vorversuch mit Seilwellen erklärt werden, der in vier Schritten durchgeführt wird (Bild 143/1).

19

V Ein Gummifaden wird durch einen kreisenden Erreger bei einer bestimmten Drehzahl zu einer spindelförmigen, stehenden Welle angeregt.

Durch Einfügen eines Spaltes erreicht man, daß die Querwelle hinter dem Spalt nur noch in der Ebene der Spaltrichtung schwingt. Man bezeichnet diesen Spalt als *Polarisator* und sagt, die Seilwelle ist *linear polarisiert.*

[1] spectrum (lat.): Bild



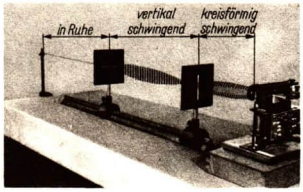


Bild 143/1 Linear polarisierte Querwelle durchsetzt Analysator bei Parallelstellung der Spalte ungehindert

Spalte stehen senkrecht aufeinander. Linear polarisierte Querwelle wird durch Analysator ausgelöscht

Ein zweiter Spalt steht parallel zum ersten. Er läßt die linear polarisierte Seilwelle ungehindert hindurchtreten. Dieser zweite Spalt heißt *Analysator*.
Der Spalt des Analysators steht senkrecht zu dem des Polarisators. Die linear polarisierte Querwelle ist hinter dem Analysator ausgelöscht.

Durch die Auslöschung einer Welle mit Hilfe eines Analysators kann man nachweisen, daß bei der Untersuchung eine linear polarisierte Querwelle vorlag. Wenn der Gummifaden in seiner Längsrichtung schwingen würde, hätte die Stellung der Spalte keinen Einfluß auf die Ausbreitung der Längswelle.

Die Polarisation läßt eine Unterscheidung zwischen Längs- und Querwelle zu.
Nur Querwellen lassen sich polarisieren.
Schwingen die Teilchen einer mechanischen Querwelle nur in einer Richtung, dann heißt die Welle linear polarisiert.

3.2. Polarisation des Lichtes

Durch Versuche wurde nachgewiesen, daß auch Lichtwellen polarisierbar sind. Dies gelingt am einfachsten mit *Polarisationsfiltern*. Diese bestehen aus dünnen Folien, in denen winzige Kristalle einer bestimmten chemischen Substanz in einer bevorzugten Richtung eingebettet sind. Diese Filter haben als Polarisator und Analysator die gleiche Aufgabe wie die Spalte bei der Polarisation von Seilwellen.

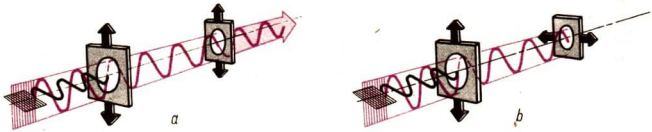


Bild 143/2 Polarisationsfilter in Parallelstellung (a) und in gekreuzter Stellung (b)

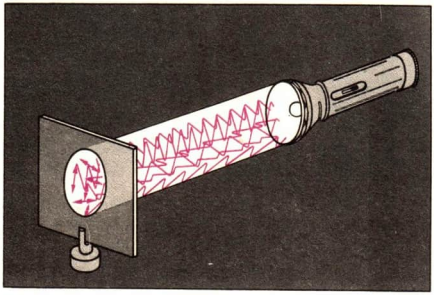


Bild 144/1 Schwingungsrichtungen bei natürlichem Licht

Es hat sich gezeigt, daß bei natürlichem Licht die Schwingungsrichtungen der Wellenzüge ganz willkürlich liegen (Bild 144/1). Durch den Polarisator werden die Lichtwellen linear polarisiert. Stehen die Durchlaßrichtungen der Filter senkrecht aufeinander, werden die polarisierten Lichtwellen ausgelöscht, und es herrscht hinter dem Analysator Dunkelheit (Bild 143/2). Man sagt, die Polarisationsfilter *stehen gekreuzt.*

Bringt man in den Strahlengang zwischen zwei gekreuzte Polarisationsfilter eine Zuckerlösung, so tritt merkwürdigerweise eine Aufhellung des Gesichtsfeldes ein. Wird der Analysator daraufhin um einen bestimmten Winkel gedreht, so zeigt sich wiederum Dunkelheit (Bild 144/2). Man muß daraus schließen, daß die Zuckerlösung die Schwingungsebene der linear polarisierten Welle gedreht hat. Die *Größe des Drehwinkels* ist abhängig von der Länge der Flüssigkeitssäule, der Konzentration der Lösung und der Wellenlänge des verwendeten Lichtes.
Nach diesem Prinzip kann mit einem *Polarimeter* in der Landwirtschaft und in der zuckerverarbeitenden Industrie schnell der Zuckergehalt von Zuckerrüben ermittelt werden. In der

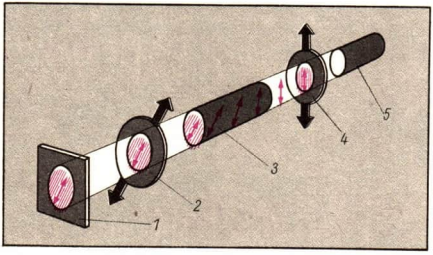
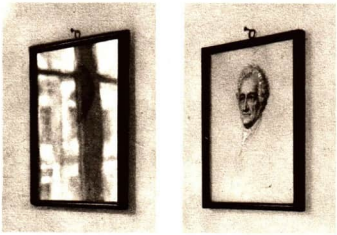


Bild 144/2 Drehung der Schwingungsebene durch eine Zuckerlösung
1 Schirm, 2 Analysator, 3 Zuckerlösung, 4 Polarisator, 5 Objektiv

Medizin wird mit Polarimetern der Zuckergehalt des Harns festgestellt, um Rückschlüsse auf einen eventuell vorliegenden Diabetes (Zuckerkrankheit) ziehen zu können.
Auch bei anderen Stoffen wurde diese Drehung der Schwingungsebene gefunden. Man bezeichnet diese Stoffe als *optisch aktiv*.
Licht kann auch polarisiert werden, wenn es beispielsweise von Glas reflektiert wird. Dabei tritt bei einem Einfallswinkel von 57° eine nahezu vollständige Polarisation auf. Beim Fotografieren kann man die Reflexe an Glasscheiben weitgehend ausschalten, indem man vor das Objektiv der Kamera ein Polarisationsfilter setzt. (Bild 145/1).



a b

Bild 145/1 Fotografische Aufnahme ohne (a) und mit (b) Polarisationsfilter

Licht läßt sich unter bestimmten Bedingungen polarisieren. Lichtwellen zeigen Eigenschaften von Querwellen.

Fragen, Übungen, Aufgaben

1. 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 Regenschirmseide, durch ein sehr feines Sieb oder durch ähnliche feinmaschige Gebilde! Was beobachten Sie, und wie ist diese Erscheinung zu erklären?
2. Blicken Sie auf eine Kerze durch einen möglichst schmalen Spalt zwischen beiden Daumen oder durch die Wimpern der fast geschlossenen Augen! Wie ist die beobachtete Erscheinung zu erklären?
3. Ein gutes Beugungsgitter können Sie sich selbst herstellen, wenn Sie auf einem größeren, weißen Bogen in regelmäßigen Abständen schwarze Streifen ziehen und den Bogen fotografieren. Das Negativ – am besten zwischen gerahmten Diagläsern – stellt dann ein optisches Gitter dar.
4. Wie lassen sich Lichtreflexe an Glasscheiben beim Fotografieren ausschalten?
5. Was versteht man unter einem optisch aktiven Stoff?

ZUSAMMENFASSUNG

Lichtwellen lassen sich durch Interferenz- und Beugungserscheinungen nachweisen.

Wie ist die Aussage „Licht und Licht ergibt Dunkelheit" zu verstehen?

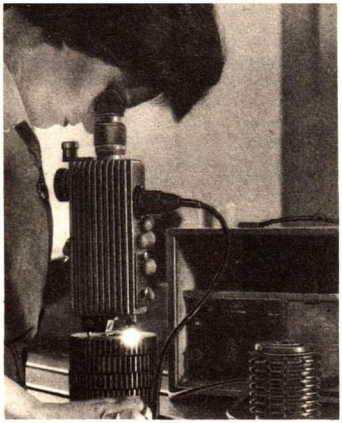
Einfarbiges Licht ergibt durch die Beugung an Spalten auf einem Schirm helle (Maxima) und dunkle Streifen (Minima), die nach Ordnungen bezeichnet werden.

Warum liegen unter gleichen Bedingungen die Maxima kürzerwelligen Lichtes dichter am Maximum 0. Ordnung als die des längerwelligen Lichtes?

Lichtwellen lassen sich polarisieren; sie zeigen Eigenschaften von Querwellen.

Wie läßt sich feststellen, ob eine Lichtwelle linear polarisiert ist?

Dispersion



In verschiedenen Industriezweigen ist es notwendig, die Legierungsbestandteile der Metallwerkstoffe zu bestimmen. Neben der chemischen Analyse wird die Spektralanalyse angewendet. Durch Dispersion[1] wird das am Werkstück erzeugte Bogenlicht im Handspektroskop mit Hilfe eines Prismas zerlegt und betrachtet. Das so sichtbar gemachte Spektrum gestattet einen Schluß auf die Zusammensetzung des untersuchten Werkstoffes.

1. Dispersion im Prisma

Wenn ein Lichtbündel durch ein Prisma gebrochen wird, zeigt das aufgefangene Bild des Strahlenbündels farbige Ränder. Um das Zustandekommen der farbigen Ränder eingehender untersuchen zu können, kann man folgenden Versuch ausführen:

20

V Mit einer Sammellinse wird ein beleuchteter Spalt auf einem Bildschirm abgebildet. Damit möglichst viel Licht an der Entstehung des Bildes beteiligt ist, beleuchtet man den Spalt mit konvergentem Licht. Es entsteht ein helles, weißes Bild des Spaltes.
Bringt man in den Strahlengang hinter die Linse ein Prisma, so wird das Licht, wie zu erwarten ist, von der brechenden Kante weg abgelenkt. Auf dem Bildschirm ist aber an Stelle des weißen Spaltbildes ein breiter, farbiger Streifen zu sehen, den man **Spektrum** nennt.

Diese Erscheinung hat der englische Physiker Isaac Newton bereits Ende des 17. Jahrhunderts näher untersucht.
Isaac Newton, geboren am 5.1.1643 zu Woolsthorpe in Lincolnshire, gestorben am 31.3.1727 in London, gilt als einer der bedeutendsten Naturwissenschaftler und als Begründer der klassischen mathematischen Physik. Seine Leistungen wurden bereits im Lehrbuch für die Klasse 9 gewürdigt.
Im Jahre 1704 veröffentlichte Newton seine „Optik". Sie enthält eine Erklärung der Spektral- und Körperfarben.

[1] Dispersion: Zerlegung von Licht durch Brechung

Die verschiedenen Farben des Spektrums gehen allmählich ineinander über, so daß man die Zahl der Farbtöne nicht genau angeben kann (siehe Farbtafel am Ende des Buches). Die **Hauptfarben** des Spektrums sind **Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett.** Blendet oder filtert man eine Spektralfarbe aus und läßt dieses einfarbige Licht durch ein weiteres Prisma gehen, so wird es zwar abgelenkt, aber nicht in andere Farben zerlegt. Die **Spektralfarben** können nicht weiter zerlegt werden. Man nennt sie deshalb **Grundfarben.**

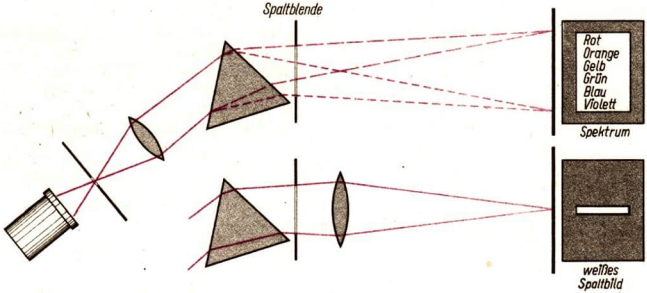


Bild 147/1 Versuchsanordnung zum Zerlegen des weißen Lichtes beim Durchgang durch ein Prisma und zur Wiedervereinigung der Spektralfarben zu Weiß

21

V Bringt man in den Strahlengang hinter das Prisma eine zylindrische Linse (Bild 147/1), so entsteht auf dem Bildschirm an Stelle des Spektrums wieder ein weißes Bild des Spaltes.

Aus den Beobachtungen der beiden Versuche kann man folgern, daß sich das weiße Licht der Lichtquelle aus den verschiedenen Spektralfarben zusammensetzt. Im ersten Versuch ist es beim Durchgang durch das Prisma in die einzelnen Farben zerlegt worden. Diesen Vorgang nennt man Dispersion des Lichtes. Im zweiten Versuch wurden die Spektralfarben wieder zu Weiß vereinigt.

Tabelle 10: Wellenlängen des sichtbaren Lichtes

Hauptfarbe	Rot	Orange	Gelb	Grün	Blau	Violett
Wellenlänge in nm	780...640	640...620	620...580	580...495	495...440	440...380

Die Entstehung des Spektrums ist darauf zurückzuführen, daß die Brechungszahl für die einzelnen Spektralfarben verschieden groß ist. Sie nimmt von Rot über Grün nach Violett zu. Da keine Lücken auftreten, müssen in den beobachteten Spektren sämtliche Wellenlängen des sichtbaren Lichtes vorhanden sein. Die Tabelle 10 gibt die Bereiche für die Hauptfarben an.
Verwendet man zum Zerlegen des Lichtes Prismen, die zwar den gleichen brechenden Winkel haben, aber aus verschiedenen Stoffen bestehen, etwa ein Kronglasprisma, ein Flintglasprisma und ein Hohlglasprisma, das mit Schwefelkohlenstoff gefüllt ist, so erhält man Spektren verschiedener Breite.

22

V Hält man im Versuch nach Bild 147/1 zwischen das Prisma und die zylindrische Linse einen schmalen Kartonstreifen und führt ihn langsam durch das Spektrum, so wird dadurch jeweils ein bestimmter Farbton ausgeblendet. Man erkennt ihn auf dem Kartonstreifen. Das Spaltbild ist in diesem Falle nicht weiß, sondern hat eine je nach der abgedeckten Spektralfarbe wechselnde **Mischfarbe.** Sie entsteht dadurch, daß sich alle übrigen Spektralfarben mischen. Entfernt man den Kartonstreifen, so kommt auch die ausgeblendete Farbe hinzu, und man erhält wieder Weiß.

Auch zwei reine Spektralfarben können sich zu Weiß ergänzen. Man nennt deshalb diese Farbpaare **Ergänzungs- oder Komplementärfarben**[1]. In grober Annäherung sind folgende Hauptfarben des Spektrums Komplementärfarben:

Rot – Grün Orange – Blau Gelb – Violett.

1.2. 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 des Spektrums hinaus geschwärzt wurde. Man bezeichnet diese unsichtbaren Strahlen als *ultraviolette* Strahlen, abgekürzt *UV-Strahlen.* Ihre Wellenlänge ist kleiner als die der sichtbaren violetten Strahlen.
Die ultravioletten Strahlen zeigen verschiedene Wirkungen:
Chemische Wirkung: UV-Strahlen schwärzen die Fotoplatte wie sichtbare Strahlen.
Physikalische Wirkung: UV-Strahlen können bestimmte Stoffe zum Leuchten im sichtbaren Spektralbereich anregen. Man bezeichnet diese Erscheinung als *Fluoreszenz.* Bei Leuchtstofflampen wird die Lichtausbeute durch eine Leuchtstoffschicht erhöht, die das UV-Licht in sichtbares umwandelt. Fälschungen können entdeckt werden, da sich im UV-Licht Farbunterschiede zeigen, die sonst nicht wahrgenommen werden.
Biologische Wirkung: UV-Strahlen üben auf den Körper eine belebende und heilende Wirkung aus. Sie fördern die Vitamin-D-Bildung. Der UV-Anteil des Sonnenlichtes ist besonders im Hochgebirge und in der staubfreien Seeluft wirksam. Durch Bestrahlungen mit der *Höhensonne,* die UV-Licht aussendet, können Krankheiten geheilt und kann besonders bei Kleinkindern im Winter dem Vitaminmangel vorgebeugt werden.

[1] complementum (lat.): Ergänzung

1.3. Das infrarote Spektrum

Untersucht man mit einem Thermoelement die Wärmeverteilung im Spektrum, so erreicht der Thermostrom jenseits des roten Endes des sichtbaren Spektrums seinen höchsten Wert 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 *infrarote* Strahlen. Diese Strahlen haben eine Wärmewirkung. In der Militärtechnik werden Ortungsgeräte eingesetzt, die beispielsweise auf die Infrarot-Wärmestrahlung der Auspuffgase und der Motoren von Panzerfahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen ansprechen. Durch Infrarotscheinwerfer kann ein Geländeabschnitt überwacht werden, ohne daß dies der Gegner direkt wahrnimmt. Das sichtbare Bild wird dabei durch sogenannte *Bildwandler* hervorgerufen. Nach diesem Prinzip arbeiten auch Nachtfahrgeräte für Kraftfahrzeuge, Nachtfernrohre und Infrarotzielgeräte.
In der Industrie werden *Infrarotstrahler* für Trocknungsprozesse und in der Landwirtschaft zur Kleintieraufzucht verwendet.

2. Der Spektralapparat

Um ein Spektrum in seinen Einzelheiten genau betrachten und mit bekannten Spektren vergleichen zu können, benutzt man den *Spektralapparat* oder das *Handspektroskop*. Die optische Einrichtung besteht aus den in Bild 149/1 gezeigten Teilen. Das zu untersuchende Lichtbündel tritt durch einen Spalt in das Spaltrohr und wird durch eine Linse parallel gerichtet, da der Spalt im Brennpunkt der Linse liegt. Das Lichtbündel durchdringt das Prisma und wird in seine spektralen Bestandteile zerlegt. Das Objektiv des Fernrohres vereinigt die Strahlen zu farbigen Spaltbildern. Sie bilden ein Spektrum, das durch das Okular betrachtet wird.

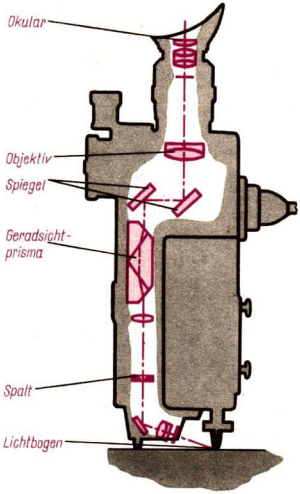


Bild 149/1 Strahlengang im Handspektroskop

3. Das Emissionsspektrum

Das Wort „Emission" bedeutet ebensoviel wie „Aussendung". Unter *Lichtemission* versteht man also die Aussendung von Licht. Lichtquellen *emittieren* Licht. Wird dieses Licht in ein Spektrum zerlegt, dann erhält man ein **Emissionsspektrum.**

3.1. Das kontinuierliche Spektrum

Bei den bisher zur Dispersion beschriebenen Versuchen wurden als Lichtquellen der glühende Metallfaden einer Glühlampe und der glühende Kohlestab einer Bogenlampe verwendet. In beiden Fällen handelt es sich um glühende feste Körper. Ihre Emissionsspektren sind zusammenhängende Farbbänder, die lückenlos vom Rot bis zum Violett reichen (siehe Farbtafel). Derartige lückenlos zusammenhängende Spektren nennt man **kontinuierliche Spektren.** Die Emissionsspektren aller glühenden festen und flüssigen Körper sind kontinuierlich. Das Leuchten vieler Flammen beruht auf der Lichtemission glühender Rußteilchen, die in der Flamme verbrennen. Da es sich auch hier um feste Teilchen handelt, ist zum Beispiel das Emissionsspektrum einer Kerzenflamme kontinuierlich.

Das Emissionsspektrum fester und flüssiger Körper ist kontinuierlich.

Die Lichtemission eines Körpers nimmt mit steigender Temperatur zu. Bei etwa 1000 °C bis 1500 °C ist die Emission vorwiegend auf den roten Teil des Spektrums beschränkt. Bei zunehmender Temperatur treten auch die anderen Bereiche des Spektrums bis zum Violett immer mehr hervor und als Gesamteindruck ergibt sich für das Auge ein gelblich-weißes Licht.

3.2. Das Linienspektrum

Ganz andere Spektren erhält man, wenn man als Lichtquelle ein leuchtendes Gas benutzt. Verdampft man zum Beispiel Salze der Alkalimetalle in einer nichtleuchtenden Bunsenbrennerflamme, dann färbt sich die Flamme. Verwendet man Kochsalz, so färbt sie sich gelb.
Betrachtet man das Spektrum dieser Flamme in einem Spektralapparat, so sieht man an Stelle eines kontinuierlichen Spektrums nur eine gelbe Linie (siehe Farbtafel). Diese Linie im Spektrum ist kennzeichnend für das Natrium. Bereits die kleine Menge von $3 \cdot 10^{-7}$ mg Natrium ruft diese Linie hervor. Verdampft man ein Lithiumsalz, so werden zwei rote Linien sichtbar. Thalliumsalze ergeben eine grüne Linie, Kaliumsalze zwei rote und eine violette Linie.
Sehr zahlreich sind die Linien in den Spektren von Eisen, Kupfer, Zink oder Aluminium, wenn diese bei hohen Temperaturen gasförmig vorliegen. Spektren, die nur aus einzelnen Linien bestehen, sind diskontinuierlich. Man nennt sie **Linienspektren.**
Mit einem Spektralapparat kann jedes Element an Hand seiner charakteristischen Spektrallinien festgestellt werden, auch wenn nur sehr geringe Mengen davon verdampft würden. Im allgemeinen genügen schon etwa $1 \cdot 10^{-7}$ mg bis $5 \cdot 10^{-7}$ mg (= 1 bis 5 zehnmilliardstel Gramm) eines Elements. Dieses Verfahren bezeichnet man als **Spektralanalyse.** Es wird häufig in der Chemie und bei der Materialprüfung zur *qualitativen Analyse* benutzt. Aber auch *quantitative Bestimmungen* sind auf Grund der Intensität der Linien möglich.

In den *Spektralröhren* sind Gase unter geringem Druck eingeschlossen. Das eingeschlossene Gas wird zum Leuchten angeregt, wenn man an die Elektroden der Röhre eine hohe Spannung anlegt (vgl. S. 10 Gasentladungen).

Die Emissionsspektren glühender Gase sind im allgemeinen Linienspektren. Sie können zum Nachweis geringster Mengen eines Elementes dienen (Spektralanalyse).

4. Das Absorptionsspektrum

Unter Absorption versteht man die Eigenschaft verschiedener Stoffe, Lichtenergie aufzunehmen. Ein Versuch soll dies verdeutlichen.

23

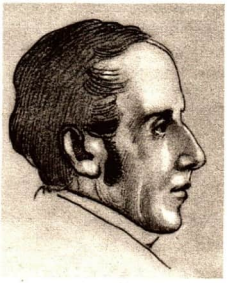
V Ähnlich wie im Versuch zur Dispersion wird das Spektrum einer Kohlebogenlampe auf einem Bildschirm erzeugt. Es enthält alle Spektralfarben. Nun hält man in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Spalt eine rote Glasscheibe. Das Spektrum verkürzt sich dadurch und besteht nur noch aus dem roten Teil.

Der Versuch zeigt, daß die rote Glasscheibe nur rotes Licht hindurchläßt und alle anderen Farben absorbiert. Die Farbglasscheibe bezeichnet man als **Filter,** das Spektrum als **Absorptionsspektrum.** Ein Filter kann auch verschiedene Farbanteile hindurchlassen. Außer farbigen Gläsern kann man als Filter auch andere feste, flüssige und gasförmige Stoffe verwenden.

Optische Filter absorbieren farbige Anteile des weißen Lichtes. Ein Absorptionsspektrum entsteht, wenn das Licht einer Lichtquelle vor der Zerlegung in Farben erst durch einen Stoff hindurchgeht, der einzelne Anteile des Lichtes absorbiert.

Das Sonnenspektrum scheint bei flüchtiger Betrachtung kontinuierlich zu sein. Untersucht man es aber genau, so beobachtet man in diesem Spektrum eine große Zahl dunkler Linien. Sie wurden von Joseph von Fraunhofer 1814 entdeckt und später nach ihm benannt. Die besonders stark hervortretenden Linien werden mit Buchstaben bezeichnet (siehe Farbtafel!). Seither hat man im Sonnenspektrum einige tausend Fraunhofersche Linien festgestellt. Im Jahre 1859 gelang es Bunsen und Kirchhoff, im Laboratorium ähnliche Spektren zu erzeugen. Betrachtet man im Spektralapparat das Spektrum einer Kohlebogenlampe und bringt vor den Spalt des Spaltrohres eine heiße Bunsenflamme, in der man ein Stück Natrium oder etwas Kochsalz verdampft, so beobachtet man im gelben Teil des kontinuierlichen Spektrums der Bogenlampe eine schwarze Linie. Sie befindet sich an der gleichen Stelle, an der im Emissionsspektrum des Natriums die gelbe Linie auftritt.
Auch bei anderen Gasen tritt die gleiche Erscheinung auf.

Ein Element absorbiert im gasförmigen Zustand diejenigen Spektrallinien, die in seinem Emissionsspektrum enthalten sind.



JOSEPH VON FRAUNHOFER, Schöpfer der deutschen Präzisionsoptik. Durch unermüdlichen Fleiß entwickelte er sich vom Glaserlehrling zum Direktor eines bekannten optischen Betriebes und wurde schließlich 1823 Professor in München. Er konstruierte hervorragende optische Geräte, verbesserte das astronomische Fernrohr und ermittelte als erster mit Beugungsgittern sehr genaue Werte für Lichtwellenlängen. Im Jahre 1814 entdeckte er die nach ihm benannten Absorptionslinien im Sonnenspektrum.

Bild 152/1 JOSEPH VON FRAUNHOFER (1787 bis 1826)

Auch das Sonnenspektrum ist ein Absorptionsspektrum. Die Fraunhoferschen Linien sind Absorptionslinien. Die Strahlung, die von der Sonnenoberfläche kommt, durchdringt die äußere Gashülle der Sonne, die Chromosphäre, und wird dort zum Teil absorbiert.
Aus der Lage der dunklen Linien kann man erkennen, welche Stoffe in der durchstrahlten Schicht vorhanden sind. So konnten bereits BUNSEN und KIRCHHOFF feststellen, daß zahlreiche auf der Erde vorkommende Elemente auch auf der Sonne existieren. Gegenwärtig sind 64 Elemente auf der Sonne mit Sicherheit nachgewiesen. Im Jahre 1868 wurde beispielsweise ein Element im Spektrum der Sonne entdeckt, das auf der Erde bis dahin noch nicht festgestellt worden war, das man als Sonnenstoff, Helium, bezeichnete. Erst 1895 konnte sein Vorkommen in der Lufthülle der Erde auf Grund der entsprechenden Emissionslinien nachgewiesen werden.

Die Untersuchung der Spektren der Sonne sowie anderer Fixsterne und der Planeten ermöglichen Rückschlüsse auf Größe, Temperatur, stoffliche Zusammensetzung und Entfernung der Himmelskörper. Diese astrophysikalischen Forschungen werden durch sowjetische und amerikanische Weltraumforschungen ergänzt und erweitert. Die Ergebnisse zeigen, daß im Kosmos und auf der Erde die gleichen Naturgesetze gelten, und bestätigen damit die materielle Einheit der Welt.

