Experimentelle Einführung in die Radiotechnik

Autor(en): **Knup, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahrbuch der Sekundarlehrerkonferenz des Kantons Zürich**

Band (Jahr): **- (1932)**

PDF erstellt am: **27.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-819482

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

EXPERIMENTELLE EINFÜHRUNG IN DIE RADIOTECHNIK

Experimentelle Einführung in die Radiotechnik

von E. Knup, Romanshorn

Radio in Schule und Leben

Mehr als eine andere Erfindung erscheint Radio dem Laien als ein unfaßbares Wunder. Und doch handelt es sich hier, wie bei andern technischen Errungenschaften, um nichts anderes als um die praktische Auswertung längst bekannter Naturkräfte und physikalischer Erscheinungen. Wie man, um die Dampfmaschine zu erklären, damit beginnen muß, die Wirkung des gespannten Dampfes zu zeigen, so kommt es im Radiovortrag oder Radiolehrkurs darauf an, die grundlegenden Vorgänge der drahtlosen Energieübertragung durch das Experiment zu vermitteln.

Radio ist deshalb etwas schwer zugänglich, weil der Mensch kein Sinnesorgan besitzt für das, was der Physiker Radiowellen oder Radiostrahlen nennt. Während wir Lichtstrahlen sehen und Schallwellen hören, sind wir in Bezug auf Radiostrahlen absolut blind und taub. In keinem physikalischen Lehrgebiet sind wir in dem Maße darauf angewiesen, durch das Experiment der schwachen Vorstellungskraft des Menschen nachzuhelfen wie im Radio. Welches auch der methodische Weg sei, immer bilde das Experiment die solide Grundlage für den Gedankenaufbau. Die vorliegende Arbeit, welche aus langjähriger Lehr- und Vortragstätigkeit herausgewachsen ist, möchte dazu ermuntern, Radio nicht nur in öffentlichen Vorträgen zu behandeln, sondern auch in der Schule in einem seiner Bedeutung angemessenen Umfange zu lehren. Nicht um zu der bereits übergroßen Zahl von Schulfächern ein weiteres hinzuzufügen und den überlasteten Lehrplan noch mehr

zu belasten. Die Berücksichtigung der neuen Erfindung bedeutet meines Erachtens weniger eine Vermehrung als eine zeitgemäße Neuorientierung des physikalischen Lehrstoffes. Für die Schüler, welche mit den Elementen der Physik vertraut sind, ist Radio nicht schwerer verständlich als zum Beispiel der Drehstromgenerator. Das unmittelbare Interesse, welches die Jugend der Sache entgegenbringt, sichert zum voraus einen guten Erfolg und wirkt befruchtend auf den gesamten Naturlehreunterricht.

Elektro-Akustik

Bevor man an die Behandlung der drahtlosen Telephonie denken kann, muß Klarheit geschaffen werden über die akustischen und elektrischen Vorgänge, welche sich beim Telephonieren mit einfachsten Apparaten abspielen. Es handelt sich hiebei um zwei Erscheinungen, von denen die eine die Umkehrung der andern ist:

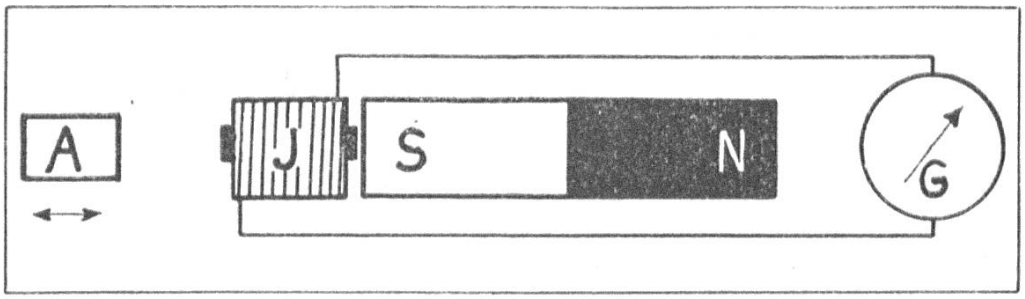

Fig. 1. Umwandlung von mechanischen Schwingungen in Wechselstrom.

