

Elektrizität und Funkentelegraphie für Seefahrer

von

Dr. Peter Kaltenbach und **Dr. Heinrich Meldau**
Seefahrtsschule Hamburg Seefahrtsschule Bremen



Erweiterter Sonderabdruck aus „Physik für Seefahrer“

Mit 179 Abbildungen

Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., Braunschweig 1931

ISBN 978-3-322-98145-5 ISBN 978-3-322-98810-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-322-98810-2

Alle Rechte vorbehalten

Druck von Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., Braunschweig

Vorwort.

In dem Teile „Elektrizität und Funkentelegraphie“ unseres Anfang 1930 in 6. Auflage erschienenen Lehrbuches „Physik für Seefahrer“, den der Verlag auf unsere Anregung erneut als Sonderdruck herausgab, wurde gegenüber der 5. Auflage die allgemeine Elektrizitätslehre vielfach didaktisch verbessert und weiter ausgestaltet, zumal in dem immer wichtiger werdenden Gebiet der Wechselströme. Vor allem wurde der Abschnitt „Funkentelegraphie“ durch Dr. Kaltenbach als Spezialisten auf diesem Gebiet mit Rücksicht auf die Fortschritte der Technik völlig umgearbeitet und vielfach ergänzt, so daß der Abschnitt fast um die Hälfte seines bisherigen Umfanges erweitert ist.

Die Notwendigkeit dazu ergab sich schon aus der Erhöhung der Anforderungen in der Prüfung zum Bordfunker II. Klasse.

Der Anklang, den der Sonderdruck fand, macht jetzt, Mitte 1931, einen Neudruck notwendig. Mehrfach geäußerten Wünschen nachkommend, haben wir die Grundtatsachen des Magnetismus, soweit sie zum Verständnis der Elektrizitätslehre nötig sind, in einem einleitenden Abschnitt vorangestellt. In der Funkentelegraphie sind, den Forderungen der Praxis entsprechend, neu behandelt der Telefunken-Dreikreis-Empfänger, das Auto-Alarmgerät und die modulierten Sender von Telefunken. Einige Druckfehler der 1. Auflage dieses Sonderdruckes sind berichtigt worden.

Hamburg und Bremen, im Juni 1931.

Dr. Kaltenbach. Dr. Meldau.

Grundgesetze des Magnetismus.

Magnete.

Als **Magnete** bezeichnet man Eisenkörper, welche die Eigenschaft haben, andere Eisenstücke anzuziehen. Die ihnen eigentümliche besondere Eigenschaft nennt man **Magnetismus**. Auch einige andere Metalle, z. B. Nickel, zeigen magnetische Erscheinungen, doch in geringerem Grade als das Eisen. Magnetismus ist zuerst am Magneteisenstein, einem in der Natur vorkommenden Eisenerz, beobachtet worden. Man lernte die

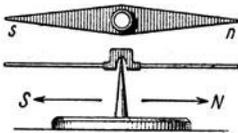


Abb. 278. Magnetnadel.

Eigenschaft des Magnetismus von solchen natürlichen Magneten durch geeignetes Bestreichen auf Stahlstäbe zu übertragen, die dadurch zu künstlichen Magneten wurden. Je nach der Gestalt unterscheidet man Hufeisenmagnete, Stabmagnete und Magnetnadeln (Abb. 278). Letztere sind oft in ihrer Mitte mit einem Hütchen zum Aufsetzen auf eine Spitze versehen. Eine solche horizontal frei bewegliche Magnetnadel soll als Kompaßnadel bezeichnet werden.

Pole eines Magnets (Abb. 279). Legt man einen gut magnetisierten Magnetstab in Eisenfeilspäne und zieht ihn wieder heraus, so haften die Späne in der Mitte gar nicht, während sie an den beiden Enden in dichten Büscheln starren. Man kann die in Wirklichkeit von allen Teilen des Magnets ausgehenden Kräfte als von zwei Anziehungsmittelpunkten ausgehend denken, die als die Pole des Magnets bezeichnet werden.

|| Unter den Polen eines Magnets versteht man Punkte, von denen man sich die Wirkung des Magnets ausgehend denken kann.



Abb. 279. Pole eines Magnets.

Ein gut magnetisierter Magnet besitzt zwei Pole von gleicher Stärke, die im Innern der Masse, und zwar etwa $\frac{1}{12}$ der Länge des Stabes von den Enden entfernt liegen. Wenn ein Stahlstab schlecht magnetisiert ist, oder wenn ein Magnet mit anderen Magneten in regelloser Lage zu-

sammengelegen hat, so können beliebig viele mehr oder weniger starke Pole an beliebigen Stellen des Stabes vorhanden sein.

Die Pole eines Magnetstabes sind ungleichartig. Hängt man einen Magnet frei beweglich auf, so stellt er sich annähernd in die Nord-süd-richtung ein, und zwar wendet sich stets ein bestimmtes Ende nach Norden (Nordpol), das andere Ende nach Süden (Südpol). Das Nordende wird durch rote Farbe, und das Südende durch blaue Farbe kenntlich gemacht.

|| Als **magnetische Achse** eines Magnetstabes bezeichnet man die gerade Verbindungslinie seiner Pole.

Bei gut magnetisierten Magnet-Stäben oder -Nadeln fällt die magnetische Achse mit der geometrischen Achse oder Mittellinie des Stabes oder der Nadel zusammen.

Magnetisches Grundgesetz:

|| Gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige Pole ziehen einander an.

Die magnetischen Kräfte wirken ungehindert durch zwischenliegende Stoffe; nur zwischengestelltes Eisen verändert die Wirkung.

Stricknadelversuch. Zerbricht man einen Magnet, z. B. eine magnetisierte Stricknadel, so erhält man wieder zwei vollständige Magnete. Während die alten Pole je an dem Ende des Stabes verbleiben, an dem sie lagen, treten an dem anderen Ende gleich starke entgegengesetzte Pole auf. Niemals gelingt es, ein Eisenstück mit einem einzelnen Pol herzustellen.

Größe der magnetischen Fernwirkung.

Polstärke. Obwohl vereinzelte Magnetpole nie vorkommen, kann man sich doch solche Pole denken. Ein Pol kann eine mehr oder weniger große Polstärke haben.

|| Die Einheit der Polstärke besitzt (im CGS-System) ein Pol, der einen ihm gleichen Pol in der Entfernung 1 cm mit der Kraft 1 Dyn abstößt. 1 Dyn ist gleich dem Gewicht von $\frac{1}{981}$ Gramm.

Annähernd kann man das Verhalten vereinzelter Magnetpole dadurch untersuchen, daß man mit recht langen Magnetenadeln arbeitet und die Untersuchung auf die Umgebung eines der beiden Pole beschränkt. Dabei ergibt sich das

|| **Coulombsche Gesetz:** Zwei Pole von den Polstärken m_1 und m_2 , die sich in der Entfernung r voneinander befinden, üben eine Kraft von der Größe $\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ aufeinander aus; diese ist abstoßend, wenn die Pole gleichnamig, anziehend, wenn sie ungleichnamig sind.

Fernwirkung eines Magnetstabes, magnetisches Moment. Ein (gut magnetisierter) Magnetstab hat stets einen Nord- und einen gleich starken Südpol. Beide üben ihre Fernwirkung nach dem Coulombschen Gesetz aus. Befänden sich die Pole an derselben Stelle des Raumes, so würden sich diese Fernwirkungen gerade gegenseitig aufheben. Je weiter die Pole voneinander entfernt sind, um so größer ist die übrigbleibende Fernwirkung. Diese hängt daher außer von der Polstärke vom Abstand der beiden Pole ab.

Als magnetisches Moment (M) eines Magnetstabes bezeichnet man das Produkt seiner Polstärke (m) und des Abstandes (l) der beiden Pole: $M = m \cdot l$.

Magnetische Induktion.

Grundversuch. Nähert man dem einen Ende eines unmagnetischen Stabes von weichem Eisen den Nordpol N eines Magnets, so zieht das andere Ende Eisenfeilspäne an (Abb. 280). Das Stäbchen ist also durch die bloße Annäherung des Magnetpols magnetisch geworden, und zwar erweist sich das dem Pol N zugewandte Ende als süd-, das abgewandte Ende als nordmagnetisch. Bei Entfernung des Magnetpols verschwindet der Magnetismus des Stäbchens wieder. Entsprechendes findet statt bei Annäherung eines Südpols.

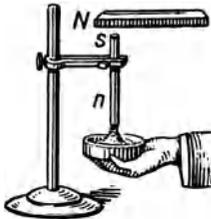


Abb. 280.

I. Induktionsversuch.

Als magnetische Verteilung oder Induktion bezeichnet man die Erscheinung, daß Eisen magnetisch wird, sobald es in den Wirkungsbereich eines Magnets kommt.

Bei der magnetischen Induktion wird stets dem induzierenden Pol gegenüber ein ungleichnamiger Pol hervorgerufen.

Weiches Eisen – Stahl, Koerzitivkraft. Ein durch Induktion magnetisiertes Stück Eisen kann wieder induzierend auf ein anderes wirken. In Abb. 281 ist dargestellt, wie eine Reihe von Eisenstäbchen unter den Pol eines Magnets gehängt ist. Macht man diesen Versuch einerseits mit Stäbchen aus weichem Eisen, andererseits mit ebensolchen Stäbchen von gehärtetem Stahl, so findet man, daß von letzteren viel weniger untereinandergehängt werden können:



Abb. 281. II. Induktionsversuch.

Weiches Eisen wird durch Induktion leicht und stark magnetisch, es verliert den Magnetismus aber sofort wieder, wenn es aus dem Wirkungs-

bereich des induzierenden Magnets gebracht wird. Magnetismus, der sofort nach dem Aufhören der Induktion wieder verschwindet, nennt man flüchtigen Magnetismus. Hartes Eisen, insbesondere gehärteter Stahl, nimmt bei derselben induzierenden Kraft weniger Magnetismus auf, hat aber die Fähigkeit, den aufgenommenen Magnetismus zum großen Teil dauernd festzuhalten (fester oder permanenter Magnetismus).

Die Fähigkeit des Eisens, Magnetismus dauernd zu behalten, wird als seine Koerzitivkraft bezeichnet. Zwischen ganz weichem Schmiedeeisen und gehärtetem Stahl kommen in der Praxis hinsichtlich der Härte und der Koerzitivkraft alle möglichen Zwischenstufen vor. Für die Herstellung permanenter Magnete verwendet man Stahlsorten mit hoher Koerzitivkraft (Wolframstahl).

Die Magnetisierung läßt sich nicht über eine gewisse Grenze, den Zustand der Sättigung, hinaus steigern. Je härter der Stahl ist, um so kräftiger muß die Induktion sein, die ihn bis zur Sättigung magnetisiert.

Zur **Aufbewahrung** legt man Magnetstäbe von gleicher Länge am besten paarweise mit entgegengesetzten Polen zusammen. Vor die Pole eines Hufeisenmagnets wird ein Anker, d. h. ein Stück weiches Eisen gelegt.

Hypothese über den Aufbau eines Magnets.

Molekularmagnete. Man stellt sich vor, daß die Moleküle des Eisens selbst kleine Magnete sind. In unmagnetischem Eisen liegen diese Molekularmagnete regellos durcheinander, so daß für ihre magnetischen Achsen keine Richtung überwiegt. In weichem Eisen sind die Molekularmagnete leicht beweglich, im Stahl aber sind sie schwer beweglich.

Vorgang der Induktion. Wird ein Magnetpol in die Nähe des Eisens gebracht, so zieht er die ungleichnamigen Pole der Molekularmagnete an und stößt die gleichnamigen ab, so daß ein Richten der Molekularmagnete stattfindet. Je stärker der induzierende Pol ist, um so weiter schreitet die Ausrichtung fort, bis schließlich der Sättigungszustand dadurch gegeben ist, daß alle Molekularmagnete sich in die Richtung der an Ort und Stelle vorhandenen Kraft eingestellt haben. Das verschiedene Verhalten des weichen und des harten Eisens erklärt sich durch die verschiedene Beweglichkeit der Molekularmagnete. Mechanische Erschütterungen erhöhen die Beweglichkeit und befördern dadurch die Induktion.

In einem **permanenten Magnet** sind die Molekularmagnete annähernd parallel zur magnetischen Achse des Stabes ausgerichtet, mit den Nordpolen nach der einen, den Südpolen nach der anderen Seite. Nur an den Enden des Stabes sperren die Achsen der Molekularmagnete infolge der

Abstoßung der gleichnamigen Pole auseinander, entsprechend den Feilspänen in Abb. 279.

Beim **Zerbrechen eines Magnets** treten die an der Bruchstelle frei werdenden Pole der Molekularmagnete in Wirksamkeit, so daß jedes Stück des Magnets wieder ein vollständiger Magnet ist.

Durch **Glühen eines Magnets** werden die Moleküle in so starke Bewegung versetzt, daß nachher jede Ordnung unter den Molekularmagneten aufgehoben, der Stab also unmagnetisch ist.

Das magnetische Feld.

Als **magnetisches Feld** bezeichnet man jeden Raum, in dem magnetische Kräfte wirksam sind. Das Kraftfeld eines Magnets ist gleichbedeutend mit seinem Wirkungsbereich.

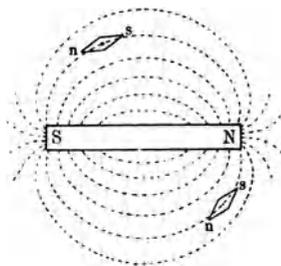


Abb. 282. Magnetnadeln im Felde eines Magnets.

Bringen wir in das Kraftfeld eines Magnets SN (Abb. 282) Magnetnadeln ns , so stellen sie sich in die Richtung der an Ort und Stelle herrschenden Kraft ein.

Als Feldrichtung in einem Punkte des Feldes bezeichnet man die Richtung, nach welcher in diesem Punkte der Nordpol einer kleinen Magnetnadel zeigt.

Die Feldrichtung im Kraftfeld eines Magnetstabes wechselt, wie Abb. 282 zeigt, von Punkt zu Punkt. Geht man von einem beliebigen Punkte des Feldes aus und schreitet stets in der Feldrichtung vorwärts, so beschreibt man eine Kraftlinie. Bei einem Magnetstab (Abb. 282) laufen die Kraftlinien vom Nordpol zum Südpol hinüber.

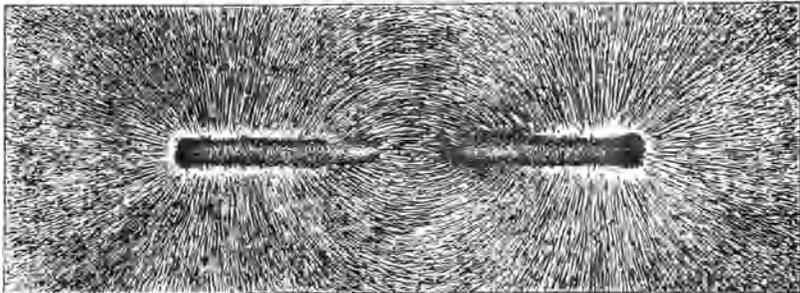


Abb. 283. Kraftlinienbild.

Zur Erzeugung eines Kraftlinienbildes bedeckt man den Magnetstab mit einer Glasscheibe oder Papptafel und streut Eisenfeilspäne darauf. Die einzelnen Späne werden durch Induktion zu kleinen Magneten, die sich beim Klopfen der Scheibe

in die Feldrichtung einstellen. Ein solches Kraftlinienbild läßt erkennen, ob ein Magnet gut oder schlecht magnetisiert ist. Wie stellen sich Anziehung und Abstoßung von Magnetpolen im Kraftlinienbild dar?

Feldstärke. Die von dem Magnet SN auf eine der Nadeln ns ausgeübte Wirkung ist an verschiedenen Stellen des Feldes verschieden groß. Man erkennt das an den mehr oder weniger schnellen Schwingungen der Nadeln, nachdem man sie aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht und dann sich selbst überlassen hat.

Die Feldstärke F an einer Stelle ist gleich der Kraft, mit der ein nordmagnetischer Einheitspol an dieser Stelle in der Richtung der Kraftlinien getrieben wird.

Ein südmagnetischer Einheitspol erfährt an derselben Stelle des Feldes die entgegengesetzt gleiche Kraft. Für einen Pol von der Polstärke m ist die Kraft m -mal so groß, also gleich $m \cdot F$.

Die Einheit der Feldstärke im CGS-System ist an einer Stelle vorhanden, an der ein Einheitspol mit der Kraft 1 Dyn in der Feldrichtung getrieben wird.

Die Feldstärke im Kraftlinienbild. An einer beliebigen Stelle eines Magnetfeldes werde eine Fläche von 1 qcm senkrecht zu den Kraftlinien gestellt. Durch jeden Punkt der Fläche könnte man eine Kraftlinie zeichnen. Von diesen Kraftlinien sollen jedoch nur so viele ausgezogen werden, wie die Feldstärke an der Stelle Einheiten hat.

Dann gibt das Kraftlinienbild sofort auch einen Überblick über die Größe der Feldstärke in jedem Punkte: da, wo die Kraftlinien nahe zusammenkommen, z. B. in der Nähe der Pole eines Magnets, ist die Feldstärke groß, da, wo sie weit auseinanderrücken, ist sie klein, z. B. in größerer Entfernung vom Magnet. Es läßt sich zeigen, daß niemals eine Kraftlinie außerhalb des Magnets beginnen oder endigen kann; alle laufen von Punkten des Magnets aus und kehren zu solchen zurück.

Ein Magnetfeld, dessen Kraftlinien parallele Geraden sind und dessen Feldstärke für alle Punkte dieselbe Größe hat, wird als gleichförmig oder homogen bezeichnet.

Das gleichförmige Magnetfeld ist das einfachste denkbare. Da alle Punkte eines solchen Feldes gleichwertig sind, so kann das Feld durch einen Pfeil dargestellt werden, der an einer beliebigen Stelle in der Feldrichtung gezeichnet wird und dessen Länge die Feldstärke darstellt.

Das einpolige Feld. Geradlinige Kraftlinien weist auch das einpolige Feld auf, d. h. das Feld in der Umgebung eines einzelnen Magnetpols. Ist der Pol ein Nordpol, so laufen die Kraftlinien radial von ihm aus, ist er ein Südpol, so laufen sie radial auf ihn zu. Die Feldstärke ist in gleicher Entfernung vom Pol konstant, sie ist nach dem Coulomb-

sehen Gesetz gleich m/r^2 , wenn m die Stärke des felderzeugenden Pols bezeichnet.

In Abb. 284 sind einzelne Kraftlinien gezeichnet. Sie gehen vom Nordpol aus und laufen zum Südpol hin. Man erhält ein Bild von der räumlichen Kraftverteilung um den Magnet, indem man sich die Abb. 283 und 284 um die magnetische Achse gedreht denkt.

Ausgezeichnete Stellen des Feldes sind:

a) Die magnetische Achse. Sie ist selbst eine Kraftlinie. Über den Nordpol hinaus ist die Feldrichtung vom Magnet fort, über den Südpol hinaus ist sie auf ihn zu gerichtet.

b) Die Äquatorebene des Magnets, d. h. die durch die Mitte des Magnets senkrecht zur magnetischen Achse gelegte Ebene. In allen Punkten der Äquatorebene ist das Feld parallel zur magnetischen Achse gerichtet, und zwar vom Nordpol zum Südpol.

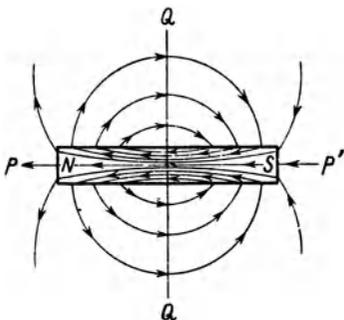


Abb. 284. Die Kraftlinien eines Magnetstabes.

Kraftlinien als geschlossene Linien. Man kann die Kraftlinien eines Magnetstabes als geschlossene Linien ansehen, die durch das Innere des Stabes vom Südpol nach dem Nordpol zurücklaufen, so, wie es in Abb. 284 dargestellt ist. Denn wenn der Magnet durchgebrochen wird, und die beiden Teile sehr wenig voneinandergerückt werden, so tritt in dem schmalen Luftspalt ein Magnetfeld auf, dessen Kraftlinien in der angegebenen Richtung verlaufen.

Das erdmagnetische Feld. Die Erde ist von einem Magnetfeld umgeben, dessen Kraftlinien in der Äquatorgegend horizontal verlaufen (magnetischer Äquator der Erde). Nördlich vom magnetischen Äquator haben die Kraftlinien eine Neigung (Inklination) nach unten, südlich eine solche nach oben, also so, als ob in der Norderdhälfte sich ein magnetischer Südpol, in der Süderdhälfte sich ein magnetischer Nordpol befände. Innerhalb eines Zimmers oder eines Hauses kann das erdmagnetische Feld als homogen angesehen werden.

Zusammensetzung und Zerlegung von Magnetfeldern. Sind in einem Raume gleichzeitig zwei Magnetfelder vorhanden, so können die Feldstärken an jeder Stelle nach dem Satze vom Kräfteparallelogramm zu einer resultierenden Feldstärke vereinigt werden.

Ebenso kann man die Feldstärke an einer Stelle in Komponenten nach zwei gegebenen Richtungen zerlegen.

Besonders einfach gestalten sich diese Sätze für homogene Felder, denn die an einer beliebigen Stelle ausgeführte Parallelogrammkonstruktion gilt in diesem Falle gleichzeitig für alle anderen Punkte.

Das erdmagnetische Feld an einem Orte kann in ein horizontales und ein vertikales zerlegt werden.

Weiches Eisen in einem Magnetfeld.

Bringt man ein Stück weiches Eisen in ein Magnetfeld, so sieht man am Kraftlinienbild, wie sich eine größere Anzahl von Kraftlinien zum Eisen hinziehen, in diesem verlaufen und an der entgegengesetzten Seite

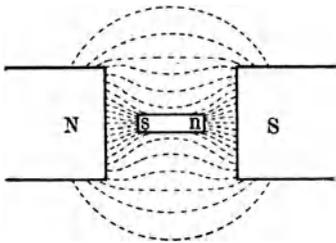


Abb. 285.

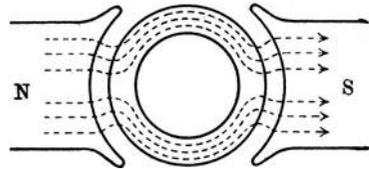


Abb. 286.

Weiches Eisen im magnetischen Feld (magnetische Durchlässigkeit).

wieder austreten (Abb. 285). Die Eintrittsstelle bezeichnet den Südpol, die Austrittsstelle den Nordpol des induzierten Eisenstückes. In der Umgebung des Eisens wird die Zahl der Kraftlinien vermindert. Man schreibt daher dem Eisen eine größere Durchlässigkeit für magnetische Kraftlinien zu, als sie die Luft besitzt, oder sagt, das Eisen setzt dem Durchgang der magnetischen Kraftlinien einen geringeren Widerstand entgegen als die Luft.

Elektrizität.

A. Ruhende elektrische Ladungen (Elektrostatik).

Elektrische Grunderscheinungen.

§ 146. Elektrizität durch Reibung, Elektronen, Elektroskop.

1. **Geschichtliches.** Schon im Altertum ist beobachtet worden, daß geriebener Bernstein (Elektron) die Eigenschaft besitzt, leichte Körper anzuziehen und nach der Berührung wieder abzustößen.

Seit dem Jahre 1600 wird die Ursache dieser Erscheinung als Elektrizität bezeichnet; der Zustand, in dem sich der geriebene Körper befindet, wird elektrischer Zustand genannt. Im Laufe der Zeit sind folgende Tatsachen festgestellt:

2. **Elektrisierbare Körper.** Außer Bernstein lassen sich viele andere Körper, wie Glas, Hartgummi, Schwefel, Siegelack durch Reiben mit Seide, Wolle, Fell oder Leder in den elektrischen Zustand versetzen

3. **Zwei Arten der Elektrizität.** Macht man eine Glasstange durch Reiben mit Seidenzeug elektrisch und hängt sie frei beweglich auf (Abb. 287), so wird sie von einer geriebenen Hartgummistange angezogen, von einer anderen geriebenen Glasstange dagegen abgestoßen. Eine geriebene Hartgummistange wird von einer geriebenen Glasstange angezogen, von einer geriebenen Hartgummistange abgestoßen.

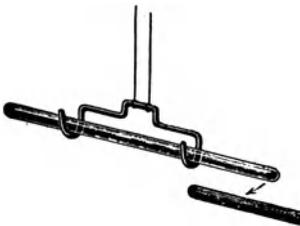


Abb. 287.

Anziehung ungleichnamig elektrischer Körper.

Danach gibt es zwei Arten der Elektrizität: die Elektrizität des geriebenen Glases nennt man positive, die des geriebenen Hartgummis negative Elektrizität; und es gilt als

|| Grundgesetz: Gleichnamig elektrische Körper stoßen einander ab, ungleichnamig elektrische Körper ziehen einander an.

4. Elektronen. Nach heutiger Anschauung besteht die Elektrizität ähnlich wie die Materie aus einzelnen unteilbaren Bausteinen, die ihrerseits zu den Atomen der Materie in enger Beziehung stehen. Jedes Atom der Materie besteht nämlich aus einem positiv geladenen Atomkern und einem oder mehreren Teilchen negativer Elektrizität, die man als Elektronen bezeichnet. Die Elektronen umkreisen den Atomkern in kreisförmigen oder elliptischen Bahnen in derselben Weise, wie die Planeten die Sonne. Im Normalzustand ist ein Atomkern von so viel Elektronen umschwärmt, daß seine positive Ladung gerade durch die der Elektronen aufgehoben wird. Es ist jedoch möglich, daß durch irgendwelche Ursachen aus einem solchen neutralen Atom ein oder mehrere Elektronen entfernt werden; dann erweist es sich als positiv elektrisch. Setzen sich umgekehrt überschüssige Elektronen an ein neutrales Atom an, so erweist sich dieses als negativ elektrisch.

Entsprechendes gilt von Körpern. Enthält ein Körper die normale Anzahl von Elektronen, so erscheint er unelektrisch. Elektronenüberschuß bedeutet negative, Elektronenmangel positive „Ladung“. Durch Reibung von Hartgummi an Fell gehen aus uns unbekannter Ursache Elektronen aus dem Fell in das Hartgummi über, beim Reiben von Glas an Seide wandern sie vom Glas in das Seidenzeug. Im folgenden ist die ältere Sprechweise von „positiver“ und „negativer Ladung“ eines Körpers überall da beibehalten, wo sie einfach und anschaulich ist.

5. Übertragung der Elektrizität durch Berührung. Eine Hollundermarkkugel, die an einem Seidenfaden aufgehängt ist (Abb. 288), wird von einem geriebenen Hartgummistab nach Berührung heftig abgestoßen. Es sind also Elektronen durch die Berührung auf die Kugel übergegangen. Derselbe Versuch läßt sich mit einer geriebenen Glasstange ausführen. Indem die Kugel Elektronen an die Glasstange abgibt, erhält auch sie einen Elektronenmangel, erscheint also positiv geladen.

6. Leiter und Nichtleiter. Hängt bei diesen Versuchen die Kugel an einem Seidenfaden, so ist die Abstoßung der Kugel nach der Berührung noch lange Zeit festzustellen, ein Zeichen dafür, daß die mitgeteilte Ladung der Kugel lange erhalten bleibt. Hängt dagegen die Kugel an einem

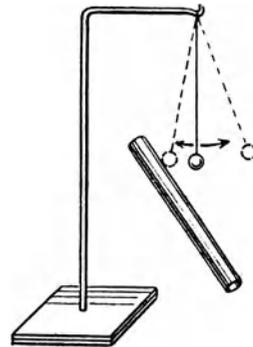


Abb. 288.
Elektrizitätsübertragung.

feinen Metallfaden, so wird sie fortgesetzt angezogen. Der Metallfaden hat also die Eigenschaft, die elektrische Ladung fortzuleiten. In ihm sind die Elektronen frei beweglich. Man unterscheidet gute Leiter, Halbleiter und schlechte Leiter der Elektrizität.

Gute Leiter sind vor allem die Metalle, dann Kohle, menschliche und tierische Körper, feuchter Erdboden, Seewasser. Halbleiter sind trockenes Holz, Papier, Stroh, Hanf, Wolle u. a. Nichtleiter oder besser sehr schlechte Leiter sind Seide, Glas, Porzellan, Hartgummi, Weichgummi, Schellack, trockene Luft.

Soll eine elektrische Ladung auf einem Leiter verbleiben, so muß man ihn isolieren, d. h. mit Nichtleitern (Isolatoren) umgeben. Bei ungenügender Dicke der isolierenden Schicht kann sie von den Elektronen durchbrochen werden, indem diese meist in Gestalt eines elektrischen Funkens von einem Leiter zum anderen überspringen.

7. Elektroskop. Zur Erkennung elektrischer Zustände benutzt man das Elektroskop. Beim Goldblatt-Elektroskop (Abb. 289 a) hängen

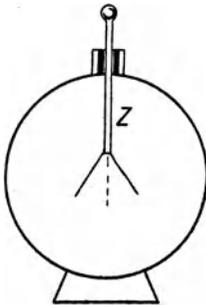


Abb. 289 a.

Goldblatt-Elektroskop.



Abb. 289 b.

Gabel-Elektroskop.

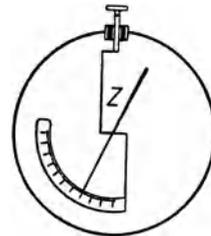


Abb. 289 c.

Elektrometer (Voltmeter).

unten an einer Metallstange zwei Goldblättchen. Die Stange ist isoliert, ihr unteres Ende mit den Goldblättchen ist zum Schutz gegen Luftzug in ein Gefäß eingeschlossen. Wird der Stange Elektrizität mitgeteilt, so verbreitet sie sich auch auf die Goldblättchen und diese stoßen einander als gleichnamig geladene Körper ab. Das Gabel-Elektroskop (Abb. 289 b) besitzt an einem isolierten Gestell eine leicht bewegliche Nadel, die vom Gestell abgestoßen wird, wenn man ihm eine elektrische Ladung zuführt.

Feinere, zum Messen des elektrischen Zustandes mit einer Skale versehene Elektroskope werden Elektrometer oder aus dem in § 151₂ angegebenen Grunde Voltmeter genannt (s. Abb. 289 c und Abb. 299).

8. Grundversuche mit dem Elektroskop. Mit einem Elektroskop lassen sich folgende Tatsachen feststellen, die das Gesagte zum Teil bestätigen, zum Teil ergänzen.

a) **Laden eines Elektroskops.** Berührt man den Knopf des Elektroskops mit einer geriebenen Glasstange, so wird das Elektroskop positiv geladen. Um es negativ zu laden, berührt man den Knopf mit einer geriebenen Hartgummistange (vgl. § 147₃).

b) **Leiter und Nichtleiter.** Verbindet man eine isolierte Metallkugel durch einen langen Metalldraht mit dem Knopf des Elektroskops und berührt die Kugel mit einem elektrischen Körper, so schlagen die Blättchen sofort aus; bei Verbindung mit einer Hanfschnur erfolgt der Ausschlag erst nach einiger Zeit, indem er allmählich wächst; bei Verbindung mit einer Seidenschnur findet kein Ausschlag statt. Während die Elektronen auf dem Leiter leicht beweglich sind, haften sie auf den Isolatoren an der Stelle, wo sie sich gerade befinden, und zwar um so fester, je besser der Isolator ist.

c) **Isolationsprüfung.** Man prüft Isolatoren auf ihre Güte dadurch, daß man den Knopf eines geladenen Elektroskops mit ihnen berührt. Ändert sich der Ausschlag nicht, so ist die Isolation gut.

d) **Ausgleich der Ladungen.** Lädt man zwei gleiche Elektroskope (Abb. 290) bis zum gleichen Ausschlag, das eine positiv, das andere negativ, und verbindet sie dann durch einen leitenden Draht, der an einem isolierenden Handgriff gehalten wird, so fallen in beiden Elektroskopen die Blättchen zusammen, der Elektronenüberschuß des negativ geladenen Elektroskops gleicht den Elektronenmangel des anderen aus. Waren die anfänglichen Ladungen ungleich stark, so bleibt auf beiden Elektroskopen ein Rest von der stärkeren Ladung zurück.

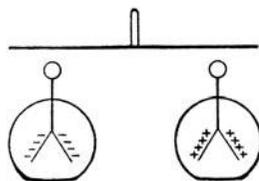


Abb. 290. Ausgleich ungleichnamiger Elektrizitäten.

§ 147. Elektrische Influenz.

1. Grundversuche. An einen isolierten, leitenden Körper K (Abb. 291) werde der Knopf eines Elektroskops gerückt. Nähert man dem Körper K einen geriebenen Glasstab, ohne K zu berühren, so spreizen sich die Blättchen des Elektroskops. Legt man auf zwei Elektroskope einen Leiter, z. B. einen Draht (Abb. 292) und nähert z. B. dem linken Elektroskop eine geriebene Hartgummistange, so schlagen beide Elektroskope aus, das linke mit positiver, das rechte mit negativer Ladung. Nach Entfernung des geladenen Körpers verschwinden in beiden Fällen die Ausschläge.

Diese Versuche zeigen, daß bei Annäherung eines elektrisch geladenen Körpers an einen Leiter auf diesem die Elektrizität verteilt wird, die gleichnamige wird abgestoßen, die ungleichnamige angezogen. Dieser Vorgang wird elektrische Verteilung oder Influenz genannt.

2. Trennung der Elektrizitäten. Die elektrische Influenz entspricht bis zu einem gewissen Grade der magnetischen Induktion (§ 129).

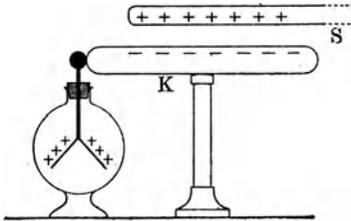


Abb. 291. I. Influenzversuch.

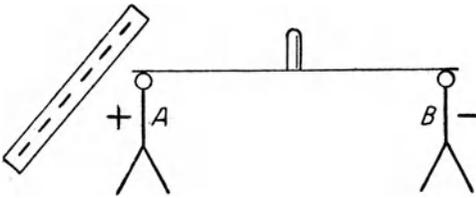


Abb. 292. II. Influenzversuch.

Während jedoch eine Scheidung von Nord- und Süd-magnetismus unmöglich ist, lassen sich die beiden Arten der Elektrizität trennen. In Abb. 291 besteht der Leiter, auf den die Influenz ausgeübt wird, aus dem Körper *K* und der Stange des Elektroskops. Rückt man während des Versuches das Elektroskop von *K* ab, so erweist sich die Elektroskopstange als positiv, *K* als negativ elektrisch. Entfernt man ebenso während des Versuches der Abb. 292 den Verbindungsdraht am

isolierenden Handgriff, so hat *A* weiter positive, *B* negative Ladung. Die entstehenden Ladungen sind stets einander entgegengesetzt gleich oder: der Elektronenmangel des einen der getrennten Körper ist dem Elektronenüberschuß des anderen gleich. Auch aus diesen Versuchen ergibt sich, daß die Elektronen auch in unelektrischen Metallen vorhanden und in ihnen leicht beweglich sind.

Berührt man den Körper *K* (Abb. 291) während des Versuches mit der Hand oder einem zur Erde abgeleiteten Draht, so fließt die positive Elektrizität zur Erde ab. Löst man jetzt die Verbindung und entfernt dann die Glasstange *S*, so ist *K* negativ geladen. Allgemein:

|| Die, mit der Ladung des verteilenden Körpers gleichnamige Elektrizität ist zur Erde ableitbar (frei), die ungleichnamige gebunden.

3. Ungleichnamige Ladung eines Elektroskops. Man kann ein Elektroskop mit einer geriebenen Glasstange negativ laden, indem man seinen Knopf mit der Hand berührt, die Glasstange in die Nähe hält, darauf die Hand und endlich den Glasstab entfernt. Entsprechend kann man das Elektroskop mit einem geriebenen Hartgummistab positiv laden.

4. Wenn ein unelektrischer Körper von einem elektrischen angezogen wird, so geht der Anziehung eine Verteilung der Elektrizitäten auf ihm voraus (Abb. 293).

Hat der angezogene Körper seine ungleichnamige Elektrizität durch Berührung an den anziehenden abgegeben, so erfolgt Abstoßung. Die Übertragung der Elektrizität von einem Körper auf einen anderen beruht also in diesem Falle in einer Entziehung der ungleichnamigen Elektrizität.



Abb. 293.
Erst Influenz, dann
Anziehung.

5. Erkennung der Elektrizitätsart. Wenn man dem Knopfe eines positiv geladenen Elektroskops einen positiv geladenen Körper nähert, so wird mehr positive Elektrizität in die Blättchen getrieben, der Ausschlag wird also größer. Bei Annäherung eines negativ geladenen Körpers findet entsprechend eine Verringerung des Ausschlags statt.

Elektrizitätsmenge, elektrisches Feld, Spannung.

§ 148. Einheit der Elektrizitätsmenge, Coulombsches Gesetz.

1. Einheit der Elektrizitätsmenge. Zwei Elektrizitätsmengen heißen gleich, wenn sie gleich große Ausschläge eines Elektroskops hervorrufen.

|| Als (elektrostatische) Einheit der Elektrizitätsmenge gilt diejenige, die eine ihr gleiche im Abstand 1 cm mit der Kraft 1 Dyn abstößt.

Für große Elektrizitätsmengen, wie sie z. B. in elektrischen Strömen transportiert werden, erweist sich die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge als unbequem klein. Man benutzt dann als praktische Einheit das Coulomb. Es ist $1 \text{ Coulomb} = 3 \cdot 10^9 = 3\,000\,000\,000$ elektrostatische Einheiten.

2. Das Coulombsche Gesetz über die Wirkung zweier Elektrizitätsmengen aufeinander lautet:

|| Zwei (punktförmig gedachte) Elektrizitätsmengen e_1 und e_2 , die sich in der Entfernung r voneinander befinden, üben eine Kraft von der Größe $\frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}$ aufeinander aus; diese ist abstoßend, wenn e_1 und e_2 gleichnamig sind, und anziehend, wenn e_1 und e_2 ungleichnamig sind.

§ 149. Das elektrische Feld.

1. Erklärungen. Jeder elektrische Körper ist von einem elektrischen Kraftfeld umgeben. Die Feldstärke an einer Stelle des Feldes ist gleich der Kraft, mit der die Einheit der Elektrizitätsmenge an dieser Stelle in der Feldrichtung getrieben wird. Geht man von einem beliebigen Punkte aus immer der Feldrichtung nach, so beschreibt man eine elektrische Kraftlinie.

2. Bilder elektrischer Kraftfelder. Die Abb. 294 stellt das elektrische Feld in der Umgebung von zwei einander gegenüberstehenden Platten dar, von denen die eine positiv, die andere negativ geladen ist.

Zwischen den Platten laufen die Kraftlinien nahezu parallel von der einen Platte zur anderen. Das Feld ist um so mehr „homogen“, je größer die Platten und je kleiner ihr Abstand ist.

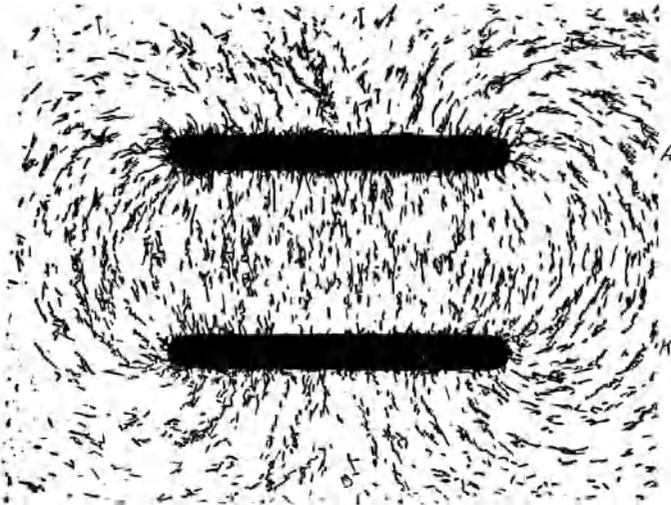


Abb. 294 ¹⁾. Elektrisches Feld zwischen entgegengesetzt geladenen Platten.

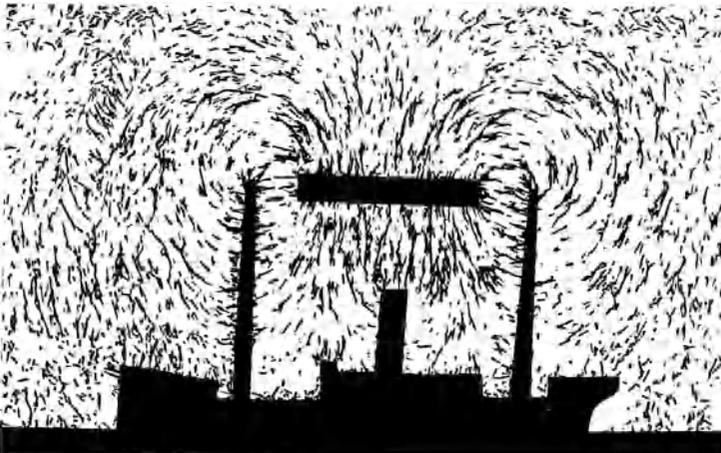


Abb. 295 ¹⁾. Elektrisches Feld zwischen Antenne und Schiffskörper.

Die Abb. 295 soll eine Vorstellung geben von dem Verlauf der elektrischen Kraftlinien zwischen Rumpf und Aufbauten eines Dampfers

¹⁾ Nach Pohl, „Elektrizitätslehre“. Mit frdl. Erlaubnis des Verlags Julius Springer, Berlin.

und einer zwischen den Masten ausgespannten Antenne in dem Augenblick, wo diese aufgeladen ist.

Zur Herstellung solcher Bilder elektrischer Kraftlinien ersetzt man die geladenen Körper durch Stanniolblätter, die auf Glas geklebt werden. Nachdem das eine von ihnen positiv, das andere negativ geladen ist, streut man frisch gepulverte Gipskristalle in das Feld und veranlaßt durch leichtes Klopfen deren Einstellung in die Feldrichtung ähnlich wie beim Sichtbarmachen der Kraftlinien magnetischer Felder durch Eisenfeilspäne.

3. Wird ein Leiter in ein elektrisches Feld gebracht, so treibt dieses in ihm sofort die Elektronen in der Feldrichtung: die in dieser Richtung liegende Seite des Leiters wird negativ, die entgegengesetzte positiv elektrisch (Influenz). Das Feld erzeugt im Leiter eine elektricitätsbewegende oder „elektromotorische“ Kraft.

§ 150. Anordnung der Elektrizität auf einem Leiter.

1. Ladung im Ruhezustand nur an der Oberfläche. Wird auf einen isolierten leitenden Körper eine Elektrizitätsmenge gebracht, so suchen ihre Teilchen als gleichnamig elektrisch sich möglichst weit voneinander zu entfernen. Nachdem die Elektrizität ihren Gleichgewichtszustand angenommen hat, finden sich daher Elektrizitätsteilchen nur an der Oberfläche des Leiters; sein Inneres ist völlig frei davon.

Diese Tatsache kann z. B. durch den in Abb. 296 dargestellten Versuch gezeigt werden. Ein oben offener, isoliert aufgestellter Metallbecher ist durch einen Draht mit einem Elektroskop verbunden und elektrisch geladen. Berührt man die Innenfläche des Bechers mit einer isolierten Kugel, so bleibt der Ausschlag des Elektroskops unverändert, die Kugel erweist sich nach dem Herausziehen als unelektrisch. Berührt man dagegen die Außenwand, so nimmt der Ausschlag des Elektroskops ab, weil die Kugel einen Teil der Ladung fortgenommen hat.

Läßt man den Becher und das Elektroskop ungeladen und berührt den Becher von innen mit einer geladenen Probestkugel, so geht die ganze Ladung auf den Becher und das Elektroskop über und die Kugel ist nach dem Herausziehen völlig unelektrisch.

2. Flächendichte der Elektrizität. Unter Flächendichte versteht man die Elektrizitätsmenge, die auf das Quadratcentimeter kommt. Auf der Oberfläche einer leitenden Kugel breitet sich die Ladung gleichmäßig aus; auf ihr ist daher die Flächendichte überall dieselbe. Bei einem eiförmigen Leiter dagegen (Abb. 297) wird die Elektrizität mehr in das stärker gekrümmte Ende getrieben, so daß hier die Flächendichte größer ist.

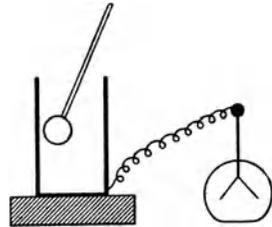


Abb. 296. Elektrizität nur an der Oberfläche.



Abb. 297. Oberflächendichte der Elektrizität.

3. Spitzenwirkung. In Spitzen häuft sich die Elektrizität in solcher Dichte an, daß sie auf die benachbarten Luftteilchen übergeht, die dann abgestoßen werden. Besitzt ein geladener Körper eine Spitze, so wird die Ladung durch diese schnell in der Luft zerstreut oder auf nahe ungeladene Körper übergeführt. Die Spitze kann auch an dem ungeladenen Körper angebracht sein.

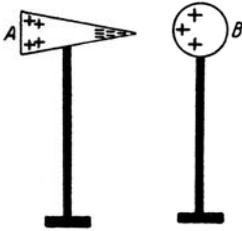


Abb. 298. Spitzenwirkung.

In Abb. 298 z. B. sei der Körper *B* positiv geladen. Nähert man ihm den ungeladenen Körper *A*, wie die Abbildung zeigt, so wird auf *A* die Elektrizität verteilt; die in die Spitze gezogene negative Elektrizität strömt aus dieser aus, auf *B* über und neutralisiert dessen positive Ladung, während auf *A* positive Ladung verbleibt. Scheinbar ist also positive Ladung von *B* auf *A* übergegangen.

Von dieser Spitzenwirkung wird besonders bei Elektrisiermaschinen Gebrauch gemacht, um Ladungen von einem Körper auf einen anderen ohne Berührung zu übertragen.

§ 151. Spannung.

1. Begriff der Spannung. Führt man einem isolierten, leitenden Körper, z. B. der Stange des in Abb. 299 abgebildeten Elektrometers, nach und nach mehr Elektrizität zu, so steigt der Ladungsgrad mehr und mehr. Der Ladungsgrad wird auch als Spannung oder Potential bezeichnet. Er ist vergleichbar dem Temperaturgrad, den ein Körper durch Zuführung von Wärmemengen erreicht.

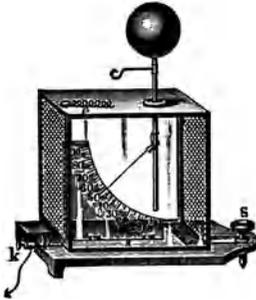


Abb. 299. Elektrometer (statisches Voltmeter).

Da die auf den leitenden Körper gebrachten Elektrizitätsteilchen sich gegenseitig abstoßen, so wird auf jedes von ihnen eine nach außen gerichtete Kraft ausgeübt. Die Spannung wird daher auch mit dem Drucke eines Gases oder einer Flüssigkeit gegen die einschließenden Gefäßwände verglichen.

Mathematisch ist die Spannung oder das Potential gleich der Arbeit, die geleistet wird, wenn die gleichnamige Elektrizitätsmenge 1 vom Leiter bis in unendlich große Entfernung von ihm abgestoßen wird, oder die geleistet werden muß, um dieselbe Elektrizitätsmenge aus unendlicher Entfernung auf den Leiter zu bringen.

2. Die praktische Einheit der Spannung ist das Volt (Erklärung in § 167). Da die Größe des Ausschlags eines Elektrometers die Spannung, d. h. die Voltzahl angibt, so bezeichnet man dieses Gerät auch als Voltmeter, und zwar als statisches im Gegensatz zu den in der Technik gebräuchlichen strombetätigten Voltmetern (§ 158₂, 172₃).

Als Nullpunkt der Spannung nimmt man in der Regel die Spannung der Erde. Positiv geladene Körper haben positive oder höhere Spannung als die Erde, negativ geladene Körper haben negative oder niedrigere Spannung als die Erde. Ein Voltmeter gibt stets nur Spannungsunterschiede an. Um mit ihm Spannungsunterschiede gegen die Erde zu messen, „erdet“ man die Seitenwände und den Boden des Kastens, d. h. mau verbindet sie durch einen Draht k (Abb. 299) leitend mit der Erde (Wasser- oder Gasleitung).

Ein positiv geladenes Voltmeter zeige bei geerdetem Gehäuse 5000 Volt an. Hebt man die Erdung auf und bringt das isolierte Gehäuse auf eine Spannung von +4000 Volt, so geht der Ausschlag auf 1000 Volt zurück. Bringt man dagegen das Gehäuse auf -3000 Volt, so erhöht sich der Ausschlag auf 8000 Volt.

Einen ungefähren Begriff von dem Spannungsunterschied zweier Körper gibt die Länge der Funken, die in trockener Luft zwischen ihnen überspringen. Z. B. entsprechen den Schlagweiten von 1 mm, 1 cm, 2 cm bei Kugeln von 1 cm Durchmesser etwa die Spannungsunterschiede 5000, 27 000, 36 000 Volt.

3. Bei ruhender Elektrizität ist die Spannung auf dem Leiter konstant. Wenn auf einem leitenden Körper oder auf mehreren solchen durch leitende Drähte verbundenen Körpern die Elektrizität ruht, so herrscht überall auf den Körpern dieselbe Spannung. (Vergleich mit einem Gase, das in ein Gefäß oder in mehrere Gefäße mit Verbindungsröhren eingeschlossen ist und sich im Ruhezustand befindet. Experimenteller Nachweis dadurch, daß man verschiedene Stellen des oder der geladenen Körper mit einem feinen Draht berührt, der zu einem Voltmeter führt. Dieses zeigt für alle Berührungspunkte denselben Ausschlag.)

4. Spannungsunterschiede bewirken einen Strom. Haben zwei durch einen leitenden Draht verbundene Körper eine verschiedene Spannung, so fließt in dem Verbindungsdraht ein Elektronenstrom von dem „negativ“ geladenen Körper zum „positiv“ geladenen Körper. Der Strom dauert so lange, wie noch ein Spannungsunterschied zwischen den Körpern vorhanden ist. Wird dieser ständig aufrechterhalten, so fließt auch ein dauernd gleichstarker Elektronenstrom (§ 157).

5. Elektrisiermaschinen. Um Spannungsunterschiede längere Zeit aufrechtzuerhalten, benutzt man Elektrisiermaschinen. Diese beruhen entweder auf der Trennung der Elektrizitäten durch Reibung (Reibungselektroisiermaschinen) oder auf der Scheidung der Elektrizitäten durch Influenz (Influenzmaschinen). Jede Elektrisiermaschine liefert eine bestimmte, von ihrer Konstruktion abhängige Höchstspannung, die als die Maschinenspannung bezeichnet wird. Im übrigen kann die Einrichtung dieser Maschinen hier übergangen werden.

Kapazität, Kondensatoren.

§ 152. Kapazität.

1. Begriff der Kapazität. Verbindet man zwei verschieden große isolierte Körper je mit einem Voltmeter (Abb. 300) und teilt beiden die

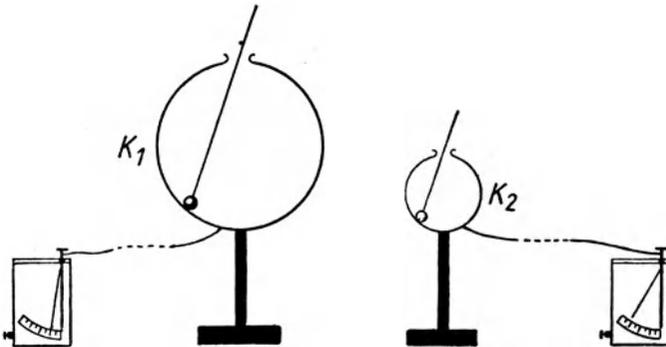


Abb. 300. Vergleich von elektrostatischen Kapazitäten.

gleiche Ladungsmenge mit, so zeigt das mit dem kleineren Körper verbundene Voltmeter einen größeren Ausschlag. Um dem größeren Körper dieselbe Spannung wie dem kleineren zu erteilen, bedarf es einer größeren Elektrizitätsmenge.

Als elektrisches Fassungsvermögen oder elektrische Kapazität C eines Körpers bezeichnet man das Verhältnis der auf ihn gebrachten Elektrizitätsmenge Q zu der dadurch erreichten Spannung E :

$$C = \frac{Q}{E}.$$

2. Einheit der Kapazität. Als elektrostatische Einheit der Kapazität gilt die einer Kugel vom Radius 1 cm. Die Kapazität einer Kugel wächst proportional ihrem Radius. Ein Körper hat eine Kapazität von 75 cm bedeutet, daß er dieselbe Kapazität hat wie eine Kugel von 75 cm Halbmesser.

Als praktische Einheit der Kapazität benutzt man das Farad. Ein Farad ist die Kapazität eines Körpers, der durch die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb die Spannung 1 Volt erhält (§ 148₁ und 167). Da diese Einheit sehr groß ist, so rechnet man meistens nach Mikrofarad $= 10^{-6}$ Farad. Es ist 1 Farad $= 9 \cdot 10^{11}$ cm, also 1 Mikrofarad $= 9 \cdot 10^5 = 900\,000$ cm, d. h. gleich der Kapazität einer Kugel von 9 km Halbmesser.

§ 153. Prinzip der Kondensatoren.

1. Grundversuch. Ein isolierter leitender Körper A sei mit einem Elektroskop verbunden und z. B. positiv geladen. Bringt man einen anderen Leiter B in die Nähe, so wird der Ausschlag kleiner, insbesondere dann, wenn B zur Erde abgeleitet ist (Abb. 301). Die

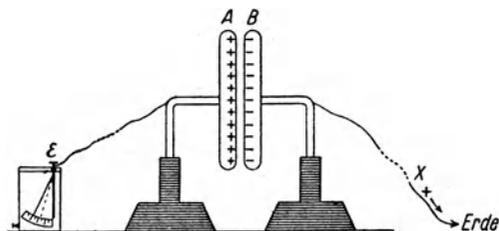


Abb. 301. Kondensator-Grundversuch.

Spannung auf A und dem Elektroskop sinkt also durch die Annäherung von B . Die positive Ladung von A zieht nämlich negative Influenzladung auf B heran, diese wirkt wieder influenzierend auf A , so daß sich auf den einander zugekehrten Seiten von A und B eine elektrische Doppelschicht bildet. Man sagt, die positive Elektrizität von A wird durch die negative zum großen Teil „gebunden“, also nach außen unwirksam. Man kann auch einfach die Hand dem geladenen Leiter A nähern, um ein Zurückgehen des Ausschlags zu beobachten. Nach Entfernung der Hand steigt der Ausschlag wieder zur alten Größe. Da die Elektrizitätsmenge auf dem Leiter A dieselbe geblieben, die Spannung aber gesunken war, so muß man schließen, daß die Kapazität des Leiters durch die Annäherung eines Körpers, vor allem eines zur Erde abgeleiteten, größer wird. Die in Abb. 301 dargestellte Vorrichtung bezeichnet man als Kondensator. Zwischen den Platten des Kondensators befindet sich ein elektrisches Feld (siehe Abb. 294).

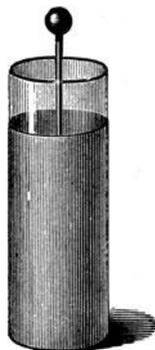


Abb. 302. Leidener Flasche.

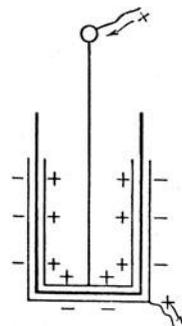


Abb. 303. Wirkung der Leidener Flasche.

2. Leidener Flasche. Zu den Kondensatoren gehört die Leidener Flasche (Abb. 302). Sie besteht aus einem Glasgefäß, das innen und außen bis auf einen breiten oberen Rand mit Stanniol belegt ist. Mit der inneren Belegung ist eine aus dem Gefäß herausragende Stange verbunden.

Die Möglichkeit in einer solchen Flasche eine große Elektrizitätsmenge aufzuhäufen, wird durch Abb. 303 erläutert. Die innere Belegung sei mit dem positiven Pole einer Elektrisiermaschine verbunden, so daß ihr beim Drehen der Maschine positive Elektrizität zuströmt. Das geschieht so lange, bis die Spannung der inneren Belegung die Maschinenspannung erreicht hat. Würde man die Flasche auf eine isolierende Unterlage stellen, so würde dieser Zustand bald erreicht sein. Ist jedoch die äußere Belegung zur Erde abgeleitet, so wird auf ihr durch Influenz eine Schicht negativer Elektrizität herangezogen, während die positive Elektrizität in die Erde entweicht. Durch die negative Schicht wird die Spannung auf der Innenbelegung herabgesetzt, so daß neue Elektrizität von der Maschine zuströmen kann. Eine Leidener Flasche mittlerer Größe hat dieselbe Kapazität wie eine Kugel von etwa 20 m Halbmesser.

3. Größe der Kapazität, Einfluß des Dielektrikums. Die Kapazität eines Kondensators ist um so größer, je größer die Belegungen und je geringer ihr Abstand voneinander ist. Aber auch das zwischen den Be-

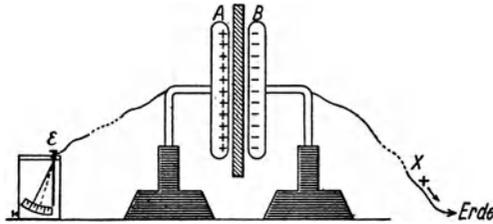


Abb. 304.

legungen befindliche isolierende Mittel ist von Einfluß auf die Größe der Kapazität, ein Zeichen dafür, daß es bei der Ausbildung des elektrischen Feldes im Kondensator wesentlich beteiligt ist.

Schiebt man nämlich zwischen die Kondensatorplatten *A*, *B*, ohne diese zu berühren, eine Hartgummi- oder Glasplatte, so geht der Ausschlag des Voltmeters zurück. Die Kapazität wird also durch die zwischen-geschobene Platte erhöht.

Wird der ganze Raum zwischen den Belegungen durch einen Isolator ausgefüllt, so steigt die Kapazität für Glas je nach der Glassorte auf den 5- bis 15fachen Wert, für Hartgummi auf den 2,8fachen, für Glimmer auf den 6- bis 8fachen, für Petroleum auf den doppelten Wert. Das zwischenliegende Mittel wird als Dielektrikum, die angeführten Zahlen werden als die Dielektrizitätskonstanten der betreffenden Stoffe bezeichnet.

4. Polarisation des Dielektrikums. Man stellt sich die Beteiligung des Dielektrikums an der Kraftübertragung folgendermaßen vor. Sobald sich Elektrizität auf den Belegungen sammelt, entsteht zwischen den Kondensatorplatten ein elektrisches Feld. Unter dessen Einfluß findet eine Polarisation im Dielektrikum statt, d. h. innerhalb jedes Moleküls rücken die Elektronen nach der Seite der positiven Platte. Diese Elektrizitätsbewegung bezeichnet man als Verschiebungsstrom. Sie

findet nur so lange statt, wie die Ladung der Kondensatorplatten und damit die Feldstärke steigt. Wird der Kondensator entladen, so bewegen sich die Elektronen in ihre Ruhelage zurück; es entsteht also ein Verschiebungsstrom in der entgegengesetzten Richtung.

§ 154. Weiteres über Kondensatoren.

1. Arten der Kondensatoren. Außer den Leidener Flaschen werden vielfach Plattenkondensatoren und Drehkondensatoren benutzt. Die Abb. 301 und 304 stellen Plattenkondensatoren dar. Vom Verlauf der elektrischen Feldlinien beim geladenen Plattenkondensator gibt Abb. 294 eine anschauliche Vorstellung. Plattenkondensatoren großer Kapazität erhält man, wenn man Stanniolblätter abwechselnd mit dünnen Platten

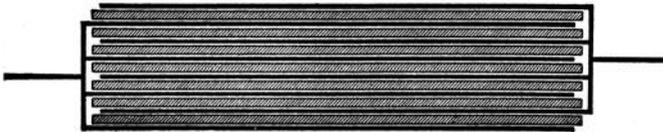


Abb. 305. Plattenkondensator.

aus Glimmer oder Glas oder Blättern aus Paraffinpapier übereinanderschichtet. Die leitend miteinander verbundenen geradzahligen Stanniolblätter bilden die eine, die verbundenen ungeradzahligen die andere Belegung des Kondensators (Abb. 305).

Bei den Drehkondensatoren ist die Kapazität stetig veränderlich. Sie bestehen meist aus zwei Sätzen halbkreisförmiger, paralleler Messingplatten; die untereinander leitend verbundenen Platten des ersten Satzes stehen fest; die des zweiten Satzes können um eine zu ihnen senkrechte Achse gedreht werden, so daß sie sich in gleichen Abständen zwischen den feststehenden Platten bewegen. In Abb. 306 sind die beiden Plattensätze auseinandergenommen dargestellt. Sind die Plattensätze ganz ineinandergeschoben, so hat man die größte, liegen sie ganz auseinander, so hat man die geringste Kapazität. Ein Zeiger gibt auf einer Gradteilung die jeweilige Stellung der Platten an. Bei den Drehkondensatoren ist das Dielektrikum meistens Luft, zuweilen Öl.



Abb. 306. Plattensätze eines Drehkondensators.

2. Durchschlagsfestigkeit. Ist die Schicht des Dielektrikums für die Spannung zu dünn, so springen Funken über. Ein Kondensator muß daher

eine dem Zwecke, zu dem er gebraucht wird, angemessene Durchschlagsfestigkeit haben. Diese ist verhältnismäßig groß bei Leidener Flaschen, gering bei Papierkondensatoren oder Drehkondensatoren mit Luftfüllung.

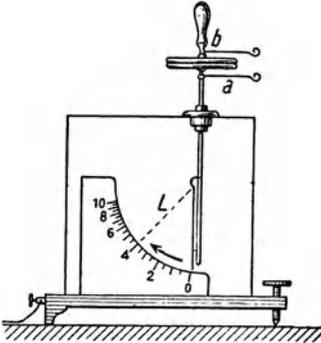


Abb. 307.
Kondensatorelektroskop.

3. Das Kondensator-Elektroskop. Durch Verbindung eines Plattenkondensators mit einem Elektroskop (Voltmeter) kann letzteres zum Erkennen auch sehr geringer Spannungsunterschiede eingerichtet werden (Abb. 307). Die eine Platte *a* des Kondensators wird auf die Stange des Elektroskops geschraubt, die andere Platte *b* auf *a* gelegt, wobei die Platten durch einen Firnisüberzug voneinander isoliert sind. Wird die untere Platte *a* mit dem zu untersuchenden Körper geringer Spannung, die obere mit der Erde verbunden, so bildet sich die Kondensatorbelegung aus.

Hebt man nun die obere Platte *b* an ihrem isolierenden Handgriff ab, so verbreitet sich die Ladung von *a* über den Stab und das Blättchen des Elektroskops und bewirkt einen Ausschlag.

§ 155. Schaltung von Kondensatoren.

1. Parallelschaltung. Verbindet man die inneren Belegungen mehrerer Leidener Flaschen untereinander und ebenso die äußeren Belegungen untereinander, so nennt man die Flaschen der so entstehenden „Batterie“ parallel geschaltet. Entsprechendes gilt von anderen Kondensatoren.

Bei Parallelschaltung von Kondensatoren addieren sich die Oberflächen der Belegungen. Die Kapazität ist daher gleich der Summe der Kapazitäten der einzelnen Kondensatoren.

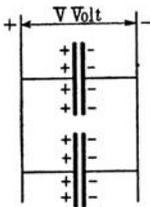


Abb. 308.
Parallel geschaltete
Kondensatoren.

Parallelschaltung wird angewendet, wenn aus mehreren kleinen Kondensatoren eine größere Kapazität zusammengesetzt werden soll (Abb. 308). Hinsichtlich der Durchschlagsfestigkeit wird dabei jeder einzelne Kondensator mit der vollen Spannung belastet.