5. Die Farben

5.1. Körperfarben

Die Farben der Gegenstände unserer Umgebung bezeichnet man als **Körperfarben.**
Entwirft man ein kontinuierliches Spektrum auf weißem, gelbem, blauem und schwarzem Mattpapier, dann beobachtet man folgende Unterschiede:

Weißes Papier: Alles Licht wird reflektiert; deshalb erscheint das Papier im Tageslicht auch weiß.

Gelbes Papier: Gelb wird vollkommen reflektiert, Rot, Orange und Grün etwas schwächer. Der blaue Teil des Spektrums erscheint schwarz, da er absorbiert wird.

Blaues Papier: Blau wird vollkommen reflektiert, Violett und Grün etwas schwächer. Die übrigen Spektralfarben werden absorbiert.

Schwarzes Papier: Alles Licht wird absorbiert; deshalb erscheint das Papier im Tageslicht auch schwarz.

Aus diesen Versuchen schließen wir:

Körperfarben entstehen dadurch, daß die Gegenstände bestimmte Anteile des auftreffenden Lichtes absorbieren, während der Rest reflektiert wird.

● *Wie erscheint ein rotes Tuch, wenn grünes Licht auftrifft?*

5.2. Farbmischungen

Bei der Herstellung von Malerfarben oder bei einem Farbdruck will man bestimmte Farbtöne erzielen. Diese erreicht man durch zwei verschiedene Mischverfahren.

Additive Farbmischung. Wenn Licht verschiedener Wellenlänge auf dieselbe Stelle der Netzhaut des Auges fällt, wird ein bestimmter Farbeindruck hervorgerufen. Dieser ergibt sich gleichsam aus der Addition der verschiedenen Farbanteile.

Beispiele

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 (siehe Farbtafel).

Eine runde Pappscheibe besitzt Sektoren in den Spektralfarben. Wenn diese Scheibe in schnelle Rotation versetzt wird, trifft auf dieselbe Stelle der Netzhaut unseres Auges in sehr kurzen Zeitabständen Licht der verschiedenen Wellenlängen. Man erblickt die Scheibe in einem hellen Grau, da ein Teil des Lichtes absorbiert wird.

Subtraktive Farbmischung. Farbiges Licht erhält man, wenn weißes Licht durch eine gefärbte Glasplatte, ein sogenanntes *Farbfilter*, fällt. Das Filter absorbiert bestimmte spektrale Farbanteile. Vom ursprünglichen weißen Licht werden einzelne Teile subtrahiert.

Beispiele

Ein Blau- und ein Gelbfilter werden aufeinandergelegt und weißes Licht hindurchgeschickt. Das Auge nimmt Grün wahr, da alle anderen Farben jeweils in einem Filter verschluckt werden.

Ebenso ergibt sich durch subtraktive Mischung Grün, wenn wir Gelb und Blau des Wasserfarbkastens mischen. Diese Wasserfarben bestehen aus winzigen Farbkörnchen, von denen die gelben Blau und Violett und die blauen Rot, Orange und Gelb absorbieren. Da Grün von allen Farbkörnchen reflektiert wird, nimmt unser Auge diese Farbe wahr.

Drei Farbfolien, Gelb, Purpur und Blaugrün, liegen so in einem Diarähmchen, daß sie einander teilweise überlappen. Bei der Projektion entstehen durch Teilabsorptionen des weißen Lichtes die Mischfarben Rot, Grün und Ultramarinblau. Beim Durchgang durch alle drei Folien wird das gesamte Licht absorbiert, und die Mitte erscheint nahezu schwarz (siehe Farbtafel).

Beim *Farbdruck* ist eine gute Farbwiedergabe möglich, wenn man die Farben Rot, Gelb und Blau zur Mischung bringt. Man fertigt deshalb von der Vorlage drei Auszüge in den entsprechenden Farben und außerdem noch einen Schwarz-Weiß-Auszug an. In diesem Falle spricht man von einem Vierfarbendruck. (Für Gemäldereproduktionen werden bis zu 11 Druckfarben benutzt.) Unter Verwendung gesonderter Druckplatten werden dann die 4 Teilbilder übereinandergedruckt. Jedes Teilbild besteht aus sehr vielen kleinen farbigen Pünktchen. Nach dem Übereinanderdrucken liegen die verschiedenfarbigen Pünktchen nebeneinander beziehungsweise teilweise oder vollkommen übereinander, so daß in den beiden letzten Fällen eine subtraktive Farbmischung zustande kommt (siehe Farbtafel). Der gesamte Farbeindruck ergibt sich aus einer additiven Mischung, da die farbigen Pünktchen nicht mehr getrennt wahrgenommen werden können.
Auch in der *Farbfotografie* werden alle Farbtöne durch das Mischen dreier Farbkomponenten erzielt. Beim *Umkehrfilm* erhält man nach dem Entwicklungsprozeß Diapositive in den natürlichen Farben. Der *Negativfilm* zeigt die komplementären Farben. Von ihm können beliebig viele Kopien angefertigt werden (siehe Farbtafel).

Die Entwicklung der Lichttheorie

1678 legte der holländische Wissenschaftler CHRISTIAN HUYGENS (vgl. S. 68 mechanische Wellen) eine **Wellentheorie** vor. Da nach damaliger Erkenntnis Wellen sich nur in einem Medium ausbreiten können, nahm er einen *Lichtäther* an. Dieser sollte so fein und unwägbar sein, daß er alle Körper durchdringt und auch den gesamten Weltenraum erfüllt. Reflexion und Brechung ließen sich mit dieser Wellentheorie leicht erklären, wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit in optisch dichteren Stoffen kleiner sein mußte als in einem optisch dünneren Medium.
Um die gleiche Zeit entwickelte der englische Physiker ISAAC NEWTON seine **Korpuskulartheorie**, die er 1704 in seinem Buch „Optics" umfassender begründete. Nach Newtons Auffassung sollte das Licht aus kleinen Masseteilchen (Korpuskeln) bestehen, die mit großer Geschwindigkeit aus der Lichtquelle herausgeschleudert werden. Mit dieser Teilchenstrahlung konnten die geradlinige Ausbreitung und die Reflexion ohne weiteres erklärt werden. Zur Deutung der Brechung und der Dispersion nahm Newton an, daß den Spektralfarben Teilchen verschiedener Größe entsprechen, die durchsichtige Körper wegen ihrer Kleinheit fast ungehindert durchdringen können. Danach sollten die kleineren Korpuskel des violetten Lichtes im dichteren Medium mehr abgelenkt werden als beispielsweise die größeren des roten Lichtes. Die Lichtgeschwindigkeit mußte nach diesen Vorstellungen im dichteren Medium größer sein als im dünneren. Zusammengefaßt ergibt dies:

Wellentheorie / Korpuskeltheorie — fordert für das dichtere Medium — kleinere / größere — Lichtgeschwindigkeit.

Kurz nach 1800 wurden besonders durch den englischen Arzt YOUNG und den französischen Physiker FRESNEL die Interferenz- und Beugungserscheinungen untersucht. Dabei mußte das Licht als Wellenerscheinung aufgefaßt werden.
1862 konnte FOUCAULT den entscheidenden experimentellen Beweis für die Richtigkeit der Wellentheorie antreten, indem er die Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien bestimmte und feststellte:

In allen Stoffen ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als im Vakuum.

1865 brachte der englische Physiker MAXWELL eine Klärung, indem er auf Grund theoretischer Voraussagen auch das Licht als elektromagnetische Welle betrachtete. Als HEINRICH HERTZ 1888 zum ersten Mal elektrische Wellen nachwies, konnte er bei diesen ebenfalls Brechung, Beugung, Interferenz und Polarisation beobachten. Schließlich konnte durch zahlreiche Versuche bestätigt werden, daß elektromagnetische Wellen für ihre Ausbreitung keines Mediums bedürfen.

Das Licht breitet sich in Form elektromagnetischer Wellen aus.

Verschiedene optische Erscheinungen, beispielsweise der lichtelektrische Effekt (vgl. S. 29), die erst nach Aufstellung der Maxwellschen Theorie entdeckt wurden, können mit ihr nicht erfaßt werden. Sie werden mit einer neuen Theorie, der *Lichtquantentheorie*, erklärt. In dieser tauchen, unserem modernen Kenntnisstand angepaßt, die alten Newtonschen Ideen der korpuskularen Natur des Lichts wieder auf. Diese beiden Theorien sind Modellvorstellungen, die für sich allein den wahren Vorgang nur ungenügend beschreiben. Man spricht deshalb von einer **Doppelnatur** des Lichtes, die große Schwierigkeiten bei der Aufstellung einer einheitlichen Theorie vom Licht bereitet.

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Ist der Spalt zwischen Lichtquelle und Prisma nach Bild 147/1 sehr breit, so erhält man kein Spektrum. Es ergibt sich ein weißes Spaltbild, dessen eine Seite rötlich und dessen andere Seite bläulich gefärbt ist. Warum ist der mittlere Teil des Bildes weiß?
2. Warum tritt beim Durchgang des Lichtes durch eine Fensterscheibe keine Farbzerlegung ein?
3. Wodurch kommt die Farbzerlegung des Lichtes beim Durchgang durch ein Prisma zustande?
4. Welche Bedeutung hat die Spektralanalyse? Nennen Sie Anwendungsmöglichkeiten!
5. Welcher Unterschied besteht zwischen Spektralfarben und Körperfarben?
6. Warum sehen Gegenstände bei künstlichem Licht anders aus als bei Tageslicht?
7. Fertigen Sie sich kleine *Farbkreisel* an, indem Sie durch den Mittelpunkt runder Pappscheibchen jeweils ein Streichholz stecken! Lassen Sie diese Kreisel rotieren, nachdem Sie die Scheibchen je zur Hälfte mit entsprechenden Komplementärfarben bemalt haben! Was für eine Farbmischung liegt vor?

ZUSAMMENFASSUNG

Weißes Licht ist zusammengesetztes Licht.

Wie kann man die einzelnen Bestandteile des weißen Lichtes nachweisen?

Die Spektralfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett bezeichnet man als Hauptfarben.

Wie kann man beweisen, daß Spektralfarben nicht weiter zerlegbar sind?

Farbfilter absorbieren bestimmte Spektralbereiche.

Welche Wirkung hat ein Rotfilter?

Emissionsspektren glühender Gase sind im allgemeinen Linienspektren.

Wie unterscheiden sich die Emissions- von den Absorptionsspektren?

Körperfarben ergeben sich aus der additiven Mischung der Spektralfarben, die ein Körper reflektiert oder hindurchläßt.

Wie kommt Grün zustande, wenn man gelbe und blaue Malerfarben mischt?

Röntgenstrahlen

WILHELM CONRAD RÖNTGEN (1845 bis 1923), Professor für Mathematik und Physik in Gießen, Würzburg und München. Er entdeckte 1895 in Würzburg die nach ihm benannten Röntgenstrahlen und erhielt dafür 1901 den ersten Nobelpreis für Physik. Die Entdeckung der Röntgenstrahlen erfolgte bei der Untersuchung der damals noch nicht lange bekannten Katodenstrahlen.

1. Die Entstehung der Röntgenstrahlen

In modernen Röntgenröhren werden die Elektronen von Glühkatoden ausgestrahlt (Bild 156/2). Ein glühender Wolframdraht emittiert je nach der Höhe der Temperatur mehr oder minder viele Elektronen (vgl. S. 16). 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

Bild 156/2 Drehanoden-Röntgenröhre
Von einer Hohlspiegelkatode (1) werden die austretenden Elektronen so gebündelt, daß sie in einem kleinen Brennfleck auf der Anode (2) auftreffen. Im Auftreffpunkt entstehen die Röntgenstrahlen. Die scheibenförmige Drehanode wird von einem Kurzschlußläufermotor (3) angetrieben, damit im Brennfleck nicht das Anodenmaterial verdampft. Die Glasröhre ist in einem spannungs- und strahlensicheren Gehäuse untergebracht. Die Röntgenröhre wird mit Öl gekühlt.

sogenannten Brennfleck vereinigen. Beim Aufprall der Elektronen entstehen 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.
Die kinetische Energie der Elektronen wird zum größten Teil beim Aufprall auf die Anode in Wärme umgewandelt.
Die Untersuchungen der Röntgenstrahlen ergaben, daß ihre Ausbreitung mit der Modellvorstellung einer elektromagnetischen Welle – ebenso wie beim Licht – beschrieben werden kann. Andererseits zeigen sie auf Grund ihrer bedeutend kleineren Wellenlänge (vgl. Bild 158/1) zum Teil andere Eigenschaften als Lichtwellen.

Röntgenstrahlen zeigen Eigenschaften elektromagnetischer Wellen. Sie entstehen beim Auftreffen schnell bewegter Elektronen auf die Anode einer Röntgenröhre. Moderne Röntgenröhren sind Glühkatodenröhren.

2. Eigenschaften und Wirkungen der Röntgenstrahlen

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. 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 organische Stoffe. Besonders schwer durchlässig ist Blei. Mit zunehmender Dicke eines Körpers nimmt auch die Absorption der Röntgenstrahlen zu.
Physikalische und chemische Wirkungen. Die Röntgenstrahlen rufen wie die UV-Strahlen bei bestimmten Stoffen Fluoreszenzen hervor. Zum Nachweis dieser Wirkung benutzt man Leuchtschirme. Auf die Luft wirken Röntgenstrahlen ionisierend, so daß die Luft dadurch leitend wird (vgl. S. 7).
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 Filme zum Schutze vor Lichtstrahlen eingelegt sind.
Biologische Wirkungen. Von großer Bedeutung ist die Eigenschaft der Röntgenstrahlen, lebendes Gewebe zu zerstören oder im Wachstum zu beeinflussen. 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.

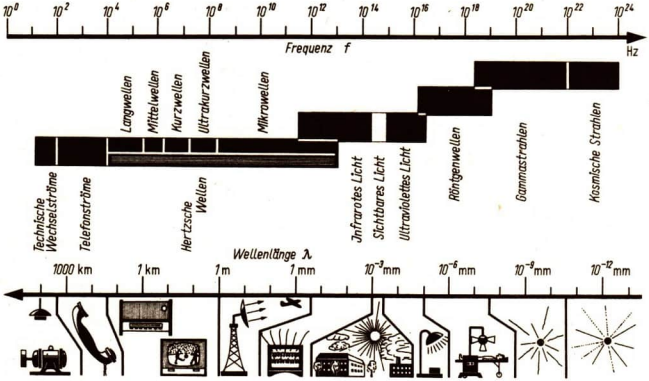
Beim Arbeiten mit Röntgenstrahlen muß man daher die Strahlenschutzvorschriften genauestens beachten. Vor allem Keimzellen sind gegen Röntgenstrahlen sehr empfindlich. Ärzte und Röntgenassistentinnen, die der Röntgenstrahlung öfters ausgesetzt sind, schützen sich daher durch Bleigummischürzen und -handschuhe. Bei den kurzzeitigen Durchleuchtungen oder Röntgenaufnahmen besteht aber für den Patienten keine Gefahr. Anwendungsbeispiele für Röntgenstrahlen sind auf Seite 192 der Anwendung von radioaktiver Strahlung gegenübergestellt.

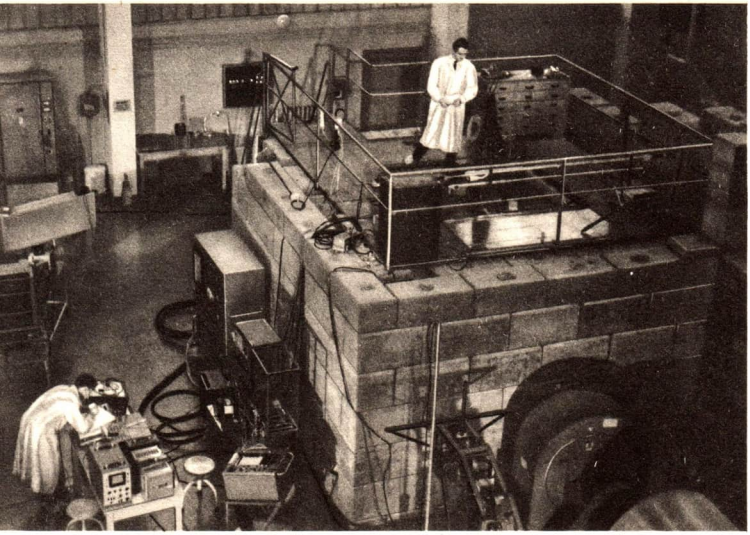
Das elektromagnetische Spektrum

Elektromagnetische Wellen sind periodische Änderungen magnetischer und elektrischer Felder. Die elektromagnetischen Wellen aller Frequenzen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus. Auch für sie gilt das Gesetz über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen.

Bild 158/1 Wellenskale der elektromagnetischen Wellen nach LEBEDEW

Der bedeutende russische Physiker P. N. LEBEDEW führte um 1900 eine besondere Form der grafischen Darstellung für die elektromagnetischen Wellen ein, die man als Wellenskale bezeichnet. Die einzelnen Bereiche werden dabei als Strecken dargestellt. Ihre Gesamtheit ergibt das sogenannte elektromagnetische Spektrum.

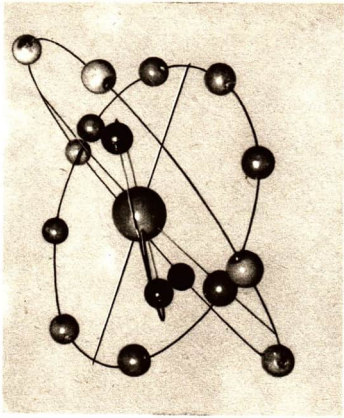




Atomphysik

Vor wenigen Jahrzehnten war die Atomphysik noch das Forschungsgebiet einiger weniger Wissenschaftler. Später wurden dann bedeutende Mittel und Arbeitskräfte für diese Forschungen bereitgestellt, weil die Wissenschaft erkannt und deutlich gemacht hatte, daß mit der Kenntnis von den Vorgängen innerhalb der kleinsten Teilchen der Stoffe wichtige Erscheinungen in der Natur erkannt und erklärt werden können.
Heute sind Wissenschaftler aller Nationen damit beschäftigt, immer weiter in das Innere der Stoffteilchen vorzudringen, das Verhalten der bereits erkannten Teilchen zu studieren und diese Erkenntnisse für die Gesellschaft nutzbar zu machen. Beispiele dafür sind die Anwendung strahlungsaktiver Stoffe zum Erforschen biologischer Vorgänge, zum Erkennen und Heilen von Krankheiten, zum Prüfen und Messen in der Technik, sowie die Umformung der Kernenergie zu nutzbarer elektrischer, thermischer oder mechanischer Energie.

Das Atommodell



Im Unterricht wurde bereits an verschiedenen Stellen das Modell eines Atoms beschrieben. Es ist heute allgemein bekannt, daß jedes Atom aus einem Kern besteht, um den sich Elektronen bewegen. Im Chemieunterricht wurden Beispiele chemischer Bindung aus dem Aufbau der Elektronenhülle erklärt und im Physikunterricht wurde das Elektron als Ladungsträger untersucht. Diese Erkenntnisse wurden in einer Jahrtausende währenden Forschungsarbeit durch viele Wissenschaftler zusammengetragen, und ständig werden diese Erkenntnisse ergänzt und erweitert.

1. Die Entwicklung des Atombegriffs

Um das ewige Werden und Vergehen in der Natur zu verstehen, wurde von dem griechischen Materialisten Leukipp und seinem Schüler Demokrit (um 400 v. d. Z.) die Lehre von den Atomen, die Atomistik, geschaffen.
Demokrit nahm an, daß es im leeren Raume unendlich viele Stoffteilchen gibt, die qualitativ gleich, der Gestalt nach aber verschieden sind. Er nannte sie *Atome*, d. h. Unteilbare. Sie sollten unveränderlich und wegen ihrer Kleinheit mit den Sinnen nicht wahrnehmbar sein. Die Mannigfaltigkeit der Welt erklärte Demokrit aus der verschiedenen Gestalt und der verschiedenen Anordnung der Atome in den Körpern. Alles Werden war nach seiner Ansicht nur eine lokale, d. h. örtliche Veränderung der Atome. Qualitätsunterschiede sind nur Unterschiede der Quantität und der räumlichen Verhältnisse.

Eine Möglichkeit experimenteller Untersuchungen war zur damaligen Zeit nicht gegeben. Es fehlten die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen, um eine solche Hypothese wie die Atomistik experimentell zu überprüfen.

Epikur hat um 300 v. d. Z. die Lehre Demokrits aufgegriffen und weiterentwickelt.
Viele Jahrhunderte vergingen danach, bis die Atomistik wieder beachtet wurde. Baco von Verulam (1561 bis 1626), ein englischer Staatsmann und Denker, vertrat die Ansicht, daß sich die Natur ohne die Annahme von Atomen nicht erkennen lasse.

Der französische Physiker PETRUS GASSENDI (1592 bis 1655) erneuerte die Lehre Epikurs. Der englische Gelehrte ISAAC NEWTON (1643 bis 1724) hat sich die Lehre von den Atomen nach der Darstellung Gassendis zu eigen gemacht. Auch der russische Naturforscher MICHAEL WASSILJEWITSCH LOMONOSSOW (1711 bis 1765) hat bereits die Atome, die er „Elemente" nannte, von den von ihm als „Korpuskeln" bezeichneten Molekülen unterschieden.

Durch die Entwicklung des Maschinenbaues angeregt, begannen sich verschiedene Wissenschaftler in England mit dem Aufbau der Werkstoffe eingehender zu beschäftigen. Der englische Lehrer JOHN DALTON (1766 bis 1844) entdeckte beim Untersuchen chemischer Verbindungen, daß sich so bekannte chemische Grundstoffe wie Stickstoff und Sauerstoff nur in ganz bestimmten Massenverhältnissen miteinander verbinden. Diese Zusammenhänge können auf einfache Weise nur mit Hilfe des Atombegriffes erklärt werden; sie wurden später in den *Gesetzen von den konstanten und multiplen Proportionen* formuliert. Die daraus gewonnenen Verhältniszahlen führten zur Bestimmung der *Atommassen*. Bei der wissenschaftlichen Entwicklung dieser Beziehungen hat sich dafür der Begriff *Atomgewicht* eingebürgert.

DALTONS **Atomhypothese** umfaßt folgende Aussagen:

Jedes Element besteht aus unzerstörbaren Atomen.
Die Atome des gleichen Elements haben gleiche Größe und gleiche Masse.
Chemische Verbindungen entstehen durch Vereinigung von Atomen verschiedener Elemente.

FARADAY (1833) fand danach bei der Untersuchung elektrolytischer Vorgänge ebenfalls Gesetzmäßigkeiten, die nur mit DALTONS Atomhypothese erklärt werden konnten. Nach diesen Erkenntnissen konnte der österreichische Physiker LOSCHMIDT (1865) die Zahl der Moleküle bestimmen, die in einem Gasvolumen von einem Kubikzentimeter enthalten sind. Damit wurde es wiederum möglich (nach HELMHOLTZ 1881), die Größe der elektrischen Elementarladung zu bestimmen und den Zusammenhang zwischen den kleinsten Bausteinen der Stoffe und der Elektrizität zu begründen. Ein weiteres Ergebnis bei der Erforschung des Aufbaus der Stoffe war der Nachweis des Physikers MAX VON LAUE, daß Kristalle einen gitterartigen Aufbau aus Atomen, Molekülen oder Ionen haben.

● *Erläutern Sie die Beugung einer Welle!*

Die französischen Physiker BECQUEREL (1896), MARIE und PIERRE CURIE (1898) untersuchten die Erscheinungen der Röntgenstrahlen und strahlender Elemente. Dabei gelang ihnen der Nachweis der Radioaktivität verschiedener Stoffe und erstmalig die Gewinnung von *Radium* (Ra) und von *Polonium* (Po).

Bild 161/1 Beugungsbild von Röntgenstrahlen an einem Kristall

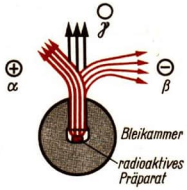


Bild 162/1 Aufspalten radioaktiver Strahlung durch ein Magnetfeld. Ein Teil der Strahlung, er wurde als α-Strahlung bezeichnet, verhält sich im Magnetfeld wie elektrisch positiv geladene Teilchen. Die β-Strahlung verhält sich wie elektrisch negativ geladene Teilchen

Bei den Untersuchungen der radioaktiv strahlenden Elemente entdeckte man, daß sich die von diesen Elementen ausgehenden Strahlen ähnlich wie elektrische Ladungen verhalten.

Man bezeichnete diese Strahlen als α- und β-**Strahlen.** Man hat später nachgewiesen, daß sie aus kleinen Masseteilchen, aus *Korpuskeln* bestehen. Außer diesen gibt es noch eine Strahlenart, die sich durch elektrische und magnetische Felder nicht beeinflussen läßt, sie wird durch diese nicht abgelenkt. Diese γ-**Strahlen** verhalten sich elektrisch neutral, sie bestehen nicht aus Korpuskeln, sondern stellen elektromagnetische Wellen dar, die größere Energiebeträge übertragen als die Röntgenwellen. Das Durchdringungsvermögen der γ-Strahlen ist sehr hoch und die schädigende Wirkung auf den lebenden Organismus entsprechend groß.

Beim Umgang mit radioaktiven Präparaten muß der Strahlenschutz unbedingt beachtet werden.

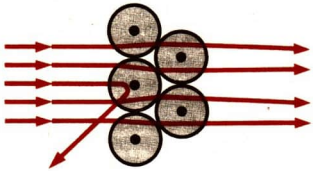
2. Das Atommodell von Rutherford

Bisher ist die Erforschung des Atoms als Ganzes, als Baustein der Stoffe beschrieben worden. Einen wesentlichen Schritt brachte der deutsche Physiker Lenard die Atomforschung voran, nachdem es ihm gelungen war, mit Hilfe von Katodenstrahlen in das Innere der Atome einzudringen und nachzuweisen, daß das Innere der Atome stofflich fast leer ist und daß dort hauptsächlich elektrische Felder existieren. Lenards wissenschaftliche Leistungen wurden dadurch überschattet, daß er sich aktiv dem Faschismus in Deutschland zur Verfügung stellte.

Mit Hilfe der Katodenstrahlen (Elektronen) wurde eine Möglichkeit zum Erforschen des Atominnern geschaffen. Der englische Physiker Ernest Rutherford (1871 bis 1937) stellte ähnliche Versuche mit α-Teilchen an (Bild 163/1). Das sind Korpuskeln, deren Masse etwa 7300 mal so groß ist wie die des Elektrons und die eine doppelt so große positive Ladung tragen.

Die Verteilung der Ablenkung (Streuung) konnte nur so erklärt werden, daß die positiv geladenen Teilchen bis in die Nähe einer ebenfalls positiven Ladung gelangen, die sie nach einem dem Gravitationsgesetz ähnlichen Gesetz abstößt.