N-S Stahlmagnet. J Induktionsspule.
G Galvanometer. A Anker aus weichem Eisen.

Grundversuch Fig. 1. Magnetische Kraftlinien nehmen ihren Weg lieber durch Eisen als durch Luft. Ein Eisenkern, der im Felde eines Stahlmagneten bewegt wird, ändert den Kraftlinienverlauf. Die Linien schneiden die Windungen der dem Stahlmagneten aufgesetzten Spule und induzieren darin Stromstöße, welche das Galvanometer anzeigt. Eine Hin- und Her-

bewegung des Eisenstückes erzeugt eine Periode Wechselstrom. Die in Fig. 1 dargestellte Apparatur ist ein Wechselstromgenerator in primitivster Ausführung.

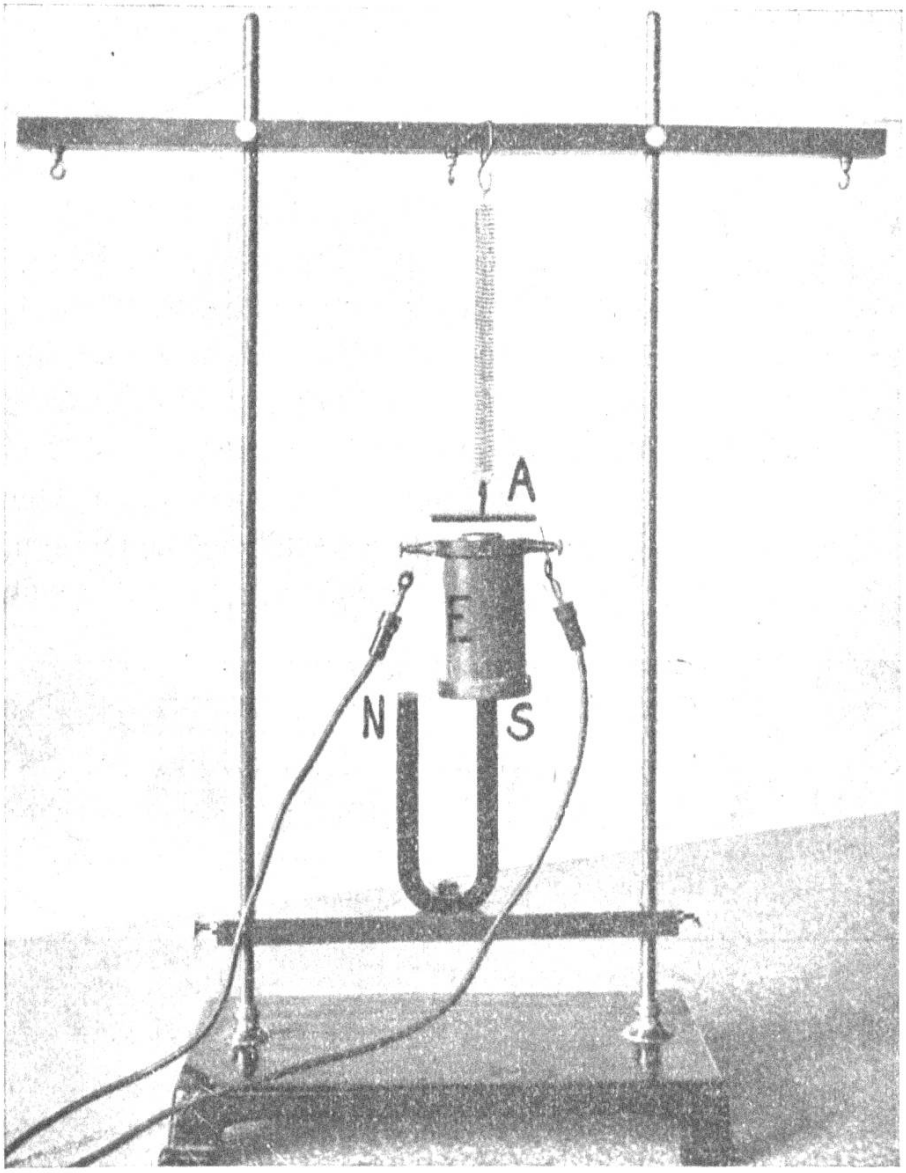

Fig. 2. Umwandlung von Wechselstrom in mechanische Schwingungen.