2. Hintereinanderschaltung. Verbindet man die innere Belegung einer ersten Flasche mit der äußeren einer zweiten, so nennt man die Flaschen hintereinander oder in Reihe geschaltet.

Die Kapazität von zwei hintereinander geschalteten Kondensatoren von gleicher Größe ist nur die Hälfte der Kapazität des einzelnen Kondensators.

Man kann sich zwei so geschaltete Kondensatoren durch einen einzigen ersetzt denken, dessen Dielektrikum die doppelte Dicke besitzt

(Abb. 309). Jeder der gleichen Kondensatoren wird nur mit der Hälfte der Gesamtspannung belastet.

Sind die Kondensatoren von verschiedener Größe, so sinkt die Kapazität durch das Hintereinanderschalten ebenfalls, und zwar ist sie stets geringer als die des kleinsten Kondensators.

Reihenschaltung wird angewendet, wenn eine vorhandene Kapazität verkleinert werden soll, oder wenn die Durchschlagfestigkeit des einzelnen Kondensators für eine gegebene Spannung nicht ausreicht.

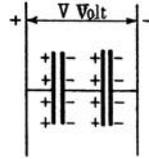


Abb. 309. In Reihe geschaltete Kondensatoren.

Atmosphärische Elektrizität.

§ 156. Luftelektrizität, Gewitter.

1. Die normale Luftelektrizität. Die oberen Schichten der Atmosphäre weisen fast stets eine positive Spannung gegen den Erdboden auf, so daß ein Spannungsgefälle (Potentialgefälle) in der Luft vorhanden ist. Dieses ist je nach der geographischen Breite, sowie nach der Jahres- und Tageszeit in weiten Grenzen veränderlich.

2. Gewitter. Bei einem Gewitter wachsen die Spannungsunterschiede in der Atmosphäre zu ungeheuer hohen Werten an. Die Entstehungsursachen der Gewitter sind noch nicht völlig aufgeklärt, sie hängen wahrscheinlich eng mit den jedes Gewitter begleitenden Kondensationen des Wasserdampfes und den Niederschlägen zusammen. Die Gewitterwolken weisen in der Regel negative Ladung auf, doch kommen auch positiv geladene Wolken vor. Die Spannungen zwischen den Wolken oder zwischen diesen und dem Erdboden gleichen sich bei hinreichender Größe in Form von Flächenblitzen oder von Funken- oder Linienblitzen aus. Der Linienblitz besteht gewöhnlich aus einer geschlängelten und vielfach verästelten leuchtenden Linie. Durch photographische Aufnahmen mit bewegter Kamera ist nachgewiesen, daß es sich bei den Blitzen meistens um rasch hin und her gehende (oszillierende) Entladungen handelt. Die Dauer eines Hin- und Rückganges liegt unter $\frac{1}{35.000}$ Sekunde, die Dauer des ganzen Blitzes gewöhnlich unter $\frac{1}{1000}$ Sekunde. Die Stromstärke kann viele tausend Ampere betragen.

Der den Blitz begleitende Donner entsteht dadurch, daß die Luft in der Blitzbahn plötzlich erhitzt und explosionsartig auseinander geschleudert wird. Da die verschiedenen Stellen der Blitzbahn verschieden weit von unserem Ohre entfernt sind, so kommen die Schallwellen zu verschiedenen Zeiten an, wodurch sich das anhaltende Rollen des Donners erklärt. Aus der Anzahl Sekunden, die zwischen einem Blitz und dem Einsetzen des Donners vergehen, kann man auf die Entfernung des

Gewitters schließen. Für je 3 s hat man 1 km, für je 5,5 s hat man 1 Seemeile zu rechnen. Sind Blitze so weit entfernt, daß man ihren Donner nicht hört, so spricht man von Wetterleuchten.

3. Das **St.-Elmsfeuer** ist eine Glimmlicht-Entladung, bei der die Elektrizität aus Gegenständen der Erdoberfläche, z. B. aus den Mastspitzen eines Schiffes, mit knisterndem oder schwach sausendem Geräusch ausströmt.

4. **Blitzableiter** haben den Zweck, dem Blitz eine gute metallische Leitung zur Erde darzubieten, so daß die Elektrizität ohne Schaden zur Erde geleitet wird. Die Leitung ist deshalb stark genug zu wählen und bis in das Grundwasser, auf See bis in das Seewasser zu führen.

B. Der elektrische Strom (Elektrodynamik).

Elektrischer Strom, galvanische Elemente.

§ 157. Benennungen und Grundbegriffe.

1. **Stromrichtung.** Ein elektrischer Strom entsteht, wenn zwei Körper verschiedener Spannung durch einen Leiter verbunden werden (§ 151₄). Er besteht darin, daß von dem Körper mit Elektronenüberschuß, d. h. dem „negativ geladenen“ Körper, Elektronen zum anderen Körper hinüberströmen. Die geschichtliche Entwicklung hat es bedingt, daß man nicht die Richtung des Elektronenstromes, sondern die entgegengesetzte als Stromrichtung bezeichnet hat, also die Richtung, in der sich scheinbar die positive Elektrizität bewegt. Da diese Bezeichnung heute noch allgemein üblich ist, so muß sie auch hier angewandt werden. Im folgenden wird demnach so gesprochen, als wenn es die positive Elektrizität wäre, die sich im Leiter bewegte.

2. **Stromquellen.** Wird der Spannungsunterschied an den Enden eines Leiters (oder Halbleiters) dauernd auf gleicher Höhe erhalten, so fließt in ihm ein dauernder Strom. Zur Aufrechterhaltung des Spannungsunterschiedes muß eine Stromquelle vorhanden sein. Diese kann z. B. bestehen in einer gleichmäßig gedrehten Elektrisiermaschine, wie in Abb. 310 dargestellt, oder in einem „galvanischen Element“ (§ 158), einem Akkumulator (§ 161₆, 187) oder einer Dynamomaschine (§ 190). Im Vergleich zu den übrigen Stromquellen erzeugt die Elektrisiermaschine sehr hohe Spannungen, sie setzt aber nur verhältnismäßig geringe Elektrizitätsmengen in Bewegung.

3. Als **Stromstärke** bezeichnet man die in der Sekunde durch den Leiterquerschnitt fließende Elektrizitätsmenge. Sie wird durch eine Einheitsstromstärke, das Ampere, ausgedrückt. Verschiedene Arten von

Strommessern oder Amperemetern sind im folgenden beschrieben. Solange keine Stromverzweigung stattfindet, ist die Stromstärke längs der ganzen Leitung konstant, weil anderenfalls ein Anstauen der Elektrizität an einzelnen Stellen stattfinden würde. Zur Messung der Stromstärke kann man daher ein geeignetes Amperemeter an irgend einer Stelle in die Leitung einschalten.

4. Spannungsabfall längs der Leitung. Während die Stromstärke in jedem Leiterquerschnitt dieselbe ist, fällt die Spannung von ihrem Wert an dem einen Ende *A* des Leiters zu dem am anderen Ende *B* allmählich ab.

Das läßt sich durch den in Abb. 310 dargestellten Versuch veranschaulichen. Das Ende *A* eines Halbleiters *AB* (Holzstab) ist mit dem positiven Pol einer Elektrisiermaschine verbunden, deren anderer Pol geerdet ist. Ist das Ende *B* des Leiters isoliert, so läßt sich bei gleichmäßiger Drehung der Maschine der Stab in

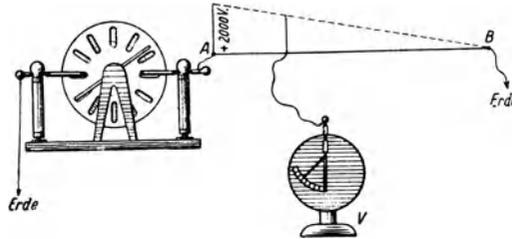


Abb. 310. Spannungsabfall.

kurzer Zeit zur Maschinenspannung auf. Auf dem ganzen Stab ist die Spannung konstant: wenn man an dem Knopf des Voltmeters *V* einen feinen Draht befestigt und sein anderes Ende (am isolierenden Griff) längs *AB* führt, so bleibt der Ausschlag von *V* konstant. Die Elektrizität auf *AB* ruht.

Wird jetzt *B* leitend mit der Erde verbunden, also auf der Spannung Null gehalten (Abb. 310), so sinkt die Spannung von ihrem Höchstwert bei *A* längs des Stabes bis zum Werte Null in *B*, wie in der Abbildung angedeutet ist und durch das Voltmeter *V* sichtbar gemacht werden kann. Die Elektrizität auf *AB* ist nicht mehr in Ruhe, sondern die „positive“ strömt gleichmäßig von *A* nach *B*. (In Wirklichkeit strömen die Elektronen von *B* nach *A*.)

Der Spannungsabfall längs der Leitung ist die Ursache, welche die Elektrizität zum Fließen veranlaßt, gerade so wie das Gefälle eines Flußbettes das Wasser, oder wie der Temperaturabfall längs einer Metallstange die Wärme zum Fließen bringen. Man vergleiche auch Abb. 310 mit Abb. 147!

§ 158. Galvanische Elemente, technische Voltmeter, EMK.

1. Das Volta-Element. Zu den Stromquellen gehört das um 1800 von Volta angegebene galvanische Element. Läßt man eine Kupfer- und eine Zinkplatte in verdünnte Schwefelsäure tauchen, ohne daß sie sich gegenseitig berühren, so weisen die beiden Metalle einen Spannungs-

unterschied auf. Das Kupfer erweist sich als positiv, das Zink als negativ elektrisch (Abb. 311).

Die eingetauchten Platten werden Elektroden, ihre oberen Enden der positive und der negative Pol des Elements genannt. Wenn die Pole nicht durch einen Leitungsdraht verbunden sind, so nennt man das Element offen.

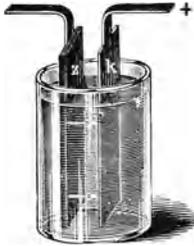


Abb. 311.
Kupfer-Zink-Element.

2. Technische Voltmeter. Da der Spannungsunterschied zwischen den Polen eines Elements nur gering ist, so würde er sich nur mit sehr empfindlichen statischen Voltmetern nachweisen lassen. Dies gelingt jedoch leicht mit dem Kondensatorelektroskop (§ 154₃, Abb. 307).

Bequemer mißt man kleine Spannungsunterschiede, wie sie bei den hier und im folgenden zu behandelnden Stromquellen auftreten, mit dem in der Technik gebräuchlichen strombetätigten Voltmetern. Um den Spannungsunterschied zwischen zwei Punkten *A* und *B* mit einem solchen Voltmeter *V* zu messen, schaltet man *V* in eine von *A* nach *B* gelegte Leitung ein. [Durch *V* fließt dann ein Strom, der aber wegen der besonderen Konstruktion des Voltmeters so schwach ist, daß er die Spannung zwischen *A* und *B* so gut wie gar nicht ändert. Der zu messende Spannungsunterschied ist diesem Strom proportional und kann an der nach Volt geteilten Skale des Voltmeters unmittelbar abgelesen werden. Näheres § 172₃.]

3. Die elektromotorische Kraft. Der Spannungsunterschied zwischen den Polen des offenen Elements wird als die elektromotorische Kraft (EMK) des Elements bezeichnet. Versuche mit verschiedenen großen Elektroden ergeben:

Die EMK ist von der Größe der Elektroden unabhängig. Für die Zusammenstellung Kupfer-Zink in verdünnter Schwefelsäure beträgt sie rund 1 Volt.

Die EMK ist unabhängig von der Spannung, auf der eine der Elektroden gehalten wird, z. B. beim Voltaelement: Zink geerdet, Kupfer + 1 Volt; Zink + 5 Volt, Kupfer + 6 Volt; Kupfer geerdet, Zink — 1 Volt usw.

4. Spannungsreihe. Auch aus anderen Stoffen lassen sich galvanische Elemente herstellen, z. B. durch Zusammenstellung von zwei Platten aus Kohle, Platin, Kupfer, Eisen, Blei, Zink, Aluminium in einer verdünnten Säure. Der in dieser Reihe weiter vorn stehende Stoff wird positiv, der weiter hinten stehende negativ elektrisch. Der Spannungsunterschied ist um so größer, je weiter die Stoffe in der Reihe voneinander entfernt sind.

5. Die Flüssigkeit. Außerdem hängt der Spannungsunterschied von der benutzten Flüssigkeit ab. Als solche kommen nur Flüssigkeiten in Betracht, die den elektrischen Strom leiten, insbesondere alle Säuren und Salzlösungen. Chemisch reines Wasser, Zuckerlösung, Petroleum oder andere Öle sind nicht verwendbar, weil sie den Strom nicht leiten. Man hat sich vorzustellen, daß der Strom nicht nur im äußeren Leitungsdraht fließt, sondern daß er den vollen Kreislauf zurücklegt, daß er z. B. im Voltaelement vom Kupfer durch den Leitungsdraht zum Zink und vom Zink durch die Flüssigkeit zum Kupfer zurückgeht.

6. Der Energieaufwand für den Strom. Solange das Element offen ist, bemerkt man an den Elektroden und der Flüssigkeit keine Veränderungen¹⁾. Sobald aber das Element „geschlossen“ ist, d. h. die Pole durch einen Leitungsdraht verbunden sind, finden chemische Vorgänge im Element statt. Diese sind äußerlich daran erkennbar, daß an der Kupferplatte Blasen aufsteigen, und daß sich das Zink mit der Zeit auflöst.

Der elektrische Strom im galvanischen Element entsteht auf Kosten von chemischer Energie, im Voltaelement z. B. durch Auflösung des Zinks.

7. Korrosion. Wenn bei einem eisernen Schiff Teile aus Messing oder Bronze außenbords unter Wasser angebracht werden, z. B. Bronzeschrauben, so bilden diese im Seewasser mit dem Eisen des Schiffes galvanische Elemente. Da diese Elemente geschlossen sind, so liegt die Gefahr nahe, daß das elektronegative Metall, also das Eisen, aufgelöst wird. Um das Anfressen des Schiffseisens, die Korrosion, zu verhüten, bringt man Zinkplatten am Schiff an. Da Zink stärker negativ elektrisch wird als Eisen, so verfällt dann das Zink der allmählichen Auflösung und der Schiffskörper bleibt unversehrt.

8. Konstante Elemente. Bei den bisher beschriebenen Elementen wird der gelieferte Strom infolge einer an den Platten auftretenden Polarisation (§ 161_g) allmählich schwächer. Dieser Übelstand wird in den konstanten Elementen vermieden.

Das für Klingelanlagen vielfach gebrauchte Leclanché-Element enthält Zink und ein Gemisch von Kohle und Braunstein in Salmiaklösung; seine EMK beträgt 1,35 Volt. Auch die sogenannten Trockenelemente enthalten eine Flüssigkeit, gewöhnlich Salmiaklösung; diese ist mit Sand, Sägespänen, Glaspulver oder Gelatine vermischt, so daß sie nicht auslaufen kann.

Technisch werden als konstante Stromquellen vielfach Akkumulatoren (Sammler) gebraucht (s. § 161_g, 187).

§ 159. Galvanische Batterie, Schaltung der Elemente.

Eine Zusammenstellung galvanischer Elemente zu gemeinsamer Wirkung wird eine galvanische Batterie genannt.

¹⁾ Vorausgesetzt, daß das Zink rein oder daß es gut mit Quecksilber amalgamiert ist. Bei Verwendung von rohem Zinkblech bilden sich zwischen dem Zink und den von ihm eingeschlossenen Kohlenstoffteilchen Lokalströme, die zur Auflösung des Zinks führen.

1. Parallelschaltung von Elementen. Verbindet man alle positiven Pole der Elemente untereinander und ebenso alle negativen Pole untereinander, so sagt man, die Elemente seien parallel geschaltet.

|| Die EMK von beliebig vielen, gleichen, parallel geschalteten Elementen ist gleich der EMK des einzelnen Elements.

Die Parallelschaltung ist nämlich der Plattenvergrößerung eines einzelnen Elements gleichwertig. Ebenso wenig wie diese hat sie eine Erhöhung der EMK zur Folge.

2. Reihenschaltung oder Hintereinanderschaltung von Elementen. Verbindet man den positiven Pol des ersten mit dem negativen Pol des zweiten Elements, den positiven Pol des zweiten mit dem negativen Pol des dritten Elements usw., so sagt man, die Elemente seien hintereinander oder in Reihe geschaltet. Der im ersten Element frei bleibende negative und der im letzten Element frei bleibende positive Pol werden mit Klemmen K_- und K_+ zum Anlegen der äußeren Leitung versehen.

|| Die EMK von n hintereinander geschalteten Elementen ist n mal so groß wie die des einzelnen Elements.

Beweis. Es seien z. B. die Zinkplatten mehrerer Voltaelemente von der EMK 1 Volt mit $Z_1, Z_2 \dots$, ihre Kupferplatten mit $K_1, K_2 \dots$ bezeichnet. Hat Z_1 die Spannung e_0 Volt, so ist die von K_1 gleich $e_0 + 1$ Volt. Auf derselben Spannung muß Z_2 sein, da sich ein Spannungsunterschied in dem kurzen Verbindungsdraht sofort ausgleichen würde. Da K_2 eine um 1 Volt höhere Spannung als Z_2 hat, so ist seine Spannung $e_0 + 2$ Volt usw. Der Spannungsunterschied der Kupferplatten gegen Z_1 steigt also treppenartig in jedem Element um 1 Volt.

3. Über Stromstärken bei verschiedenen Schaltungen siehe § 168_{5, 6}.

Wirkungen des elektrischen Stromes.

§ 160. Wärmewirkung.

1. Erwärmung des Leiters. Leitet man einen starken elektrischen Strom durch einen dünnen Eisendraht, so wird dieser glühend, ein dickerer Draht wird nur erwärmt. Allgemein gilt:

|| Der elektrische Strom erwärmt jede Leitung, die er durchfließt. Die Energie des Stromes wird dabei in „Stromwärme“ umgesetzt.

2. Technische Anwendungen. Die Umwandlung der elektrischen Energie in Wärmeenergie bietet ein bequemes Mittel zur Erzeugung hoher Temperaturen und wird deshalb vielfach zur Erwärmung, zur Lichterzeugung und zum Schmelzen benutzt. In den elektrischen Öfen und anderen Heizapparaten, Lötkolben, Bügeleisen, Kochtöpfen, Zigarrenanzündern usw. wird der Strom durch Drähte oder Metallstreifen von hohem Widerstand geleitet, wodurch diese und die Körper, in denen sie eingebettet sind, erwärmt werden. Auf der Erwärmung des durchflossenen

Leiters beruhen auch die elektrische Minenzündung, die Zündung der Sprengladung des Elektrolots, die Schmelzsicherungen (§ 185), die Glühlampen (§ 188) und die Hitzdrahtstrommesser.

3. Die Hitzdrahtstrommesser messen die Stärke eines elektrischen Stromes durch die Verlängerung, die ein Draht infolge der Erwärmung beim Stromdurchgang erfährt. Die Abb. 312 stellt schematisch ein solches Instrument dar. Der zu messende Strom durchfließt den Platinsilberdraht CD . In der Mitte von CD und im Punkte B ist ein feiner Messingdraht AB befestigt. Dieser wird durch einen Metallfaden, der um die Rolle R geschlungen ist, mittels der Feder f gespannt. Bei Verlängerung des Drahtes CD kann die Feder f mehr anziehen, wodurch die Rolle R mitsamt dem auf einer Skale spielenden Zeiger gedreht wird.

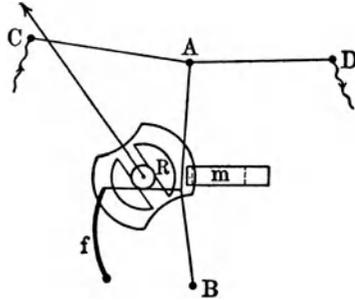


Abb. 312. Hitzdrahtstrommesser.

Hitzdrahtinstrumente finden als Strom- und Spannungsmesser Verwendung; sie eignen sich auch zur Messung von Wechselströmen, weil die Erwärmung des Hitzdrahtes von der Stromrichtung unabhängig ist.

§ 161. Chemische Wirkungen des elektrischen Stromes.

Das Ampere.

1. Elektrolyte. Während feste Körper (Metalle, Kohle usw.) durch den elektrischen Strom nur erwärmt werden, erfahren Säuren und Salzlösungen durch ihn außer der Erwärmung stets auch eine chemische Zersetzung. Z. B. wird aus Kupfervitriollösung durch den elektrischen Strom am negativen Pol Kupfer, am positiven Schwefelsäure abgeschieden; Höllensteinlösung wird in derselben Weise in Silber und Salpetersäure zerlegt. Diese Zersetzung bezeichnet man als *Elektrolyse*, die ihr unterworfenen Säuren und Salzlösungen heißen *Elektrolyte*.

2. Wasserzersetzung. Läßt man z. B. zwei Platinbleche in ein Gefäß mit stark verdünnter Schwefelsäure tauchen und verbindet sie mit den Polen einer Stromquelle von hinreichender Spannung, so steigen an beiden Blechen, die als Elektroden bezeichnet werden, Blasen auf, und zwar an der Zuleitungselektrode des positiven Stromes, der *Anode A* (Abb. 313), Sauerstoff, an dessen Ableitungselektrode, der *Kathode K*, Wasserstoff. Fängt man die Gase, jedes für sich, wie in Abb. 313 dargestellt, auf, so findet man, daß auf einen Raumteil Sauerstoff immer zwei Raumteile Wasserstoff kommen. Dieses sind die chemischen Bestandteile des

Wassers. Im Endergebnis läuft deshalb die Zersetzung der verdünnten Schwefelsäure auf die Zersetzung des in dem Gemisch befindlichen Wassers hinaus. Sie wird daher vielfach als Wasserzersetzung bezeichnet.

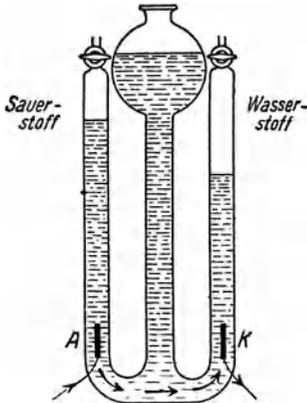


Abb. 313.
Wasserzersetzungsgapparat.

Fängt man den Sauerstoff und den Wasserstoff bei der Wasserzersetzung in einem gemeinsamen Behälter auf, so erhält man ein Gasgemisch, das bei Entzündung mit lautem Knall explodiert, indem sich die Bestandteile wieder zu Wasser vereinigen. Es wird als Knallgas bezeichnet.

3. Das Ampere. Die Menge des bei einer Wasserzersetzung gebildeten Knallgases hängt lediglich von der durch die Flüssigkeit gegangenen Elektrizitätsmenge ab. Man kann den Vorgang deshalb benutzen, um die Einheit der Stromstärke festzusetzen.

Die Einheit der elektrischen Stromstärke ist das Ampere. Ein Ampere ist die Stromstärke, die in einer Minute 10,4 Kubikzentimeter Knallgas erzeugt, gemessen bei 0° C und 760 mm Barometerstand.

Schwache Ströme werden nach Milliampere (MA), d. h. tausendstel Ampere gemessen.

Nach der gesetzlichen Erklärung ist das Ampere die Stromstärke, die in 1 Sekunde 1,118 mg Silber abscheidet.

4. Technische Anwendungen. Die Elektrolyse von Metallsalzlösungen wird technisch benutzt, um Metalle mit Überzügen anderer Metalle zu versehen, sie z. B. zu vergolden, versilbern, vernickeln, verkupfern. Zum Versilbern werden die Gegenstände in eine zyanalkaliumhaltige Silberlösung gehängt, und zwar als Kathode, d. h. mit dem negativen Pol der Stromquelle verbunden, während als Anode eine Silberplatte in das Bad gehängt wird (Abb. 314). Wie bei der Wasserzersetzung der Wasserstoff, so wandern bei der Elektrolyse der

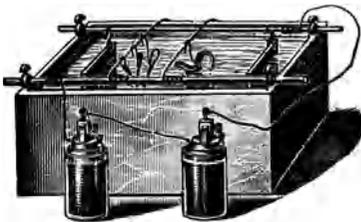


Abb. 314. Versilberungsbad.

Metallsalze die Metalle mit dem positiven Strome. Im vorliegenden Falle schlägt sich Silber auf den als Kathode dienenden Gegenständen nieder, während sich an der Anode gleich viel Silber auflöst. In ähnlicher Weise werden plastische Abdrücke von Bildwerken, Kupferstichplatten u. a.

hergestellt (Galvanoplastik). Eine weitere Anwendung findet die Elektrolyse zur Gewinnung reiner Metalle aus ihren Erzen oder sonstigen Verbindungen (Elektrolyt-Kupfer, Aluminium usw.).

Die chemischen Wirkungen des Stromes werden auch dazu verwendet, um die Pole einer Stromquelle zu erkennen. Hierzu dienen Polreagenz-papiere. Man drückt zwei mit den Polen verbundene Drähte auf das etwas angefeuchtete Papier; auf diesem entsteht an dem Draht, der mit dem negativen Pol verbunden ist, ein roter Fleck.

Man kann zum Erkennen der Pole auch die mit ihnen verbundenen Drähte in gewöhnliches (nicht destilliertes) Wasser tauchen. Dabei erkennt man den negativen Pol an der auftretenden starken Gasentwicklung.

5. Als **Voltameter** (nicht zu verwechseln mit Voltmeter) bezeichnet man Apparate, mit denen man die Stärke eines elektrischen Stromes auf Grund der in einer Minute oder einer Sekunde abgeschiedenen Stoffmenge mißt. Man hat Knallgasvoltameter, Silbervoltameter und Kupfervoltameter. Da diese Apparate für den täglichen Gebrauch nicht bequem sind, so werden sie nur zur Eichung anderer Strommesser benutzt.

6. **Der Akkumulatorgrundversuch.** Die Akkumulatoren oder Sammler dienen dazu, elektrische Energie aufzuspeichern.

Stellt man zwei Bleiplatten, getrennt voneinander, in verdünnte Schwefelsäure, so weisen sie als gleichartige Körper keinen Spannungsunterschied auf. Verbindet man aber eine Zeitlang die eine Platte mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pol einer Stromquelle (Abb. 315 a), so überzieht sich die positive Platte mit einem braunen Überzug von Bleisuperoxyd (in der Abbildung mit PbO_2 bezeichnet), während die negative metallische Blei (Pb) bleibt.

Die Platten sind durch den Ladestrom verschieden gemacht oder polarisiert, sie bilden nun mit der verdünnten Schwefelsäure ein Element. Schließt man dieses durch einen Leitungsdraht, so fließt in ihm ein Entladestrom, und zwar kommt der positive Entladestrom aus der Klemme, in die der positive Ladestrom hineingeleitet war (Abb. 315 b). Die beschriebene Vorrichtung stellt einen Bleiakкумулятор einfachster Form dar. Beim Laden des Akkumulators wird elektrische Energie in chemische Energie verwandelt, beim Entladen findet eine Rückverwandlung der chemischen Energie in elektrische statt.

Bau und Behandlung der Akkumulatoren s. § 187.

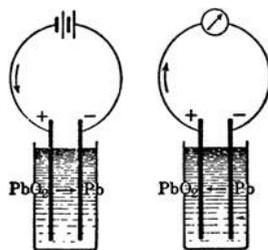


Abb. 315 a. Abb. 315 b.
Bleiakkumulator.

§ 162. Magnetische Wirkungen des elektrischen Stromes.

1. Grundversuch (Oerstedt 1820). Eine Kompaßnadel sei im erdmagnetischen Felde aufgestellt, so daß sie im magnetischen Meridian ruht. Führt man einen Strom in der Richtung Süd–Nord über die Nadel hin, so wird diese aus dem Meridian abgelenkt, und zwar geht das Nordende nach Westen.

Führt man den Strom in der Richtung Ost–West oder West–Ost über die Nadel, so erfolgt keine Ablenkung.

Aus den Versuchen folgt:

Ein stromdurchflossener Draht ist von einem magnetischen Kraftfeld umgeben. Die Kraftlinien verlaufen an jeder Stelle quer zum Draht.

2. Die Richtung der Kraftlinien kann bestimmt werden durch die

Amperesche Regel: Für eine mit dem positiven Strom schwimmende menschliche Figur, welche die Nadel ansieht, wird der Nordpol nach links abgelenkt

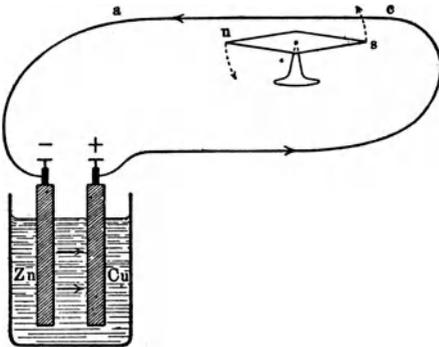


Abb. 316. Ablenkung der Magnetnadel.

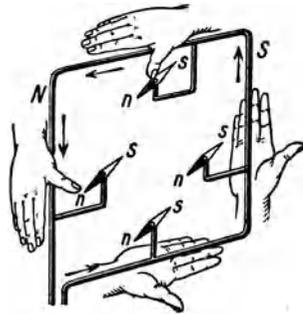


Abb. 317. „Rechte-Hand-Regel“.

oder bequemer durch die

„Rechte-Hand-Regel“. Man lege die rechte Hand in die Richtung des positiven Stromes (so daß die Finger die Stromrichtung anzeigen), die Handfläche der Nadel zugekehrt, dann wandert der Nordpol nach der Richtung des ab gespreizten Daumens aus (Abb. 316, Abb. 317).

3. Gestalt der Kraftlinien. Die magnetischen Kraftlinien um einen geradlinigen stromdurchflossenen Leiter sind Kreise. Für ein Auge, das in der Stromrichtung blickt, umkreisen sie den Strom im Sinne des Uhrzeigers. Bei genügend starkem Strom können sie durch Eisenfeilspäne sichtbar gemacht werden (Abb. 318 a und 318 b).

4. Drahtspule. Wird ein stromdurchflossener Draht zu einer kreisförmigen Schleife gebogen, so laufen die Kraftlinien des ihn umgebenden Magnetfeldes durch die Schleife hindurch und kehren außerhalb der Schleife in sich zurück (Abb. 319 a, b).

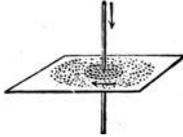


Abb. 318 a.

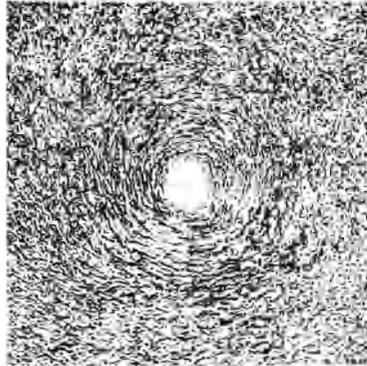


Abb. 318 b.

Kraftlinien um einen geraden Draht.

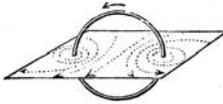


Abb. 319 a.

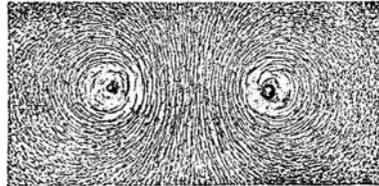


Abb. 319 b.

Kraftlinien in der Umgebung eines kreisförmigen Drahtes.

Eine stromdurchflossene Drahtspirale, wie in Abb. 320 dargestellt, wird in ihrem Innern von einem nahezu homogenen Magnetfeld durchzogen. Im Außenraum ist ihr Magnetfeld dem eines Stabmagnets

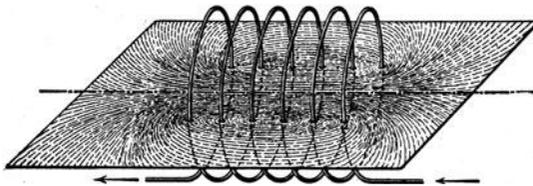


Abb. 320. Kraftfeld einer Stromspule.

sehr ähnlich (in Abb. 320 liegt der Nordpol links). Statt solcher Drahtspiralen benutzt man meist Drahtspulen aus isoliertem Draht, der in beliebig vielen Lagen übereinander gewickelt werden kann.

5. Galvanoskop, Galvanometer. Das Magnetfeld im Innern einer Spule von vielen Windungen kann dazu dienen, einen schwachen, durch den Draht fließenden

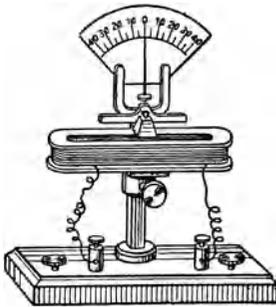


Abb. 321. Galvanoskop.

Strom nachzuweisen. Bei dem in Abb. 321 abgebildeten Instrument ist ein kleiner Magnet um eine horizontale Achse beweglich. Wird durch die unter ihm befindliche längliche Spule ein Strom geschickt, so wird der Nordpol nach oben, der Südpol nach unten getrieben oder umgekehrt, je nach der Stromrichtung. Man liest die Neigung des Magnets an der Skale mittels des Zeigers ab. Die Spule kann der Nadel genähert oder von ihr entfernt werden, dadurch wird die Empfindlichkeit des Instruments mehr oder weniger groß. Instrumente dieser und ähnlicher Art, die das Vorhandensein eines Stromes anzeigen, werden Galvanoskope genannt. Sind sie feiner gebaut und zum Messen der Stromstärke geeignet, so heißen sie Galvanometer.

(Siehe Übungsaufgaben: Elektrizität 1, 2.)

§ 163. Elektromagnetismus.

1. Stabförmiger Elektromagnet. Schiebt man in eine stromdurchflossene Spule einen Eisenkern, so wird dieser durch Induktion magnetisch, d. h. seine Molekularmagnete stellen sich in die Feldrichtung ein. Zu den eigentlichen Kraftlinien des Stromes kommen dann noch die der gleichgerichteten Molekularmagnete hinzu, so daß viel mehr Kraftlinien sowohl die Spule als auch den Außenraum durchsetzen. Man erhält so einen stabförmigen Elektromagnet, dessen Polbestimmung (ebenso wie die der anderen Elektromagnete) nach der Regel erfolgen kann:

Man lege die rechte Hand in die Richtung des Stromes, die Handfläche dem Eisen zugekehrt, so entsteht der Nordpol in der Richtung des abgesehenen Daumens.

2. Hufeisen-Elektromagnet. Man kann sich den stabförmigen Elektromagnet hufeisenförmig gebogen denken. Dabei braucht nicht der ganze Eisenkern bewickelt zu sein; es kann auch auf jeden Schenkel des Hufeisens eine Spule geschoben werden, wobei auf richtige Stromrichtung zu achten ist (Abb. 322).

3. Polloser Elektromagnet. Denkt man sich die Pole eines Hufeisen-Elektromagnets ganz zusammengebogen und miteinander vereinigt, so entsteht ein polloser Elektromagnet (Abb. 323). Bei ihm kommen auf dem ganzen Wege durch das Spuleninnere zu den Kraftlinien des Stromes die der Molekularmagnete hinzu. So kommt es, daß im Eisen je nach der Feldstärke und der Eisensorte 100- bis 2000 mal soviel Kraftlinien entstehen als in derselben ringförmigen Spule ohne Eisenfüllung. Ein solcher Magnet übt nach außen keinerlei magnetische Wirkung aus,

wohl aber eine starke Wirkung auf eine zweite, den Eisenkern umgebende Spule (Transformator § 177, 201).

Wegen der Erhöhung der Kraftlinienzahl bei Anwesenheit von Eisen in einer Spule sagt man auch, das Eisen sei für magnetische Kraftlinien durchlässiger, oder es biete ihnen einen besseren Weg als die Luft oder der leere Raum.

4. Amperewindungszahl. Die Stärke eines Elektromagnets hängt wesentlich ab von der Anzahl der Spulenwindungen und der Stromstärke in ihnen. Als Amperewindungszahl bezeichnet man das Produkt: Windungszahl mal Amperezahl.

Eine Spule von 100 Windungen, in denen ein Strom von 2,5 A fließt, hat dieselbe Amperewindungszahl 250 und infolgedessen dieselbe magnetisierende Wirkung wie z. B. eine Spule von nur 50 Windungen bei einer Stromstärke von 5 A.

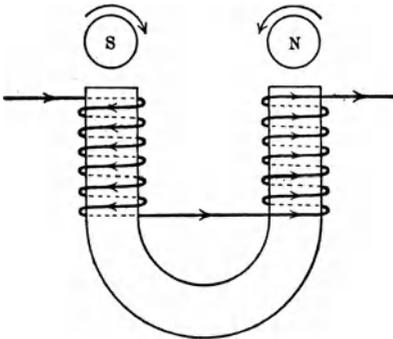


Abb. 322. Hufeisen-Elektromagnet.

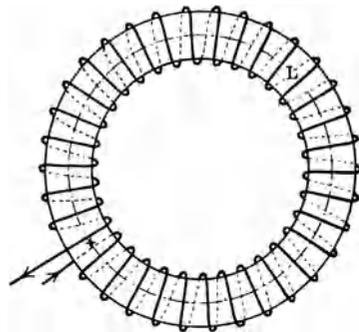


Abb. 323. Polloser Elektromagnet.

5. Halbfester Magnetismus, Hysterisis. Unterbricht man den Strom in der Elektromagnetwicklung, so verschwindet das Spulenfeld sofort ganz, ebenso bei weichem Eisen der größte Teil der von den gerichteten Molekularmagneten herrührenden Kraftlinien. Es bleibt jedoch je nach der Härte des Eisens eine gewisse „halbfeste“ Magnetisierung zurück.

Nimmt die Stromstärke in der Wicklung zunächst zu und sodann wieder ab, so ist der Magnetismus des Eisens bei ansteigender Stromstärke geringer, bei absteigender größer als der Mittelwert. Diese Erscheinung wird als Hysterisis (Zurückbleiben) bezeichnet.

§ 164. Anwendungen des Elektromagnetismus.

Von den Anwendungen des Elektromagnetismus seien genannt:

1. Herstellung permanenter Magnete. Das von einem starken Strom in einer Spule erzeugte kräftige Magnetfeld bietet ein bequemes Mittel, um gehärtete Stahlstäbe und Kompaßnadeln zu magnetisieren.

2. Lasthebemagnete werden in Eisenwerken und im Schiffsbetrieb beim Laden und Löschen von Eisenladungen gebraucht. Abb. 324 stellt einen schematischen Querschnitt eines Lastmagnets dar.

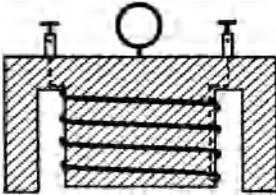


Abb. 324. Schematischer Durchschnitt durch einen Lastmagnet.

3. Der elektromagnetische Telegraph besteht aus einer Stromquelle, dem Morseschreiber, der Morsetaste und der Leitung von der Gebe- zur Empfangsstation. Der Morseschreiber enthält einen Elektromagnet, der jedesmal, wenn der Strom auf der Gebestation geschlossen wird, einen Anker anzieht (Abb. 325). Dadurch wird ein den Anker tragender Hebel in Bewegung gesetzt und ein Stift oder ein Farbrädchen gegen einen Papierstreifen gedrückt. Ein Uhrwerk zieht diesen Streifen gleichförmig weiter. Durch kürzeres oder längeres Niederdrücken der Taste auf der Gebestation kann man Morsezeichen nach der Empfangsstation übermitteln.

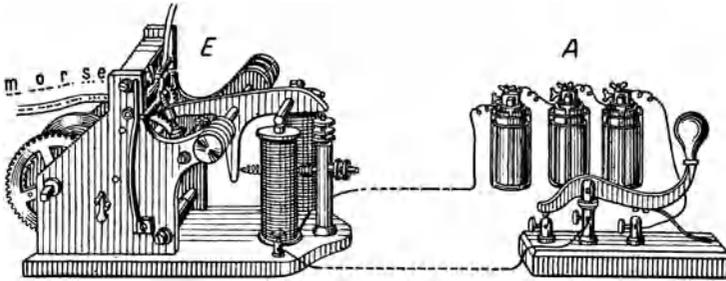


Abb. 325. Morseschreiber.

4. Relais. Sind die Stationen weit voneinander entfernt, so läßt man den Linienstrom nicht unmittelbar den Morseschreiber, sondern nur ein Relais betätigen. Dieses besteht aus einem Elektromagnet, der einen leicht beweglichen Anker anzieht, wodurch ein mit ihm verbundener Kontakt den Strom einer Lokalbatterie schließt. Dieser Strom erst setzt den Morseschreiber in Tätigkeit. Der Kunstgriff, durch ein Relais eine Energiequelle auszulösen, wird auch sonst vielfach benutzt (Relais beim Selbststeuerer, Signalrelais beim Kreiselpaß, „Schützensteuerung“ der elektrischen Ladewinden).

5. Die elektrische Klingel (Abb. 326) enthält einen Elektromagnet E , dem gegenüber ein Anker A durch eine in c befestigte Feder gehalten wird. Ein mit dem Anker verbundener Klöppel schlägt gegen eine Glocke, sobald der Elektromagnet den Anker anzieht. Damit bei Stromschluß nicht nur ein einmaliges Anschlagen, sondern ein fortgesetztes Klingeln ertönt, ist der bei a ankommende und von da die Schenkel des Elektromagnets umkreisende Strom bei c in die Ankerfeder und von dieser über eine Kontaktfeder F zur Kontaktschraube K geführt, von wo er über b zur Stromquelle zurückläuft. Bei Anziehen des Ankers entfernt sich F von K , so daß der Strom an dieser Stelle unterbrochen wird. Dadurch wird der Elektromagnet unmagnetisch, er läßt den Anker los, F kommt wieder in Berührung mit K , der Strom fließt wieder und der gleiche Vorgang wiederholt sich fortgesetzt, solange der Strom geschlossen ist. Ähnlich gebaute Vorrichtungen werden auch sonst zum selbsttätigen Unterbrechen und Schließen von Strömen benutzt. Sie werden als Wagnersche Hammerunterbrecher bezeichnet.

6. Weicheisenstrommesser. Ein Stück weiches Eisen wird in eine stromdurchflossene Spule hineingezogen. Abb. 327 stellt ein auf dieser Tatsache beruhendes Amperemeter dar. Der zu messende Strom wird durch die aufrecht stehende Drahtspule geleitet. Dadurch wird ein kleiner, an einer Spiralfeder hängender Weicheisenzylinder in die Spule

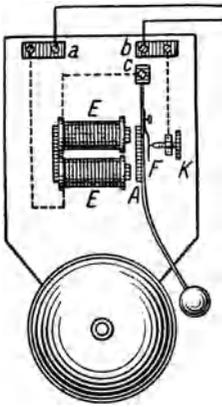


Abb. 326. Elektrische Klingel.

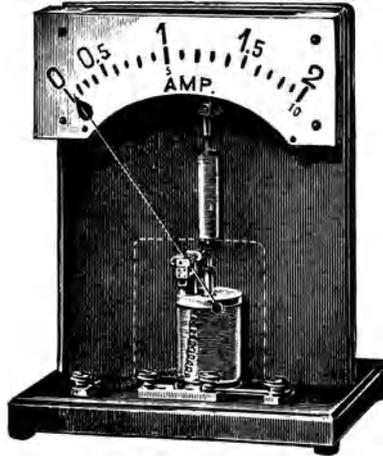
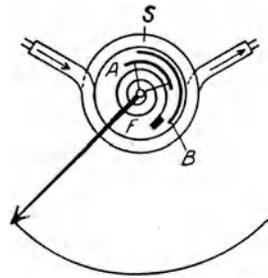


Abb. 327. Weicheisenstrommesser.

hineingezogen, und zwar um so tiefer, je stärker der Strom ist. Die Bewegung wird durch einen Hebel auf einen Zeiger übertragen, der vor einer nach Ampere geteilten Skale spielt. Dieser Strommesser gehört zur Klasse der Weicheiseninstrumente.

Abb. 328 zeigt die Einrichtung der meisten technisch gebrauchten Weicheiseninstrumente. Im Innern einer Spule *S* ist ein gebogener Eisenstreifen *B* an der Wand des Gehäuses befestigt, während ein anderer Streifen *A* um eine Achse, die mit der Spulenchse zusammenfällt, drehbar ist, wobei ihr durch eine Spiralfeder eine Nullstellung angewiesen wird. Fließt Strom durch die Spule, so werden die Streifen gleichsinnig magnetisiert und stoßen einander ab. Die Bewegung von *A* wird durch einen Zeiger sichtbar gemacht.

Abb. 328.
Weicheisenstrommesser.

§ 165. Bewegungsantrieb eines Stromleiters im Magnetfeld.

1. Ableitung und Versuch. Ein Magnetpol erfährt in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters eine Kraft, deren Richtung nach der Rechten-

Hand-Regel zu bestimmen ist (§ 162₂). Da Wirkung und Gegenwirkung einander gleich sind, so erfährt der Leiter von dem Magnetpol den entgegengesetzten Antrieb.

Das läßt sich z. B. durch den in Abb. 329 dargestellten Versuch zeigen. Zwischen den Polen eines Hufeisenmagnets ist ein leicht biegsamer Leiter (Antennenlitze) lose aufgehängt. Es werde ein Strom z. B. in der Richtung von vorn nach hinten hindurchgeschickt. Nach der Rechten-Hand-Regel sucht der Strom den Nordpol nach links zu bewegen. Der Stromleiter weicht bei Stromschluß nach rechts aus.

2. Rechte-Hand-Regel für den Bewegungsantrieb. Die Richtung der Kraft, die ein Stromleiter in einem Magnetfeld erfährt, läßt sich danach durch folgende Regel bestimmen:

Man halte die rechte Hand in die Richtung des positiven Stromes, die Handfläche dem Nordpol zugekehrt (d. h. so, daß man die magnetischen Kraftlinien mit der Hand auffängt), dann erfährt der Stromleiter einen Antrieb nach der Kleinfingerseite.

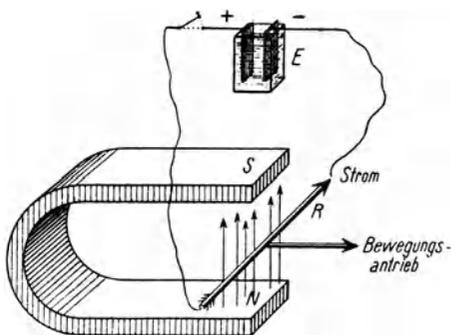


Abb. 329. Bewegung eines Stromleiters in einem Magnetfeld.

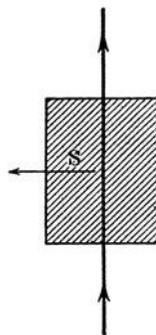


Abb. 330. Stromleiter im Magnetfeld.

Wird ein Stromleiter in der Weise, wie in Abb. 330 dargestellt, über einen Südpol geführt, so ergibt sich ein Antrieb nach links, da die Kraftlinien auf den Südpol zulaufen, die Handfläche also von S abgekehrt zu halten ist.

Auf den Bewegungsantrieben stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld beruhen die Gleichstrom-Elektromotoren (§ 192, 193), sowie die

3. Drehspulstrommesser. Ihr Prinzip wird durch Abb. 331 erläutert. Zwischen den Polen N, S eines kräftigen Hufeisenmagnets ist eine Drahtspule um die Punkte a, b drehbar gelagert. Sie wird durch Spiralfedern so gehalten, daß ihre Windungsebene annähernd parallel zu den von N nach S laufenden Kraftlinien ist. Wird durch die Spule (vermittelt der Spiralfedern) ein Strom geleitet, der z. B. von a nach b fließt, so erfahren die rechts liegenden Spulendrähte nach der obigen Regel einen Antrieb nach unten, die linken einen solchen nach oben. Die Spule dreht

sich daher unter Anspannung der Federn rechts herum, und zwar um so mehr, je stärker der Strom ist.

In Wirklichkeit enthält die Spule viel mehr Windungen als in Abb. 331 gezeichnet ist; der Stahlmagnet ist mit Polschuhen ausgestattet, und im Innern der Spule ist ein Eisenkern angeordnet, der die Kraftlinien zusammenhält.

Bei Umkehrung der Stromrichtung dreht sich die Spule entgegengesetzt. Ist daher der Nullpunkt der Skale nicht in der Mitte, sondern am linken Ende, so ist beim Einschalten des Instrumentes auf richtige Polarität zu achten. Das Gerät ist nur für Gleichstrom brauchbar; für diesen ist es das bequemste und das genaueste Meßgerät.

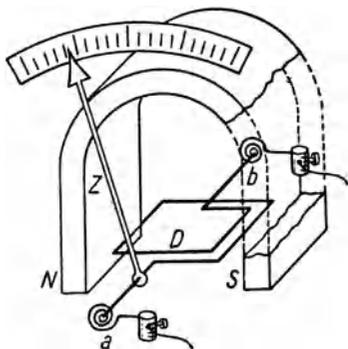


Abb. 331. Prinzip des Drehspul-Instrumentes.

Das Ohmsche Gesetz und seine Anwendung.

§ 166. Widerstand und Leitfähigkeit eines Stromleiters.

1. Versuch. Zwischen die Anschlußklemmen, z. B. einer Lichtleitung, werde ein Draht geschaltet. (Zur Vermeidung eines „Kurzschlusses“ muß er genügend lang und dünn sein!) An einem in die Leitung eingeschalteten Amperemeter lese man die Stärke des durch den Draht fließenden Stromes ab. Macht man diesen Versuch mit Drähten verschiedener Länge, von verschiedenem Querschnitt und von verschiedenem Material, so erhält man sehr verschiedene Stromstärken. Die Drähte haben also eine verschieden große Leitfähigkeit für den elektrischen Strom. Statt von der Leitfähigkeit eines Drahtes spricht man im Elektrizitätswesen meist von seinem Widerstande, d. h. dem umgekehrten Wert der Leitfähigkeit.

Man findet durch die beschriebenen Versuche: ein Draht von doppelter Länge hat den doppelten Widerstand usw., ein Draht von doppeltem Querschnitt hat den halben Widerstand usw. Allgemein:

|| Der Widerstand eines Drahtes ist proportional seiner Länge und
|| umgekehrt proportional seinem Querschnitt.

Außerdem ist er in hohem Maße abhängig vom Material, aus dem der Draht besteht.

2. Einheit des Widerstandes. Zur Messung des Widerstandes benutzt man eine Einheit, die als Ohm (Ω) bezeichnet wird:

|| Ein Ohm (Ω) ist der Widerstand eines Quecksilberfadens von 1 qmm
|| Querschnitt und 106,3 cm Länge bei 0° C.

3. Berechnung des Widerstandes eines Drahtes. Bezeichnet man als spezifischen Widerstand c den Widerstand eines Drahtes von 1 m

Länge und 1 qmm Querschnitt, so ist der Widerstand eines Drahtes von l m Länge und q qmm Querschnitt durch die Formel gegeben:

$$w = c \cdot \frac{l}{q} (\Omega)$$

Die folgende Tafel gibt einige Werte des spezifischen Widerstandes c und der spezifischen Leitfähigkeit λ . Letztere ist der umgekehrte Wert des spezifischen Widerstandes.

Material	Spezifischer Widerstand c	Spezifische Leitfähigkeit $\lambda = \frac{1}{c}$
Silber	0,016	62,5
Kupfer	0,0175	57
Eisen	0,12	8,4
Quecksilber	0,95	1,05
Nickelin	0,40	2,5
Konstantan	0,5	2,0
Chromnickel	1,1	0,91

Kupfer eignet sich wegen seines geringen spezifischen Widerstandes und seines im Vergleich zu Silber niedrigen Preises am besten für elektrische Leitungen.

Die durch hohen spezifischen Widerstand ausgezeichneten Legierungen Nickelin, Konstantan und Chromnickel werden vielfach für Regulier- und Vorschaltwiderstände verwandt.

Beispiele. 1. Ein 400 m langer Eisendraht von 1,5 qmm Querschnitt hat einen Widerstand

$$w = 0,12 \cdot \frac{400}{1,5} \Omega = 32 \Omega.$$

2. Eine 4,5 km lange Kupferdrahtleitung von kreisförmigem Querschnitt und 3 mm Durchmesser hat einen Widerstand

$$w = 0,0175 \cdot \frac{4500}{1,5^2 \cdot \pi} \Omega = 11,1 \Omega.$$

4. Veränderung des Widerstandes mit der Temperatur, Eisenwiderstände. Der Widerstand der Metalle steigt mit der Temperatur, z. B. der des Eisens um etwa $\frac{1}{300}$ seines Wertes für jeden Grad Temperaturerhöhung. Davon macht man Gebrauch zur selbsttätigen Regulierung von Strömen, z. B. des Heizstromes von Elektronenröhren. Schwankungen der Stromstärke würden entstehen durch Spannungsschwankungen der Stromquelle. Man schaltet nun in den Stromkreis einen Eisendraht. Dieser wird durch den hindurchfließenden Strom erwärmt. Wächst infolge Erhöhung der Spannung die Stromstärke, so wird der Eisendraht stärker erhitzt, dadurch wird sein Widerstand größer, was ein Sinken der Stromstärke zur Folge hat. Bei passender Wahl der Länge und Dicke des Eisenwiderstandes bleibt die Stromstärke nahezu konstant.

Der Widerstand von Konstantan und Nickelin ist von der Temperatur fast unabhängig; der Widerstand der Flüssigkeiten und der Kohle nimmt mit wachsender Temperatur ab.

5. Messung des Widerstandes. Man kann den Widerstand eines Drahtes auch durch Vergleich mit einem bekannten Normalwiderstand unter Benutzung der in § 173 beschriebenen Brückenschaltung messen.

Dabei verwendet man meist Normalwiderstände abgestufter Größe, die in Kästen vereinigt sind (Abb. 332). Die Leitung wird an die Klemmen k und k_1 angeschlossen. Wenn alle Stöpsel zwischen den gezeichneten Messingblöcken eingesteckt sind, so ist der zwischen k und k_1 liegende Widerstand verschwindend gering. Durch Herausnehmen eines Stöpsels wird der zwischen den zugehörigen Blöcken liegende Widerstand eingeschaltet. In der Figur sind die Stöpsel für 100, 40, 30 und 20 Ω herausgenommen, d. h. es liegt ein Widerstand von 190 Ω zwischen k und k_1 .

6. Schaltung von Widerständen. Bei Hintereinanderschaltung von Drähten addieren sich deren Widerstände. Schaltet man dagegen zwei oder drei Drähte von gleichem Widerstand parallel, so hat der Doppeldraht nur den halben Widerstand, der dreifache Draht nur ein Drittel des Widerstandes des einzelnen Drahtes (Allg. s. § 170).

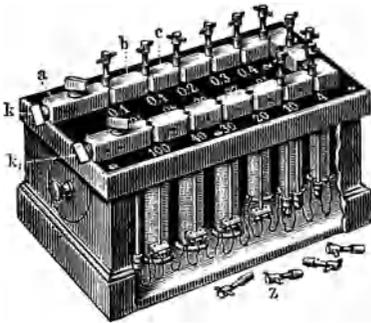


Abb. 332. Meßwiderstand.

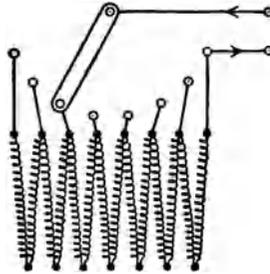


Abb. 333. Kurbelwiderstand.

7. Regulierwiderstände. Zur Regulierung des Stromes in einer Leitung schaltet man häufig in sie Regulierwiderstände ein.

Abb. 333 stellt schematisch einen Kurbelwiderstand dar. Steht die gezeichnete Kurbel auf dem am weitesten links befindlichen Kontakt, so ist der Widerstand sämtlicher Spiralen eingeschaltet; dreht man sie mehr nach rechts, so verbleiben weniger Spiralen im Stromkreis, der Widerstand der Leitung wird kleiner.



Abb. 334. Schiebewiderstand.

Eine stetigere Regulierung erhält man durch Schiebewiderstände (Abb. 334). Bei ihnen kann ein Gleitkontakt C über eine auf Isoliermaterial gewickelte Widerstandsspule von blankem Draht verschoben werden.

(Siehe Übungsaufgaben: Elektrizität 3 bis 13.)

§ 167. Das Ohmsche Gesetz für einen Leiter.

1. Erklärung des Volt, Ohmsches Gesetz. Nach den in § 166 angeführten Versuch ist die Stromstärke in einem Leiter seinem Leitvermögen proportional, also umgekehrt proportional zu seinem Widerstand. Außerdem hängt die Stromstärke von dem Spannungsgefälle, d. h. dem Spannungsunterschiede an den Enden des Leiters ab, und zwar ist sie diesem genau proportional. Trifft man nun noch für die Einheit der Spannung die Festsetzung:

Ein Volt ist der Spannungsunterschied, der an den Enden eines Drahtes von 1 Ohm Widerstand herrschen muß, wenn in ihm ein Strom von 1 Ampere fließen soll,

so gilt der als **Ohmsches Gesetz für einen Leiter** bezeichnete Satz:

$$(I) \quad i = \frac{e}{w}$$

Die Stromstärke in einem beliebigen Leiterstück ist gleich dem Spannungsunterschied der beiden Endpunkte, dividiert durch den Widerstand w des Leiterstückes.

2. Spannungsabfall. Wenn von den drei im Ohmschen Gesetz vorkommenden Größen zwei bekannt sind, so kann man die dritte berechnen. Insbesondere ist

$$(1a) \quad e = i \cdot w$$

d. h.: Wenn in einem Leiter von w Ohm Widerstand ein Strom von i Amp. fließt, so haben seine Enden einen Spannungsunterschied von $e = i \cdot w$ Volt.

Dieser Spannungsabfall in dem Leiter wird auch wohl als „Spannungsverlust“ in ihm bezeichnet, insofern, als von der gesamten zur Verfügung stehenden Spannung dieser Teil verbraucht wird, um den Strom durch diesen Leiter zu treiben, oder um den Widerstand dieses Leiters zu überwinden.

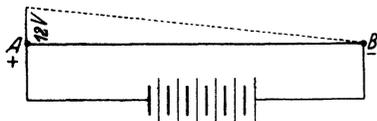


Abb. 335. Spannungsabfall.

Ist der Leiter ein gleichförmiger Draht, ohne Verdickungen oder schadhafte Stellen, so fällt in ihm die Spannung gleichmäßig ab, wie in Abb. 335 und 310 schematisch dargestellt ist. Man vergleiche damit die Abb. 147, die den Druckabfall in einer wasserdurchströmten Röhre veranschaulicht.

3. Spannungsabfall in hintereinander geschalteten Leiterstücken.

Auch für mehrere hintereinander geschaltete Drähte gilt das Ohmsche Gesetz. Wenn die einzelnen Drähte z. B. die Widerstände w_1 , w_2 , w_3

besitzen, so ist der Gesamtwiderstand $w_1 + w_2 + w_3$. Bedeutet e den Spannungsunterschied zwischen dem Anfang des ersten und dem Ende des letzten Drahtes, so ist

$$i = \frac{e}{w_1 + w_2 + w_3}.$$

Nach Ermittlung von i findet man die Spannungsabfälle e_1, e_2, e_3 , die auf die einzelnen Leiterstücke kommen, gemäß Gleichung (Ia) zu

$$e_1 = i \cdot w_1, \quad e_2 = i \cdot w_2, \quad e_3 = i \cdot w_3,$$

d. h. in Leitern mit großem Widerstand findet ein starker, in Leitern mit geringem Widerstand ein geringer Spannungsverlust statt.

Beispiel. Drei Drähte von $w_1 = 2,4, w_2 = 3,6, w_3 = 6,0 \Omega$ Widerstand sind hintereinander geschaltet und mit den Punkten A, B (Abb. 336) an eine Stromquelle gelegt. Die Spannung in A beträgt $+ 24$ Volt, in B ist sie gleich Null. Welcher Strom fließt und welche Spannung herrscht in den Punkten C und D ?

Es ist

$$i = \frac{24}{2,4 + 3,6 + 6,0} = 2 \text{ Amp.}$$

Von der Gesamtspannung wird verbraucht im ersten Draht $2 \cdot 2,4 = 4,8$ Volt; im zweiten Draht $2 \cdot 3,6 = 7,2$ Volt; im dritten Draht $2 \cdot 6,0 = 12,0$ Volt. Daher ist die Spannung in C gleich $24 - 4,8 = 19,2$ Volt, in D gleich $12,0$ Volt. Um dieses Beispiel durch eine Wasserströmung zu veranschaulichen, hat man sich statt eines gleichmäßig dicken Rohres drei Röhren hintereinandergesetzt zu denken, von denen die erste am weitesten, die zweite mittelweit und die dritte am engsten ist. In der weiten Röhre nimmt der Druck am wenigsten, in der engsten am meisten ab, da eine größere Druckdifferenz nötig ist, um denselben Wasserstrom durch eine Röhre von geringerem Querschnitt zu treiben.

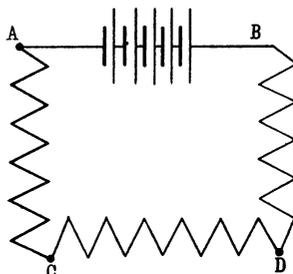


Abb. 336. Spannungsabfall bei Reihenschaltung von Drähten.

4. Der Spannungsverlust in Zuleitungskabeln läßt sich hiernach aus deren Widerstand und der Stärke des Betriebsstromes berechnen:

Beispiel. Ein Motor mit 12 Amp. Stromverbrauch ist mittels zweier Kupferkabel, die je $0,5 \Omega$ Widerstand besitzen, an eine Stromquelle von 110 Volt Spannung angeschlossen. Welcher Spannungsunterschied herrscht an den Klemmen des Motors?

Um den Strom von 12 Amp. durch die Hinleitung von $0,5 \Omega$ zu treiben, muß man an den Enden einen Spannungsunterschied von $12 \cdot 0,5 = 6$ Volt haben. Dasselbe gilt für die Rückleitung. Im ganzen gehen in der Zuleitung mithin 12 Volt verloren, und es bleiben für den Motor 98 Volt.

Würde man die Leitung durch eine gleich dicke Eisenleitung ersetzen, so würde deren Widerstand etwa siebenmal so groß sein (s. Tab. § 166₃), der Spannungsverlust würde daher statt 12 Volt etwa 84 Volt betragen und für den Motor würden nur 26 Volt übrigbleiben!

(Siehe Übungsbeispiele: Elektrizität 14 bis 23.)

§ 168. Das Ohmsche Gesetz für den ganzen Stromkreis.

Es soll jetzt die Stromquelle selbst mit in Betracht gezogen werden.

1. Versuch. Eine Kupfer- und eine Zinkplatte seien in schwach angesäuertes Wasser getaucht. Mit der Kupferplatte sei die „Klemme“ A , mit dem Zink die Klemme B verbunden. Zwischen A und B sei eine äußere Leitung mit dem Widerstand w_a gelegt. In sie sei außerdem ein Amperemeter eingeschaltet, an dem die Stromstärke abgelesen werden kann. Man entferne jetzt die Platten weiter voneinander: die Stromstärke sinkt; man nähere sie einander: die Stromstärke steigt.

2. Innerer Widerstand. Da der Spannungsunterschied zwischen den Platten durch ihre größere oder geringere Entfernung nicht beeinflusst wird, so kann die Änderung der Stromstärke nur in dem verschiedenen Widerstand der zwischen den Platten befindlichen Flüssigkeitsschicht liegen. In der Tat muß die im äußeren Kreise von A nach B fließende Elektrizität im Innern des Elementes von B nach A zurückströmen. Im Gegensatz zu w_a soll der Widerstand, den sie dabei findet, als innerer Widerstand w_i bezeichnet werden.

Durch Versuche findet man, daß als

3. Ohmsches Gesetz für den ganzen Stromkreis die Formel gilt:

$$(II) \quad i = \frac{EMK}{w_i + w_a}$$

|| In jedem Gleichstromkreise ist die Stromstärke in Ampere gleich der elektromotorischen Kraft der Stromquelle in Volt, dividiert durch den Gesamtwiderstand der Strombahn in Ohm.