Bild 163/1 Ablenkung von α-Teilchen
RUTHERFORD und seine Mitarbeiter fanden in den Jahren 1906 bis 1913, daß die α-Teilchen dünne Metallschichten, d. h. Tausende von Atomen, ohne große Ablenkung durchdringen, gelegentlich aber stärkste Ablenkung erfahren. Von den Elektronen der Atome können die α-Teilchen wegen ihrer großen Masse jedoch kaum beeinflußt werden



RUTHERFORD schloß, daß die überwiegende Masse des Atoms im Zentrum konzentriert sei und eine positive Ladung besitze. Er bezeichnete dies als den **Atomkern.**
Die größten Ablenkungswinkel sind auf sehr starke Abstoßung zurückzuführen. Eine große Ablenkung kann nur eintreten, wenn sich das betreffende α-Teilchen dem Kern sehr dicht genähert hat. Da es sich dabei nur um vereinzelte Fälle handelte, muß der Kern sehr klein sein. Die Rechnung ergibt einen Durchmesser, der kleiner als 10^{-14} m ist. Aus den geschilderten Erfahrungen entwickelte RUTHERFORD ein Atommodell.

Das Rutherfordsche Atommodell

1. Ein Atom besteht aus einem *Atomkern* und einer *Atomhülle.* Die *positive Ladung* und fast die gesamte *Masse des Atoms* sind im Kern konzentriert.
2. Elektronen in der Hülle kompensieren die positive Ladung, so daß das Atom elektrisch *neutral* ist. Die Elektronen müssen in dauernder Bewegung sein, damit sie nicht infolge der elektrostatischen Anziehung in den Kern stürzen.

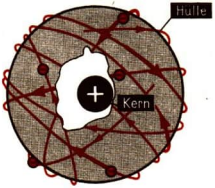


Bild 163/2 Atommodell nach RUTHERFORD (nicht maßstabgetreu)

3. Da der Kerndurchmesser nur etwa 0,0001 Atomdurchmesser groß ist, muß die Hülle im wesentlichen leerer Raum sein.

RUTHERFORD hat einmal scherzhaft gesagt: „Ein Atom besteht in der Hauptsache aus nichts."

Beispiel

1 m³ Platin hat nur etwa 1 mm³ undurchdringliche Substanz. Denkt man sich die Atomkerne als stecknadelkopfgroße Masseklümpchen, so würden sie 30 m Abstand voneinander haben. Dazwischen bewegen sich einige Elektronen von verschwindend geringer Masse ($0{,}9 \cdot 10^{-27}$ g).

Sinn und Aufgabe von Modellen. Der Mensch ist tief verwurzelt in den Eindrücken und Erfahrungen des täglichen Lebens. Deshalb versucht er auch in Gebieten wie z. B. in der Atomphysik, in die seine Sinne ihm keinen unmittelbaren Zugang ermöglichen, Erfahrungen und wissenschaft-

liche Ergebnisse durch anschauliche Bilder (Atommodelle) verständlich zu machen. Auch wenn hierdurch die Wirklichkeit nicht vollständig erfaßt wird, können solche Modellvorstellungen sehr fruchtbar für die Forschung sein. Wenn diese Vorstellungen, wie z. B. beim Atommodell, dem Erfahrungsbereich zu einem bestimmten Zeitpunkt der Forschung angepaßt sind, so ermöglichen sie Fragestellungen für neue Versuche, deren Ergebnisse unter Umständen zu einer Verfeinerung oder zu einer Veränderung des Modells führen.
Ein Modell ist nie ein absolut getreues Abbild der Wirklichkeit, sondern es spiegelt nur eine oder einige Seiten des betrachteten Dinges oder Prozesses wider, aber das sind gerade die im jeweils gegebenen Zusammenhang wesentlichen Seiten.
Modelle sind nur sinnvoll, wenn sie auf der Grundlage gesicherter Erfahrungen konstruiert werden. Dann können sie ein immer getreueres Abbild der Wirklichkeit auf dem Wege „der ewigen unendlichen Annäherung des Denkens an das Objekt" (Lenin) werden.

3. Das Atommodell von Bohr

Bei der Erklärung der Spektren wurde erläutert, daß leuchtende Stoffe im Gaszustand Linienspektren ergeben. Diese Atome strahlen demnach Energie ganz bestimmter Frequenzen aus. Nach dem Rutherfordschen Atommodell führen die Elektronen *Kreisbewegungen*, also beschleunigte Bewegungen, aus. Sie müßten daher ein veränderliches Magnetfeld hervorrufen, das wiederum mit einem wechselnden elektrischen Felde verknüpft ist. Ein solches elektromagnetisches Feld breitet sich im Raum aus. Diese Energieabgabe hätte zur Folge, daß die Bahnen der Elektronen dem Kerne sich immer mehr nähern und die Elektronen in sehr kurzer Zeit in den Kern stürzen würden. Infolgedessen wäre die *Frequenz* der ausgestrahlten Energie in dieser Zeit *dauernd veränderlich*. Da das nicht mit der Praxis (konstantes Linienspektrum) übereinstimmt, ergibt sich hieraus:

Das Rutherfordsche Atommodell kann nur sehr begrenzt auf wenige Erscheinungen im Atominnern angewendet werden.

Im Jahre 1913 verwandte Bohr die neuesten theoretischen Erkenntnisse, speziell über das Licht (Quantentheorie) zu einer Umgestaltung des Rutherfordschen Atommodells; dazu machte er die folgenden Annahmen[1]:

[1] Man nennt sie auch Postulate (lat.): wörtlich „Forderungen", hier: momentan nicht beweisbare, aber in ihren Folgerungen bewährte Voraussetzungen.

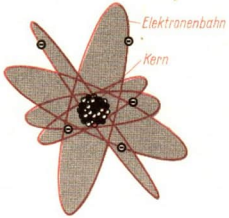


Bild 164/1 Atommodell nach Bohr (nicht maßstabgetreu)

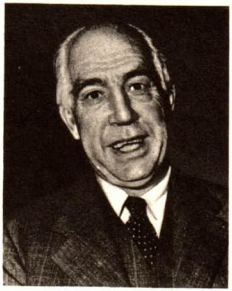


Bild 164/2 Niels Bohr (1885 bis 1962)

1. Die Hüllenelektronen können nur auf bestimmten („erlaubten") Bahnen kreisen. Dabei wird keine Energie ausgestrahlt.
2. Eine Ausstrahlung von Energie erfolgt bei einem Sprunge von Elektronen auf eine kernnähere Bahn; eine Absorption von eingestrahlter Energie (Energieaufnahme) führt zu einem Sprung auf eine dem Atomkern entferntere Bahn (Bild 165/1).

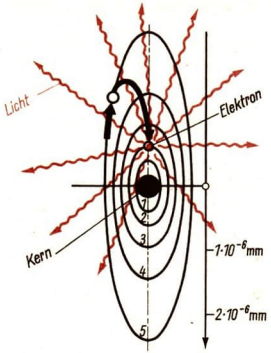


Bild 165/1 Elektronensprung im Bohrschen Atommodell unter Energieabgabe in Form einer Lichtwelle

Zahlreiche Forschungsergebnisse haben bewiesen, daß mit Hilfe der theoretischen Annahmen von Bohr viele Einzelheiten des Atombaus, der Spektren und der chemischen Eigenschaften der Elemente erklärt werden können. Für die neuesten Forschungsergebnisse reicht jedoch diese Modellvorstellung auch nicht aus, hierfür müssen komplizierte mathematische Gleichungen herangezogen werden, um das Atom zu beschreiben. Damit verliert die Darstellung ihre Anschaulichkeit. Zum Erklären grundlegender Erkenntnisse über den Bau der Atome ist das Atommodell von Bohr jedoch auch heute noch geeignet.

4. Der Aufbau der Atome

Das Wasserstoffatom ist am einfachsten aufgebaut. Es besteht nur aus einem positiv geladenen Kernteilchen, einem Proton (p) und einem Elektron (e), das um das Proton kreist. Der kleinstmögliche Bahnradius dieses Elektrons beträgt nach dem Bohrschen Atommodell

$$r_H = 0{,}53 \cdot 10^{-7} \text{ mm}.$$

Nach der Bohrschen Modellvorstellung befindet sich das H-Atom im Grundzustand, wenn das Elektron auf der kernnächsten Bahn kreist. Das Wasserstoffatom kann elektromagnetische Wellen nur dann aussenden, wenn sich das Elektron auf einer weiter vom Kern entfernten Bahn bewegt und auf eine kernnähere Bahn zurückspringt. In diesem Falle geht das H-Atom aus einem angeregten in den Grundzustand zurück. Ein H-Atom kann zum Beispiel bei Gasentladungen durch den Zusammenstoß mit Elektronen in einen angeregten Zustand versetzt werden. Beim Zurückspringen des zum Atom gehörenden Elektrons auf die kernnähere Bahn wird die zugeführte Energie als Licht oder elektromagnetische Strahlung wieder frei (Bild 165/1). Die Atome der anderen chemischen Elemente sind komplizierter als das Wasserstoffatom aufgebaut. 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.

● *Vergleiche hierzu die entsprechenden Abschnitte im Lehrbuch Chemie!*

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.

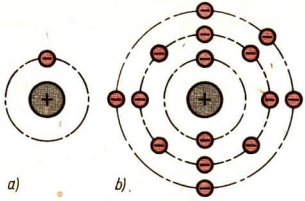


Bild 166/1 Schalenaufbau der Atome (a, b)

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.

● *Erklären Sie den Schalenaufbau der Atome und ihre Stellung im Periodensystem der Elemente!*

Fragen und Aufgaben

1. Vergleichen Sie die Atomlehre des Altertums mit der unserer Zeit!
2. Welche chemischen Gesetze werden mit dem Daltonschen Atombegriff erklärt?
3. Welche Untersuchungen lieferten die erste Kunde vom Atominnern?
4. Beschreiben Sie das Rutherfordsche Atommodell!
5. Wie unterscheidet sich das Bohrsche vom Rutherfordschen Modell?
6. Welche Mängel haben beide Modelle?
7. Wie erklärt sich die gegenüber dem Atomkern sehr geringe Dichte der Stoffe?
8. Was besagt die Ordnungszahl im Periodensystem über den Bau des betreffenden Atoms?

ZUSAMMENFASSUNG

Atome haben eine Struktur: sie bestehen aus Kern und Elektronenhülle.

Nennen Sie Methoden, wie man mit Hilfe von Katoden- und α-Strahlen diese Tatsache feststellen konnte!

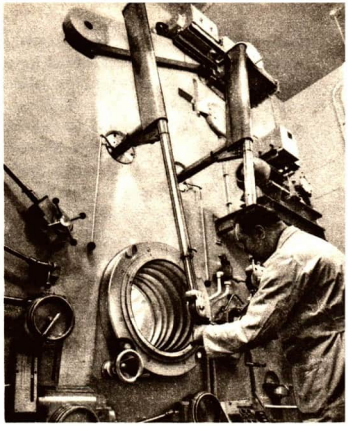
Fast die gesamte Masse eines Atoms ist in seinem Kern vereinigt.

Durch welche Versuche konnte diese Tatsache begründet werden?

Von den nicht sichtbaren Atomen hat man Modellvorstellungen entwickelt, die den jeweiligen Erfahrungsbereich beschreiben; diese Modellvorstellungen sind jeweils nur ein unvollständiges Abbild der Wirklichkeit.

Welche Atommodelle haben Sie kennengelernt und wodurch unterscheiden sie sich?

Der Bau des Atomkerns



Die physikalische Erforschung des Atomkerns hatte zur Folge, daß sich eine neue Technik, die Kerntechnik, entwickelte. Es entstanden Forschungsstätten, deren Aufbau, Ausstattung und Unterhaltung zum Teil nur noch im Rahmen internationaler Zusammenarbeit möglich ist. So arbeiten viele Wissenschaftler aller sozialistischen Länder in dem Kernforschungsinstitut in Dubna bei Moskau und den anderen, mit Forschungsreaktoren ausgestatteten Instituten der sozialistischen Länder, um die Anwendbarkeit der Kernenergie immer mehr zu verbessern.

Im Jahre 1815 hatte WILLIAM PROUT (1785 bis 1850) die Vermutung ausgesprochen, daß alle Atome aus Wasserstoffatomen aufgebaut seien. Da deren Masse als geringste unter allen gleich 1 gesetzt wurde, hätten die Atomgewichte ganze Vielfache, also ganzzahlig, sein müssen! Bei genauer Bestimmung der Atomgewichte zeigten sich jedoch vielfach Abweichungen von der Ganzzahligkeit, namentlich bei den höheren Atomgewichten. Die Proutsche Hypothese geriet daher in Vergessenheit. Sie enthielt aber ein Stück Wahrheit, was rund hundert Jahre später erkannt wurde.

1. Die Protonen

Genauere Erkenntnisse über den Aufbau der Atomkerne gewann RUTHERFORD im Jahre 1919 auf Grund eines Versuchs. Er ließ α-Teilchen, die von Radon ausgestrahlt wurden, durch Stickstoff hindurchgehen (Bild 168/1).

● *Welche Ladung besitzen die α-Teilchen?*

Das Aufblitzen auf dem Leuchtschirm konnte nicht von den α-Teilchen stammen. Daraufhin ließ RUTHERFORD die Spuren der α-Teilchen in einer mit Stickstoff gefüllten Nebelkammer untersuchen.

In der Nebelkammer befindet sich ein mit Wasserdampf übersättigtes Gas (meist Luft), das beim Durchgang von elektrisch geladenen Teilchen oder auch durch Röntgenstrahlen ionisiert wird. Dabei entstehen Nebelkerne, an die sich feinste Wassertröpfchen anlagern. Die Flugbahn eines α-Teilchens wird damit als Nebelstreifen sichtbar.

Unter etwa 3000 Aufnahmen zeigte eine Aufnahme ganz deutlich das, was RUTHERFORD bereits vermutet hatte: Eine Nebelspur gabelte sich. Dort war ein α-Teilchen auf einen Stickstoffkern getroffen und die dicke, kurze Spur deutete auf ein relativ schweres Teilchen hin, während die andere Spur wesentlich dünner und länger als die des α-Teilchens war. Hier mußte ein kleineres als das α-Teilchen geflogen sein, das vorher nicht im Gas selbständig existiert hatte und dessen Energie ausreichte, um den Leuchtschirm (Bild 168/1) zu erreichen.
Durch weitere Versuche in elektrischen und magnetischen Feldern konnte man die Masse und die Ladung dieses Teilchens bestimmen. Es handelte sich um den leichtesten Atomkern, den Wasserstoff-Atomkern. Diesen Kern bezeichnet man 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. Statt abgestoßen zu werden, wird das Teilchen jetzt 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

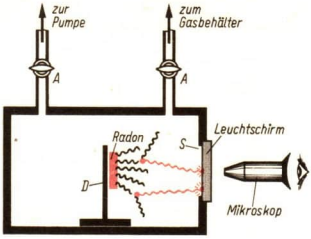


Bild 168/1 Die Abmessungen des Gefäßes und die Dichte des Stickstoffes verhindern, daß die α-Teilchen den Leuchtschirm erreichen. Aus dem trotzdem zu beobachtenden Aufleuchten des Schirms konnte RUTHERFORD schließen, daß eine durch die α-Teilchen ausgelöste Strahlung den Leuchtschirm erreicht

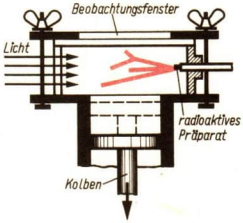


Bild 168/2 Nebelkammer nach WILSON

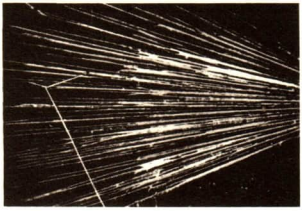


Bild 168/3 Nebelkammeraufnahme einer Kernreaktion

Vorgang bezeichnet man als **Kernreaktion** (vgl. S. 177). 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 Neutronen

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.

Erst 1932 verhalf eine der für die Kernphysik wichtigsten Entdeckungen zu einer neuen Erkenntnis. Bei der Bestrahlung von Beryllium mit α-Strahlen entdeckten die deutschen Physiker BECKER und BOTHE eine von Beryllium ausgehende außerordentlich durchdringende Strahlung. Sie ging z. B. durch Bleischichten hindurch, welche die α- und β-Strahlen völlig 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.

IRENE und FREDERIC JOLIOT-CURIE wiederholten die Versuche. Dabei stellten sie fest, daß die Luft besonders stark ionisiert wurde, wenn die Berylliumstrahlung auf wasserstoffhaltige Stoffe, z. B. Paraffin, auftraf.

In Nebelkammeraufnahmen konnten aus dem Paraffin kommende ionisierende Protonenstrahlen nachgewiesen werden.

Der englische Physiker JAMES CHADWICK (geb. 1891), ein Mitarbeiter RUTHERFORDS, konnte nachweisen, daß die nicht ionisierende Be-Strahlung ungeladene Elementarteilchen enthielt, denen man den Namen Neutron; Symbol n, gab.

RUTHERFORD hatte schon 1920 ihre Existenz vermutet, aber sie nicht nachweisen können.

Die Masse des Neutrons beträgt $m_n = 1{,}67 \cdot 10^{-24}$ g. Seine Masse ist etwa 0,15 Prozent größer als die des Protons. Das Neutron besitzt keine Ladung.

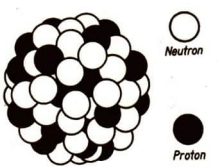


Bild 169/1 Modell eines Atomkerns
Nukleonen bestehen aus Protonen und Neutronen

Bald nach der Entdeckung des Neutrons wurde von den sowjetischen Physikern D. Iwanenko und I. Tamm und dem Deutschen W. Heisenberg erkannt, daß die Atomkerne aus Protonen und Neutronen bestehen. Heisenberg legte als erster eine vollständig ausgearbeitete Theorie vor:

Alle Atomkerne bestehen aus Nukleonen: Protonen und Neutronen.
Kernladungszahl = Ordnungszahl = Zahl der Protonen.
Zahl der Nukleonen (Protonen + Neutronen) = Massenzahl[1]

Man kennzeichnet seither ein Element durch sein chemisches *Symbol*, dem oben die Massenzahl, unten die Ordnungszahl als Index[2] angefügt wird (Tabelle 11).

Tabelle 11: Charakteristische Größen einiger Atomkerne

Kern (Teilchen)	Symbol	Massenzahl	Protonenzahl (Kernladungszahl)	Neutronenzahl	Kernmasse bzw. Teilchenmasse	Schreibweise
Neutron	n	1	0	1	1,00898	n^1_0
Proton	p	1	1	0	1,00759	p^1_1
Helium	He	4	2	2	4,00278	He^4_2
Stickstoff	N	14	7	7	14,00368	N^{14}_7
Sauerstoff	O	16	8	8	15,99561	O^{16}_8
Natrium	Na	23	11	12	22,9910	Na^{23}_{11}
Jod	J	127	53	74	126,9157	J^{127}_{53}
Uran	U	238	92	146	238,125	U^{238}_{92}

3. Die Isotope

Die Kenntnis der Kernbausteine hat die Erklärung einer Erscheinung gebracht, die schon seit 1907 bekannt, aber nicht verständlich war: Man lernte 6 Elemente mit der Ordnungszahl 90 kennen, die chemisch völlig gleich sind, aber ein verschiedenes Atomgewicht haben. Später fand man Neon mit den Atomgewichten 20, 21, 22.
Heute weiß man, daß die Atomkerne solcher Stoffe die *gleiche Anzahl* von Protonen, aber eine *verschiedene* Anzahl von Neutronen enthalten. Man nennt diese Atome

[1] Als Masseneinheit (ME) wird neuerdings $\frac{1}{12}$ der Masse von C^{12} verwendet. Die meisten Tabellen geben noch $\frac{1}{16}$ der Masse von O^{16} an. 1 ME = $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g. Die auf C^{12} bezogenen Werte weichen sehr wenig ab.

[2] Aus technischen Gründen konnte in dieser Auflage die heute übliche Schreibweise mit vor das Symbol gesetzten Zahlen noch nicht gedruckt werden.

Isotope[1]. Sie haben die gleiche Ordnungszahl im Periodensystem, verhalten sich chemisch gleichartig, unterscheiden sich aber in manchen physikalischen Eigenschaften.

Isotope sind Kerne mit gleicher Protonenzahl, aber verschiedener Neutronenzahl. Sie sind chemisch nicht zu unterscheiden.

Die meisten Elemente sind Gemische aus Isotopen; das Zinn erreicht mit 10 Varianten die größte bisher bekannte Zahl. Nur bei 21 Elementen kennt man je einen stabilen Atomkern.

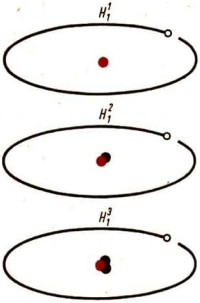


Bild 171/1 Der Wasserstoff hat zwei natürlich vorkommende Isotope: H^1, H^2. Der schwere Wasserstoff H_1^2, auch Deuterium D_1^2 genannt, ist zu 0,015% im gewöhnlich vorkommenden Wasserstoff enthalten. Natürliches Wasser enthält geringe Mengen von schwerem Wasser D_2O, so daß davon 1 l aus etwa 5000 l Wasser durch Elektrolyse gewonnen werden kann. Ein nicht stabiles Isotop Tritium H_1^3 ist bei Kernumwandlungen entdeckt worden.

Die relative Häufigkeit, d. h. der prozentuale Anteil der Isotope als Bestandteile der natürlichen Elemente ist nahezu konstant. Deswegen ergibt sich bei den chemischen Methoden der Atomgewichtsbestimmung ein bestimmter mehr oder weniger von einer ganzen Zahl abweichender Wert.

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 Massenspektrograf, der bereits 1919 von dem englischen Physiker Aston entwickelt wurde. In ihm werden Ionen gleicher Masse durch elektrische und magnetische Felder auf dieselbe Stelle einer Fotoplatte oder eines Auffängers geleitet (Bild 171/2).

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

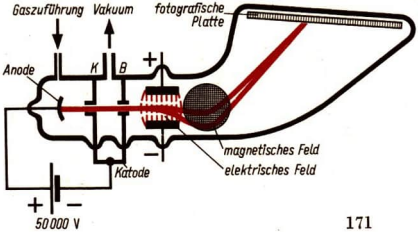


Bild 171/2 Schema des Massenspektrografen. Dieses Gerät beruht auf der Tatsache, daß bewegte Teilchen gleicher Ladung, aber unterschiedlicher Masse und Geschwindigkeit in elektrischen und magnetischen Feldern verschieden stark abgelenkt werden

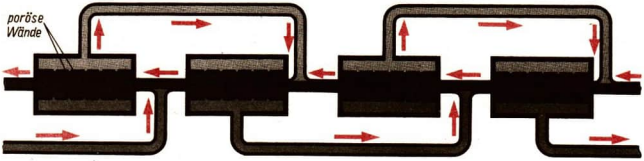


Bild 172/1 Schematische Darstellung einer Stufendiffusion
Der leichte Anteil wird in jeder Stufe nach rechts, der schwere nach links geleitet

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 Massenspektrograf liefert zwar Isotope in reinster Form, aber man erhält mit ihm nur geringe Mengen, im besten Falle 10^{-9} g in einer Stunde. Da man aber meist 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 (Bild 172/1).

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 und Stahl beträgt zur Zeit etwa $4 \cdot 10^8$ t. Wie groß ist der Würfel, in dem alle Atomkerne dieser Metallmenge, dicht neben- und übereinandergepackt, Platz haben? Die Masse der Elektronen ist zu vernachlässigen.

4. Natürliche Radioaktivität

Auf Grund der Entdeckung der Röntgenstrahlen untersuchte 1896 der französische Physiker HENRI BECQUEREL (1852 bis 1908) an fluoreszierenden Stoffen, ob die Fluoreszenz die Ursache der Röntgenstrahlen sei. Dabei entdeckte er, daß alle *Uransalze* auch dann Strahlen aussenden, wenn sie nicht fluoreszieren. Die weitere Forschung war eine Aufgabe sowohl der Physik wie der Chemie, da die strahlenden Stoffe und die Strahlung selbst untersucht werden mußten.
Hervorragende Ergebnisse verdanken wir dem Ehepaar PIERRE CURIE (1859 bis 1906) und MARIE CURIE-SKLODOWSKA (1867 bis 1934) (Bild 173/1).
Unter schwierigsten Arbeitsbedingungen fanden sie, daß auch *Thoriumsalze* die gleiche Strahlung wie Uransalze aussenden. Da sich die Strahlung von Uranpechblende stärker als die des reinen Urans erwies, vermutete MARIE CURIE, daß in dem Erz unbekannte Elemente mit stärkerem Strahlungsvermögen enthalten seien. Es gelang ihr in jahrelanger Arbeit, zwei neue stark strahlende Elemente zu gewinnen. Das eine erhielt den Namen *Radium* (Ra), „Das Strahlende", das andere zu Ehren der polnischen Heimat der Entdeckerin den Namen *Polonium* (Po).
Die Eigenschaft, die von BECQUEREL entdeckten Strahlen auszusenden, wurde **Radioaktivität** genannt.

Die Größe der Forscherleistung wird man recht würdigen, wenn man bedenkt, daß 7 t Erz verarbeitet werden mußten, um 1 g Ra zu gewinnen. MARIE CURIE hat sich durch die jahrelange Arbeit mit radioaktiven Stoffen gesundheitlichen Schaden zugezogen, der zu ihrem Tode führte. PIERRE und MARIE CURIE haben es gleich WILHELM CONRAD RÖNTGEN abgelehnt, ihre Entdeckungen geschäftlich auszuwerten. Diese sollten zum Wohle aller Menschen dienen.

Die CURIES schlossen einen radioaktiven Stoff in eine Bleikapsel ein, so daß nur ein dünnes Strahlenbündel durch einen Kanal austreten konnte. Das Bündel ging durch ein magnetisches Feld. Dabei stellten die Forscher fest, daß ein Teil der Strahlen genauso abgelenkt wurde wie die Katodenstrahlen. Dieser Teil konnte als sehr schnelle Elektronen bestimmt werden; ihre Geschwindigkeit ist jedoch nicht einheitlich; man nennt sie **Betastrahlen** (β-Strahlen).

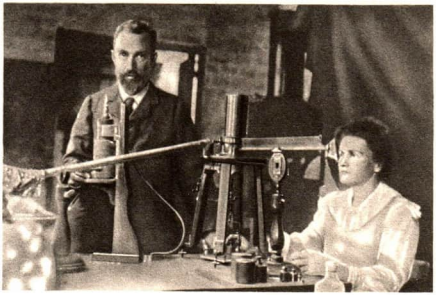


Bild 173/1
PIERRE CURIE und MARIE CURIE-SKLODOWSKA

Schon im Laufe der ersten Untersuchungen konnten die folgenden Eigenschaften festgestellt werden:

1. Die Strahlen der radioaktiven Stoffe wirken auf die Fotoplatten auch durch lichtdichte Verpackung.
2. Sie bringen geeignete Stoffe zum Fluoreszieren.
3. Sie ionisieren die Luft.
4. Sie durchdringen alle Stoffe mehr oder weniger stark.
5. Sie üben eine Reizwirkung auf Organismen aus.
6. Die Strahlungsfähigkeit ist durch kein Mittel (Hitze, Kälte, Druck, chemische Einwirkung, elektromagnetische Felder) zu beeinflussen.