N-S Stahlmagnet. E Elektromagnet. A Anker, federnd aufgehängt.

Grundversuch Fig. 2. Die Spule E sei zunächst stromlos und somit ohne magnetische Wirkung. Der eine Pol des Stahlmagneten, dessen Kraft durch den Eisenkern der Spule hindurch wirkt, übt einen Zug aus auf den federnd aufgehängten

Eisenanker. Nun verbinden wir die Spule mit den Polen einer Batterie. Ein Gleichstromstoß in der einen Richtung verstärkt das Feld des Stahlmagneten, der Anker wird stärker angezogen. Ein Stromstoß in umgekehrter Richtung schwächt das magnetische Feld, der Anker wird losgelassen. Hierauf speisen wir die Spule mit Wechselstrom, also mit Strom wechselnder Richtung. Jede Periode schwächt und verstärkt das Feld des Stahlmagneten, der Anker sollte sich im Takte des Wechselstroms auf und ab bewegen. Er erweist sich jedoch als zu träge, um der Frequenz 50 unseres Netzstromes zu folgen. Wir ersetzen ihn durch eine Telephonmembran, die wir so auflegen, daß zwischen Spulenkern und Membran etwa 1 mm Abstand bleibt. Die Membran gibt die Schwingungszahl 50 als tiefen Ton wieder. Ein Wechselstrom von der Frequenz 435 würde den Ton a' von der Schwingungszahl 435 erzeugen. Den gewünschten Strom liefert ein Generator, bestehend aus Stimmgabel und Telephonhörer (Fig. 3). Der induzierte Strom betätigt die

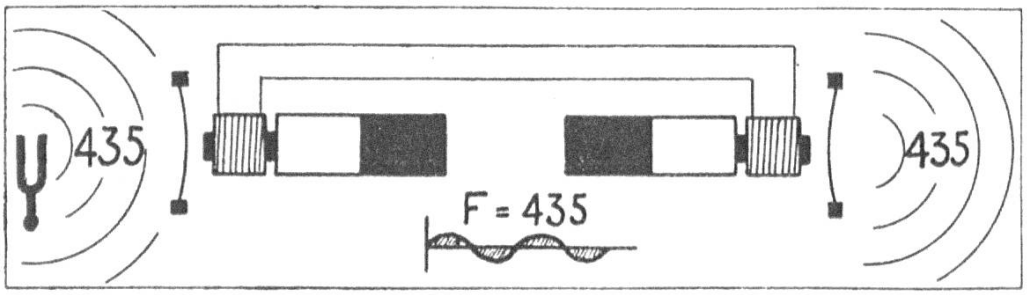

Fig. 3. Einfacher Telephonieversuch.
435 Schallwellen pro Sekunde erzeugen
435 Perioden Wechselstrom erzeugen
435 Schallwellen pro Sekunde.

Membran eines zweiten Telephonhörers. Wir können telephonieren. Allerdings nicht auf weite Entfernung, denn der erzeugte Strom ist zu schwach, um einen größeren Leitungswiderstand zu überwinden. Das Telephonieren auf größere Distanz gelingt, wenn wir die schwachen elektrischen Schwingungen einem stärkeren Boten aufladen. Als Träger dient der Strom einer Batterie (Fig. 4), dem der Sprechstrom mit Hilfe des Mikrophons überlagert wird. Bei unbesprochenem Mikrophon fließt ein ruhiger Gleichstrom durch Fernleitung und Empfangsapparatur,