Dieses Gesetz gilt für alle Stromkreise. Die Stromquelle kann z. B. auch eine Dynamomaschine sein; auch eine solche hat einen inneren Widerstand, der zusammen mit dem äußeren Widerstand den Gesamtwiderstand der Strombahn darstellt.

Die elektromotorische Kraft (EMK) der Stromquelle ist nach § 158, der Spannungsunterschied an den Polen der offenen Stromquelle, d. h. wenn an diese keine äußere Leitung angeschaltet ist.

Im Ohmschen Gesetz für den ganzen Stromkreis treten vier Größen auf. Sind drei von diesen Größen gegeben, so kann die vierte nach Formel (II) berechnet werden.

Beispiele. 1. Ein Element von der EMK = 1,4 Volt und einem inneren Widerstand = 0,3 Ω wird durch einen Draht von 2,5 Ω Widerstand geschlossen. Welche Stromstärke entsteht? — Die obige Formel ergibt $i = 0,5$ Amp.

2. Man schließt einen Akkumulator, dessen Platten so groß sind, daß der innere Widerstand = 0 gesetzt werden kann, durch einen Draht von 18 Ω Widerstand. An einem in den Stromkreis eingeschalteten Amperemeter von 1 Ω Wider-

stand liest man die Stromstärke 0,1 Amp. ab. Wie groß ist die elektromotorische Kraft E des Akkumulators?

Der Widerstand beträgt $18 + 1 = 19 \Omega$; folglich ist $E = 0,1 \cdot 19 = 1,9$ Volt.

3. Eine Batterie von sechs Elementen besitzt eine EMK von 12,4 Volt. Wenn sie durch einen Draht von $29,5 \Omega$ Widerstand geschlossen wird, fließt in diesem ein Strom von 0,4 Amp. Wie groß ist der innere Widerstand der Batterie?

Der Gesamtwiderstand des Stromkreises ist nach Formel (II) $w = \frac{12,4}{0,4} = 31 \Omega$. Davon $w_a = 29,5$ subtrahiert, ergibt den Wert $w_i = 1,5 \Omega$.

4. Eine Dynamo zeigt offen eine Spannung von 114 Volt, nach Einschalten von vier Lampen von je 240Ω Widerstand sinkt die Spannung auf 110 Volt (bei unveränderter Tourenzahl).

Der Widerstand der vier parallel geschalteten Lampen ist $240 : 4 = 60 \Omega$. Daraus folgt die Stromstärke $i = 110 : 60 = 1,83$ Amp. Die EMK beträgt 114 Volt, also ist nach Gleichung (II) der Gesamtwiderstand $w_i + w_a = 114 : 1,83 = 62,3 \Omega$, also $w_i = 2,3 \Omega$.

4. **Erläuterung durch Wasserströmung.** Die Strömung der Elektrizität im Stromkreis erfolgt entsprechend wie die Strömung von Wasser, das etwa durch eine Kreiselpumpe in einer geschlossenen Röhrenleitung in Bewegung gesetzt wird. Der EMK entspricht die treibende Kraft der Pumpe. Je größer diese Kraft ist, um so stärker ist die entstehende Strömung; diese fällt um so schwächer aus, je größere Widerstände das Wasser beim Durchströmen der äußeren Leitung und der Pumpe zu überwinden hat (s. Abb. 337).

5. Wenn man n gleiche Elemente parallel schaltet, so erzielt man keine Erhöhung der EMK (§ 159₁), wohl aber ist der innere Widerstand der Batterie nur der n -te Teil von dem des einzelnen Elementes. Die Stromstärke ist daher

$$\text{bei Parallelschaltung} \quad i = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + w_a}$$

wenn w_i den inneren Widerstand des einzelnen Elementes und E seine EMK bezeichnen.

Parallelschaltung wird angewendet, wenn der äußere Widerstand klein ist. Dann ist es zur Erzielung einer großen Stromstärke vorteilhaft, auch den inneren Widerstand klein zu machen.

6. Wenn man n gleiche Elemente hintereinander („in Reihe“) schaltet, so ist die EMK der Batterie die n -fache des einzelnen Elementes (§ 159₂), aber auch der innere Widerstand ist n -mal so groß wie der des Einzelelementes. Also ist in der obigen Bezeichnung

$$\text{bei Hintereinanderschaltung} \quad i = \frac{n \cdot E}{n \cdot w_i + w_a}$$

Reihenschaltung wird angewendet, wenn der äußere Widerstand groß ist. In diesem Falle muß man eine große EMK haben, um den Strom durch die äußere Leitung zu treiben.

(Siehe Übungsaufgaben: Elektrizität 24 bis 27.)

§ 169. Polklemmenspannung und EMK.

1. Sobald die Klemmen einer Stromquelle (Element, Batterie, Dynamo) durch eine äußere Leitung geschlossen werden, ist die Spannung

zwischen den Klemmen kleiner als die EMK der Stromquelle. Ist die Stromstärke im Stromkreise i Amp., der innere Widerstand der Stromquelle w_i , so ist der Spannungsabfall in der Stromquelle nach dem Ohmschen Gesetz $i \cdot w_i$ Volt. Also ist die Klemmenspannung

$$(III) \quad e_p = \text{EMK} - i \cdot w_i.$$

Die „Polklemmenspannung“ e_p ist demnach stets kleiner als die EMK der Stromquelle, und zwar um so mehr, je stärker der fließende Strom und je größer der innere Widerstand der Stromquelle ist.

2. Erläuterung durch Wasserströmung. A und B (Abb. 337) seien zwei Wasser enthaltende Gefäße. Durch eine Kreiselpumpe oder Wasserschnecke bei C werde Wasser von B nach A gedrückt.

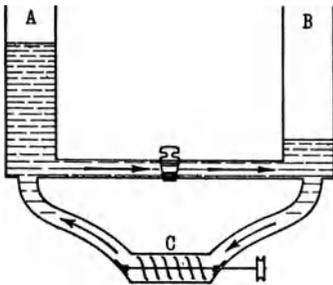


Abb. 337. EMK und Klemmenspannung im Wasserbeispiel.

Die Gefäße seien durch ein Rohr verbunden, das durch einen Hahn abgeschlossen werden kann. Bei gleichmäßig arbeitender Pumpe wird der Höhenunterschied des Wassers in A und B dann am größten sein, wenn der Hahn geschlossen ist. Diesem Höchstbetrage des Höhenunterschiedes entspricht im elektrischen Falle die EMK. Sobald der Hahn mehr und mehr geöffnet wird, sinkt der Spiegel in A , während er in B steigt, und zwar um so mehr, je stärker der Strom im Verbindungsrohr ist. Zu jeder Hahnstellung, d. h. zu jedem Werte des Widerstandes im Verbindungsrohr, gehört ein bestimmter

Wert, des Höhenunterschiedes. Dieser entspricht bei einem elektrischen Stromkreise der Klemmenspannung.

3. Stromstärke bei Kurzschluß. Die Stromstärke wird am größten bei „Kurzschluß“, d. h. wenn der Widerstand des äußeren Schließungskreises verschwindend klein gemacht wird. Auch dann kann die Stromstärke nicht über jedes beliebige Maß anwachsen, da immer noch der innere Widerstand der Stromquelle zu überwinden bleibt. Die ganze EMK wird dann zur Überwindung dieses Widerstandes verbraucht.

Beispiel. Es seien 12 Elemente von je 1 Volt EMK und je $0,1 \Omega$ inneren Widerstand hintereinander geschaltet. Dann ist die EMK der Batterie $E = 12$ Volt ihr innerer Widerstand $w_i = 1,2 \Omega$. Schließt man die Klemmen durch einer dicken Kupferbügel kurz, so ist $e_p = 0$. Es entsteht ein Strom, der sich aus Gleichung (III) zu $i = 10$ Amp. berechnet.

(Siehe Übungsaufgaben: Elektrizität 28 bis 31.)

§ 170. Stromverzweigung.

1. Stromverzweigung. Die äußere Leitung eines Stromkreises (Abb. 338) teile sich bei A in zwei Teile, die sich in B wieder vereinigen. Die Widerstände w_1 und w_2 der Zweigleitungen seien bekannt. Wie verhalten sich die Zweigströme i_1 und i_2 zueinander, und wie groß muß der Widerstand w eines Einzeldrahtes sein, der, zwischen A und B eingeschaltet, denselben Hauptstrom i liefert?

Bei *A* muß durch den Strom *i* ebensoviel Elektrizität zufließen, wie durch die Ströme *i*₁ und *i*₂ weggeführt wird. Ebenso muß bei *B* durch *i* ebensoviel Elektrizität weggeführt werden, wie durch *i*₁ und *i*₂ herangebracht wird:

Der Hauptstrom ist gleich der Summe der Zweigströme:

$$i = i_1 + i_2.$$

Bezeichnet man den Spannungsunterschied zwischen *A* und *B* mit *e*_{*a b*}, so ist nach dem Ohmschen Gesetz

$$i_1 = \frac{e_{ab}}{w_1} \quad \text{und} \quad i_2 = \frac{e_{ab}}{w_2}.$$

Hieraus folgt

$$i_1 : i_2 = w_2 : w_1, \text{ d. h.}$$

Die Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweige.

2. Ersatzwiderstand. Man denke sich die Zweigwiderstände zwischen *A* und *B* weggenommen und dafür einen Einzeldraht eingesetzt, der die Stromstärke *i* und daher auch den Spannungsunterschied *e*_{*a b*} unverändert läßt. Der Widerstand *w* dieses Drahtes heißt der Ersatzwiderstand für die parallel geschalteten Drähte mit den Widerständen *w*₁ und *w*₂.

Nach dem Ohmschen Gesetz ist dann auch $i = \frac{e_{ab}}{w}$.

Setzt man die Werte von *i*, *i*₁ und *i*₂ in die Gleichung $i = i_1 + i_2$ ein, so erhält man

$$\frac{e_{ab}}{w} = \frac{e_{ab}}{w_1} + \frac{e_{ab}}{w_2}.$$

Dividiert man auf beiden Seiten durch *e*_{*a b*}, so erhält man den Satz:

Der Widerstand *w* (Ersatzwiderstand) einer Verzweigung von zwei Drähten mit den Widerständen *w*₁ und *w*₂ ist nach der Formel zu berechnen:

$$\boxed{\frac{1}{w} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2}}$$

Der umgekehrte Wert des Widerstandes eines Drahtes heißt nach § 166₁ seine Leitfähigkeit. Die obige Formel läßt sich daher auch in der anschaulicheren Fassung aussprechen:

Die Leitfähigkeit parallel geschalteter Drähte ist gleich der Summe der Leitfähigkeiten der Einzeldrähte.

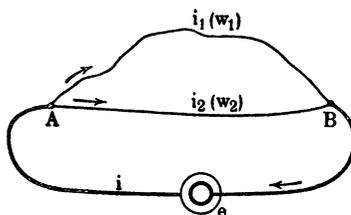


Abb. 338. Stromverzweigung.

3. Verallgemeinerung. Entsprechend findet man für beliebig viele Drähte, die in einem Punkte A auseinander- und in B wieder zusammenlaufen:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \cdots i_n$$

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3} + \cdots \frac{1}{w_n}$$

Werden n Drähte von gleichem Widerstand w_1 parallel geschaltet, so ist die Leitfähigkeit der Verzweigung die n -fache des Einzeldrahtes, der Widerstand also gleich $\frac{w_1}{n}$.

4. Spannungsteilung (Potentiometerschaltung). Hat man eine höhere Spannung zur Verfügung, als man für einen bestimmten Zweck

gebraucht, so kann man von ihr einen Teil in der folgenden Weise abgreifen. Zwischen die beiden Hauptleitungen (Abb. 339), die sich auf dem Spannungsunterschied e befinden mögen, legt man eine Leitung vom Widerstand w , so daß ständig ein Strom von der Stärke

$$J = \frac{e}{w}$$

in ihr fließt. Legt man zwischen zwei Punkte $a b$ des eingeschalteten Widerstandes eine Nebenleitung, so ist in ihr nur ein Teil e_1 der Spannung e wirksam.

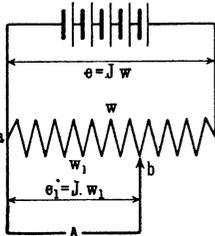


Abb. 339. Spannungsteilung (Potentiometerschaltung).

Derartige Schaltungen werden an Bord beispielsweise benutzt, um mittels des Schiffnetzes von 110 Volt Spannung die für viel geringere Spannungen eingerichteten Signal- und Telephonanlagen zu betreiben.

In der drahtlosen Telegraphie wendet man Spannungsteilungen unter dem Namen Potentiometerschaltung vielfach an, um die für einen Apparat benötigte Spannung regulieren zu können. Zu dem Zweck bildet man eine der Anschlußstellen a , b (oder beide) als Gleitkontakt aus. Ist die Stromstärke im Apparat A nur verschwindend gering gegenüber der Stärke J des Gesamtstromes, so gelten die in der Abbildung angegebenen Beziehungen und es ist $e_1 = \frac{w_1}{w} \cdot e$.

(Siehe Übungsaufgaben: Elektrizität 31 bis 34.)

§ 171. Reihenschaltung und Parallelschaltung von Stromverbrauchern.

1. Als **Stromverbraucher** bezeichnet man alle Apparate, in denen der elektrische Strom zu irgend einem Zwecke verwandt wird, wie Glüh-

oder Bogenlampen, Elektromotoren, elektrische Öfen, Zersetzungsapparate und andere. Sie heißen auch **Nutzwiderstände** im Gegensatz zu etwaigen in die Leitung eingeschalteten **Ballastwiderständen**, die nur verhüten sollen, daß der Strom zu stark wird, und zu **Regulierwiderständen**, die zur Regelung der Stromstärke dienen. Die Stromverbraucher werden entweder hintereinander geschaltet (**Reihen- oder Serienschaltung**) oder parallel zueinander (**Parallelschaltung**).

2. Bei Hintereinanderschaltung von Stromverbrauchern addieren sich deren Widerstände. In allen Stromverbrauchern fließt dann ein Strom von derselben Stärke. Je mehr Verbraucher eingeschaltet werden, um so geringer wird die Stromstärke (Abb. 340). Haben n hintereinander geschaltete Verbraucher alle denselben Widerstand w_1 , so ist der Gesamt-widerstand $n \cdot w_1$.

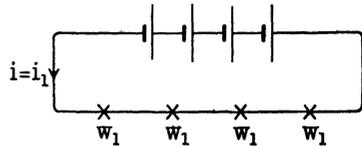


Abb. 340. Reihenschaltung von Stromverbrauchern.

Beispiel. Bogenlampen werden meist zu zweien hintereinander geschaltet. Außerdem wird in die Leitung noch ein Regulierwiderstand gelegt.

3. Wenn bei Parallelschaltung (Abb. 341) die Zuleitungsdrähte gegenüber den Nutzwiderständen oder Verbrauchern nur verschwindend kleinen Widerstand haben, so tritt in ihnen kein nennenswerter Spannungsverlust ein und jeder Verbraucher liegt daher an der vollen Netzspannung.

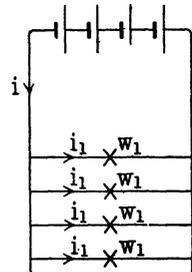


Abb. 341. Parallelschaltung von Stromverbrauchern.

Sind die Widerstände der n Verbraucher unter sich gleich, und zwar gleich w_1 , so ist der Gesamt-widerstand $w = w_1/n$; die Gesamtstromstärke ist $i = n \cdot i_1$.

Beispiel. Glühlampen werden in der Regel parallel geschaltet. Bei Parallelschaltung ist der eine Verbraucher vom anderen fast unabhängig. Voraussetzung ist nur, daß die Hauptzuführungsleitungen genügend stark sind, so daß in ihnen kein nennenswerter Spannungsabfall eintritt, und daß die Stromquelle hinreichend ist, um die Netzspannung auf derselben Höhe zu halten.

§ 172. Amperemeter, Voltmeter. Erweiterung ihrer Meßbereiche.

1. Die wichtigsten Arten von **Amperemetern** sind schon gelegentlich der Wirkungen des elektrischen Stromes beschrieben, nämlich die **Hitzdrahtinstrumente** (§ 160₃), die **Weicheiseninstrumente** (§ 164₆) und die **Drehspulinstrumente** (§ 165₅). **Milliamperemeter** sind Strommesser für sehr geringe Stromstärken.

Amperemeter sind in den Stromkreis einzuschalten, so daß der gesamte zu messende Strom durch sie hindurchfließt; dabei ist es einerlei, an welcher

Stelle des Stromkreises das Gerät eingeschaltet wird (Abb. 342, Vergleich mit Wasseruhr). Das Amperemeter darf keinen nennenswerten Widerstand haben, damit der Spannungsverlust in ihm unbedeutend ist und bei wechselndem Stromverbrauch die Spannung an der Verbrauchsstelle nicht beeinflußt.

2. Erweiterung des Meßbereiches eines Amperemeters. Bei stärkeren Strömen ist es unmöglich, den ganzen Strom durch den Hitzdraht oder die Spule des Amperemeters zu leiten. Man bedient sich in diesem Falle eines einfachen Kunstgriffes. Man schaltet dem Hitzdraht oder dem Draht der Spule einen Draht parallel, der z. B. die neunfache Leitfähigkeit hat, so daß $\frac{9}{10}$ des Stromes am Hitzdraht oder Spulendraht vorbei und nur $\frac{1}{10}$ durch ihn hindurchfließen. Dann sind die Angaben der Skale mit 10 zu multiplizieren, wenn diese nicht unmittelbar für den Gesamtstrom geeicht ist. Bei noch stärkeren Strömen wählt man für den „Nebenschluß“ (engl. „shunt“) die 99fache oder 999fache Leitfähigkeit, so daß die Gesamtstromstärke das Hundertfache oder Tausendfache des durch den Hitzdraht oder die Spule fließenden Stromes ist.

3. Voltmeter. Die Spannungsmessung durch Voltmeter beruht auf dem Ohmschen Gesetz. Man legt zwischen die beiden Punkte, deren Spannungsunterschied e man messen will, eine Nebenleitung von bekanntem, sehr hohen Widerstand w (meist mehrere tausend Ω) und mißt den durch sie fließenden schwachen Strom (Abb. 342). Nach dem Ohmschen Gesetz ist e der Stromstärke i proportional ($e = i \cdot w$).

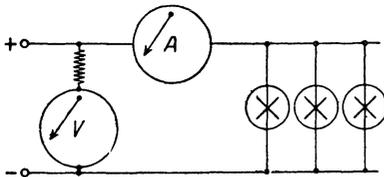


Abb. 342.

Schaltung von Volt- und Amperemeter.

Unter w ist der Widerstand des Instrumentes einschließlich der Zuleitungsdrähte zum Instrument zu verstehen. Um die Berechnung von e aus i zu sparen, teilt man die Skale statt nach i unmittelbar nach e .

Diese Teilung gilt dann natürlich nur für den bestimmten zugrunde gelegten Wert des Widerstandes w . Bei den meisten Voltmetern ist der Vorschaltwiderstand in das Gerät selbst eingebaut.

Der Widerstand des Voltmeters muß sehr groß sein, damit nur ein geringer Teil der Energie auf dem Nebenwege nutzlos verbraucht wird, und damit ferner die Stromverhältnisse in der Hauptleitung nicht nennenswert durch das Anlegen des Voltmeters geändert werden.

4. Die Erweiterung des Meßbereiches eines Voltmeters geschieht dadurch, daß man dem Instrument noch einen Widerstand vorschaltet. Ist dieser z. B. neunmal so groß wie der Widerstand des Instrumentes selbst, so hat w in der obigen Gleichung den zehnfachen Wert, und die

Angaben der Skale sind mit 10 zu multiplizieren. Für höhere Spannungen schaltet man Widerstände vor, die 99- oder auch 999 mal so groß sind wie die des Instrumentes, und hat dann den abgelesenen Wert mit 100 bzw. 1000 zu multiplizieren.

5. Die Schaltung von Strom- und Spannungsmessern sei noch durch Abb. 343 erläutert. Die von der Stromquelle kommenden Leitungen + -- sind durch die Sicherungen S_1 und S_2 gesichert. Das Amperemeter A_1 mißt den im ganzen Stromnetz verbrauchten Strom. A_1 könnte ebensogut in die Rückleitung bei B eingeschaltet sein. Das Voltmeter V_1 mißt die Netzspannung. (Wenn die Zuleitungsdrähte keinen nennenswerten Widerstand bieten, so ist dieser Spannungsunterschied zwischen den Hauptleitungen A_1M und BN überall derselbe.) Das Amperemeter A_2 mißt den vom Motor M verbrauchten Strom, das Voltmeter V_2 die Klemmenspannung, mit der dieser Motor läuft. Diese ist kleiner als die Netzspannung, weil ein Teil der Netzspannung im Vorschaltwiderstand W_1 verbraucht wird. A_2 , W_1 und M könnten ihre Plätze in der Leitung beliebig vertauschen. Das Amperemeter A_3 mißt den von der Glühlampe L_1 verbrauchten Strom. L_2 und L_3 sollen zwei hintereinander geschaltete Bogenlampen, W_2 den ihnen vorgeschalteten Ballastwiderstand darstellen.

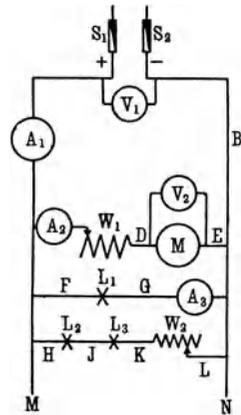


Abb. 343. Schaltung von Strom- und Spannungsmessern.

6. Prüfung von Strom- und Spannungsmessern. Amperemeter, deren Angaben mit denen eines Normalinstrumentes verglichen werden sollen, sind mit diesem hintereinander zu schalten.

Voltmeter sind dem Normalinstrument parallel zu schalten.

§ 173. Widerstandsmessung, Wheatstonesche Brücke.

1. Indirekte Widerstandsmessung. Man kann den Widerstand eines Drahtes dadurch bestimmen, daß man einen Strom hindurchschickt, den Strom i sowie den Spannungsunterschied e an den Enden des Drahtes mißt und daraus nach dem Ohmschen Gesetz den Widerstand berechnet.

2. Die Meßbrücke. Um einen unbekanntem Widerstand x mit einem bekannten Widerstand r zu vergleichen, bedient man sich einer Vorrichtung, die als Meßbrücke oder Wheatstonesche Brücke bezeichnet wird. Der Stromkreis eines Elementes E (Abb. 344) verzweigt sich zwischen A und B in den geradlinig ausgespannten Neusilberdraht ACB und den Zweig ADB , der in AD den unbekanntem Widerstand x und in DB den bekannten Vergleichswiderstand r enthält. Von D aus führt ein Draht durch ein

Galvanometer nach einem auf dem Neusilberdraht verschiebbaren Schleifkontakt C . Man verschiebt diesen Kontakt so lange, bis das Galvano-

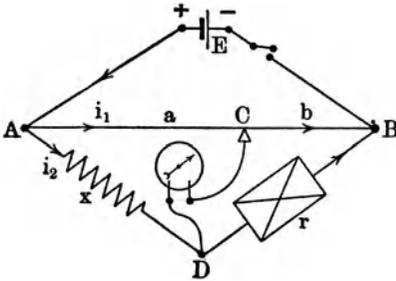


Abb. 344. Wheatstone'sche Brücke.

meter keinen Strom mehr anzeigt. Dann fließt auch in CB der Strom i_1 , in DB der Strom i_2 , und es sind C und D auf derselben Spannung; es muß also der Spannungsabfall längs AC gleich dem längs AD sein. Demnach ist, wenn der Widerstand von AC mit a bezeichnet wird,

$$i_2 \cdot x = i_1 \cdot a.$$

Ebenso ergibt sich, wenn der Widerstand von CB mit b bezeichnet wird:

$$i_2 \cdot r = i_1 \cdot b.$$

Durch Division folgt daraus:

$$\frac{x}{r} = \frac{a}{b}, \text{ d. h. } x = \frac{a}{b} \cdot r.$$

Da es nur auf das Verhältnis der Widerstände der Drahtstücke a und b ankommt, und sich diese verhalten wie die entsprechenden Drahtlängen, so braucht man nur die letzteren einzusetzen; sie können an einem Maßstab abgelesen werden.

Leistung und Arbeit des elektrischen Stromes.

§ 174. Elektrische Leistung (Effekt).

1. Wird eine Glühlampe, ein Motor, ein aufzuladender Akkumulator oder irgend ein anderer Stromverbraucher an eine Stromquelle oder ein Leitungsnetz geschaltet, so wird der Stromquelle oder dem Netz elektrische Energie entzogen. Diese wird im Stromverbraucher verbraucht, d. h. in Wärme, mechanische, chemische Energie oder eine andere Energieart verwandelt.

2. **Stromleistung (Effekt).** Die in der Sekunde der Stromquelle oder dem Netz entnommene Arbeit, die elektrische Leistung, ist proportional der Stromstärke und proportional dem Spannungsunterschied der Anschlußklemmen.

Die Einheit für die elektrische Leistung ist das Watt (Voltampere):

|| Ein Watt ist die Leistung eines Stromes von 1 Amp. bei einem Spannungsunterschied von 1 Volt.

Größere Leistungen drückt man in Kilowatt (kW) aus, indem man 1 kW = 1000 Watt setzt.

Die elektrische Leistung L , d. h. die Stromarbeit, die in der Sekunde in einem Leiter verbraucht wird, ist das Produkt aus Spannungsunterschied e an den Enden des Leiters und der Stärke i des in ihm fließenden Stromes:

$$L = e \cdot i \text{ (Watt)}$$

Beispiel. Eine Kohlenfadenlampe verbraucht einen Strom von 0,5 Amp. bei einem Spannungsunterschied von 114 Volt. Dann ist die dem Netz entnommene Leistung

$$L = 114 \cdot 0,5 = 57 \text{ Watt.}$$

3. Zu den Einheiten der mechanischen Leistung steht das Watt in der Beziehung

$$1 \text{ Meterkilogramm in der Sekunde} = 9,81 \text{ Watt,}$$

also

$$1 \text{ PS} = 75 \cdot 9,81 = 736 \text{ Watt.}$$

Beispiel. Ein Motor läuft bei 105 Volt Klemmenspannung mit 12 Amp. Dann ist die im Motor verbrauchte elektrische Leistung

$$L_e = 105 \cdot 12 = 1260 \text{ Watt} = \frac{1260}{736} \text{ PS} = 1,7 \text{ PS.}$$

Ein Teil dieser Leistung wird zur Überwindung der Reibung usw. verbraucht. Ist der „Nutzeffekt“ des Motors etwa 80 Proz., so bleibt $1,7 \cdot 0,80 = 1,36 \text{ PS}$ als mechanische Leistung übrig.

War der Motor unter Vorschaltung eines Widerstandes an ein Netz von 115 Volt angeschlossen, so ist die dem Netz entnommene Leistung $115 \cdot 12 = 1380 \text{ Watt}$. Von dieser werden 120 Watt im Vorschaltwiderstand in Wärme umgesetzt.

§ 175. Die elektrische Arbeit.

1. Die Einheiten der elektrischen Arbeit. Aus der Leistung erhält man die elektrische Arbeit durch Multiplikation mit der Zeit, während welcher die Leistung andauerte. Als Einheiten für die Arbeit dienen die Wattsekunde (Joule) oder die Kilowattstunde.

Die Wattsekunde ist die von einem Watt in einer Sekunde geleistete Arbeit, die Kilowattstunde (kWh) die von einem Kilowatt in einer Stunde geleistete Arbeit.

Danach ist die Stromarbeit

(1) $A = e \cdot i \cdot t$ (Wattsekunden, wenn t in Sekunden ausgedrückt ist)
oder

(2) $A = \frac{e \cdot i \cdot t}{1000}$ (Kilowattstunden, wenn t in Stunden ausgedrückt ist).

Beispiel. Die Glühlampe des Beispiels § 174₂ verbraucht z. B. in 30 s die Arbeit von $57 \cdot 30 = 1710 \text{ Wattsekunden}$, in 100 Brennstunden die Arbeit von $57 \cdot 100 \text{ Wattstunden} = 5,7 \text{ kWh}$.

Anmerkung. Ersetzt man in der Formel (1) die Spannung e nach dem Ohmschen Gesetz durch $e = i \cdot w$, so erhält man für die Arbeit den Ausdruck

$$A = i^2 \cdot w \cdot t,$$

d. h. in einem Leiter vom Widerstand w ist die Arbeit dem Quadrat der Stromstärke proportional. Dasselbe gilt auch für die Leistung.

2. Beziehung zum Meterkilogramm und zur Wärmeeinheit (Kalorie).

Zum Meterkilogramm steht die Wattsekunde nach § 174₃ in der Beziehung:

$$1 \text{ Meterkilogramm} = 9,81 \text{ Wattsekunden.}$$

Da ein Meterkilogramm nach § 123₃ äquivalent ist $\frac{1}{427}$ WE, so ist

$$1 \text{ Wattsekunde gleichwertig } \frac{1}{427 \cdot 9,81} = 0,00024 \text{ WE.}$$

|| Durch 1 kW wird daher in der Sekunde die Wärmemenge 0,24 WE entwickelt; eine Kilowattstunde (kWh) ist gleichwertig 864 WE.

Beispiel. Welche Wärmemenge wird stündlich in einem Widerstand entwickelt, der bei 22 Amp. Stromstärke einen Spannungsverlust von 15 Volt bewirken soll?

$$\text{Die Wärmemenge beträgt } \frac{15 \cdot 22}{1000} \cdot 864 = 285 \text{ WE.}$$

(Siehe Übungsaufgaben: Elektrizität 35 bis 43.)

Induktionsströme.

§ 176. Der grundlegende Induktionsversuch.

1. Bewegung eines Drahtes in einem Magnetfeld. Wie in § 165 gezeigt wurde, erfährt ein stromdurchflossener Draht in einem Magnetfeld einen Bewegungsantrieb; wenn der Draht frei beweglich ist, so bewegt er sich. Faraday hat gezeigt, daß auch das Umgekehrte gilt: wenn man einen Draht in einem Magnetfeld so bewegt, daß er Kraftlinien durchschneidet, dann entsteht in ihm ein Bewegungsantrieb für die Elektrizität, d. h. eine elektromotorische Kraft, die Drahtenden erhalten einen Spannungsunterschied; wenn man sie also durch eine äußere Leitung miteinander verbindet, so fließt in dem Kreise ein elektrischer Strom.

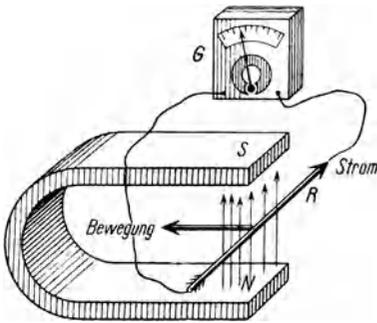


Abb. 345. Induktion in einem bewegten Leiterstück.

Zum Nachweis ersetzt man in der durch Abb. 329 dargestellten Versuchsanordnung die Stromquelle durch ein empfindliches Galvanometer (Abb. 345). Bewegt man den Stromleiter R nach links, so zeigt das

Galvanometer einen Strom an, der in derselben Richtung fließt wie der Strom in Abb. 329, also einen Strom, der den Stromleiter R nach rechts zu bewegen, mit anderen Worten, die ausgeführte Bewegung zu hemmen sucht. Diese Erscheinung heißt Magnetinduktion, der Strom ein induzierter Strom.

Für diesen gilt allgemein die

|| Lenzsche Regel: Der Induktionsstrom hat stets eine solche Richtung, daß er die Bewegung, die ihn hervorruft, zu hemmen sucht.

Es ist daher zur Bewegung des Leiters im Magnetfeld bei fließendem Induktionsstrom Arbeit zu leisten. Diese Arbeit ist der Aufwand für den Strom. Durch Magnetinduktion kann hiernach mechanische Arbeit unmittelbar in elektrische Energie verwandelt werden. In den Dynamomaschinen wird diese Umwandlung in großem Maßstabe geleistet (§ 190 u. f.).

Wird der an den Stromleiter R angeschlossene Stromkreis geöffnet, so daß ein Induktionsstrom nicht fließen kann, so bewirkt die bei der Bewegung von R entstehende EMK lediglich einen Spannungsunterschied an den Enden von R .

Bewegt man den Draht R (Abb. 325) auf und nieder, also parallel zu den magnetischen Kraftlinien, so entsteht kein Induktionsstrom.

2. Die Richtung der induzierten EMK oder des Induktionsstromes läßt sich nach diesem Versuch nach der Regel bestimmen:

|| Man halte die rechte Hand so in die Richtung des bewegten Drahtes, daß die Handfläche die magnetischen Kraftlinien auffängt und der Daumen die Richtung der Bewegung anzeigt, dann geben die Fingerspitzen die Richtung der induzierten EMK bzw. des dadurch hervorgerufenen Stromes an. — Dynamoregel.

3. Induktionsversuche im erdmagnetischen Felde. Unter Benutzung eines empfindlichen Galvanometers lassen sich die Induktionsströme durch Bewegungen eines Drahtstückes oder einer Drahtschleife im erdmagnetischen Felde nachweisen. AB und CD (Abb. 346) seien zwei auf einem Brette angebrachte blanke Drähte, deren Enden A und C mit dem Galvanometer G verbunden sind. Über ihnen kann das Gleitstück EF verschoben werden.

Liegt das Brett horizontal, so ergibt eine Verschiebung des Gleitstückes EF nach rechts einen Induktionsstrom, der auf nordmagnetischer Breite im Sinne des gebogenen Pfeiles kreist. Wenn das Brett senkrecht zur Inklinationsrichtung gehalten wird, so ist der Induktionsstrom am stärksten, er ist erheblich schwächer, wenn es vertikal in Ost-West-Richtung gehalten wird. Es entsteht kein Induktionsstrom, wenn die Ebene des Brettes die Inklinationsrichtung enthält.

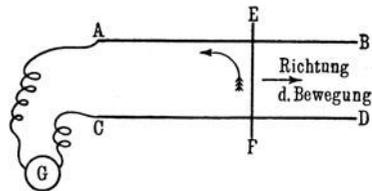


Abb. 346.

Induktion im erdmagnetischen Felde.

§ 177. Weitere Induktionsversuche.

1. Induktion in Spulen. Kräftigere Wirkungen als bei einem Einzeldraht entstehen, wenn man die Drahtwindungen einer Spule von magnetischen Kraftlinien schneiden läßt. Stößt man z. B. den Magnet SN



Abb. 347.
Induktion in einer Spule.

(Abb. 347) in die Drahtspule (oder schiebt die Spule über den Nordpol weg bis in die Mitte von SN), so schneiden die Drahtwindungen die von N ausstrahlenden magnetischen Kraftlinien und es entsteht (bei geschlossenem Stromkreis) ein, von links gesehen, gegen den Uhrzeiger laufender

Strom. Beim Herausziehen des Magnets entsteht ein entgegengesetzter Strom; solange der Magnet ruht, ist keine EMK vorhanden.

Man kann diese Tatsachen auch in der Fassung aussprechen:

|| Jede Vermehrung und jede Verminderung der eine Spule (oder einen Stromkreis) durchsetzenden Kraftlinienzahl hat eine EMK und bei geschlossenem Kreis einen Induktionsstrom zur Folge.

Seine Richtung kann nach der obigen oder nach der folgenden Regel bestimmt werden:

|| Wenn man in der Richtung der Kraftlinien auf die Fläche des geschlossenen Leiters blickt, so bewirkt eine **Vermehrung** der die Leiterfläche durchsetzenden Kraftlinien einen Induktionsstrom „**gegen** den Uhrzeiger“, eine **Verminderung** der Kraftlinien einen Induktionsstrom „**mit** dem Uhrzeiger“.

(Zur Unterstützung des Gedächtnisses merke man: Vermehrung entspricht gegen, Verminderung entspricht mit dem Uhrzeiger.)

Die Richtigkeit dieser Regel ergibt sich aus dem in Abb. 347 dargestellten Versuch. Denn im Magnet SN laufen die Kraftlinien von S nach N (s. Abb. 274).

Um Induktionserscheinungen durch Bewegung von Spulen im erdmagnetischen Felde zu beobachten, schließe man ein empfindliches Galvanometer durch eine Drahtschleife oder Spule. Bei Parallelverschiebung der Schleife oder Spule entsteht kein Strom, wohl aber bei jeder Drehung, bei der die Zahl der die Schleife durchsetzenden Kraftlinien geändert wird. Man bestimme jedesmal die Stromrichtung nach obiger Regel.

2. Induktion durch Veränderung eines Primärstromes (Elektroinduktion). Das eine Spule durchsetzende Magnetfeld kann auch von einer stromdurchflossenen anderen Spule herrühren, die als „Primärspule“ bezeichnet werden soll. Jede Veränderung des Stromes in der Primärspule hat eine Änderung des magnetischen Feldes auch in der „Sekundärspule“ und daher eine EMK in ihren Windungen zur Folge, so daß bei geschlossenem Sekundärstromkreis ein Induktionsstrom fließt. Dabei gilt die Regel:

Beim Schließen des Primärstromes oder bei seiner Verstärkung ist der Sekundärstrom dem primären entgegengesetzt, beim Öffnen des Primärstromes oder bei seiner Schwächung ist der Sekundärstrom mit dem primären gleichgerichtet. — Bei stetig fließendem Primärstrom ist in der Sekundärspule keine elektromotorische Kraft wirksam.

Diese Art der Induktion wird als Elektroinduktion bezeichnet. Sie ist nicht an die Spulenform der Leiter gebunden. Laufen z. B. eine Primär- und eine

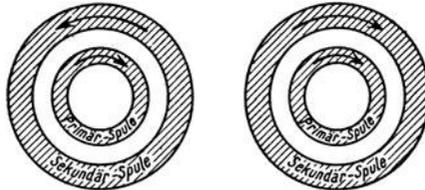


Abb. 348. Stromrichtung in der Sekundärspule beim Schließen Öffnen Verstärken -Schwächen des Stromes in der Primärspule.

Sekundärleitung geradlinig nebeneinander her, so entsteht um die erstere im Augenblick des Stromschlusses das Magnetfeld mit seinen kreisförmigen Kraftlinien. Diese greifen auch um den Sekundärdraht herum, und zwar um so zahlreicher, je näher die Leitungen einander liegen. Daher entsteht ein induzierter Gegenstrom, während bei der Stromöffnung ein gleichgerichteter Stromstoß entsteht.

3. Verstärkung der Induktion durch Eisen. Transformator. Für dieselbe Änderung des Primärstromes fällt der induzierte Strom bedeutend stärker aus, wenn die Primärspule einen Eisenkern enthält, weil durch diesen die Zahl der Kraftlinien erheblich gesteigert wird (§ 163). Die Primär- und die Sekundärspule können sich auch nebeneinander befinden, wenn nur die von der Primärspule erzeugten Kraftlinien auch die Sekundärspule durchsetzen. Das kann wirksam durch einen geschlossenen Eisenweg erreicht werden, wie durch Abb. 349¹⁾ schematisch veranschaulicht wird. In ihr bedeutet *uv* die Primär-, *UV* die Sekundärwicklung oder umgekehrt. Beide sind auf einen rahmenförmigen Weicheisenkern gewickelt; die gestrichelte Linie deutet den Verlauf der magnetischen Kraftlinien an.

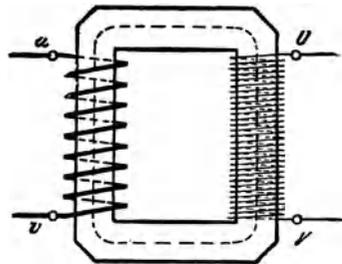


Abb. 349. Transformator-Grundversuch.

Die Erscheinungen der Elektroinduktion werden ausgenutzt in den Funkeninduktoren (§ 181) und den Transformatoren (§ 201).

¹⁾ Kosack, Elektrische Starkstromanlagen. Verlag Jul. Springer, Berlin.

§ 178. Größe der induzierten EMK und Stärke des Induktionsstromes.

1. Für die **Größe der induzierten EMK** gelten die Faradayschen Sätze:

|| Bewegt sich ein Leiterstück in einem Magnetfeld, so ist die in ihm induzierte EMK gleich der Anzahl der sekundlich von ihm geschnittenen magnetischen Kraftlinien.

|| Die in einem geschlossenen Leiterkreise induzierte EMK ist gleich der sekundlichen Änderung der Zahl der Kraftlinien, welche die Leiterfläche durchsetzen.

Als Leiterfläche ist eine beliebige Fläche gemeint, die durch den Leiter begrenzt wird. Enthält der Leiter eine Spule, z. B. von 100 Windungen, so ist die Fläche durch jede einzelne Windung zu legen. Eine durch den Hohlraum der Spule gehende Kraftlinie schneidet die Leiterfläche 100mal, ihr Eintritt oder ihr Wegfall ist 100fach zu rechnen. Die EMK in einer Spule ist deshalb proportional ihrer Windungszahl.

Dasselbe ergibt sich aus folgender Überlegung: Man denke sich die Windungen zunächst aufgeschnitten. In jeder einzelnen Windung wird bei einer Änderung der die Spule durchsetzenden Kraftlinienzahl die gleiche EMK erzeugt. Jede Windung kann als Element betrachtet werden. In Wirklichkeit sind alle diese Elemente hintereinander geschaltet. Die gesamte EMK ist daher proportional der Anzahl der Windungen.

2. Die **Stromstärke** des Induktionsstromes berechnet sich aus der induzierten EMK und dem Gesamtwiderstand der Leitung nach dem Ohmschen Gesetz. Auch hier ist der Gesamtwiderstand oft in einen inneren und einen äußeren Widerstand zu trennen, z. B. bei der Dynamomaschine, wo der Gesamtwiderstand gleich dem inneren Widerstand des Ankers der Maschine plus dem Widerstand der Außenleitung zu setzen ist.

§ 179. Wirbelströme.

1. **Entstehung und Nachweis der Wirbelströme.** Bewegt sich ein Magnet in der Nähe irgend einer Metallmasse, z. B. einer Kupferplatte, so werden in der Metallmasse durch Magnetinduktion elektrische Ströme erzeugt, deren Verlauf sich zwar im einzelnen nicht genau angeben läßt, die aber stets das Bestreben haben, die Bewegung zu hemmen. Statt des Magnets kann auch die Metallmasse bewegt werden. Solche Ströme heißen **Wirbelströme**. Ihre Wirkung läßt sich augenfällig an dem in Abb. 350 dargestellten **Waltenhofenschen Pendel** zeigen. Eine kupferne Scheibe schwingt zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagnets. Ist dieser erregt, so kommt das Pendel fast augenblicklich zur Ruhe. Die in der Kupferscheibe induzierten Wirbelströme hemmen die Bewegung, wobei sie die Schwingungsenergie des Pendels in Wärme umsetzen.

2. Anwendung der Wirbelströme zur Dämpfung. Wirbelströme werden vielfach zur Dämpfung praktisch ausgenutzt. Läßt man einen Magnet einmal frei, einmal im Innern eines Kupfermantels schwingen, so kommt er im zweiten Falle schneller zur Ruhe. Hitzdrahtinstrumente enthalten meist eine mit dem Zeiger verbundene Aluminiumscheibe, die sich zwischen den Polen eines permanenten Hufeisenmagnets bewegt. Die bei der Bewegung entstehenden Wirbelströme dämpfen die Schwingungen (s. Abb. 312).

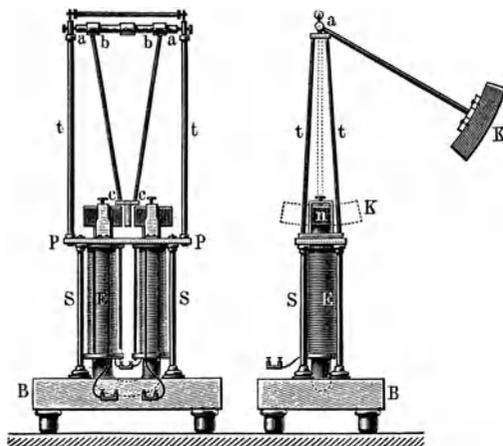


Abb. 350. Waltenhofensches Pendel.

3. Überaus **schädlich** würden Wirbelströme wirken, die in den Eisenkernen der Wicklungen von Funkeninduktoren, Umformern, Dynamomaschinen und Elektromotoren entstanden, da sie einen großen Teil der Energie nutzlos in Wärme verwandeln würden. Man vermeidet sie, indem man das Eisen unterteilt, d. h. aus Eisendrähten oder Blechen (Lamellen) mit isolierenden Zwischenschichten aufbaut (lamelliertes Eisen).

§ 180. Selbstinduktion.

1. Begriff der Selbstinduktion. Wenn die Stromstärke im Draht einer Spule wächst, so wird die Zahl der durch die Spule laufenden Kraftlinien größer. Diese Vermehrung der Kraftlinienzahl induziert auch in den Windungen der Spule selbst eine elektromotorische Kraft, und zwar eine solche, die der EMK des ursprünglichen Stromes entgegenwirkt. Nimmt dagegen die Stromstärke im Draht einer Spule ab, so wird die Zahl der hindurchgehenden Kraftlinien kleiner und diese Verminderung bewirkt eine elektromotorische Kraft, die der EMK des ursprünglichen Stromes gleichgerichtet ist.

Man bezeichnet die Induktion, die ein Leiter auf sich selbst ausübt, als Selbstinduktion. Zur angelegten äußeren Spannung tritt beim Anwachsen der Stromstärke eine Gegen-EMK, beim Abnehmen der Stromstärke eine gleichgerichtete EMK.

2. Schließen und Öffnen des Stromes. Beim Schließen eines Stromkreises bewirkt die Gegen-EMK der Selbstinduktion, daß der Strom nicht

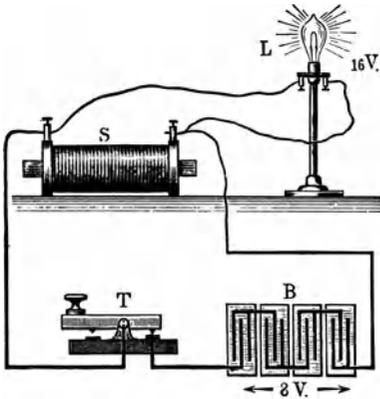


Abb. 351. Versuch über Selbstinduktion.

gleich in voller Stärke einsetzt, sondern erst nach einer gewissen Zeit seinen konstanten Wert erreicht. Diese Zeit ist bei ausgespannten Drähten nur kurz, bei windungsreichen Spulen jedoch, besonders wenn diese einen Eisenkern enthalten, kann sie mehrere Sekunden dauern. Bei plötzlicher Unterbrechung des Stromes äußert sich die mit dem Strom gleichgerichtete EMK der Selbstinduktion in dem Auftreten einer hohen Spannung an der Unterbrechungsstelle.

Wird viel kräftiger, wenn man eine größere Spule, besonders eine solche mit Eisenkern, in die Leitung einschaltet.

2. Verbindet man die Enden der Spule mit Handgriffen und faßt diese an, so verspürt man beim Unterbrechen einen kräftigen elektrischen Schlag (Vorsicht!).

3. Man legt in einen Stromkreis eine 8 Volt-Batterie *B* (Abb. 351), die Spule *S*, am besten mit Eisenkern, und die Taste *T*. Parallel zu *S* legt man eine 16 Volt-Glühlampe *L*. Bei fließendem Strom bleibt diese dunkel, bei Unterbrechung leuchtet sie für einen Augenblick hell auf.

4. Man kann die Glühlampe *L* durch eine Glimmlampe mit einer Zündspannung von 100 bis 200 Volt ersetzen.

3. Scheinbares Beharrungsvermögen der Elektrizität. Nach den Erscheinungen der Selbstinduktion hat die Elektrizität scheinbar ein Beharrungsvermögen: der Strom ist schwer in Gang zu bringen, der fließende Strom schwer aufzuhalten. In Wirklichkeit darf man jedoch der Elektrizität eine Trägheit wie den materiellen Körpern nicht zuschreiben; der Grund der scheinbaren Trägheit ist nur in dem Entstehen und dem Verschwinden des zum Strom gehörigen Magnetfeldes zu suchen.

4. Größe der Selbstinduktion. Die Größe der Selbstinduktion eines Drahtes ist von der Gestalt abhängig, die man ihm gibt. Knickt man ihn in der Mitte ein und legt Hin- und Rückleitung isoliert dicht nebeneinander, so entsteht kein Magnetfeld, und die Selbstinduktion ist gleich Null. Spannt man den Draht geradlinig aus, so hat er eine gewisse,

nicht sehr große Selbstinduktion. Wickelt man hingegen den Draht zu einer Spule auf, so ist die Selbstinduktion groß, weil dann die Kraftlinien jeder Windung die anderen Windungen zum großen Teil mit umfassen. Durch einen Eisenkern kann sie noch erheblich verstärkt werden.

Zur Herstellung induktionsfreier Wicklungen wickelt man den in der Mitte eingeknickten und zusammengebogenen überspannenen Draht, wie Abb. 352 andeutet, auf eine Rolle (bifilare Wicklung).

5. Als Variometer bezeichnet man Vorrichtungen, mit denen die Selbstinduktion eines Stromkreises verändert werden kann.

Stufenweise veränderliche Selbstinduktion erhält man, indem man von einer Induktionsspule mit Hilfe eines Steck- oder Schleifkontaktes eine mehr oder weniger große Zahl von Windungen abgreift. Um eine stetig veränderliche Selbstinduktion zu erhalten, macht man zwei hintereinander in den Stromkreis geschaltete Spulen gegeneinander beweglich. Sind sie gleichsinnig gewickelt, so wächst die Selbstinduktion bei Annäherung oder Parallelstellung der Spulen; sind sie entgegengesetzt gewickelt, so nimmt die Selbstinduktion unter denselben Verhältnissen ab.

6. Selbstinduktionskoeffizient. Die Größe der Selbstinduktion einer Spule oder Leitung wird durch ihren Selbstinduktionskoeffizienten ausgedrückt.

Der Selbstinduktionskoeffizient einer Spule ist die elektromotorische Kraft, die in ihr durch eine Stromänderung von 1 Amp. in der Sekunde geweckt wird.

Die Einheit der Selbstinduktion nennt man Henry.

Ein Henry ist die Selbstinduktion einer Spule, in der die elektromotorische Kraft 1 Volt induziert wird, wenn sich die Stromstärke um 1 Amp. in der Sekunde ändert.

Oft wird der Selbstinduktionskoeffizient in sogenannten elektromagnetischen Einheiten (cm) angegeben: dabei ist $1 \text{ Henry} = 10^9 \text{ cm}$.

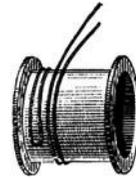


Abb. 352. Induktionsfreie (bifilare) Wicklung.

§ 181. Induktionsapparate, Funkeninduktor.

1. Der Zweck der Induktionsapparate, insbesondere des Funkeninduktors, ist, vermittelt eines Primärstromes durch Induktion Stromstöße hoher Spannung zu erzeugen. Ihre Einrichtung ist schematisch in Abb. 353 dargestellt. Durch eine Primärspule von wenigen Windungen dicken Drahtes wird ein kräftiger Strom geschickt. Beim Betrieb mit Gleichstrom ist es nötig, diesen in rascher Folge zu unterbrechen, was durch einen Wagnerschen Hammer, wie in der Abbildung gezeichnet, oder einen anderen Unterbrecher geschieht. Die Primärspule ist umgeben von

einer Sekundärspule mit sehr vielen Windungen feinen Drahtes. Zur Erhöhung der Wirkung enthält die Primärspule einen Eisenkern, aus Einzeldrähten oder lamelliertem Eisen (§ 179₃).

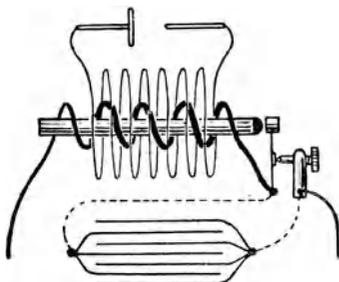


Abb. 353. Funkeninduktor.

Um die Funkenbildung möglichst zu verhindern, sind an die beiden Seiten der Unterbrechungsstelle die Belegungen eines Plattenkondensators gelegt, in den sich die hohen Spannungen entladen können.

Der Funkeninduktor ist der Vorläufer der heute vielfach in der Technik gebrauchten Transformatoren (Umspanner) (siehe § 201).

2. In der **Medizin** finden kleine Induktoren Verwendung, wie der in Abb. 354 dargestellte.

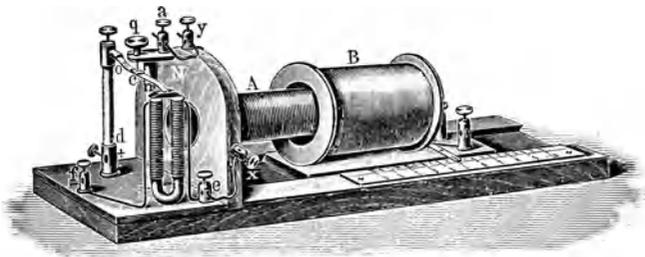


Abb. 354. Induktionsschlittenapparat.

Bei diesem „Schlittenapparat“ kann die Sekundärspule mehr oder weniger über die Primärspule geschoben und damit die Sekundärspannung verändert werden.

§ 182. Mikrophon, Telephon.

1. Das **Mikrophon**, eine Vorrichtung zur Verwandlung von Schall-schwingungen in elektrische Stromschwankungen, ist schematisch in Abb. 355 dargestellt. Zwischen einer Grundplatte P_2 und einer Sprechplatte P_1 ist ein Filzring F gelegt, in dessen Innern sich Kohlekörnchen befinden. M ist eine Metallfassung, J eine isolierende Schicht. Das Mikrophon wird im einfachsten Falle in einen Stromkreis eingeschaltet,

der außerdem ein Element und ein Telephone enthält. Wird gegen die Platte P_1 gesprochen, so macht diese die Sprachschwingungen mit. Dadurch entsteht eine bald losere, bald festere Berührung der Kohlekörner, was Widerstandsänderungen des Kohlepulvers und entsprechende Stromschwankungen im Rhythmus der Sprachschwingungen veranlaßt.

In der Regel werden die Mikrophonströme nicht unmittelbar dem Telephone zugeführt, sondern zunächst mittels eines Telephontransformators auf höhere Spannung gebracht, wie aus Abb. 356 ersichtlich. In ihr bedeutet M_i das Mikrophon, I die Primär-, II die Sekundärwicklung des Transformators. Dieser ist in der Regel eisengefüllt.

2. Das **Telephone** setzt Stromschwankungen in Schallschwingungen um. Es besteht aus

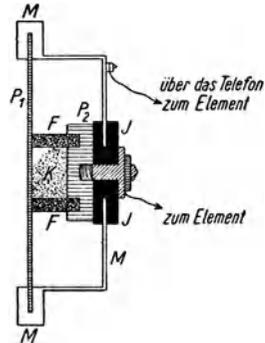


Abb. 355. Durchschnitt durch ein Mikrophon.

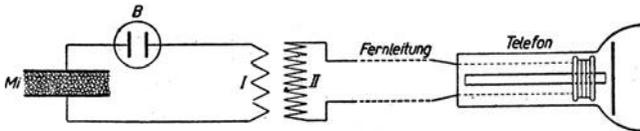


Abb. 356. Mikrophon, Transformator, Telefon.

einem Elektromagnet, dessen Eisenkerne auf einen kräftigen Stahlmagnet aufgesetzt sind. Durchfließen etwa vom Mikrophon kommende Ströme die Wicklung, so wird der Magnetismus des Stahlmagnets im Rhythmus der Sprachschwingungen, je nach der augenblicklichen Stromrichtung entweder verstärkt oder geschwächt. Dadurch wird eine vor den Polen des Magnets angeordnete Eisenmembran in demselben Rhythmus mehr oder weniger angezogen; deren Schwingungen versetzen wiederum die Luft in entsprechende Schallschwingungen.

In Abb. 357 ist ein Dosentelephon dargestellt. M ist ein kräftiger Halbringmagnet. Er trägt an seinen Polen nach innen gerichtete und dann nach oben umgebogene Polschuhe aus weichem Eisen, über die Spulen W_1 , W_2 geschoben sind. Die Enden der Spulenwicklung sind über das isolierende Stück J nach außen geführt. Die untere Abbildung läßt die Schallmembran P und die Hörmuschel U erkennen.

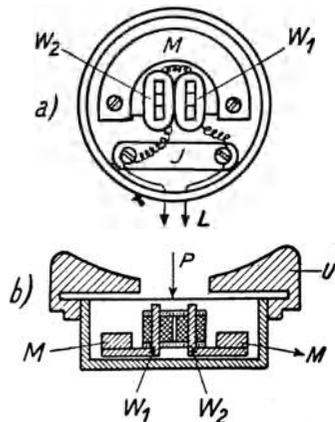


Abb. 357. Dosentelephon.
a) nach Abnahme der Membran,
b) im Durchschnitt.

§ 183. Membransender.

Die Abb. 358 gibt eine schematische Darstellung eines neuzeitigen Wasserschallsenders im Schnitt. Die Membranen 1 und 2 sind etwa 8 mm dicke Stahlscheiben, deren Ränder zu Flanschen ausgebildet und mit diesen

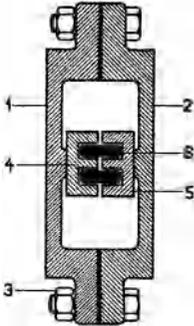


Abbildung 7
Schematisierter Schnitt durch
einen Wasserschallsender

Abb. 358.
Wasserschallsender
im Schnitt.



Abb. 359. Gruppe von
zwei Unterwasserschallsendern
(Länge 1,4 m).

wasserdicht verschraubt sind. Im Innern ist auf jeder Membran ein Anker (4 und 5) befestigt. In den Nuten dieser Anker liegt eine Spule 6, die mit Wechselstrom gespeist wird. In jeder Halbperiode des Wechselstromes werden die Anker und mit ihnen die Membranen gegeneinander gezogen und kehren dann in ihre Ruhelage zurück. Die Schwingungszahl ist daher gleich der Wechselzahl (meist 1050) des Stromes. Der Durchmesser und die Dicke der Membranen sind so gewählt, daß die Eigenschwingungszahl der Membran mit dieser Zahl übereinstimmt (Resonanzfall). Für Feuerschiffe oder sonstige fest auf den

Meeresgrund verlegte Sendestationen werden gewöhnlich zwei Sender im Abstand einer halben Wellenlänge des Tones im Wasser zur Ausnutzung der Gruppenwirkung (s. § 89₃) vereinigt, und zwar um 90° gegeneinander gedreht (Abb. 359). Neuere Luftschallsender haben im wesentlichen denselben inneren elektrischen Aufbau.

C. Aus der Elektrotechnik.

Elektrische Leitungen, Sicherungen, Schalter.

§ 184. Leitungen.

1. Stromkreise. Die Verteilung der von der Stromquelle (Dynamomaschine) gelieferten elektrischen Energie erfolgt an Bord meist auf

folgende Weise: Die einzelnen Stromverbraucher (Lampen und Motoren) sind zu Stromkreisen vereinigt, die von besonderen Verteilungstafeln aus gespeist werden. Nach jeder solchen Verteilungsstelle führt eine von dem Hauptschaltbrett ausgehende Hauptleitung. Sind mehrere Dynamomaschinen vorhanden, so sind besondere Schalter (Maschinenwähler) vorgesehen, die es ermöglichen, daß jeder Stromkreis von jeder beliebigen Maschine mit Strom versorgt werden kann.

2. Doppelleitungssystem, Eindrahtsystem. Die Leitungen werden entweder doppelpolig geführt derart, daß Hin- und Rückleitung unmittelbar nebeneinander isoliert verlegt sind, oder einpolig, indem nur die Hinleitung isoliert verlegt ist, während die Rückleitung des Stromes durch den eisernen Schiffskörper erfolgt. Das Doppelleitungssystem hat den Vorteil, daß auch Gleichstrom ohne Einfluß auf den Kompaß bleibt. Innerhalb einer Kugel von 5 m Halbmesser um den Kompaß müssen alle Starkstromleitungen doppelpolig verlegt sein.

3. Als Leitungsmaterial für Hauptleitungen finden fast ausschließlich Kabel Verwendung. Das sind mit Gummi isolierte Kupferdrahtleitungen, die zum Schutz gegen Feuchtigkeit mit einem Bleimantel umpreßt sind; zum Schutz gegen mechanische Verletzungen sind sie meist noch mit Eisenband oder Eisendraht umflochten. Für Zweigleitungen genügen Gummiaderdrähte mit Metallumhüllung.

4. Die Kupferquerschnitte der Leitungen werden auf Spannungsverlust berechnet (§ 167₄). Außerdem ist darauf zu achten, daß eine dem Querschnitt entsprechende Maximalstromstärke nicht überschritten wird, da sich sonst der Draht zu stark erwärmen würde. In folgender Tabelle ist für isolierte Leitungen und Kabel die höchst zulässige Dauerstromstärke angegeben:

Querschnitt in qmm	J_{\max} in Amp.	Querschnitt in qmm	J_{\max} in Amp.	Querschnitt in qmm	J_{\max} in Amp.
0,75	9	6	31	50	160
1	11	10	43	70	200
1,5	14	16	75	95	240
2,5	20	25	100	120	280
4	25	35	125	150	325

§ 185. Schmelzsicherungen.

1. Beschreibung. Um Leitungen vor zu hoher Stromstärke und damit vor zu starker Erwärmung zu schützen, werden Sicherungen eingeschaltet. Darunter versteht man Einsatzstücke aus dünnem Metalldraht (Silber oder Kupfer), deren Querschnitt so gewählt ist, daß sie bei Überschreitung der für die Leitung zulässigen Stromstärke schmelzen und so den Strom unterbrechen. Dadurch ist ein Glühendwerden der Leitung

und eine daraus entstehende Feuersgefahr vermieden. Bei jeder Sicherung ist die normale Betriebsstromstärke und die höchste zulässige Spannung angegeben.

Alle Sicherungen bestehen aus dem Schmelzeinsatz und einem Unterteil (Sockel) mit den Leitungsanschlüssen. Bei den Streifensicherungen ist der Schmelzeinsatz ein Metallstreifen oder Metalldraht, der noch mit einer Schutzkappe bedeckt wird. Bei den Patronensicherungen ist der Schmelzdraht in einem Porzellangehäuse (Patrone oder Stöpsel) zwischen zwei Metallkontakten angeordnet. Die Patrone wird in den Unterteil eingeschraubt, wodurch der Schmelzdraht in die Leitung eingeschaltet ist. Patronensicherungen werden für geringere Stromstärken (bis etwa 40 Amp.) hergestellt und wegen ihrer bequemen und ungefährliehen Handhabung hauptsächlich für Haus- und Lichtleitungen verwendet, während für die größeren Stromstärken Streifensicherungen oder automatische Schalter in Betracht kommen.

Die Sicherungen für kleine Stromstärken sind so eingerichtet, daß es unmöglich ist, aus Fahrlässigkeit in einen Sockel ein Einsatzstück zu setzen, das für eine höhere Stromstärke bestimmt ist (Unverwechselbarkeit).

Ist eine Sicherung geschmolzen, so wird ein neuer Schmelzeinsatz eingesetzt. Schmilzt dieser ebenfalls, so muß die Ursache hierfür festgestellt und nötigenfalls die Leitung auf ihre Isolation untersucht werden. Der Gebrauch geflickter Sicherungen ist unzulässig und gefährlich.

2. Anordnung der Sicherungen. Alle von der Hauptschalttafel ausgehenden Hauptleitungen und alle Verteilungsleitungen sind je für sich zu sichern. Ferner sind überall da, wo sich der Leitungsquerschnitt verkleinert, Sicherungen anzubringen. Bei doppelpolig verlegten Leitungen müssen beide Pole gesichert sein.

§ 186. Schalter.