Die scheinbar nicht zu beeinflussende Strahlung wurde von RUTHERFORD mit Hilfe eines sehr starken Magnetfeldes ebenfalls aufgespalten. Ein Teil wurde nicht beeinflußt, der andere Teil erfuhr eine sehr geringe, **aber deutliche Ablenkung,** die der Ablenkung der Elektronen entgegengerichtet war. Folglich mußte er aus *positiv geladenen* Teilchen bestehen. Da dieses Bündel nicht aufgespalten wurde, ergab sich eine einheitliche kinetische Energie der Teilchen, die als α-Teilchen bezeichnet wurden.
Durch Vergleiche mit der Elementarladung des Elektrons und auf Grund der geringen Ablenkbarkeit der α-Teilchen fand RUTHERFORD, daß die Masse der Teilchen mindestens 3680 mal so groß sein müßte wie die eines Elektrons.
Eine Deutung des Ergebnisses gelang RUTHERFORD, als er durch Spektraluntersuchungen *Helium* feststellte, sobald er die Strahlen in eine stark evakuierte Kammer eintreten ließ, in der elektrische Entladungen stattfanden.
RUTHERFORD vermutete, daß die Strahlung aus Heliumionen besteht. Zur Nachprüfung ließ er sie von Blei absorbieren, das darauf im Vakuum geschmolzen wurde. Dabei entwich Helium.
Da sich in allen radioaktiven Mineralien Helium nachweisen läßt, wurde die Vermutung zu einer begründeten Hypothese. Zur völligen Sicherung mußten Ladung e und Masse m der Teilchen bestimmt werden. Das Verhältnis $\frac{e}{m}$ für Wasserstoffionen war als doppelt so groß wie bei einem α-Teilchen bekannt. Da keine Atome mit der doppelten Masse des Wasserstoffatoms bekannt waren, nahm RUTHERFORD eine Ladung von 2 Elementarladungen mit einer vierfachen Masse an, wonach es sich um einen Heliumkern handeln konnte. In mühsamen Versuchen wurden α-Teilchen aufgefangen, gezählt und die Ladungen elektrometrisch gemessen. Die Ladung eines α-Teilchens bestand tatsächlich aus 2 positiven Elementarladungen.
Aus den Versuchen ergab sich für m ein Wert, der mit dem für Helium bekannten befriedigend übereinstimmte. Seither gilt das von RUTHERFORD und SODDY (1877 bis 1960) gefundene Ergebnis:

α-Teilchen sind doppelt positiv geladene Heliumkerne.

4.1. Die Ursachen der Radioaktivität

Die *dauernde* Energieabgabe durch Strahlung der radioaktiven Stoffe, an denen man lange Zeit keine Veränderung feststellen konnte, schien dem *Energiesatz* zu widersprechen. Die Größe der abgegebenen Energie konnte bestimmt werden, indem man alle Strahlen eines radioaktiven Präparats in einer Bleikapsel auffing, die in einem Eiskalorimeter stand. So wurde die Energie als Wärme gemessen. 1 g Ra liefert etwa 100 cal · h^{-1}. Über lange Zeiträume ergeben sich erstaunlich hohe Werte. Die Herkunft der umgesetzten Energie mußte also einen bisher noch unbekannten Ursprung haben, auf den sich das Ziel der Forschung richtete.
Die Erkenntnis, daß α-Teilchen und Elektronen Bestandteile der Strahlung sind, wies auf eine Erklärung ihrer Entstehung hin. Es konnte ein Zerfall der Atomkerne möglich sein.
Eine experimentell gesicherte Theorie des radioaktiven Zerfalls lieferten um 1903 Rutherford und Soddy zusammen mit Ramsey:

Aus Ra^{226}_{88} entsteht ein Edelgas Radon, Rn^{222}_{86}, das unter α-Strahlung in einigen Tagen zerfällt.

Ramsey vollbrachte die großartige Leistung, aus winzigsten Mengen sowohl die Eigenschaften wie auch mit eigens zu diesem Zwecke konstruierten Mikrowaagen das Atomgewicht zu bestimmen. Ramseys Arbeiten ergaben: Bei der Verwandlung von Ra in Rn sinkt die Massenzahl um 4, die Ladung (Ordnungszahl) um 2, wie es nach dem Ausstoß von Heliumkernen zu erwarten ist. Allgemein gilt:

Bei Aussendung eines α-Teilchens nimmt die Massenzahl um 4, die Ordnungszahl um 2 ab.
Bei Aussendung eines β-Teilchens bleibt die Massenzahl erhalten, die Ordnungszahl steigt um 1, da dem Kern eine negative Ladungseinheit entzogen wird.

4.2. Zerfallsreihen

Die bei einem radioaktiven Zerfall entstehenden neuen Kerne sind meist wieder radioaktiv, so daß man ganze Zerfallsreihen (radioaktive Familien) kennt.
Bald nach dieser Entdeckung 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 ½ g; innerhalb der nächsten 1590 Jahre zerfällt von dem restlichen ½ g wieder die Hälfte, also ¼ g. Man hat es nun für zweckmäßig gehalten, die Zeit, in der jeweils die Hälfte der vorhandenen Atome eines radioaktiven Elements zerfällt, als charakteristische Größe für den Zerfall festzulegen. Man nennt sie die *Halbwertzeit*. Wie aus der nachstehenden Tabelle hervorgeht, sind die Halbwertzeiten verschiedener radioaktiver Stoffe sehr unterschiedlich. Sie umfassen die verschiedensten Zeitabschnitte zwischen etwa 10^{-6} s und 10^{9} Jahren.

Tabelle 12: Einige Halbwertzeiten

Element	Halbwertzeit	Element	Halbwertzeit
U	$4{,}5 \cdot 10^9$ Jahre	Rn	3,82 Tage
Ra	1590 Jahre	RaC	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$ s

4.3. Nachweis der radioaktiven Strahlung

Alle radioaktiven Strahlen vermögen Elektronen aus den Atomen herauszulösen und dadurch Ionen zu erzeugen. Gase werden dabei leitfähig, und in einem abgeschlossenen Raum bildet sich beim Anlegen eines elektrischen Feldes ein *Ionisationsstrom.* Man kann ihn messen und dadurch die Strahlungsintensität bestimmen. Das heute meist gebrauchte Meßgerät ist das **Geiger-Müller-Zählrohr.** Es besteht aus einem dünnwandigen Metallrohr oder einem mit einem Metallbelag versehenen Glasrohr, durch das axial ein dünner Stahldraht gespannt ist. Das Rohr ist meist mit einem Gasgemisch von Argon ($p = 90$ Torr) und Alkohol ($p = 10$ Torr) gefüllt. Gegenüber der Wand erhält der Draht eine Spannung von etwa 1200 V (siehe dazu auch Bild 8/1).

5. Künstliche Radioaktivität

Die Ursache der natürlichen Radioaktivität sind Kernumwandlungen, die ohne Einwirkungen von außen eintreten. Auf Seite 167 wurde gezeigt, daß RUTHERFORD 1919 eine künstliche Kernumwandlung gelang. Er gab die folgende Deutung: Die α-Teilchen (Heliumkerne) dringen gelegentlich in einen Stickstoffkern ein. Das dadurch entstandene Gebilde zerfällt sogleich in ein Proton und einen Rest, den man errechnen kann, da die Summe der Massenzahlen und der Kernladungszahlen vor und nach der Reaktion gleich sein müssen. Der neue Kern ist ein Sauerstoffisotop:

$$N^{14}_{7} + He^{4}_{2} \rightarrow H^{1}_{1} + O^{17}_{8}$$

$$(14 + 4 = 1 + 17),\ (7 + 2 = 1 + 8)$$

Dafür schreibt man auch $N^{14}_{7}\,(\alpha, p)\,O^{17}_{8}$. Die Klammer drückt aus, daß ein α-Teilchen aufgenommen und ein Proton abgegeben wurde.

● *Welche Regel gilt für die oberen und unteren Indizes bei Atomumwandlungen?*

Im Jahre 1932 ließ das französische Forscherehepaar IRENE und FREDERIC 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:

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

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 Halbwertzeit 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 künstliche radioaktive Kerne.

Heute werden durch Bestrahlung viele Radioisotope hergestellt, die ausgedehnte Verwendung in der Forschung, der Technik und der Medizin finden.

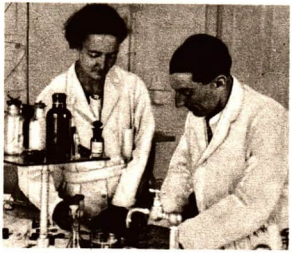


Bild 177/1 IRENE (1897 bis 1956) und FREDERIC JOLIOT-CURIE (1900 bis 1958)

Fragen und Aufgaben

1. Leiten Sie die Ablenkung der α- und β-Strahlen im Magnetfeld aus der UVW-Regel für Leiterbewegungen (3-Fingerregel der rechten Hand) ab!
2. Warum werden γ-Strahlen nicht abgelenkt?
3. Was bedeutet Si_{14}^{29} (α, n) S_{16}^{32}?
4. Welchen Forschern verdankt man die Erklärung der Radioaktivität?
5. Erklären Sie den Begriff der künstlichen Radioaktivität!
6. Mit welchen Teilchen können Kernumwandlungen durchgeführt werden?

ZUSAMMENFASSUNG

Alle Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen: ihr Sammelname ist Nukleonen.

Erklären Sie die Eigenschaften der Nukleonen, und vergleichen Sie diese mit denen der Elektronen!

Die Anzahl der Nukleonen eines Atomkerns entspricht der Massenzahl des Elements.

In welcher Schreibweise wird die Massenzahl eines Elements deutlich gemacht?

Die Anzahl der Protonen eines Atomkerns entspricht der Kernladungs- und der Ordnungszahl.

Erklären Sie die Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente!

Die meisten Elemente bestehen aus Isotopen.

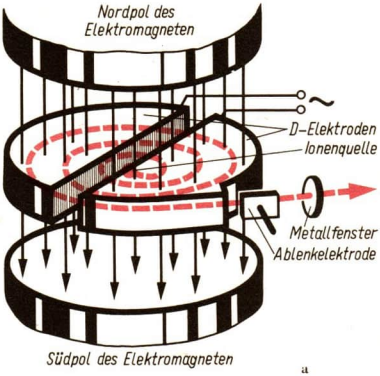
Wodurch unterscheiden sich Massen- und Ordnungszahlen der Isotope?

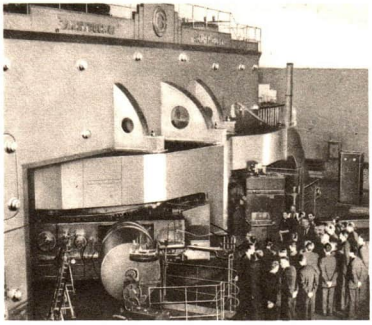
Beim radioaktiven Zerfall eines Elements vermindert sich bei Abgabe eines α-Teilchens die Massenzahl um 4 und die Ordnungszahl um 2 Einheiten: bei Abgabe eines β-Teilchens bleibt die Massenzahl erhalten, und die Ordnungszahl wird um 1 Einheit erhöht.

Charakterisieren Sie α-Teilchen und β-Teilchen!

6. Beschleuniger

Auf Seite 168 wurde gesagt, daß es RUTHERFORD gelang, mit α-Teilchen der radioaktiven Strahlung Protonen aus Stickstoffkernen herauszuschlagen. Diese Ergebnisse haben die moderne Kernforschung und Kerntechnik eingeleitet.
α-Teilchen radioaktiver Stoffe stehen nur in begrenzter Menge und Energie zur Verfügung. Daher wurde versucht, auf technischem Wege Ionen zu beschleunigen. Ein solcher Beschleuniger ist das **Zyklotron.** Es wurde 1930 von E. O. LAWRENCE (1901 bis 1958) konstruiert. Als Ionenquelle dienen Gasentladungen mit Glühkatoden, deren Elektronen ionisieren.
Die Ionen unterliegen dem Einfluß eines starken Magnetfeldes und eines elektrischen Wechselfeldes. Das erste zwingt die Ionen, die sich senkrecht zu seinen Feldlinien bewegen, in Kreisbahnen. Das zweite zieht sie nach der entgegengesetzt geladenen Elektrode. Das sind die einfachen physikalischen Grundlagen (Bilder 179/1a und b).
Am Rande der Kammer werden die Ionen durch eine Ablenkelektrode tangential





a b

Bild 179/1a, b
Zwischen den Polschuhen eines starken Elektromagneten sind zwei hochevakuierte Kammern in Gestalt zweier halbkreisförmiger Metalldosen angebracht. Sie sind gegeneinander isoliert, durch einen Spalt getrennt und nach innen zu offen. Die Ionen durchlaufen viele Male die beiden Kammern unter dem Einfluß einer hochfrequenten Wechselspannung. Dabei werden die Ionen im Spalt zwischen den beiden Kammern sehr stark beschleunigt.
b) Beschleuniger im Institut für Kernprobleme der Akademie der Wissenschaften der UdSSR

durch ein dünnes Metallfenster nach außen abgelenkt und zur Bestrahlung verwendet, oder man läßt sie innerhalb der Kammern mit maximaler Geschwindigkeit auf eine Prallplatte auftreffen. In der Folgezeit sind die Beschleuniger weiterentwickelt worden. Eine der größten Anlagen ist das **Synchrophasotron** in Dubna in der Sowjetunion (Bild 179/2).

Bild 179/2 Synchrophasotron

7. Energieumsatz bei Kernreaktionen

Als man noch die Atomkerne aus *Protonen* und *Elektronen* zusammengesetzt dachte, schien das Problem ihrer Festigkeit durch die *elektrostatische* Anziehung gelöst.
Es mußte jedoch eine Erklärung für die Festigkeit des Kerns bei der Zusammensetzung aus Protonen und *Neutronen* gegeben werden: Die Protonen stoßen einander ab wegen ihrer gleichen positiven Ladung, *Gravitationskräfte* reichen nicht aus, um die Stabilität des Kerns zu erklären. Man nimmt heute besondere **Kernkräfte** an, die bei geringster Reichweite (Größenordnung 10^{-15} m) außerordentlich groß sind.
Das Wissen über die Kernkräfte ist noch unvollkommen und erfordert zu seiner Erweiterung höchste mathematische Hilfsmittel und immer größere technische Einrichtungen. Einfacher lassen sich Aussagen über die Massen und die **Bindungsenergien** darstellen.

7.1. Der Massendefekt

Die mit modernen Methoden der Massenbestimmung ermittelten Werte zeigten eigenartige Ergebnisse. Es beträgt der **Massenwert**

des *Protons* $M_p = 1{,}007596$ ME,
der des *Neutrons* $M_n = 1{,}008983$ ME

Bei einem Atomkern aus Z Protonen und N Neutronen erwartet man einen Massenwert

$$M = Z \cdot M_p + N \cdot M_n .$$

Er ist aber immer etwas kleiner als diese Summe.
Die Differenz heißt: Massendefekt (Δm).
Zahlenmäßig gilt für den Heliumkern:

$$\Delta m = (2 \cdot 1{,}007596 \text{ ME} + 2 \cdot 1{,}008983 \text{ ME}) - 4{,}002775 \text{ ME}$$
$$\underline{\underline{\Delta m = 0{,}030383 \text{ ME}}}.$$

Ähnliches gilt für alle Kernumwandlungen. Daraus ergibt sich:

Bei der Bildung leichter oder der Spaltung schwerer Kerne tritt ein „Verlust" an Masse ein (Massendefekt).

● *Wie groß ist die Differenz zwischen dem experimentell ermittelten Massenwert 73,94604 und der Massenwertsumme des Selenkerns* Se^{74}_{34}*?*

Diese Masse kann nicht verschwunden sein. Eine Erklärung der Erscheinung verdanken wir Albert Einstein (1879 bis 1955). Er hat in allgemeiner Form bewiesen, daß jeder Masse ein bestimmter Energiebetrag entspricht. Diese zahlenmäßige Beziehung zwischen beiden Größen wird ausgedrückt durch die **Einsteinsche Gleichung**

$W = m \cdot c^2$. c bedeutet hierbei die Lichtgeschwindigkeit.

So entspricht 1 g Masse der folgenden Energie:

$$W = 0{,}001 \text{ kg } (3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2$$
$$W = 9 \cdot 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}$$
$$W = 9 \cdot 10^{13} \text{ Nm oder } 9 \cdot 10^{13} \text{ Ws} = 25 \cdot 10^6 \text{ kWh.}$$

Diese Energiemenge wird bei einem Massendefekt (Δm) von 1 g frei. EINSTEIN hat seine Gleichung im Jahre 1905 theoretisch abgeleitet. Sie ist durch die Kernphysik als eines der bedeutungsvollsten Gesetze bestätigt worden.

● *Widerspricht der Massendefekt dem Satz von der Erhaltung der Masse?*

Wenn es gelingt, einen schweren Kern annähernd zu halbieren, so muß Energie frei werden. Dasselbe gilt für das Verschmelzen von leichten Kernen. In beiden Fällen tritt als Äquivalent ein Massendefekt ein.

ALBERT EINSTEIN, einer der bedeutendsten Physiker der Neuzeit, wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren. Er studierte in Zürich Mathematik und Physik und erhielt später als Schweizer Staatsangehöriger eine Anstellung im Patentamt in Bern. In rascher Folge schuf er bedeutende Arbeiten über Molekularphysik. 1905 veröffentlichte er die spezielle Relativitätstheorie und schuf damit die Grundlage zum Erkennen der Bewegungsgesetze von Körpern, deren Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit nähert. EINSTEINs Gedanken wurden vielfach abgelehnt; sie sind aber gerade durch Erfahrungen in atomaren Gebieten glänzend bestätigt worden. Sehr bald wandte EINSTEIN die Plancksche Quantentheorie auf das Licht an und schuf die Lehre von den Lichtquanten (Photonen). Von 1909 an war er Professor in Zürich, Prag und wiederum in Zürich. 1914 wurde auch er auf Anregung von MAX PLANCK nach Berlin berufen. Seit Beginn des 1. Weltkrieges trat er entschieden für Völkerverständigung und Frieden ein. 1933 verließ er das faschistische Deutschland und ging über Belgien nach den USA, wo er an der Universität Princeton lehrte. Auch hier trat er mutig gegen Krieg und Rassenhetze und gegen den Mißbrauch der Kernenergie zu Kriegszwecken auf. Er hat bis zu seinem Tode daran gearbeitet, die physikalischen Feldtheorien weiterzuentwickeln.

8. Die Kernspaltung

Der italienische Physiker ENRICO FERMI[1] hat als erster den Kernbeschuß mit Neutronen durchgeführt und viele radioaktive Isotope gewonnen. Aus Uran entstanden dabei Atome, die β-Teilchen aussandten. FERMI nahm an, daß dadurch die Ordnungszahl 92 des Urans um eine Einheit erhöht worden und ein neues künstliches Element mit der Ordnungszahl 93 entstanden sei. Man nennt solche Elemente, die in der Natur nicht gefunden werden, **Transurane.** FERMIs Deutung, deren Nachprüfung sehr folgenreich war, erwies sich als Irrtum.
Einige Jahre später konnten aber mit Hilfe des Zyklotrons tatsächlich Transurane hergestellt werden. In wägbaren Mengen wurde im Jahre 1942 das *Neptunium* Np^{238}_{93} gewonnen und mit Hilfe einer besonders entwickelten *Ultramikrochemie* untersucht. Mittels der modernen Beschleuniger sind durch Beschuß des Urans und neu gewonnener Transurane bis jetzt noch *Plutonium* Pu_{94}, *Americium* Am_{95}, *Curium* Cm_{96}, *Berkelium*

[1] ENRICO FERMI (1901 bis 1955), vor dem Faschismus nach den USA emigriert, Nobelpreis 1938

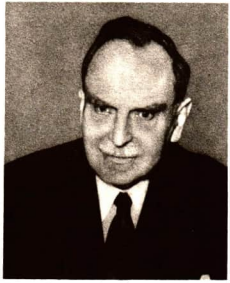


Bild 182/1 Otto Hahn

Bk_{97}, *Californium* Cf_{98}, *Einsteinium* Es_{99}, *Fermium* Fm_{100}, *Mendelevium* Md_{101} und *Nobelium* No_{102} hergestellt worden.

Schon 1934 hatte die deutsche Chemikerin Ida Noddack die Möglichkeit diskutiert, daß der Urankern in zwei annähernd gleichgroße Teile gespalten werden könnte. Erst Ende 1938 konnten Otto Hahn (Bild 182/1) und sein Mitarbeiter Fritz Strassmann in schwierigen chemischen Untersuchungen nachweisen, daß nach der Bestrahlung Barium auftritt. Das aber ist ein Spaltstück mittlerer Masse, eine Erscheinung, die von der österreichischen Physikerin Lise Meitner erstmalig als Atomspaltung erkannt wurde. Wie sehr damals die Spaltung noch unwahrscheinlich erschien, ist aus den folgenden Sätzen der ersten Veröffentlichung Hahns vom 22. Dezember 1938 zu erkennen:

„Als Chemiker müßten wir eigentlich sagen, bei den neuen Körpern handelt es ... sich um Barium ... Als Kernchemiker können wir uns zu diesem allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik widersprechenden Sprung noch nicht entschließen."

Das ungeheure Aufsehen, das diese Arbeiten in allen Forschungsstätten erregten, erklärt sich daraus, daß bei einer Spaltung des Urankernes durch Neutronen weitere Neutronen entstehen, die von neuem Kerne spalten können. Somit rückte eine praktische Verwendung der Kernspaltung in den Bereich der Möglichkeiten, an die selbst Rutherford wegen der geringen Anzahl von Zufallstreffern bei den bisherigen Bestrahlungen nicht geglaubt hatte. Die Spaltungsneutronen wurden bald nachgewiesen, und überall setzte eine intensive Arbeit in den Forschungsstätten ein.

8.1. Vorgang der Kernspaltung

Die Bewegungsenergie verwandelt sich bei der Abbremsung der Teilchen (Zu-

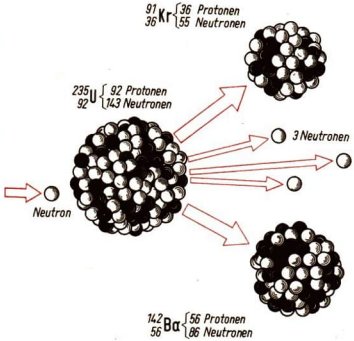


Bild 182/2 Ein Neutron dringt in den Kern U^{239} ein und führt zu einem Zwischenkern, der bald in mittelschwere Spaltstücke zerfällt. Bei diesem Vorgang wird eine erhebliche Energie frei, und überschüssige Neutronen werden ausgeschleudert. Die Energie steckt als Bewegungsenergie in den Bruchstücken, den Neutronen, und in der β- und γ-Strahlung, die bei der Spaltung oder dem weiteren Zerfall der Bruchstücke ausgestrahlt wird.

sammenstöße) in Wärme. Als Äquivalent dieser Energie tritt ein Massendefekt ein, aus dem diese Energie errechnet werden kann. Man weiß heute:

Bei jeder Spaltung eines Urankernes wird eine Energie von etwa $7{,}7 \cdot 10^{-15}$ kcal frei.

Um zu einem Vergleich mit der durch chemische Vorgänge frei werdenden Energie zu gelangen, zeigen wir folgendes

Beispiel

1 Grammatom U^{235} enthält $6{,}023 \cdot 10^{23}$ Atome. Wenn 235 g Uran vollständig gespalten werden könnten, so erhielte man $6{,}023 \cdot 10^{23} \cdot 200$ MeV $= 1204{,}6 \cdot 10^{23}$ MeV. 1 kg würde dann $\frac{1000}{235}$ mal so viel, d. h. $5 \cdot 10^{26}$ MeV $= 2 \cdot 10^{10}$ kcal liefern. Vergleicht man damit die Energie von etwa 7500 kcal je kg, die bei der Verbrennung von Steinkohle frei wird, so erkennt man:

Die Spaltung von Uran liefert über 2 Millionen mal soviel Energie wie die Verbrennung der gleichen Menge Steinkohle.

● *Wieviel Kilowattstunden elektrischer Energie lassen sich gewinnen, wenn 1 kg U^{235} vollständig gespalten wird?*

9. Die Kernfusion

Eine zweite Möglichkeit, aus Kernumwandlungen Energie zu gewinnen, ist die *Synthese leichter Kerne.*
Die Erkenntnis, daß bei der Heliumsynthese sehr hohe Energiebeträge frei werden, hat eine Antwort auf die Frage nach dem *Entstehen* der *Sonnenenergie* gegeben.

Man weiß heute, daß diese Energie bei der Bildung von Atomkernen aus Protonen und Neutronen frei wird, und zwar im wesentlichen bei der Bildung von Heliumkernen. Alle Fixsterne bestehen vorwiegend aus Protonen und Neutronen (Plasmazustand).
Es gibt verschiedene Wege, auf denen in der hohen Temperatur von etwa $2 \cdot 10^7$ °K des Sonneninnern die stabilen Heliumkerne He_2^4 (α-Teilchen) entstehen können. Ihr Endergebnis ist die Bildung dieser Kerne aus 4 Protonen, wobei 2 Positronen frei werden:

Bild 183/1

$$4\,H_1^1 \rightarrow He_2^4 + 2e_1^0 .$$ Positron

Die Energie-Masse-Bilanzen für die Sonne ergeben, daß die dauernd ausgestrahlte Sonnenenergie (Leistung von $3{,}7 \cdot 10^{23}$ kW) noch auf etwa 10^{11} Jahre gedeckt ist.

Man nennt solche Kernreaktionen, bei denen die Stoßenergie der Teilchen durch hohe Temperaturen erzeugt wird, thermonukleare Reaktionen.

Wenn man bedenkt, daß bei 1 kg He_2^4 durch Fusion etwa 200 Millionen kWh, also 10mal soviel wie bei der Spaltung von 1 kg U_{92}^{235} frei werden, so ist ersichtlich, daß eine technische Beherrschung thermonuklearer Reaktionen von größter Bedeutung ist.

Ökonomisch wichtig dabei ist die praktische Unerschöpflichkeit des Rohstoffes Wasser, der das zu der Reaktion besonders geeignete Deuterium D_1^2 zu etwa 0,016 % enthält, das sich durch Isotopentrennung gewinnen läßt.
Es wäre nötig, daß ein einmal eingeleiteter Verschmelzungsvorgang sich selbsttätig weiter fortsetzte, ähnlich wie ein Brand sich ausbreitet. Er müßte zugleich aber lenkbar und nicht eine Explosion sein, die in der noch zu besprechenden H-Bombe eintritt.

Fragen, Aufgaben

1. Was versteht man unter Massendefekt?
2. Welcher Unterschied besteht zwischen Kernumwandlung und Kernspaltung?
3. Welche sind die z. Z. wichtigsten spaltbaren Stoffe?
4. Woher stammt die Sonnenenergie?
5. Was versteht man unter thermonuklearen Reaktionen?
6. Welche Voraussetzungen hat eine Kettenreaktion?

ZUSAMMENFASSUNG

Der Zusammenhalt der Kerne wird durch spezifische Kernkräfte von sehr geringer Reichweite und großer Stärke bewirkt.

Erläutern Sie diese Erscheinung!

Die Bindungsenergie der Kerne ist so groß, daß man sie als Massendefekt bei der Bildung der Kerne oder bei der Zerlegung in ihre Bestandteile ermitteln kann:

$1\,g \triangleq 25 \cdot 10^6$ kWh.

Anwendung der Kernenergie

Die Erforschung der Kernenergie gehört heute in vielen Staaten zur Aufgabe der Wissenschaftler. Die Sowjetunion hat verschiedene sozialistische Staaten beim Aufbau von Forschungsreaktoren unterstützt. In diesen Reaktoren (unser Bild zeigt eine der beiden Anlagen in Rossendorf bei Dresden) werden viele radioaktive Isotope hergestellt, die man in der Medizin, in der Industrie und der Landwirtschaft und vor allem für Forschungsaufgaben einsetzt.