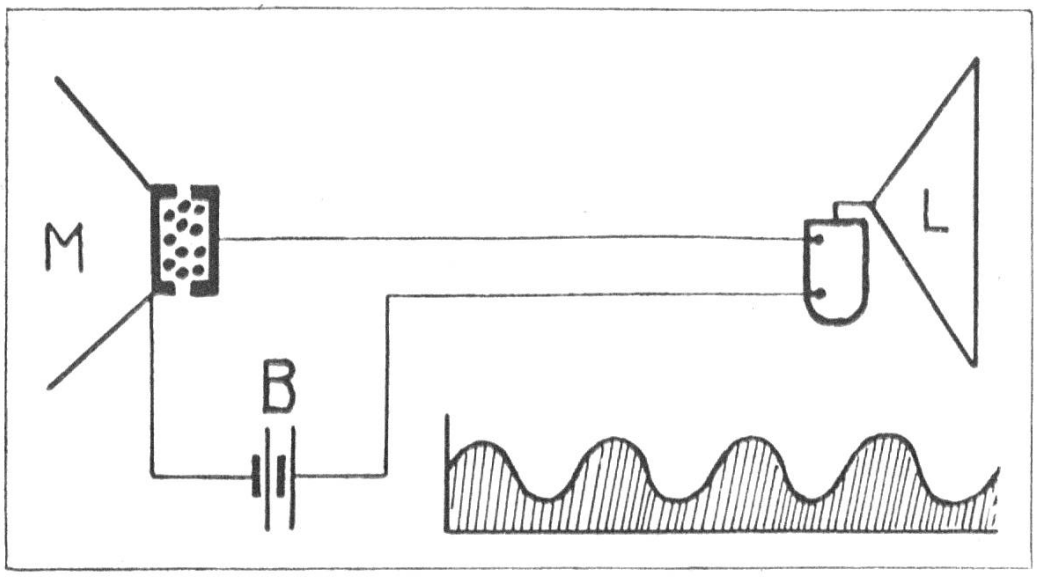

Fig. 4. Modulation des Trägerstromes durch Schallwellen.
M Mikrophon. B Batterie. L Lautsprecher.

die Membran des Telephonhörers oder Lautsprechers bleibt gleichmäßig gespannt. Wird das Mikrophon besprochen, so erzeugen die Schallwellen Kontaktschwankungen, welche die Stromstärke verändern, der Wellenstrom bewegt die Membran, welche die Stromschwankungen in Schallwellen umwandelt und hörbar macht. Für Demonstrationsversuche eignet sich der Lautsprecher besser als der Telephonhörer.

Pic-Up und Lautsprecher

In Fig. 3 ist die Uebertragung des Tones a′ von der Schwingungszahl 435 dargestellt. Ebenso läßt sich irgend ein Musikstück als Summe von Einzeltönen telephonieren. An Stelle eines Orchesters lassen wir vor dem Mikrophon eine Schallplatte spielen. Zweckmäßiger ersetzen wir die gesamte Sendeapparatur durch ein elektrisches Grammophon, Fig. 5 und 6. Die Elektrodose, in der Grammophontechnik als Pic-Up bezeichnet, unterscheidet sich von dem Antriebssystem des Lautsprechers lediglich durch die geringeren Ausmaße. Die Schwingungen der Grammophonnadel übertragen sich auf den Anker, dessen Bewegungen den Telephonstrom induzieren. Im Lautsprecher vermittelt die Nadel die Ankerschwingungen der Konusmem-