1. Von Hand zu betätigende Schalter. Schalter dienen zum Schließen und Unterbrechen eines Stromkreises. Für größere Stromstärken benutzt man Hebelschalter, für kleinere Drehschalter. Beim Unterbrechen eines Stromkreises bildet sich leicht an der Unterbrechungsstelle ein Lichtbogen. Damit dieser möglichst schnell abgerissen wird, hat das Öffnen des Stromkreises plötzlich zu geschehen. Bei den Moment-schaltern sind zu dem Zwecke besondere Federn angebracht. Zweipolige Schalter sind solche, durch welche die Hin- und Rückleitung gleichzeitig unterbrochen werden; einpolige Schalter solche, die nur eine Leitung unterbrechen. Durch Umschalter kann eine Leitung wahlweise mit einer oder einer anderen Stromquelle verbunden werden.

2. Automatische Ausschalter sind solche, die unter gewissen Umständen die Leitung selbsttätig unterbrechen; sie werden elektromagnetisch betätigt. Es gibt Maximal- und Minimalausschalter.

Maximalschalter wirken ähnlich wie Sicherungen: falls der Strom eine bestimmte vorgeschriebene Stärke übersteigt, schalten sie aus. Sie kommen hauptsächlich bei hohen Stromstärken (an Stelle von Sicherungen) zur Anwendung.

Minimalschalter haben den Zweck, die Leitung zu unterbrechen, wenn eine vorgeschriebene kleinste Stromstärke unterschritten wird. Sie werden z. B. in den Ladestromkreis von Akkumulatoren eingeschaltet und sollen verhindern, daß während des Ladens aus der Batterie Strom in die ladende Maschine zurückfließt. Das würde eintreten, wenn die Spannung der ladenden Maschine aus irgend einem Grunde kleiner geworden ist als die Gegenspannung der Batterie; die Dynamo würde dann als Motor laufen. Maximal- und Minimalausschalter unterbrechen sowohl bei zu großer als auch bei zu kleiner Stromstärke.

3. Schalttafeln. Alle Instrumente, Apparate und Sicherungen werden auf Schalttafeln angebracht, so daß sie bequem zu beobachten bzw. zu bedienen sind. Die Schalttafeln sind aus Marmor oder Schiefer hergestellt. Die Hauptschalttafel befindet sich an Bord im Maschinenraum; an den einzelnen Verteilungsstellen sind Verteilungstafeln aufgestellt.

Akkumulatoren oder Sammler.

§ 187. Der Bleiakкумуляtor.

1. Beschreibung. Der den Bleiakкумуляtor erklärende Grundversuch ist in § 161₆ beschrieben. Die technisch hergestellten Bleiakкумуляtoren enthalten statt einfacher Bleiplatten Gitter- oder Rippenplatten, die von der Fabrik besonders vorbereitet sind. Die positiven Platten sind mit Bleisuperoxyd ausgestrichen, sie sind an ihrer braunen Farbe kenntlich. Zur Erhöhung der Aufnahmefähigkeit (Kapazität) enthält jede Zelle meistens mehrere positive und negative Platten, wobei alle positiven untereinander und alle negativen untereinander verbunden sind. Jede positive Platte befindet sich zwischen zwei negativen (grauen), so daß die Zahl der negativen Platten um eins größer ist als die der positiven. Die Berührung der Platten wird durch Vorsprünge im Gefäß oder durch Glasstäbe verhindert.

2. Spannung. Die EMK eines Akkumulators steigt während der Ladung und sinkt während der Entladung. Für die an Bord gebrauchten Heizakkumulatoren gelten etwa die in Abb. 360 dargestellten Kurven, bei deren Aufnahme die Lade- und die Entladestrom-

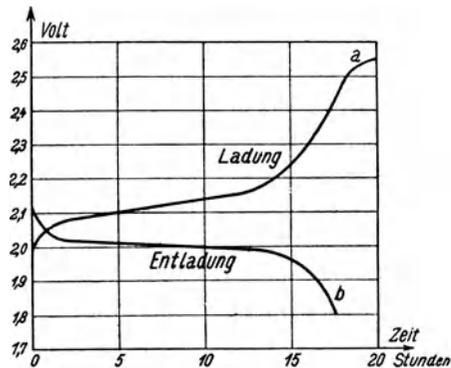


Abb. 360. Lade- und Entladespannung eines Bleiakкумуляtors.

stärke konstant gehalten ist. Die Ladespannung der Zelle steigt zunächst schnell, dann langsam und zum Schluß wieder schnell von 2 Volt bis etwa 2,55 Volt. Unmittelbar nach dem Abstellen geht die Spannung auf 2,1 Volt zurück. Die Entladespannung sinkt von diesem Wert schnell auf 2 Volt, bleibt eine ganze Zeitlang nahe auf diesem Wert und würde dann, nachdem 1,8 Volt erreicht sind, schnell fallen. Weiter darf die Stromentnahme nicht fortgesetzt werden, da sonst die Zelle Schaden nehmen würde.

Durch Hintereinanderschaltung von Zellen kann man jede gewünschte Höhe der Spannung erreichen.

3. Stromstärke. Da durch eine zu schnelle chemische Veränderung das feine Material der Platten schwer leidet, so darf jede Zelle nur mit der von der Fabrik angegebenen Maximalstromstärke geladen und entladen werden. Beim Laden durch eine Stromquelle höherer Spannung ist daher ein Widerstand vorzuschalten, der die Stromstärke für jede Zelle nicht über das erlaubte Maß ansteigen läßt. Auch beim Entladen muß der Schließungskreis stets einen genügend hohen Widerstand haben.

4. Die Ladung kann nur an einer Gleichstromquelle erfolgen. Vor Beginn der Ladung ist zu prüfen, ob genügend Säure in den Zellen ist (1 bis 1,5 cm über der Oberkante der Platten). Mit einem Aräometer ist festzustellen, ob die Säure die richtige Konzentration hat. Das spezifische Gewicht der Säure ist im geladenen Zustand höher als im entladenen (etwa 1,24 gegen 1,19). Das zur Verdünnung der Säure verwandte Wasser muß chemisch rein, insbesondere frei von Metallsalzen sein. Bei Fehlen von destilliertem Wasser ist reines Regenwasser zu nehmen.

Der Pluspol ist an den Pluspol, der Minuspol an den Minuspol der ladenden Gleichstromquelle zu legen, und zwar unter Vorschaltung eines Regulierwiderstandes und eines Amperemeters.

Die Spannung der Stromquelle muß höher sein als die Spannung des angelegten Akkumulators, z. B. für 30 hintereinander geschaltete Akkumulatorzellen höher als $30 \cdot 2,7 = 81$ Volt. Nun wird die nötige Ladestromstärke mittels des Regulierwiderstandes eingestellt. Sie darf nicht höher sein als die Maximalstromstärke, wohl aber geringer, wodurch nur die Ladezeit vergrößert wird. Die Ladung ist so lange fortzusetzen, bis alle Zellen eine lebhaft Gasentwicklung zeigen („Kochen“). Bleiben dabei einzelne Zellen zurück, so sind sie auf Kurzschluß infolge Verbiegens der Platten zu untersuchen.

Auch nicht gebrauchte Akkumulatoren sind etwa monatlich einmal bis zum lebhaften Kochen aufzuladen. Gelegentliche, jedoch nicht zu starke Überladung wirkt günstig.

Da sich über Akkumulatoren unter Umständen Knallgas sammelt, so darf in die Aufstellungs-Räume oder -Schränke kein offenes Feuer oder Licht gebracht werden.

5. Die Kapazität eines Akkumulators wird in Amperestunden angegeben. Die Kapazität ist um so größer, je größer die Platten sind und je mehr von ihnen parallel geschaltet sind. Sie ist geringer bei schneller Entladung als bei langsamer.

6. Nutzeffekt. Von der beim Laden aufgewendeten elektrischen Energie werden in guten Akkumulatoren etwa 70 % wiedergewonnen. Vorausgesetzt ist dabei, daß die Spannung der Stromquelle möglichst vollständig ausgenutzt, daß also nicht viel Energie durch vorgeschalteten Regulierwiderstand vernichtet, d. h. in Wärme oder Licht verwandelt wird. Beim Laden aus einem Netze von beispielsweise 110 Volt Spannung wird man die vorhandenen Zellen — sofern es nicht mehr als 40 sind — hintereinander schalten.

Die elektrische Beleuchtung.

§ 188. Elektrische Glühlampen.

In den elektrischen Glühlampen wird ein Leiter, entweder ein Kohlefaden oder ein feiner Metalldraht, durch die Stromwärme bis zur Weißglut erhitzt. Der Glühdraht ist in einem kugel- oder birnenförmigen Glasgefäß untergebracht, das man, um das Verbrennen des Leuchtdrahtes zu verhindern, luftleer gepumpt hat. Die Enden des Drahtes sind durch kräftigere Drahtstücke aus dem Gefäß herausgeführt und mit zwei Kontaktstücken des Lampensockels verbunden. Dieser wird entweder in die Lampenfassung eingeschraubt



Abb. 361.
Kohlefadenlampe.

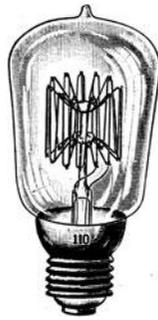


Abb. 362.
Metallfadenlampe.

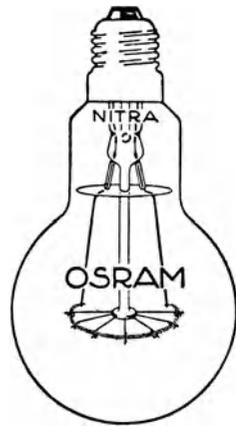


Abb. 363. Spiralfadenlampe (gasgefüllt).

(Edisonfassung) oder durch einen Bajonettverschluß darin befestigt (Swanfassung). Das Leitungsnetz muß möglichst genau die vorgeschriebene Spannung haben. Ist die Spannung zu niedrig, so glüht der Faden nicht hell; ist sie zu hoch, so wird die Lampe bald unbrauchbar.

Die 1879 erfundene Kohlefadenlampe (Abb. 361) ist heute für Beleuchtungszwecke ganz durch Metallfadenlampen ersetzt. Der Glüh-

draht besteht meist aus dem schwer schmelzbaren Metall Wolfram. Der ziemlich lange Metalldraht wird entweder zickzackförmig aufgehängt (Abb. 362), oder zu einer engen Spirale aufgewickelt und so auf einen kleinen Raum zusammengedrängt (Spiraldrahtlampen, Abb. 363).

Metallfadenlampen verbrauchen bei gleicher Lichtstärke viel weniger Energie als Kohlefadenlampen. Weiter hat man die Wirtschaftlichkeit der Glühlampen dadurch wesentlich erhöht, daß man das Glasgefäß mit einem indifferenten Gas, meist einer Mischung von Argon und Stickstoff, gefüllt hat. Die Gasfüllung ermöglicht, den Draht auf eine höhere Temperatur zu bringen, als dies bei luftleeren Lampen möglich ist, da der Gasdruck der Zerstäubung des Glühdrahtes entgegenwirkt. Während Kohlefadenlampen etwa 3,3 Watt für 1 HK erforderten, ist diese Zahl bei gewöhnlichen Metallfadenlampen auf 1,5 bis 1,0, bei größeren gasgefüllten Lampen bis auf 0,5 Watt gesunken (Halbwattlampen). Nach längerem Brennen nimmt die Lichtstärke der Lampen ab; der Glühfaden zerstäubt allmählich, wodurch die Birne im Innern geschwärzt wird.

Glühlampen werden parallel geschaltet. Da sich schon geringe Spannungsschwankungen durch ungleiches Brennen der Lampen bemerkbar machen, so müssen die Querschnitte der Leitungsdrähte so gewählt sein, daß der Spannungsverlust von der Dynamo bis zur äußersten Lampe 5% der Spannung nicht überschreitet.

§ 189. Der elektrische Lichtbogen. Die Bogenlampe.

1. Entstehung des Lichtbogens. Verbindet man zwei Kohlenstäbe mit den Polen einer Elektrizitätsquelle von 40 bis 50 Volt Spannung, so kann man sie zur Berührung nähern, ohne daß ein Funke überspringt.



Abb. 364.
Positive und negative Kohle.

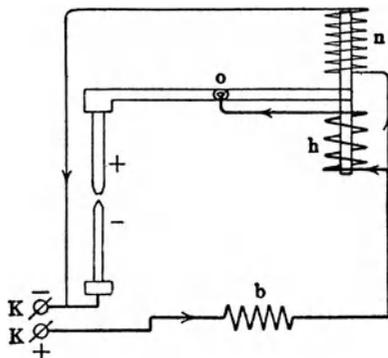


Abb. 365.
Differentialbogenlampe.

Bringt man die Stäbe zur Berührung, so tritt an der Berührungsstelle infolge des großen Widerstandes eine so hohe Erwärmung ein, daß die

Kohlenspitzen zu glühen anfangen. Jetzt kann man die Kohlenstäbe auf mehrere Millimeter auseinanderziehen, ohne daß der Strom zu fließen aufhört. Der Zwischenraum wird durch einen Lichtbogen überbrückt, der die Leitung zwischen den Kohlenstäben bewirkt. Die Kohlenspitzen werden glühend, während der Lichtbogen selbst nur schwach leuchtet. Die positive Kohle brennt zu einem Krater aus. Der weißglühende Krater, mit einer Temperatur von 3500° , ist die Hauptquelle des starken Bogenlichtes. Die negative Kohle (2500°) spitzt sich zu. Man wählt die positive Kohle stärker als die negative, weil sie doppelt so schnell aufgebraucht wird.

Auch zwischen Metallstäben ist ein Lichtbogen möglich.

Der Lichtbogen ist ein zwischen die Kohlen- oder Metallelektroden gelegter Leiter; sein Bestehen ist an weißglühende Stellen dieser Elektroden geknüpft. Reißt er ab, so muß er von neuem gezündet oder „gezogen“ werden.

In den Flammenbogenlampen sind den Kohlen Metallsalze beigemischt, wodurch ein gut leitender und selbst intensiv leuchtender Bogen erzielt wird. Die Lichtstärke ist bei demselben Stromverbrauch fast viermal so groß als beim reinen Bogenlicht.

Bei den Scheinwerfern steht die positive Kohle horizontal, die negative schräg. Sie sind so angebracht, daß sich der Lichtbogen im Brennpunkt eines Parabolspiegels befindet, von welchem die Lichtstrahlen parallel zur Spiegelachse reflektiert werden (s. Abb. 208 a, b).

2. Regulierwerke der Lampen. Wenn der Lichtbogen zur Beleuchtung verwandt werden soll, so muß der Abstand der Kohlenstifte konstant erhalten bleiben. Dies geschieht durch Regulierwerke, die elektromagnetisch betätigt werden.

Das Prinzip der Einrichtung und der Wirkungsweise eines solchen Regulators gibt die in Abb. 365 schematisch dargestellte Differentialbogenlampe an. Die positive Kohle ist an dem linken Hebelarm eines um o drehbaren Hebels befestigt. Der rechte Hebelarm trägt einen langen Eisenkern, welcher unten von der Hauptstromspule h und oben von der Nebenstromspule n umgeben ist. Solange die Lampe nicht eingeschaltet ist, sind die Kohlenspitzen miteinander in Berührung. Beim Einschalten geht der Strom zunächst von der positiven Polklemme K durch einen Widerstand b , durch die Hauptstromspule h mit geringem Widerstand über o durch die positive Kohle und dann durch die negative Kohle nach der negativen Polklemme K zurück. Infolge des durch h fließenden Stromes wird der Eisenkern nach unten gezogen. Dadurch werden die Kohlenspitzen voneinander entfernt und der Lichtbogen bildet sich. Je mehr er wächst, desto größer wird sein Widerstand und desto mehr Strom fließt durch die Nebenschlußspule n . Hierdurch wird der Eisenkern gehoben, die Kohlenspitzen einander genähert, der Widerstand des Lichtbogens verkleinert und dadurch die Stromstärke in h vergrößert, mithin der Eisenkern gesenkt und die Kohlenspitzen wieder entfernt.

3. Lichtbogenschweißung. Der Lichtbogen wird vielfach zum Schweißen von Blechen, Reparatur von Gußstücken, Ausbessern von Gußfehlern usf. benutzt, wobei der Lichtbogen in der Regel zwischen dem Arbeitsstück und einer Elektrode aus Kohle oder Eisen hergestellt wird.

Stromerzeuger, Gleichstrom-Dynamos.

§ 190. Das Prinzip der Dynamomaschinen.

Die Dynamomaschinen haben den Zweck, elektrische Energie in größeren Mengen durch Induktion zu erzeugen. Dabei wird mechanische Arbeit, die von einer Dampfmaschine oder einer anderen Antriebsmaschine geliefert wird, in elektrische Energie umgewandelt.

1. Das **Prinzip der Dynamomaschinen** wird schematisch erläutert durch die Abb. 366 und 367. Abb. 366 stellt das Prinzip der Wechselstrommaschine, Abb. 367 das der Gleichstrommaschine dar. In beiden

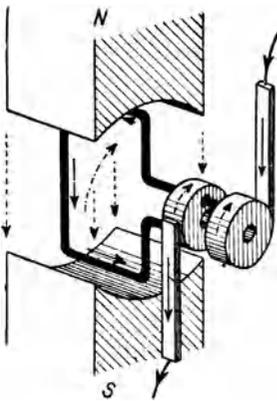


Abb. 366. Prinzip der Wechselstrommaschine.

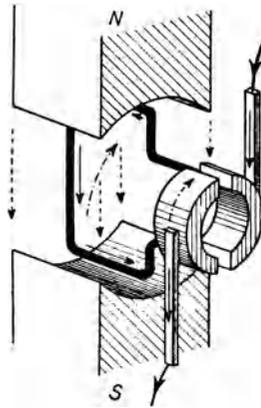


Abb. 367. Prinzip der Gleichstrommaschine.

Fällen wird eine Drahtschleife zwischen den Polen eines Magnets gedreht, so daß die vom N-Pol zum S-Pol verlaufenden magnetischen Kraftlinien geschnitten und in den Schleifenwindungen elektromotorische Kräfte induziert werden. Diese sind in der gezeichneten Stellung der Schleife am größten, ihr Sinn ist in den Abbildungen angegeben (§ 176₂, 177₁). Nach einer Vierteldrehung ist die EMK auf Null gesunken, sie kehrt dann ihr Vorzeichen um und wächst wieder bis zum Höchstwert, der bei entgegengesetzter Lage der Schleifenebene erreicht wird. Die Enden des Schleifendrahtes sind demnach bei der Drehung auf einer „Wechselspannung“, d. h. einem Spannungsunterschied, der bei jeder Umdrehung zweimal das Vorzeichen wechselt.

2. Bei der **Wechselstrommaschine** wird diese Wechselspannung dem äußeren Netz zugeführt. Zu dem Zweck ist jedes Drahtende an einem vollen Ring befestigt, auf dem eine Bürste schleift, so daß sich die Wechselspannung auch diesen Bürsten mitteilt. Sind die Bürsten durch

eine äußere Leitung verbunden, so fließt in dieser ein Wechselstrom, der sich in dem betrachteten einfachen Falle sinusförmig mit der Zeit ändert, wie die obere Kurve in Abb. 368 und Abb. 381 anzeigen.

Man bezeichnet die Zeit, in der die Sinuslinie einmal durchlaufen wird, als die Periode des Wechselstroms, die halbe Periode heißt Wechsel. Die Zahl der Perioden in einer Sekunde heißt Periodenzahl oder Frequenz, die der Wechsel die Wechselzahl, so daß die Wechselzahl doppelt so groß ist als die Frequenz. Weiteres über Wechselstrommaschinen siehe in § 194.

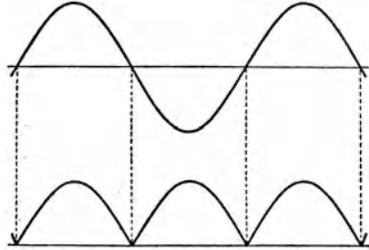


Abb. 368. Sinusförmiger Wechselstrom und pulsierender Gleichstrom.

3. Bei der Gleichstrommaschine wird jedesmal beim Spannungswechsel die Anschaltung der äußeren Leitung gewechselt. Zu dem Zweck sind in dem einfachen Falle der

Abb. 367 die Enden des Schleifendrahtes an Halbringen befestigt, die — voneinander isoliert — derart auf der Achse befestigt sind, daß die Bürsten beim Wechsel der Spannung je auf den anderen Halbring treten. Auf diese Weise erhält man, wenn die Bürsten durch eine äußere Leitung miteinander verbunden sind, in dieser einen pulsierenden Gleichstrom, wie er durch die untere Kurve in Abb. 368 dargestellt wird. Das Halbringsystem wird als Kollektor bezeichnet.

4. Ausgestaltung der Gleichstromdynamos. Um größere Spannungsunterschiede und infolgedessen größere Stromstärken, und ferner, um einen

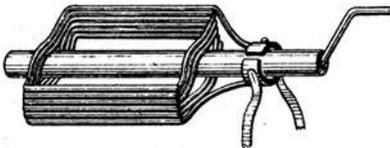


Abb. 369. Ersatz des Drahtrechtecks durch eine rechteckige Spule.

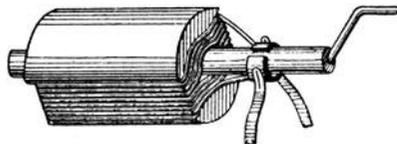


Abb. 370. Doppel-T-Anker von Siemens.

möglichst gleichmäßig fließenden Strom zu erhalten, wendet man folgende Mittel an:

- a) An Stelle des Drahtrechtecks mit nur einer Windung verwendet man Spulen mit vielen Windungen (Abb. 369).
- b) Man bringt innerhalb der Spule einen Weicheisenkern an und erreicht dadurch, daß das Magnetfeld zwischen den Polen besser zusammengehalten wird (§ 135). Der so entstehende Körper wird als Anker der Dynamomaschine bezeichnet. Abb. 370 stellt einen Siemens-Doppel-T-

Anker dar. Der Eisenkern ist, damit in ihm keine Wirbelströme entstehen, lamelliert.

c) Statt einer Spule bringt man auf dem Anker eine große Zahl solcher an, indem man gleichzeitig den Halbring-Kollektor durch einen

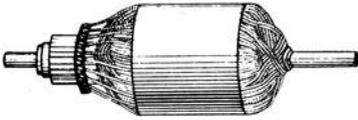


Abb. 371. Trommelanker.

solchen mit entsprechend vielen von einander isolierten Lamellen ersetzt (siehe Abb. 371). Durch Verwendung eines solchen Trommelankers erzielt man Überlagerung von ebensoviel Wechselspannungen, wie man Spulen angebracht hat und, da diese

Spannungen in regelmäßigen Abständen gegeneinander versetzt sind, im äußeren Netz einen sehr nahe gleichförmig fließenden Strom, wie Abb. 372 veranschaulicht.

d) Statt der Stahlmagnete verwendet man Elektromagnete, durch die man ein erheblich stärkeres Feld erzeugen kann. Nach dem „dynamoelektrischen Prinzip“ von W. Siemens können die Elektromagnete durch den von der Maschine selbst erzeugten Gleichstrom erregt werden.

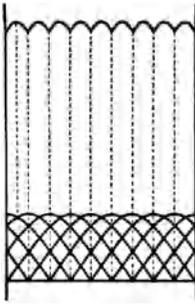


Abb. 372.
Überlagerung von
sechs pulsierenden
Gleichströmen.

Der bei stillstehender Dynamo in den Schenkeln des Elektromagnets von der früheren Erregung zurückgebliebene Magnetismus genügt, um bei beginnender Drehung der Maschine einen schwachen Strom zu erzeugen; dieser fließt durch die Windungen des Elektromagnets und verstärkt bei richtigem Drehsinn der Maschine dessen Magnetismus. Dadurch wird wieder der Strom stärker usw., bis die Magnete gesättigt sind und die Maschine ihre normale Spannung erreicht hat. Nur vor der erstmaligen Inbetriebnahme der Maschine müssen die Elektromagnete durch Fremdstrom erregt werden.

Maschinen mit Stahlmagneten, sogenannten magnetische Maschinen, werden an Bord als Umdrehungsfernzeiger gebraucht. Die Schraubenwelle treibt mittels Übertragung eine kleine magnetische Maschine an. Je höher die Tourenzahl, um so höher die erzeugte EMK. Diese kann auf der Brücke an einem nach Umdrehungszahlen geeichten Voltmeter abgelesen werden.

e) Maschinen für größere Leistungen werden gewöhnlich statt mit einem Polpaar mit einer größeren Anzahl von Polpaaren gebaut, was eine entsprechende Vermehrung der Bürsten bedingt (s. Abb. 376).

5. Die Energieumwandlung. Läuft eine Dynamo offen, d. h. ohne angeschaltetes Netz, so hat die Antriebsmaschine lediglich die Reibung zu überwinden. (Bei der Nebenschlußmaschine hat sie außerdem die Energie für den Strom der Feldmagnete zu liefern.) Wird das äußere

Netz angeschaltet, so daß in ihm Strom fließt, so fließt dieser zugleich in den Ankerdrähten und hemmt nach der Lenzschen Regel (§ 176) den Gang des Ankers. Je größer die Stromentnahme ist, um so schwerer läßt sich der Anker drehen, um so mehr Arbeit muß mithin die Antriebsmaschine leisten.

§ 191. Arten der Gleichstrom-Dynamomaschinen.

Je nach der Art der Erregung der Feldmagnete unterscheidet man Hauptstrommaschinen, Nebenschlußmaschinen und Doppelschlußmaschinen.

1. Die Hauptstromdynamo (Abb. 373). Der ganze, von der positiven Bürste abgenommene Strom fließt hintereinander durch die Wicklung des Feldmagnets und durch die Nutzleitung zur negativen Bürste zurück. Damit die Maschine überhaupt auf Spannung kommt, muß der äußere Stromkreis geschlossen sein. Die Stärke des magnetischen Feldes wird durch den aus der Maschine entnommenen Strom beeinflusst. Da die

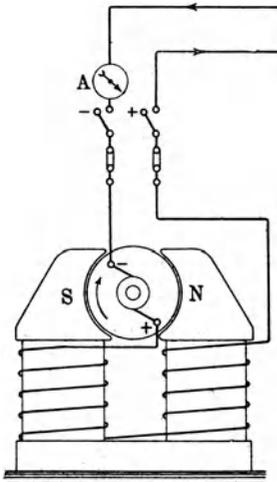


Abb. 373. Hauptstromdynamo.

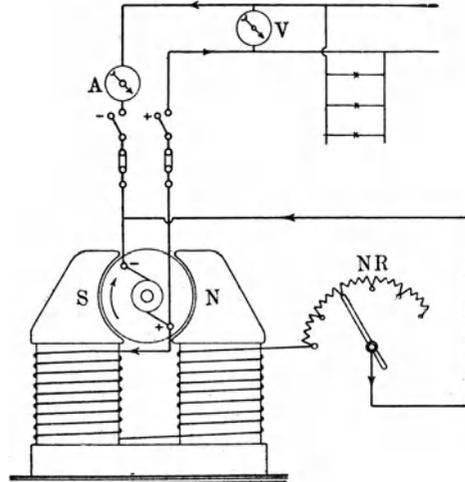


Abb. 374. Nebenschlußdynamo.

erzeugte Spannung der magnetischen Feldstärke proportional ist, so ist sie ebenfalls von der Stromstärke abhängig. Bei geringer Stromstärke, also großem äußeren Widerstand, ist die Klemmenspannung nur klein; sie nimmt zu, wenn die Stromstärke durch Einschalten von Lampen oder Motoren vergrößert wird. Die Hauptstrommaschine eignet sich wegen dieser Spannungsschwankungen nicht für Beleuchtung mit parallel geschalteten Glühlampen; sie kommt für den Bordbetrieb nicht in Frage.

2. Die Nebenschlußdynamo (Abb. 374). An den Bürsten teilt sich der ganze, vom Kollektor abgenommene Strom in zwei Zweige. Der Hauptstrom geht als Nutzstrom in den äußeren Stromkreis. Der Nebenstrom (2 bis 5 % des ganzen Stromes) geht von der positiven Bürste durch die Magnetwicklungen zur negativen Bürste zurück. Durch diese Anordnung wird das magnetische Feld der Dynamo und daher auch ihre Klemmenspannung viel weniger von den Schwankungen im Nutzstrom beeinflusst, als bei Hauptstromdynamos. Die Nebenschlußdynamo eignet sich besonders für parallel geschaltete Glühlampen.

Werden mehr Lampen eingeschaltet, so wächst die von der Dynamo zu liefernde Stromstärke des Hauptstromes, was ein Sinken der Klemmenspannung zur Folge hat. Dadurch nimmt auch die Stromstärke im Nebenschluß etwas ab, die magnetische Erregung wird geschwächt und die EMK der Maschine sinkt ebenfalls. Dies hat wiederum ein Sinken der Klemmenspannung zur Folge. Der Spannungsverlust ist jedoch verhältnismäßig gering, er kann mit Hilfe eines in der Nebenschlußleitung liegenden Nebenschlußregulators (*NR* in Abb. 374) aufgehoben werden; man schaltet an ihm so viel Widerstand aus, bis die durch das Voltmeter *V* angezeigte Spannung wieder ihren normalen Wert erreicht hat.

Wenn dagegen im Nutzstromkreis Lampen ausgeschaltet werden, so nimmt die Stromstärke im Nutzstrom ab, diejenige im Nebenschluß zu. Damit steigt die magnetische Erregung und auch die Klemmenspannung. Zum Ausgleich muß dann mehr Widerstand eingeschaltet werden.

3. Bei der Doppelschlußmaschine (Compounddynamo) (Abb. 375) sind die Elektromagnete mit einer doppelten Wicklung umgeben. Die Hauptstromwicklung enthält wenige Windungen dicken Drahtes, die Nebenschlußwicklung viele Windungen dünnen Drahtes.

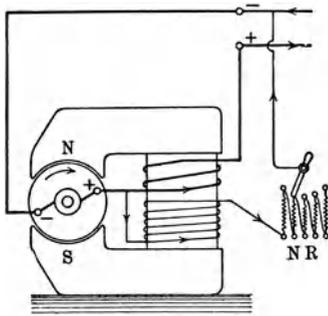


Abb. 375. Doppelschlußmaschine.

Werden im äußeren Netz einer solchen Dynamo z. B. Lampen eingeschaltet, so steigt die Stromstärke im Hauptstrom, sie fällt im Nebenschluß. Wenn die Windungszahlen der Hauptstrom- und Nebenschlußwicklung im richtigen Verhältnis gewählt sind, so heben sich diese beiden Wirkungen gegenseitig auf.

Die Doppelschlußmaschine hat den Vorteil, daß sie fast gar keine Bedienung erfordert, da sie bei Belastungsschwankungen ihre Spannung selbsttätig regelt. Sie wird daher an Bord besonders zum Betrieb von kleineren Lichtanlagen verwendet. Bei größeren Anlagen hat man meistens Nebenschlußmaschinen.

4. Einiges über Bau und Betrieb der Dynamos. Abb. 376 zeigt eine sechspolige Gleichstrommaschine.

Das Material des Magnetgestells ist Gußeisen oder Dynamogußstahl; die Magnetkerne der Feldmagnete sind meist aus Schmiedeeisen hergestellt. Auf die Kerne sind Polschuhe geschraubt, die zur Vermeidung von Wirbelströmen ebenso wie der Anker aus lamelliertem Eisen hergestellt sind.

Mehrpelige Maschinen haben in der Regel soviel Bürstenpaare wie Polpaare. Die Bürsten sind mit Haltern isoliert an dem drehbaren Bürstenträger befestigt und können so auf dem Kollektor verschoben werden. Sie müssen in der neutralen Zone stehen. Ist dies nicht der Fall, so liefert die Maschine nicht ihre volle Spannung, da die in den Spulen induzierten elektromotorischen Kräfte sich teilweise entgegenwirken; außerdem tritt dann am Kollektor eine für ihn sehr schädliche Funkenbildung auf. Die Lage der neutralen Zone hängt von der Belastung der Maschine ab. Bei Leerlauf, d. h. wenn kein Strom entnommen wird, liegt sie

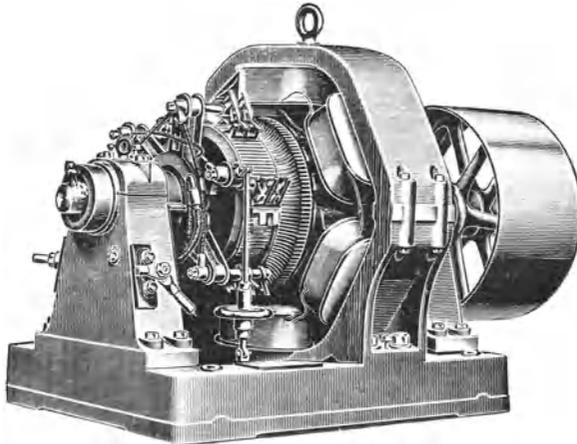


Abb. 376. Sechspolige Gleichstrommaschine.

in der Mitte zwischen den Feldmagneten. Bei Stromentnahme magnetisiert der um den Anker fließende Strom diesen quer zur Feldrichtung. Dieses Feld setzt sich mit dem des Feldmagnets zu einem resultierenden „Betriebsfeld“ zusammen, das in der Drehrichtung des Ankers gegen das des Feldmagnets gedreht ist (Ankerückwirkung). Um Funkenbildung am Kollektor zu vermeiden, müssen daher die Bürsten mit zunehmender Belastung mehr in der Drehrichtung verschoben werden.

Diesem Übelstand kann dadurch begegnet werden, daß zwischen den Hauptpolen des Feldmagnets Hilfspole (Wendepole) angebracht werden, die vom Hauptstrom umflossen werden und das Ankerquerfeld für jede Stromstärke aufheben.

Von der mechanischen Leistung, die einer Maschine zugeführt wird, werden etwa 80 bis 90 % in elektrische Energie umgewandelt. Der Rest geht infolge verschiedener Ursachen verloren, d. h. er verwandelt sich in Wärme.

Gleichstrom-Elektromotoren.

§ 192. Prinzip dieser Elektromotoren. Gegenelektromotorische Kraft.

Unter Elektromotoren versteht man Maschinen, in denen elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt wird.

1. Prinzip des Gleichstrom-Elektromotors. Ein solcher Motor stellt die Umkehrung einer Gleichstrom-Dynamomaschine dar. Führt man deren Anker von außen über die Bürsten Strom zu (während auch die Elektromagnete durch denselben oder durch Fremdstrom erregt sind), so erfährt jeder einzelne Leiter am Umfang des Ankers in dem Magnetfeld eine Kraft, die ihn nach der Kleinfingerseite zu verschieben sucht, wenn man die rechte Hand so in die Stromrichtung hält, daß die Handfläche die magnetischen Kraftlinien auffängt (§ 165, Abb. 329, 330). Alle so entstehenden Kräfte üben Drehmomente in gleichem Sinne auf den Anker aus, so daß dieser (falls er nicht festgehalten wird) in Drehung gerät und Arbeit nach außen abgeben kann.

2. Gegenelektromotorische Kraft. Wenn sich der Anker des an ein Netz gelegten Elektromotors dreht, so stellt die Maschine gleichzeitig eine Dynamo vor, da ja die Ankerleiter die Kraftlinien des Magnetfeldes schneiden. Nach dem Induktionsgesetz wird dadurch in der Ankerwicklung eine elektro motorische Kraft, und zwar stets eine der Netzspannung entgegengesetzte EMK induziert.

3. Selbstregulierung des Elektromotors. Je schneller der Motor läuft, um so größer wird die Gegen-EMK. Daraus ergibt sich folgendes ausgezeichnete Verhalten des Elektromotors.

Unbelastet nimmt der an ein Netz angeschlossene Motor eine solche Tourenzahl an, daß die Gegen-EMK die dem Motor zugeführte Klemmenspannung nahezu ganz aufhebt. Sie würde diese ganz aufheben, wenn keinerlei Reibung und sonstige Verluste vorhanden wären. In diesem Falle würde demnach der laufende Motor dem Netze keinen Strom entnehmen. Wird der Motor belastet, so sinkt die Tourenzahl und damit die Gegen-EMK. Da die Klemmenspannung konstant bleibt, so entnimmt jetzt der Motor dem Netze Strom, und zwar um so mehr, je größer die von ihm verlangte Arbeitsleistung ist.

|| Der Elektromotor regelt seinen Stromverbrauch selbst; je stärker er belastet wird, um so mehr Strom entnimmt er der Stromquelle.

4. Tourenregulator. Da die Gegen-EMK proportional der Stärke des Magnetfeldes und der Tourenzahl ist, so muß bei abnehmender Feldstärke die Tourenzahl zunehmen. Werden nämlich die Magnete schwächer erregt, so muß der Anker schneller laufen, um dieselbe Gegen-EMK wie vorher zu erzeugen.

Um die Tourenzahl eines Motors zu vergrößern, schwächt man die Feldmagnete durch Vorschalten von Widerstand (Tourenregulator).

5. Anlasser. Jeder größere Elektromotor, der direkt an ein Leitungsnetz mit konstanter Spannung angeschlossen werden soll, muß einen Anlasser besitzen, d. h. einen Regulierwiderstand, der vor den Anker geschaltet ist; derselbe ist beim Inbetriebsetzen des Motors zunächst ganz eingeschaltet und wird, während der Motor anläuft, allmählich langsam ausgeschaltet. Würde der Motor direkt an die Netzspannung angeschlossen, so würde beim Einschalten, da der Ankerwiderstand klein ist, ein sehr starker Strom auftreten, so daß die Sicherungen durchschlagen oder die Ankerwicklung gefährdet werden könnte. Hat der Motor seine normale Tourenzahl erreicht, so ist dies nicht mehr zu befürchten, da jetzt die Gegen-EMK den größten Teil der angelegten Spannung aufhebt.

§ 193. Arten der Gleichstrom-Elektromotoren.

Je nach der Schaltung von Anker und Magnetwicklung unterscheidet man Hauptstrommotoren, Nebenschlußmotoren.

1. Der Hauptstrommotor (Abb. 377). Der Anker und die aus wenigen dicken Windungen bestehende Magnetwicklung sind hintereinander geschaltet. Da der ganze Strom die Magnetwicklung durch-

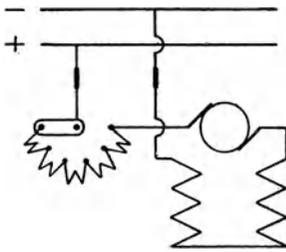


Abb. 377.
Stromverlauf im Hauptstrommotor.

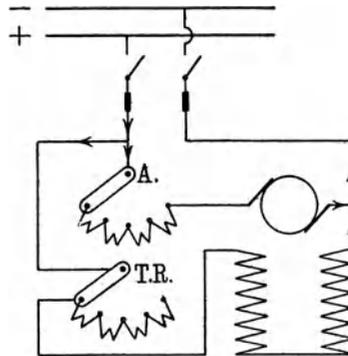


Abb. 378.
Stromverlauf im Nebenschlußmotor.

fließt, so hängt die Magneterregung und daher auch die Tourenzahl von der Belastung ab, und zwar sinkt die Tourenzahl mit zunehmender Belastung. Der Hauptstrommotor kann daher nur dann verwendet werden, wenn eine konstante Tourenzahl nicht verlangt wird. Wegen seiner hohen Anzugskraft beim Anlaufen kommt er hauptsächlich als Antrieb bei elektrischen Bahnen und bei Hebezeugen in Betracht.

2. Der Nebenschlußmotor (Abb. 378). Bei diesem sind Anker und Magneterregung parallel geschaltet. Die aus vielen Windungen bestehende

Magnetwicklung hat einen hohen Widerstand, es fließen nur 2 bis 5% des Gesamtstromes hindurch. Da der Magneterregerstrom hier nahezu unabhängig von der Ankerstromstärke ist, so bleibt die Feldstärke konstant; der Nebenschlußmotor hat daher eine nahezu konstante Tourenzahl bei allen Belastungen. Bei zunehmender Belastung nimmt die Tourenzahl nur wenig ab; diese Abnahme kann man wieder aufheben, indem man mittels des Tourenregulators mehr Widerstand vor die Magnetwicklung vorschaltet, wodurch das Magnetfeld geschwächt und die Tourenzahl erhöht wird. In Abb. 378 ist die Schaltungsskizze eines Nebenschlußmotors mit Anlasser (*A*) und Tourenregulator (*TR*) gezeichnet. Die Hebelstellung ist so, wie sie beim Anlassen des Motors sein muß. Der Widerstand im Anlasser ist zuerst ganz eingeschaltet, der im Tourenregulator dagegen ganz ausgeschaltet. Beim Inbetriebsetzen des Motors wird der Anlaßwiderstand langsam ausgeschaltet und hierauf der Hebel des Tourenregulators in die Stellung gebracht, die der gewünschten Tourenzahl entspricht.

Die Anlasser haben häufig eine elektromagnetisch betätigte, selbsttätige Ausschaltvorrichtung. Während der Motor in Betrieb ist, wird der Schalthebel des Anlassers durch einen vom Nebenschlußstrom umflossenen Elektromagnet festgehalten. Tritt nun aus irgend einem Grunde, z. B. durch Schmelzen einer Sicherung, eine Stromunterbrechung ein, so verliert der Elektromagnet seinen Magnetismus und der Schalthebel wird durch eine Spiralfeder in seine Anfangsstellung zurückgerissen. Es wird dadurch unmöglich gemacht, den Motor bei ausgeschaltetem Anlaßwiderstand an das Netz anzuschließen.

Erzeugung und Eigenschaften des Wechselstromes.

§ 194. Wechselstromdynamo.

1. Das Prinzip der Wechselstromdynamomaschine (Wechselstromgenerator) ist bereits in § 190 erläutert. Der Anker kann ebenso wie bei der Gleichstromdynamo als Trommelanker ausgebildet sein. Da die im Anker induzierten Ströme nicht gleichgerichtet zu werden brauchen, so können sie mittels Bürsten von Voll-Schleifringen abgenommen werden, die mit der Ankerwicklung verbunden sind. Auch bei den Wechselstrommaschinen ersetzt man die (in Abb. 366 gezeichneten) Stahlmagnete durch Elektromagnete. Diese müssen durch Gleichstrom aus einem Gleichstromnetz oder von einer besonderen kleinen Gleichstrommaschine oder aus einer Akkumulatorenbatterie erregt werden.

2. Innenpolmaschinen. Da Wechselstrommaschinen keinen Kollektor zum Gleichrichten der Ströme nötig haben, so kann man auch den Anker stillstehen und den Feldmagnet rotieren lassen, am bequemsten im Innern des außen befindlichen Ankers. Eine solche „Innenpolmaschine“

mit zwei Polpaaren ist in Abb. 379 dargestellt. Dem rotierenden Feldmagnet NS wird Gleichstrom durch die mit $+$ und $-$ bezeichneten Bürsten, die auf Vollringen schleifen, zugeführt. Die so erzeugten konstanten Pole des Feldmagnets induzieren in den Spulen des Ankers bei jedem Vorübergang wechselnde Spannungen und diese rufen in der bei 1 und 1' angeschlossenen äußeren Leitung Wechselströme hervor.

3. Die **Gleichpol- oder Induktormaschine** besitzt keinerlei Schleifringe und ist daher sehr betriebssicher. Abb. 380 a stellt schematisch den Feldmagnet dar. Dieser befindet sich in dem durch Abb. 380 b im

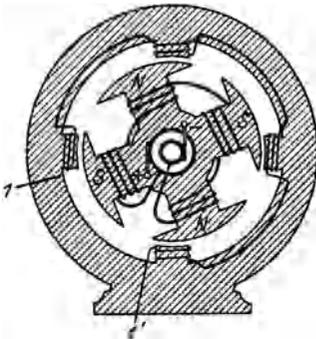


Abb. 379. Wechselstromgenerator.
Bei $+$ und $-$ Gleichstromanschluß.
Bei 1 und 1' Wechselstromabnahme.

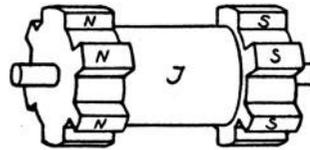


Abb. 380 a¹). Gleichpolrad.

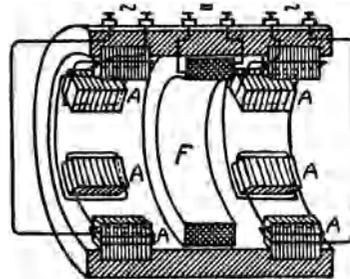


Abb. 380 b¹). Zugehöriges Gehäuse.

Schnitt dargestellten Gehäuse. Die gleichstromgespeiste Erregerwicklung F liegt im Gehäuse fest. Sie magnetisiert den Feldmagnet J , und zwar so, daß die „Polhörner“ der einen Seite lauter Nord-, die der anderen Seite lauter Südpole sind. Indem die Polhörner an den Ankerwicklungen A (Abb. 380 b) vorbeigedreht werden, entsteht in diesen die EMK. Gleichpolmaschinen für 500 Perioden werden vielfach bei mittelgroßen F. T.-Stationen verwendet.

4. Die **Frequenz oder Periodenzahl** n der Wechselströme hängt ab von der Umdrehungszahl u der Maschine und ihrer Polzahl p , und zwar ist

$$n = \frac{u}{60} \cdot \frac{p}{2}.$$

Die Wechselzahl ist doppelt so groß.

¹) Nach Fuchs, Grundriß der Funken-Telegraphie. Mit freundl. Erlaubnis des Verlages R. Oldenbourg, München.

Beispiel. Bei 40 Polen des Ankers (und ebenso vielen des Feldmagnets) und $n = 1500$ Umdrehungen in der Minute hat eine (für Zwecke der drahtlosen Telegraphie bestimmte) Wechselstrommaschine die Frequenz $n = \frac{1500}{60} \cdot \frac{40}{2} = 500$.

Die technisch gebrauchten Wechselströme haben meist eine Frequenz von 50 bis 60. Für große Sender der drahtlosen Telegraphie hat man Hochfrequenzmaschinen mit bis zu 100 000 Wechsellern gebaut (Goldschmidt-Maschine in Eilvese, Arco-Maschinen in Nauen). In der Funkentelegraphie verwendet man vielfach Maschinen mit der Frequenz 500.

5. Spannung und Spannungsregulierung der Wechselstrommaschine.

Die Spannung einer Wechselstrommaschine hängt von der Windungszahl der Spulen und von deren Schaltung ab. In Abb. 379 z. B. sind die vier Spulen hintereinander, also „auf Spannung“ geschaltet. Die Spannung ist ferner proportional zur Tourenzahl und zur Stärke der Pole des Feldmagnets. Ihre Regulierung erfolgt durch Veränderung der Felderregung, indem der Erregerstrom der Feldmagnete mittels eines Regulierwiderstandes auf die geeignete Stärke eingestellt wird.

§ 195. Wechselstrommessung. Augenblicks- und Effektivwerte.

1. Erklärungen. Bei einem Wechselstrom wechselt die augenblickliche Stromstärke i_t während einer Periode zweimal zwischen Null und dem

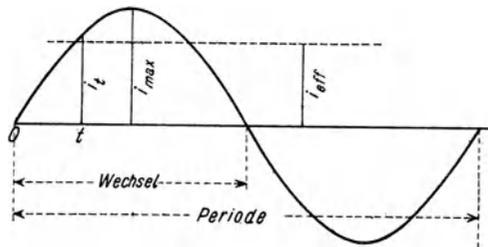


Abb. 381. Wechselstrom.

Höchstwert i_{\max} (s. Abb. 381). Das gleiche gilt für die den Strom erzeugende Wechselspannung.

Für die Berechnung der mit dem Wechselstrom erzielbaren Leistung (des „Effektes“) kommen nicht die nur vorübergehend auftretenden Höchstwerte i_{\max} und e_{\max} von Stromstärke und Spannung in Betracht, sondern Mittelwerte, die man als effektive Stromstärke (i_{eff}) und effektive Spannung (e_{eff}) bezeichnet.

Unter effektiver Stromstärke eines Wechselstromes versteht man die Stromstärke, die ein Gleichstrom haben muß, wenn er denselben Effekt (dieselbe Leistung), z. B. dieselbe Wärmewirkung haben soll, wie der Wechselstrom.

Bei einem sinusförmigen Wechselstrom ist

$$i_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_{\text{max}} = 0,707 \cdot i_{\text{max}} \quad (\text{s. Abb. 381}).$$

Ebenso gilt für die effektive Spannung

$$e_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot e_{\text{max}} = 0,707 \cdot e_{\text{max}}.$$

2. Oszillograph. Zum Studium und zur Demonstration von Wechselstromkurven, d. h. der Darstellung von i_t als Funktion der Zeit t hat man Instrumente gebaut, die dem Strom äußerst schnell zu folgen vermögen. Sie werden Oszillographen genannt.

In der Regel wird bei ihnen ein sehr kleiner Spiegel entsprechend dem Verlauf des Stromes i_t (oder der Spannung) bewegt. Ein auf den Spiegel fallender Lichtstrahl dient als langer Lichtzeiger und läßt die Bewegungen des Spiegels stark vergrößert auf einem Schirm erscheinen. Durch einen rotierenden Spiegel kann das Bild entsprechend der Zeit auseinandergezogen und so die Kurve des Wechselstromes sichtbar gemacht werden.

3. Messung der Effektivwerte. Wird von der Stromstärke und der Spannung eines Wechselstromes schlechthin gesprochen, so sind die Effektivwerte gemeint. Diese werden ohne weiteres durch Hitzdraht- oder durch geeignete Weicheiseninstrumente (§ 160₃, 164₆) angezeigt. Gewöhnliche Drehspulinstrumente sind zur Messung von Wechselströmen nicht geeignet.

§ 196. Selbstinduktion im Wechselstromkreise.

1. Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreise. Legt man an die Enden eines Drahtes, der induktionsfrei gewickelt ist, der also nur Ohmschen Widerstand w enthält, eine Wechselspannung, so lassen sich die Stromstärken einfach nach dem Ohmschen Gesetz berechnen, d. h. es ist

$$i_t = \frac{e_t}{w}, \quad i_{\text{max}} = \frac{e_{\text{max}}}{w} \quad \text{und} \quad i_{\text{eff}} = \frac{e_{\text{eff}}}{w}.$$

Wie die erste dieser Gleichungen zeigt, ist in diesem Falle die Stromkurve in Phase mit der Spannungskurve.

Dasselbe gilt für die ganzen Stromkreise, wenn diese nur Ohmschen Widerstand enthalten.

2. Selbstinduktion im Wechselstromkreise verkleinert die Stromstärke und bewirkt außerdem eine Phasenverschiebung, derart, daß der Strom der Spannung nachhinkt.

Man verbinde z. B. die Enden einer Spule von vielen Windungen über ein Hitzdrahtamperemeter mit den Polen einer Gleichstromquelle (Abb. 382) und lese die Stromstärke ab. Ersetzt man die Gleichstrom-

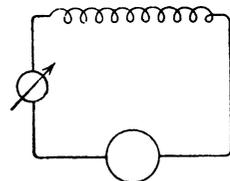


Abb. 382. Selbstinduktion im Wechselstromkreise.

durch eine Wechselstromquelle von gleicher effektiver Spannung, so fällt die Stromstärke geringer aus, besonders wenn die Spule einen Eisenkern enthält.

3. Wechselstromwiderstand. Daß eine Spule dem Wechselstrom einen größeren Widerstand bietet als dem Gleichstrom, hat seine Ursache in der Gegen-EMK ihrer Selbstinduktion. Diese äußert sich beim Gleichstrom nur im Augenblick des Ein- und Ausschaltens; beim Einschalten widerstrebt sie der Entstehung, beim Ausschalten dem Verschwinden des Stromes. Auch im Wechselstromkreise ist die EMK der Selbstinduktion stets der Änderung des gerade bestehenden Stromes entgegengerichtet. Diese Gegen-EMK muß von der aufgedrückten äußeren EMK mit überwunden werden; deren Effektivwert muß also für dieselbe Stromstärke größer sein als beim Gleichstrom. Mit anderen Worten, bei gleicher effektiver Spannung fällt die Stromstärke kleiner aus.

Der von der Selbstinduktion herrührende Widerstand einer Spule oder Leitung wird ihr induktiver Widerstand genannt, er ist dem Selbstinduktionskoeffizienten L und der Frequenz n direkt proportional. Sein Wert ist gleich $2\pi nL$. Für Gleichstrom ($n = 0$) wird er gleich Null. Kommt zum induktiven noch Ohmscher Widerstand w hinzu, so ist der Gesamtwiderstand

$$R = \sqrt{w^2 + (2\pi nL)^2}.$$

Beispiel. Eine Drahtspule hat einen Ohmschen Widerstand $w = 1 \Omega$ und einen Selbstinduktionskoeffizienten $L = 0,01$ Henry. Dann ist für Gleichstrom der Gesamtwiderstand $R = w = 1 \Omega$. Für Wechselstrom von der Frequenz $n = 50$ ist $R = \sqrt{1^2 + 3,14^2} = 3,3 \Omega$, für solchen von $n = 500$ ist $R = \sqrt{1^2 + 31,4^2} = 31,8 \Omega$ usw. Mit wachsendem n wächst der induktive Widerstand immer mehr, so daß der Ohmsche Widerstand ihm gegenüber immer weniger ins Gewicht fällt.

Es ist zu beachten, daß der induktive Widerstand nur ein scheinbarer Widerstand ist; durch ihn wird nicht elektrische Energie in Wärme verwandelt und er wirkt daher auch nicht dämpfend auf elektromagnetische Schwingungen wie der Ohmsche Widerstand.

4. Drosselspulen. Die Eigenschaft von Drahtspulen hoher Selbstinduktion, einem Gleichstrom nur den Ohmschen Widerstand, einem Wechselstrom dagegen außerdem einen großen induktiven Widerstand entgegenzusetzen, wird praktisch ausgenutzt, wenn man einem Stromverbraucher Gleichstrom zuführen, Wechselstrom dagegen von ihm fernhalten will. Da der Wechselstrom durch eine solche Spule abgedrosselt wird, nennt man sie Drosselspule. Die Drosselwirkung ist um so größer, je höher die Frequenz des Wechselstromes ist. Durch einen Eisenkern kann sie bedeutend erhöht werden (Eisendrossel).

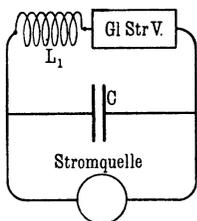


Abb. 383. Drosselspule L_1 .

Beispiel. Erzeugt die Stromquelle in Abb. 383 neben Gleichstrom auch Wechselstrom, der von dem Gleichstromverbraucher (Gl. Str. V.) ferngehalten werden

soll, so schaltet man eine Drosselspule L_1 vor und läßt den Wechselstrom sich in einer durch den Kondensator C für Gleichstrom gesperrten Nebenleitung ausgleichen.

5. Die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom läßt sich mit zwei Oszillographen zeigen, von denen der eine die Spannungs-, der andere die Stromkurve aufschreibt.

Zur Erklärung der Phasenverschiebung geht man von der Stromkurve aus (s. Abb. 384). Um den Wechselstrom i zu erzeugen, muß zunächst zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes w die Spannung e_1 vorhanden sein. Nun erzeugt aber i durch Selbstinduktion eine Gegenspannung, die am größten ist beim stärksten Anstieg von i . Sie sei durch die punktierte Sinuslinie dargestellt. Außer e_1 muß daher zur Überwindung der Gegenspannung noch die Spannung e_2 vorhanden sein. Insgesamt muß die den Strom i erzeugende Maschine daher die Spannung $e_1 + e_2 = e$ liefern; diese erreicht, wie die Abb. 384 zeigt, ihre Höchst- und Nullwerte früher als die Stromkurve.

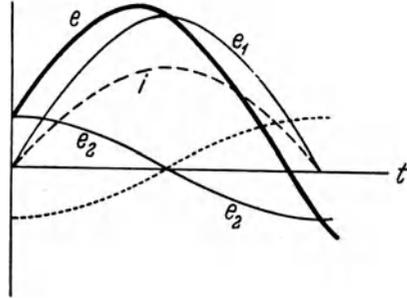


Abb. 384. Phasenverschiebung durch Selbstinduktion.

Der Strom bleibt hinter der Spannung um so mehr zurück, je größer der induktive Widerstand im Vergleich zum Ohmschen ist. Ist der Ohmsche Widerstand gegenüber dem induktiven sehr gering, so kann die Phasenverschiebung bis 90° betragen.

§ 197. Kapazität im Wechselstromkreise.

1. Schaltet man in den Stromkreis einer Gleichstromquelle einen Kondensator, so fließt nur im Augenblick des Einschaltens ein Strom, der den Kondensator auflädt. Sobald dies geschehen, ist der Stromkreis durch das Dielektrikum versperrt.

2. Ein Kondensator (eine Kapazität) läßt einen Wechselstrom hindurch, und zwar um so besser, je größer die Kapazität und je höher die Frequenz ist. Der Strom eilt der Spannung voraus.

Man schalte einen größeren Kondensator (Abb. 385) an eine Wechselstrommaschine möglichst hoher Frequenz und lege in die Leitung ein Hitzdrahtamperemeter oder eine Glühlampe. Das Amperemeter zeigt einen Strom an, die Lampe glüht auf, was beides bei einer Gleichstromquelle ausgeschlossen wäre.

Die in der Leitung fließenden Ströme sind nichts anderes als die Ladungs- und Entladungsströme des Kondensators. Je größer dieser ist und je häufiger die Ströme fließen, um so größer ist die Stärke des

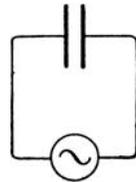


Abb. 385. Kapazität im Wechselstromkreise.

Wechselstromes, der durch den Kondensator „hindurchgeht“. Die „Leitfähigkeit“ des Kondensators ist demnach seiner Kapazität C und der Frequenz n proportional, und zwar ist sie gleich $2\pi n C$. Daraus folgt:

3. Der kapazitive Widerstand eines Kondensators hat den Wert $\frac{1}{2\pi n C}$. Für Gleichstrom ($n = 0$) wird er unendlich groß. Kommt zum kapazitiven Widerstand noch Ohmscher Widerstand w hinzu, so ist der Gesamtwiderstand

$$R = \sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{2\pi n C}\right)^2}.$$

Beispiel. Eine Glühlampe vom Ohmschen Widerstand $w = 450 \Omega$ wird hinter einen Kondensator von 6 Mikrofara geschaltet. Dann ist für Gleichstrom der Gesamtwiderstand $R = \infty$. Für Wechselstrom von der Frequenz $n = 60$ ist $R = \sqrt{450^2 + 442^2} = 637 \Omega$, für solchen von $n = 500$ ist $R = \sqrt{450^2 + 53^2} = 453 \Omega$ usw. Für hochfrequente Ströme verschwindet der Anteil des kapazitiven Widerstandes fast ganz und es bleibt nur der Ohmsche Widerstand übrig.

Auch der kapazitive Widerstand ist nur ein scheinbarer; er verwandelt nicht elektrische Energie in Wärme wie der Ohmsche Widerstand.

4. Sperr- oder Blockierungskondensator. Treten in einer Leitung gleichzeitig Gleich- und Wechselströme auf, so kann man durch einen Kondensator dem Gleichstrom den Weg versperren, während der Wechselstrom durch diesen Kondensator hindurchgeht (Sperr-, Blockierungs- oder Blockkondensator).

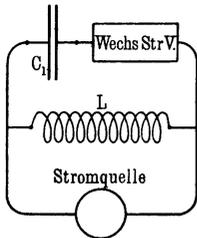


Abb. 386.
Sperrkondensator C_1 .

Beispiel. Erzeugt die Stromquelle in Abb. 386 neben Wechselstrom auch Gleichstrom, der von dem Wechselstrom-Verbraucher (Wechs. Str. V.) ferngehalten werden soll, so schaltet man einen Kondensator C_1 genügend großer Kapazität vor und läßt den Gleichstrom durch eine für Wechselstrom gedrosselte Nebenleitung L fließen.

Hochfrequenzsicherungen. Um bei den Sendern der drahtlosen Telegraphie zu verhüten, daß Hochfrequenzströme auf die Gleich- oder Wechselstrommaschine übergehen und dort wegen ihrer hohen Spannung die Isolation durchschlagen, verbindet man die Zu- und Ableitung der Maschinen mit der Erde, indem man jedoch diese Leitungen für Gleichströme oder Wechselströme geringerer Frequenz durch Kondensatoren sperrt. Die Hochfrequenzströme werden über die Kondensatoren glatt zur Erde abgeleitet und meiden den Weg durch die Maschine.

5. Die Phasenverschiebung kann auch hier durch Oszillographen sichtbar gemacht werden.

Ihre Ursache erhellt aus einer der Abb. 384 entsprechenden Figur. Die Überlegungen sind dieselben wie in § 196₅, nur ist die Gegenspannung des Kondensators dann am größten, wenn der positive Strom zu fließen aufhört. Die Gegenspannungskurve (punktiert) ist daher um 90° zu verschieben; dasselbe gilt

von e_2 . Die Summe $e_1 + e_2 = e$ gibt dann eine Sinuslinie, die der Stromkurve nachhinkt.

Der Strom eilt der Spannung um so mehr voraus, je größer der kapazitive Widerstand im Vergleich zum Ohmschen ist.

§ 198. Selbstinduktion und Kapazität im Wechselstromkreise.

Sind in einem Wechselstromkreise Selbstinduktion und Kapazität gleichzeitig vorhanden, so ist der Gesamtwiderstand

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

Die Phasenverschiebung φ ergibt sich aus

$$\tan \varphi = \frac{2\pi n L - \frac{1}{2\pi n C}}{w}.$$

Der Strom bleibt hinter der Spannung zurück oder eilt ihr voraus, je nachdem der Zähler des rechtsstehenden Bruches positiv oder negativ ist.

Ist der Zähler gleich Null, so beschränkt sich der Widerstand auf den Ohmschen und es entsteht, wenn dieser klein ist, auch bei kleiner angelegter Wechselspannung eine überaus große Stromstärke (Resonanzfall, elektrische Schwingung, s. § 202).

Aus

$$2\pi n L - \frac{1}{2\pi n C} = 0$$

folgt

$$\frac{1}{n} = T = 2\pi \sqrt{LC},$$

d. h. der Resonanzfall tritt ein, wenn die Periode der den Wechselstrom erzeugenden EMK den hier angegebenen Wert hat.

Aus der für $\tan \varphi$ mitgeteilten Formel ergibt sich: Im Resonanzfall ist der Strom mit der EMK in Phase. Ist die Periode der EMK kleiner als der angegebene Wert für T , so hinkt der Strom nach (induktiver Fall), ist sie größer, so eilt der Strom vor (kapazitiver Fall).

§ 199. Leistung des Wechselstromes.

Ein Gleichstrom fließt stets in der Richtung der ihn erzeugenden EMK (Spannung), wobei seine Leistung durch das Produkt $e \cdot i$ gegeben ist (§ 174).

Sind bei einem Wechselstrom Strom und Spannung in Phase, so haben e und i stets das gleiche Vorzeichen, die Leistung $e \cdot i$ ist also stets positiv, d. h. die Wechselstrommaschine leistet in dem Stromkreise Arbeit.

Hat dagegen der Strom eine Phasenverschiebung gegen die Spannung (§ 196₅ und § 197₅), so haben zeitweise e und i verschiedenes Vorzeichen, d. h. der Strom läuft entgegengesetzt zur Maschinenspannung (s. Abb. 384). In diesen Zeiten ist das Produkt $e \cdot i$ negativ, was besagt, daß aus dem Wechselstromkreise (infolge seiner Selbstinduktion oder seiner Kapazität) Arbeit in die Maschine zurückgeliefert wird. In der Abb. 387 ist neben e und i das Produkt $e \cdot i$ dargestellt für den Fall, daß der Strom i um 30° gegen die Spannung e in Phase verschoben ist. Die schraffierten Flächen

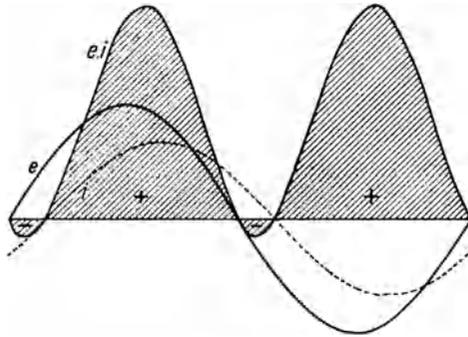


Abb. 387. Leistung im Wechselstromkreise.

stellen die Arbeit dar. Um die von der Maschine abgegebene Arbeit zu erhalten, hat man die mit dem Minuszeichen versehenen von den mit dem Pluszeichen versehenen Flächen zu subtrahieren.