Die Entdeckung der Kernspaltung und der in ihr liegenden Möglichkeiten fiel in die Zeit der Vorbereitung des 2. Weltkrieges. Die deutschen und amerikanischen Imperialisten ließen sofort nach Bekanntwerden der ersten Berichte die mit der Kernspaltung verbundenen Forschungsprobleme auf den Krieg ausrichten. In Deutschland und in den USA wurden Forschergruppen gebildet, die zahlreiche grundlegende Fragen zu klären hatten. Da zu befürchten war, daß die *deutschen Imperialisten* die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Herstellung von Atombomben ausnützen würden, glaubten EINSTEIN und andere in den USA lebende führende Physiker den Fortbestand der Menschheit dadurch zu sichern, indem sie den *amerikanischen Imperialisten* ihre Hilfe zur Herstellung von Atombomben gaben. Mit einem riesigen Material- und Geldaufwand wurde in Amerika die Atombombe geschaffen.

Nachdem der Krieg im August 1945 schon entschieden war, erfolgte entgegen den Warnungen EINSTEINS, BOHRS, OPPENHEIMERS und anderer Wissenschaftler der Abwurf zweier Atombomben über Japan.

Die **friedliche Nutzung** der Kernenergie ist das Energieproblem unseres Zeitalters. Wohl reichen die Vorräte an Kohle und Öl, die auf der Erde vorhanden sind, noch längere, aber immerhin begrenzte Zeit. Die Reserven an Wasserkräften lassen sich nur bis zu einem bestimmten Umfang wirtschaftlich nutzen.

Da der Energiebedarf der gesamten Welt dauernd steigt, wird überall an der Nutzbarmachung der Kernenergie gearbeitet. Zwischen der Sowjetunion, den USA und Großbritannien ist 1963 ein Abkommen über ein gemeinsames Arbeiten auf diesem Gebiet getroffen worden.

1. Die Kettenreaktion

Die Hahnsche Entdeckung der Kernspaltung wurde durch die wichtige Entdeckung von I. und F. Joliot-Curie ergänzt, daß bei einer Spaltung 2 bis 3 Neutronen frei werden, die neue Spaltungen bewirken können. Es kann dadurch zu einer lawinenartig anschwellenden Kette von Spaltungen kommen (Bild 186/1).

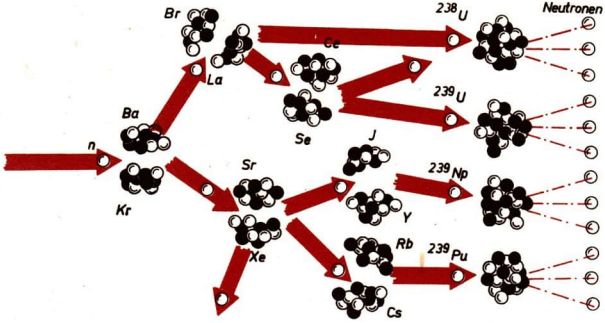


Bild 186/1 Links hat ein Neutron einen Kern des Urans^{235} in zwei Bruchstücke (Ba und Kr) gespalten; dabei entstehen zwei Sekundärneutronen. Diese zwei Neutronen treffen auf zwei Kerne Uran^{235} und spalten den einen in Br + La und den anderen in Sr + Xe. Bei jedem dieser beiden Spaltvorgänge werden Neutronen frei, die wieder weitere Spaltungen bewirken oder mitunter von Uran^{238} eingefangen werden, wobei sich dieses über U^{239} und Np^{239} zu Pu^{239} umwandelt. Letzteres ist ebenso spaltbar wie U^{235}.

Die Kernspaltungen durch Protonen, Deuteronen, γ-Strahlen großer Energie, die man in Beschleunigern erhält, vermögen keine Kettenreaktion hervorzurufen, da durch die Spaltungen diese Teilchen sich nicht vermehren oder „reproduzieren". Neutronen dagegen können Kettenreaktionen in Uran, Thorium und Plutonium erzeugen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Es dürfen nicht zu viele Neutronen nach außen entweichen. Das wird verhindert bei genügend großer Menge des spaltbaren Stoffes. Die Mindestmasse für das Eintreten einer Kettenreaktion heißt die **kritische Masse.**
2. Das Spaltmaterial darf nicht zu viel Stoffe enthalten, die Neutronen auffangen.
3. Die frei werdenden Neutronen müssen eine bestimmte Geschwindigkeit zum Auslösen einer neuen Spaltung haben.

2. Der Reaktor

Ein Kernreaktor ermöglicht es, durch eine gesteuerte, selbständig ablaufende Kettenreaktion Energie zu gewinnen.

Brennstoff der Reaktoren. Dazu wird zunächst spaltbares Material, der sogenannte *Brennstoff* benötigt. Geeignet dazu sind natürliches Uran, U^{235}, U^{233} und mit U^{235} angereichertes natürliches Uran; außerdem auch Plutonium. U^{235} wird durch Isotopentrennung gewonnen; Plutonium wird in Reaktoren künstlich erzeugt.
Der Brennstoff wird in Form von metallischen Stäben oder Platten als Oxid oder als gelöstes Salz verwendet.

Bremssubstanz (Moderator). Da die frei werdenden Neutronen höhere Geschwindigkeiten haben, wird im Reaktor ein Stoff benötigt, der ihre Energie vermindert, ohne sie einzufangen. Man verwendet dazu oft reinen *Graphit* (thermischer Uran-Graphit-Reaktor).
Besonders geeignet als Bremssubstanz ist *schweres Wasser*, das zunächst nicht in ausreichender Menge vorhanden war.
Für manche Reaktortypen ist auch *gewöhnliches Wasser* geeignet. Für andere wird das in der Herstellung sehr teure *Beryllium* verwendet.

Regelungseinrichtungen. Die Regelung der thermischen Reaktoren erfolgt mit Hilfe von *beweglichen Stäben* oder *Platten* aus Cadmium oder *borhaltigem Stahl*. Beide Stoffe absorbieren in hohem Maße langsame Neutronen. Je tiefer die Stäbe im Reaktor stecken, desto mehr Neutronen werden absorbiert. Während des Betriebes erfolgt die Regelung automatisch, ebenso die Ausschaltung im Gefahrenfalle.
Bei dem Betrieb eines Reaktors ist die Änderung der Reaktivität durch die steigende Temperatur und die Einwirkung der Spaltprodukte zu berücksichtigen.

Kühlsystem. Die bei der Spaltung frei werdende Energie wird durch Zusammenstöße der Spaltprodukte und α-Teilchen mit den Atomen der Umgebung sowie Absorption der γ-Strahlung in Wärmeenergie verwandelt. Um diese zu nutzen und zugleich das Reaktormaterial vor Zerstörung zu schützen, muß die Wärme abgeleitet werden. Wenn als Moderator gewöhnliches oder schweres Wasser verwendet wird, kann das durch *Zirkulation* des Wassers erfolgen.

Graphit als Moderator bedingt eine zusätzliche Kühlung durch eine Flüssigkeit (Wasser, flüssiges Metall, z. B. Na- oder Na-K-Legierungen) oder ein Gas, z. B. CO_2.

Strahlenschutz. Die radioaktiven, zum Teil gasförmigen Produkte müssen ebenso wie die γ-Strahlen abgeschirmt werden. Jeder Reaktor ist daher mit einer dicken Wand aus *Schwerbeton* umgeben. Er wird auch teilweise in den Erdboden eingelassen. Außerdem umgibt man ihn mit einem *Neutronenreflektor*. Dieser besteht aus Graphit, Beryllium oder Berylliumoxiden, an deren Atomkernen die Neutronen gestreut werden. Von dort aus gelangt ein Teil davon in den Reaktor zurück.
Die gesamte Reaktoranlage wird von einem zentralen, geschützten Schaltraum überwacht und gesteuert.

3. Reaktortypen

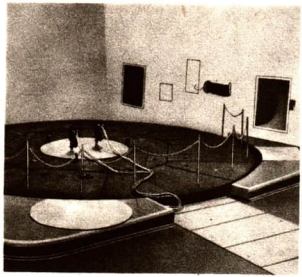


Bild 188/1 Blick in die Reaktorhalle des ersten sowjetischen Kernkraftwerkes

Nach ihrer *Verwendung* unterscheidet man Forschungs-, Energie- und Produktionsreaktoren. Die Grenzen lassen sich nicht scharf ziehen.
Nach der *räumlichen Anordnung* des spaltbaren Materials gibt es zwei Arten: homogene und heterogene Reaktoren.
Im **homogenen Reaktor** ist der Brennstoff in einem Moderator (meist Wasser) fein verteilt oder als Salz gelöst.
Im **heterogenen Reaktor** sind Brennstoff und Moderator örtlich getrennt; er ist komplizierter gebaut.
Forschungsreaktoren bilden die größte Gruppe der bisher gebauten Anlagen. Mit ihnen werden vielerlei Untersuchungen zu Problemen der Kernphysik, der Werkstoffforschung und der medizinischen Therapie durchgeführt. An ihnen werden auch Wissenschaftler und Techniker ausgebildet.

Der erste **Energiereaktor,** der nur der Erzeugung elektrischer Energie dient, wurde am 27. Juni 1954 in der Sowjetunion in Betrieb genommen (Bild 188/1).
Er ist ein thermischer Reaktor, bei dem die frei werdende Wärme mit Hilfe eines Druckwassersystems (100 at, 270 °C) nach außen geleitet wird. Der Reaktor arbeitet seit der Inbetriebnahme zuverlässig. Weit größere Kernkraftwerke (750 MW) sind im Bau. Eine schematische Darstellung der Energieumwandlungen in einem Kernkraftwerk zeigt Bild 188/2.

Die **Produktionsreaktoren** erzeugen Plutonium aus U^{238} und U^{233} aus dem nichtspaltbaren Th^{232}. Man nennt sie auch Brutreaktoren.

Bild 188/2
Energieumwandlungen in einem Kernkraftwerk

4. Kernenergie zum Antrieb von Fahrzeugen

Bis jetzt werden nur Schiffe mit Kernenergie angetrieben. Bei Flugzeugen, Raketen und Lokomotiven ist man über Vorstudien noch nicht hinausgekommen. Die Hauptschwierigkeit liegt in der Konstruktion geeigneter Sicherheitseinrichtungen. 1959 wurde in der Sowjetunion der erste und zugleich auch größte durch Kernenergie angetriebene

Eisbrecher „Lenin“ fertiggestellt (Länge 134 m, Breite 27,6 m, 16 000 BRT, Bild 189/1). Die Sowjetunion und die USA verfügen auch über U-Boote mit Kernenergieantrieb. Größere Fracht- und Fahrgastschiffe dieser Antriebsart sind im Bau.

5. Kernwaffen

Die Uranbombe. Für die ersten Atombomben wurde reines U^{235} verwendet. Die überall vorhandenen freien Neutronen (kosmische Strahlung) lösen darin eine Kettenreaktion aus, falls die kritische Masse vorhanden ist. Daher wird der Spaltstoff in der Bombe in zwei voneinander getrennten unterkritischen Massen angeordnet. Die Bombe wird dadurch gezündet, daß die Massen durch eine Sprengladung innerhalb eines dicken Metallmantels aufeinander geschossen werden. So wird die kritische Masse hergestellt.

Der zweite Weltkrieg war praktisch schon entschieden, als von einem Bomberkommando der US-Air-Force eine solche Uranbombe am 6. August 1945 über Hiroshima abgeworfen wurde. Ihre Anwendung war durch keinerlei militärische Notwendigkeit begründet. Sie tötete 80 000 Menschen sofort, noch mehr wurden verletzt, durch Strahleneinwirkung zu Siechtum und Tod verurteilt.

Drei Tage später wurde die Stadt Nagasaki das Opfer einer amerikanischen Plutoniumbombe ähnlicher Konstruktion.

Auf Kosten des Lebens und der Gesundheit unzähliger Männer, Frauen und Kinder hatten die amerikanischen Imperialisten eine „neue Waffe taktisch erprobt“ und meinten, der Welt gezeigt zu haben, daß ein Widerstand gegen ihren Anspruch auf eine Weltherrschaft nutzlos sei.

Die Wasserstoffbombe. Auch die Möglichkeit, Energie durch Verschmelzung von Kernen freizusetzen, ist zuerst in den Dienst kriegerischer Vorbereitungen gestellt worden. In Amerika wurde die Wasserstoffbombe entwickelt.

Wir wissen, daß für eine Kernfusion eine sehr hohe Temperatur nötig ist. Sie wird durch die Zündung einer Plutoniumbombe erzeugt. Dann setzt unter sehr großer Wärmebildung eine Kernfusion ein, bei der sich Heliumkerne aus Wasserstoffisotopen bilden. Dabei ist der Masse keine kritische Grenze gesetzt, so daß die Möglichkeiten ungeheuerlicher Zerstörung bestehen.

Bild 189/1 Der Eisbrecher „Lenin“ ist mit drei Druckwasserreaktoren ausgestattet und arbeitet mit angereichertem Uran. Der Eisbrecher kann ohne Brennstoffaufnahme über 1 Jahr fahren und verbraucht dabei etwa 80 kg Uran.

Der Schutz vor Kernwaffen. Der Schutz vor der vielfachen Wirkung der Kernwaffen ist bedeutend schwieriger als der Schutz vor den herkömmlichen Waffen. Im Zentrum einer Atombombenexplosion gibt es keinen Schutz. Mit der weiteren Entfernung vom Zentrum nehmen die Aussichten auf einen wirksamen Schutz ständig zu. Schutzmittel vor dem Hauptfaktor der Vernichtung, der Druckwelle, sind Bunker, Unterstände, Löcher, Gräben, Keller massiver Gebäude. Sie schützen auch vor der Wärmestrahlung. Gegen die durchdringenden Neutronen- und γ-Strahlen vermögen dicke Mauern und Erdwälle einen gewissen Schutz zu bieten, da sie die Strahlung absorbieren. Neutronen können künstliche Radioaktivität hervorrufen. Deswegen müßten Lebensmittel in betroffenen Gebieten vor dem Genuß auf etwaige Strahlung untersucht werden. Da der radioaktive Zerfall weder aufzuhalten noch zu beschleunigen ist, müssen beim Betreten eines verseuchten Geländes oder bei der Benutzung von bestrahlten Gegenständen umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen beachtet werden.

Der beste Schutz vor der Kernwaffe, an dem jeder Mensch mitarbeiten kann, ist der weltweite Kampf um die totale Abrüstung.

Von der Sowjetunion wurde im September 1959 der Vollversammlung der Vereinten Nationen folgender Vorschlag unterbreitet:

Alle im Besitz der Staaten befindlichen Atom- und Wasserstoffbomben werden vernichtet, ihre Produktion wird eingestellt. Die Energie der spaltbaren Materialien wird ausschließlich für friedliche, wirtschaftliche und wissenschaftliche Zwecke verwendet. Die Raketen aller Reichweiten für militärische Zwecke werden abgeschafft, und die Raketentechnik dient nur Transportzwecken und der Erschließung des Weltraumes zum Wohle der ganzen Menschheit.

Ein erster Schritt ist das im Juli 1963 in Moskau von der UdSSR, den USA und Großbritannien beschlossene Verbot von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre, im Weltraum und im Wasser. Ebenso wie die DDR sind viele Staaten diesem Abkommen beigetreten.

ZUSAMMENFASSUNG

Manche Kerne schwerer Elemente ($z > 82$) können unter Freisetzen großer Energiemengen durch Neutronen gespalten werden.

Wie kann die Kernspaltung realisiert werden?

Kernfusion ist die Verschmelzung von Kernen durch thermonukleare Reaktionen.

Welche Kernfusion vollzieht sich in der Sonne?

Kernreaktoren sind Einrichtungen, mit denen durch eine gesteuerte Kettenreaktion die bei der Kernspaltung frei werdende Energie gewonnen wird.

Nach welchen Gesichtspunkten werden Kernreaktoren eingeteilt?

Die Anwendung radioaktiver Isotope

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

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.

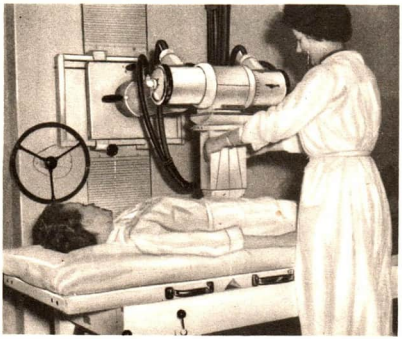
Man kann Radioisotope grundsätzlich in jedem Reaktor gewinnen, sowohl in den ausschließlich der Forschung dienenden Versuchs- oder Forschungsreaktoren als auch in den Reaktoren der Atomkraftwerke. Will man von einem Element, z. B. von Kobalt, ein radioaktives Isotop erhalten, so bringt man es in den Moderator eines Reaktors. Die zahlreichen Neutronen, die den Moderator durchdringen, vereinigen sich zum Teil mit den Kobaltkernen und bilden dadurch andere radioaktive Kerne:

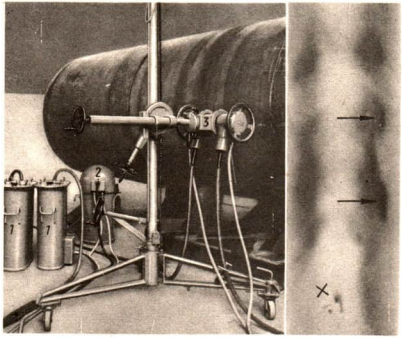
$$Co_{27}^{59} + n_0^1 \rightarrow Co_{27}^{60}$$

Co_{27}^{60} ist radioaktiv und geht unter Aussenden von β- und γ-Strahlen in den Nickelkern Ni_{28}^{60} über:

$$Co_{27}^{60} \rightarrow Ni_{28}^{60} + e_{-1}^{0} .$$

Die Halbwertzeit 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.





Anwendungsbeispiele für Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen können nur mit komplizierten Hochspannungsanlagen und flüssigkeitsgekühlten, empfindlichen Röhren unter Einsatz von Elektroenergie erzeugt werden.

Röntgendiagnostik

Mit Hilfe der Röntgendiagnostik können krankhafte Veränderungen im Körper oder die Lage eingedrungener Fremdkörper festgestellt werden. Man unterscheidet im wesentlichen drei Verfahren: die *Durchleuchtung*, die *Röntgenaufnahme* und die *Schirmbildaufnahme* bei Reihenuntersuchungen.

Röntgentherapie

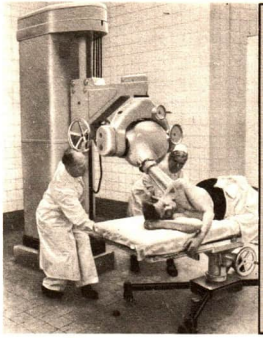
Röntgenstrahlen schädigen krankhaftes, besonders krebsartiges Gewebe stärker als gesundes Gewebe. Erkrankungen der oberen Hautschichten können bereits durch weiche Röntgenstrahlen geheilt werden. Bei Bestrahlung innerer Organe verwendet man sehr harte Röntgenstrahlen. Zur Schonung der umgebenden gesunden Körperzellen wird der Krankheitsherd von verschiedenen Seiten bestrahlt.

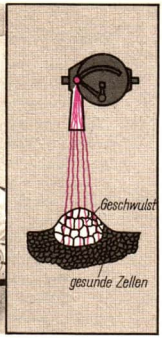
Röntgengrobstrukturuntersuchung

Bei diesem Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung werden sehr harte Röntgenstrahlen angewendet. Es lassen sich damit Lunker, Schlakkeneinschlüsse, Risse usw. feststellen. Es ist ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Prüfung metallischer Schweißnähte.

Anwendungsbeispiele für Radioisotope

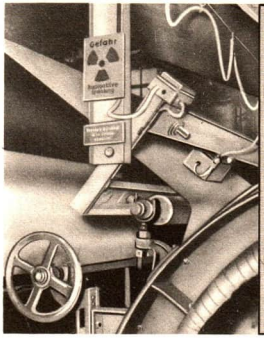
Radioaktive Isotope sind ohne Energiezufuhr strahlungsintensiv, fast ortsunabhängig einsetzbar und bedürfen außer dem Strahlenschutz keiner komplizierten, teuren Anlagen.

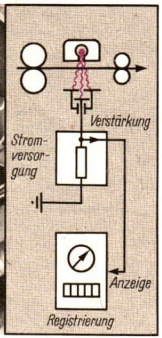




Bestrahlungsverfahren

Bestrahlungsverfahren werden in der Medizin zur Therapie und in der Kunststoffindustrie zum Veredeln von Plasten verwendet. Stark wuchernde Gewebe (Geschwulste) sind besonders strahlenempfindlich. Plaste erhalten durch Bestrahlen eine höhere Festigkeit und Temperaturbeständigkeit.



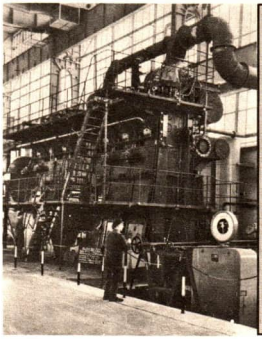


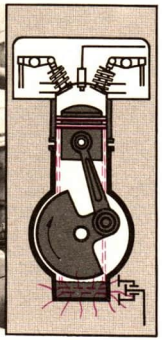
Durchstrahlungsverfahren

Durchstrahlungsverfahren werden in der Industrie bei Kontrollgeräten angewendet. Gußteile, Schweißverbindungen und Schmiedestücke können auf verborgene Materialfehler geprüft werden. Weit verbreitet ist die mit Hilfe einer Strahlenquelle und einer Ionisationskammer durchgeführte Dickenmessung von Folien.

Markierungsverfahren

Bei Markierungsverfahren fügt man stabilen Atomen radioaktive Isotope bei, die in geringsten Mengen durch ihre Strahlung nachweisbar sind. Der Verschleiß einzelner, mit radioaktiven Isotopen präparierter Maschinenteile kann so ohne Ausbau der Teile durch die radioaktive Strahlung der im Schmiermittel abgeführten Verschleißteilchen gemessen werden.





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 gehörten auch Frédéric und Irène Joliot-Curie, die zu den bedeutendsten Atomforschern zählen. Frédéric Joliot-Curie hat ein Verfahren zur Messung der Halbwertzeit 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 „Zoe" 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 Amtes enthoben.

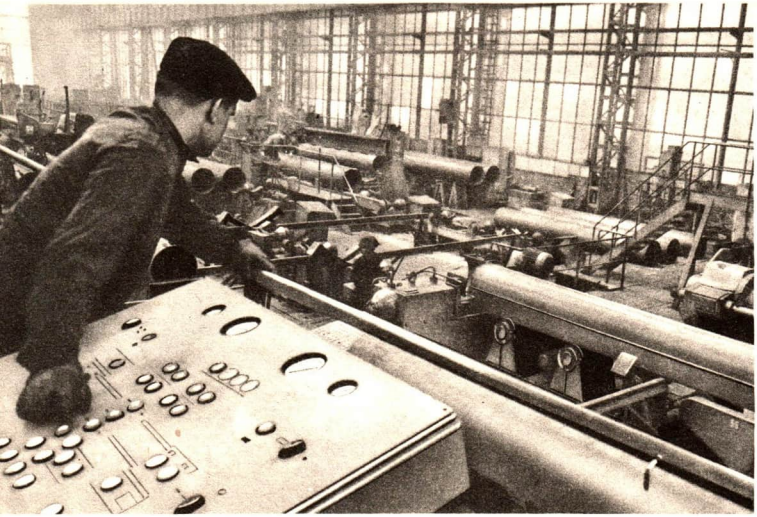
Als die Weltfriedensbewegung immer mehr erstarkte und 1949 der Weltfriedensrat gegründet wurde, wählte man Frédéric Joliot-Curie zum Präsidenten. In dieser Eigenschaft wurde er Initiator des Stockholmer Appells zur Ächtung der Atombombe, zu dem sich über 500 Millionen Menschen aller Erdteile durch ihre 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. Irène Joliot-Curie war bereits am 17. 3. 1956 an den gleichen Folgen verstorben.

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."

Zum augenblicklichen Zeitpunkt ist die Erforschung der Atomkerne, ihrer Teilchen und der Wechselwirkungen zwischen diesen Teilchen noch lange nicht abgeschlossen. Ständig erweitern die Physiker das Wissen um den Bau und die Energie der Atome. Vieles ist heute schon bekannt, aber es steht noch die Verwirklichung in der Praxis, in der Produktion aus.

Von den vielen hundert Atomarten, die bekannt sind, lassen sich mit den gegenwärtigen technischen Möglichkeiten der menschlichen Gesellschaft zur Zeit nur wenige durch Kernspaltung oder Kernfusion zum Freiwerden von Energie ausnutzen. Der Sauerstoff der Luft und der Wasserstoff des Wassers sind jedoch die Rohstoffe, die uns in fast unerschöpflichem Maße zur Verfügung stehen. Ob diese Rohstoffe eines Tages als Kernbrennstoffe der Gesellschaft zur Verfügung stehen werden, das hängt nicht nur von den erkannten physikalischen Gesetzen, sondern auch in ganz entscheidendem Umfang von den gesellschaftlichen Bedingungen ab, unter denen wir Menschen leben.

Solange es Kriege gibt oder die Gefahr eines Krieges droht, solange kann die Produktivkraft Wissenschaft auch in der sozialistischen Gesellschaft nicht voll mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln dafür eingesetzt werden, die wirksamen Gesetzmäßigkeiten und günstigsten Bedingungen bei der Umwandlung der Atomkernenergie zur friedlichen Nutzung zu erforschen.



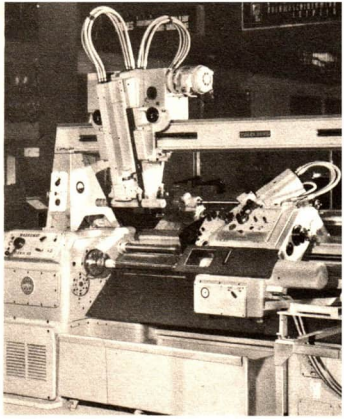
Grundlagen der Automatisierung

In der modernen Produktion bedient und überwacht der einzelne Werktätige umfangreiche Anlagen und viele Maschinen, so wie hier bei der Herstellung von Rohren. Das ist das typische Bild für eine automatisierte Anlage. Maschinen übernehmen weitgehend die Arbeitsverrichtungen der Menschen.

Nach einmaligem Einrichten der Fertigungsanlage durch den Menschen läuft der Arbeitsprozeß dann selbsttätig nach einem vorher festgelegten Programm ab. Einen solchen Vorgang nennt man eine **Steuerung.** Der Mensch überwacht, aber er braucht nicht ständig einzugreifen. Abweichungen, die beispielsweise durch Abnutzung der Werkzeuge entstehen, werden jedoch nicht selbsttätig beseitigt.

Wird die ständige Kontrolle des Arbeitsprozesses auch von Geräten übernommen und danach das Werkzeug selbsttätig verstellt, so spricht man von einer **Regelung.** Steuerungen und Regelungen sind die beiden Prozesse, auf deren Grundlage sich jede Automatisierung vollzieht.