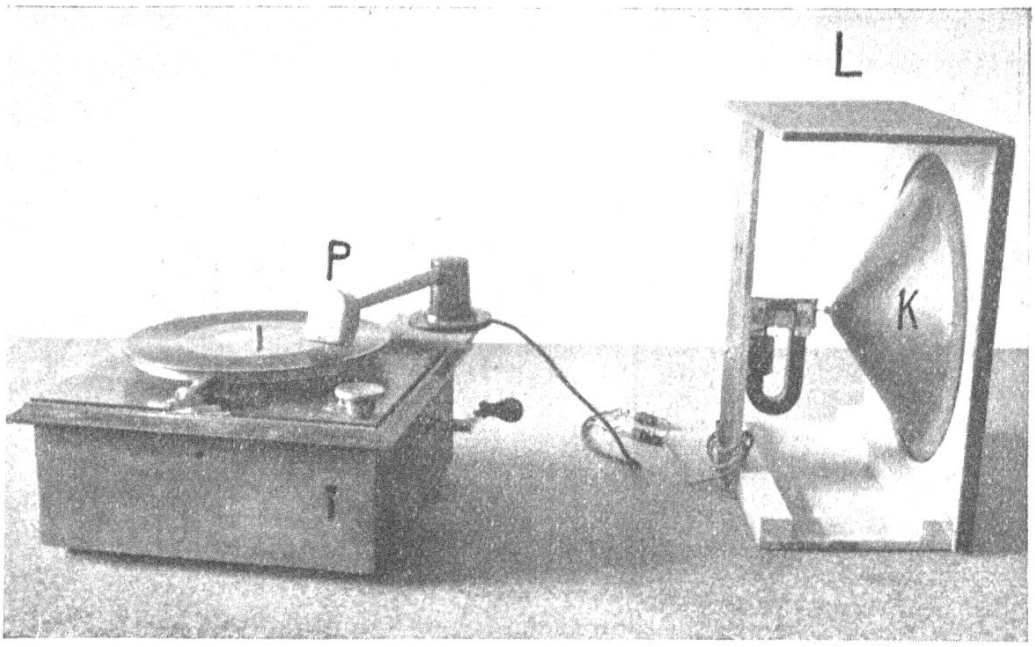

Fig. 5. Elektro-Grammophon.
P Pic-Up. L Lautsprecher. K Konusmembran.

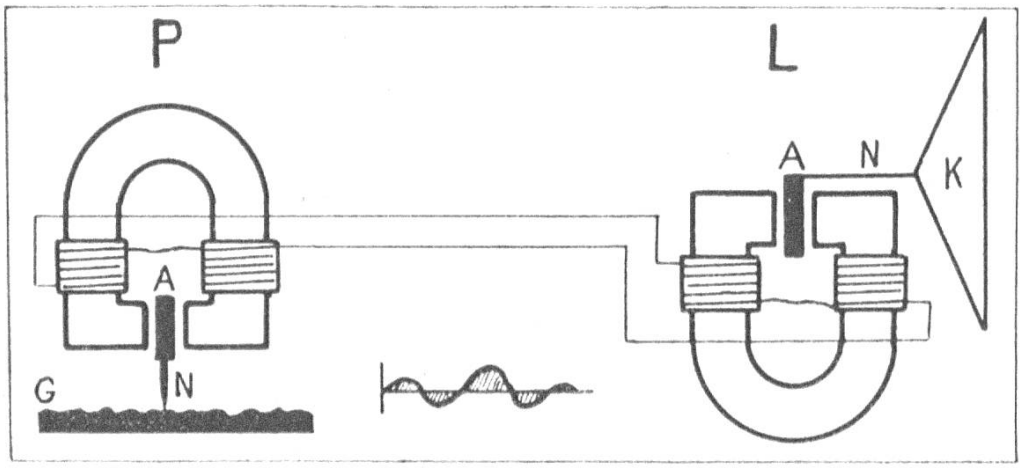

Fig. 6. Elektro-Grammophon.
P Pic-Up, Hufeisenmagnet mit 2 Induktionsspulen. A Anker. N Nadel. G Grammophonplatte. L Lautsprecher, magnetisches Antriebssystem. A Anker. N Nadel. K Konusmembran.

bran. Aus einem alten Kopfhörer einen Lautsprecher oder ein Pic-Up herzustellen, ist eine verlockende Bastleraufgabe.

Die Wiedergabe der Grammophonplatte ist qualitativ einwandfrei, dagegen wird die geringe Lautstärke als Mangel empfunden. Wir müssen verstärken.