Wird die Phasenverschiebung zwischen der i - und der e -Kurve größer, so wachsen die negativen Flächen auf Kosten der positiven; bei einer Phasenverschiebung von 90° sind beide Arten von Flächen einander gleich, man hat dann einen sogenannten „wattlosen Strom“.

Beispiel. Wird der Sekundärwicklung eines Transformators (§ 201) kein Strom entnommen, so ist der Strom in der Primärwicklung um 90° in Phase gegen die Spannung verschoben. Der Transformator entnimmt dann dem Netz keine Energie (abgesehen von kleinen Verlusten durch Erwärmung, Hysteresis u. a.).

Wechselstrommotoren, Transformatoren.

§ 200. Der Drehstrommotor.

1. Unter den Wechselstrommotoren ist der Drehstrommotor der wichtigste.

Unter Drehstrom oder Dreiphasenstrom versteht man drei gleich starke Wechselströme von derselben Frequenz, die je eine Phasenverschiebung von 120° gegeneinander haben.

Die Verkettung der drei Ströme ist in Abb. 388 dargestellt, indem für jede Zwölfteelperiode die Stromstärken senkrecht zur Zeitachse aufgetragen sind.

Die drei Ströme fließen in drei getrennten Leitungen von der Erzeugungs- zur Verbrauchsstelle; eine Rückleitung ist unnötig, da $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ ist, wie aus der Figur hervorgeht und auch leicht trigonometrisch

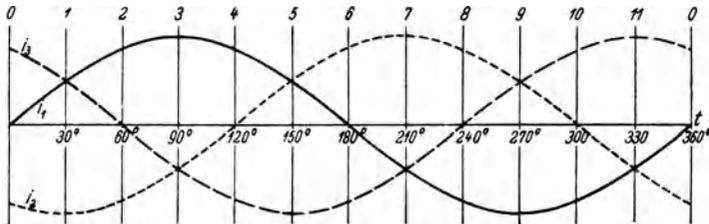


Abb. 388. Die drei Phasen des Drehstromes.

bewiesen werden kann. Diesseits der Stromquelle wie jenseits des Stromverbrauchers können daher die drei Leitungen in je einem Punkte vereinigt werden.

2. Erzeugung des Drehstromes. Bei den Dreiphasen-Wechselstromdynamos trägt der Anker drei Spulen, deren Mitten einen Abstand von 120° voneinander haben. Bei Mehrpolmaschinen sind drei Spulengruppen vorhanden, derart, daß von einem Pol bis zum nächsten gleichnamigen Pol drei Spulen, für jede Phase eine, vorhanden sind. Die drei Wicklungen laufen von einem Punkte aus, die anderen Enden sind über Schleifringe nach außen zum Stromverbraucher geführt.

3. Der Drehstrommotor hat drei je unter 120° gegeneinander gestellte Spulen. Durch jede von ihnen wird eine Phase, d. h. einer der Wechselströme geleitet. Dadurch entsteht in jeder Spule ein Wechselfeld. Die

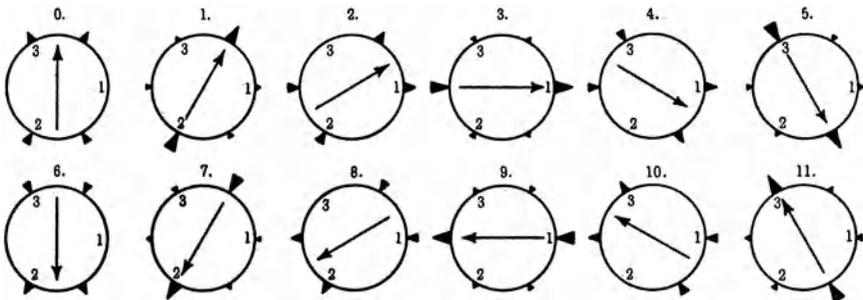


Abb. 389. Entstehung des Drehfeldes durch Dreiphasenstrom.

Überlagerung dieser drei Wechselfelder gibt ein resultierendes Magnetfeld von konstanter Stärke, das sich im Laufe einer Periode einmal herumdreht.

Dieses Drehfeldes wegen nennt man die drei verketteten Wechselströme Drehstrom.

Die Entstehung des Drehfeldes wird durch Abb. 389 veranschaulicht. Die Senkrechte auf der Ebene der ersten Spule, d. h. der Spule, durch die der Strom 1 der Abb. 388 fließt, sei nach der in den Kreis geschriebenen 1, die Senkrechte der zweiten Spule nach 2 und die Senkrechte der dritten Spule nach 3 gerichtet. Zur Zeit $t = 0$ (Abb. 388) ist $i_1 = 0$, i_2 negativ, i_3 positiv, beide mittelstark. Dasselbe gilt von den durch die Ströme erzeugten Magnetfeldern, wie in Abb. 389 durch die Größe der außen an den Kreis gesetzten Pfeilspitzen angedeutet ist. Nach $\frac{1}{12}$ Periode sind nach Abb. 388 i_1 und i_3 positiv (klein), i_2 negativ (groß). Dem entsprechend sind die Felder in Abb. 389₁ gezeichnet usf. Man sieht, daß das Gesamtfeld, das durch den Pfeil im Innern der Kreise dargestellt wird, sich stetig dreht, indem es seine Stärke beibehält.

Bringt man in das Drehfeld als Anker einen in sich geschlossenen Leiter, so werden in diesem durch das rotierende Feld Wirbelströme induziert, die eine solche Richtung haben, daß sie die gegenseitige Bewegung aufzuheben suchen. Der Anker folgt daher dem Drehfeld. Bei unbelastetem Motor ohne nennenswerte Reibung würde er dieselbe Geschwindigkeit annehmen wie das Drehfeld. Bei belastetem Motor bleibt er entsprechend der Belastung hinter ihm zurück.

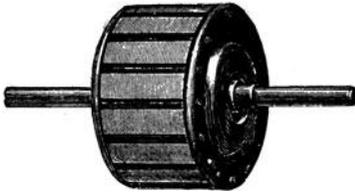


Abb. 390. Kurzschlußanker.

Der Anker des Drehstrommotors wird als Kurzschlußanker bezeichnet. Er besteht, wie Abb. 390 zeigt, aus dicken Kupferstäben, die beiderseits durch Kupferringe in leitender Verbindung stehen. Die Kupferstäbe sind in Nuten eines Zylinders aus lamelliertem Eisen untergebracht.

4. Ein großer Vorteil des Drehstrommotors ist es, daß er keinerlei Schleifringe benötigt. Diese Eigenschaft macht ihn ganz besonders zum Betrieb der Kreiselpompe geeignet.

5. Stator und Rotor. Die feststehenden Spulen, die das magnetische Drehfeld erzeugen, werden als Stator, der sich drehende Kurzschlußanker wird als Rotor bezeichnet. Der in Abb. 390 dargestellte Rotor ist innerhalb des ihn ringförmig umgebenden Stators angeordnet. Beim Kreiselpompe befindet sich der in den Kreiselpompe eingepreßte Kurzschlußanker außen, der Stator innen.

§ 201. Transformation von Wechselströmen.

1. Unter **Umformung** eines elektrischen Stromes versteht man die Verwandlung einer Stromart in eine andere, z. B. von Gleichstrom in Wechselstrom, Drehstrom in Gleichstrom. Die dazu nötigen rotierenden Maschinen heißen Umformer.

Ein besonderer Fall der Umformung ist die Umwandlung eines Stromes niederer Spannung und großer Stromstärke in einen Strom von höherer Spannung und geringerer Stromstärke oder umgekehrt. Bei Gleichstrom läßt sich dies nur durch rotierende Umformer erreichen. Es ist die technisch wertvollste Eigenschaft der Wechselströme, daß sie sich bequem durch automatisch arbeitende, stillstehende „Transformatoren“ (auch Umspanner genannt) auf andere Spannung bringen lassen.

2. Die wesentlichen Teile eines **Transformators** sind nach § 177, zwei Spulen, eine mit wenigen Windungen dicken, die andere mit vielen Windungen dünnen Drahtes, die so angeordnet sind, daß die bei Stromschluß in der „Primärspule“ entstehenden magnetischen Kraftlinien möglichst vollzählig die „Sekundärspule“ durchsetzen. Zu diesem Zweck ist meist ein Eisenkörper vorhanden, der zur Vermeidung von Wirbelströmen lamelliert ist.

Man ordnet bei den technisch gebrauchten Transformatoren die Primär- und die Sekundärwicklung nicht, wie in Abb. 349 gezeichnet, auf verschiedenen Eisenkernen an, sondern bringt auf den einzelnen Kernen einen Teil jeder der beiden Wicklungen unter, wodurch eine Streuung der magnetischen Kraftlinien vermieden wird. Die Anordnung kann ent-

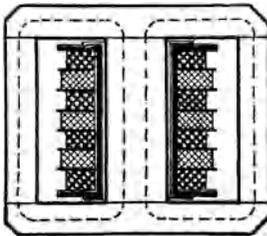


Abb. 391 ¹⁾. Manteltransformator.

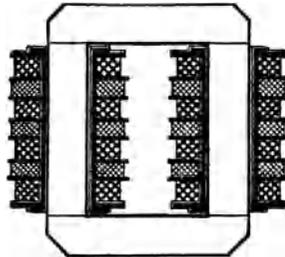


Abb. 392 ¹⁾. Kerntransformator.

weder zylinderförmig sein mit dem dicken Draht innen, dem dünnen außen, oder scheibenförmig, wie in den Abb. 391 und 392 dargestellt ist.

Die in Abb. 391 dargestellte Bauart wird als Kern-, die in Abb. 392 dargestellte als Manteltransformator bezeichnet.

Die Transformation von Drehstrom erfordert für jede Phase ein Spulenpaar. Die drei Paare werden gewöhnlich auf einem Eisengestell untergebracht.

3. **Wirkungsweise.** Fließt durch die Primärspule mit dem dicken Draht ein Wechselstrom, so wird in der Sekundärspule ein Wechselstrom derselben Frequenz, aber höherer Spannung und geringerer Stromstärke induziert und umgekehrt.

¹⁾ Nach Kosack, Elektrische Starkstromanlagen. Mit freundl. Erlaubnis des Verlages Jul. Springer, Berlin.

Das Verhältnis der sekundären EMK zur primären EMK ist gleich dem Verhältnis der Windungszahlen der Sekundär- und Primärspule.

Bedeutet E_1 die Spannung, i_1 die Stromstärke des Primärstromes, E_2 die Spannung und i_2 die Stromstärke des Sekundärstromes, so ist bei verlustlosem Arbeiten des Transformators die hineingeschickte elektrische Leistung gleich der herauskommenden, also bei induktionsfreier Belastung

$$E_1 \cdot i_1 = E_2 \cdot i_2.$$

Die Stromstärke des umgeformten Stromes nimmt in demselben Verhältnis ab oder zu, in dem die Spannung zu- oder abnimmt.

Der durch den Ohmschen Widerstand, Hysteresis und Wirbelströme entstehende Verlust an Energie beträgt bei guten Transformatoren der technisch gebrauchten Wechselströme nur wenige Prozente.

Transformatoren für hochfrequente Wechselströme, wie sie in der drahtlosen Telegraphie vorkommen, dürfen der Hysteresisverluste wegen keinen Eisenkern enthalten.

Auch in der Primärwicklung wird infolge ihrer Selbstinduktion eine EMK, und zwar eine Gegen-EMK, hervorgerufen. Bei offener Sekundärspule ist diese fast so groß wie die zugeführte Klemmenspannung, so daß die Stromentnahme nur sehr gering ist. (Wattloser Strom, s. § 199, Beispiel. Vergleich mit dem Verhalten eines Elektromotors bei Leerlauf § 192₃.)

4. Fernübertragung elektrischer Energie. In der leichten Umformbarkeit liegt ein großer Vorteil der Wechselströme. Der in den Elektrizitätswerken erzeugte Wechselstrom wird zur Fernleitung in hochgespannten Strom umgeformt. Da dieser nur geringe Stromstärke besitzt, so kann er durch dünne, gut isolierte Leitungen ohne wesentliche Verluste auf weite Entfernungen übertragen werden. An der Verbrauchsstelle wird dann der Strom wieder auf niedrige Spannung und große Stromstärke umgeformt. Die Wechselstrom-Transformatoren benötigen keiner Wartung, während Gleichstrom nur dadurch umgeformt werden kann, daß man mit ihm einen Gleichstrommotor und mit diesem eine für die gewünschte Spannung gebaute Dynamomaschine treibt. Nur im Funkeninduktor (§ 181) findet eine unmittelbare Erzeugung hoher Spannungen aus Gleichstrom dadurch statt, daß man den Gleichstrom durch einen Unterbrecher „zerhackt“ und ihn dann auf hohe Spannung transformiert.

5. Ein Nachteil des Wechselstromes ist es, daß man mit ihm nicht Akkumulatoren laden kann. Soll dieses geschehen, so ist der Wechselstrom zunächst durch einen Gleichrichter in Gleichstrom zu verwandeln (siehe § 213).

D. Drahtlose Telegraphie (Funkentelegraphie).

Elektrische Schwingungen.

§ 202. Elektrische Schwingungen durch Kondensatorentladungen.

1. Versuch. In Abb. 393 a bedeutet L eine Selbstinduktionsspule mit herausnehmbarem Eisenkern, C einen Kondensator (etwa 10 MF), O einen Oszillographen. Legt man den Umschalter U auf den linken

Kontakt, so wird der Kondensator C mit den Polen der Batterie B verbunden und auf deren Spannung (etwa 100 Volt) aufgeladen; legt man jetzt den Umschalter nach rechts, so entlädt sich der Kondensator durch die stark gezeichnete Strombahn und der Oszillograph zeichnet eine Entladungskurve, wie sie in Abb. 393 b dargestellt ist.

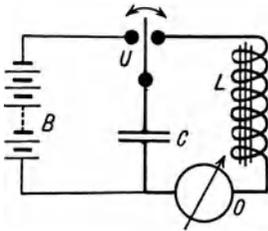


Abb. 393 a. Ladung und oszillatorische Entladung eines Kondensators.

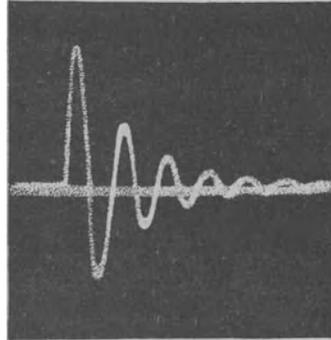


Abb. 393 b. Gedämpfte Schwingungen.

Dieser Versuch zeigt, daß beim Entladen eines Kondensators durch eine Selbstinduktionsspule (von nicht allzu großem Ohmschen Widerstand, siehe § 203₃) ein Hin- und Herschwingen (Oszillieren) der Elektrizität stattfindet.

Die Entladung eines Kondensators durch eine Strombahn mit Selbstinduktion erfolgt in Form von gedämpften Schwingungen (oszillatorische Entladung).

Kondensator und Strombahn werden zusammen als Schwingungskreis oder Kondensatorkreis, auch wohl als schwingendes System bezeichnet.

Verkleinert man die Kapazität, so rücken die einzelnen Schwingungen in der Entladungskurve näher zusammen, d. h. die Schwingungsdauer wird kleiner. Dasselbe zeigt sich beim Vermindern der Selbstinduktion, etwa durch Herausziehen des Eisenkernes.

2. Verkleinert man die Kapazität und Selbstinduktion des Schwingungskreises sehr stark, so werden die Schwingungen bei der Entladung des Kondensators schließlich so schnell, daß der Oszillograph ihnen nicht mehr zu folgen vermag. Daß sie auch in diesem Falle vorhanden sind, zeigt folgender Versuch. In Abb. 394 wird ein Schwingungskreis aus dem Kondensator C (Leidener Flasche von etwa $\frac{1}{500}$ MF) und einer Spule L von einigen Windungen aus dickem Kupferdraht gebildet. Die Strombahn ist durch eine Funkenstrecke F unterbrochen. Der Kondensator wird am einfachsten durch einen Funkeninduktor geladen, dessen Primär-

spule mit Wechselstrom oder unterbrochenem Gleichstrom gespeist wird. Die Enden der Sekundärspule des Induktors werden je mit einer Belegung der Leidener Flasche oder, was auf dasselbe hinauskommt, mit den Elektroden der Funkenstrecke verbunden.

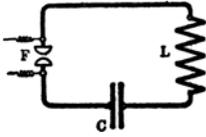


Abb. 394. Schwingungskreis mit Anschluß an Funkeninduktor.

Der Induktor lädt, während die Strombahn bei F unterbrochen ist, den Kondensator so lange auf, bis die Spannung ausreicht, um die Funkenstrecke F zu durchschlagen. Durch den bei F überspringenden Funken wird die Unterbrechungsstelle leitend; die glühende Funkenbahn ist ein Leiter, ebenso wie der Lichtbogen in einer Bogenlampe.

Läßt man das vom Funken ausgehende Licht auf einen schnell rotierenden Spiegel und von da erst auf die Netzhaut des Auges oder eine photographische Platte fallen, so erhält man das in Abb. 395 dargestellte

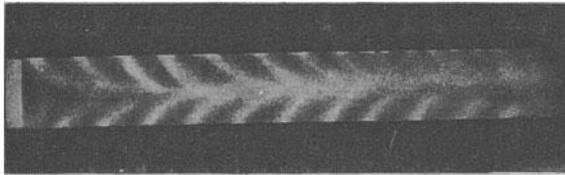


Abb. 395. Das Funkenbild im rotierenden Spiegel.

leuchtende Band. (Die Funkenstrecke ist in der Zeichenebene senkrecht zur Richtung des Bandes zu denken.) Das Bild zeigt, daß in Wirklichkeit während einer Funkenentladung eine ganze Reihe von einzelnen Funken übergehen, und zwar abwechselnd von der einen und der anderen Seite (Feddersen 1858), daß also auch in diesem Falle eine oszillatorische Entladung stattfindet.

3. Thomsonscher Schwingungskreis. In Abb. 396 sollen A und B schematisch die beiden Belegungen des Kondensators, $AFLB$ die Strombahn eines Schwingungskreises darstellen. A sei positiv, B negativ geladen. Die Entstehung von Schwingungen beim Entladen des Kondensators werde durch das danebengezeichnete mechanische Modell erläutert. Bei geschlossenem Hahn H sei die U-Röhre mit Wasser gefüllt, und zwar so, daß dieses im Schenkel A höher steht als im Schenkel B . Wird H geöffnet, so treibt der Überdruck in A das Wasser nach B . In Abb. 396₂ ist der Druckunterschied verschwunden, aber das Wasser strömt infolge seiner Trägheit in derselben Richtung weiter, so daß es in B ansteigt, und zwar, wenn keine Reibung vorhanden wäre, ebenso hoch, wie es vorher in A gestanden hatte. Von da schwingt das Wasser wieder nach

A zurück (Abb. 396₃). Die Gleichgewichtsstörung des Wassers in A und B verursacht also eine Schwingung. Ähnliches gilt für den elektrischen Schwingungskreis. Springt bei F ein Funke über, so fließt positive Elektrizität in der Richtung $AFLB$. Infolge der Selbst-

induktion des Schließungskreises setzt der Strom jedoch nicht sofort in voller Stärke ein, er schwillt vielmehr allmählich an, indem dabei gleichzeitig das zugehörige Magnetfeld um den Draht aufgebaut wird (Abb. 396₁). Die Stromstärke und mit ihr die Stärke des Magnetfeldes wachsen, solange noch positive Elektrizität auf A vorhanden ist. Wenn der Kondensator entladen ist, so bricht der von A nach B laufende Strom keineswegs plötzlich ab, vielmehr treibt ihn das verschwindende Magnetfeld noch eine Zeitlang in derselben Richtung weiter, so daß positive Ladung auf B aufgehäuft wird (s. § 180₄). Wenn keine Energieverluste vorhanden wären, so würde der Kondensator bis zu einer der ursprünglichen entgegengesetzten gleichen Spannung aufgeladen. Darauf findet in derselben Weise das Zurückschwingen der

Elektrizität statt, und dieser Vorgang würde sich beim Fehlen von Verlusten immer wiederholen. In Wirklichkeit treten stets Energieverluste (§ 203₃) auf, so daß die Spannung mehr und mehr sinkt, die Funkenstrecke mehr und mehr abkühlt und die Schwingungen schließlich aufhören.

4. Energieverwandlung. Wie bei den Schwingungen des Wassers in Abb. 396 eine fortgesetzte Verwandlung von Lagenenergie in Bewegungsenergie und umgekehrt stattfindet, so wird auch bei den Schwingungen eines Kondensatorkreises die Energie des geladenen Kondensators in eine andere Energieform, die Energie des die Strombahn umgebenden

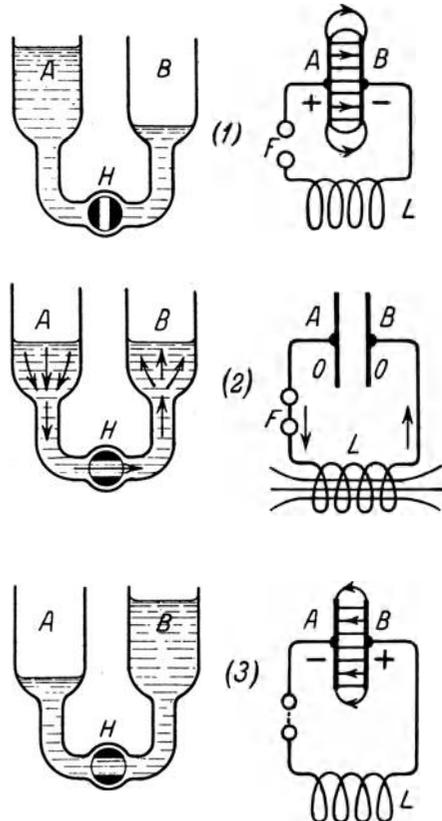


Abb. 396. Elektrischer Schwingungskreis und mechanisches Modell.

Magnetfeldes, wechselseitig verwandelt. Diesen ganzen Schwingungsvorgang bezeichnet man als elektromagnetische Schwingung.

§ 203. Schwingungsdauer, Frequenz, Amplitude und Dämpfung.

1. Man kann die Schwingungsdauer T der elektromagnetischen Schwingung bei dem Versuch der Abb. 393 entweder durch Vergleich mit einem anderen Wechselstrom von bekannter Schwingungsdauer oder aus den Abmessungen der Versuchsanordnung und der Drehgeschwindigkeit des Spiegels bestimmen. Das zweite Verfahren kann auch bei einem Versuch mit schnellen Schwingungen nach Abb. 394 und 395 angewendet werden.

Die Schwingungsdauer hängt ab von der Kapazität C des Kondensators und von der Selbstinduktion L des Schwingungskreises. Aus diesen Größen kann sie berechnet werden nach der

Thomson'schen Formel:
$$T = 2\pi\sqrt{C \cdot L}$$
 (vgl. § 198).

Setzt man in diese Formel die Kapazität C in Farad, die Selbstinduktion L in Henry ausgedrückt ein, so erhält man T in Sekunden.

Beispiele. 1. $C = 10 \text{ MF} = \frac{1}{100\,000} \text{ Farad}$; $L = 1 \text{ Henry}$. In diesem Falle ist $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{100\,000}} = 0,02 \text{ s}$ (abgerundet).

2. $C = \frac{1}{100} \text{ MF} = \frac{1}{100\,000\,000} \text{ Farad}$; $L = \frac{1}{4000} \text{ Henry}$. Daraus folgt: $T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{400\,000\,000\,000}} = \frac{1}{100\,000} \text{ s}$ (abgerundet).

Wegen der sehr kleinen Schwingungsdauer rechnet man vielfach mit der Frequenz $n = \frac{1}{T}$, d. h. der Anzahl Hertz (Schwingungen in der Sekunde, s. § 84₈). Der im Schwingungskreis fließende Wechselstrom wird als hochfrequenter Wechselstrom bezeichnet, wenn seine Frequenz einige tausend Hertz übersteigt.

In der Umgebung des Schließungsbogens ist ein magnetisches Wechselfeld derselben Frequenz vorhanden.

Die Schwingungszahlen von Hochfrequenzströmen werden auch in „Kilohertz (kHz)“ oder „Kilocykeln/Sek. (kc/s)“ ausgedrückt, wobei 1 Kilohertz = 1 Kilocycle/Sekunde = 1000 Hertz bedeutet. Im Beispiel 2 ist die Frequenz = 100 000 Hertz = 100 Kilohertz = 100 kc/s.

Die Thomson'sche Formel zeigt, daß zur Erzielung einer bestimmten Schwingungsdauer zwei Mittel dienen können. Man kann entweder bei unveränderter Selbstinduktion die Kapazität des Kondensators oder bei unverändertem Kondensator die Selbstinduktion des Schwingungskreises passend wählen. Die Schwingungsdauer wird erhöht einerseits durch Verwendung größerer Kondensatoren oder durch Parallelschalten mehrerer Kondensatoren, andererseits dadurch, daß man die Selbstinduktion des Schwingungskreises durch Verlängern des Drahtes oder Einschalten von einander isolierter Drahtwindungen oder Spulen vergrößert. Die Schwin-

gungsdauer wird verkürzt einerseits durch Verwendung kleinerer Kondensatoren oder Hintereinanderschalten von Kondensatoren, andererseits durch Verkürzung des Schließungskreises.

Wesentlich für einen Schwingungskreis sind nach der Thomsonschen Formel die Kapazität und die Selbstinduktion. Man sagt deshalb häufig abgekürzt, der Schwingungskreis sei „aus einer Kapazität C und einer Selbstinduktion L “ zusammengesetzt, statt „aus einem Kondensator mit der Kapazität C und einem Schließungskreis mit der Selbstinduktion L “.

2. Die Amplituden, d. h. die Höchstwerte der Wechselstromstärke und damit der Stärke des zugehörigen Magnetfeldes sind von der Spannung abhängig, bis zu welcher der Kondensator aufgeladen wurde. Die Spannung kann um so höher sein, je länger die Funkenstrecke ist (bei 1 cm Funkenstrecke etwa 30000 Volt). Übrigens ist die Funkenstrecke nur zur Ermöglichung der Aufladung nötig. Die Schwingungen gehen in viel vollkommenerer Weise in Schwingungskreisen ohne Funkenstrecke (Abb. 393 a) vor sich. Wie sie in derartigen Kreisen erregt werden können, wird in § 204 erläutert.

3. Die Dämpfung der Schwingungen. Die bei der Entladung eines Kondensators auftretenden elektrischen Schwingungen sind mehr oder weniger stark gedämpft. Als Dämpfungsursachen kommen hauptsächlich in Betracht:

der Ohmsche Widerstand der Leitung, vor allem der Funkenstrecke; Verluste im Kondensator, besonders durch Sprühen des Kondensators; Ausstrahlung von Energie in Form elektromagnetischer Wellen (§ 209).

Trägt man auf einer Koordinatenachse die Zeit und senkrecht zu ihr die Stromstärken auf, so würde man ohne Dämpfung eine Sinuskurve erhalten. In Wirklichkeit liefert die beschriebene Kondensatorentladung eine Kurve nach Art der Abb. 394. Die Schwingungsweite wird rasch kleiner, die Schwingungsdauer dagegen bleibt dieselbe. Man sagt bildlich, daß die Schwingung „abklingt“, indem man das allmähliche Abnehmen der Amplitude mit dem Verklingen eines Tones vergleicht. Das Verhältnis zweier um eine Schwingungsdauer voneinander entfernten Schwingungsweiten (Amplituden) wird das Dämpfungsverhältnis genannt.

Überschreitet der Ohmsche Widerstand w eines Schwingungskreises den Wert $2\sqrt{\frac{L}{C}}$, so ist die Dämpfung so stark, daß überhaupt keine Eigenschwingungen entstehen. Die auf den Kondensatorbelegungen angesammelten Elektrizitätsmengen gleichen sich dann durch einen allmählich schwächer werdenden Gleichstrom aus. Einen solchen Schwingungskreis nennt man aperiodisch.

Der Leitungswiderstand ist bei den schnellen Schwingungen größer als bei Gleichstrom oder bei Wechselstrom niederer Frequenz. Während sich bei

diesen Stromarten die elektrische Strömung gleichmäßig auf den ganzen Querschnitt verteilt, verläuft der hochfrequente Strom fast nur an der Oberfläche (Skin-effekt). Es werden daher in Schwingungskreisen statt massiver Leitungen häufig Litzen verwendet, die aus zahlreichen sehr dünnen, voneinander durch Emaillack isolierten Kupferdrähten verdreht sind, da man hierdurch den Strom zwingt, den vollen Querschnitt auszunutzen.

Zwecks Vergrößerung der leitenden Oberfläche werden die Selbstinduktionsspulen der Sender vielfach aus (versilbertem) Kupferband und die Hochfrequenz führenden Verbindungsleitungen aus Kupferrohr hergestellt.

4. Die starke Induktionswirkung der hochfrequenten Wechselfelder läßt sich zeigen, wenn man über die Selbstinduktionsspule L der Abb. 394 eine Sekundärspule aus wenigen Drahtwindungen hält, die durch eine kleine Glühlampe geschlossen sind. Diese leuchtet dann um so heller auf, je mehr Kraftlinien der Spule L durch die Sekundärspule gehen.

5. Die Ausnutzung der Zeit. Bei dem in Abb. 394 dargestellten Versuch entsteht bei jedem einzelnen Funkenübergang ein gedämpfter Schwingungszug.

Der Gleichstrom werde durch einen Hammerunterbrecher 100 mal in der Sekunde unterbrochen. Da nur der in der Sekundärspule induzierte hochgespannte Öffnungsstrom in Betracht kommt, so wird demnach der Kondensator 100 mal in der Sekunde aufgeladen, und ebenso viele Funkenentladungen erfolgen. Jeder Funke leitet Schwingungen ein, deren Schwingungsdauer $\frac{1}{1\,000\,000}$ s betrage und deren Dämpfung so beschaffen sei, daß 10 merkliche ganze Schwingungen auftreten. Die dafür erforderliche Zeit ist $10 \cdot \frac{1}{1\,000\,000} = \frac{1}{100\,000}$ s. Da der Kondensator immer erst nach $\frac{1}{100}$ s wieder aufgeladen wird, so dauern in diesem Falle die Pausen zwischen den Schwingungen, während deren die Elektrizität in Ruhe ist, $\frac{1}{100} - \frac{1}{100\,000} = \frac{999}{100\,000}$ s, also 999 mal so lang wie die Schwingungen selbst.

Man erkennt hieraus, wie schlecht im Grunde bei dieser Versuchsanordnung die Zeit ausgenutzt wird, und von welcher Wichtigkeit es ist, einerseits die Funken noch schneller aufeinanderfolgen zu lassen, andererseits elektrische Wellen von geringerer Dämpfung oder ungedämpfte Wellen zu erzeugen. In der Tat liegt die Entwicklung der drahtlosen Telegraphie zum Teil in den hiermit angedeuteten Richtungen.

(Siehe Übungsaufgaben: Elektrizität 44 bis 47.)

§ 204. Erregung eines schwingungsfähigen Kreises durch Kopplung mit einem schwingenden Kreis. Resonanz.

1. Magnetische oder induktive Kopplung. In Abb. 397 sind zwei Schwingungskreise abgebildet, die je aus einem Kondensator und einer Strombahn bestehen. Der „primäre Kreis“ I mit der Kapazität C_1 und der Selbstinduktion L_1 enthält eine Funkenstrecke und kann durch An-

schluß an einen Funkeninduktor $F. J.$ zum Schwingen angeregt werden. Die nebeneinander gezeichneten Spulen sind als übereinandergeschoben zu denken, natürlich derart, daß sie gut voneinander isoliert sind. Der „sekundäre Kreis“ II enthält keine Funkenstrecke. Werden im Kreise I Schwingungen erzeugt, so gehen die Kraftlinien des hierdurch in der Spule L_1 entstehenden magnetischen Wechselfeldes mehr oder weniger auch durch die Spule L_2 des Kreises II. Durch Induktion entstehen in diesem Schwingungen von gleicher Frequenz, wie sie die Schwingungen im Kreise I besitzen. Man nennt solche Schwingungen nach § 49 erzwungene Schwingungen, im Gegensatz zu den Eigenschwingungen des Kreises II. Die Kreise sind durch das ihnen gemeinsame Magnetfeld gekoppelt; man nennt die Kopplung in diesem Falle eine magnetische oder induktive.

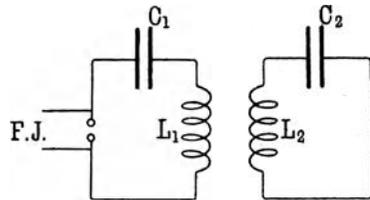


Abb. 397. Magnetische (induktive) Kopplung.

Die Stärke der erzwungenen Schwingungen im Kreise II kann durch ein in diesen Kreis eingeschaltetes Hitzdrahtamperemeter angezeigt werden; die am Kondensator C_2 auftretende Wechselspannung kann man durch eine Glimmlampe oder Neonröhre sichtbar machen.

Die Kopplung der beiden Schwingungskreise kann mehr oder weniger fest sein. Die induktive Kopplung ist um so fester, je mehr Kraftlinien des Kreises I den Kreis II schneiden, d. h. je näher man die aufeinanderwirkenden Spulen bringt, und je größer die Windungszahlen dieser Spulen sind.

Je loser die Kopplung ist, desto schwächer ist der in Kreis II fließende Wechselstrom und desto niedriger die Wechselspannung an C_2 . Die induktive Kopplung wird häufig so ausgeführt, daß die eine der beiden Spulen drehbar im Innern der anderen Spule angebracht ist („Kopplungsvariometer“). Stehen die Windungsebenen der beiden Spulen senkrecht zueinander, so induziert der primäre Kreis nicht auf den sekundären und die Schwingungskreise sind nicht miteinander gekoppelt. Dreht man die bewegliche Spule aus dieser Nullstellung etwa nach rechts, so nimmt die Kopplung zu, bis die Windungen beider Spulen parallel liegen (90°), bei weiterem Drehen nimmt sie wieder ab. Dasselbe gilt für eine Drehung der beweglichen Spule aus der Nullstellung nach links. Zwei zur Nullstellung symmetrischen Lagen der Drehspule entsprechen gleich starke, aber in der Phase entgegengesetzte Schwingungen im Sekundärkreis (Seitenbestimmung beim Telefunken-Bordpeiler).

2. Direkte Kopplung. Ihrer Einfachheit wegen wird vielfach die in Abb. 398 dargestellte „direkte Kopplung“ angewendet. Bei ihr

ist ein Teil der „Selbstinduktion“, d. h. der Strombahn, den Kreisen I und II gemeinsam. Man kann sich diese Kopplung aus der magnetischen oder induktiven Kopplung dadurch entstanden denken, daß man einen Teil der Spulen L_1 und L_2 ganz nahe zusammengelegt und dann die Isolation zwischen ihnen herausgenommen hat.

Die direkte Kopplung ist um so fester, je mehr Windungen der Selbstinduktion den beiden Kreisen gemeinsam sind.

3. Elektrische oder kapazitive Kopplung liegt vor, wenn die beiden Kreise eine „Kapazität“, d. h. einen Kondensator gemeinsam haben, wie in Abb. 399 dargestellt. Sind im Kreise I Schwingungen vorhanden,

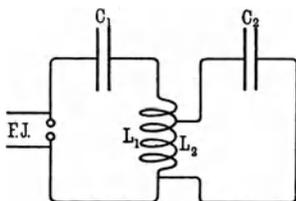


Abb. 398. Direkte Kopplung.

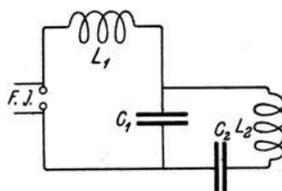


Abb. 399. Elektrische (kapazitive) Kopplung.

so rufen sie periodische Spannungsschwankungen an den Belegungen dieses Kondensators C_1 hervor. Dadurch wird der Kreis II zum Mitschwingen angeregt. Jeder der Kreise kann außer dem gemeinsamen noch eigene Kondensatoren besitzen.

Diese Kopplung ist um so fester, je größer die den Kreisen gemeinsame Kapazität ist.

4. Resonanz, Abstimmung der Kreise aufeinander. Der sekundäre Kreis besitzt nach der Thomsonschen Formel die Eigenschwingungsdauer $T_2 = 2\pi\sqrt{C_2 \cdot L_2}$. Solange diese von der Schwingungsdauer $T_1 = 2\pi\sqrt{C_1 \cdot L_1}$ des primären Kreises verschieden ist, sind die erzwungenen Schwingungen des sekundären Kreises schwach. Macht man aber durch Veränderung entweder einer Kapazität oder einer Selbstinduktion die Schwingungsdauern einander gleich, so summieren sich die von Kreis I auf Kreis II übertragenen Antriebe, und es tritt Resonanz ein.

Die Bedingung, daß zwei Schwingungskreise in Resonanz sind, ist daher:

$$C_1 \cdot L_1 = C_2 \cdot L_2$$

Im Resonanzfalle sagt man, der Kreis II sei auf den Kreis I „abgestimmt“. Die Abstimmung wird am bequemsten durch variable Selbstinduktionen, d. h. Spulen von veränderlicher Länge oder Lage, oder durch Drehkondensatoren erreicht.

5. Resonanzkurve. Verändert man die Frequenz des Kreises II durch einen Drehkondensator C_2 (Abb. 397 bis 399) und beobachtet den

Ausschlag eines in diesen Kreis eingeschalteten Hitzdrahtamperemeters, so läßt sich aus den zusammengehörigen Werten von Frequenz und Ampere-meterausschlag eine „Resonanzkurve“ zeichnen (Abb. 400); diese hat ihr Maximum bei Resonanz der beiden Kreise und verläuft um so spitzer, je schwächer die beiden Kreise gedämpft sind.

Wenn die Resonanzkurve spitz verläuft, wenn also eine geringe Änderung der Abstimmung schon ein starkes Abfallen der erzwungenen Schwingungen im Sekundärkreis verursacht, so nennt man die Resonanz scharf.

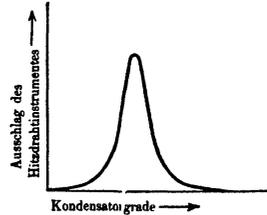


Abb. 400. Resonanzkurve.

6. Vor- und Nachteile loser und fester Kopplung. Bei fester Kopplung findet eine intensivere und schnellere Energieübertragung aus dem geschlossenen in den offenen Kreis statt als bei loser Kopplung.

Feste Kopplung hat aber auch Nachteile im Gefolge. Werden nämlich zwei Schwingungssysteme, die beide die gleiche Eigenfrequenz besitzen, miteinander gekoppelt, so entstehen in jedem System zwei verschiedene Schwingungen nebeneinander, von denen die eine eine größere, die andere eine kleinere Frequenz besitzt als die ursprüngliche. Die Ursache für diese Erscheinung der „Zweiwelligkeit“ ist die Rückwirkung des sekundären Kreises auf den primären. Die Frequenzen dieser Kopplungsschwingungen unterscheiden sich um so mehr, je fester die Kopplung ist.

Scharfe Resonanz erhält man bei gedämpften Schwingungen nur bei loser Kopplung. Es ist Sache der praktischen Erfahrung, in jedem Falle den günstigsten Kopplungsgrad zu ermitteln.

(Siehe Übungsaufgaben: Elektrizität 48 bis 50.)

§ 205. Kontakt- oder Kristalldetektoren.

1. Gleichrichter. Zum Nachweis schwacher Hochfrequenzschwingungen dienen empfindliche Apparate, die man Detektoren nennt.

Die in der Funkentelegraphie lange Zeit ausschließlich verwendeten Kontaktdetektoren bestehen aus einer Metallspitze oder -kante S (Abb. 401), die unter sanftem Druck eine Kristallfläche K z. B. von Bleiglanz, Silicium, Pyrit (Schwefelkies), Carborund u. a. berührt. Eine solche Berührungsstelle hat die merkwürdige Eigenschaft, daß sie für schwache Ströme ganz verschiedenen Widerstand besitzt, je nachdem der Strom in der einen oder der anderen Richtung hindurchgeleitet wird.

Um das zu zeigen, schaltet man ein Drehspulgalvanometer an eine Wechselstromquelle von so hoher Frequenz, daß der Zeiger des Galvanometers den Stromstößen nicht mehr folgen kann; es gibt dann keinen Ausschlag. Legt man aber

einen Kontaktdetektor in den Stromkreis, so schlägt es aus, weil der Detektor die Stromstöße der einen Richtung durchläßt, die der entgegengesetzten aber gar nicht oder wenigstens viel schwächer (Ventilwirkung). Diese Eigenschaft läßt sich unmittelbar sichtbar machen, wenn man an Stelle des Drehspulgalvanometers einen Oszillographen in den Stromkreis legt.

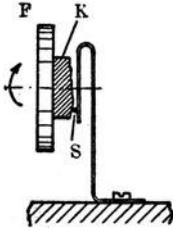


Abb. 401.
Kontaktdetektor
(Stellzelle).

Wegen dieser Eigenschaft, im wesentlichen nur Ströme in einer Richtung durchzulassen, bezeichnet man den Kontaktdetektor auch als Gleichrichter. Vielfach sind die Kontaktdetektoren so eingerichtet, daß, wenn sie einmal unempfindlich geworden sind, leicht eine neue wellenempfindliche Stelle aufgesucht werden kann. Bei der in Abb. 401 dargestellten Einrichtung geschieht das durch Drehen des Rades F , an dem der Kristall K befestigt ist.

2. Aperiodischer Kreis. Im Kreise I (Abb. 402) erregt man, etwa durch einen Funkeninduktor oder Summer, Schwingungen. Der Kreis II enthält eine Spule S von einigen Drahtwindungen, den Detektor D , der schematisch durch eine Pfeilspitze und einen Strich dargestellt ist, und das Drehspulgalvanometer G .

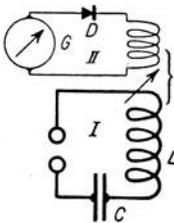


Abb. 402.
Aperiodischer Kreis.

Koppelt man Kreis II mit dem Kreis I, so wirkt der Detektor auf die in II induzierten Hochfrequenzströme wie ein Ventil, das nur Stromstöße einer Richtung hindurchläßt. In II entstehen daher an Stelle des Wechselstromes Gleichstromstöße derselben Richtung, welche das Galvanometer ausschlagen lassen. Da der Detektor einen hohen Widerstand hat (von der Größenordnung 1000 Ohm), können im Kreise II keine eigentlichen Schwingungen mehr entstehen. Man nennt daher den Kreis einen aperiodischen Kreis (s. § 203₃).

3. Telephonempfang. Die hochfrequenten Schwingungen der drahtlosen Telegraphie können nicht unmittelbar mit einem Telephon abgehört werden, da unser Ohr Schwingungen von mehr als 30000 Hertz nicht wahrzunehmen vermag. Außerdem haben die Telephonspulen einen viel zu hohen Wechselstromwiderstand, als daß die hochfrequenten Stromstöße in merklicher Stärke hindurchgehen könnten, und die Membran des Hörers wäre nicht imstande, so schnell wechselnden Kräften zu folgen.

Um das Vorhandensein von Hochfrequenzschwingungen in einem Telephon hörbar machen zu können, muß man sie zunächst durch einen Detektor gleichrichten. Die Wirkung des Detektors werde zunächst bei der Aufnahme gedämpfter Schwingungen erläutert. In Abb. 403 sind die Vorgänge vom Überspringen der Funken im Kreise I bis zur Anziehung der Hörermembran im Kreise II schematisch dargestellt. Jede Entladung

durch einen Funken (*a*) verursacht einen hochfrequenten Schwingungszug, der im Kreise II eine erst anwachsende und dann abklingende Schwingung erregen würde, wenn dieser keinen Detektor enthielte (*b*). Durch den Detektor werden beispielsweise die negativen Halbschwingungen unterdrückt und die Wirkung der positiven summiert, so daß die bei *d* angedeuteten Telefonströme entstehen. Diese bewirken die in *e* darge-

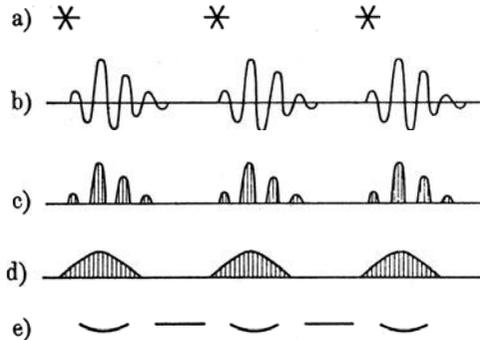


Abb. 403. Detektorwirkung, Telefonempfang.

a) Funke. b) Schwingung im Empfänger. c) Wirkung des Gleichrichters. d) Telefonströme. e) Telefonmembran.

stellten Anziehungen der Hörermembran. Es ist dabei zweckmäßig, dem Telephon einen Blockkondensator parallel zu schalten, der die gleichgerichteten Stromstöße ansammelt und dessen Entladungsstrom dann die Anziehung der Membran des Hörers verursacht.

Die Telefonmembran wird demnach ebenso oft in der Sekunde angezogen, wie Funken im Kreise I übergehen. Man hört also im Telephon einen Ton entsprechend der sekundlichen Funkenzahl im Kreise I. (In Abb. 404 muß man sich die einzelnen Funken und Schwingungszüge durch viel größere Zwischenräume getrennt denken.) Der Detektor verwandelt also die hochfrequenten Schwingungen in niederfrequente, hörbare.

§ 206. Frequenzmesser (Wellenmesser).

Zur bequemen Messung der Frequenz von Hochfrequenzströmen, die beispielsweise in einem Schwingungskreis I (Abb. 404) fließen, benutzt man einen schwach gedämpften Schwingungskreis II, den Frequenz- oder Wellenmesser. Er besteht aus einem Drehkondensator *C* und einer (auswechselbaren) Spule *L*. Zu jeder Stellung des Kondensators *C* kann man die Eigenfrequenz (oder die „Wellenlänge“, siehe § 209) aus einer Eichkurve entnehmen. Als Schwingungsanzeiger dient der Kontaktdetektor *D* mit dem Galvanometer *G*, an dessen Stelle auch ein Hörer geschaltet werden kann. Man koppelt den Frequenzmesser II sehr lose

mit dem erregten Kreis I und verändert C , bis man am Galvanometer den größten Ausschlag oder im Hörer den lautesten Ton beobachtet. Die dieser Resonanzlage entsprechende Frequenz (Wellenlänge) wird an der Eichkurve abgelesen. Durch Auswechseln der Spule L kann man verschiedene Frequenzbereiche erhalten.

Ersetzt man Detektor und Galvanometer durch einen Summer S und ein Element E (in Abb. 404 punktiert gezeichnet), so kann der Kreis II auch als

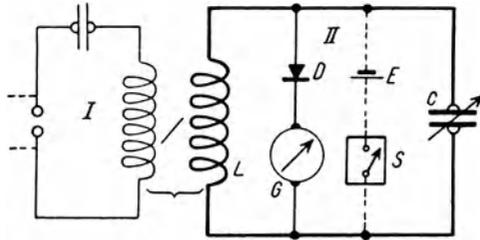


Abb. 404. Frequenz- oder Wellenmesser.

schwacher, geeichter Hilfssender verwendet werden. Der Summer S ist ein kleiner rasch schwingender elektromagnetischer Unterbrecher (Wagnerscher Hammer), der bei jeder Stromunterbrechung eine oszillatorische Entladung des bei Stromschluß aufgeladenen Kondensators hervorruft.

Elektromagnetische Wellen.

§ 207. Offene Schwingungskreise.

1. Nach § 202 könnte es scheinen, als ob sich die physikalischen Vorgänge der elektrischen Schwingung ganz im Schwingungskreis und dessen unmittelbarer Umgebung abspielten. Das ist jedoch nicht immer der Fall; ein Teil der im Schwingungskreis vorhandenen Energie wandert unter Umständen in Form einer elektromagnetischen Wellenbewegung in den Raum hinaus. Bevor dieser Vorgang näher betrachtet wird, sei eine Form des Schwingungskreises, der offene Schwingungskreis, erläutert, bei dem die Ausstrahlung erheblich größer ist, als bei dem bisher betrachteten „geschlossenen“ Kreise.

2. Ein **offener Schwingungskreis (offener Oszillator)** besteht in seiner einfachsten Form aus einem gerade ausgespannten Draht, der in der Mitte durch eine Funkenstrecke unterbrochen ist. Man kann sich den offenen Schwingungskreis aus einem geschlossenen Kondensatorkreis durch Entfernen der Kondensatorplatten voneinander entstanden denken, wie durch Abb. 405 veranschaulicht wird. Die gestrichelten Linien bedeuten dabei die elektrischen Kraftlinien zwischen den Belegungen des geladenen Kondensators. Bei diesem Entfernen nimmt natürlich die

Kapazität ab, doch behält sie immer noch einen gewissen Wert; als Belege des Kondensators haben jetzt die ganzen Drähte mit den Endplatten, als Dielektrikum hat der ganze umgebende Luftraum zu gelten. Schließlich können die Endplatten noch wegfallen, so daß nur der von der Funkenstrecke unterbrochene Draht zurückbleibt. Da der Draht außer seiner

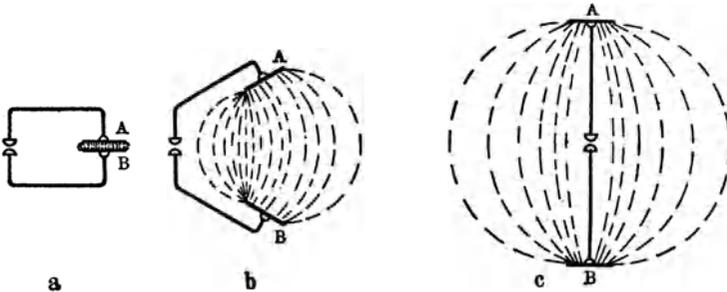


Abb. 405. Öffnen des Schwingungskreises.

Kapazität auch eine gewisse Selbstinduktion besitzt, so bleibt der so erhaltene offene Oszillator schwingungsfähig. Verbindet man die beiden Drähte mit einem Funkeninduktor, so werden beide Drahthälften aufgeladen. Beim Überspringen des Funkens entstehen dann Schwingungen der Elektrizität auf dem Draht.

Da die ganzen Drähte als Kondensatorbelegungen wie auch als Strombahnen anzusehen sind, so ist die Stromstärke in der Mitte, also in der Funkenstrecke, am größten, an den äußeren Drahtenden ist sie gleich Null. In Abb. 406 stellt die Kurve J den Verlauf der den einzelnen Punkten des Drahtes zukommenden Maximalwerte J der Stromstärke des Wechselstromes dar, und zwar sind die Werte von J senkrecht zur Strombahn aufgetragen. Die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf der Maximalwerte der Spannung V ; diese sind gleich Null in der Mitte, am größten an den Drahtenden. (An Stelle der Endplatten kann man sich den Draht etwas verlängert denken.)

Diese Verteilung der Stromstärken läßt sich nachweisen durch ein Hitzdrahtinstrument oder ein Glühlämpchen, das man nacheinander an verschiedenen Stellen des Drahtes einschaltet; die Ausschläge bzw. das Aufleuchten sind am stärksten in der Nähe der Funkenstrecke, am geringsten in der Nähe der Drahtenden. Ebenso läßt sich durch einen Spannungsanzeiger nachweisen, daß die Spannungsschwankungen ihr Maximum an den Enden des Drahtes haben. Unmittelbar sichtbar machen läßt sich der Spannungsverlauf, wenn man statt linearer Drähte lange Spulen mit vielen Windungen verwendet (Seibtsche Spulen). Die Stellen hoher Spannungen geben sich im Dunkeln durch Ausstrahlung zu erkennen.

3. Stehende Schwingungen. Der Vergleich der Abb. 406 mit der Abb. 106 zeigt, daß die Elektrizität auf dem offenen Oszillator in stehenden Wellen schwingt, und zwar kommt auf die ganze Länge

des Oszillators eine halbe Wellenlänge, auf eine Oszillatorhälfte eine viertel Wellenlänge. In der Mitte liegt ein „Strombauch“, an den Enden liegen „Stromknoten“, während die Spannung in der Mitte einen „Spannungsknoten“ und an den Enden „Spannungsbäuche“ aufweist.

Neben dieser Grundschwingung können noch Oberschwingungen auftreten, bei denen $\frac{2}{2}, \frac{3}{2} \dots$ Wellenlängen auf den Oszillator kommen. Sie sind aber meistens bedeutend schwächer als die Grundschwingung. Für die Frequenz der Eigenschwingung (einschließlich ihrer Oberschwingungen) eines linearen Drahtes ist hiernach vor allem die Länge des Drahtes maßgebend.

§ 208. Die Antenne, Verlängerung und Verkürzung.

1. Halbierung des linearen Oszillators. Wir können uns denken, daß die in der unteren Hälfte des offenen Schwingungskreises (Abb. 406) fließenden Wechselströme von einer großen Kapazität, etwa einer senkrecht



Abb. 406. Strom J und Spannung V auf dem offenen Oszillator.

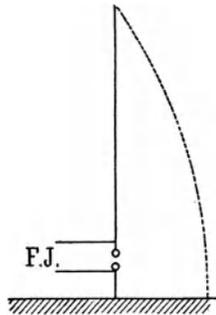


Abb. 407. Einfach-Antenne.



Abb. 408. Antennenverlängerung.

zum Draht gestellten großen Metallplatte oder auch von gut leitendem Erdreich aufgenommen werden. Dadurch wird an der ganzen Stromverteilung der oberen Hälfte nichts geändert. Ein solcher gleich unter der Funkenstrecke „geerdeter“ linearer Draht stellt den zuerst von Marconi benutzten einfachsten Sendedraht der drahtlosen Telegraphie, die Einfach-Antenne dar (Abb. 407).

Nach § 207₃ kommt auf den halben Oszillator, also auf die Antennenhöhe, der vierte Teil einer Wellenlänge, so daß man z. B. bei einer Antenne von 100 m Höhe eine Eigenwelle von 400 m Länge erhält.

2. Verlängerung und Verkürzung der Antenne. Schaltet man in die Antenne Spulen ein (Abb. 408), so wird dadurch die Selbstinduktion des Drahtes vergrößert. Dies hat zur Folge, daß die Stromverteilung geändert wird, und zwar tritt dann die stärkste Schwingungsbewegung nicht mehr an der Funkenstrecke auf, sondern weiter unten (in der Erde).

|| Durch Einschaltung von Spulen in die Antenne kann also deren Wellenlänge vergrößert werden.

Schaltet man dagegen in die Antenne Kondensatoren, z. B. Leidener Flaschen ein (Abb. 409), so sind deren Kapazität und die Kapazität des Drahtes hintereinandergeschaltet, wodurch eine Verringerung der Gesamtkapazität und damit eine Verkürzung der Wellenlänge erzielt wird.

|| Durch Einschalten von Kondensatoren in die Antenne kann deren Wellenlänge verkürzt werden.

Eine Antennenverkürzung ist bei Sendeantennen nur auf etwa 70 %, die Verlängerung auf viel größere Werte, nämlich bis auf das $2\frac{1}{2}$ -fache statthaft.



Abb. 409. Antennenverkürzung.

§ 209. Die elektromagnetischen Wellen im Raume.

1. Ausbreitung der magnetischen Kraftlinien. Wenn in einem Drahte ein elektrischer Strom entsteht, so ist das zugehörige Magnetfeld keineswegs sofort im ganzen Raume vorhanden, sondern es breitet sich vom Drahte mit endlicher, wenn auch sehr großer Geschwindigkeit nach allen Seiten aus. Diese Geschwindigkeit ist gleich der Lichtgeschwindigkeit von 300 000 km/s oder 300 Mill. m/s.

Wenn daher in einem vertikal gestellten linearen Antennendraht sehr schnell wechselnde Ströme auf und nieder fließen, so erzeugt jeder Strom kreisförmige magnetische Kraftlinien, und zwar der absteigende Strom solche, die von oben gesehen im Sinne des Uhrzeigers gerichtet sind, der auf-

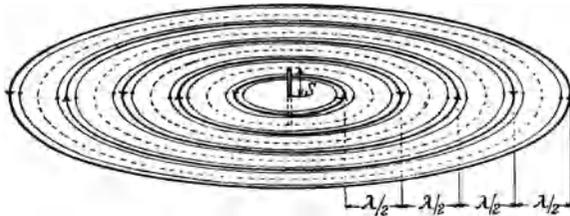


Abb. 410¹⁾. Magnetische Kraftlinien einer Sendeantenne.

steigende Strom entgegengesetzt gerichtete. Jeder zunächst am Drahte entstehende Kraftlinienring breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und diese Ringe folgen aufeinander wie die Wellenberge und Wellentäler auf einer Wasserfläche, wenn man an einer Stelle derselben etwa einen auf dem Wasser schwimmenden Klotz in gleichmäßigem Takte auf und ab bewegt. Sie sind in Abb. 410 nur in der Äquatorebene der Sendeantenne

¹⁾ Nach Pohl, Elektrizitätslehre, 2. Aufl. Verlag Jul. Springer, Berlin.

gezeichnet; man hat sie sich ebenso in den Parallelebenen (mit geringerer Feldstärke) zu denken.

Finden in der Sekunde z. B. eine Million Schwingungen statt, so folgen die Wellenberge (rechts herumlaufende Kraftlinien) in der Entfernung von 300 m aufeinander, d. h. die Wellenlänge λ ist gleich 300 m.

Wird die Frequenz $\frac{1}{T}$ mit n , die Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit c bezeichnet, so gilt auch für die elektromagnetischen Wellen die Grundgleichung der Wellenlehre (s. § 52₂)

$$c = n \cdot \lambda. \quad \text{Daraus folgt: } \lambda_m = \frac{300\,000\,000}{n}$$

oder

$$\lambda_{cm} = 3 \cdot 10^{10} \cdot T.$$

Hier und im folgenden ist die Einheit, in der eine Größe ausgedrückt ist, durch einen angehängten Index bezeichnet.

Drückt man T nach der Thomsonschen Formel (§ 203₁) aus, so erhält man

$$\lambda_{cm} = 3 \cdot 10^{10} \cdot 2\pi \sqrt{C_F \cdot L_H}.$$

Berücksichtigt man, daß nach § 152₂ die in Farad ausgedrückte Kapazität $C_F = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot C_{cm}$ und nach § 180₇ die in Henry ausgedrückte Selbstinduktion

$L_H = \frac{1}{10^9} L_{cm}$ ist, so erhält man die einfache Formel

$$\lambda_{cm} = 2\pi \sqrt{C_{cm} \cdot L_{cm}}.$$

2. Ausbreitung der elektrischen Kraftlinien. Die magnetischen Kraftlinien sind stets von elektrischen Feldern im Äther begleitet, die sich gleichfalls mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die elektrischen Kraft-

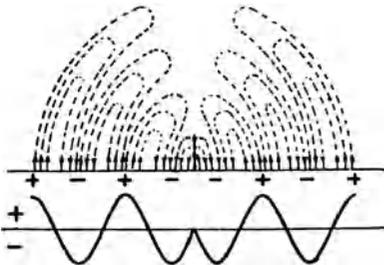


Abb. 411. Elektrische Kraftlinien einer Sendeantenne.

linien verlaufen so, wie in Abb. 411 in einem „Meridianschnitt“ durch die Sendeantenne angedeutet ist, sie sind scharenweise in Abständen von $\lambda/2$ abwechselnd von unten nach oben und von oben nach unten gerichtet. Abb. 295 zeigt ein Momentbild der elektrischen Kraftlinien in der nächsten Umgebung einer Schiffs-Sendeantenne.

Bei schnellen Schwingungen im Antennendraht lösen sich die elektrischen Kraftlinien samt den magnetischen Kraftlinien von der Sendeantenne ab. Sie tragen die in ihnen aufgehäufte Energie auf weite Entfernungen fort. Bei gut leitendem Boden steht die Front der elektrischen Wellen senkrecht zum Boden; bei schlecht leitendem Boden bleibt der Fuß zurück, so daß sich die Wellenfront vornüber neigt.

3. Elektromagnetische Wellen nennt man die geschilderte Verbindung von magnetischen und elektrischen Kraftlinien, die sich mit Lichtgeschwindigkeit von ihrer Ursprungsstätte ausbreiten. In ihnen stehen die Richtung der elektrischen Kraftlinien, die der magnetischen Kraftlinien und die Fortpflanzungsrichtung je aufeinander senkrecht.

Abb. 412 zeigt ein Momentbild einer fortschreitenden elektromagnetischen Welle. Bewegt sich die Welle von links nach rechts in der Pfeilrichtung, so gehört zu einer senkrecht von oben nach unten gerichteten elektrischen Feldstärke E_2 , eine wagrecht nach hinten (in die Papierebene) zeigende magnetische Kraft M_2 , zu einer nach oben zeigenden elektrischen Kraft E_1 , eine nach vorn gerichtete magnetische Feldstärke M_1 .

Bei einer Frequenz von 100 kc/s ($\lambda = 3000$ m) sind beispielsweise die Strecken AB , BC und CD , je 750 m lang. Die elektromagnetische Welle läuft nun mit Lichtgeschwindigkeit an dem als fest angenommenen

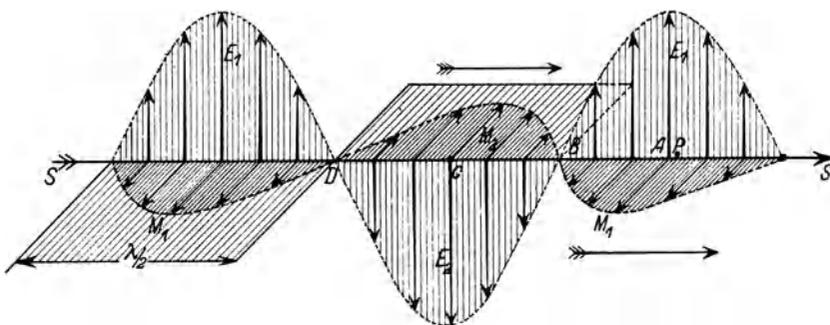


Abb. 412. Momentbild einer fortschreitenden elektromagnetischen Welle.

Punkte P vorüber, so daß nach einer Viertelperiode (im obigen Beispiel $1/400\,000$ s) der im Punkte B gezeichnete Schwingungszustand nach P gelangt, elektrische und magnetische Feldstärke also Null geworden sind. Nach einer weiteren Viertelperiode, d. h. nach der gleichen Zeit, kommt der Schwingungszustand des Punktes C nach P und beide Feldstärken haben bei P wieder ihre Maximalwerte, aber entgegengesetzte Richtung wie zuvor. Elektrische und magnetische Welle sind bei Ausbreitung über gut leitendem Boden oder Seewasser gleichphasig.

Diese Wellen werden auch Hertz'sche Wellen genannt, nach dem deutschen Forscher Heinrich Hertz, der sie zuerst experimentell hergestellt und untersucht hat, nachdem der englische Physiker Maxwell ihr Vorhandensein aus theoretischen Erwägungen gefolgert hatte. Auch die Lichtwellen und die Wellen der strahlenden Wärme sind elektromagnetische Wellen, sie unterscheiden sich von den hier betrachteten nur durch ihre sehr geringe Wellenlänge.

Die Fortpflanzungsrichtungen elektromagnetischer Wellen bezeichnet man als Funkstrahlen. Bei ungestörter Ausbreitung sind die Funkstrahlen Bögen größter Kreise.