Steuerung



Es gibt bereits eine große Anzahl von Arbeitsvorrichtungen, bei denen die Kraft und Funktion der Menschenhand durch Mechanismen ersetzt werden kann.
Solch eine Greifvorrrichtung entfernt beispielsweise ein Drehteil aus einem Drehautomaten und legt es auf die Transporteinrichtung, während eine zweite Vorrichtung ein neues Werkstück einlegt. Hierbei wirkt eine Steuerung.

1. Steuerung der Beleuchtung

An einfachen Beispielen sollen die Merkmale einer Steuerung erklärt werden.
Beim Hereinbrechen der Dämmerung muß die elektrische Straßenbeleuchtung eingeschaltet werden. Aus wirtschaftlichen Gründen soll sie jedoch nicht länger brennen als notwendig. Das Ein- und Ausschalten der Lampen kann von einer Schaltzentrale aus durch einen Menschen geschehen. Dazu muß der Mensch die Helligkeit beobachten – oder anders ausgedrückt mit seinen Augen messen –, mit Erfahrungswerten vergleichen und danach den Schalthebel verstellen. Soll dieser Vorgang automatisch ablaufen, so müssen die Funktionen des Menschen von Geräten übernommen werden. Beispielsweise kann als Meßeinrichtung eine Fotozelle dienen. Ein elektromagnetisches Relais kann das Verstellen des Lampenstromes übernehmen. Es soll schalten, wenn nicht genügend Licht auf die Fotozelle fällt (Bild 197/1).
Sobald die Helligkeit auf der Straße unter einen bestimmten Wert sinkt, werden die Straßenlampen eingeschaltet. Steigt die Helligkeit über diesen Wert, so werden die Lampen wieder ausgeschaltet. Man nennt diesen Vorgang eine **selbsttätige Steuerung.** Würde man einen Strommesser in den Fotozellenstromkreis legen, so würde die Zeigerstellung dem Menschen eine Information über die Helligkeit auf der Straße geben. Die Zeigerstellung ist ein Signal für die Helligkeit. Der Mensch wertet das Signal entsprechend aus und handelt danach. Man spricht dann von einer **Handsteuerung.** In der Automatisierungstechnik wird diese Signalerfassung und -verarbeitung von Geräten

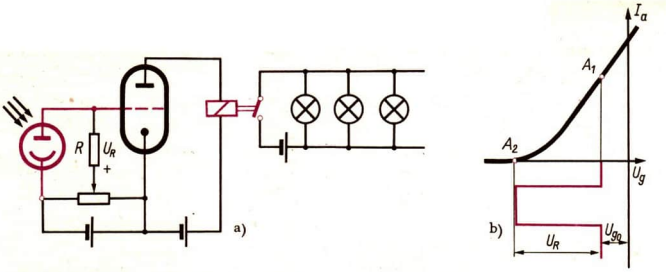


Bild 197/1 a) Prinzip eines Dämmerungsschalters
b) Verschiebung des Arbeitspunktes auf der Kennlinie der Elektronenröhre

Die Fotozelle liegt im Gitterkreis einer Elektronenröhre, die als Verstärker wirkt. Im Anodenkreis liegt das Relais. Die Gittervorspannung U_{go} muß mit Hilfe des Spannungsteilers so gewählt werden, daß bei Unterschreiten eines bestimmten Beleuchtungswertes auf der Straße ein großer Anodenstrom durch die Röhre fließt. Dies entspricht dem Arbeitspunkt A_1 im Bilde rechts, das die I_a-U_g-Kennlinie der Elektronenröhre darstellt. Bei Belichtung der Fotozelle fällt am Widerstand R eine Spannung U_R ab, die die Gitterspannung U_g nach negativen Werten verschiebt. Damit wird die Triode gesperrt. Dies entspricht dem Arbeitspunkt A_2. Das Relais fällt ab, und die Straßenlampen werden ausgeschaltet.

übernommen. Es handelt sich also immer um selbsttätige Steuerungen; man bezeichnet sie kurz als Steuerungen. Beim Dämmerungsschalter ist der Fotozellenstrom zunächst ein Signal für die Helligkeit. Dieses Signal gibt seine Information weiter auf den Anodenstrom. Der Anodenstrom enthält die vollständige Information über die Beleuchtung, denn zu jedem Helligkeitswert gehört eine bestimmte Anodenstromstärke. Durch das Relais wird die Information verkleinert; denn der Lampenstrom kann nur zwei Werte annehmen, je nachdem ob die Helligkeit auf der Straße einen bestimmten Wert über- oder unterschritten hat.

● *Wie müßte die Schaltung verändert werden, wenn die Information nicht verkleinert werden soll?*

So werden die Signale auf einem bestimmten Weg übertragen. Diesen Weg nennt man den **Wirkungsweg.** Er spielt in der Automatisierungstechnik eine wichtige Rolle.
In unserem Fall gilt: Die Helligkeit auf der Straße wirkt auf die Fotozelle, damit auf den Verstärker und das Relais und schließlich auf den Lampenstrom. Dieser Wirkungsweg stimmt nicht mit dem Weg des Anodenstromes oder beispielsweise des Lampenstromes überein. Stellt man die einzelnen Geräte, die für den Wirkungsweg wesentlich sind, durch Kästchen dar, so ergibt sich Bild 198/1. Die Größe am Eingang dieses Wirkungsweges ist die Beleuchtung[1], die Größe am Ausgang ist die Stromstärke im Lampenstromkreis.

[1] Die exakte physikalische Größe für die Beleuchtung bzw. Helligkeit heißt die Beleuchtungsstärke. Sie ist bestimmt durch den Lichtstrom, der auf eine Fläche fällt.

Bei einer Steuerung wirkt eine Eingangsgröße in festgelegter Weise selbsttätig auf eine Ausgangsgröße.

Um eine Größe steuern zu können, muß man messen und verstellen. Die Messung kann entweder vorher einmalig erfolgen oder in jedem Augenblick durch eine Meßeinrichtung, wie in diesem Beispiel durch die Fotozelle. Die Fotozelle nennt man die **Meßeinrichtung** oder den **Meßfühler.** Das Gerät, das die Verstellung übernimmt, heißt das **Stellglied.**

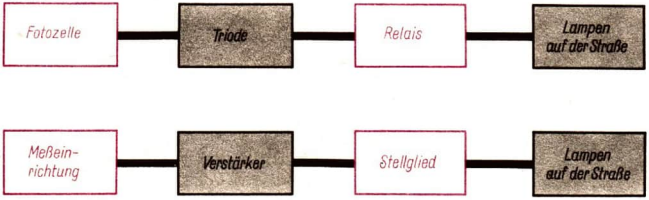


Bild 198/1 Steuerung der Beleuchtung als Blockschaltbild

In diesem Fall ist das elektromagnetische Relais das Stellglied. In Bild 198/1 sind die entsprechenden Bezeichnungen eingetragen. Bei einer Steuerung müssen die Meßwerte von der Meßeinrichtung auf das Stellglied übertragen werden können. Das gilt nicht nur für Steuerungen, sondern allgemein für alle automatischen Vorgänge. Deshalb kann man bei der Automatisierung keine reinen Anzeigegeräte als Meßeinrichtung verwenden. Beispielsweise kann man mit einem üblichen elektrischen Belichtungsmesser die Beleuchtungsstärke auf der Straße zwar messen, aber nicht steuern; denn es fehlt die Übertragungsmöglichkeit der Meßwerte.

Bei allen automatisierten Vorgängen müssen die Meßeinrichtungen im Gegensatz zu Anzeigegeräten eine Übertragungsmöglichkeit für die Meßwerte besitzen.

2. Steuerung eines Drehmeißels

Einem anderen Steuervorgang begegnet man bei der sogenannten Kopiervorrichtung an einer Drehmaschine (Bild 199/1). Der Drehmeißel soll so bewegt werden, wie es die Schablone vorschreibt. Ein Kopierdrehautomat ist auf Seite 196 gezeigt. Die Maße der Schablone (12) werden durch einen Taster (13) festgestellt. Der Drehmeißel (2) wird durch die Überlagerung von zwei Bewegungen in gewünschter Weise gelenkt. Einmal wird der Längsschlitten (11) mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit bewegt. In einem Winkel von 55° dazu wird der Kopierschlitten hydraulisch mittels des feststehenden Kolbens (6) und des verschiebbaren Zylinders (4) bewegt.

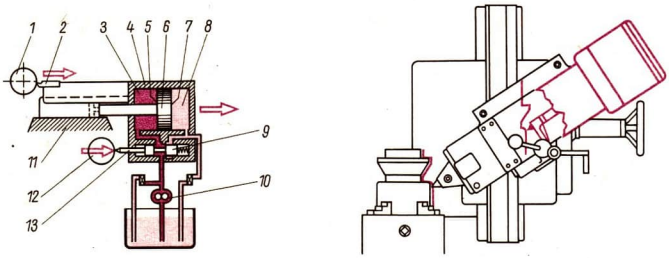


Bild 199/1 Kopiervorrichtung an einer Drehmaschine

Die Wirkungsweise der Steuerung ist folgende: Die Pumpe (10) fördert Öl zum Zylinderraum (3) und bewegt durch die Druckwirkung auf die Kolbenkreisringfläche (5) den Meißel (2) so lange nach links, bis der Taster (13) an der Schablone (12) anliegt. Der Taster ist mit dem Steuerkolben (9) verbunden. Durch den mit geringer Druckkraft aufliegenden Taster wird der Steuerkolben beim Auftreffen auf die Schablone um eine kleine Strecke nach rechts verschoben. Damit wird durch die Steuerkante des Kolbens (9) die Zuleitung zum Zylinderraum (8) freigegeben und der Öldruck wirkt auf die größere Kolbenfläche (7). Der Meißel wird nach rechts bewegt, da sich der Zylinder (4) nach rechts verschiebt, die Zuleitung nach (8) wird geschlossen, und da in (8) der Öldruck nicht mehr wirksam ist, wird nun der gesamte Zylinder (4) so weit wieder nach links verschoben, bis die Steuerkante wieder dem Drucköl den Weg nach (8) freigibt.

● *Warum wird bei Freigabe der Leitung nach (8) der Zylinder (4) nach rechts bewegt, obwohl auf beiden Seiten des Kolbens (6) gleicher Druck herrscht?*

Der Drehmeißel folgt dadurch ständig der Bewegung des Tasters und formt so die Schablone nach.

Die Meßeinrichtung ist bei der Kopiervorrichtung der Taster. Die Längenmeßwerte (Durchmesser) werden auf den Drehmeißel übertragen. Im Gegensatz dazu ist ein Feinmeßzeiger ein reines Anzeigegerät. Das Stellglied ist der Steuerkolben.

Betrachtet man den Wirkungsweg, so kann man sagen: Die Maße der Schablone beeinflussen den Taster, damit den Steuerkolben und schließlich den Kolben mit dem Dreh-

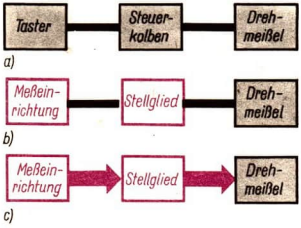


Bild 199/2 Steuerung des Drehmeißels als Blockschaltbild

Tabelle 13

Kopierdrehvorrichtung	Allgemeine Bezeichnung
Taster	Meßeinrichtung
Steuer-kolben	Stellglied
Stellung des Drehmeißels	Steuergröße x
Stellung des Steuer-Kolbens	Stellgröße y
Abnutzung des Dreh-meißels	Störgröße z_1
Ausfall der Pumpe	Störgröße z_2

Die Tabelle zeigt verschiedene physikalische Größen, die bei einer Steuerung von Bedeutung sind, in bildlicher Darstellung

meißel. Stellt man die einzelnen Geräte durch Blöcke dar, so erhält man Bild 199/2. Eingangsgröße dieser Steuerung ist das jeweilige Maß der Schablone, Ausgangsgröße ist die Stellung des Drehmeißels. Diese Ausgangsgröße ist die Größe, die gesteuert werden soll. Man bezeichnet sie als **Steuergröße *X*.** In diesem Fall ist die Stellung des Drehmeißels die Steuergröße *X*. Man kann die Stellung des Drehmeißels in Längeneinheiten angeben, wenn man beispielsweise den Abstand Drehachse – Planschlitten betrachtet. Die Stellung des Stellgliedes nennt man die **Stellgröße *Y*.** Sie kann hier als Stellung des Steuerkolbens ebenfalls in Längeneinheiten angegeben werden. In diesem Fall stimmen Steuergröße und Stellgröße in der Dimension überein. Das muß keineswegs immer der Fall sein.

Läuft die Steuerung über lange Zeit selbsttätig, so wird man Abweichungen von den geforderten Maßen feststellen. Es sind Störungen aufgetreten, die die Steuerung nicht mehr in der gewünschten Weise funktionieren lassen. Beispielsweise die Abnutzung des Drehmeißels kann solche Störung hervorrufen. Solche Größen, die störend auf die Steuerung einwirken, nennt man **Störgrößen Z_1, Z_2 . . . .** Die Abnutzung des Drehmeißels wirkt hier als Störgröße. Bei einer Steuerung gibt es eine Steuergröße und eine Stellgröße, aber es kann mehrere Störgrößen geben. So kann in diesem Beispiel auch das Versagen der Ölförderpumpe eine Störgröße sein.

● *Ergänzen Sie die entsprechenden Begriffe in der Tabelle für eine andere Steuerung!*

Wie bereits festgestellt wurde, beeinflussen die Maße der Schablone die Stellung des Drehmeißels. In umgekehrter Richtung wirkt aber die Stellung des Drehmeißels nicht auf das jeweilige Maß der Schablone.
Diese Wirkungsrichtung kennzeichnet man in der Darstellung von Bild 199/2 c durch Pfeile. Die Stellung des Drehmeißels wirkt aber auch nicht auf einem anderen Wege als über den Kolben auf das Maß der Schablone zurück. Man sagt, der Wirkungsablauf hat keine Rückwirkung, er ist rückwirkungsfrei. Der Wirkungsweg ist offen. Allgemein gilt:

Bei einer Steuerung ist der Wirkungsablauf rückwirkungsfrei. Diesen offenen Wirkungsweg nennt man Steuerkette.
Der Wirkungsweg bei einer Steuerung wird nur in einer Richtung durchlaufen.

Der offene Wirkungsweg ist das wichtigste Kennzeichen einer Steuerung.

3. Steuerung einer Uhrenanlage

Beobachtet man den Zeiger einer Normaluhr, wie man sie auf Bahnhöfen und Plätzen, in Betrieben und auch in Schulen findet (Bild 201/1), dann kann man feststellen, daß der Minutenzeiger sprunghaft von einem Teilstrich auf den anderen rückt. Zu solch einer Uhrenanlage gehören eine Hauptuhr und eine Anzahl von Nebenuhren, die man auch Normaluhren nennt (Bild 201/2). Durch die Hauptuhr werden die Nebenuhren gesteuert. Die Hauptuhr übernimmt in diesem Fall mehrere Funktionen. Sie ist Meßeinrichtung. und Pendel und Kontakte sind gleichzeitig Stellglied. Steuergröße ist die Zeigerstellung der Nebenuhr. Stellgröße ist die Stellung des Pendels.

● *Welche Störgrößen können bei einer gesteuerten Uhrenanlage auftreten?*

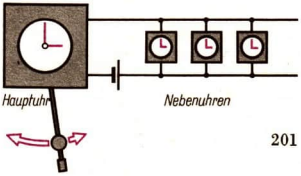


Bild 201/1 Normaluhr (Nebenuhr)

Bild 201/2 Prinzip der Uhrensteuerung

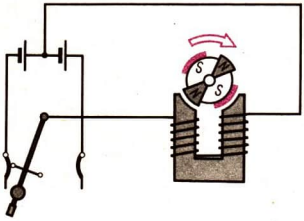


Bild 202/1 Schaltung der Uhrensteuerung

Die Hauptuhr ist eine Pendeluhr. Durch besondere Einrichtungen wird dafür gesorgt, daß nach Ablauf von jeweils einer Minute ein Stromstoß auf die Nebenuhr übertragen wird. Der Einfachheit halber schließt in der dargestellten Schaltung das Pendel in jedem Umkehrpunkt der Schwingung einen elektrischen Kontakt. Der Mechanismus einer Nebenuhr besteht aus einem Elektromagneten in Hufeisenform. Zwischen den Polschuhen des Magneten ist ein vierpoliger Anker drehbar angebracht. Der Anker ist durch einen Manipermring vormagnetisiert. Gegenüberliegende Pole haben die gleiche Polarität. Stehen einander beispielsweise Südpol des Elektromagneten und Südpol des Ankers gegenüber, so dreht sich der Anker durch die abstoßende Kraft ruckartig weiter, bis dem Südpol des Elektromagneten der Nordpol des Ankers gegenübersteht. Diese Drehung wird über Zahnräder auf den Zeiger der Uhr übertragen. Eine Sperre sorgt dafür, daß der Anker sich nur in einer Richtung drehen kann. Soll der Anker, die nächste Drehung ausführen, so muß die Richtung des Stromes geändert werden.

● *Welche Polung hat der Elektromagnet bei der gezeichneten Stellung des Pendels in Bild 202/1?*

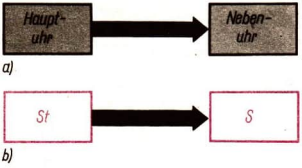


Bild 202/2 Steuerung der Nebenuhr
a) durch Geräte dargestellt
b) durch Steuereinrichtung und Steuerstrecke dargestellt

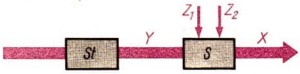


Bild 202/3 Prinzip einer Steuerung

Die Hauptuhr wirkt auf die Nebenuhr, aber die Nebenuhr nicht wieder auf die Hauptuhr. Der Wirkungsablauf vollzieht sich in einer Richtung. Der Wirkungsweg ist offen. Diese Steuerkette kann man zunächst durch die Geräte wie in Bild 202/2 a darstellen.

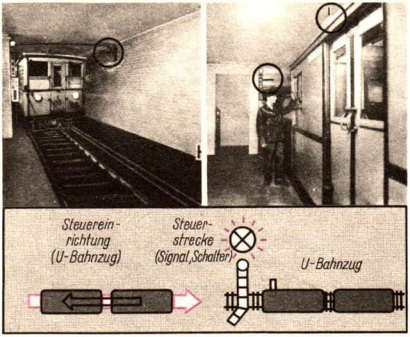
Bei dieser Steuerung kann man deutlich zwei Teile erkennen; die Hauptuhr ist die steuernde Anlage, und die Nebenuhr ist die gesteuerte Anlage. So läßt sich jede Steuerung in zwei Gruppen trennen. Man bezeichnet die steuernde Anlage als **Steuereinrichtung St** und die gesteuerte Anlage als **Steuerstrecke S.** In Bild 202/2 b sind die entsprechenden Bezeichnungen eingetragen. Kennzeichnet man in dieser Darstellung noch die Steuergröße X, die Stellgröße Y und die Störgrößen Z_1, $Z_2 \ldots$, so ergibt sich als allgemeine Darstellung der Wirkungsweise einer Steuerung Bild 202/3.

Eingangsgröße der gesamten Steuerkette ist die Zeit, die von der Hauptuhr festgestellt

Anwendungsbeispiele zur Steuerung

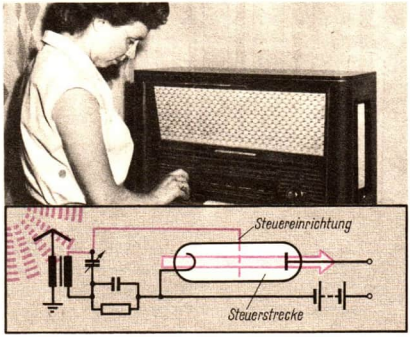
Verkehr

Bei der Berliner U-Bahn, wie auch bei vielen anderen Bahnen, beeinflußt jeder Zug mit seiner Steuereinrichtung die Signalanlagen und den Fahrstromschalter (Steuerstrecke) auf dem direkt hinter ihm liegenden Streckenabschnitt. Das Einfahren eines weiteren Zuges in die Strecke wird dadurch verhindert.



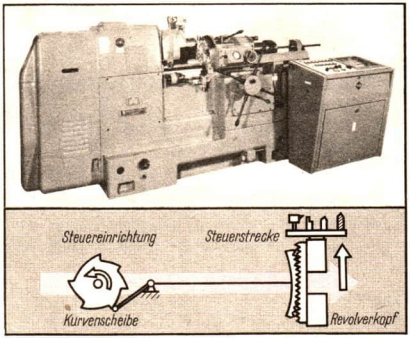
Elektronik

Die von der Antenne aufgenommenen Hochfrequenz-Wechselspannungen werden (verstärkt) dem Gitter zugeleitet. Durch die Gitterspannung wird der Anodenstrom in der Triode gesteuert. Steuerstrecke ist die Verstärkerröhre (Triode).



Maschinenbau

Trommelrevolver-Drehautomaten sind durch Kurvenscheiben gesteuerte Arbeitsmaschinen. Unser Bild zeigt den Steuermechanismus, durch den die Werkzeuge in Arbeitsstellung und außer Eingriff gebracht werden.



wird. Ausgangsgröße der gesamten Steuerung, also auch Ausgangsgröße der Steuerstrecke, ist die Steuergröße X. In diesem Beispiel ist es die Zeigerstellung der Nebenuhr. Die Steuereinrichtung wirkt durch die Veränderung der Stellgröße Y auf die Steuerstrecke ein. Die Stellgröße ist die Ausgangsgröße der Steuereinrichtung und zugleich die Eingangsgröße der Steuerstrecke. Die Pendelstellung ist die Ausgangsgröße der Hauptuhr und zugleich die Eingangsgröße der Nebenuhr.

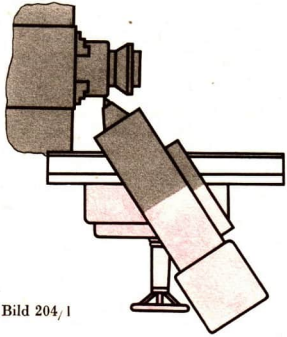


Bild 204/1

Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Welche weiteren Anwendungen für Steuerungen mit Hilfe von Fotozellen gibt es?
2. In welcher Weise unterscheidet sich die auf Seite 197 angegebene Fotozellenschaltung von der auf Seite 30 behandelten?
3. Welches ist die Steuereinrichtung und welches ist die Steuerstrecke

3.1. bei der Kopiervorrichtung (siehe Bild 204/1)?

3.2. beim Dämmerungsschalter?

4. Beschreiben Sie den Wirkungsweg bei der Ventilsteuerung im Viertakt-Ottomotor!
5. Entwerfen Sie eine Schiffsmodell-Fernsteuerung mit einer durch Uhrwerk betriebenen Steueranlage, die mit dazwischenliegender Nullstellung abwechselnd nach links bzw. rechts ausschlägt. Der Auslöseimpuls könnte durch einen Schlauch (Ventilgummi) von einem Druckball (Parfümzerstäuber) übertragen werden.
6. Bauen Sie einen automatischen Feuermelder aus einem Bimetallstreifen, einer Kontaktschraube, einer Spannungsquelle und einer Klingel! Bei Erwärmung des Bimetallstreifens (Kerzenflamme) soll die Klingel ertönen. Zeichnen Sie das Schaltbild und das Wirkungsschema!
7. Welche Temperaturmeßgeräte kennen Sie, die sich auch als Meßeinrichtung für automatisierte Anlagen verwenden lassen?

ZUSAMMENFASSUNG

Aufgabe einer Steuerung ist es, eine Ausgangsgröße in vorgegebener Weise durch eine Eingangsgröße zu beeinflussen.

In welchen Maßeinheiten können die Eingangsgröße und die Ausgangsgröße bei der Uhrenanlage angegeben werden?

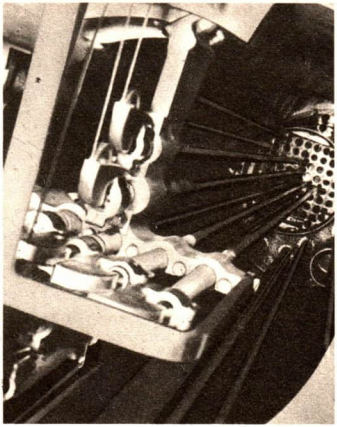
Kennzeichen der Steuerung ist der offene Wirkungsweg, die Steuerkette.

An welcher Stelle ist der Wirkungsweg bei der Kopiervorrichtung offen?

Der Wirkungsweg wird in einer Richtung durchlaufen.

In welcher Richtung wird der Wirkungsweg beim Trommelrevolver-Drehautomaten durchlaufen?

Regelung



Im Kernreaktor werden Einrichtungen verwendet, die auf eine Veränderung des Energieumsatzes so reagieren, daß dadurch die Leistungsabgabe selbsttätig sofort wieder auf den erforderlichen Wert gebracht wird. Solch ein Vorgang wird als Regelvorgang bezeichnet. Schiffe und Flugzeuge, Energiemaschinen und Produktionsprozesse werden ebenfalls geregelt, so daß man sagen kann, die Regeltechnik hat umfassende Bedeutung.

1. Regelung der Temperatur

In einem Warmwasserspeicher soll die Temperatur des Wassers einen möglichst konstanten Wert haben. Man könnte diese Aufgabe durch eine Steuerung lösen unter der Voraussetzung, daß die Wasserentnahme immer gleichbleibend ist. Dann könnte man mit einer Schaltuhr und einem Zeitschaltplan durch Ein- und Ausschalten der Heizung die Temperatur des Wassers steuern und auf diese Weise einen annähernd konstanten Wert der Wassertemperatur erreichen (Bild 205/2). Diese Steuerung liefert aber kein

Bild 205/2 Prinzip der Temperatursteuerung

zufriedenstellendes Ergebnis, sobald die Wasserentnahme unregelmäßig ist, und das trifft in der Mehrzahl der Fälle zu. Eine Verbesserung des Ergebnisses kann man erreichen, wenn man mit einem Thermometer die Wassertemperatur direkt mißt (Bild 206/1). Das Thermometer mißt dauernd im Speicher die Wassertemperatur. Sobald die Wassertemperatur unter den gewünschten Wert sinkt, wird über einen Übertragungsmechanismus die Heizung eingeschaltet. Damit steigt die Wassertemperatur wieder, bei Erreichen des gewünschten Wertes wird die Heizung wieder selbsttätig abgeschaltet.

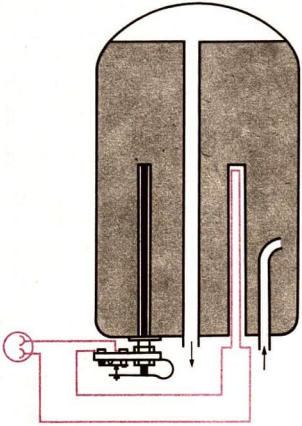


Bild 206/1 Temperaturregelung im elektrischen Warmwasserspeicher

Diesen Vorgang nennt man eine **selbsttätige Regelung.** Würde ein Mensch die Temperatur an einem Thermometer ablesen und danach die Heizung ein- bzw. ausschalten, so wäre die Aufgabe durch eine sogenannte Handregelung gelöst. In der Automatisierungstechnik aber beschäftigt man sich ausschließlich mit selbsttätigen Regelungen und bezeichnet sie kurz als Regelungen. Um eine Größe regeln zu können, muß man sie messen. **Meßeinrichtung** ist hier das Thermometer. Ein übliches Flüssigkeitsthermometer genügt nicht, denn es ist ein reines Anzeigeinstrument, es fehlt die Übertragungsmöglichkeit der Meßwerte. Ein Quecksilberthermometer läßt sich als Meßeinrichtung für Steuerungen und Regelungen verwenden, wenn man Drähte als elektrische Kontakte in die Kapillare einschmilzt. Bei solch einem Kontaktthermometer schließt der steigende Quecksilberfaden den Kontakt. Neben dem Kontaktthermometer wird häufig in Warmwasserspeichern das sogenannte Stabthermometer verwendet (Bild 206/2).