Die Radioröhre

Elektronenemission

Grundversuch: Die Funkenstrecke eines Induktors oder einer Elektrisiermaschine wird in eine luftverdünnte Röhre verlegt, mit dem Erfolg, daß die Funken bedeutend länger werden. Daraus ist ersichtlich, daß die Luft den Uebertritt von einer Elektrode zur andern hemmt. Um diesen Widerstand zu überwinden, ist eine sehr hohe Spannung erforderlich. Je kleiner der Widerstand, desto geringer kann die Spannung gewählt werden. Versuche von Edison haben weiter gezeigt, daß der Elektronenaustritt aus der Kathode umso leichter vor sich geht, je wärmer das Metall ist. Diese Entdeckung führte dazu, die Kathode als Glühfaden auszubilden. Den für die Erwärmung notwendigen Strom liefert die sogenannte Heizbatterie. Um die vom glühenden Heizfaden emittierten Elektronen zur Anode zu ziehen, genügt eine positive Spannung von weniger als 100 Volt. Die Anordnung Fig. 7 treffen wir in der Einweggleich-

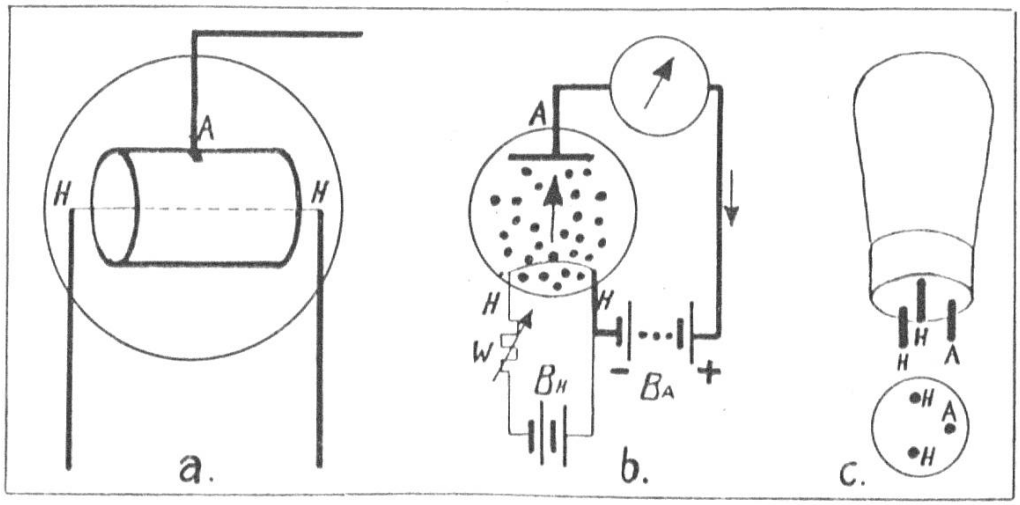

Fig. 7. Elektronenröhre.

a) Kathode und Anode. b) Anodenstrom und Heizstrom. c) Röhre mit Sockel. HH Heizfaden (Kathode). A Anode. W Regulierwiderstand 20-30 Ohm. B_H Heizbatterie 4 Volt. B_A Anodenbatterie 50-100 Volt.

richterröhre. Für die folgenden Emissionsversuche läßt sich ebenso gut eine Radioröhre verwenden. Das Vorhandensein

einer weiteren, vorderhand nicht besprochenen und nicht angeschlossenen Elektrode behindert unsere Messungen keineswegs. Wir stellen fest:

1. Anodenstrom fließt nur bei geheizter Kathode.

2. Der Anodenstrom ist umso stärker, je höher die Kathode geheizt wird, d. h. je größer der Heizstrom ist. (Die Heizung wird durch einen veränderlichen Widerstand reguliert.)

3. Je höher die Anodenspannung, desto stärker ist der Anodenstrom. Diese dem Ohm'schen Gesetz entsprechende Feststellung gilt jedoch nicht uneingeschränkt. Wenn wir nämlich die Anodenspannung steigern, so kommen wir schließlich an einen Punkt, wo eine Spannungserhöhung keine Stromerhöhung mehr zur Folge hat. Dies ist der Fall, wenn die Spannung ausreicht, um alle von der Kathode emittierten Elektronen zur Anode zu ziehen. Die Spannung weiter zu erhöhen, ist natürlich zwecklos. Die Betriebsdaten liegen jeder gekauften Röhre bei.