4. Unregelmäßigkeiten in der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen.

Mit zunehmender Entfernung von der Sendeantenne nehmen die Schwingungsamplituden der Wellen ab. Eine einfache Gesetzmäßigkeit hat sich dafür noch nicht aufstellen lassen, weil die Absorption der Wellen am Untergrunde und in der Luft sehr verwickelte und veränderliche Verhältnisse schafft. So haben die meisten Sender bei Nacht eine erheblich größere Reichweite als am Tage. Als weitere Beobachtungen, die auf Unregelmäßigkeiten in der Wellenausbreitung zurückzuführen sind, seien genannt: Anormal große oder geringe Reichweite desselben Senders; Wandern der Funkstrahlen und unscharfe Minima beim Peilen eines entfernten Senders (Nachteffekt); rasch aufeinanderfolgende Änderungen in der Empfangslautstärke („Fadings“).

Als Hauptursache für diese Unregelmäßigkeiten, die mit den Verhältnissen bei der Ausbreitung von Schallsignalen eine gewisse Ähnlichkeit zeigen, vermutet man die „Ionisation“ der Luft.

Die atmosphärische Luft ist stets mehr oder weniger „ionisiert“, d. h. es sind in ihr mehr oder weniger Atome vorhanden, denen Elektronen fehlen und solche, die einen Überschuß daran haben. Je stärker die Luft ionisiert ist, um so besser leitet sie. Die Ionisation kann bewirkt werden z. B. durch Erhitzung, durch Berührung mit glühenden Körpern, durch Röntgenstrahlen, durch ultraviolette Strahlen des Sonnenlichts. Man hat sich vorzustellen, daß durch die genannten „Ionisatoren“ Elektronen aus dem Verbanne einzelner Atome herausgeworfen werden, und daß diese Elektronen sich dann an andere Atome ansetzen.

Man nimmt an, daß sich in der Lufthülle in einer Höhe von 100 bis 200 km eine stärker ionisierte Schicht befindet („Heavyside-Schicht“), an der die Funkstrahlen Reflexionen erfahren oder auch entlanggleiten können. Es ist dann beispielsweise möglich, daß mehrere Funkstrahlen desselben Senders auf verschiedenen Wegen an einen bestimmten Empfangsort gelangen, sich dort überlagern und zu den beobachteten Störungen Veranlassung geben. Diese Verhältnisse sind heute noch nicht ausreichend geklärt.

5. Wellenbereiche. Der für den Funkverkehr zur Verfügung stehende Wellenbereich ist heute schon so stark mit Sendern besetzt, daß nur durch die schärfste Einhaltung der zugewiesenen Wellenlängen gegenseitige Störungen auf ein erträgliches Maß herabgesetzt werden können.

Man kann heute folgende sechs Wellenbereiche (Wellenbänder) unterscheiden:

a) Wellen über 8000 m. Weitverkehr der Großstationen auf sehr große Entfernungen, z. B. Nauen Pressedienst.

b) Wellen zwischen 8000 und 3000 m. Verkehr der Großstationen auf große und mittlere Entfernungen.

c) Wellen zwischen 3000 und 1100 m. Weitverkehr der Schiffe und Küstenstationen. Zeitsignale. Großrundfunksender.

d) Wellen zwischen 1100 und 150 m. Funkbaken $\lambda = 1050$ bis 950 m; Flugzeugwelle 900 m; Fremdpeilungen $\lambda = 800$ m; allgemeine Ruf- und Seenotwelle 600 m; Schiffswellen; Rundfunk; Telephonienahverkehr.

e) Wellen zwischen 150 und 10 m: „Kurzwellen“. Weitverkehr mit sehr geringer Energie. Telephonie über sehr große Entfernungen.

f) Wellen unter 10 m: Ultrakurze Wellen. Richtfunkbaken.

§ 210. Wirkung der elektromagnetischen Wellen auf einen Empfangsdraht.

1. Wenn die von der Sendeantenne ausgehenden elektromagnetischen Wellen auf einen ähnlichen Draht, die Empfangsantenne, treffen, so suchen sie darin elektrische Schwingungen zu erregen. In Abb. 413 ist eine einfachste Versuchsanordnung dargestellt. Wenn die von der links abgebildeten Sendeantenne ausflutenden kreisförmigen magnetischen Kraftlinien den rechts stehenden Empfangsdraht durchschneiden, so treiben sie die Elektrizität nach oben oder nach unten, je nachdem die Kraftlinie nach vorn oder nach hinten gerichtet ist. Da die schneidenden Kraftlinien ihre Richtung wechseln, so wird die Elektrizität auf dem Drahte hin und her getrieben; es entsteht in ihm eine erzwungene Schwingung, die stark anwächst, wenn ihre Frequenz mit der des Empfangsdrahtes übereinstimmt, wenn mit anderen Worten Resonanz vorhanden oder die Empfangsantenne auf den Sender abgestimmt ist. Bestehen beide Antennen, wie hier angenommen, aus einem einfachen vertikalen Luftdraht, so ist Resonanz vorhanden, wenn beide gleiche Länge besitzen. Ist dies nicht der Fall, so kann die Abstimmung erreicht werden durch Änderung der Selbstinduktion oder der Kapazität im Empfangsdraht, d. h. durch Veränderung der Windungszahl einer Spule oder durch Regulieren an einem Drehkondensator (§ 208₂).

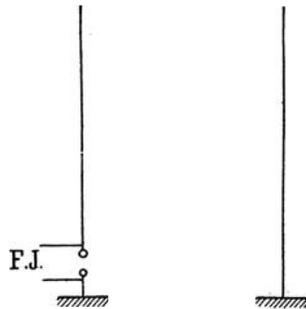


Abb. 413. Lineare Sende- und Empfangsantenne.

Statt der magnetischen Wellen kann man auch die mit ihnen verbundenen elektrischen Wellen betrachten. Da in ihnen die elektrische Kraft in Abständen je einer halben Wellenlänge nach oben und nach unten gerichtet ist, so ergibt sich, daß die Elektrizität auf dem Empfangsdraht in derselben Weise einen wechselnden Antrieb erfährt, wie durch die Induktion seitens der magnetischen Wellen.

Durch den vom Sender ausflutenden Zug elektromagnetischer Wellen ist der Empfänger mit dem Sender gekoppelt, und zwar um so loser, je weiter beide voneinander entfernt sind.

2. Die Entstehung der Schwingungen in der Empfangsantenne werde durch die Abb. 414 veranschaulicht. Nachdem die Senderschwingungen eingesetzt haben, pendelt die Empfängerschwingung allmählich hoch. Sie erreicht ein Maximum der Amplitude und nimmt dann wieder ab, weil die Senderschwingung abklingt, so daß weitere Antriebe nur noch schwach und bald gar nicht mehr erfolgen.

|| Daraus geht hervor, daß die Empfängerschwingungen um so stärker anwachsen, und daß auch die Abstimmung um so schärfer sein kann, je weniger gedämpft die Senderschwingung ist.

3. Da die Amplitude der elektromagnetischen Wellen mit zunehmender Entfernung schnell abnimmt, so ist die Energie, die vom Empfangsdraht aufgenommen wird, nur gering. Von mehreren Kilowatt in der Sendeantenne entfällt infolge der Energieverteilung über den gesamten Raum auf die Empfangsantenne in Hunderten von Kilometern Entfernung vielleicht noch ein milliardstel Watt.

Es sind daher empfindliche Detektoren unter möglichster Ausnutzung der Resonanz erforderlich, um diese Schwingungsenergien noch hörbar zu machen. Die in § 205 beschriebenen Kontaktdetektoren

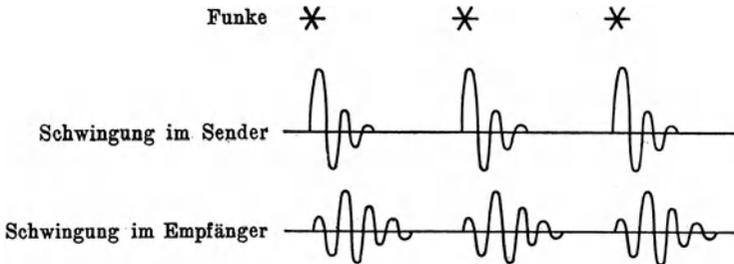


Abb. 414. Hochschaukeln der Schwingungen in der Empfangsantenne. (Die einzelnen Wellenzüge sind weit voneinander entfernt zu denken.)

sind im Bordbetrieb durch die empfindlicheren Elektronenröhren (siehe § 219) fast völlig verdrängt und dienen in der Hauptsache nur noch als Reserve.

4. **Phasenverhältnisse.** Die in einer Hochantenne von einer vorüberziehenden elektromagnetischen Welle erzeugte EMK ist stets der augenblicklich längs des Antennendrahtes herrschenden Feldstärke proportional und daher mit der elektromagnetischen Welle in Phase.

Diese EMK verursacht in der Antenne einen Strom, dessen Phase sich nach den in § 196 bis 198 angegebenen Gesetzen des Wechselstromkreises bestimmt. Ist die Antenne auf die ankommende Welle abgestimmt, so ist der Strom mit der EMK gleichphasig. Ist die Antenne nicht mit der erregenden Welle in Resonanz, so hat der Antennenstrom gegen die EMK eine Phasenverschiebung, die mit zunehmender Verstimmung der Antenne gegen die ankommende Welle anwächst und bei starker Verstimmung $\pm 90^\circ$ erreicht.

Der Antennenstrom erzeugt seinerseits in der Umgebung der Antenne ein schwaches elektromagnetisches Wechselfeld, d. h. die Antenne strahlt einen Teil der aufgenommenen Energie als Sender wirkend wieder aus. Dieses „Rückstrahlungsfeld“ ist in der Nähe der Antenne stets mit dem Antennenstrom gleichphasig.

Ist die Antenne auf eine ankommende Welle abgestimmt, so ist die Rückstrahlung der Antenne mit der Welle gleichphasig.

Ist die Antenne gegen die Welle stark verstimmt, so ist die Rückstrahlung in der Phase um $\frac{1}{4}$ Periode gegen die Welle verschoben.

§ 211. Gerichtete Sender und Empfänger.

1. Allgemeines. Eine gewöhnliche Vertikalantenne strahlt elektromagnetische Wellen nach allen Richtungen gleich stark aus. Bei allen Telegrammen, die nur für eine Empfangsstation bestimmt sind, bedeutet das eine große Verschwendung von Energie. Man hat deshalb schon lange versucht, durch besonders ausgestaltete Antennen oder durch Spiegelwirkung die Wellen nur nach einer bestimmten Richtung auszusenden, doch hat man auf diesem Wege nur bei kurzen Wellen Erfolge erzielt.

Eine gewöhnliche Vertikalantenne empfängt auch von allen Seiten gleich gut. Viele von den Vorteilen, die durch einen gerichteten Sender zu erzielen wären, sind auch mit einem „gerichteten Empfänger“ zu erreichen, vor allem größere Störungsfreiheit der Empfangsstation selbst, sowie die Möglichkeit funkentelegraphischer Peilungen.

Für die Zwecke der drahtlosen Ortsbestimmung von See- und Luftschiffen hat der gerichtete Empfänger eine größere Bedeutung erlangt als der gerichtete Sender.

2. Die Braunsche Rahmenantenne ist die heute fast ausschließlich verwendete Antennenart für gerichteten Empfang. Sie besteht aus einer vertikal aufgestellten Drahtspule, die auf einen geeigneten Rahmen gewickelt ist. Die Enden der Spule führen zu einem Drehkondensator, so daß ein geschlossener Schwingungskreis („Rahmenkreis“) von geringer Dämpfung und daher großer Resonanzschärfe entsteht. Wird die Spule von den magnetischen Kraftlinien eines elektromagnetischen Wechselfeldes geschnitten, so entsteht in ihr durch Induktion eine EMK von der Frequenz des Wechselfeldes. Diese EMK ist in größerer Entfernung vom Sender selbst bei Abstimmung des Rahmenkreises auf die ankommende Welle in der Regel so schwach, daß sie ausgiebiger Verstärkung mit Hoch- und Niederfrequenzverstärkern (s. § 215 u. f.) bedarf, um eine hinreichende Empfangslautstärke zu ergeben.

In Abb. 415 bedeuten die Pfeile M magnetische Kraftlinien, die von einer weit entfernten, in der Richtung S stehenden Sendeantenne ausgestrahlt werden. Wegen der großen Entfernung vom Sender können dabei die Wellen als ebene Wellen betrachtet und die Kraftlinien in der Umgebung des Rahmens R als gerade Linien gezeichnet werden. In der Stellung I wird der um eine vertikale Achse drehbare Empfangsrahmen am stärksten induziert, weil die Kraftlinien die volle Windungsfläche des Rahmens

durchsetzen. Dreht man ihn um den Winkel α in die Stellung II, so nimmt die induzierte EMK ab, weil nur die zur Rahmenfläche senkrechte Komponente von M induzierend wirkt; diese ist aber $M' = M \cdot \cos \alpha$ (Abb. 416). In der Stellung III ist die im Rahmen induzierte EMK Null, weil die Kraftlinien parallel zur Windungsfläche laufen und diese

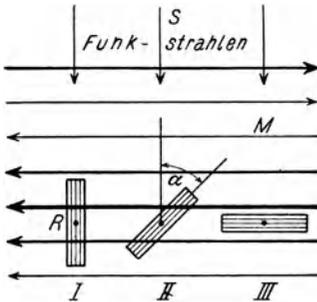


Abb. 415. Rahmenempfang.

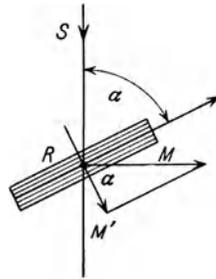


Abb. 416. Rahmenempfang.

nicht mehr schneiden. Bei einer vollen Drehung des Rahmens erhält man daher zwei Maxima und zwei Minima des Empfangs. Man kann deshalb die Rahmenantenne dazu benutzen, um die Richtung der bei R eintreffenden Funkstrahlen zu bestimmen und damit den Sender zu peilen. Da sich die Lautstärke bei Drehung des Rahmens in der Nähe des Minimums viel stärker ändert als in der Nähe des Maximums, ist es zweckmäßig, die Minimumstellung zur Peilung zu benutzen. Auf diesem Prinzip beruht der Telefunkenbordpeiler.

Der Bordpeiler hat große Bedeutung für die drahtlose Ortsbestimmung der Seeschiffe und Luftfahrzeuge erlangt. Seine nähere Beschreibung und die Auswertung der mit ihm erlangten Beobachtungen muß jedoch den Lehrbüchern der Navigation überlassen bleiben (vgl. die zusammenfassende Darstellung im Nachtrag zu Breusing-Meldau, Steuermannskunst: Meldau, Technische Navigation, Wetterkunde, Meeresströmungen. Bremen 1929).

3. Phasenverhältnisse. Rückstrahlung einer geschlossenen Drahtschleife. Bei einer feststehenden Drahtspule ist die von einem magnetischen Wechselfeld induzierte EMK in dem Augenblick am größten, wo sich die Zahl der von der Spule umfaßten Kraftlinien am schnellsten ändert. Dies ist der Fall, wenn die magnetische Feldstärke gerade durch Null geht. Im Augenblick, wo das magnetische Feld am Rahmenort seine größte Stärke hat, ist die Änderung des Feldes am kleinsten; die induzierte EMK ist daher jetzt Null und wechselt gerade ihre Richtung, weil aus der Zunahme der vom Rahmen umschlossenen Kraftlinien eine Abnahme wird.

Die in einer Drahtspule („Schleife“) durch eine elektromagnetische Welle induzierte EMK hinkt der Welle um $\frac{1}{4}$ Periode nach.

In einer geschlossenen Drahtschleife (Rahmenkreis) erzeugt die EMK einen Strom, dessen Phase sich nach dem in § 198 für den Wechselstromkreis mit Kapazität und Selbstinduktion angegebenen Gesetz richtet.

Ist der Rahmenkreis (die Schleife) auf die ankommende Welle abgestimmt, so ist der Strom mit der induzierten EMK in Phase, gegen die Welle also um 90° phasenverschoben. Ist der Rahmenkreis stark gegen die Welle verstimmt, so ist der Strom in der Phase um $\frac{1}{4}$ Periode gegen die EMK verschoben und somit gegenüber der ankommenden Welle gleich- oder gegenphasig.

Ist die Periode der ankommenden Welle kleiner als die Eigenperiode der Schleife, so hinkt der Strom der EMK nach und ist daher in Gegenphase zur Welle (induktive Schleife); ist die Periode der Welle größer als die Eigenperiode, so eilt der Strom der EMK voraus und ist daher mit der Welle gleichphasig (kapazitive Schleife).

Der Strom in der Drahtschleife erzeugt in deren Umgebung ein „Rückstrahlungsfeld“, das mit dem Strome gleichphasig ist.

Die Elektronenröhre.

§ 212. Die Elektronenröhre mit zwei Elektroden.

1. Die heutige drahtlose Nachrichtenübertragung wird durch die vielseitige Verwendung der Elektronenröhre gekennzeichnet. Zum Verständnis ihrer Wirkungsweise sei zunächst einiges über die heutige Auffassung des Wesens der elektrischen Erscheinungen zusammengefaßt. Es ist früher (§ 146 u. f.) gezeigt worden, daß man sich die Erscheinungen der Elektrostatik durch Elektronenüberschuß bzw. -mangel in den „elektrisch geladenen“ Körpern erklären kann.

Die Erscheinung der Influenz zeigt, daß auch in unelektrischen Leitern Elektronen vorhanden und daß diese innerhalb der Leiter frei beweglich sind.

Den elektrischen Strom in einem Leitungsdraht stellt man sich als Strom von Elektronen vor, der entgegengesetzt der Richtung des „positiven Stromes“ im Draht dahinzieht. Die mehr oder weniger starke Behinderung, welche die Elektronen dabei je nach dem Material des Drahtes erfahren, erklärt die verschiedene Größe des spezifischen Widerstandes verschiedener Materialien. Die Zusammenstöße der Elektronen mit den Molekülen des stromführenden Leiters verursachen die Stromwärme.

2. **Elektronen-Emission.** In der Elektronenröhre haben wir es mit frei durch den luftleeren Raum fliegenden Elektronen zu tun. In einem

Metall sind die Elektronen in dauernder Bewegung, die um so lebhafter ist, je höhere Temperatur das Metall besitzt. Bei sehr hoher Temperatur des Metalls wird diese Elektronenbewegung so heftig, daß ein Teil der Elektronen aus der Metalloberfläche hinausgeschleudert wird. Auf diese Weise bildet sich in der Umgebung des glühenden Metalls eine (unsichtbare) Elektronenwolke. Diese wird bald so dicht, daß infolge der abstoßenden Wirkung der frei gewordenen Elektronen keine neuen Elektronen mehr aus dem Metall herausfliegen können.

Das Freiwerden der Elektronen aus einem erhitzten Metall bezeichnet man als Elektronen-Emission.

Die Emission ist besonders stark, wenn sich das erhitzte Metall im hohen Vakuum befindet.

Der Vorgang der Elektronenemission läßt sich durch folgenden Versuch anschaulich machen. Das stark ausgezogene Viereck in Abb. 417 stellt ein bis zum höchsten erreichbaren Vakuum (0,0001 mm Quecksilbersäule) ausgepumptes Glasgefäß (Hochvakuumröhre) dar. Es enthält zwei eingeschmolzene Elektroden, eine plattenförmige Anode A und einen dünnen Draht aus Wolframmetall als Kathode K . Von den Elektroden führen drei Drähte nach außen. Verbindet man die Anode mit dem positiven Pol einer Batterie B_2 (von 50 bis 100 Volt), den Metalldraht mit ihrem negativen Pol, so zeigt ein in den Stromkreis geschalteter empfindlicher Strommesser keinen Strom an; auch dann nicht, wenn man B_2 durch eine Stromquelle von bedeutend höherer Spannung ersetzt.

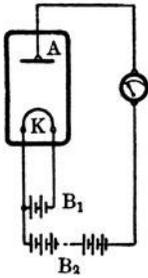


Abb. 417. Elektronenröhre mit zwei Elektroden.

Das Vakuum ist ein vollkommener Isolator. Schließt man dagegen die beiden Enden des Metallfadens K an eine geeignete Batterie B_1 an, so daß die Kathode K auf Weißglut (etwa 2000°) erhitzt wird, so zeigt das Milliampereometer einen Strom an. Aus der glühenden Kathode treten jetzt Elektronen in den umgebenden Raum aus. Da die Anode mit dem positiven Pol und der Glühfaden mit dem negativen Pol der Batterie B_2 verbunden sind, so entsteht in der Röhre ein elektrisches Feld zwischen Anode und Kathode. Als negative Teilchen werden die frei gewordenen Elektronen von der positiv geladenen Anode angezogen und aus der Wolke abgesaugt, so daß neue Elektronen aus der glühenden Kathode austreten können. Die von der Anode angezogenen Elektronen fliegen durch das Vakuum hindurch auf die Anode, treten in diese ein und wandern nun durch die Anodenleitung und den Strommesser als gewöhnlicher elektrischer Strom zum positiven Pol der Batterie B_2 ; die aus der Kathode austretenden Elektronen werden dabei immer wieder durch neue, vom negativen Pol von B_2 zuströmende ersetzt, so daß ein stetig fließender Elektronenstrom entsteht.

Verbindet man A mit dem negativen, K mit dem positiven Pol von B_2 , so zeigt der Strommesser auch bei glühendem Metallfaden K keinen Ausschlag. Die vom Glühfaden ausgeschleuderten Elektronen werden jetzt von der negativ geladenen Platte A abgestoßen, so daß ein Elektronenstrom durch das Vakuum nicht zustande kommt.

3. Erklärungen. Die Röhre (mitsamt den Elektroden) nennt man Kathoden- oder Elektronenröhre, auch wohl Hochvakuumröhre.

Die zur Erhitzung der Kathode K dienende Batterie B_1 heißt Heizbatterie. In den von B_1 und K gebildeten Heizkreis ist gewöhnlich noch ein Widerstand zum Regulieren der Heizstromstärke eingeschaltet (Heizwiderstand oder Heizregler).

Damit der Heizfaden die für den Betrieb günstigste Temperatur besitzt, muß zwischen seinen Enden eine bestimmte, bei jeder Röhrentype angegebene Heizspannung herrschen. Diese kann mit einem an die Enden des Heizdrahtes gelegten Voltmeter geprüft werden; ihre richtige Einstellung ist für die Lebensdauer der Röhre von großer Bedeutung.

Die Heizspannung beträgt z. B. für die im Bordpeiler gebrauchte Telefunkenröhre RE 144 3,5 Volt, für die Senderöhre RS 18 etwa 15,5 Volt.

Die „Anodenbatterie“ B_2 liefert die zur Aufrechterhaltung des Elektronenstromes nötige Spannung zwischen Anode und Kathode.

Als Anodenkreis bezeichnet man den vom negativen Pol von B_2 zur Kathode, von da durch das Vakuum zur Anode und durch die Drahtleitung zum positiven Pol von B_2 führenden Stromkreis; der Spannungsunterschied zwischen Anode und Kathode heißt die Anodenspannung, der im Anodenkreis fließende Strom Anodenstrom. Der „positive“ Strom hat die entgegengesetzte Richtung des Elektronenstromes.

4. Die Stärke des Anodenstromes hängt von der Stärke der Elektronenemission der Kathode und von der Anodenspannung ab.

Die Stärke der Emission des Glühdrahtes hängt von seiner Länge, seiner Dicke, seinem Material und seiner Temperatur ab. Unter 2000° ist die Emission eines reinen Wolframdrahtes sehr gering; bei dieser Temperatur wächst sie stark an, weshalb die Heizstromstärke sorgfältig konstant erhalten werden muß, wenn die Emission konstant bleiben soll.

Durch Beimischung geringer Mengen von Thorium zum Wolfram oder durch Überziehen des Drahtes mit Metalloxyden oder anderen chemischen Verbindungen kann die Emission so gesteigert werden, daß sie schon bei bedeutend niedrigerer Temperatur (Rotglut) ausreichende Stärke erreicht. Eine Röhre mit einem solchen Glühfaden kann (meist durch Überheizung) ihre Emission verlieren und damit unbrauchbar werden, ohne daß der Heizfaden durchbrennt. Beim Bordpeiler wird daher die Emission der Röhren mit einem Milliamperemeter im Anodenkreis überwacht.

Der spiegelnde Belag aus Magnesium- oder Calciummetall soll die beim Auspumpen in der Röhre zurückgebliebenen Spuren von Wasserdampf binden und so unschädlich machen.

Mit der Anodenspannung wächst die Stromstärke des Anodenstromes zuerst langsam. Die Spannung reicht zunächst noch nicht aus, um die den Glühfaden dicht umgebenden Elektronen, die „Raumladung“, genügend abzusaugen. Wächst die Anodenspannung, so steigt die Stärke des Anodenstromes schnell an, erreicht aber bei konstanter Heizstromstärke einen Sättigungswert, der nicht überschritten werden kann, weil mehr Elektronen für den Strom nicht zur Verfügung stehen (Sättigungsstrom).

Diesen in Milliampere gemessenen Sättigungsstrom J_s bezeichnet man kurz als die Emission der Röhre. (Beispielsweise ist bei der Type RE 144 $J_s = 20$ MA.)

§ 213. Elektronenröhren als Gleichrichter.

Legt man an Stelle einer Gleichspannung eine Wechselspannung zwischen Anode und Heizfaden einer Elektronenröhre, so kommt ein Anodenstrom nur bei denjenigen Wechsellagen zustande, bei denen der glühende Heizfaden Kathode ist; die anderen Wechsel werden abgedrosselt, die Röhre stellt für diese einen unendlich großen Widerstand dar. Die Elektronenröhre wirkt daher auf den Wechselstrom wie ein Ventil, das sich nur nach einer Seite hin öffnen kann. Diese Eigenschaft kann zum Gleichrichten von Wechselstrom benutzt werden.

Unter Verwendung solcher „Ventilröhren“ kann man beispielsweise Akkumulatoren aus einem Wechselstromnetz laden oder gleichgerichteten Wechselstrom zur Lieferung der Anodenspannung für Empfänger oder Röhrensender verwenden.

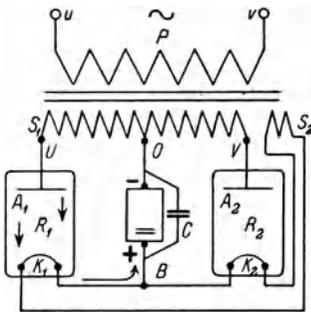


Abb. 418.

Elektronenröhre als Gleichrichter.

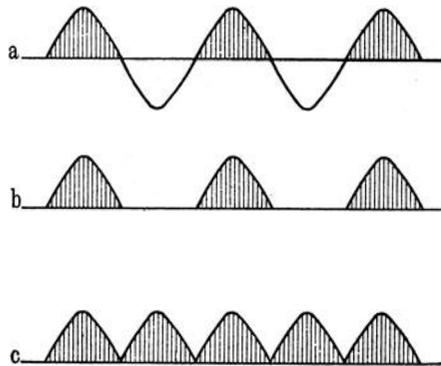


Abb. 419.

Gleichrichtung von Wechselstrom.

Abb. 418 zeigt ein schematisches Schaltbild eines Röhrengleichrichters. Die Wechselstromquelle liegt an der Primärspule P eines Transformators, dessen Sekundärspule S_1 mit den Anoden der beiden Ventilröhren R_1 und R_2 verbunden ist.

Zwischen die „Anzapfung“ O in der Mitte von S_1 und den Punkt B wird der Gleichstrom verbrauchende Apparat geschaltet. Ist während eines Wechsels U positiv, V negativ, so fließt durch R_2 kein Anodenstrom, weil A_2 negativ ist; durch R_1 fließt positiver Strom von A_1 über K_1 und B durch den Gleichstromverbraucher nach O . Ist beim nächsten Wechsel V positiv, U negativ, so ist R_1 dem Strom versperrt und positiver Anodenstrom fließt von V über A_2 , K_2 und B ebenfalls nach O . Man erhält so in der Leitung BO und somit im Verbrauchsapparat einen pulsierenden Gleichstrom nach Abb. 419 c, den man durch Zuschalten eines großen Ausgleichkondensators C parallel zum Verbrauchsapparat „glätten“ kann. Die Heizfäden der beiden Ventilröhren werden durch einen Wechselstrom niederer Spannung aus einer besonderen Sekundärspule des Transformators geheizt.

§ 214. Das Gitter in der Elektronenröhre.

1. Das Gitter. Die Kathoden- oder Elektronenröhre hat ihre Bedeutung für die Funktechnik durch die Einführung einer dritten Elektrode, des Gitters zwischen Kathode und Anode, erreicht. Dieses hat seinen Namen davon, daß es den Weg zwischen den Hauptelektroden wie ein Sieb oder Gitter teilweise versperrt. Es wird meist durch eine zylindrische Spirale aus dünnem Draht gebildet. Die Kathode ist als feiner Draht in der Achse dieses Zylinders geradlinig ausgespannt, während die Anode aus einem ihn umgebenden Zylindermantel aus Metallblech besteht. Das Gitter ist ebenso wie die Hauptelektroden an einem nach außen führenden Draht befestigt. Die vier Anschlußdrähte der drei Elektroden führen zu vier Kontaktstiften, die bei den kleineren Röhren in einem Röhrensockel aus Isolierstoff nach Angabe der Abb. 420 befestigt sind. HH sind die Anschlüsse des Heizfadens, G ist mit dem Gitter, A mit der Anode der Röhre verbunden.

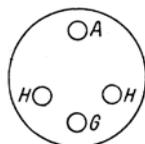


Abb. 420.
Röhrensockel.

2. Steuerung des Elektronenstromes durch das Gitter. In Abb. 421 ist die Röhre schematisch durch ein Rechteck mit abgerundeten Ecken dargestellt; K bedeutet den Heizfaden, G das Gitter und A die Anode. Zum Betrieb der Röhre gehören drei Stromkreise:

a) der Heizkreis: er wird gebildet von der Heizbatterie HB , einem Regulierwiderstand (Heizwiderstand) W und dem Glühfaden K ;

b) der Anodenkreis: er besteht aus der Anodenbatterie AB , der Anode A , der Vakuumstrecke AK innerhalb der Röhre zwischen Anode und Kathode und der Kathode K . Der positive Pol der Anodenbatterie ist mit der Anode, ihr negativer Pol im Punkte O mit der Kathode verbunden;

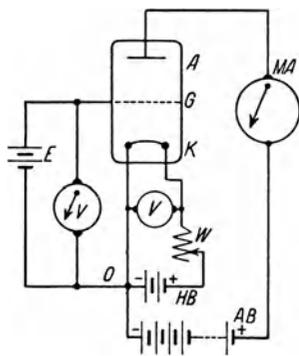


Abb. 421. Aufnahme einer Röhrenkennlinie.

c) der Gitterkreis: er wird gebildet aus dem Gitter G , der Vakuumstrecke GK zwischen Gitter und Kathode und einer Spannungsquelle außerhalb der Röhre zwischen G und K .

Gibt man dem Gitter eine positive Spannung gegenüber der Kathode, so wird die anziehende Wirkung der Anode auf die Elektronen durch die im gleichen Sinne wirkende Anziehung des positiv geladenen Gitters unterstützt. Der Elektronenstrom wird dadurch verstärkt. Eine negative Ladung des Gitters wirkt der anziehenden Wirkung der Anode entgegen und schwächt den Elektronenstrom. Durch Aufladen des Gitters kann daher der Elektronenstrom gesteuert werden. Es ergibt sich die Hauptregel:

Ist das Gitter gegen den Heizfaden positiv geladen, so wird der Anodenstrom verstärkt; ist es negativ geladen, so wird der Anodenstrom geschwächt oder ganz abgedrosselt.

Wird das Gitter isoliert, so wird es durch die auftreffenden Elektronen negativ geladen und daher der Anodenstrom abgeschwächt.

Dieses Verhalten der Kathodenröhre läßt sich durch den Versuch bestätigen, wenn man nach der Abb. 421 zwischen Gitter und Kathode Elemente E einschaltet und dadurch dem Gitter verschiedene Spannungsunterschiede gegen die Kathode gibt, die am Voltmeter V abzulesen sind; den Punkt O kann man als geerdet und als Nullpunkt der Spannung betrachten. Zur Messung der Stärke des Anodenstroms dient das in den Anodenkreis geschaltete Milli-Amperemeter MA .

3. Die Kennlinie der Kathodenröhre. Mißt man bei gleichbleibender Anoden- und Heizspannung zu verschiedenen Gitterspannungen die zugehörigen Anodenströme, so kann man daraus die für die Beurteilung der Eigenschaften einer Röhre wichtige Röhrenkennlinie (Charakteristik) zeichnen. Man trägt zu diesem Zweck in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die Gitterspannungen, d. h. die Spannungsunterschiede zwischen Gitter und Kathode, als Abszissen und die zugehörigen Anodenströme als Ordinaten ab (Abb. 422).

Die Kennlinie steigt zuerst langsam, dann steiler an, verläuft im mittleren Teile geradlinig, biegt dann um und nähert sich bei höheren positiven Gitterspannungen allmählich dem Sättigungsstrom.

Legt man zwischen Gitter und Kathode verschiedene Spannungen, so sind die Änderungen des Anodenstromes den Änderungen der Gitterspannung proportional, solange die Röhre auf dem geradlinigen Teile der Kennlinie arbeitet.

Unter dieser Voraussetzung sind die Schwankungen des Anodenstromes das genaue Abbild der Spannungsschwankungen am Gitter.

4. Verstärkerwirkung der Röhre. Elektronenrelais. Vermöge dieser Eigenschaft läßt sich die Elektronenröhre in erster Linie zur Verstärkung

schwacher Wechselströme verwenden. In Abb. 423 bedeutet die stark ausgezogene Linie die Kennlinie einer Elektronenröhre. Man legt an das Gitter eine schwache Wechselspannung, die durch die Kurve e_g schematisch dargestellt wird und beispielsweise zwischen $+1$ und -1 Volt schwankt. Entsprechend der Kennlinie schwankt dann auch der Anodenstrom genau im Rhythmus der Gitterspannung, wie die Wellenlinie rechts oben andeutet. Der Anodenstrom besteht jetzt aus einem Gleichstrom, dem ein Wechselstrom von der Frequenz der Gitterspannung überlagert ist. In Abb. 423 ist der Gleichstromanteil des Anodenstromes $4,5$ MA; der Wechselstrom hat eine Amplitude von $1,5$ MA.

Mit diesem Vorgang ist eine Verstärkung der Wechselstromleistung verbunden. Der dem Gitter zugeführte Wechselstrom braucht lediglich

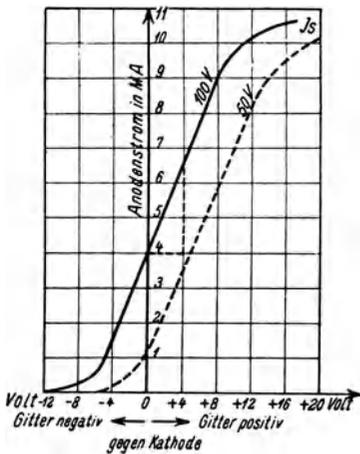


Abb. 422.
Kennlinie einer Elektronenröhre.

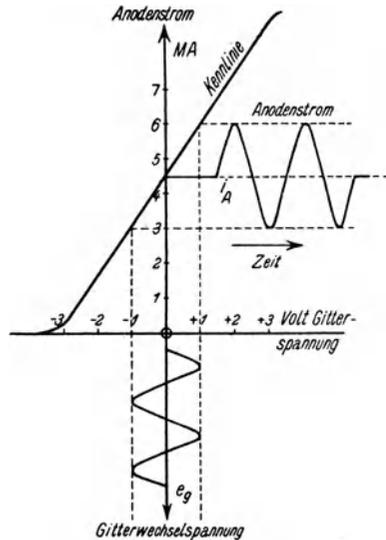


Abb. 423.
Verstärkerwirkung der Elektronenröhre.

das Gitter auf Spannung aufzuladen; da infolge der geringen Röhrenkapazität der Ladungsstrom sehr schwach sein kann, ist auch die zugeführte Wechselstromleistung sehr gering. Dies gilt besonders dann, wenn durch eine negative „Vorspannung“ des Gitters erreicht wird, daß das Gitter auch beim Anlegen einer Wechselspannung stets negativer als der Heizfaden bleibt (s. Abb. 424).

Die Änderungen des Anodenstromes erfolgen dagegen bei der verhältnismäßig hohen Anodenspannung, so daß die elektrische Leistung des Anodenwechselstromes erheblich größer ist als die dem Gitter zugeführte Leistung. Bei gleicher Wechselspannung am Gitter ist die Amplitude des

Anodenwechselstromes und damit die Verstärkung um so größer, je steiler die Kennlinie verläuft.

Die an das Gitter kommenden Spannungsschwankungen dienen in der Elektronenröhre dazu, eine Energiequelle, nämlich die Anodenbatterie, auszulösen. Es liegt daher eine Relaiswirkung (§ 164₄) vor, weshalb die Röhre auch als Elektronenrelais bezeichnet wird. Dieses Relais hat die ausgezeichnete Eigenschaft, daß es masse- und daher trägheitsfrei arbeitet, so daß es den Änderungen der Gitterspannung ohne jede Verzögerung folgt, auch wenn diese Änderungen millionenmal in der Sekunde erfolgen.

Die Verstärkung schwacher Wechselströme in der Funktechnik wird in § 215 und 216 ausführlicher behandelt. Außerdem kann die Elektronenröhre auf Grund der Steuerwirkung des Gitters zur Schwingungserzeugung (§ 217) und zum Bau eines äußerst empfindlichen Detektors (§ 218) verwendet werden.

5. Steilheit. Ändert man die Gitterspannung beispielsweise von 0 auf + 4 Volt, so steigt dadurch der Anodenstrom bei der untersuchten Röhre (Abb. 422) von 4,0 auf 6,6 MA, also um 2,6 MA. Der Neigungswinkel α der Kennlinie oder ihre Steilheit ist also gegeben durch

$$\text{tang } \alpha = \frac{2,6 \text{ MA}}{4 \text{ Volt}} = 0,65 \text{ MA/Volt.}$$

6. Änderung der Anodenspannung. Durchgriff. Verändert man die Anodenspannung, so verschiebt sich die Kennlinie parallel zur Achse der Gitterspannung, und zwar bei Erhöhung der Anodenspannung nach links, bei Verminderung nach rechts.

In Abb. 422 stellt die gestrichelte Linie die Kennlinie derselben Röhre für 50 Volt Anodenspannung dar. Es ergibt sich aus den Kennlinien, daß man bei dieser Röhre bei 50 Volt Anodenspannung denselben Anodenstrom bekommt wie bei 100 Volt, wenn man die Gitterspannung jeweils um 5 Volt erhöht. Eine Änderung der Gitterspannung um 5 Volt entspricht in der Wirkung auf den Anodenstrom einer Änderung der Anodenspannung von 50 Volt. Das Verhältnis dieser beiden Zahlen bezeichnet man als Durchgriff D der Röhre. Er wird in Prozenten ausgedrückt. Im obigen Beispiel ist $D = 5 \text{ V} : 50 \text{ V} = 0,1 = 10 \text{ Proz.}$

§ 215. Niederfrequenzverstärker.

1. Die Verstärkung schwacher Wechselströme mittels einer Elektronenröhre sei zunächst an der Verstärkung schwacher Telefonströme erläutert, die man als Niederfrequenzverstärkung bezeichnet.

In Abb. 424 ist der stark ausgezogene Antennenkreis mit einem aperiodischen Detektorkreis induktiv gekoppelt. Die vom Kontaktdetektor gleichgerichteten Stromimpulse von Ton- oder Sprachfrequenz seien zu schwach, um ein Telefon unmittelbar stark genug zu erregen. Man

leitet sie daher zur Verstärkung einer Elektronenröhre zu, in deren Anodenkreis das Telephon liegt.

Da die Schwankungen des Anodenstromes einer Röhre um so stärker sind, je größere Spannungsschwankungen am Gitter auftreten, ist es zweckmäßig, die zu verstärkenden Ströme zunächst auf höhere Spannung zu transformieren, bevor man sie dem Gitter zuführt. Man schickt deshalb die niederfrequenten Ströme durch die Primärspule eines eisengefüllten

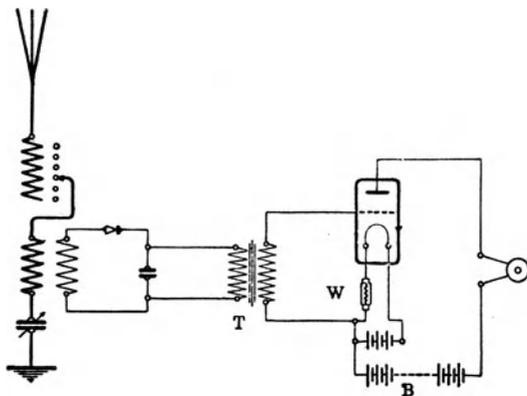


Abb. 424. Die Röhre als Niederfrequenzverstärker.

Transformators T , der als Eingangstransformator bezeichnet wird; in dessen Sekundärspule werden sie auf höhere Spannung gebracht und an Gitter und Kathode der Röhre gelegt; sie bewirken positive und negative Aufladungen des Gitters im Rhythmus der Ton- oder Sprachschwingungen, wodurch genau entsprechende Schwankungen des Anodenstromes veranlaßt werden. Der durch das Telephon fließende Anodenstrom läßt dieses dann im Rhythmus der Ton- oder Sprachschwingungen ansprechen. Häufig liegt das Telephon im Sekundärkreis eines zweiten Transformators, durch dessen Primärwicklung der Anodenstrom fließt. Durch diesen Ausgangstransformator wird der Anodengleichstrom, der bei unrichtigem Anschluß des Hörers nach einiger Zeit die Magnetisierung der Hörermagnete schwächt, vom Telephon ferngehalten.

2. Mehrfache Niederfrequenzverstärkung. Ist die Verstärkung in einer einzigen Röhre nicht ausreichend, so schaltet man zur weiteren Verstärkung eine zweite und gegebenenfalls eine dritte Röhre hinzu. Das Ankoppeln der weiteren Verstärkeröhren kann durch Transformatoren oder durch Widerstände erfolgen.

3. Als Beispiel für die Transformatorenkopplung diene das Schaltbild eines Dreifach-Niederfrequenzverstärkers (Abb. 425). Der Anodenstrom der ersten Verstärkeröhre durchfließt die Primärspule eines

kleinen Transformators mit Eisenkern; die Stromschwankungen des Anodenstromes werden in der Sekundärwicklung des Transformators auf höhere Spannung gebracht und an das Gitter und die Kathode der zweiten Röhre geleitet. Hier rufen sie abermals verstärkte Schwankungen des Anoden-

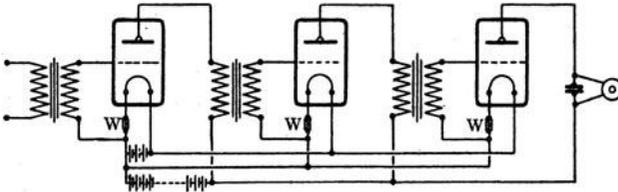


Abb. 425 ¹⁾. Dreifach-Niederfrequenzverstärker.

stromes hervor. In der gleichen Weise werden diese Stromschwankungen in der dritten Röhre nochmals verstärkt und mittels des in ihrem Anodenkreise liegenden Telefons oder Lautsprechers hörbar gemacht.

Eine weitere Verstärkung ist wegen der Mitverstärkung der Störgeräusche praktisch meist wertlos. Vielfach begnügt man sich mit einer zweifachen Verstärkung.

4. Widerstandskopplung. Die Übertragung der Niederfrequenzströme von einer Röhre auf die folgende kann auch durch hochohmige Widerstände erfolgen. Als Beispiel zeigt Abb. 426 einen dreifachen Nieder-

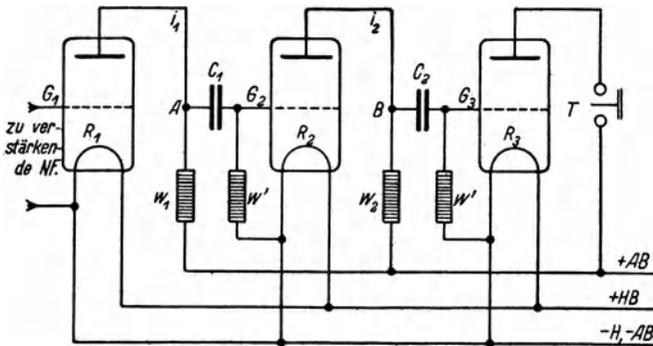


Abb. 426. Dreifach-Niederfrequenzverstärker mit Widerstandskopplung.

frequenzverstärker, wie er beispielsweise im Telefonbordpeiler eingebaut ist. Der Anodenstrom i_1 der Röhre R_1 wird durch einen hohen Widerstand w_1 geleitet; dabei erleidet er einen Spannungsabfall $e_1 = i_1 w_1$. Mit dem Punkte A ist die eine Belegung eines kleinen Blockkonden-

¹⁾ In den folgenden Schaltbildern soll bei Leitungskreuzungen nur dort metallische Verbindung der Leitungen vorhanden sein, wo an der Kreuzungsstelle ein Punkt steht.

sators C_1 verbunden, dessen andere Belegung am Gitter G_2 der zweiten Röhre liegt. Die im Punkte A vorhandene Spannung $e - i_1 w_1$ (e Spannung der Anodenbatterie) lädt C_1 auf. Schwankt nun der Anodenstrom i_1 , so ändert sich auch in gleichem Maße der Spannungsabfall $i_1 w_1$ und damit die Spannung in A . Dies hat entweder Zuladung oder Entladung von C_1 und daher auch eine genau entsprechende Änderung der Gitterspannung zur Folge. Diese Spannungsänderung steuert den Anodenstrom i_2 von R_2 , in dessen Stromkreis der Widerstand w_2 liegt. Infolge der Verstärkerwirkung von R_2 sind die Spannungsschwankungen in B erheblich stärker als in A ; sie werden durch den Gitterkondensator C_2 dem Gitter von R_3 zugeführt, hier nochmals verstärkt und dem im Anodenkreis liegenden Kopfhörer T zugeleitet. Die Gitter der Verstärkeröhren sind durch hochohmige Widerstände W' mit den Kathoden verbunden, damit die Ansammlung negativer Ladungen auf den Gittern und damit ein Abdröseln des Anodenstromes verhindert wird.

§ 216. Hochfrequenzverstärkung.

1. Da die Elektronen elektrischen Kräften ohne merkliche Trägheit folgen, kann man die Elektronenröhre auch zur unmittelbaren Verstärkung der von der Antenne aufgenommenen hochfrequenten Schwingungen benutzen. Diese werden an das Gitter und die Kathode einer Elektronenröhre geleitet und rufen verstärkte hochfrequente Schwankungen des Anodenstromes hervor. Zwecks größerer Verstärkung können mehrere Röhren hintereinander geschaltet werden. Zur Energieübertragung von einer Verstärkeröhre auf die nächste kann man, wie bei der Niederfrequenzverstärkung, Transformatoren oder Widerstände verwenden, nur dürfen die Hochfrequenztransformatoren kein Eisen enthalten.

Eine Hochfrequenzverstärkung ist vor allem dann wichtig, wenn die ankommenden Wellenimpulse so schwach sind, daß sie unter der „Reizschwelle“ des Detektors liegen, d. h. daß sie diesen nicht zu erregen imstande sind. In einem solchen Falle wäre jede Niederfrequenzverstärkung nutzlos. Werden jedoch bereits die ankommenden Hochfrequenzschwingungen verstärkt, so daß die Reizschwelle des Detektors überschritten wird, so steht einer weiteren Tonverstärkung in der Niederfrequenz nichts im Wege. Dies gilt insbesondere für die äußerst schwachen Hochfrequenzschwingungen, die in den verhältnismäßig kleinen Rahmenantennen induziert werden.

2. Als Beispiel für eine **mehrstufige Hochfrequenzverstärkung** diene die Schaltung in Abb. 427, die im Prinzip dem Hochfrequenzverstärker des Telefunkenpeilers entspricht. Die vom Sender ausgehenden elektromagnetischen Wellen erregen in dem abgestimmten Schwingungskreis, der aus der Rahmenspule R als Selbstinduktion und dem Drehkondensator C

besteht, in der Regel sehr schwache hochfrequente Wechselströme gleicher Frequenz. Die Wechselspannung an C wird an Gitter und Kathode der ersten Röhre R_1 gelegt und steuert deren Anodenstrom, so daß diesem Gleichstrom ein bereits verstärkter Hochfrequenzstrom überlagert ist. An Stelle des hochohmigen Widerstandes w_1 der Abb. 426 liegt hier im Anodenkreis die Drosselspule Dr , die für den Gleichstromanteil des Anodenstromes einen verhältnismäßig geringen, für die Hochfrequenzströme im Anodenstrom infolge ihrer hohen Selbstinduktion einen sehr großen Widerstand besitzt. Die Spannungsschwankungen am Ende der Drosselspule

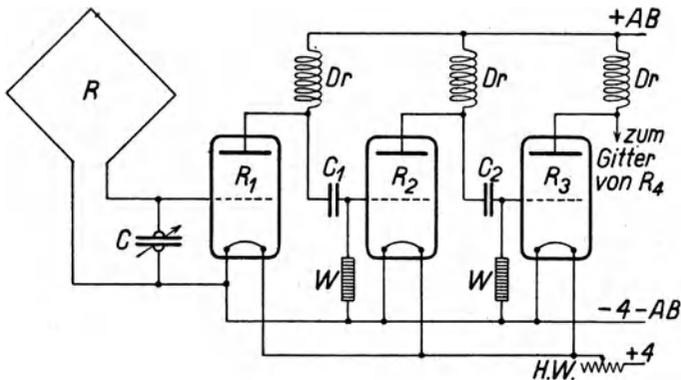


Abb. 427. Mehrstufiger Hochfrequenzverstärker mit Drosselspulenkopplung.

werden, wie beim widerstandsgekoppelten Niederfrequenzverstärker, über den Kondensator C_1 dem Gitter der zweiten Röhre zugeführt. Durch diese Zusammenstellung der Drosselspule Dr mit dem Kondensator C_1 wird der Gleichstromteil des Anodenstromes von R_1 vom hochfrequenten Wechselstromteil getrennt (s. § 196) und ersterer zur Anodenbatterie, letzterer an das Gitter der zweiten Röhre R_2 geleitet. Der hochohmige Gitterableitwiderstand W verhindert die dauernde Ansammlung von Elektronen auf dem Gitter der Röhre R_2 und bestimmt den Mittelwert der Gitterspannung. In den folgenden Röhren wiederholt sich derselbe Vorgang. Im Telefonkennbordpeiler wird eine vierfache Hochfrequenzverstärkung angewandt.

§ 217. Die Röhre als Schwingungserzeuger, Rückkopplung.

1. Induktive Rückkopplung. In den Anodenkreis einer Elektronenröhre sei ein geschlossener Schwingungskreis I, bestehend aus einem Kondensator und einer Spule L_1 , in der durch Abb. 428a angedeuteten Weise hineingelegt. Sobald durch die im Anodenkreis liegende Taste der Strom geschlossen wird, entsteht ein Stromstoß in der Spule L_1 . Dieser regt den Kreis I zu schwachen Eigenschwingungen an, die jedoch nach kurzer Zeit abgeklungen sein würden.

Läßt man nun aber L_1 auf eine im Gitterkreis liegende Spule L_2 wirken, so erzeugen die Spannungsschwankungen an den Enden von L_2 ebensolche auf dem Gitter. Die Schwankungen der Gitterspannung wiederum bewirken Schwankungen des Anodenstromes, und zwar genau im Rhythmus der Eigenschwingungen des Kreises I. Bei richtigem Wicklungssinn der Spule L_2 verstärken die Schwankungen des Anodenstromes die Ströme in L_1 und damit die Schwingungen im Kreise I. Hierdurch wird wieder L_2 stärker angeregt usw., so daß die Schwingungen des Kreises I und die des Gitterkreises sich schnell zu einem Höchstbetrage hinaufschaukeln.

Die Verstärkung einer Stromschwankung im Anodenkreis dadurch, daß man sie auf den Gitterkreis zurückwirken läßt, wird als Rückkopplung bezeichnet (A. Meißner 1913).

Der Schwingungskreis $L_1 C_1$ kann auch in den Gitterkreis, die Rückkopplungsspule L_2 in den Anodenkreis verlegt werden (Abb. 428 b).

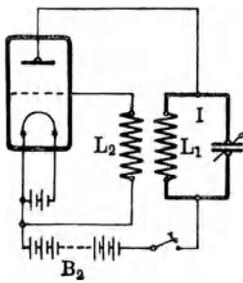


Abb. 428 a.

Rückkopplung.

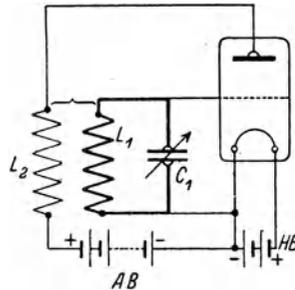


Abb. 428 b.

Beim Einschalten der Röhre wird durch den einsetzenden Anodenstrom mittels der Rückkopplungsspule L_2 eine Spannung in L_1 induziert, welche den Kondensator C_1 auflädt. Dieser entlädt sich durch L_1 und dadurch wird der Schwingungskreis $L_1 C_1$ zu schwachen Eigenschwingungen angeregt. Die an C_1 entstehende Wechselfspannung steuert den Anodenstrom im gleichen Rhythmus. Diese Stromschwankungen unterstützen bei richtigem Wicklungssinn von L_2 durch Induktion die Schwingungen in $L_1 C_1$, so daß diese zu einem Höchstwert aufgeschaukelt werden.

2. Kapazitive Rückkopplung. Das Wesen der Rückkopplung besteht darin, daß ein Teil der Schwingungsenergie aus dem Anodenkreis in den Gitterkreis zurückgeleitet wird, so daß infolge der Steuerwirkung des Gitters die Schwingungen im Schwingungskreis dauernd verstärkt werden. Diese Zurückführung der Energie kann auch durch einen Kondensator geschehen, der in geeigneter Weise zwischen Anoden- und Gitterkreis geschaltet wird. Eine solche „kapazitive Rückkopplung“ wird beispielsweise bei der ersten Röhre des Telefonenbordpeilers verwendet.

Die Rückkopplung läßt sich vergleichen mit den Vorgängen in einer selbst-erregenden Dynamo. Den schwachen Schwingungen im Kreise I, die durch das Einschalten der Anodenbatterie veranlaßt werden, entspricht der remanente Magnetismus der Feldmagnete. Dieser erzeugt zunächst einen schwachen Ankerstrom; wird dieser im richtigen Sinne um die Feldmagnete geleitet, so verstärkt er das Feld, der Ankerstrom wächst usw.

3. Schwingungen ungedämpft. Durch die Rückkopplung können die Schwingungen des Kreises I zu ungedämpften gemacht werden. Die im Kreise auftretenden Energieverluste werden fortwährend durch den im richtigen Takte erfolgenden Nachschub von Energie aus der Anodenbatterie ausgeglichen. (Vergleich mit einem Uhrpendel oder mit einer Chronometerunruhe, denen auch vom Triebwerk über das Räderwerk und das Hemmungsrad bei jeder Schwingung ein kleiner Energiebetrag zum Ersatz für die durch Reibung und Luftwiderstand verlorengegangene Schwingungsenergie zufließt.)

§ 218. Die Röhre als Detektor.

1. Schaltung. Mit einer Elektronenröhre kann man einen höchst empfindlichen Detektor herstellen, der als Audion bezeichnet wird. Eine einfache Audionschaltung ist in Abb. 429 dargestellt. B_1 stellt die Heiz-,

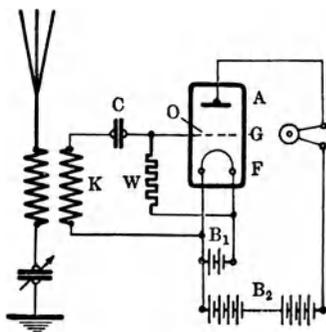


Abb. 429. Audionschaltung.

B_2 die Anodenbatterie dar. Im Anodenkreis liegt das Telephon. Die Antennenschwingungen werden durch die Koppplungsspule K auf den Gitterkreis übertragen, und zwar werden sie einerseits durch den Kondensator C an das Gitter, andererseits an den Glühfaden, meist an dessen negatives Ende geführt. Der „Gitterkondensator“ C ist das Hauptkennzeichen der Audionschaltung. Durch ihn wird das Gitter isoliert (blockiert). Diese Isolation wird aber bis zu einem gewissen Grade wieder aufgehoben durch eine Leitung mit sehr hohem Widerstand W

(Silicium-Widerstand von 1 bis 3 Millionen Ohm), die das Gitter mit dem Glühfaden verbindet. (Der Widerstand W kann auch parallel zu C gelegt werden.)

2. Die Wirkungsweise des Audions beruht darauf, daß das Gitter bei positiver Ladung Elektronen aufnimmt, sie aber bei negativer Ladung von sich fernhält. Es treffe zunächst eine Reihe gedämpfter Wellenzüge auf die Antenne (Abb. 430, Kurve 1). Beim Vorübergang eines jeden Wellenzuges wird der Kondensator C durch die Koppplungsspule K abwechselnd positiv und negativ geladen. Die linke Belegung von C werde in einem bestimmten Augenblick positiv geladen, dann läßt sich

durch Influenz die rechte Belegung negativ und positive Ladung wird nach dem Gitter hin abgestoßen. Dadurch wird der Anodenstrom etwas stärker. Das Gitter nimmt Elektronen auf und der Anodenstrom fällt wieder. Bei der nächsten Halbwelle wird das Gitter negativ, es gibt daher die vorhin aufgenommenen Elektronen nicht wieder ab und ist am Ende der ersten Periode etwas stärker negativ geladen als anfangs. Auch der Anodenstrom ist aus diesem Grunde nach einer Periode schwächer als vorher. Dieser Vorgang wiederholt sich bei den folgenden Schwingungen des Wellenzuges. Ohne den Gitterableitwiderstand W würde das Gitter mit jeder einzelnen Schwingung stärker negativ werden, bis es wegen seiner starken negativen Ladung keine Elektronen mehr aufnehmen könnte. Diese Ladung würde auch nach Abklingen des Wellenzuges bestehen bleiben, so daß die folgenden Wellenzüge ohne Wirkung sein würden. Nun fließen aber über den Widerstand W ständig Elektronen ab, und zwar um so mehr, je höher die negative Spannung des Gitters ist. Daher hört das Anwachsen der negativen Gitterspannung allmählich auf; sobald dann die Empfangsschwingung schwächer wird, fließen mehr Elektronen durch den Widerstand W ab als aufgenommen werden, so daß die negative Spannung des Gitters mehr und mehr schwindet und gleich nach dem Abklingen des Empfangswellenzuges der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt ist.

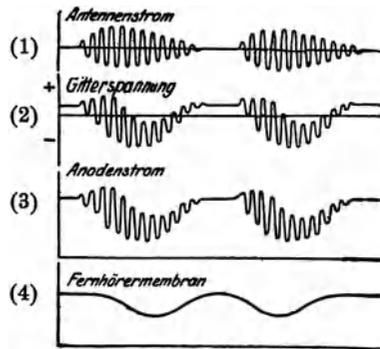


Abb. 430. Audionempfang.

In Abb. 430 zeigt die zweite Kurve (2) den Verlauf der Gitterspannung beim Vorüberziehen der gedämpften Wellenzüge der Kurve (1). Da sich der Anodenstrom genau entsprechend der Gitterspannung ändert, stellt die Kurve (3) den Verlauf des Anodenstromes dar. Dieser besteht a) aus einem Anodengleichstrom, der unbemerkt durch das Telefon fließt, b) einem hochfrequenten Wechselstrom, der durch einen dem Telefon parallel geschalteten Blockkondensator (in der Abb. 429 nicht gezeichnet) geht, und c) aus einem Niederfrequenz- oder Telephonstrom, entsprechend der jedesmaligen Abnahme des mittleren Anodenstromes während des Vorüberganges eines Schwingungszuges. Dieser letzte Strom, der ebenso wie der Anodengleichstrom durch das Telefon fließt, bewirkt, daß die Telephonmembran so oft in der Sekunde angezogen wird, wie Wellenzüge die Antenne treffen. Bild (4) in Abb. 430 deutet die Bewegung der Fernhöreremembran an. Die Höhe des gehörten Tones entspricht daher der Anzahl der in der Sekunde im Sender übergehenden Funken.

Ein ankommender ungedämpfter Wellenzug würde nur beim Einsetzen eine einmalige Anziehung der Telephonmembran bewirken, im übrigen aber nicht wahrnehmbar sein. Zum Hörbarmachen hat man in diesem Falle den Kunstgriff des Überlagerungs- oder Schwebungs-empfanges anzuwenden (s. § 219).

Über das Verhalten des Audions gegenüber den modulierten Wellenzügen der drahtlosen Telephonie s. § 229.

3. Das Audion mit Rückkopplung. Dämpfungsverminderung. Eine weitere Vervollkommnung des Audions wird durch die Anwendung einer Rückkopplung erzielt. Man läßt den in der vorigen Nummer unter b)

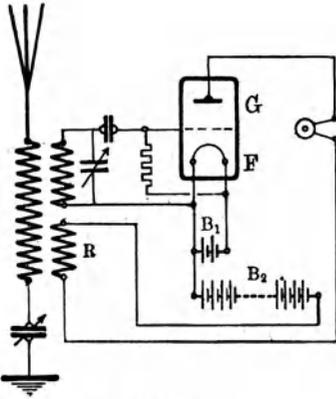


Abb. 431.

Audion mit Rückkopplung.

angeführten Hochfrequenzstrom des Anodenkreises durch eine „Rückkopplungsspule“ R (Abb. 431) auf den Antennen- und damit auf den Gitterkreis zurückwirken. Wird der Antenne auf diese Weise Energie ihrer eigenen Frequenz aus dem Anodenkreis zugeführt, so kann die Dämpfung der in ihr abklingenden Schwingung beliebig herabgesetzt werden. Bei zu fester Kopplung kann es sogar vorkommen, daß die Dämpfung mehr als aufgehoben wird, daß mit anderen Worten die Antennenschwingungen verstärkt werden. Die Antenne strahlt dann Wellen aus und vermag unter Umständen Nachbarstationen empfindlich zu stören.

Die Rückkopplung kann auch kapazitiv mittels eines Drehkondensators erfolgen.

Die Dämpfungsverminderung hat eine bedeutende Erhöhung der Lautstärke und der Abstimmbarkeit (Störungsfreiheit) zur Folge. Kurz vor der Selbsterregung ist die Empfindlichkeit des Audions am größten. Das Eintreten der Selbsterregung macht sich in der Regel durch einen Knack im Fernhörer bemerkbar.

4. Im Vergleich zum Kontaktdetektor ist das Audion viel empfindlicher. Während ein Kontaktdetektor nur die Energie ankommender Hochfrequenzschwingungen in Energie von Telephonströmen umsetzt, liegt beim Audion eine Relaiswirkung vor, indem die ankommenden Wellen lediglich die örtliche Energiequelle der Anodenbatterie auslösen. Durch das Audion ist daher eine bedeutende Vergrößerung der Reichweiten erzielt. Auf Schiffen werden Kontaktdetektoren nur noch zur Aushilfe und zur Erfüllung gesetzlicher Vorschriften neben dem Audion mitgeführt.

5. Dämpfungsverminderung beim Bordpeiler. Die Dämpfungsverminderung durch Rückkopplung kann auch bei Hochfrequenzverstärkern angewendet werden; so ist die Eingangsröhre des Telefunkenbordpeilers mit einer kapazitiven Rückkopplung versehen, damit man die Dämpfung im Rahmenkreis vermindern und dadurch die Empfindlichkeit des Empfängers steigern kann. Diese Rückkopplung darf aber nur bis an die Grenze der Schwingungserzeugung eingestellt werden. Sobald die Eingangsröhre durch noch festere Rückkopplung selbst zu schwingen beginnt, was man am Abnehmen des Anodenstromes der zweiten Röhre erkennen kann, ist der Peiler für die Aufnahme von außen kommender Wellen unempfindlich.