Das **Stellglied,** das die Heizung verstellt, ist in diesem Beispiel der Kontaktmechanismus.

● *Überlegen Sie, in welche Richtung die Stellfeder bei Erwärmung von Metallhülse und Glasstab bewegt wird (Wärmeausdehnungskoeffizienten)!*

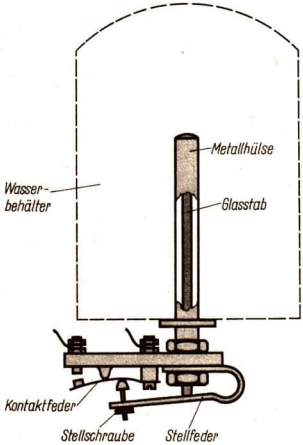


Bild 206/2 Stabthermometer mit Kontakten

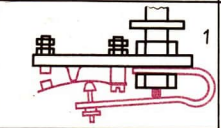
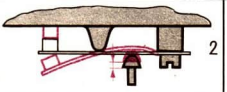
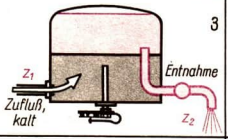
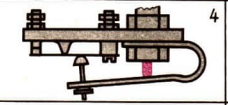
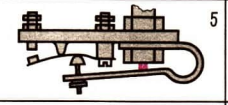
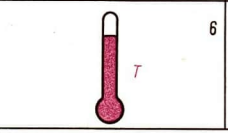
Das Stabthermometer besteht aus einer Metallhülse, in der sich ein Stab aus Glas oder Invar befindet. Bei Temperaturerhöhung dehnen sich beide Stoffe unterschiedlich aus. Die relative Ausdehnung gilt als Maß für die Temperatur. Mit der Stellschraube läßt sich die Kontaktstellung festlegen, die der gewünschten Temperatur entspricht. Durch die Längenänderung wirkt die Stellfeder so auf die Stellschraube, daß die ursprünglich gestreckte Kontaktfeder nach oben durchknickt und den Kontakt öffnet.

Stellgröße Y ist die Stellung der Kontaktfeder. **Störgrößen Z_1 und Z_2** sind die Umgebungstemperatur und die veränderliche Wasserentnahme. Die Größe, die geregelt wird, nennt man die **Regelgröße.** Sie entspricht der Steuergröße bei einer Steuerung. In diesem Fall ist die Wassertemperatur im Speicher die Regelgröße. Ihr augenblicklicher Wert, der vom Stab gemessen wird, heißt der **Istwert X der Regelgröße.** Der gewünschte Wert, der konstant gehalten werden soll, heißt der **Sollwert X_K der Regelgröße.** Die Einstellung des Sollwertes erfolgt durch die Schraube.

Allgemein kann man den Vorgang einer Regelung folgendermaßen beschreiben:

> **Bei einer Regelung wird ständig der Istwert X der Regelgröße gemessen und mit dem Sollwert X_K verglichen. Bei einer Abweichung des Istwertes vom Sollwert erfolgt selbsttätig ein Verstellen, das die Abweichung rückgängig macht.**

Tabelle 14

Beispiel	
	Stellglied
	Stellgröße y
	Störgrößen z_1, z_2
	Istwert x
	Sollwert x_K
	Regelgröße

2. Regelung der Spannung

Bei der Lichtmaschine in Kraftfahrzeugen findet man ebenfalls eine Regelung. Die Aufgabe dieser Regelung besteht darin, die von der Lichtmaschine gelieferte Spannung konstant zu halten. Die Lichtmaschine wird über einen Keilriemen vom Verbrennungsmotor angetrieben. Bei laufendem Motor liefert die Lichtmaschine die Spannung für alle Verbraucher im Kraftfahrzeug.

● *Nach welchem Prinzip arbeitet die Lichtmaschine?*

Der Drehzahlbereich des Motors ist sehr groß und damit ist auch die von der Lichtmaschine gelieferte Spannung sehr unterschiedlich. Eine Folge wäre zum Beispiel die veränderliche Helligkeit der Lampen. Deshalb ist das Konstanthalten der Spannung sehr wichtig. Die von der Lichtmaschine erzeugte Spannung U ist um so größer, je höher die Drehzahl und je stärker der Strom in den Feldwicklungen sind. Man kann trotz veränder-

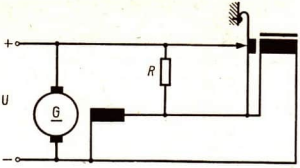


Bild 208/1 Spannungsregelung an der Lichtmaschine
In der gezeichneten Kontaktstellung ist der Widerstand R kurzgeschlossen, und der Erregerstrom ist groß. Steigt die Spannung am Generator über einen bestimmten Wert, den Sollwert, so zieht der Elektromagnet an, und der Kontakt wird geöffnet. – In den Erregerstromkreis ist nun zusätzlich der Widerstand R geschaltet. Dadurch wird der Erregerstrom geschwächt, und die Spannung am Generator sinkt wieder. Ist sie unter den Sollwert gesunken, wird der Kontakt wieder geschlossen, damit der Widerstand überbrückt, und so steigt der Erregerstrom wieder. Damit steigt die Spannung am Generator von neuem und so fort.

licher Drehzahl die erzeugte Spannung konstant halten, indem man den Erregerstrom entsprechend verändert (Bild 208/1).
Die Funktionen von Meßeinrichtung und Stellglied übernimmt hier der Elektromagnet mit den Kontakten.

● *Welche Meßinstrumente gibt es, bei denen die elektromagnetische Wirkung ausgenutzt wird?*

Hier erfolgt keine direkte Messung der Spannung am Generator, sondern der durch den Elektromagneten fließende Strom wird als Maß für die Spannung verwendet.
Regelgröße ist die Spannung am Generator. Ihr Istwert X wird indirekt durch den Strom im Elektromagneten gemessen. Der Sollwert X_K der Regelgröße wird durch die Rückzugsfeder am Kontakt fest eingestellt. Regelgröße ist eine Spannung, aber der Vergleich von Istwert und Sollwert ist ein Vergleichen von Kräften.

● *Welche beiden Kräfte werden verglichen?*

Stellgröße Y ist die Stellung der Kontakte. Störgrößen Z_1 und Z_2 sind die veränderliche Drehzahl des Motors und die veränderliche Zahl der angeschalteten Verbraucher.
Verfolgt man bei dieser Regelung ähnlich wie bei den Steuerungen den Wirkungsablauf, so stellt man fest: Die Spannung am Generator wirkt auf den Strom im Elektromagneten, der Elektromagnet wirkt auf die Stellung der Kontakte, diese beeinflussen über den Widerstand den Erregerstrom und damit die Spannung am Generator. Die Spannung am Generator aber wirkt wieder auf den Strom und so fort. Der Kreislauf beginnt von

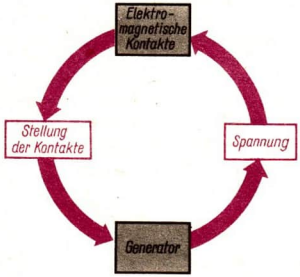


Bild 208/2 Wirkungsweg der Spannungsregelung

neuem. Der Wirkungsweg ist geschlossen (Bild 208/2). In umgekehrter Richtung wirkt die Spannung am Generator aber nicht direkt auf die Stellung der Kontakte, d. h. der Wirkungsweg ist gerichtet. Allgemein gilt:

Bei einer Regelung ist der Wirkungsablauf geschlossen. Den geschlossenen Wirkungsweg nennt man Regelkreis.
Der Regelkreis wird nur in einer Richtung durchlaufen.

Das sind die wichtigsten Kennzeichen einer Regelung und die wesentlichsten Unterschiede zwischen Steuerung und Regelung. Diese Wirkungsrichtung ist in Bild 208/2 gekennzeichnet.

3. Regelung des Wasserstandes

Beim Betrieb eines Heizkraftwerkes werden der Kesselanlage zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche Dampfmengen entnommen. Trotz der veränderlichen Dampfentnahme muß der Speisewasserstand im Kessel konstant bleiben. Die Aufgabe kann durch eine Regelung des Wasserstandes gelöst werden. In Bild 209/1 wird als Meßeinrichtung für den Wasserstand ein Schwimmer verwendet.

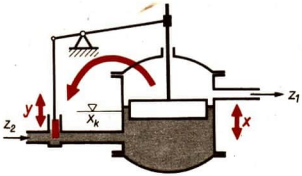


Bild 209/1 Wasserstandsregelung

- *Würde die Meßeinrichtung noch gültige Werte liefern, wenn sich die Dichte der Flüssigkeit ändern würde?*

Stellglied ist ein Schieber, der den Speisewasserzufluß verstellt. Die Übertragung der Meßwerte vom Schwimmer auf das Stellglied erfolgt über einen Hebel. Ein Wasserstandsglas kommt hier als Meßeinrichtung wegen der fehlenden Übertragungsmöglichkeit nicht in Frage.

- *Welches sind hier Regelgröße, Stellgröße und Störgrößen?*

Der Sollwert X_K ist in Bild 209/1 gekennzeichnet. Die Sollwerteinstellung kann beispielsweise durch vertikale Verschiebung der Schwimmerstange am Hebel erfolgen.

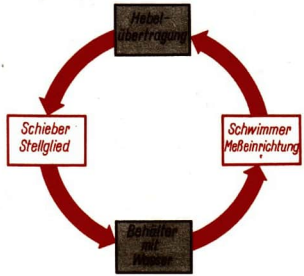


Bild 209/2 Wasserstandsregelung als Blockschaltbild. Der Pfeil zeigt die Wirkungsrichtung an

Steigt der Wasserstand über den Sollwert X_K, so bewegt sich der Schwimmer nach oben. Gleichzeitig senkt sich der Schieber, und der Zufluß wird verringert. Daher sinkt der Wasserspiegel bei weiterer Dampfentnahme wieder. Der Schwimmer bewegt sich nach unten, damit wird der Schieber über den Hebel wieder nach oben bewegt und so fort. Der Wirkungsablauf ist geschlossen. Der Regelkreis wird in der gekennzeichneten Richtung durchlaufen.

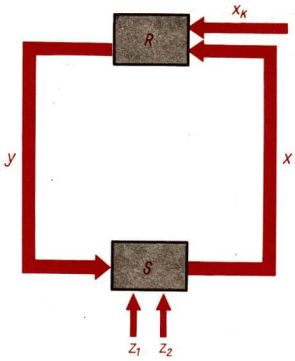


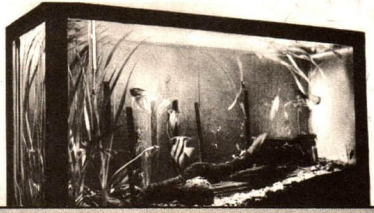
Bild 210/1 Prinzip einer Regelung

Ähnlich wie die Steuerkette besteht der Regelkreis aus zwei Hauptbestandteilen, aus der regelnden Anlage und der geregelten Anlage. Die regelnde Anlage heißt **Regeleinrichtung *R*** oder kurz Regler, und die geregelte Anlage nennt man **Regelstrecke *S*.** Dabei wird die Meßeinrichtung zur Regeleinrichtung gezählt und das Stellglied zur Regelstrecke. Häufig läßt sich das aber im Geräteaufbau nicht trennen, beispielsweise hat der Elektromagnet bei der Spannungsregelung der Lichtmaschine gleichzeitig die Funktionen von Meßeinrichtung, Regeleinrichtung und Stellglied übernommen.

Die Ausgangsgröße der Regelstrecke S (des Behälters) ist der Istwert X der Regelgröße, der Wasserstand. Er ist gleichzeitig Eingangsgröße für die Regeleinrichtung R. Ausgangsgröße der Regeleinrichtung R ist die Stellgröße Y (die Stellung des Schiebers), sie ist gleichzeitig Eingangsgröße der Regelstrecke S. Damit ist der Wirkungsweg geschlossen. Der Sollwert X_K wird von außen eingestellt, und die Abweichung des Istwertes X vom Sollwert X_K wird in der Regeleinrichtung gebildet. Die Störgrößen wirken von außen auf die Regelstrecke (Bild 210/1).

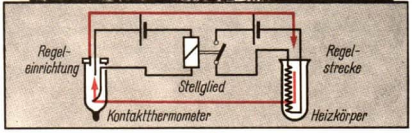
Bei dieser Wasserstandsregelung kann der Schieber, also das Stellglied, in einem gewissen Bereich – zwischen den Stellungen auf und zu – jede beliebige Stellung annehmen. Die Stellgröße verändert sich stetig. Derartige Regler nennt man **stetige Regler.** Im Gegensatz dazu kann bei der Temperatur- und Spannungsregelung die Stellgröße nur zwei Werte annehmen. Die Kontakte sind entweder geöffnet oder geschlossen. Derartige Regler heißen **Zweipunkt-Regler.**

Anwendungsbeispiele zur Regelung



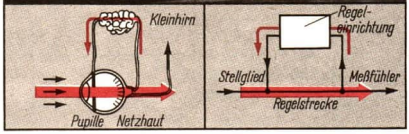
Technik

Im Aquarium wird durch eine Heizungsregelung die Temperatur des Wassers konstant gehalten. Das Kontaktthermometer schaltet die Heizung entweder ein oder aus. Diese Regelung ist eine Zweipunktregelung.



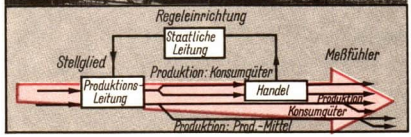
Biologie

Wenn sich der Lichteinfall auf die Netzhaut des Auges ändert, dann wird ein von den Sehzellen ausgehender Impuls zum Kleinhirn geleitet. Infolgedessen wird durch das Muskelsystem der Pupille die Pupillenöffnung verstellt und damit der Lichteinfall auf die Netzhaut konstant gehalten. Diese Regelung ist eine stetige Regelung.



Gesellschaft

Das Gesetz der proportionalen Entwicklung der Produktion erfordert eine genaue Bestimmung der Bedürfnisse der sozialistischen Gesellschaft. Die Leitungen der Produktionsbetriebe erhalten deshalb durch den Volkswirtschaftsplan die entsprechenden Produktionsaufträge. Auch dieser Vorgang ist eine Regelung.



Versuche, Fragen, Aufgaben

1. Stellen Sie in einer Tabelle für die drei behandelten Beispiele die Begriffe für Meßeinrichtung, Stellglied, Regeleinrichtung, Regelstrecke, Regelgröße, Stellgröße und Störgrößen zusammen!
2. Wie kann man eine Steuerung von einer Regelung unterscheiden?
3. Wenn Sie beim Bootfahren einen bestimmten Kurs einhalten wollen, steuern Sie oder regeln Sie das Boot? Beschreiben Sie den Wirkungsweg!
4. Nennen Sie Beispiele für Temperaturregelungen!
5. Handelt es sich beim Vergaser eines Otto-Motors um eine Flüssigkeitsstandsteuerung oder um eine Flüssigkeitsstandregelung?
6. Erklären Sie die Wirkungsweise der Drehzahlregelung bei der Dampfmaschine!
7. Bauen Sie eine Temperaturregelung aus Bimetallstreifen, Kontaktschraube, Spannungsquelle und einer Glühlampe als Heizgerät auf! Zeichnen Sie die Schaltung und das Wirkungsschema!

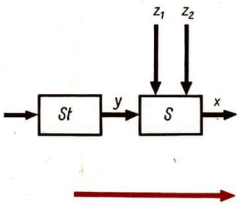
ZUSAMMENFASSUNG

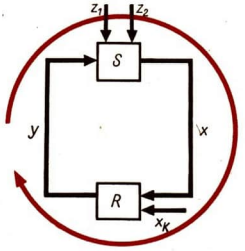
Aufgabe einer Regelung ist es, eine Regelgröße einem vorgeschriebenen Sollwert anzugleichen.
Wie erfolgt der Regelvorgang?

Kennzeichen einer Regelung ist der geschlossene Wirkungsweg, der Regelkreis.
Wie verläuft der Wirkungsweg bei einer Temperaturregelung im Aquarium mit Kontaktthermometer?

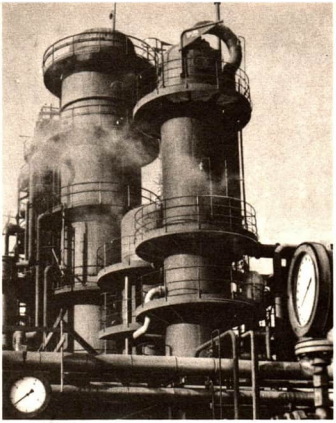
Der Wirkungsweg wird in einer Richtung durchlaufen.
In welcher Richtung wird der Wirkungsweg beim Vergaser eines Otto-Motors durchlaufen?

Steuerung	Regelung
Offener Wirkungsweg Steuerkette **Eine** Wirkungsrichtung	**Geschlossener** Wirkungsweg Regelkreis **Eine** Wirkungsrichtung





Automatisierung



In der chemischen Industrie ist die Automatisierung besonders hochentwickelt, weil die meisten chemischen Produktionsprozesse hierfür günstige Voraussetzungen bieten. Sie laufen sehr oft kontinuierlich ab, bleiben über lange Zeiträume unverändert, sind mit relativ einfachen Transportproblemen verbunden und benötigen im Gegensatz zur mechanischen Produktion keine Montagevorgänge, die besonders schwierig zu automatisieren sind.

1. Automat und Automatisierung

Der Begriff *Automat* begegnet uns an vielen Stellen im täglichen Leben. So kennen wir unter anderem *Warenautomaten*, *Fütterungsautomaten*, *Musikautomaten* oder *Drehautomaten*. Bei Betätigung dieser Automaten wird ein bestimmtes Programm ausgeführt.

● *Beschreiben Sie das Programm eines Warenautomaten vom Einwerfen einer Münze bis zur Warenausgabe!*
Welchen Einfluß hat das Futterbedürfnis der Hühner in einer Intensivhaltungsanlage auf den Futterautomaten?

Im Bild 214/1 wird die Entwicklung von der mechanisierten Fertigung zur automatisierten Fertigung gezeigt.
Bei a werden alle Arbeitsgänge vom Bedienungspersonal ausgeführt. Bei b wird der Drehmeißel nach einem Programm selbsttätig bewegt. Der Drehautomat ist eine programm**gesteuerte** Maschine. Über eine geneigte Rollbahn gelangen die Werkstücke zum Prüfautomaten. Der Prüfautomat sortiert die nicht maßgerechten Teile aus. Auch beim Prüfautomaten liegt eine Steuerung vor. Bei c sind der Drehautomat und der Prüfautomat zu einem Maschinenaggregat vereinigt. Es wird fortwährend gemessen und bei auftretenden Abweichungen wird der Drehmeißel so verstellt, daß kein Fehler am Werkstück auftritt. Es handelt sich hier um eine programm**geregelte** Maschine. Der Mensch muß den gesamten Prozeß nur noch überwachen. Der Begriff Automatisierung bezieht

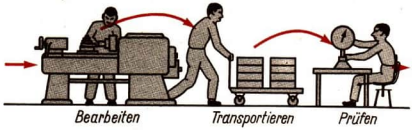
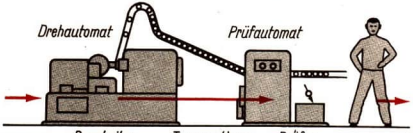
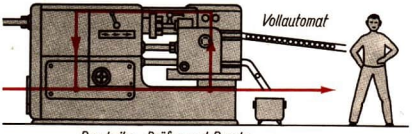


Bild 214/1
Entwicklung von der mechanisierten zur automatisierten Fertigung





Bearbeiten, Prüfen und Regeln

sich nicht nur auf eine einzelne Maschine, sondern auf einen ganzen Fertigungsprozeß, der selbsttätig abläuft und bei dem Abweichungen vom Programm selbsttätig korrigiert werden. Die Steuerungen und Regelungen der Einzelprozesse sind miteinander verknüpft und werden von zentraler Stelle aus überwacht.
Allgemein kann man sagen:

Bei der Automatisierung wird die körperliche Arbeit des Menschen und eine ins einzelne gehende Kontrolle durch den Menschen weitgehend von Maschinen übernommen.

Durch die Automatisierung werden die Tätigkeitsmerkmale des Arbeiters grundlegend verändert. Er erteilt die Befehle, erkennt Fehler in der Automatik und beseitigt ihre Ursachen.
In einer automatischen Fertigungsstraße sind die Maschinen nebeneinander aufgestellt und übernehmen die Arbeit der Menschen. Der Mensch kontrolliert die Anlage.

2. Automatisierung in der chemischen Industrie

Ein entscheidender Grund für die Rentabilität der Automatisierung in der Chemieindustrie ist die Tatsache, daß hier eine Massenproduktion vorliegt, bei der über lange Zeiträume hinweg ein und dieselben Produkte erzeugt werden. Der eingestellte Produktionsablauf wird nicht verändert.
Bei der Durchführung des Chemieprogramms spielt die Automatisierung der chemischen Prozesse eine bedeutende Rolle. Besonders häufig handelt es sich in diesem Industriezweig um Regelungen von Druck, Temperatur, Flüssigkeitsstand und Menge. Dabei werden zusätzlich spezielle Ansprüche an die Geräte gestellt. Sie müssen robust, korrosions- und explosionssicher und säurebeständig sein. Aus der Vielzahl der Steuerungs- und Regelungsaufgaben in der chemischen Industrie sei ein Beispiel herausgegriffen.

Bild 215/1 Regelungen in einer Destillierkolonne
Die zu destillierende Flüssigkeit, die aus zwei Komponenten *a* und *b* bestehen möge, wird bei *I* eingeführt. Im unteren Teil der Kolonne, dem Sumpf, befindet sich eine Heizschlange, die mit Dampf beheizt wird. Eine Temperaturmeßeinrichtung mißt die Sumpftemperatur und verstellt bei Abweichungen vom Sollwert ein Ventil in der Dampfzuleitung. Die Regeleinrichtung ist durch R_1 dargestellt. Da das Sumpfprodukt im Verlaufe des Trennungsprozesses ständig zunimmt, die Zunahme aber nicht gleichmäßig erfolgt, ist auch noch eine Standregelung erforderlich. Die Regeleinrichtung R_2 sorgt dafür, daß der Flüssigkeitsspiegel im Sumpf immer gleich hoch bleibt. Der leicht siedende Bestandteil *b* sammelt sich als Dampf im oberen Teil der Kolonne, im Kopf. Der Dampf kondensiert wieder im Kühler *K* und wird bei *III* als leicht siedendes Produkt *b* entnommen. Um größere Reinheit dieses Produktes zu erhalten, wird ein Teil davon durch die Pumpe *P* dauernd wieder zum Kopf zurückgepumpt. Dabei regelt R_3 die Temperatur des Kopfproduktes

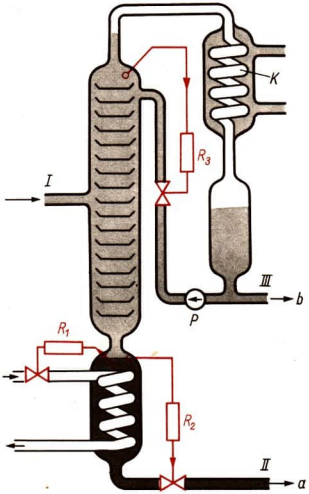
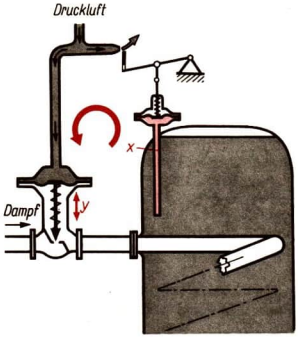


Bild 215/2 Pneumatische Temperaturregelung des Sumpfproduktes aus 215/1
Als Meßeinrichtung dient ein Flüssigkeitsfederthermometer. Dabei ist der bei Wärmeausdehnung der Flüssigkeit auftretende Flüssigkeitsdruck ein Maß für die Temperatur. Der Flüssigkeitsdruck wird von einer Membrane gemessen. Die Verformung der Membrane wird auf einen Hebel übertragen, der an einem Ende eine Prallplatte trägt. Stellglied ist ein Membranventil. Da die Energie des Meßwerkes nicht zur Betätigung des Ventils ausreicht, wird Hilfsenergie benötigt, die in der Druckluft zugeführt wird. Die Leitung, durch die die Druckluft mit konstantem Druck zum Stellglied strömt, ist an einer Stelle durch eine Düse geöffnet. Vor dieser Düse befindet sich die Prallplatte, die durch das Meßwerk bewegt wird



Das Destillieren ist ein sehr häufig anzutreffender Arbeitsvorgang. Dabei sind meist zwei oder mehrere Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Siedepunkten voneinander zu trennen. Diese Aufgabe wird in sogenannten Destillierkolonnen gelöst (Bild 215/1).
Bei Flüssigkeiten mit mehreren Bestandteilen (Erdöl) gewährleisten eine Vielzahl von Regelungen eine einwandfreie Trennung der Bestandteile. Der Aufwand lohnt sich aber, da die Produktivität der Anlage durch Einhaltung der optimalen Produktionsbedingungen erhöht wird, da die Stoffe dabei restlos ausgenutzt werden und eine gleichbleibende Qualität der Erzeugnisse gewährleistet ist.
Zum Verstellen wird häufig *Hilfsenergie* benötigt. Dazu kann man elektrische Energie, hydraulische Energie (Drucköl) oder pneumatische Energie (Druckluft) verwenden.

3. Automatisierung in der Energiewirtschaft

Dieser wichtige Zweig der Industrie befaßt sich mit der Ausnutzung der Energiequellen und mit der Energieversorgung. So unterschiedlich wie die Energiequellen sind, so unterschiedlich sind auch die Aufgaben der Automatisierung der dort auftretenden Prozesse. Von großer Bedeutung sind die Wärmekraftwerke und damit die Dampfturbinen. Zu jeder Dampfturbine gehört aber ein Dampferzeuger.

Bild 216/1 Kesselanlage mit Regelungen

Die Dampfentnahme wirkt als Störung. Bei erhöhter Dampfentnahme muß mehr Brennstoff zugeführt werden. Der Regler R_1 verstellt die Brennstoffmenge in Abhängigkeit von der Belastung, der Dampfentnahme. Der Regler R_2 muß den Luftstrom so regeln, daß immer das richtige Mengenverhältnis Luft – Brennstoff vorhanden ist. Dazu wird die durchströmende Luftmenge gemessen und bei Abweichungen vom Sollwert wird die Drosselklappe verstellt. Diesmal ist der Sollwert aber nicht wie bei den vorher besprochenen Beispielen konstant, sondern er verändert sich in Abhängigkeit von der entnommenen Dampfmenge. Außerdem hat eine Belastungsänderung auch eine Änderung des Speisewasserstandes zur Folge. Der Regler R_3 hält die Höhe des Wasserstandes konstant, er greift in die Speisewasserzuleitung ein. Am Kesselausgang hält der Regler R_4 den Druck des Dampfes konstant.