§ 219. Überlagerungsempfang.

1. Empfang ungedämpfter Wellen. Beim Empfang ungedämpfter Wellen tritt eine gewisse Schwierigkeit auf. Weder der Kontakt-detektor noch das Audion bei der in § 218₂ geschilderten Wirkungsweise lassen das Telephon auf ungedämpfte Wellenzüge ansprechen; ein Wellenzug bewirkt nur bei seinem Einsetzen eine einmalige Anziehung der Telephonmembran. Bei einer unverändert mit gleicher Amplitude ankommenden elektromagnetischen Welle bleibt die Telephonmembran dauernd angezogen, also in Ruhe.

Der Überlagerungsempfang (Schwebungsempfang) beseitigt diese Schwierigkeit in vollkommener Weise. Der ankommenden Schwingung von der Frequenz n_1 wird im Empfänger eine zweite Schwingung von etwas abweichender Frequenz n_2 überlagert. Dann entstehen nach § 53₃ Schwebungen, deren Anzahl in der Sekunde gleich der Differenz der Schwingungszahlen n_1 und n_2 der beiden Wellen ist.

Da die Schwebungen bei gleichbleibenden Frequenzen n_1 und n_2 völlig gleichmäßig erfolgen, so erzeugen sie im Telephon einen reinen Ton, wenn ihre Anzahl innerhalb des Hörbereichs liegt. Überlagert man beispielsweise einer Schwingung von der Frequenz $n_1 = 100\,000$ Hertz ($\lambda = 3000$ m) eine zweite Schwingung von der Frequenz $n_2 = 99\,000$ Hertz, so entsteht im Hörer ein Schwebungston von der Frequenz $n_1 - n_2 = 1000$ Hertz. Ändert man n_2 bei konstant gehaltenem n_1 , so hört man einen Schwebungston, der mit sehr hoher Tonlage einsetzt, tiefer wird, bei Resonanz verschwindet und nach Überschreiten der Resonanzlage wieder höher wird. Durch passende Wahl der Hilfsschwingung läßt sich die Tonhöhe des Überlagerungstones beliebig einstellen.

2. Überlagerer. Die Hilfsschwingung kann durch einen kleinen Röhrensender, den Überlagerer, erzeugt und durch lose Kopplung auf den Antennen- oder Eingangskreis des Empfängers übertragen werden. Da man hierzu nur geringer Schwingungsenergie bedarf, genügt eine gewöhnliche Verstärkerröhre, die mittels einer Rückkopplungsschaltung

(s. § 217) einen Schwingungskreis zu ungedämpften Hochfrequenzschwingungen erregt. Durch Auswechseln der Schwing- und Rückkopplungsspulen und durch Einstellen des Drehkondensators nach Skale kann man jede praktisch vorkommende Frequenz der Hilfsschwingung erhalten.

3. Überlagerungsempfang beim Audion. Äußerst einfach gestaltet sich der Schwebungsempfang beim Audion mit Rückkopplung. Man hat nur die Rückkopplung so fest zu machen, daß es selbst schwingt, und die Antenne gegen die Empfangswelle ein wenig zu verstimmen. Es entstehen dann durch Überlagerung der durch Rückkopplung in der Röhre erzeugten mit den von der Antenne aufgefangenen Schwingungen die gewünschten Schwebungen. Beim Drehen des Antennenkondensators macht sich das Vorhandensein einer Sendestation mit ungedämpften Wellen durch ein Pfeifen bemerkbar, indem die ganze Tonskale von den höchsten bis zu den tiefsten Tönen hinunter und hinauf bestrichen wird.

4. Der Überlagerungsempfang zeichnet sich durch große Störungsfreiheit aus, da ungedämpfte Wellen auch bei sehr kleinen Unterschieden in den Wellenlängen schon recht verschiedene Überlagerungstöne ergeben.

Bei der Aufnahme sehr langer Wellen ist es vorteilhafter, einen getrennten Überlagerer zu verwenden, da die Antenne sonst zu stark gegen die Empfangswelle verstimmt und damit ihre Aufnahmefähigkeit gegenüber der Empfangswelle zu gering wird.

Die Lautstärke der Signale gedämpfter oder modulierter Sender wird durch geeignete Überlagerung bedeutend vergrößert, doch wird ihr Eigentum dadurch zerstört und sie erhalten eine mehr zischende Klangfarbe.

§ 220. Arten der Hochfrequenzschwingungen.

Man unterscheidet gedämpfte und ungedämpfte Schwingungen (Type *B* und *A* nach dem Weltfunkvertrag von 1927).

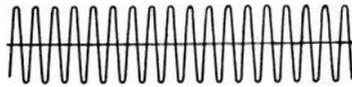


Abb. 432 a. Ungedämpfter Wellenzug.

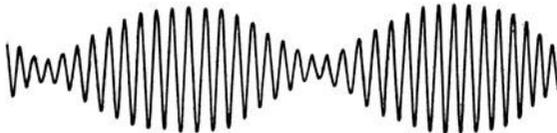


Abb. 432 b. Einfach modulierter Wellenzug.

1. Durch einmalige Entladung eines Kondensatorkreises entstehen gedämpfte Schwingungen. Die Amplituden aufeinander folgender Schwingungen nehmen je nach der Stärke der Dämpfung mehr oder weniger rasch bis auf Null ab.

2. Die ungedämpften Schwingungen (Type A) teilt man in drei Gruppen ein:

a) Type A_1 : ungedämpfte Schwingungen im eigentlichen Sinne, bei denen Amplitude und Frequenz völlig konstant bleiben (Abb. 432a). Dazu muß der Schwingung dauernd Energie zugeführt werden.

Beispielsweise können die von Wechselstromerzeugern nach § 194 gelieferten Wechselströme als ungedämpfte (Niederfrequenz-)Schwingungen aufgefaßt werden. Ein Verfahren zur Erzeugung ungedämpfter Hochfrequenzschwingungen wurde in § 217 erläutert.

b) Type A_2 : ungedämpft modulierte Schwingungen. Läßt man die Amplitude einer ungedämpften Hochfrequenzschwingung in gesetzmäßiger Weise, etwa im Rhythmus eines einfachen Tones zu- und abnehmen, so nennt man die Schwingung moduliert (Abb. 432b). Die ursprüngliche ungedämpfte Schwingung (oder Welle) heißt Trägerwelle, die niederfrequente Schwingung, welche ihr aufgeprägt wird, modulierende Frequenz.

c) Type A_3 : Telephoniewellen. Anstatt durch einen einfachen Ton (Sinuswelle) kann eine ungedämpfte Trägerwelle auch durch verwickelte Schallwellen moduliert werden. Abb. 432c stellt z. B. eine dem Vokal „o“ entsprechende Schall-schwingung dar. (In Wirklichkeit sind die Schwingungszeiten der elektrischen

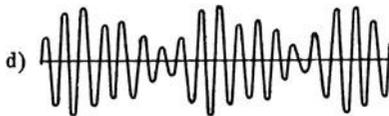


Abb. 432 c, d. Telephonie-Wellenzug.

Schwingung, verglichen mit denen der akustischen Schwingung, viele tausendmal kleiner zu denken, als in der Zeichnung dargestellt werden konnte.) In Abb. 432d ist die Trägerwelle a) durch Aufprägung der niederfrequenten Schwingungen des Vokals o verändert (moduliert).

Legt man durch die positiven Maxima der Wellen des modulierten Wellenzuges eine Kurve, so ist dieses die Kurve c; die durch die negativen Maxima gelegte Kurve ist das an der Zeitachse gespiegelte Bild der Kurve c.

Durch Schallwellen modulierte ungedämpfte Schwingungen bilden die Grundlage der drahtlosen Telephonie (s. § 229).

Bordstationen.

Im folgenden sollen nur diejenigen Funkanlagen auf Handelsschiffen eingehend beschrieben werden, die von Bordfunkern mit dem Bordfunkerzeugnis II. Klasse bedient werden.

§ 221. Gekoppelter Sender und Empfänger von Braun.

1. Bei den ältesten Sendern für drahtlose Telegraphie verwendete man als Antenne einen durch eine Funkenstrecke unterbrochenen, senk-

recht in die Höhe geführten Draht. Die gleiche Antenne benutzte man auch für den Empfänger, indem man die Funkenstrecke durch einen Wellenanzeiger ersetzte. Mittels einer solchen vertikalen Eindrahtsendeantenne (Abb. 413) können nur geringe Energiemengen angesammelt, in Schwingung versetzt und ausgestrahlt werden. Von diesem geringen Energievorrat verzehrt die Funkenstrecke durch Wärmeentwicklung einen großen Teil, so daß die Schwingungen stark gedämpft sind. Resonanz kann nicht ausgenutzt werden und der Empfänger spricht fast auf jede Welle an. Vermehrung der Antennenkapazität durch Verwendung mehrerer Drähte gibt keine wesentliche Verbesserung.

2. Braunschener gekoppelter Sender. F. Braun (Straßburg) gab 1898 ein viel wirksameres Mittel zur Vermehrung der Antennenenergie

an, das auch heute noch bei fast allen Sendern angewendet wird. Er häufte in einem geschlossenen Schwingungskreis mit großer Kapazität einen großen Energiebetrag an, übertrug diese Energie durch Kopplung in die Antenne und ließ sie von dieser in den Raum hinausstrahlen. Die Abb. 433 a und b stellen Ausführungen dieses Gedankens dar. Der geschlossene oder Erregerkreis kann entweder magnetisch (induktiv) durch das den Spulen s_1 und s_2 gemeinsame magnetische Wechselfeld oder direkt durch das beiden Schwingungskreisen gemeinsame Stück bc der Strombahnen mit der Antenne gekoppelt sein (siehe § 204).

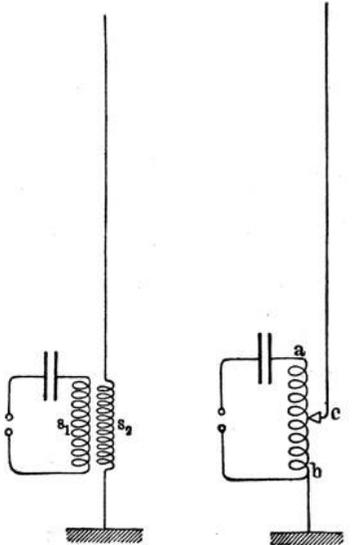


Abb. 433 a.

Abb. 433 b.

Braunschener Sender

(induktive Kopplung).

(direkte Kopplung).

Die direkte Kopplung hat den Vorteil der Einfachheit, da hier die beiden Kreise nicht gegeneinander isoliert zu werden brauchen. Sie wird deshalb für die Tonfunksender bevorzugt, während bei Röhrensendern meist die induktive Kopplung angewendet wird.

Selbstverständlich muß der Antennenkreis auf den Erregerkreis abgestimmt werden.

Die Kopplung darf nicht zu lose und nicht zu fest sein. Bei zu loser Kopplung würde die Energie nicht schnell genug aus dem Erregerkreis in den Antennenkreis hinüberwandern. Eine zu feste Kopplung hat Zweiwelligkeit zur Folge (§ 222).

3. Der Braunsche Empfänger. Da im Braunschen Sender bei jeder Aufladung des Primärkreises ein größerer Energiebetrag zur Verfügung steht, so klingt der hinausgesandte Wellenzug viel weniger schnell ab, als bei einer einfachen Antenne nach Abb. 407. Erst durch Einführung des Braunschen Senders wurde daher eine abgestimmte drahtlose Telegraphie möglich. Zu dem Zwecke wurde die Kopplung auch für den Empfangsapparat eingeführt. Dieser besteht demgemäß im einfachsten Falle aus einem offenen Schwingungskreis, der veränderliche Spulen und Kondensatoren zur Abstimmung enthält, und einem mit ihm gekoppelten geschlossenen Kreis, der den Detektor enthält.

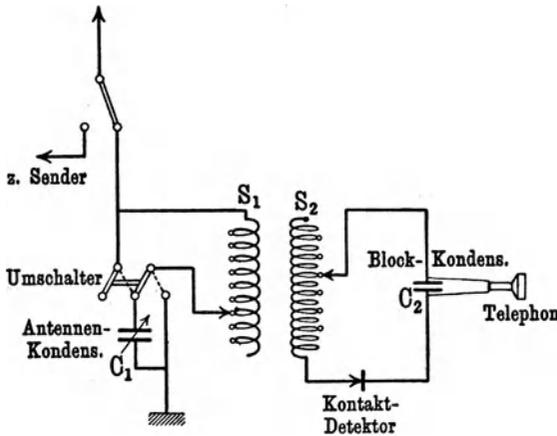


Abb. 434. Empfängerschaltung mit Kontaktdetektor und aperiodischem Kreis.

Abb. 434 zeigt die Schaltung, in welcher der vertikale Pfeil die Antenne, S_1 eine stufenweise veränderliche Selbstinduktion und C_1 einen Drehkondensator bedeuten. Die Antenne ist durch die Spule S_1 mit der Spule S_2 des geschlossenen Kreises gekoppelt. In diesem Kreise liegt der durch eine Pfeilspitze angedeutete Detektor. Ferner liegt in ihm das Telephon, dem der Blockkondensator C_2 parallel geschaltet ist. Der geschlossene Kreis läßt infolge des hohen Detektorwiderstandes eigentliche Schwingungen nicht zustande kommen und wird deshalb als aperiodischer Kreis bezeichnet.

Wenn die Spule S_1 und der Kondensator C_1 , wie in der Abbildung dargestellt, hintereinandergeschaltet sind, so ist die Antenne zur Aufnahme kurzer Wellen geeignet.

Durch Überlegen eines Umschalters kann bei manchen Empfangsapparaten erreicht werden, daß C_1 zu S_1 parallel geschaltet ist. In diesem Falle ist die Antenne auf lange Wellen geschaltet (Schwungradschaltung).

4. Zwischenkreis, Sekundärempfang. Zur Erzielung einer größeren Abstimmsschärfe und dementsprechend größerer Störungsfreiheit wird viel-

fach zwischen der Antenne und dem aperiodischen Kreis noch ein Zwischenkreis von geringer Dämpfung eingeschaltet. Dieser wirkt gleichsam wie ein zweites, wegen seiner geringeren Dämpfung feineres Sieb für die ankommenden elektromagnetischen Wellen (Siebkreis). Man nennt diese Empfangsart „Sekundärempfang“ im Gegensatz zu dem in Abb. 434 dargestellten „Primärempfang“.

§ 222. System der tönenden Löschfunken (B-Sender).

1. Nachteil des ursprünglichen Braunschens Senders. Diesem Sender haftete zunächst noch die folgende Unvollkommenheit an.

Rückwanderung der Energie in den Primärkreis. In der Mechanik (§ 50) wurde gezeigt, daß bei zwei abgestimmten, gekoppelten Systemen I und II die Energie, nachdem sie aus I in II hinübergewandert ist, wieder aus II nach I zurückwandert. Das findet mehr oder weniger auch beim Braunschenschen Sender in seiner ursprünglichen Form statt, ein Teil der Energie wandert aus dem Antennenkreis in den Erregerkreis zurück, sie pendelt zwischen den Kreisen hin und her, statt ausgestrahlt zu werden. Davon gibt die durch photographische Aufnahme der Schwingungen hergestellte Abb. 435 Zeugnis. Als Folge dieses Hin- und Herwanderns der Schwingungsenergie ergeben sich zwei „Kopplungsschwingungen“, von denen die eine über, die andere unter der Eigenschwingung der gekoppelten Kreise liegt. Diese Zweiwelligkeit erwies sich als sehr störend.



Abb. 435. Energiewanderung zwischen primärem und sekundärem System.

2. Die Wiensche Stoßerregung. Dieser Übelstand ist durch eine Verbesserung der Funkenstrecke gründlich beseitigt worden. Bei der gewöhnlichen Funkenstrecke bleibt die Funkenbahn zu lange leitend und deshalb der Primärkreis zu lange geschlossen. Bei der Löschfunkenstrecke nach Wien schaltet man eine Reihe von 8 bis 10 kurzen Einzelfunkenstrecken hintereinander. Die Elektroden sind mit einem Silberbelag *S* versehene kreisförmige Kupferplatten *K*, die durch Glimmerringe *G* von etwa 0,15 mm Dicke voneinander getrennt werden; dadurch wird erreicht, daß alle Einzelfunken genau gleiche Länge besitzen. Durch die großen Abkühlungsflächen und das gute Wärmeleitvermögen des Silbers und Kupfers wird die beim Funkenübergang entwickelte Wärme so schnell abgeleitet, daß der Funke fast augenblicklich erlischt. Dadurch ist der Erregerkreis unterbrochen, die Energie kann aus der Antenne nicht mehr

in ihn zurückwandern und die Zweiwelligkeit ist aufgehoben. Die Antenne sendet die ihr mitgeteilte Energie mit der Frequenz ihrer Eigenschwingung hinaus. Diese Art der Erregung der Antenne heißt Stoßerregung, weil der Erregerkreis die Antenne gleichsam nur einmal elektrisch anstößt. Der Erregerkreis wird deshalb auch Stoßkreis genannt. In Abb. 436 b bedeutet der stark ausgezogene Schwingungskreis

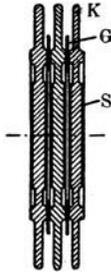


Abb. 436 a.

Wiensche Löschkfunkenstrecke.

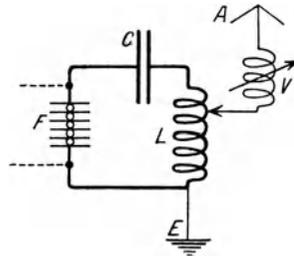


Abb. 436 b.

Wienscher Löschkfunken sender.

den Stoßkreis mit der mehrteiligen Wienschen Löschkfunkenstrecke F ; der Antennenkreis $AVLE$ ist mit dem Stoßkreis direkt gekoppelt und enthält zur Abstimmung das Selbstinduktions-Variometer V .

3. Weiterer Vorteil: Tönender Sender. Infolge ihrer guten Wärmeableitung gestattet die Löschkfunkenstrecke, hohe Funkenzahlen in der Sekunde anzuwenden. Speist man den Stoßkreis mit hochgespanntem Wechselstrom von 500 Perioden, so lassen sich die Funkenübergänge ganz regelmäßig gestalten, so daß die ausgesandten Wellenzüge gleichmäßig aufeinanderfolgen. Im Empfänger wird dadurch die Telephonmembran in regelmäßige Schwingungen versetzt, deren Frequenz gleich ist der Funkenzahl in der Sekunde; man vernimmt daher einen musikalisch reinen Ton, der leicht von den besonders in den Tropen häufigen atmosphärischen Störungen unterschieden werden kann. Gewöhnlich arbeiten die Sender mit 1000 Funken in der Sekunde, so daß man im Telephon einen hohen Ton von der Schwingungszahl 1000 hört, der gut durchdringt und für den das Ohr sehr empfindlich ist. Da ein solcher Sender im Empfangstelephon unmittelbar Töne erzeugt, so wird er als „tönender Sender“ oder Tonfunken sender, die ganze Einrichtung als „System der tönenden Löschkfunken“ bezeichnet.

4. Dieses von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie Telefunken (vom Jahre 1908 an) ausgebaute System erwies sich als den früheren Einrichtungen mit Knallfunken weit überlegen.

Der „tönende Sender“ wird noch heute auf vielen deutschen Schiffen angewendet. Er zeichnet sich durch Betriebssicherheit und verhältnismäßige Einfachheit aus, so daß er auch den nebenamtlich tätigen, in

der Funkentelegraphie ausgebildeten Schiffsoffizieren eine sichere Bedienung ermöglicht.

Infolge der Dämpfung der von ihm ausgestrahlten Wellen beansprucht der tönende Löschfunkensender ein ziemlich breites Wellenband,

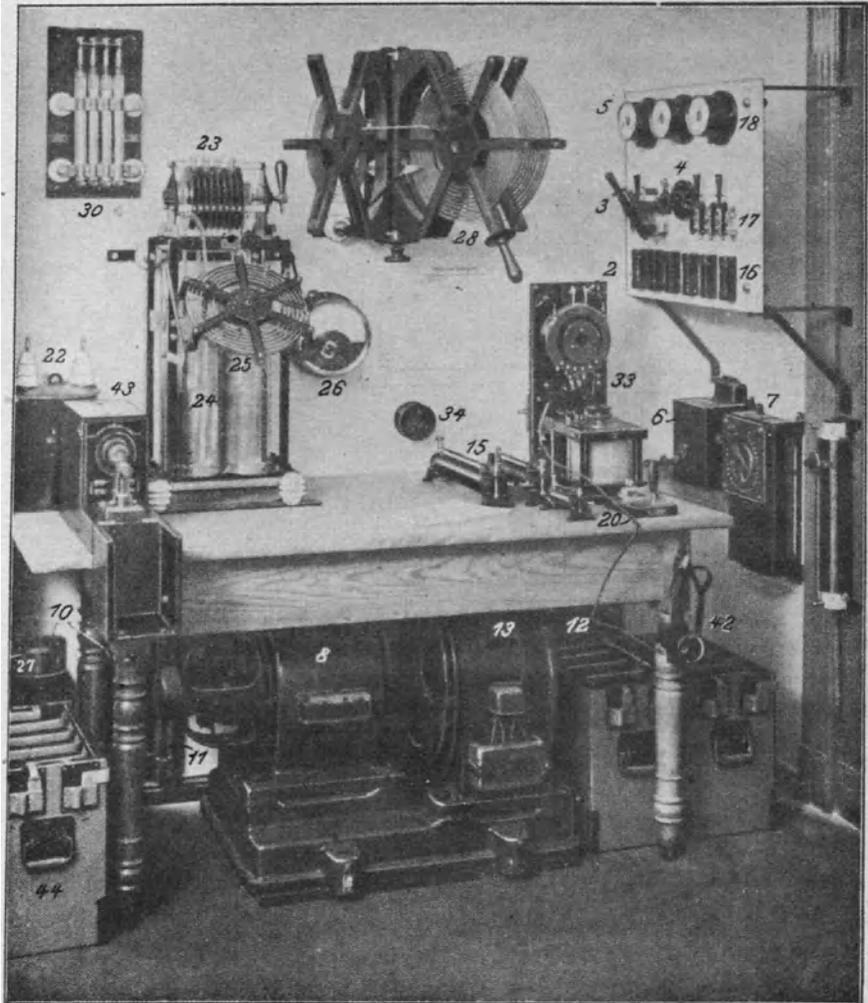


Abb. 437. Geräte einer 1,5 Tk-Station (Telefunken).

d. h. die Resonanzschärfe seiner Wellen ist bei weitem nicht so groß wie die der ungedämpften oder modulierten Wellen. Um einer möglichst großen Zahl von Sendestationen das gleichzeitige Senden ohne unerträgliche gegenseitige Störungen zu ermöglichen, hat die Washingtoner

§ 223. Der Tonfunksender als Hauptsender.

An Bord deutscher Handelsschiffe werden zurzeit (1929) noch zwei Stationsgrößen des Tonfunksenders als Hauptsender verwendet, die 1,5 Tk-Station mit 1,5 kW Antennenenergie und die 0,5 Tk-Station mit 0,5 kW Antennenenergie; sie unterscheiden sich lediglich durch verschiedene Größe der Einzelteile. Abb. 437 zeigt eine Zusammenstellung der Apparate, Abb. 438 die Schaltskizze einer 1,5 kW-Station.

1. Stromquelle (Gleichstromkreis). Als Energiequelle steht an Bord aus dem Schiffsnetz Gleichstrom von meist 110 Volt Spannung zur Verfügung. Die Gleichstromenergie wird durch einen Motorgenerator, auch Umformeraggregat genannt, in Wechselstromenergie umgeformt, d. h. man speist einen Gleichstrommotor mit Gleichstrom aus dem Schiffsnetz und betreibt damit einen Wechselstromerzeuger (Generator).

Der Gleichstrom zum Antrieb des Umformers wird über Sicherungen (2)*, Polwender (3), doppelpoligen Ausschalter (4) dem Schiffsnetz (1) entnommen, durch das Amperemeter (5) über den vereinigten Anlasser und Tourenregler (6, 7, in Abb. 437 getrennt dargestellt) dem Gleichstrommotor (8) zugeführt. Ein Drehspulvoltmeter zeigt dabei die Netzspannung und den richtigen Polanschluß an. Der Gleichstrommotor ist ein Neben- schluß- oder Compoundmotor mit Wendepol.

Abreißrelais. Der Speisestrom läuft zunächst durch einen elektromagnetisch betätigten Relaiskontakt K , der beim Beginn des Anlassens durch den Elektromagneten E beim Vorübergang der beiden gabelförmigen, federnden Kontakte G des Anlaßhebels an den Kontaktstücken A geschlossen wird und der geschlossen bleibt, solange die Netzspannung vorhanden und der Anlaßhebel nicht in die Nullstellung zurückgeführt ist. Beim Ausbleiben der Netzspannung während des Betriebes wird der Kontakt K geöffnet; er wird erst dann wieder geschlossen, wenn der Motor von neuem angelassen wird, nachdem der Anlaßhebel in die Ausschaltstellung zurückgedreht wurde.

Dadurch wird vermieden, daß der Motor beim Wiederkehren der Spannung Schaden nimmt, da er erst wieder Strom erhält, wenn der Anlaßwiderstand völlig eingeschaltet ist. Es ist unzulässig, den Abreißkontakt nach einem Ausbleiben der Netzspannung durch einfaches Hereindrücken wieder zu schließen, ohne die Anlasserkurbel zurückzustellen, oder ihn gar dauernd festzusetzen, da hierdurch der Motoranker unbrauchbar werden kann.

Dreht man die Kontaktkurbel des Anlassers aus der Nullstellung langsam nach rechts, so schließt zunächst die federnde Kontaktgabel G über die Kontakte A den Strom für den Abreißschalter, so daß dieser den Abreißkontakt K schließt; dann wird das Magnetfeld des Motors an die volle Spannung gelegt und die dem Anker vorgeschalteten Anlaßwiderstände W_1 allmählich ausgeschaltet. Bei weiterer Drehung der Anlaßkurbel über B hinaus liegt der Anker an der vollen Netzspannung, während der Magnetwicklung immer mehr Widerstand W_2 vorgeschaltet

*) Diese Zahlen beziehen sich auf die Abb. 437 und 438.

wird. Dadurch steigt die Tourenzahl des Motors (§ 192). Sie kann mit dem Regler um etwa 30 Proz. verändert werden.

2. Der Wechselstromgenerator. Mit dem Anker des Gleichstrommotors ist der Anker des Wechselstromgenerators (13) direkt gekuppelt. Die Wechselstrommaschine ist als Induktortype gebaut (s. § 194_b), d. h. die Wechselstromwicklung und die Gleichstromerregwicklung für die Magnete liegen beide fest. Der rotierende Teil besteht lediglich aus einem gezahnten eisernen Polrad. Die Erregerwicklung 14 ist an das Gleichstromnetz angeschlossen; durch einen Schiebewiderstand (Tonschieber, 15) kann die Erregerstromstärke so eingestellt werden, daß bei jedem Wechsel nur ein Funke übergeht und so ein reiner Ton entsteht. Die Frequenz der Wechselstrommaschine beträgt normal 500 Hertz (1000 Wechsel). Ihre Spannung wird durch das Voltmeter 18 angezeigt.

Die Anker beider Maschinen sind durch Hochfrequenzsicherungen (11) gegen Rückwirkung der hochfrequenten Ströme des Senders geschützt. Diese Sicherungen bestehen gewöhnlich aus Blockkondensatoren, deren eine Belegungen mit den Klemmen des Motors bzw. der Wechselstrommaschine verbunden sind, während die anderen Belegungen an Erde (den Schiffskörper) gelegt sind. Treten durch Induktionswirkungen des Erregerkreises in den Niederspannungskreisen gefährliche Hochfrequenz-Überspannungen auf, so gleichen sie sich durch die Kondensatoren zur Erde aus, so daß die Ankerwicklungen gegen Durchschlagen gesichert sind. Häufig sind auch die Magnetwicklungen besonders gesichert.

Der Umformer wird gewöhnlich außerhalb des Stationsraumes in einen Kasten an Deck oder auch im Maschinenraum aufgestellt; dies hat den Vorteil, daß der Funker während des Empfangs eines Telegramms nicht durch das Motorgeräusch gestört wird und daher den Motor nicht jedesmal nach dem Senden abzustellen braucht.

Bei den 1,5-Tk-Stationen hat der Motor etwa 5 PS Leistung und läuft mit 1500 Touren; bei den 0,5-Tk-Stationen beträgt die Motorleistung etwa 1,5 PS und die Tourenzahl 3000. Die Spannung der Wechselstrommaschine ist in beiden Fällen 220 Volt, die Periodenzahl 500.

3. Der primäre Wechselstromkreis (Transformatorkreis) (s. die Mitte der Schaltkizze Abb. 438). Der an den Klemmen der Wechselstrommaschine abgenommene (tonfrequente) Wechselstrom wird über Sicherungen (16), einen doppelpoligen Ausschalter (17), das Ampere-meter (19), die Morsetaste (20), eine Blockierung (29 a) am Sende-Empfangsumschalter (29), eine Drosselspule (21) der Primärspule des Hochspannungstransformators (22) zugeleitet.

Im Transformator wird der 500-periodige Wechselstrom bei der 1,5-kW-Station auf etwa 8000 Volt, bei der 0,5-kW-Station auf etwa 5000 Volt Spannung transformiert.

Ist die Station durch den Sende-Empfangsumschalter (29) auf „Senden“ geschaltet, so ist die Unterbrechungsstelle der Blockierung (29 a) geschlossen; bei der Stellung auf „Empfangen“ dagegen ist sie geöffnet, so daß eine gleichzeitige Betätigung des Senders unmöglich ist.

Die Drosselspule (21) hat den Zweck, Resonanz zwischen dem primären Wechselstromkreis und dem folgenden sekundären Wechselstromkreis herzustellen, was zur Erzielung eines klaren, reinen Tones nötig ist. Sie wird beim Einbau der Station richtig eingestellt.

4. Der sekundäre Wechselstromkreis enthält die Sekundärspule des Transformators (22) und die Kapazität (24).

5. Der geschlossene Schwingungskreis (Stoßkreis oder Erregerkreis) besteht aus der „Kapazität“ (24), der „Selbstinduktion“ (25) und der Funkenstrecke (23). Als Kapazität dienen drei bis vier parallel geschaltete Leidener Flaschen.

Die Selbstinduktion wird durch eine flache Spirale aus Kupferband gebildet. Zur Einstellung des Schwingungskreises auf die verschiedenen Wellenlängen sind mehrere bezeichnete Stöpselkontakte angebracht, und zwar ist bei den normalen Stationen der Erregerkreis auf die Wellen 600 m, 660 m, 705 m und 730 m abgestimmt. Hinzu kommt noch die Peilwelle 800 m. Die Abstimmung auf diese Wellen erfolgt beim Einbau der Station.

Die Funkenstrecke ist eine Löschfunkenstrecke (§ 222). Sie besteht bei den 1,5-kW-Stationen aus acht Einzelfunkenstrecken, jede etwa 0,2 mm lang, die durch besondere Kupferbügel in beliebiger Zahl kurzgeschlossen werden können. Sind sämtliche acht Funkenstrecken in Betrieb, so arbeitet man mit der größten Energie; will man auf kürzere Entfernung, also mit geringerer Energie telegraphieren, so schließt man mehrere Einzelfunkenstrecken kurz. Die 0,5-kW-Stationen besitzen eine zehnteilige Funkenstrecke mit kleineren Elektroden; auch bei diesen ist es möglich, die ausgesandte Energie durch Veränderung der Zahl der eingeschalteten Einzelfunkenstrecken zu verändern. Die Apparate des Erregerkreises sind auf einem Gestell isoliert aufgebaut.

Der geschlossene Schwingungskreis wird durch die Sekundärwicklung des Transformators aufgeladen.

6. Der offene Schwingungskreis, die Antenne, ist durch direkte Kopplung an den Stoßkreis angeschlossen. Er besteht aus dem eigentlichen Luftleiter, der Erdung und den zur Abstimmung notwendigen Apparaten.

Die Antenne wird gebildet durch zwei oder mehrere Bronzedrähte, die wagerecht zwischen zwei Masten gut isoliert aufgehängt sind. Die Niederführungsdrähte sind bei einer *T*-Antenne in der Mitte, bei einer *L*-Antenne an einem Ende des Luftleiters befestigt. Die Kapazität der Antenne beträgt je nach der Höhe und der Entfernung der Masten 500 bis 1000 cm.

Die Erdung erfolgt an Bord durch Anschluß des einen Endes der Selbstinduktionsspule (25) an den eisernen Schiffskörper; in diese Leitung

ist ein Hitzdrahtamperemeter (26) eingeschaltet, an welchem man die Stromaufnahme der Antenne beobachten kann.

Der geschlossene Schwingungskreis ist mit dem offenen, der Antenne, direkt gekoppelt, d. h. beide Schwingungskreise haben einige Windungen der Selbstinduktionsspule (25) gemeinsam. Für jede der fünf Wellen (600, 660, 705, 730, 800, m) ist ein bezeichneter Stöpselkontakt auf der Spule 25 vorgesehen.

Zur Abstimmung des offenen Schwingungskreises auf den geschlossenen dient das Luftdrahtvariometer (28). Dieses besteht aus drei flachen Spiralen aus Kupferband, von denen die mittlere gegen die

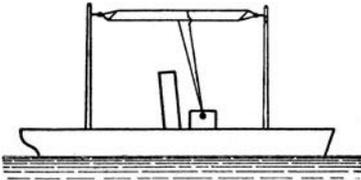


Abb. 439. T-Antenne.

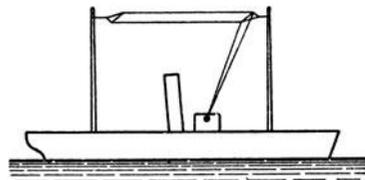


Abb. 440. L-Antenne.

beiden anderen beweglich ist. Für die Abstimmung des Luftleiters auf die einzelnen Wellenlängen sind Stöpselanschlüsse angebracht; die genaue Abstimmung erreicht man dadurch, daß man die bewegliche Flachspule gegen die beiden festen verschiebt, wodurch die Selbstinduktion stetig verändert wird. Die Flachspule ist so lange zu verschieben, bis das in die Erdleitung eingeschaltete Hitzdrahtamperemeter bei reinem Ton den größten Ausschlag zeigt.

Wenn bei den größeren Stationen die Eigenwellenlänge der Antenne infolge ihrer größeren Kapazität zu groß wird, so kann eine „Verkürzungskapazität“ (30) in den offenen Schwingungskreis eingeschaltet werden; diese besteht aus mehreren parallel geschalteten kleinen Leidener Flaschen.

Vom Variometer ist die Leitung über den Luftdrahtumschalter zur Antenne geführt. Hierbei muß besonders auf gute Isolation an der Wanddurchführung geachtet werden.

Eine Blitzschutzvorrichtung dient zum Schutze des Funkers und der Apparate bei Gewittern. Sie besteht aus einer verstellbaren Funkenstrecke und einem dazu parallel liegenden Schalter, durch den die Antenne unmittelbar mit dem Schiffskörper verbunden werden kann. Die Funkenstrecke wird so eingestellt, daß beim Senden ein Funkenübergang eben nicht mehr stattfindet. Treten dann in der Antenne durch die atmosphärische Elektrizität Überspannungen auf, so gleichen sich diese über die Funkenstrecke zur Erde aus; während eines Gewitters wird der Schalthebel eingelegt und so die Antenne unmittelbar geerdet.

Während des Peilens mit dem Bordpeiler ist die Antenne zu isolieren.

7. Bedienungsvorschrift beim Senden. Die gewünschte Wellenlänge wird an der Selbstinduktionsspule des geschlossenen und am Luftdrahtvariometer des offenen Schwingungskreises eingestöpselt.

Der Gleichstrom für den Motor wird eingeschaltet.

Der Anlasser des Motors wird langsam unter Beobachtung des Gleichstromamperemeters eingeschaltet. Durch den Tourenregler wird der Motor auf normale Drehzahl gebracht.

Der Schalter im Wechselstromkreis wird geschlossen.

Der Sende-Empfangsumschalter wird auf „Senden“ gestellt.

Mit Hilfe des Tonschiebers (15) verstärkt man die Wechselstromerregung derart, daß man beim Drücken der Taste einen reinen Ton erhält.

Der zunächst auftretende Ton geht bei weiterer Erregung nach einigen unreinen Perioden allmählich in den gewünschten hohen Ton von 1000 Schwingungen, entsprechend 1000 Funken in der Sekunde, über. Weiter darf die Erregung nicht gesteigert werden, weil sich sonst Partialfunken bilden, die den Ton unrein machen und die Reichweite verringern.

Durch Einstellen des Luftdrahtvariometers unter Beobachtung des Antennenamperemeters stimmt man den offenen auf den geschlossenen Schwingungskreis ab (Maximalausschlag am Antennenamperemeter).

Darauf kann das Telegramm abgegeben werden.

§ 224. Notsender.

1. Der Zweck des Notsenders ist, die drahtlose Station unabhängig vom Schiffsnetz zu machen für den Fall, daß die Lichtmaschine aus irgend einem Grunde gestört ist. Dieses wird erreicht durch eine an Deck aufgestellte Akkumulatorenbatterie, die während der ganzen Reise betriebsfertig geladen sein muß. Außerdem dient der Notsender als Reserve, falls im Hauptsender selbst Störungen eintreten oder der Hauptsender wegen zu geringer Entfernung der Gegenstation nicht benutzt werden soll.

2. Der Ladestromkreis der Notsenderbatterie *B* (Abb. 441) ist an das Schiffsnetz (1) angeschlossen und enthält die Hauptsicherungen (2), den Polwender (3) und das Amperemeter (4) gemeinsam mit der Gleichstromzuführung des Hauptsenders, ferner den „Automat“ (5), den Ladewiderstand (6) und eine Ladesicherung (7). Durch das Gleichstromvoltmeter (8) mit dem (nicht eingezeichneten) Voltmeterumschalter kann sowohl die Klemmenspannung der Akkumulatorenbatterie als auch die Netzspannung gemessen werden. Der Polwender soll ermöglichen, die Batterie immer mit richtigen Polen ans Netz anzuschließen, da es auf Schiffen manchmal vorkommt, daß die Zuleitungsdrähte ihre Pole vertauschen. Ist richtig gepolt, so schlägt der Zeiger des Drehspulvoltmeters nach der richtigen Seite aus, andernfalls muß der Polwender umgelegt werden. Die Glühlampe (9) liegt parallel zur Akkumulatorenbatterie.

Soll die Batterie geladen werden, so ist der Polwender einzulegen und hierauf, nachdem man sich durch Beobachtung des Voltmeters überzeugt hat, daß die Polarität stimmt, der Automat einzuschalten.

Der Automat soll verhindern, daß sich die Batterie ins Netz entlädt, wenn aus irgendeinem Grunde die Netzspannung unter die Batteriespannung sinkt oder ganz ausfällt. In beiden Fällen unterbricht er selbsttätig die Verbindung mit dem Netz.

Die Ladung ist zu beendigen (durch Ausschalten des Polwenders), wenn die Akkumulatorenzellen starke Gasentwicklung zeigen (kochen) und die Batteriespannung auf 43 Volt gestiegen ist.

Die Bordstationen der Telefunken-gesellschaft haben Blei-Akkumulatoren-batterien von 16 Zellen mit 32 Volt Entladespannung. Die normale Ladestromstärke beträgt etwa 6 Amp., die maximale Entladestromstärke 17 Amp.

Beim Gebrauch des Notsenders ist auf sparsamsten Verbrauch des Primärstromes aus der Akkumulatoren-batterie zu achten; Leerlauf des Umformers ist zu vermeiden.

3. Für den Notsender wird der Stoßkreis und der Antennenkreis des Hauptsenders benutzt. Die Aufladung der Kondensatoren im Stoßkreis geschieht jedoch nicht durch den Wechselstromtransformator des Hauptsenders, sondern durch einen besonderen Hammerinduktor, dessen Sekundärspule mit den Belegungen der Stoßkreiskondensatoren verbunden wird.

Der Hammerinduktor kann auf zweierlei Weisen gespeist werden, und zwar

- a) mit Gleichstrom aus der Notsenderbatterie,
- b) mit Wechselstrom aus einem besonderen Umformer-Aggregat („Flieger-Umformer“).

Die Umschaltung von der einen auf die andere Betriebsart geschieht durch Umlegen eines dreipoligen Umschalters.

a) Liegt der Umschalter U auf den Kontakten a, b, c (Abb. 442), so fließt der Gleichstrom aus der Notsenderbatterie B über den Regulierwiderstand w zur Taste T , durch die Primärspule P zum Hammerunterbrecher über den Kontakt c und die Blockierung am Sende-Empfangsumschalter zur Batterie zurück. In diesem Falle wirkt der Induktor als gewöhnlicher Funkeninduktor (s. § 181).

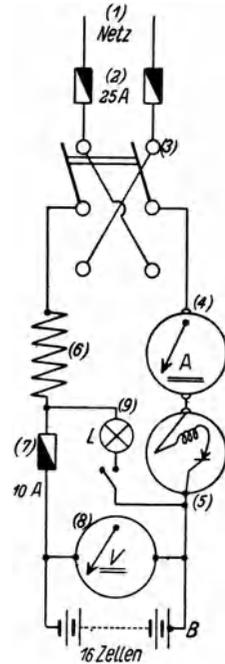


Abb. 441. Ladestromkreis des Notsenders.

b) Legt man den Umschalter U nach der anderen Seite auf die Kontakte d, e, f , so wird die Primärschule des Induktors mit der Wechselstromwicklung uv des „Flieger-Umformers“ verbunden, welcher Wechselstrom von 500 Perioden liefert. Wird der Hammerunterbrecher mittels der Kontaktschraube kurzgeschlossen, so wirkt der Induktor als Wechselstromtransformator.

Der Umformer enthält einen Gleichstromnebenschlusmotor, dessen Anker A und Magnetfeld F aus der Akkumulatorenbatterie gespeist werden. In die Verbindungsleitung des Motors mit der Batterie sind Anlaufwiderstände geschaltet, die beim Umlegen des Sende-Empfangs-

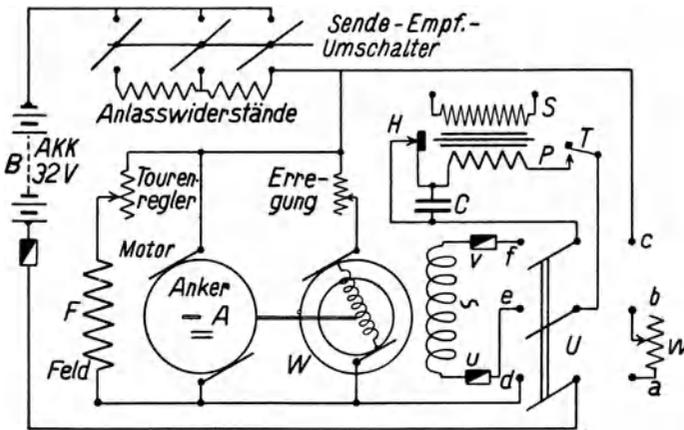


Abb. 442.

Schaltbild des Notsenders.

umschalters auf „Senden“ stufenweise selbsttätig ausgeschaltet werden. Die Tourenzahl des Motors kann durch einen Tourenregler verändert werden. In demselben Gehäuse mit dem Motor befindet sich die Wechselstrommaschine W . Ihr rotierendes Magnetfeld wird durch Gleichstrom, der durch zwei Schleifringe zugeleitet wird, erregt. Die Erregung und damit die erzeugte Wechselspannung kann durch einen Schieberegler verändert werden.

Wegen der geringeren Energie der Wechselstrommaschine des Notsenders werden nur wenige Funkenstrecken eingeschaltet. Da der Umformer Wechselstrom von 500 Perioden liefert, erhält man bei dieser Betriebsart tönende Zeichen wie mit dem Hauptsender, während der Hammerunterbrecher tiefere, mehr schnarrende Signale erzeugt. Aus diesem Grunde gibt man dem Wechselstrombetrieb des Notsenders meist den Vorzug.

§ 225. Der modulierte Sender.

1. Allgemeines. Wird eine Trägerwelle von beispielsweise 500 kc/s (kHz), die eine Wellenlänge von 600 m besitzt, mit einem Niederfrequenzton von 500 Hz moduliert, so nehmen die Amplituden der Trägerwelle während 250 Schwingungen von Null allmählich bis zu einem Maximalwert zu, um während der folgenden 250 Schwingungen der Trägerwelle wieder auf Null abzunehmen, worauf sich der Vorgang in regelmäßiger Folge wiederholt.

Infolge dieser großen Anzahl von Einzelschwingungen innerhalb eines Wellenzuges geben diese tönend-modulierten Wellen (Type A_2) eine schärfere Resonanz als gedämpfte Wellen (Type B), wenn sie auch die Resonanzschärfe rein ungedämpfter Wellen (Type A_1) nicht erreichen.

Während diese jedoch nur mit Überlagerung aufgenommen werden, sind die tönend-modulierten ebenso wie die gedämpften Wellen mit einem einfachen Detektorempfänger oder Audion ohne Rückkopplung aufnehmbar. Aus diesem Grunde sind für Seenotrufe diese beiden Wellenarten vorgeschrieben.

Für die Erzeugung tönend-modulierter Wellen kommen heute an Bord nur Röhrensender in Frage. Im folgenden wird das Modell „MRSI“ der Deutschen Betriebsgesellschaft für drahtlose Telegraphie (Debeg) beschrieben, das unter Verwendung eines großen Teiles der vorhandenen Apparate auch nachträglich an Tonfunkensender angepaßt werden kann.

2. Grundsätzliche Wirkungsweise. Abb. 443 zeigt das Schaltschema des modulierten Senders, Abb. 444 die Außenansicht des eigentlichen Sendergeräts.

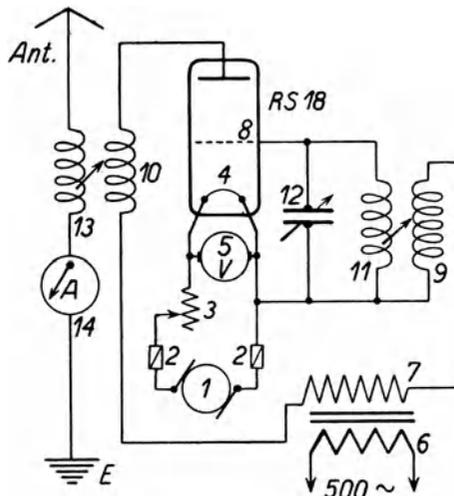


Abb. 443. Grundsätzliches Schaltschema des modulierten Senders.

Es ist ein Röhrensender mit abgestimmtem Gitterkreis, induktiver Rückkopplung und induktiv angekoppelter Antenne. Die Schaltung der Röhre entspricht der Abb. 428 b, unterscheidet sich aber von dieser durch die Anodenstromquelle. An Stelle der Gleichstrom liefernden Anodenbatterie tritt beim modulierten Sender die Sekundärspule eines Wechselstromtransformators, die hochgespannten Wechselstrom von etwa 500 Perioden liefert. Dadurch werden die Schwingungen moduliert; ist nämlich während einer halben Periode des Wechselstromes (Abb. 445₁) das mit der Anode verbundene Ende der Sekundärspule positiv, so erzeugt das

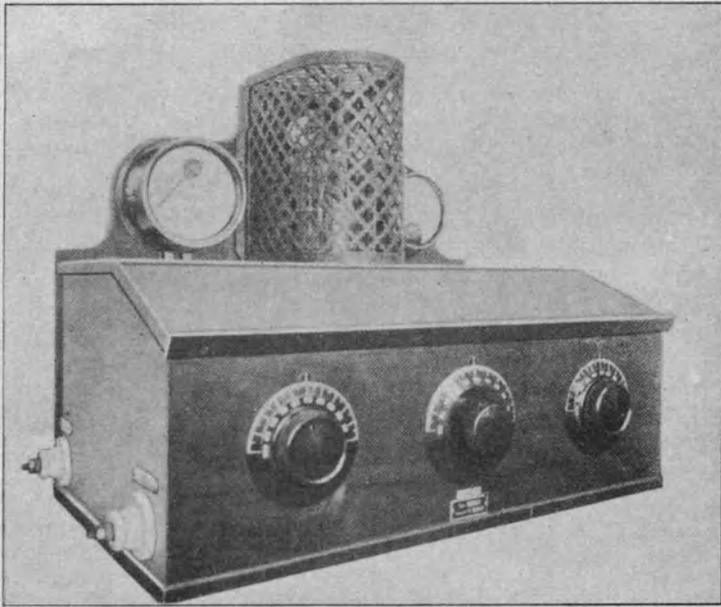


Abb. 444. Sendergerät des modulierten Senders.

Senderrohr Schwingungen (Abb. 445₂), und zwar nehmen deren Amplituden entsprechend der Änderung der Wechselfspannung erst zu und dann ab. Abb. 445₂ stellt schematisch den Anodenstrom mit der überlagerten Hochfrequenzschwingung dar. In der nächsten Halbperiode des Wechselstromes wird die Anode negativ, Schwingungen können nicht entstehen, weil der Elektronenstrom in der Röhre nur bei positiver Anode fließen kann. Bei einer Schwingungszahl von 500 000 Hertz würde man daher in jeder Sekunde 500 Wellenzüge von je 500 Schwingungen enthalten. Da jedoch die Schwingungen erst einsetzen, wenn die Anodenspannung eine gewisse Höhe erreicht hat, und auch abklingen, wenn diese Spannung noch nicht ganz Null geworden ist, so wird die Anzahl der innerhalb der

einen Halbperiode tatsächlich erregten Schwingungen zwar kleiner als 500, aber doch noch viele Male größer als bei einem Funkensender (Abb. 445₃). Daraus erklärt sich die gegenüber dem Tonfunkensender erheblich größere Resonanzschärfe des modulierten Senders. Die Tonhöhe der von der Antenne ausgestrahlten Schwingungen ist gleich der Periodenzahl des Wechselstromes, der die Anodenenergie liefert; sie beträgt durchschnittlich 500 Hertz und kann durch Änderung der Tourenzahl des Umformers in gewissen Grenzen verändert werden.

3. Beschreibung. a) Stromquellen: Die Senderöhre (Telefunken, Type RS 18) erhält ihren Heizstrom in der Regel aus einem vom Schiffnetz gespeisten Gleichstrom-Gleichstrom-Einankerumformer (s. Abb. 443), der an seinem zweiten Kollektor (1) Gleichstrom von 25 Volt Spannung

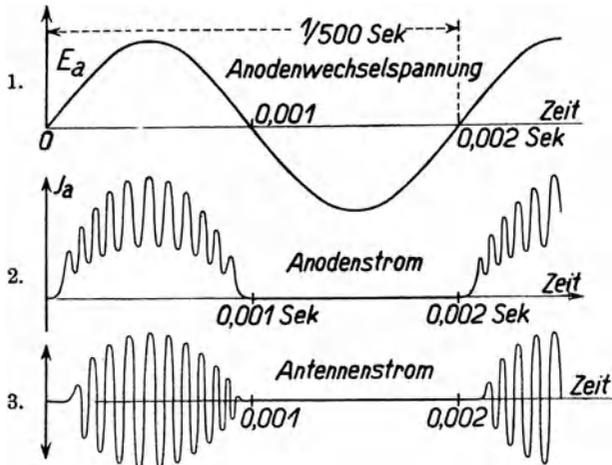


Abb. 445. Wirkungsweise des modulierten Senders.

liefert. Dieser wird über zwei Sicherungen (2), einen Heizwiderstand (3) und zwei nicht eingezeichnete Drosselspulen dem Heizfaden (4) zugeführt. Die Heizspannung wird mittels des Heizwiderstandes auf den an jeder Senderöhre angegebenen Wert (15 bis 16 Volt) reguliert und kann am Voltmeter (5) dauernd überwacht werden. Die vorgeschriebene Heizspannung ist genau einzuhalten. Wird sie überschritten, so wird die Lebensdauer der wertvollen Röhren gefährdet.

Für die Lieferung der Anodenspannung wird der in § 223 beschriebene Gleichstrom-Wechselstromumformer der 0,5 kW-Station verwendet (Frequenz 500 Hertz, Spannung etwa 130 Volt bei geschlossener Taste; vgl. Schaltskizze Abb. 438). Dieser Wechselstrom wird ebenso wie bei der Tonfunkstation über die Blockierung und die Taste der Primärspule (6) des normalen Hochspannungstransformators ($\frac{220}{8000}$ Volt) zu-

geführt; in dessen Sekundärspule (7) wird er auf etwa 4000 Volt umgespannt und dem eigentlichen Sendergerät zugeführt.

b) Der Senderkasten (Abb. 444) enthält hinter der durchbrochenen Schutzkappe das Senderrohr, im Holzkasten die variable Antennenkopplung (linke Skalenscheibe) mit den Kopplungsspulen (10) und (13), den Abstimmkondensator (12) des Gitterkreises (mittlerer Drehknopf) und die variable Gitterkopplung mit den Spulen (11) und (9) (rechte Skalenscheibe), außerdem die Anschlüsse für Antenne, Erde und die Stromquellen. An der Rückwand des Geräts ist links das Antennenamperemeter (14) und rechts das Voltmeter (5) zur Überwachung der Heizfadenspannung angebracht.

c) Der Heizkreis des Senderrohrs ist oben unter a) beschrieben.

Der Gitterkreis enthält den geschlossenen Schwingungskreis aus der Gitterspule (11) und dem Drehkondensator (12) und ist an Kathode und Gitter der Senderöhre angeschlossen.

Der Anodenkreis wird gebildet von der Anode, der Spule (10) zur induktiven Ankopplung der Antenne, der Sekundärspule (7) des Wechselstromtransformators, der Anodenspule (9) zur Ankopplung des Gitters (Rückkopplungsspule) und der Kathode.

Im Antennenkreis liegt die eigentliche Antenne, der Sende-Empfangsumschalter, das Variometer zur Antennenabstimmung, ein Umschalter (Senderwähler) vom Röhrensender auf den Notsender, wenn nötig eine Antennenverlängerungsspule, die Antennenspule (13), das Antennenamperemeter (14) und die Erdleitung.

4. Wirkungsweise. Wird im Wechselstromkreise die Taste gedrückt, so wird der vom 500 \sim -Generator erzeugte Wechselstrom im Transformator hochgespannt und bei geheizter Kathode als Anodenstrom durch die Senderöhre getrieben, wenn das linke Ende der Sekundärspule (7) positiv ist. Der beginnende Anodenstrom induziert über die Spule (9) auf den Gitterkreis (11), (12) und regt ihn zum Schwingen an; dessen Schwingungen steuern ihrerseits den Anodenstrom, und dieser wiederum unterhält über die Rückkopplungsspule (9) die Schwingungen des Gitterkreises. Um dem Gitter eine ausreichende Steuerspannung zuführen zu können, ist die Gitterspule (11) drehbar in der Anodenspule (9) angeordnet. Mit zunehmender Spannung an der Sekundärspule steigt die Amplitude der Schwingungen; bei abnehmender Sekundärspannung nimmt sie ebenfalls ab. Ist beim nächsten Wechsel das rechte Ende von (7) positiv, so kann kein Anodenstrom und somit auch keine Schwingung zustande kommen. Ein Teil der Schwingungsenergie des Anodenstromes wird durch die Antennenankopplungsspule induktiv auf die drehbare Antennenspule (13) übertragen und dadurch auch der Antennenkreis in Schwingungen versetzt.

Mittels der Kopplung $\frac{10}{13}$ kann die günstigste Energieübertragung auf die Antenne eingestellt werden. Der Antennenstrom kann am Hitzdrahtamperemeter (14) abgelesen werden.

Der Wellenbereich des Senders umfaßt 600 bis 800 m.

Zur Messung der ausgestrahlten Wellenlänge dient ein kleiner Wellenmesser mit fest eingebauter Spule nach Abb. 404, der mit Kontaktdetektor und Drehspulgalvanometer als Wellenanzeiger ausgestattet ist.

Der modulierte Sender wird zur Erreichung größerer Reichweite auch mit zwei parallel geschalteten Senderöhren versehen. Auch kann die Heizung der Röhren über einen Vorschaltwiderstand aus dem Schiffsnetz erfolgen.

5. Bedienungsvorschrift beim Senden.

1. Senderwähler auf Röhrensender legen.
2. Sendewelle am Variometer und an der Antennenverlängerungsspule stöpseln; Gitterkopplung, Gitterkondensator und Antennenkopplung nach Tabelle für die gewünschte Welle einstellen.
3. Hauptschalter an der Schalttafel schließen.
4. Heizumformer anlassen und Heizspannung auf den vorgeschriebenen Wert einstellen.
5. Hauptumformer anlassen und Wechselspannung mittels des Erregerwellenstandes auf etwa 130 Volt regulieren.
6. Wellenmesser nach Eichkurve auf die gewünschte Sendewelle einstellen; Sende-Empfangsumschalter auf Senden stellen.
7. Taste drücken und das Variometer langsam bewegen, bis der Stromzeiger am Wellenmesser den größten Ausschlag gibt. Damit ist die ausgestrahlte Welle festgelegt. Variometer feststellen.

Es wird also, abweichend vom Tonfunkensender, der größte Ausschlag **nicht** am Antennenamperemeter, sondern am Wellenmesser durch Bewegungen des Variometers eingestellt. Es könnte sonst die wirklich ausgestrahlte Welle erheblich von der gewünschten abweichen. Für die tatsächlich ausgestrahlte Welle ist stets die Angabe des Wellenmessers maßgebend. Auch geringe Änderungen der Antennen- oder Gitterankopplung können eine Wellenänderung hervorrufen, die man mit dem Variometer unter Beobachtung des Wellenmessers wieder korrigieren muß.

Zu starke Glut der Anode deutet auf schlechte Abstimmung zwischen den Kreisen des Senders und ist durch Nachstimmen zu beseitigen.

§ 226. Das Audion der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie.

1. **Beschreibung.** Dieses Audion wird durch Abb. 446 dargestellt. Das Gerät ist in einen kleinen pultförmigen Eisenkasten eingebaut. Oben auf dem Kasten befinden sich in der Mitte die Röhrenfassung und davor die Fassung für den Eisenwiderstand, durch den dafür gesorgt wird, daß die Temperatur des Glühfadens auch bei Spannungsschwankungen der Heizbatterie konstant bleibt (§ 166₄). Links und rechts oben können an

das Gerät Spulen angesteckt werden, und zwar befinden sich links die Steckbuchsen für die Empfangskopplung, rechts die für die Rückkopplungsspulen. Auf der schrägen Vorderwand sind der Bedienungsriff und die Skale für die Abstimmung angeordnet. An der linken Seite befinden sich der Drehknopf für die Fein-Abstimmung und die Anschlußbuchsen zum Empfänger bzw. für Antenne und Erde, auf der rechten Seite unten die Anschlußbuchsen für zwei Telephone. Auf der Rückseite ist unten das Anschlußkabel für die Heiz- und Anodenspannung herausgeführt.

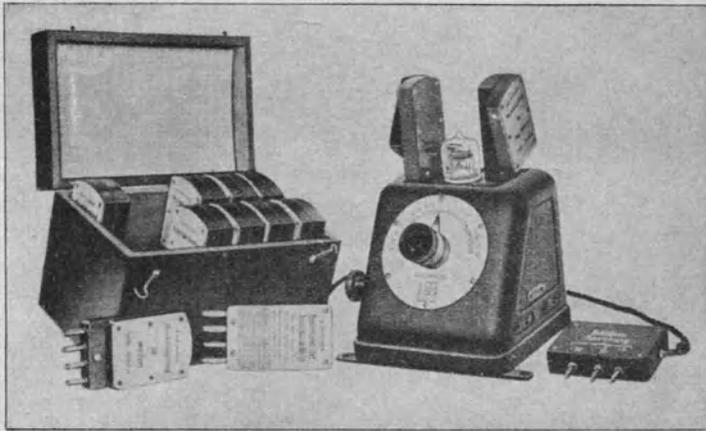


Abb. 446. Audion der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie.

Im Innern des Eisengehäuses sind eingebaut: der Abstimmungskondensator, der Gitterkondensator (C in Abb. 429), der Gitterentladewiderstand (W in Abb. 429), ein Telephontransformator, ein Parallelkondensator zur Anodenbatterie, ein Telephonkondensator und das Gitterpotentiometer (§ 170₄).

Dem Gerät sind in einem Kästchen sechs Spulensätze beigegeben, die, paarweise rechts und links oben in die zugehörigen Anschlußbuchsen eingesteckt, einen Wellenbereich von 300 bis 20 000 m aufzunehmen gestatten. Jeder Spulensatz besteht aus zwei Doppelspulen. Die eine Spule einer jeden Doppelspule ist gegen die andere beweglich und einstellbar, so daß die Kopplung zwischen den beiden Spulen verändert werden kann. Für das Suchen einer Welle ist eine besondere „Kopplung für Suchempfang“ vorhanden, die an Stelle der Empfängerkopplung oben links am Audiongerät eingesteckt wird.

Falls die mit dem Audion aufgenommenen Zeichen nicht stark genug sind, können sie mit einem Niederfrequenzverstärker verstärkt werden.

2. Netzanschlußgerät. Als Energiequellen für Röhrenapparate dienten ursprünglich Akkumulatoren- und Trockenbatterien. Da die Instand-

haltung dieser Stromquellen große Aufmerksamkeit erfordert und Mühe und Zeitverlust veranlaßt, so hat man Netzanschlußgeräte hergestellt, durch die der gesamte Energiebedarf für Heizung und Anodenstrom dem Gleichstromnetz des Schiffes entnommen wird. In diesem Gerät wird die Gleichspannung von 110 bis 220 Volt durch einen Vorschaltwiderstand auf die zur Heizung und Anodenspeisung erforderliche Höhe herabgedrückt. Eine Eisendrossel im Verein mit einem Kondensator hält Spannungsschwankungen am Kollektor von der Heiz- und der Anodenspannung fern. Eine Luftdrossel und ein weiterer Kondensator dienen dazu, etwaige beim Funken des Kollektors entstehende hochfrequente Schwingungen vom Empfänger abzuhalten. Zu diesem Netzanschlußgerät kommen noch Spannungsteiler (Potentiometer), die dazu dienen, die Spannungen der Glühfäden im Audion und den Verstärkerröhren auf die vorgeschriebene Höhe einzustellen.

Audion und Niederfrequenzverstärker können auch wahlweise aus der Notsenderbatterie gespeist werden.

3. Notempfang mit dem Audiongerät. Um einen Empfang auch dann noch zu ermöglichen, wenn sämtliche Audion- und Verstärkerröhren unbrauchbar geworden sind, kann das Audiongerät auch für Detektorempfang eingerichtet werden. Zu diesem Zweck wird an Stelle der Audionröhre ein „Detektorzwischenstück“ in die Röhrenfassung eingestöpselt, der Detektor in die beiden Buchsen des Zwischenstückes eingesetzt und der Eisenwasserstoffwiderstand entfernt.

Bezüglich der Einzelheiten der beschriebenen Geräte sei auf die Spezialbeschreibungen der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie „Das Audiongerät“ und „Das Gleichstromnetzanschlußgerät“ verwiesen. Die Handhabung dieser Geräte läßt sich nur an ihnen selbst erlernen.

§ 227. Mehrrohrenempfänger.

1. Der Empfänger E 360 S der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie. Als Beispiel für einen Mehrrohrenempfänger sei das Vierröhrengerät E 360 S der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie beschrieben. Das Gerät (Abb. 447) ist ähnlich dem einfachen Audion in einen pultförmigen Metallkasten eingebaut. Es enthält ein Audion mit Rückkopplung (Audionröhre A), einen widerstandsgekoppelten zweifachen Niederfrequenzverstärker (Röhren V_I und V_{II}) und einen Überlagerer (Röhre O); mit vollständigem Spulensatz umfaßt es einen Wellenbereich von 300 bis 40 000 m und eignet sich zum Empfang ungedämpfter, modulierter oder gedämpfter Telegraphiesender und von Telephoniesendern.