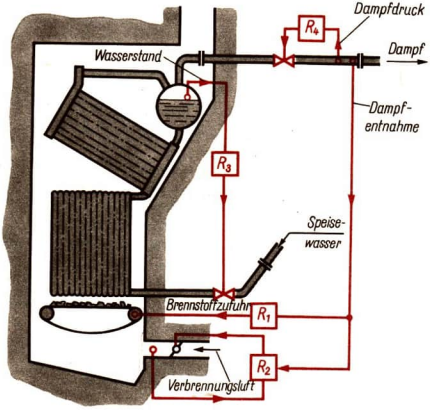
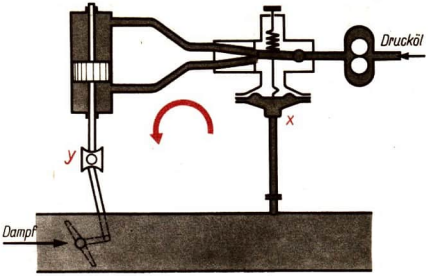


Bild 217/1 Hydraulische Druckregelung. Durch das entsprechend dem Dampfdruck verstellbare Strahlrohr wirkt das zugeführte Drucköl auf einen Arbeitskolben. Dadurch wird die Drosselklappe betätigt



Der gelieferte Dampf muß stets einen bestimmten Druck und eine bestimmte Temperatur haben, denn vom Dampfdruck und der Dampftemperatur ist der Energieinhalt des Dampfes und damit die Wirtschaftlichkeit der Energieumsetzung in den Turbinen abhängig. Die entnommene Dampfmenge ist zu verschiedenen Zeiten sehr unterschiedlich (Bild 217/1).

4. Bedeutung der Automatisierung

Aus den bisher behandelten Beispielen konnte man bereits ersehen, daß durch die Automatisierung der Mensch von körperlicher, monotoner geistiger und gesundheitsschädigender Arbeit befreit werden kann. Automatisierte Anlagen arbeiten gleichmäßiger, genauer und schneller als der Mensch. Ein Automat ermüdet nicht.
Die Automatisierung ist ein wesentliches Mittel zur Steigerung der Arbeitsproduktivität.

● *Was versteht man unter dem Begriff Arbeitsproduktivität?*

Am Beispiel einer Taktstraße für die automatische Montage von Kugellagern im VEB Wälzlagerwerk Fraureuth läßt sich dies leicht zeigen.
Für die Montage von Hand wurden 8 Arbeitskräfte benötigt, um 5500 Lager je Schicht (also in 8 Stunden) zu montieren. Der Automat schafft in der gleichen Zeit mit 2½ Arbeitskräften 8400 Lager. Daraus ergibt sich eine Steigerung der Arbeitsproduktivität um 489%.
Inwieweit sich der hohe Nutzeffekt der Automatisierung zum Vorteil der Werktätigen auswirkt, hängt von den gesellschaftlichen Verhältnissen ab.
Manchmal hört man die Auffassung, daß die Automatisierung den Menschen erst zum eigentlichen Beherrscher der Maschinen macht. Das ist natürlich nicht richtig. Seit langem baut der Mensch auf Grund der Kenntnisse von Naturgesetzen Maschinen, mit denen er die Natur beherrscht und sie zur Befriedigung seiner Bedürfnisse umgestaltet. Die Anwendung von Maschinen ermöglichte ihm unter anderem, noch unbekannte Naturgesetze zu entdecken, die wieder zur Verbesserung der Maschinen beitrugen oder

auf deren Basis neue Maschinen geschaffen werden konnten. Die Maschinen waren immer vom Menschen geschaffene Mittel zur Beherrschung der Natur und werden es immer sein.

Ein anderer Gesichtspunkt ergibt sich, wenn man vom Menschen als gesellschaftlichem Wesen ausgeht. Unter den Verhältnissen der Klassengesellschaft konnte bei den Menschen die irrige Auffassung entstehen, daß die Ursache der elenden Zustände und der Unterdrückung die Maschinen seien. Das zeigt sich in den Maschinenstürmereien vor 150 Jahren und in der Angst vor dem „Dämon Technik" heute. Seit Marx erkannt hat, daß nicht die Maschinen, sondern die Besitzverhältnisse Ursache der Übel sind, welche die Technisierung unter solchen Verhältnissen mit sich bringt, daß die Überführung der Produktionsmittel in Gemeineigentum der einzige Weg ist, die gesellschaftliche Entwicklung bewußt gestalten zu können, und seit die sozialistischen Länder erfolgreich diesen Weg beschreiten, braucht es diese Angst nicht mehr zu geben. Die Automatisierung macht den Übergang zu sozialistischen Produktionsverhältnissen in den kapitalistischen Staaten immer notwendiger, wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen. Unter den kapitalistischen Produktionsverhältnissen führt die Automatisierung zu noch größerer Anhäufung von Reichtum in den Händen der Kapitalisten und andererseits zu noch größerer Ausbeutung der Werktätigen.

Die schwerwiegendste Auswirkung auf die Arbeiterklasse ist dabei der Anstieg der Arbeitslosigkeit. Im Bereich der hochautomatisierten amerikanischen Automobilindustrie gibt es rund 200 000 Arbeitslose. Das sind 20% aller in diesem Industriezweig Beschäftigten. Infolge der Einführung automatischer Rangiereinrichtungen bei den Eisenbahnen der USA wurden im Verlaufe eines Jahres 237 000 Eisenbahner entlassen.

Unter sozialistischen Produktionsverhältnissen dient die Automatisierung den Interessen der Arbeiterklasse. Die Automatisierung befreit den Arbeiter von schwerer physischer, gesundheitsschädigender und monotoner Tätigkeit. Die Arbeitszeit verkürzt sich, den frei werdenden Arbeitskräften wird durch ihren Staat eine neue Arbeit zugesichert. Insbesondere haben die Arbeiter die Möglichkeit, sich mit Unterstützung des sozialistischen Staates zu qualifizieren, denn besseres Fachwissen ist eine Forderung, die die Automatisierung an alle stellt.

ZUSAMMENFASSUNG

Bei automatisierten Arbeitsprozessen wird der Mensch nicht nur wie bei mechanisierten Prozessen weitgehend von schwerer körperlicher Arbeit befreit, sondern es wird ihm auch die sich ständig wiederholende geistige Tätigkeit abgenommen.

Welche Möglichkeiten ergeben sich durch die Automatisierung für die Werktätigen?

Jede automatisierte Anlage enthält Steuerungen oder Regelungen oder eine Verknüpfung von beiden.

Liegt beim sogenannten Sicherungsautomaten eine Steuerung oder eine Regelung vor?

Voraussetzung für jede Automatisierung ist die Meßbarkeit und Verstellbarkeit der entsprechenden Aufgabenwerte.

Kennen Sie Aufgabenwerte, für die es zur Zeit noch keine ausreichenden Meßverfahren gibt?

Lösungen

Elektrizitätslehre

S. 13/5.1. $50 \cdot 2 = 100$ Lichtblitze
S. 13/5.2. $n = 1500\ \text{min}^{-1}$ bzw. $3000\ \text{min}^{-1}$ usw.

Mechanische Schwingungen und Wellen

S. 48/3. $T = 0{,}00227$ s
S. 51/3. Die Elongation ist zu den angegebenen Zeitpunkten stets Null.
S. 57/4. Nein! Mitschwingen tritt nur bei gleicher Eigenfrequenz ein.
S. 61/4. Es fehlt die Kopplung (vgl. „Wellenmaschine")
S. 66/2. $\lambda = 1{,}7$ cm 3. $f \approx 442$ Hz 4. $\lambda = 375$ km
S. 74/1. $s = 29$ m
S. 74/5. $\lambda_1 \approx 1{,}77$ cm, $\lambda_2 \approx 1{,}54$ cm
S. 74/7. $n \approx 1{,}32$

Hertzsche Wellen

S. 99/3.1. $\lambda = 1622$ m
S. 99/3.2. $\lambda = 1{,}65$ m
S. 99/4.1. $f = 602$ kHz
S. 99/4.2. $f = 175{,}5$ MHz
S. 99/5. $l \approx 0{,}76$ m
S. 99/6. $f \approx 185$ MHz
S. 103/5.1. LW 5.2 UKW 5.3. MW 5.4 UKW
S. 113/9. Zeilenzahl = 625; Bildwechselfrequenz = 25 s^{-1}; Zeilenfrequenz = 15 625 s^{-1}

Lichtwellen

S. 120/1. Die Höhe des Gegenstandes beträgt 15 cm
S. 120/2. a) $t_{\text{Mond—Erde}} = 1{,}28$ s
b) $t_{\text{Sonne—Erde}} = 8$ min 20 s
S. 120/3. Ein Lichtjahr beträgt rund $9{,}5 \cdot 10^{12}$ km
S. 120/4.1. Ein Lichtstrahl könnte die Erde in einer Sekunde rund $7^1/_2$mal umkreisen.
S. 120/4.2. Praktisch ist dies nicht möglich, da sich das Licht geradlinig ausbreitet.
S. 125/2. $s' = 120$ mm
S. 131/3. Die Parallelverschiebung beträgt rund 3 cm

S. 131/4. Die Grenzwinkel der Totalreflexion betragen:
$\alpha_{Kronglas} = 41{,}1°$
$\alpha_{Diamant} = 24{,}4°$ Vergleichen Sie auch S. 130, Tabelle 9!

S. 138/1. Das Bild ist aufrecht, vergrößert und virtuell. Es erscheint im gegenstandsseitigen Brennpunkt und ist doppelt so groß wie der Gegenstand.

S. 138/2. $y' = 15$ mm
$f = 26{,}7$ mm

S. 138/3. Bei einer Gegenstandsweite $s = 8{,}2$ cm ergibt sich ein Projektionsbild von 87,8 cm · 131,7 cm.

S. 155/2. Es tritt nur eine Parallelverschiebung des Lichtes auf; die Spektralfarben vereinigen sich wieder zu Weiß.

S. 155/3. Beim Prisma kommt es zur Farbzerlegung des Lichtes, weil die verschiedenfarbigen Strahlen das Prisma als divergente Bündel verlassen und sich dadurch nicht wieder mischen.

Grundlagen der Automatisierung

S. 212/3. Kursregelung

S. 212/5. Flüssigkeitsstandregelung

Achse, optische 122, 133
Additive Farbmischung 153
Amplitude 49, 64, 83, 88
Anode 16
Anodenstrom 19, 23, 87
ARDENNE, MANFRED von 110
ASTON 171
Atomaufbau 165
– begriff 160
– hypothese 161
– modell 160, 162
Audion 109
Ausbreitungsgeschwindigkeit 65
Austrittsarbeit 16, 41
Automatisierung 195, 213

BECQUERELL 161
Beugung 73, 74, 139
Bildaufnahmeröhre 111
Bild, reelles 124, 125, 134
–, virtuelles 122, 125, 134
Bindungsenergie 180
Bodenwelle 102, 104
Bogenentladung 12
BOHR 164
Brechungsgesetz 73, 128
– verhältnis 73, 128
– winkel 72, 127
– zahl 73, 128
Brennpunkt 123, 133
– strahl 133
– weite 124, 125, 134
BUNSEN 151

CHADWICK 169
CURIE 161, 173

Dämpfung 51, 52
Dämpfung elektromagnetischer Schwingungen und Wellen 83, 84, 85, 98
Demodulation 108
Dichte, optische 120, 127
Diode 16, 18
Dipolfeld 97
Dipol, gestreckter (offener) 99
Dispersion 146 ff.

Eigenfrequenz 55
– von Schwingkreisen 83, 84, 85, 86, 87, 89, 93, 94, 95, 108
Eigenleitung 34
Eigenschwingung 54
Einfallslot 69, 121, 127
– winkel 70, 121, 127
EINSTEIN 181
– sche Gleichung 180
Elektron 6, 7, 9, 13, 15, 16, 32
Elektronenemission 15, 18
Elektronenröhre 15, 16
Elongation 47
Empfänger 92, 108, 109
Empfangsdipol 98
Endicon 111
Energie des elektrischen Feldes 80, 83
– magnetischen Feldes 81, 83
– elektromagn. Feldes 98
– umwandlungen bei Schwingungen 47
Energieumwandlungen im Schwingkreis 83
Entdämpfung 86, 87
Erregerfrequenz 54, 86
– quelle 86

Fadenpendel 50
FARADAY 91
Farbfilter 151
– mischung 153
FEDDERSEN 91
Federschwinger 47, 85
Feld, elektrisches 6, 8, 16, 80, 81, 82, 93
–, magnetisches 80, 81, 82, 93
–, elektromagnetisches 97, 98
FERMI 181
Fernrohr, astronomisches 136
Fernsehen 110
FIZEAU 119
Fotoemission 28
Fotozelle 29, 30
FOUCAULT 154
FRAUNHOFER 151, 152
Fraunhofersche Linien 151, 152
Frequenz 48, 49, 63, 65, 83
Frequenzbereiche 85
Frequenz elektromagnetischer Schwingungen 83, 88, 89, 158
Frequenzmessung 56
FRESNEL 154
Funkmeßverfahren 117

GASSENDI 161
Gegenstandsgröße 125, 134
Gegenstandsweite 125, 134
Geiger-Müller-Zählrohr 176
Gitter 21
–, optisches 141
– spule 87
Gleichrichter 20, 35
Glühemission 15
Grenzfall, aperiodischer 52

Grundfarben 147
Grundgleichung der Wellenlehre 65, 94, 96

Halbleiter 33, 34
Halbwertzeit 175
Hallwachseffekt 28
Hauptebene 133, 135
Hauptfarben 147
HEISENBERG 170
HERTZ, Heinrich 48, 92, 155
Hertzsche Wellen 91, 98
Hochfrequenz 85, 105
– erwärmung 89, 90
– generator 89
Höchstfrequenz 85
– generator 95
Hohlspiegel, sphärischer 122
HUYGENS 68, 69, 154
Huygenssches Prinzip 67

Ikonoskop 111
Induktivität 81, 83, 84, 95
Industrielles Fernsehen 115
Interferenz 75, 139
Ionisation 7, 9, 10
Ionosphäre 103
Isotope 170
Istwert 207
IWANENKO 170

JOLIOT-CURIE 169, 194

Katode 16
Katodenstrahlen 13, 14
Katodenstrahlröhre 25
Kapazität 81, 83, 84, 94, 95
Kerndurchmesser 163
– fusion 183
– kräfte 180
– ladungszahl 166
– spaltung 181
Kettenreaktion 186
KIRCHHOFF 151
Komplementärfarben 148
Kondensator 80, 82, 83, 84, 90, 93
Kopplung 58, 59
Kopplung von Schwingkreisen 88, 89

Ladungsträger 6
LAUE 161
LAWRENCE 178
LEBEDEW 158
Leitung in Gasen 7, 8, 9
– in Halbleitern 33
– in Metallen 32
–, selbständige 8, 9
–, unselbständige 6, 7
– im Vakuum 15, 16
Lichtbogen 12
Lichtgeschwindigkeit 119
Linsen, Abbildungsgleichung für 135
LOMONOSSOW 161
LOSCHMIDT 161
Lupe 136

MARCONI 92
Massendefekt 180
MAXWELL 91, 92, 155
Medium, optisches 120, 130
– der Welle 60
MEISSNER 87
Meißnergenerator 87
Meßeinrichtung 198, 206
Mikroskop 136
Mischfarben 148, 153
Mittelpunktsstrahl 123, 133
Modulation 105, 106

Nachrichtenübermittlung 92, 105, 116
Nebelkammer 167
Neutron 169
NEWTON 146, 154
NIPKOW 110
Nukleonen 170

Objektiv 132, 136
Okular 136
Ordnungszahl 166
Oszillator 60

Parabolspiegel 123
Parallelstrahlen 123, 133
Pendel 46
Pendelkette 59
Periode 49
Phase 49
Polarisation 142, 143
POPOW 92
Positron 177
Prisma, optisches 129, 146
Prismenfernrohr 137
Proton 167

Radar 117
Radioaktivität 173
Raumladung 19
– welle 103, 104
Regeleinrichtung 210
– größe 207
– kreis 209, 212
Reflexion 76, 101, 102, 121 ff.
Reflexionsgesetz 70, 121
Resonanz 55, 86, 89, 93, 95, 108
Richtfunk 116
Röhrengenerator 87, 88, 90
RÖMER 119
RÖNTGEN 156
Röntgenstrahlen 156 ff.
RUTHERFORD 162
Rückkopplung 88

Sammellinse 132 ff.
Sandpendel 49
Schwingung 47
Schwingungen, elektromagnetische 82
–, Anwendung 88, 89
–, freie 84, 86
–, gedämpfte 51, 82, 83, 85
–, hochfrequente 85
–, mechanische 83, 85
–, ultrahochfrequente 85, 95
–, ungedämpfte 51, 86, 87
Schwingungsdauer 49, 83
Schwingungsgleichung 84
Schwingkreis 81 bis 96, 108
Schwund 104
Selbstinduktion 81, 82
selbsttätige Regelung 206

selbsttätige Steuerung 196
Sendedipol 98
Sender 92, 107
SNELL VAN ROYEN (SNELLIUS) 128
SODDY 175
Sollwert 207
Spektralanalyse 151
Spektrum 142 ff.
Spiegel 121 ff.
Spule 79 bis 83, 85, 89, 93, 95
Steilheit der Triode 23
Stellglied 198, 206
Stellgröße 200, 207
stetiger Regler 210
Steuereinrichtung 202
– größe 200
– kette 201
– strecke 202
Steuerung 195, 198, 204
Störgröße 200, 207
Störstellenleitung 35
Stoßionisation 9
Strahlen 162
Strahlenschutz 187
Strom, elektrischer 6
Stromrichtung 17
Stromverstärkungsfaktor 39
Stromwärme 32
Synchronisation 112

Thermoelektrizität 41, 42
Thermoelement 42
Thermonukleare Reaktion 183
Tonfrequenz 87, 105, 106, 108, 109
– generator 106
Totalreflexion, Grenzwinkel der 130
Trägerfrequenz 105, 108
Transistor 33
Transurane 181
Trennmethoden 172
Triode 20

Ultraschall 74, 75, 78
– geber 89
– generator 89
Verkehrsfunk 114
Verstärker 23, 24, 40, 107, 113

Wechselfeld 81, 82, 93, 94, 97
Wechselstrom 86, 88, 94, 96
Welle 59
–, Elementar- 68
–, Longitudinal- 60
–, resultierende 77
–, stehende 77
–, Transversal- 60
Wellenbereiche 94, 104
– front 68
Wellenlänge 65
– der Hertzschen Wellen 94, 95
Wellenlänge des Lichtes 141
Wellennormale 63, 69, 119
Wirkungsweg 197

YOUNG 139, 154

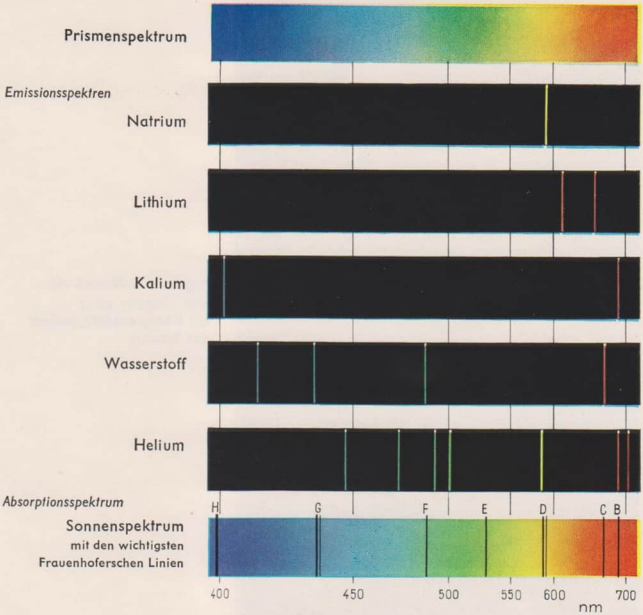
Zählrohr 176
Zonenschmelzen 90
Zweipunkt-Regler 210
Zyklotron 178

Quellennachweis der Bilder

Die Zeichnungen wurden nach Vorlagen angefertigt von Heinz Grothmann, Berlin.
Titelfoto: VWV Archiv · Bischoff, H., Weimar: 160 · Blunck, H., Berlin: 75/1 · Brieger, H., Halle: 114/4 · Foto-Brüggemann, Leipzig: 196, 203/3 · Bunschuh, W., Berlin: 36, 118, 132 · Charité Berlin: 192/2 · Demme, Berlin: 80 · Deutscher Militärverlag Berlin: 93, 116/2 · Deutsche Staatsbibliothek Berlin: 68/2 · Giebel, E., Halle: 86, 117/1 · Golm, W., Berlin: 124/1 · Jobst, Jena: 139 · Krüger, H., Berlin: 192/1 · Photo Kino-Krütgen, Halle: 42, 53/1, 65/1, 136/1 · Meyer, B., Berlin: 201/1 · Mörner, K., Berlin: 211/1 · Müller, R., Berlin: 76/1 · Nerlich, C., Berlin: 159 · von Nyssen, W., Markkleeberg: 143/1 Schiffbau-Versuchsanstalt Berlin: 45 · Schmidt, K. R., Berlin: 58, 121, 211/3 · Schulze, H. E., Berlin: 117/2 · Seidel, R., Karl-Marx-Stadt: 146, Farbfoto · VEB Carl Zeiss Jena: 79, 137/1, 137/3 · VEB Dieselmotorenwerk Rostock: 193/3 · VEB Funkwerk Erfurt: 6, 75/2 · VEB Funkwerk Köpenick: 90, 101, 107/4 · VEB Werk für Fernsehelektronik Berlin: 111/1, 115/1 VWV/Archiv: 26/1, 76/2, 91/2, 95/1, 107/3, 152/1, 161/1, 168/3, 192/4, 205 · VWV/Seifert, M.: 10/1, 11/1, 11/2, 32, 43/2, 46, 53/3, 54, 114/1, 114/3, 191, 203/1, 203/2, 211/2 · Werner, H., Dresden: 192/3 · Zentralbild: 11/3, 15, 43/1, 67, 79, 91/1, 91/3, 114/2, 115/2, 116/3, 117/3, 126/2, 136/3, 137/1, 156, 164/2, 167, 173, 177/1, 179/1, 179/2, 182/1, 185, 188/1, 189/1, 193, 195, 211/3, 213 · Zimmer, Leipzig: 105.
Reproduktionen aus: Aerosport, Berlin: 117/3, 127 · Isotope in Forschung und Produktion, VEB Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig: 193/2 · Jugend und Technik, Berlin: 53/2 · Lehrbuch der Physik, BG. Teubner, Leipzig: 145/1 · Verlag Technik, Berlin: 5, 28/1

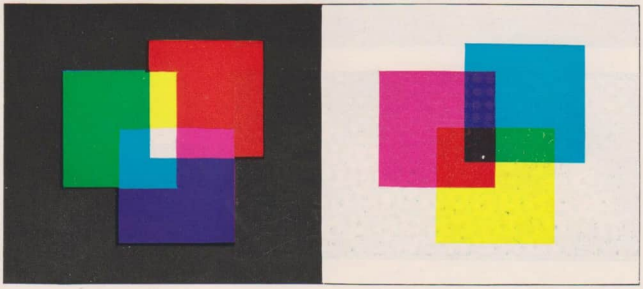
Bei Empfang und Abgabe des Lehrbuches vom Schüler auszufüllen

Lfd. Nr.	Name	Schuljahr	Zustand des Buches	
			bei Empfang	bei Abgabe
1		19— / —	neu	
2		19— / —		
3		19— / —		
4		19— / —		

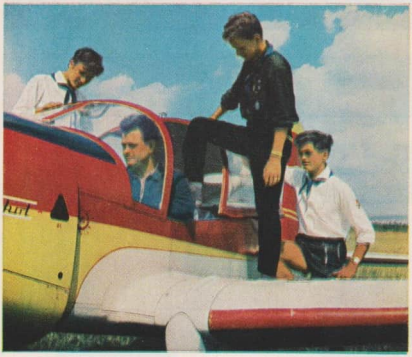


Additive Farbmischung

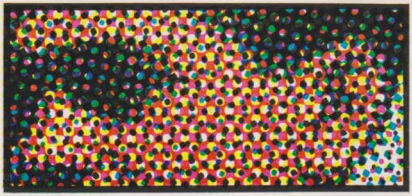
Subtraktive Farbmischung



Negativ einer Farbaufnahme
Das Negativ zeigt die Komplementärfarben des Positivs



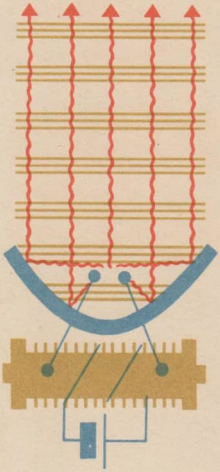
Positiv einer Farbaufnahme
Pionier-Arbeitsgemeinschaft „Junge Flieger"



Farbdruck
Der vergrößerte Bildausschnitt zeigt die Farbpunkte, die durch additive Mischung im Auge den Farbeindruck hervorrufen

1887

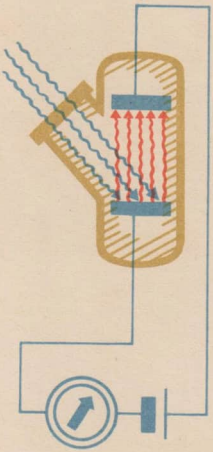
Energietransport durch elektromagnetisches Feld



Heinrich Hertz
1857 bis 1894

1888

Lichtelektrischer Effekt



Wilhelm Hallwachs
1859 bis 1922

1899

Lichtmechanischer Effekt

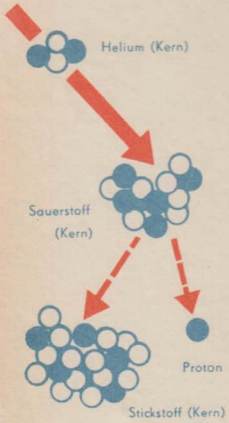
Petr N. Lebedew
1866 bis 1912

1919

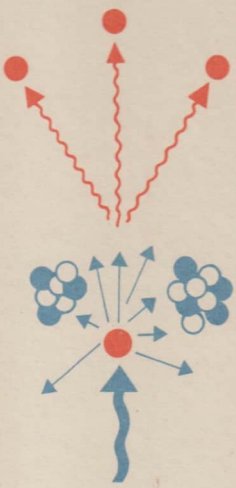
1939

1942

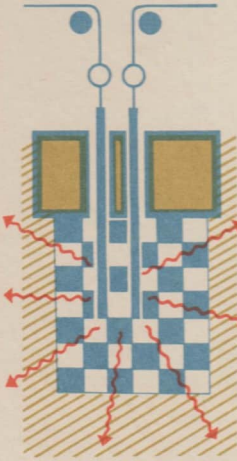
Kernbeschuß



Kernspaltung



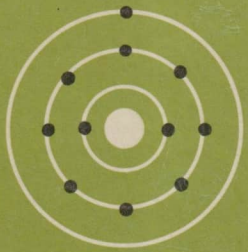
Kernenergie



Ernest Rutherford
1871 bis 1931

Otto Hahn
geb. 1879

Enrico Fermi
1901 bis 1954



02 10 01-3
2,85