Der Audionteil entspricht dem einfachen Audion, SA ist die induktive Empfangskopplung, SR die Rückkopplung. Der Abstimmkondensator wird durch den Feinstellknopf FS an der linken Skalenscheibe auf der

schrägen Vorderwand bedient. Darunter befinden sich der Druckknopfschalter *DE* für den Heizstrom und die Telephonbuchsen (*BU*) für den Empfang mit Audion allein (unverstärkt). Zum Aufsuchen einer Station wird an Stelle von *SA* eine besondere Suchkopplung eingestöpselt. Der Heizstromregler *HR* dient zur Einstellung der richtigen Heizstromstärke für alle 4 Röhren.



Abb. 447. 4-Röhrenempfänger E 360 S (Telefunken).

Der Zweifachniederfrequenzverstärker entspricht dem Schalt-schema der Abb. 426; seine Wirkungsweise ist im § 215₄ beschrieben. Bei Gebrauch des Verstärkers ist der Hörer in die Buchsen *BV* einzustöpseln.

Der Überlagerer ist ein rückgekoppeltes Audion mit so fest ein-gestellter Rückkopplung („Dreipunktschaltung“), daß es unter allen Um-ständen sicher Schwingungen erzeugt. Um diese Hilfschwingung jeweils in richtiger Stärke auf den Empfangskreis übertragen zu können, steht die Schwingspule *SO* auf einem drehbaren Spulenhalter *SH*. Der Ab-stimmkondensator *CO* für den Überlagerer wird mittels des Dreh-knopfes *FS'* an der rechten Skalenscheibe eingestellt.

Der Vorteil eines besonderen Überlagerers gegenüber der Überlagerung mit Schwingaudion zeigt sich besonders bei Empfang längerer Wellen und ergibt sich aus folgender Überlegung.

Beim Empfang mit dem Schwingaudion muß der Empfangskreis zum Zwecke der Überlagerung gegen die ankommende Welle verstimmt werden, so daß die Differenz der Schwingungszahlen der Empfangs- und Hilfsschwingung gleich der gewünschten Tonfrequenz ist. Wählt man letztere beispielsweise zu 1000/s, so muß bei einer Empfangswelle von 500 kc/s ($\lambda = 600$ m) die Hilfsschwingung auf 501 kc/s oder 499 kc/s eingestellt werden, entsprechend den Wellenlängen 598,8 oder 601,2 m. In beiden Fällen ist der Empfangskreis noch genügend scharf auf die Empfangswelle abgestimmt. Beträgt die Empfangswelle dagegen 18 500 m ($n = 16,218$ kc/s), so muß das Schwingaudion zur Erzeugung des gleichen Überlagerungstones auf 17,218 oder 15,218 kc/s abgestimmt werden, entsprechend Wellenlängen von 17 424 und 19 714 m. Bei dieser schon beträchtlichen Verstimmung des Empfangskreises gegen die aufzunehmende Welle werden die Zeichen bei der großen Resonanzschärfe ungedämpfter Wellen schon merklich leiser aufgenommen, als wenn das Audion scharf auf die Senderwelle abgestimmt und durch mäßige Rückkopplung entdämpft wird, während gleichzeitig ein besonderer Überlagerer die Hilfsschwingung erzeugt.

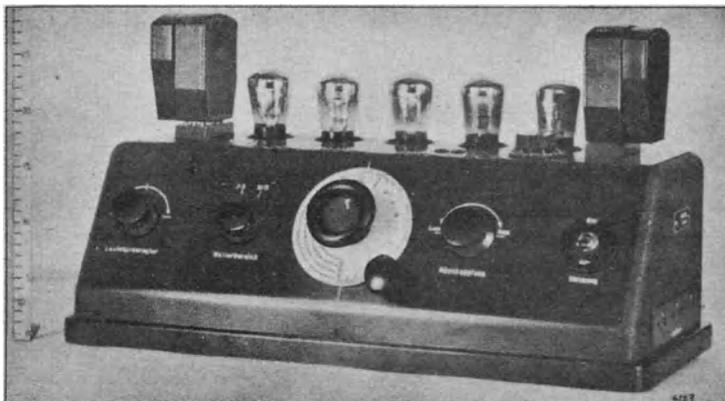


Abb. 448. 5-Röhren-Universalempfänger der C. Lorenz A. G.

2. Anstatt des Audiongeräts mit getrenntem Niederfrequenzverstärker oder des 4-Röhrenempfängers E 360 S baut die Deutsche Betriebsgesellschaft für drahtlose Telegraphie (Debeg) auch den empfindlicheren 5-Röhren-Universalempfänger (Type ERU 129) der C. Lorenz A. G. an Bord ein (Abb. 448).

Das pultförmige Gehäuse enthält einen zweistufigen Hochfrequenzverstärker, das Audion und einen durch Transformatoren gekoppelten zweistufigen Niederfrequenzverstärker. Das links auf der Deckplatte eingestöpselte auswechselbare Spulenpaar ist ein Kopplungstransformator, durch welchen die Schwingungen der (unabgestimmten) Antenne auf den Gitterkreis der ersten Röhre übertragen werden. Von dieser werden die verstärkten Hochfrequenzschwingungen mittels Drosselspule und Blockkondensator zur zweiten Hochfrequenzverstärkerröhre weitergeleitet (siehe § 216₂). Das auswechselbare Spulenpaar rechts auf der Deckplatte dient zur Übertragung der Schwingungsenergie aus der zweiten Röhre auf den Gitterkreis des Audions. Beide Gitterkreise werden gemeinsam mittels der großen Skalenscheibe in der Mitte der schrägen Frontplatte auf die Empfangswelle abgestimmt („Einknopfbedienung“). Das Audion hat kapazitive Rückkopplung, die durch den Drehknopf rechts von der Abstimmsscheibe verändert werden kann. Der Wellenbereichschalter links von der Hauptskale dient zur Auswahl der geeignetsten Drosselspule im Hochfrequenzverstärker. Mittels des Lautstärkereglers können kleine Abweichungen von der günstigsten Abstimmung der beiden Gitterkreise ausgeglichen werden. Die fünf Röhren stehen auf der Deckplatte in der Reihenfolge von links: 2 H. F., 2 N. F., Audion. Ihre Heizspannung wird durch einen gemeinsamen Heizwiderstand mit Drehknopf auf der Deckplatte geregelt, der Heizstrom wird mittels eines Kippschalters ein- und ausgeschaltet. Die Anschlußbuchsen für Antenne, Erde und die Batterien liegen an der Rückseite, die Anschlüsse für die Hörer an der rechten Seite des Geräts. Mit vier Spulensätzen umfaßt der sehr selektive Empfänger einen Wellenbereich von 100 bis 2500 m.

§ 228. Röhrensender für ungedämpfte Wellen.

1. Vorteil ungedämpfter Sender. Es wurde schon mehrfach hervorgehoben, wie wichtig es ist, daß die vom Sender hinausgeschickten Wellenzüge möglichst wenig gedämpft sind. Je geringer die Dämpfung, um so schärfer läßt sich der Empfänger auf den aufzunehmenden Sender abstimmen, um so besser kann man daher die Gegenstation unter einer größeren Menge gleichzeitig sendender Stationen heraushören, ohne von den anderen Sendern gestört zu werden. Die Forderung einer hohen Auswahlmöglichkeit oder Selektivität der Funkgeräte ist um so dringender, je dichter das Netz der Stationen für drahtlose Telegraphie wird.

Hinsichtlich des Senders wird diese Forderung im höchsten Maße erfüllt durch Sender mit ungedämpften Schwingungen. Der erste derartige Sender war der Lichtbogensender von Poulsen, später lernte man, ungedämpfte Wellen unmittelbar durch Hochfrequenzmaschinen zu erzeugen. Solche sind besonders in großen Landstationen wie Nauen

(System Graf Arco) und in Eilvese (System Goldschmidt) in Betrieb. Einen großen Fortschritt stellt der Röhrensender dar, da er auch für mittlere und kleine Stationen ermöglicht, ungedämpfte Schwingungen von beliebiger Frequenz und dabei völlig konstanter Amplitude zu erzeugen.

2. Ein sehr einfacher Röhrensender ist in Abb. 449 dargestellt. Es ist eine Rückkopplungsschaltung nach Abb. 428a, bei welcher der geschlossene Schwingungskreis I durch den offenen Antennenkreis ersetzt ist. Zur Einstellung der günstigsten Antennenankopplung können von der im Antennenkreis liegenden Selbstinduktionsspule L_1 mehr oder weniger Windungen in den Anodenkreis eingeschaltet werden. Dieser geht von der Anodenbatterie B_2 einerseits an die Kathode, andererseits durch einen Teil von L_1 über eine Taste zur Anode. Parallel zur Anodenbatterie B_2 liegt ein größerer Blockkondensator C , über den die Schwingungen ihren Weg nehmen, ohne durch den Widerstand der Batterie B_2 große Verluste zu erleiden. L_2 stellt die im Gitterkreis liegende Rückkopplungsspule dar. Durch stetigen Nachschub von Energie aus der Anodenbatterie werden die Schwingungen in der Antenne auf gleicher Amplitude erhalten (§ 217₉).

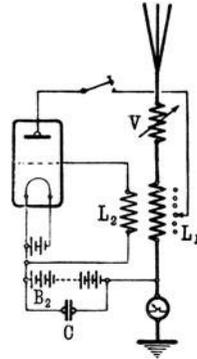


Abb. 449. Einfacher Röhrensender.

3. **Röhrensender mit Zwischenkreis.** Der beschriebene einfachste Röhrensender leidet noch darunter, daß er außer der Grundwelle leicht störende Oberschwingungen entstehen läßt. Sender mit „Zwischenkreis“ sind von diesem Nachteil frei. Sie entsprechen im wesentlichen einer Rückkopplungsschaltung (vgl. Abb. 428a), bei der die Schwingungen in einem geschlossenen Schwingungskreis I, dem „Zwischenkreis“, erregt und dann meist induktiv auf die Antenne übertragen werden.

4. **Fremderregte Röhrensender.** Größere Röhrensender mit Zwischenkreis neigen häufig zu unerwünschten Frequenzschwankungen. Um diesen Fehler zu beseitigen, wendet man heute bei stärkeren Röhrensendern fast stets Fremderregung an. Dabei erzeugt ein kleiner Röhrensender, der „Steuersender“ mittels einer geeigneten Rückkopplungsschaltung in einer Steuerröhre ungedämpfte Schwingungen der gewünschten Frequenz. Die vom Steuersender erzeugte Hochfrequenz-Wechselspannung wird an Gitter und Kathode der eigentlichen Senderöhre gelegt und dient lediglich dazu, deren Anodenstrom zu steuern. Die Senderöhre wirkt dabei als Hochfrequenzverstärker für die vom Steuersender erregten Schwingungen und verstärkt diese so weit, daß die gewünschte Senderleistung erreicht wird. Reicht eine Senderöhre dazu

nicht aus, so werden zwei oder mehrere gleichartige Senderöhren einander parallel geschaltet.

Eine nähere Beschreibung der baulichen Einzelheiten größerer Röhrensender kann hier nicht gegeben werden; es sei nur erwähnt, daß das Tasten der Sender meist durch Beeinflussung der Gitterspannung der Steuer- und Senderöhren geschieht. Als Stromquelle für den Anodenstrom der Röhren verwendet man entweder 500periodigen Wechselstrom, der in einem Transformator hochgespannt und in Glühkathoden-Gleichrichtern (s. § 213) gleichgerichtet wird, oder besser hochgespannten Gleichstrom, der in einer besonderen Gleichstromdynamo erzeugt wird.

Die Röhrensender der Schiffsstationen lassen sich nach einfacher Umschaltung auch als tönende (modulierte) Sender verwenden und sind häufig mit Telephoniegerät ausgestattet.

§ 229. Drahtlose Telephonie.

1. Die drahtlose Telephonie gewinnt auch für mittlere und kleinere Schiffe besonders für den Nahverkehr stetig an Bedeutung. Man unterscheidet dabei folgende drei Betriebsformen:

a) Blindtelephonie: Ein Telephoniesender (Küstenfunkstelle oder Rundfunksender) sendet zu bestimmten bekanntgegebenen Zeiten Nachrichten, die für einen größeren Kreis von Empfängern bestimmt sind, z. B. Wetter- oder Eismnachrichten, Sturmwarnungen u. a. Das empfangende Schiff braucht nur eine Empfangsanlage (Rundfunkempfänger), hat aber keine Möglichkeit, selbst Nachrichten auszusenden.

b) Wechselsprechen: Beide Stationen haben Sender und Empfänger; A spricht, B hört; auf ein verabredetes Zeichen schalten beide ihre Apparate um und nun kann A hören, während B spricht.

c) Gegensprechen. A und B können ohne Umschaltung beliebig sprechen oder hören, wie es beim gewöhnlichen Fernsprechverkehr über Drahtleitungen üblich ist.

Für den gegenseitigen Verkehr der Schiffe untereinander und mit Küstenfunkstellen kommt heute nur das Wechselsprechen in Frage.

2. **Telephoniesender.** Als Telephoniesender kann nur ein Sender dienen, der eine ungedämpfte Trägerwelle konstanter Amplitude zu erzeugen vermag. Diese ungedämpfte Trägerwelle wird im Rhythmus der Schallschwingungen in der Regel durch Beeinflussung der Gitterspannungen moduliert. Die akustischen Schwingungen wirken auf ein Mikrophon; die Mikrophonströme werden auf höhere Spannung transformiert und können dann im einfachsten Falle unmittelbar auf das Gitter der Senderöhre einwirken. Indem die Schwankungen der Gitterspannung verstärkte Schwankungen des Anodenstromes hervorrufen, modulieren sie die Amplituden der Trägerwelle im Rhythmus der Sprachschwingungen. Da die

Besprechung der Senderöhren unmittelbar durch das Mikrophon in den meisten Fällen nicht ausreicht, so werden die Mikrophonströme vielfach zunächst mit Elektronenröhren verstärkt, bevor sie der Senderöhre zugeführt werden.

Als Beispiel für eine neuzeitliche Telephoniestation sei der Röhrensender, Bauart „spez. 215 S“, von Telefunken kurz beschrieben, der für den Fernsprechnahverkehr auf Schiffen bestimmt ist.

Es ist ein fremdgesteuerter Röhrensender mit einem Wellenbereich von 150 bis 330 m und der festen Welle 600 m für den Seenotverkehr. Seine Telegraphiestrichleistung beträgt 120 Watt. Nach Umlegen eines Schalters kann er auch als ungedämpfter oder als modulierter Telegraphiesender benutzt werden. Die Reichweite über freie See wird für Telephonie auf 50 bis 60 sm, für Telegraphie tönend auf 60 bis 80 sm und für Telegraphie ungedämpft auf 200 bis 250 sm angegeben.

Als Stromquelle dient ein vom Schiffsnetz gespeister Umformer, der drei verschiedene Spannungen liefert, und zwar Gleichstrom von 1500 Volt für die Anodenkreise der Senderöhren, Gleichstrom von 14 Volt für die Heizung der Senderöhren und Wechselstrom von 50 Perioden bei 9,5 Volt zur Heizung der Modulationsröhre.

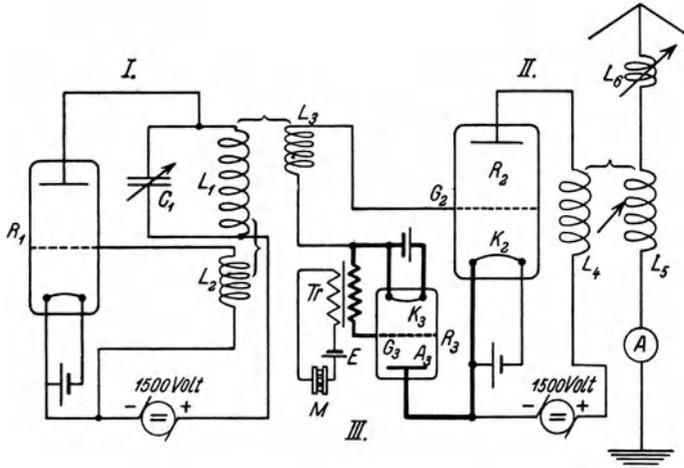


Abb. 450. Telephoniesender.

Der eigentliche Sender, dessen vereinfachtes Schaltschema Abb. 450 zeigt, besteht aus dem Steuersender, dem Leistungsverstärker nebst Antennenteil und dem Modulationsteil.

a) Der Steuersender (I), der die Gleichmäßigkeit der ausgestrahlten Wellenlänge verbürgen soll, ist ein nach Abb. 428a geschalteter einfacher Röhrensender mit Rückkopplung. Im Anodenkreis der Steuerröhre R_1 liegt ein geschlossener Schwingungskreis aus dem Drehkondensator C_1 und der Spule L_1 , im Gitterkreis die mit L_2 gekoppelte Rückkopplungsspule L_2 . Im Kreise $L_1 C_1$ werden durch die Röhre R_1 ungedämpfte Schwingungen konstanter Frequenz und Amplitude erzeugt, deren Frequenz durch Verändern des Drehkondensators C_1 beliebig innerhalb des Wellenbereichs eingestellt werden kann.

b) Der Leistungsverstärker (II). Die Wechselspannung im Kreise $L_1 C_1$ wird durch die Spule L_3 auf die Gitter der beiden parallel geschalteten Senderöhren R_2

übertragen (In Abb. 450 ist der Übersichtlichkeit wegen nur eine Röhre eingezeichnet). Diese wirken lediglich als Hochfrequenzverstärker für die vom Steuerender erzeugten Hochfrequenzschwingungen; deren Spannungsschwankungen steuern den Anodenstrom von R_2 , so daß im Anodenkreis der Hauptsenderöhren ein kräftiger Hochfrequenzstrom entsteht, welcher die gleiche Frequenz besitzt wie die Schwingungen des Steuerenders. Die Schwingungsenergie der Hauptsenderöhren wird durch den Anodentransformator $L_4 L_5$ induktiv auf die Antenne übertragen und von dieser ausgestrahlt. Das Variometer L_6 dient zusammen mit der stufenweise veränderlichen Selbstinduktion L_5 zur Abstimmung der Antenne auf die Sendewelle. Die Abstimmung kann am Antennenamperemeter (A) erkannt werden.

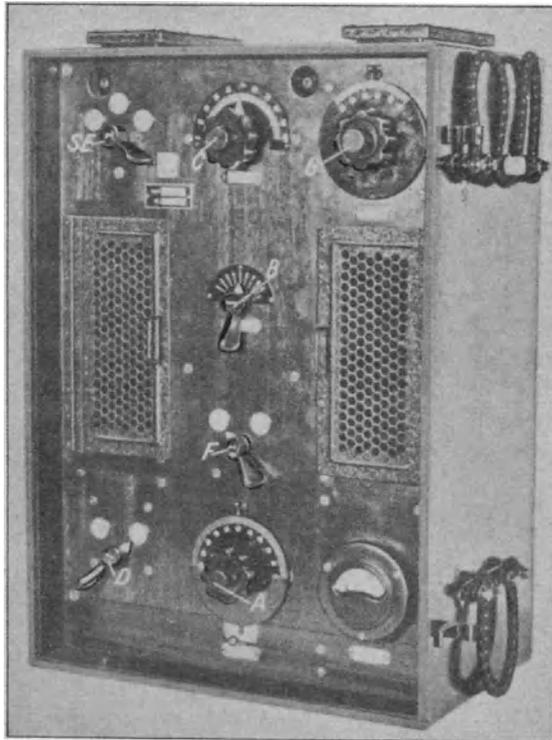


Abb. 451. Röhrensender für Telephonie-Nahverkehr (Telefunken).

c) Modulationsteil (III). Zur Modulation der Hochfrequenzschwingungen dient die von Telefunken entwickelte und bei vielen Rundfunksendern angewendete „Gittergleichstromsteuerung“.

Werden die Gitter der Hauptsenderöhren isoliert, so laden sie sich durch die darauf fliegenden Elektronen ähnlich wie beim Audion immer stärker negativ, so daß der Anodenstrom der Hauptsenderöhren abgedrosselt wird. Legt man in die Leitung vom Gitter G_2 zur Kathode K_2 einen veränderlichen Widerstand, so können diese negativen Gitterladungen mehr oder weniger leicht abfließen. In demselben Maße ändern sich die Amplituden der Schwingungen im Anodenkreis der Senderöhren. Als veränderlicher Widerstand dient die „Modulations-

röhre“ R_3 , deren Kathode K_3 über L_3 mit dem Gitter G_2 der Hauptsenderöhre verbunden ist, während die Anode von R_3 an der Kathode von R_2 liegt. Beeinflusst man den Elektronenstrom in R_3 durch Spannungsschwankungen an G_3 , so erleidet der Anodenstrom der Hauptöhre Amplitudenschwankungen, die diesen proportional sind. Zu diesem Zweck legt man zwischen G_3 und K_3 die Sekundärspule eines Sprechtransformators T_r , dessen Primärspule mit dem Mikrophon M und einer Stromquelle E einen Stromkreis bildet. Bespricht man das Mikrophon M , so werden die Sprechströme in der Sekundärspule von T_r auf höhere Spannung transformiert und steuern den vom Gitter der Hauptsenderöhre R_3 abfließenden Gittergleichstrom und damit auch die Amplitude des Anodenwechselstromes

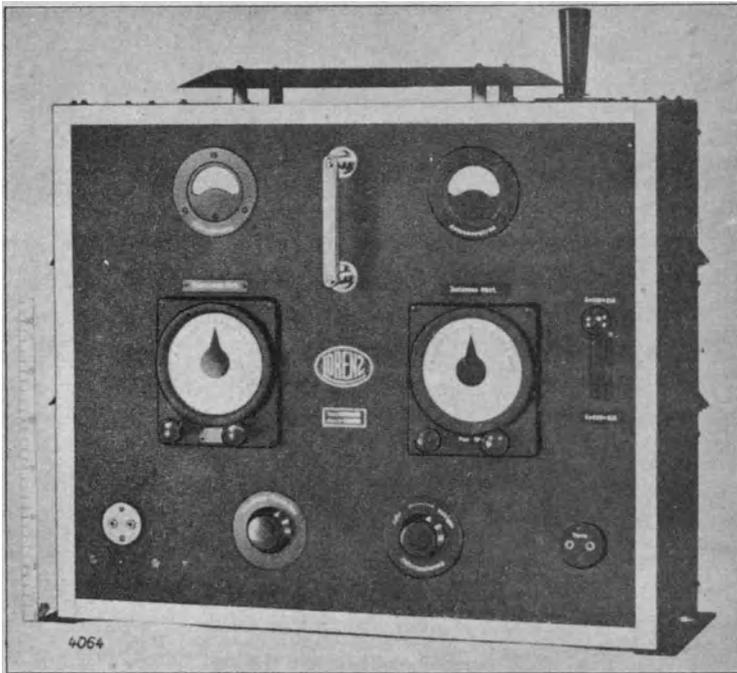


Abb. 452. 200-Watt-Telephoniesender der C. Lorenz A. G.

der Hauptöhren. Auf diese Weise können die in den Hauptsenderöhren verstärkten Schwingungen im Rhythmus der Sprachschwingungen verzerrungsfrei moduliert werden.

Abb. 451 zeigt die Außenansicht des eigentlichen Sendergeräts. Auf der Vorderplatte befinden sich unterhalb der Anschlußbuchsen für Antenne und Erde der Sende-Empfangsumschalter SE , der gleichzeitig als Ausschalter des Senders dient, das Antennenvariometer C und die Antennenankopplung G (L_4 L_6). Darunter liegt ein Stufenschalter B zur Grobabstimmung der Antenne und der Wellenbereichschalter F , mit dem entweder der Bereich 150 bis 330 m oder die Seewelle 600 m eingeschaltet werden kann. Die vier Röhren sind nach Öffnen der beiden durchbrochenen Blechtüren zugänglich. Darunter befindet sich links der Umschalter D für Telephonie, Telegraphie ungedämpft oder Telegraphie moduliert (tönend). Daneben liegt die Skalenscheibe A des Drehkondensators C_1 , an der mittels

Eichkurve die Sendewelle eingestellt wird. Rechts davon ist ein Voltmeter zur Überwachung der Heizspannung der Röhren eingebaut. Soll ungedämpft tonlos telegraphiert werden, so wird der Modulationsteil ausgeschaltet und statt dessen eine Taste in die Gitterleitung der Steuer- und Hauptsenderöhren eingeschaltet; für tönendes Senden kann in diese Tastleitung ein mechanischer Unterbrecher gelegt werden, der eine Tonfrequenz einführt.

Abb. 452 zeigt den 200-Watt-Telephoniesender der C. Lorenz A. G. (Type SR 02 129), der ebenfalls von der Debeg für den Funk-Fernsprechnahverkehr eingebaut wird. Als Stromquelle dient ein Umformeraggregat, bestehend aus einem Gleichstrommotor, der mit einer Doppeldynamo und einer Erregerdynamo gekuppelt ist; die Doppeldynamo liefert an einem Kollektor Gleichstrom von 14 Volt für die Röhrenheizung und am anderen Kollektor Gleichstrom von 1000 Volt für die Anodenspannung der Senderöhren. Der Motor treibt außerdem die Erregerdynamo für 220 Volt Gleichstrom, der zur Felderregung der Doppeldynamo und zur Speisung verschiedener Hilfskreise im Sender dient. Eine besondere Hilfswicklung dieser Maschine erzeugt einen schwachen Wechselstrom von etwa 1000 Hertz zur Tonmodulation der Senderschwingungen, wenn tönend gesandt werden soll. Eine Akkumulatorenbatterie von 12 Volt wird bei Spannungsschwankungen im Netz durch einen automatischen Schalter der Heizdynamo parallel geschaltet, damit die Heizspannung der Senderöhren konstant gehalten werden kann.

Das Sendergerät enthält vier Röhren, eine Steuerröhre, eine Modulationsröhre und zwei parallel geschaltete Hauptsenderöhren. Die Schaltung weicht in einzelnen Punkten von der des Telefunken senders ab. Insbesondere wirkt die Modulationsröhre dabei unmittelbar auf den Anodenstrom des Steuersenders ein (Heising-Schaltung.) Auf der Frontplatte des Senderkastens erkennt man links oben das Voltmeter für die Heizspannung, rechts das Antennenamperemeter; darunter die Abstimmskalen für den Steuersender und das Antennenvariometer, ferner den Wellenbereichumschalter; in der untersten Reihe befinden sich die Anschlußbuchsen für das Mikrophon und die Telegraphiertaste, ferner der Umschalter von Telephonie auf Telegraphie und der Heizregler. Die Reichweite bei Telephonie wird mit 75 bis 100 sm angegeben.

3. Als Empfänger für die modulierten Wellenzüge der drahtlosen Telephonie kann in nicht zu großer Entfernung vom Sender ein Kontakt-detektor dienen; bei größerem Abstand benutzt man Röhrengeräte, z. B. die in § 226 und 227 beschriebenen Apparate. Die Wirkung des Kontakt-detektors wie die des Audions ist gegenüber dem modulierten Wellenzug im wesentlichen dieselbe wie bei den Wellenzügen eines Ton-senders; an die Stelle des Einsetzens und Abklingens der Wellenzüge tritt hier das An- und Abswellen der Amplitude der Trägerwelle.

Die Rückkopplung im Audionkreise muß bei Telephonieempfang vorsichtig eingestellt werden. Bei starker Annäherung an den Schwingungspunkt wird die Sprache wegen zu starker Dämpfungsverminderung leicht unverständlich.

Wird der Schwingungspunkt, der sich im Hörer meist durch ein Knacken bemerkbar macht, überschritten, so strahlt die Empfangsantenne bei den meisten Empfangsgeräten einen Teil der im Audion erzeugten Schwingungen aus. Dadurch können benachbarte Empfänger empfindlich gestört werden.

§ 230. Der Telefunken-Dreikreis-Empfänger.

Der Empfänger E 363 S (Abb. 453) ist ein hochwertiges 6-Röhren-gerät für den Wellenbereich 120—1200 m, das sich durch besonders bequeme Einstellbarkeit („Einknopfbedienung“) auszeichnet. Seine Trennschärfe ist so groß, daß es, gegebenenfalls unter Vorschaltung eines geeigneten Vorsatzgeräts, in Betrieb bleiben kann, während gleichzeitig der eigene Sender arbeitet: es ermöglicht daher Gegensprechverkehr.

Der Dreikreisempfänger enthält zwei abstimmbare, neutralisierte Hochfrequenzstufen, abstimmbares Audion und drei widerstandsgekoppelte Niederfrequenzstufen. Sämtliche Bedienungsgriffe sind an der Vorderplatte, die Anschlüsse für Antenne, Erde und die Stromquellen an der

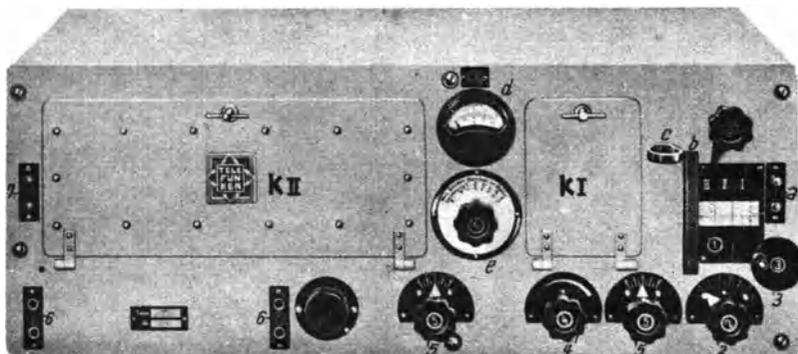


Abb. 453. Telefunken-Dreikreis-Empfänger.

Rückwand des als Störschutz dienenden Metallgehäuses angebracht. Mit dem Druckknopfschalter *a* (Braun 1) wird der Heizstrom und damit das Gerät ein- und ausgeschaltet. Links davon liegt der Stufenschalter mit den Bezeichnungen I, II und III zur Einstellung des gewünschten Wellenbereichs. Da die Drehkondensatoren der drei Abstimmkreise durch eine gemeinsame Achse miteinander gekuppelt sind, können diese mittels des gezahnten Trommelrandes *b* nach einer mitgelieferten Eichkurve gemeinsam abgestimmt werden; dabei dient der Ring *c* als Stütze für die Hand. Die Feineinstellung der Trommel erfolgt durch den Drehknopf 3. Auf der mit Papier überzogenen Trommel können Rufzeichen und Namen der zu empfangenden Stationen eingetragen werden. In der unteren Reihe der Bedienungsknöpfe liegt rechts der Handgriff 2 zur Betätigung der Rückkopplung, ferner der Lautstärkereglер 4, mit dem die Lautstärke ohne Störung der Abstimmung geändert werden kann, und außerdem zwei Knöpfe 5 zum Ausgleich geringfügiger Verschiedenheiten zwischen den Abstimmkreisen. Diese braucht man jedoch meistens nur in besonders

schwierigen Fällen zur Steigerung der Lautstärke und Trennschärfe zu betätigen. In die Klinken-Steckbuchsen 6 werden die mit Klinkensteckern versehenen Hörer eingestöpselt, und zwar ist bei Empfang mit 4 Röhren das rechte Klinkenpaar, bei Empfang mit allen 6 Röhren das linke zu verwenden. Zur Verbesserung der Trennschärfe kann durch Druck auf den schwarzen Knopf bei 7 noch eine „Tonselektion“ eingeschaltet werden. Diese besteht aus einem im Anodenkreis der 1. NF-Röhre liegenden, auf den Ton von 1000 Hertz abgestimmten Schwingungskreise, der Zeichen dieser Tonhöhe besonders gut durchläßt, dagegen Wechselströme, deren Frequenz von 1000 Hertz abweicht, abschwächt.

Beim Empfang von Telephonie muß die Tonselektion wegen der von ihr verursachten Verzerrung der Sprache ausgeschaltet bleiben.

Das Meßgerät *d* mit dem darunter liegenden Umschalter *e* dient zur Messung von Heiz- und Anodenspannungen sowie der Anodenströme der 6 Röhren. Die Heizspannung kann durch einen rechts hinter der Klappe *kI* angebrachten Heizregler auf den vorgeschriebenen Wert von 3,5 Volt eingestellt werden. Die 6 Röhren (R E 144) sind im Innern des Gehäuses hinter den Klappen *kI* und *kII* untergebracht, und zwar befindet sich die 1. HF-Röhre hinter der kleineren Klappe, während die übrigen Röhren hinter der größeren Klappe stehen.

§ 231. Das Auto-Alarm-Gerät.

Um auch solchen Schiffen, deren Funkstation nicht dauernd besetzt ist, jederzeit den Empfang von Seenotrufen zu ermöglichen, hat man besondere Empfänger, „Auto-Alarm-Geräte“ entwickelt. Diese sprechen auf ein dem eigentlichen Notruf vorangehendes Alarmzeichen selbsttätig an und geben dessen Aufnahme dem Funker und der Schiffsleitung durch Alarmglocken zu erkennen. Das im Weltfunkvertrag (1927) festgelegte Alarmsignal besteht aus einer Reihe von 12 Strichen von je 4 Sekunden Dauer mit Zwischenpausen von je 1 Sekunde (Art. 19, § 21) und wird auf der 600 m-Welle gedämpft oder moduliert ausgestrahlt.

Das Auto-Alarmgerät von Telefunken (Abb. 454) umfaßt den in einem Metallkasten 1 eingebauten Empfänger mit Signalwähler-Anlage, den Zusatzkasten 2, die Alarmvorrichtungen 3 und die Stromquellen.

Der an die Bordantenne angeschlossene Empfänger ist ein Sekundärempfänger mit einer Hochfrequenzverstärkerstufe, Audion, 2 Niederfrequenzverstärkerstufen und einem Niederfrequenzgleichrichter zur Betätigung des Empfangsrelais. Die Empfangskreise sind durch Blockkondensatoren unveränderlich auf die Seenotwelle abgestimmt, mit Ausnahme des Antennenkreises, der wegen der Verschiedenheit der Bordantennen durch einen Drehkondensator abstimmbar ist. Dieser kann nach Abschrauben des Deckels *a* eingestellt werden. Durch eine veränderliche induktive

Kopplung zwischen dem Antennenkreis und dem Schwingungskreis der HF-Röhre kann erreicht werden, daß der Apparat auch noch auf die von der Seenotwelle 600 m abweichenden Wellen zwischen 585 und 615 m anspricht, damit auch Notrufe aufgenommen werden, deren Welle um ein geringes vom vorgeschriebenen Werte abweicht. Drehkondensator und Kopplung werden beim Einbau des Geräts eingestellt.

Die vom Empfänger aufgenommenen Zeichen werden nach gehöriger Verstärkung mittels der Gleichrichterröhre in Gleichstromimpulse ver-

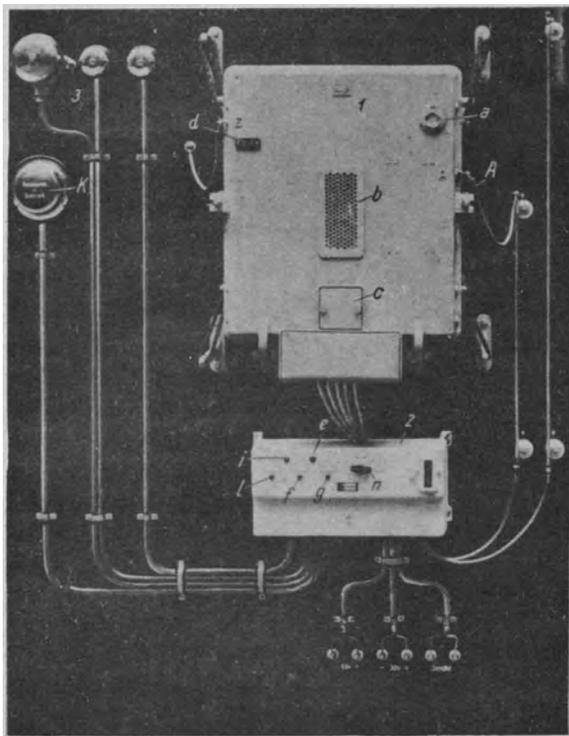


Abb. 454. Auto-Alarm-Gerät von Telefunken.

wandelt und über Empfangsrelais der Signal-Wähleranlage zugeleitet welche die ganze untere Hälfte des Kastens 1 einnimmt. Sie hat den Zweck, aus der großen Zahl der aufgenommenen Morsezeichen und atmosphärischen Störungen die Alarmzeichen auszusieben und nur auf diese die Alarmglocken ansprechen zu lassen. In Gegenden mit lebhaftem Funkverkehr oder starken Luftstörungen ist das keine leichte Aufgabe, die durch eine verwickelte Kombination von zahlreichen Relais und Drehwählern gelöst wird. Eine eingehende Darstellung ihrer Wirkungsweise würde den Rahmen dieser Beschreibung überschreiten.

Der Empfang des Alarmsignals läßt drei Klingeln (3) ertönen, die im Funkraum, in der Kammer des Funkers und auf der Brücke angebracht sind. Gleichzeitig leuchtet das rote Lämpchen *e* am Zusatzkasten 2 auf. Durch Druck auf die Rückstelltaste *f* wird der Alarm wieder abgestellt. Das blaue Lämpchen *i* leuchtet, solange das Gerät eingeschaltet und in Ordnung ist. Eine parallel dazu geschaltete größere blaue Lampe *K* befindet sich auf der Brücke und zeigt durch ihr Leuchten an, daß das Gerät in Betrieb ist.

Mittels eines kleinen Hilfssenders (aus Summerkreis und Taste) kann man das richtige Arbeiten des Geräts jederzeit nachprüfen, indem man die Prüftaste *g* im Rhythmus des Alarmzeichens niederdrückt. Um unnötigen Alarm der Schiffsleitung zu vermeiden, wird während des Prüfens durch Druck auf die Abstelltaste *l* der Wecker auf der Brücke abgeschaltet.

Als Stromquelle für Heizung und Anodenspannung der Röhren sowie für die Relais und Wähler dient ein vom Schiffsnetz angetriebener Umformer, dessen Dynamo eine Spannung von 64 Volt liefert. Diese wird beim Einbau mit einem Widerstand, der unter dem durchbrochenen Deckel *b* liegt, eingestellt.

Als Hilfsspannung zur Kontrolle des Geräts wird die 32 Volt-Notbatterie ebenfalls an das Gerät angeschlossen. Dadurch wird der Weckeralarm ausgelöst, sobald entweder die Betriebsspannung oder die Batteriespannung aus irgendeinem Grunde wegbleibt. Ebenso ertönen die Alarmglocken, wenn eine Röhre oder eine der unter dem Deckel *c* liegenden 5 Wählersicherungen durchbrennt. Doch bleibt in diesem Falle das rote Lämpchen *e* dunkel.

Nach Lösen der beiden seitlichen Flügelmuttern kann die Vorderplatte des Empfängergehäuses so weit nach vorn geklappt werden, daß man die 5 Röhren auswechseln kann.

Das Einschalten des Geräts erfolgt durch Anlassen des Umformers mit einem Druckknopfschalter und Drehen des Schaltergriffs *n*. Dadurch wird gleichzeitig die Antenne eingeschaltet und der Sender durch Unterbrechung der Tastleitung blockiert.

Durch Einstöpseln eines Kopfhörers in die Buchsen *d* kann man sich von dem richtigen Arbeiten des Empfängers und der Röhren überzeugen.

§ 232. Die modulierten Sender von Telefunken.

1. Als Ersatz für die Schiffs-Löschfunkensender hat Telefunken neuerdings zwei tonmodulierte Röhrensender von fast übereinstimmender Bauart entwickelt, und zwar ein Einröhrengerät (Type S 309 S) mit 200 Watt Antennenleistung an Stelle des 0,5 TK-Senders und ein stärkeres

Gerät (Type S 307 S) mit zwei parallel geschalteten Senderöhren und 400 Watt Antennenleistung anstatt des 1,5 TK-Senders. Sie zeichnen sich besonders durch Einfachheit der Bedienung und große Reichweite aus.

2. Wirkungsweise. Beide Sender sind Primärsender mit unabgestimmter induktiver Rückkopplung, die unmittelbar auf den Antennenkreis wirken. Ihr grundsätzliches Schaltbild (Abb. 455) kann aus der Rückkopplungsschaltung der Abb. 428 a hergeleitet werden, indem man darin den Schwingungskreis I durch einen (in Abb. 455 stark ausgezogenen) offenen Kreis L_1, L_2, L_3, A ersetzt.

Die Anodenspannung von etwa 3000 Volt wird von der Sekundärspule des Transformators T geliefert, dessen Primärspule mit 500-periodigem Wechselstrom von 220 Volt Spannung gespeist wird. Dadurch wird in

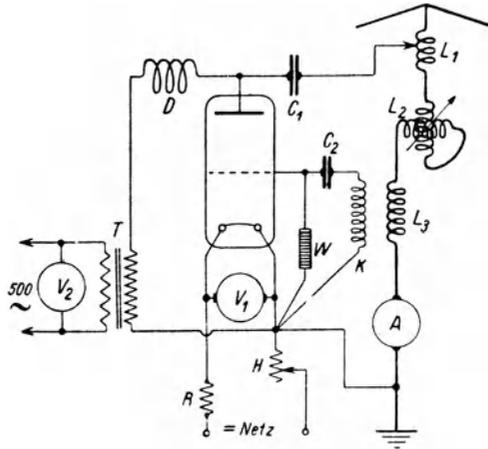


Abb. 455. Schaltbild des tonmodulierten Senders (Telefunken).

der gleichen Weise wie beim modulierten Sender der Debeg (§ 225) die Modulierung der erzeugten Hochfrequenzschwingungen bewirkt. Zwecks Verminderung der durch die hohe Anodenspannung verursachten Gefahren liegt diese unmittelbar an Anode und Kathode der Senderöhre. Dabei verhindert der Sperrkondensator C_1 den Ausgleich der Anodenspannung über die Spulen des Antennenkreises, während die (eisenlose) Hochfrequenzdrossel D die im offenen Schwingungskreis erzeugten Hochfrequenzschwingungen vom Transformator fernhält.

Im Antennenkreis liegen außer der eigentlichen Antenne die Selbstinduktionsspulen L_1 und L_3 , das Variometer L_2 , das Antennen-Ampere-meter A und die Erdung. Durch einen (nicht gezeichneten) Stufenschalter kann die Selbstinduktion verändert werden, so daß zwei Wellenbereiche entstehen. Innerhalb jedes Bereichs wird die gewünschte Welle ausschließlich mit dem Variometer L_2 eingestellt.

Der unabgestimmte Gitterkreis enthält die Rückkopplungsspule K , den Blockkondensator C_2 und den Ableitwiderstand W . C_2 und W dienen zur Herstellung der geeigneten Gitterspannung. Für die gute Ausnutzung der Senderöhre ist es nämlich günstig, wenn das Gitter während der Schwingungserzeugung im Mittel eine negative Spannung gegen die Kathode besitzt. Erhält das Gitter durch K während einer Halbperiode positive Spannung, so nimmt es starke Elektronenladung auf. Der vom



Abb. 456. Einröhrengerät S 309 S (Telefunken).

Gitter zur Kathode abfließende Elektronenstrom (Gitterstrom) erleidet dabei im Widerstand W einen Spannungsabfall, so daß das Gitter negativer bleibt als die Kathode. Der Kondensator C_2 versperrt dem Gittergleichstrom den Weg über die Spule K .

Die Heizung der Röhre geschieht durch Gleichstrom, welcher über einen festen Vorschaltwiderstand R und den Heizregler H aus dem Schiffsnetz entnommen wird.

3. Beschreibung. Beide Sender sind in geerdete Metallkästen eingebaut, die außer R alle im Schaltbild dargestellten Teile enthalten.

Abb. 456 zeigt das Einröhrengerät S 309 S; das Zweiröhrengerät unterscheidet sich davon nur durch die Größe und durch eine abweichende Anordnung der drei Meßgeräte. Die Senderöhre befindet sich hinter der durchbrochenen Scheibe und ist nach Öffnen der Verschlusstür zugänglich. Das Voltmeter V_1 dient zur Überwachung der Heizspannung, welche mittels des Heizreglers H auf den an der Senderöhre angegebenen Wert eingestellt wird. Mit dem Voltmeter V_2 mißt man die Spannung des primären Wechselstromes; sie wird wie beim Tonfunken sender durch Änderung der Erregung der Wechselstrommaschine geregelt. A ist das Amperemeter für den Antennenstrom.

Die Sender haben zwei durch den Handgriff B umschaltbare Wellenbereiche und zwar

Bereich I: $\lambda = 550—700$ m, 546—428 kHz;

Bereich II: $\lambda = 680—850$ m, 441—353 kHz.

Die Abstimmung des Senders erfolgt nach Einschaltung des Wellenbereichs lediglich durch Drehung des Antennen-Variometers mittels des Handrades E . Da keine variable Kopplung benutzt wird, und der Sender unmittelbar auf den Luftdraht wirkt, ist die Einstellung auf Höchstausschlag am Antennenamperemeter nicht mehr nötig. Die Wellen 600, 660, 705, 730 und 800 m sind dabei durch Wellenmarken gekennzeichnet, welche beim Einbau des Senders an den entsprechenden Punkten der Gradskala festgeklemmt werden. Zur Nachprüfung der ausgestrahlten Welle wird ein Wellenmesser beigegeben.

Beim Öffnen der Sendertür wird die primäre Wechselspannung durch einen doppelpoligen Schalter selbsttätig vom Transformator abgeschaltet. Dadurch wird eine Berührung Hochspannung führender Teile unmöglich gemacht.

Im Senderkasten eingebaute, unmittelbar an das Schiffsnetz angeschlossene Glühlampen sollen Feuchtigkeitsniederschläge im Innern des Gehäuses und damit eine Verschlechterung der Isolation verhindern.

Die Schalttafel mit Sicherungen, Schalter und Meßgeräten, sowie der Umformer nebst Anlasser, Tourenregler und Erregerwiderstand entsprechen der beim Tonsender beschriebenen Anordnung.

Übungsaufgaben.

VI. Elektrizität.

§ 162 (Ampèresche Regel).

1. Auf einem Schiffe geht ein Kabel längsschiffs unter dem Kompaß hin. Welchen Einfluß kann dieses Kabel auf den Kompaß ausüben, wenn in ihm positiver Strom von hinten nach vorn geleitet wird, der durch den Schiffskörper zur Maschine zurückkehrt? Auf welchen Kursen sind die Ablenkungen am größten, welches Vorzeichen haben sie? Auf welchen Kursen wird die Feldstärke beeinflusst und in welchem Sinne? Wie verhält sich — bei derselben Stromstärke — die Größe der Ablenkung auf den verschiedenen magnetischen Breiten? Wodurch kann man den Einfluß der stromführenden Kabel auf den Kompaß ausschalten?
2. Dieselbe Aufgabe für den Fall, daß der positive Strom unter der Brücke von St. B. nach B. B. hinübergeführt ist.

§ 166 (Widerstand).

3. Wie groß ist der Widerstand w eines Kupferdrahtes von 75 m Länge und 2 qmm Querschnitt?
4. Ebenso: eines Kupferdrahtes von 200 m Länge und 0,6 qmm Querschnitt?
5. Ebenso: eines Eisendrahtes von denselben Abmessungen?
6. Ebenso: eines Kupferdrahtes von 350 m Länge und 1 mm Durchmesser?
7. Ebenso: einer 50 km langen Telegraphenleitung aus Eisendraht von 3 mm Dicke?
8. Ein Kupferdraht von 75 m Länge und 2 qmm Querschnitt und ein solcher von 25 m Länge und 1 qmm Querschnitt werden hintereinander geschaltet. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?
9. Welchen Querschnitt muß man einer 800 m langen Kupferdrahtleitung mindestens geben, wenn ihr Widerstand nicht mehr als $1,5 \Omega$ betragen soll?
10. Wie lang ist ein 1 mm dicker Kupferdraht von 1Ω Widerstand?
11. Wie lang muß ein 3 qmm starker Nickelindraht gewählt werden, wenn er 10Ω Widerstand haben soll?
12. Welcher Querschnitt ist einer Eisendrahtleitung zu geben, die eine 5 qmm starke Kupferleitung ersetzen soll, so daß der Widerstand derselbe ist?
13. 10 Kohlefadenlampen von je 220Ω Widerstand werden parallel geschaltet. Welchen Widerstand hat diese Stromverzweigung?

§ 167 und 169 (Ohmsches Gesetz).

14. Eine Lampe von 120Ω Widerstand wird an ein Netz von $+110$ Volt und 0 Volt Spannung gelegt. Welcher Strom fließt?
15. Eine Lichtleitung von 110 Volt ist für 10 Amp. gesichert. Darf man einen 450 m langen Eisendraht von 2 mm Durchmesser einschalten? Darf man einen Kupferdraht von denselben Dimensionen einschalten?

16. Eine Glühlampe verbraucht bei 110 Volt Spannung einen Strom von 0,9 Amp. Welchen Widerstand hat der Glühfaden?
17. Ebenso: bei $e = 100$ Volt, $i = 0,45$ Amp.
18. Ebenso: bei $e = 220$ Volt, $i = 0,9$ Amp.
19. Eine Dynamomaschine treibt einen in einiger Entfernung aufgestellten Motor. Die Stromstärke beträgt 24 Amp. Die Dynamo hat eine Klemmenspannung von 110 Volt. Wie groß ist die Klemmenspannung am Motor, wenn das Verbindungskabel (Hin- und Rückleitung zusammen) einen Widerstand von $0,16 \Omega$ besitzt.
20. Welchen Spannungsverlust hat man in einem 1 km langen Kupferkabel von 8 qmm Querschnitt bei einer Stromstärke von 10 Amp.? Wie groß ist der Spannungsverlust bei einer Eisenleitung von denselben Dimensionen?
21. Zwei Widerstände $AC = w_1 = 25 \Omega$ und $CB = w_2 = 30 \Omega$ sind hintereinander geschaltet. A wird an $+110$ Volt, B an die Spannung 0 gelegt. Welcher Strom fließt und welche Spannung ist in C vorhanden?
22. Ebenso: $w_1 = 3,3 \Omega$, $w_2 = 0,5 \Omega$, A auf der Spannung 0, B auf -114 Volt.
23. Entsprechend: $AC = w_1 = 10 \Omega$, $CD = w_2 = 40 \Omega$, $DB = w_3 = 25 \Omega$. A auf $+112$ Volt, B auf -112 Volt.
24. Ein Element von der EMK 1,8 Volt und dem inneren Widerstand $0,2 \Omega$ wird durch einen Draht von $2,8 \Omega$ geschlossen. Welche Stromstärke erhält man?
25. Ein Element mit dem inneren Widerstand $0,1 \Omega$, durch einen Draht von $1,4 \Omega$ Widerstand geschlossen, liefert eine Stromstärke von 0,8 Amp. Wie groß ist die EMK?
26. Ein Akkumulator von der EMK 2,15 Volt, durch einen äußeren Widerstand von $0,55 \Omega$ geschlossen, liefert eine Stromstärke von 3,2 Amp. Wie groß ist sein innerer Widerstand?
27. Welche Stromstärke entsteht, wenn 24 Elemente, deren jedes eine EMK 1 Volt und einen inneren Widerstand $w_i = 0,2 \Omega$ hat, bei einem äußeren Widerstand $w_a = 0,3 \Omega$ a) zu 24 in Reihe, b) zu 12 in Reihe und die beiden Reihen parallel, c) zu 8 in Reihe und die drei Reihen parallel usf. geschaltet werden?
28. Ein Voltaelement hat eine EMK von 1,05 Volt und einen inneren Widerstand $w_i = 0,1 \Omega$. Welche Stromstärke erhält man, wenn man das Element durch einen Widerstand $w_a = 1,4 \Omega$ schließt? Wie groß ist in diesem Falle die Klemmenspannung?
29. Ebenso: Akkumulatorzelle; EMK = 2,05 Volt, $w_i = 0,05 \Omega$, $w_a = 1,25 \Omega$.
30. Ebenso: Element mit der EMK = 1,50 Volt, $w_i = 0,2 \Omega$, der äußere Widerstand beträgt nacheinander $\alpha) 9,8 \Omega$, $\beta) 1,8 \Omega$, $\gamma) 0,3 \Omega$, $\delta) 0,0 \Omega$ (Kurzschluß).

§ 170 (Stromverzweigung).

31. Wie groß ist der Widerstand einer Verzweigung von zwei Drähten von 2,4 und $3,6 \Omega$ Widerstand?
32. Drei Drähte haben die Widerstände 3Ω , 5Ω und 8Ω . Wie groß ist der Widerstand, wenn man sie a) hintereinander, b) parallel schaltet?
33. Ein Strom von $i = 8$ Amp. fließt durch zwei parallel geschaltete Drähte von 4 und 6Ω Widerstand. Welche Stromstärke fließt in jedem der Zweige?
34. Ebenso: $i = 32$ Amp. Verteilung auf drei Zweige von $0,5 \Omega$, $0,6 \Omega$ und $0,9 \Omega$ Widerstand.

§ 174, 175 (Elektrische Leistung und Arbeit).

35. Welche elektrische Leistung wird einem Motor zugeführt, der bei einer Spannung von 110 Volt mit 32 Amp. läuft?

36. Welche Leistung wird in einem Ballastwiderstand von 5Ω vernichtet bei einer Stromstärke von 12 Amp.?
37. Wieviel kostet der zehnstündige Betrieb einer Glühlampe, die bei $e = 110$ Volt Spannung die Stromstärke $i = 0,3$ Amp. verbraucht, wenn die kW-Stunde mit 0,60 $\mathcal{R}\mathcal{M}$ berechnet wird?
38. Ebenso der monatliche Betrieb bei täglich achtstündiger Brenndauer, wenn $e = 220$ Volt, $i = 0,9$ Amp. und 1 kW-Stunde = 45 $\mathcal{R}\mathcal{M}$.
39. Wieviel PS muß eine Dampfmaschine zum Antrieb einer Dynamo leisten, wenn letztere bei einem Wirkungsgrad von 80 % 120 Glühlampen von je 0,3 Amp. Stromverbrauch und 110 Volt Spannung speisen soll?
40. Eine Dampfmaschine leistet 35 PS. Wie groß ist die Leistung in Kilowatt?
41. Die Nutzleistung eines Motors beträgt 10 kW. Wie groß ist die Leistung in PS?
42. Wieviel Kalorien entwickelt ein Tauchsieder bei 114 Volt und 1,8 Amp. Stromverbrauch in 5 Minuten?
43. Welche Wärmemenge wird stündlich in einem Widerstand entwickelt, der eine Leistung von 1500 Watt vernichtet?

§ 203, 204 (Funkentelegraphie). Thomsonsche Formel.

44. Welche Schwingungsdauer und welche Frequenz haben die Schwingungen eines Schwingungskreises, dessen Kapazität $C = 0,5$ MF und dessen Selbstinduktion $L = 0,2$ Henry beträgt?
45. Desgl.: $C = 7 \cdot 10^{-3}$ MF; $L = 1/5000$ Henry.
46. Welche Kapazität ist nötig, um mit einer Selbstinduktionsspule von 0,01 Henry einen Schwingungskreis von der Frequenz 600 Hertz zu bilden?
47. Welche Selbstinduktion hat eine Spule, welche mit einem Kondensator von 0,25 MF einen Schwingungskreis von der Frequenz 960 Hertz bildet?
48. Zur Messung der Selbstinduktion einer Spule L_2 vereinigt man sie mit einer Kapazität von $45 \cdot 10^{-5}$ MF und bekommt Resonanz mit einem Primärkreise (Abb. 397). Man ersetzt nun L_2 durch eine Spule von 10^{-4} Henry und erhält nun Resonanz bei 0,000 62 MF. Wie groß ist die Selbstinduktion von L_2 ?
49. Im Resonanzfall ist $C_1 = 56 \cdot 10^{-4}$ MF, $C_2 = 37 \cdot 10^{-4}$ MF, $L_1 = 0,002$ Henry. Wie groß ist L_2 ?
50. Desgl.: $C_1 = 2560$ cm, $L_1 = 39\,500$ cm, $C_2 = 980$ cm.

Sachregister.

- Abreißrelais** 362.
Abstimmung von Schwingungskreisen 322.
Akkumulatoren 289.
Akkumulatorgrundversuch 253.
Ampere 252.
Ampèresche Regel 254.
Amperemeter 271.
Amperewindungszahl 257.
Anlasser 301.
Anode 251.
Anodenbatterie 339.
Anodenspannung 344.
Antennen 328, 333, 335, 364.
Anziehung, elektrische 235.
Aperiodischer Kreis 324.
Arbeit, elektrische 275.
Audion 350, 373.
Ausgangstransformator 345.
Autoalarm 386.
- Batterie, galvanische** 249.
Blitz 245; **Blitzableiter** 246.
Blockkondensator 308.
Bogenlampe 292.
Braunsche Rahmenantenne 335.
Braunscher Sender und Empfänger 356.
- Chemische Wirkung des elektrischen Stromes** 251.
Coulomb, Einheit der Elektrizitätsmenge 235.
Coulombsches Gesetz für Elektrizitätsmengen 235.
— — für **Magnetpole** 223.
- Dämpfung elektrischer Schwingungen** 319.
Dämpfungsverminderung 352.
Detektoren 323, 250.
Dielektrikum 242.
Direkte Kopplung 322.
Drehfeld 311.
Dreikreisempfänger 385.
Drehspulstrommesser 260.
- Drehstrom** 310.
Drosselkopplung 347.
Drosselspulen 306.
Dynamoelektrisches Prinzip 296.
Dynamomaschinen 294.
- Effekt des elektrischen Stromes** 274.
Effektive Stromstärke, Spannung 304.
Eingangstransformator 345.
Einheit der Elektrizitätsmenge 235.
Elektrische Grunderscheinungen 230.
Elektrisches Feld 235.
Elektriermaschinen 239.
Elektrizität, atmosphärische 245.
Elektrizitätsmenge 235.
Elektrolyse 251.
Elektromagnetische Wellen 329.
Elektromagnetismus 256.
Elektromotoren 300.
Elektromotorische Kraft 248.
— — durch **Induktion** 250.
Elektronen 231, 246, 337.
Elektronenemission 337.
Elektronenröhre 337 u. f.
Elektronenströme 246.
Elektroskop 232.
Elemente, galvanische 247.
Ersatzwiderstand 269.
- Farad** 240.
Feld, elektrisches 235.
—, **elektromagnetisches** 331.
—, **magnetisches** 226.
Feldstärke, magnetische 227.
—, **elektrische** 235.
Frequenz bei Wechselstrom 295, 304.
Funkentelegraphie 314.
- Galvanische Elemente** 247.
— **Versilberung** usw. 252.
Galvanometer, Galvanoskop 256.
Galvanoplastik 252.
Gegenelektromotorische Kraft 300.

Gewitter 245.
 Gitter in der Elektronenröhre 341.
 Gleichrichter 340.
 Gleichstrom-Dynamo 295.
 — - Elektromotore 300.
 Glühkathode 338.
 Glühlampen 291.
Henry 283.
 Hitzdrahtstrommesser 251.
 Hochfrequenzschwingungen, Arten 354.
 Hochfrequenzsicherungen 308, 363.
 Hochfrequenzverstärkung 347.
 Hysteresis 257.
Induktion, magnetische 224.
 Induktionsströme 276.
 Induktive Kopplung 321.
 Induktiver Widerstand 306.
 Induktor 283.
 Influenz, elektrische 233.
 Ionisation der Luft 332.
Kapazität, elektrische 240.
 — im Wechselstromkreis 307.
 Kapazitiver Widerstand 308.
 Kathode 251; Kathodenröhre 337 u. f.
 Kilowattstunde 275.
 Klingel, elektrische 258.
 Koerzitivkraft 224.
 Kollektor 295.
 Kondensator, elektrischer 241.
 Kondensatorkreis 315 u. f.
 Kontaktdetektoren 323.
 Kopplung, direkte 322.
 —, elektrische (kapazitive) 322.
 —, feste und lose 323.
 —, magnetische (induktive) 321.
 Korrosion 249.
 Kraft, elektromotorische 248.
 Kraftlinien, magnetische, einer Drahtspule 255.
 —, —, eines Magnets 226.
 —, —, um elektrischen Strom 254.
 Kurzschluß 268.
 Kurzschlußanker 312.
Leidener Flasche 241.
 Leistung, elektrische 274.
 — des Wechselstroms 309.
 Leitfähigkeit, Widerstand 261.
 Leitungen, elektrische 286.
 Lenzsche Regel 277.

Lichtbogen 292, 293.
 Löschfunken 358.
 Lufterktrizität 245.
Magnetische Kopplung 321.
 — Wirkungen des elektrischen Stromes 254.
 Mehrröhrenempfänger 375.
 Membransender 286.
 Meßbereich von Strom- und Spannungsmessern 272.
 Meßbrücke 273.
 Mikrophon 284.
 Modulierter Sender 369 u. f., 388.
 Molekularmagnete 225.
Netzanschlußgerät 374.
 Niederfrequenzverstärkung 344.
 Notsender 366.
Ohmsches Gesetz 261.
 — — für den ganzen Stromkreis 266.
 — — für einzelne Leiterstücke 264.
 Oszillator, offener 326.
 Oszillatorische Entladung 315.
 Oszillograph 305.
Phasenverschiebung 307, 308.
 Polklemmenspannung 267.
 Potentiometerschaltung 270.
Rahmenantenne 335.
 Rechte-Hand-Regel für Magnetpol 254.
 — für den Stromleiter 260.
 — für Induktionsströme 277.
 Resonanz von Kondensatorkreisen 322.
 Richtempfänger 335.
 Röhrensender 369, 378 u. f.
 Rotor — Stator 312.
 Rückkopplung 348, 352.
 Rückstrahlung einer Hochantenne 334.
 — einer Schleife 336.
Schalter 288.
 Schaltung der Elemente 249, 267.
 — der Kondensatoren 244.
 — der Strom- und Spannungsmesser 273.
 — der Stromverbraucher 270.
 Schlagweiten 239.
 Schwebungsempfang 353.
 Schwimmregel, Ampèresche 254.
 Schwingungen, elektrische 314.
 Schwingungskreis, Thomsonscher 316.
 —, offener 326.

- Selbstinduktion 281.
 — im Wechselstromkreis 305.
 Selbstinduktionskoeffizient 283.
 Sicherungen 287; Hochfrequenz- 308, 363.
 Spannung, elektrische 238.
 Spannungsabfall 247, 264.
 Spannungsreihe 248.
 Spannungsteilung 270.
 Sperrkondensatoren 308.
 Spezifischer Widerstand 261.
 Spitzenwirkung, elektrische 238.
 Stator — Rotor 312.
 Stoßerregung 359.
 Strom, elektrischer 246.
 Stromverzweigung 268.
- T**elegraph, elektromagnetischer 258.
 Telephon 285.
 Telephonempfang 324.
 Telephonie, drahtlose 355, 380.
 Thomsonsche Formel 318.
 Tonsender 258 u. f.
 Tönende Funken 259.
 Tourenregulator 300.
 Transformator 312.
 — - Grundversuch 279.
 Trommelanker 296.
- Ü**berlagerungsempfang 353.
 Umformeraggregat 362.
 Umformung elektrischer Ströme 312.
- V**ariometer 283.
 Ventilwirkung der Elektronenröhre 340.
 Verstärker, Nieder- und Hochfrequenz-
 344 u. f.
 Volt 238, 264.
 Voltmeter 253.
 Voltmeter, statische 232, 238.
 —, technische 248, 272.
- W**ärmeäquivalent 276.
 Wärmewirkung des elektrischen Stromes
 250.
 Wasserzersetzung 251.
 Watt, Wattsekunde 275.
 Wattloser Strom 310.
 Wechselstrom 302.
 — - Widerstand 306.
 Weicheisenstrommesser 259.
 Wellen, elektromagnetische 329.
 Wellenbereiche 332.
 Wellenmesser 325.
 Wheatstonesche Brücke 273.
 Widerstand, elektrischer 261.
 —, —, äußerer und innerer 266.
 Widerstandskopplung 346.
 Widerstandsmessung 273.
 Wiensche Stoßerregung 321.
 Wirbelströme 280.
- Z**weiwelligkeit 358.
 Zwischenkreis 357, 379.