Steuerung des Anodenstromes

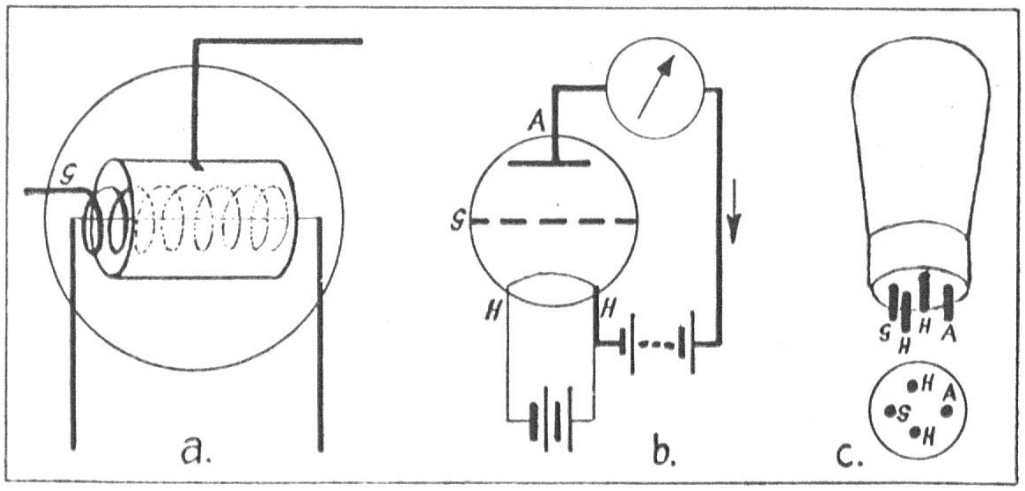

Fig. 8. Elektronenröhre mit Gitter G.

In der Radioröhre Fig. 8 befindet sich zwischen Kathode und Anode das sogenannte Gitter. Diese als Spirale oder Sieb ausgebildete Elektrode bedeutet für den Anodenstrom weniger ein räumliches als ein elektrisches Hindernis. Elektronen fliegen nicht nur zur positiven Anode, sondern auch zum näher liegenden neutralen Gitter, welches dadurch negative Ladung

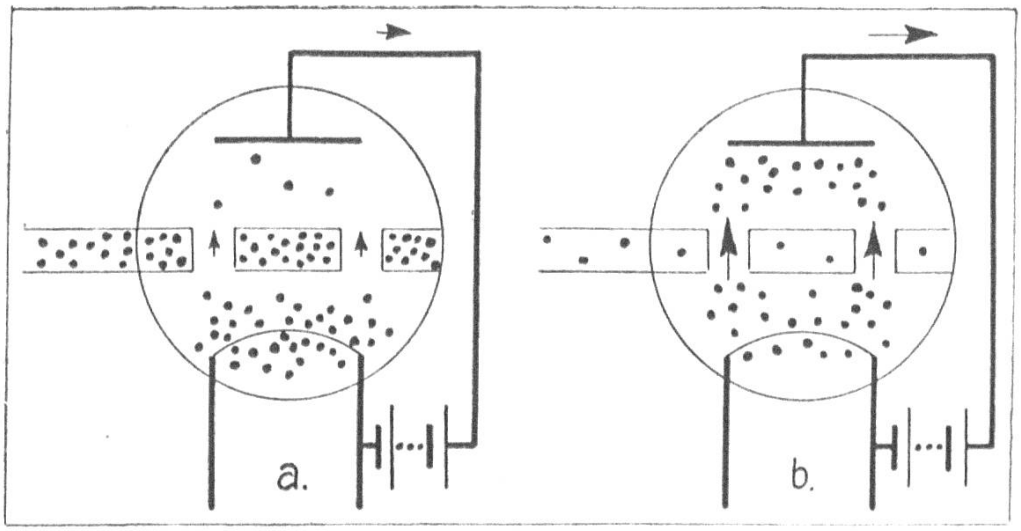

Fig. 9. Steuerung des Anodenstromes.
a) negatives Gitter : schwacher Anodenstrom.
b) positives Gitter : starker Anodenstrom.

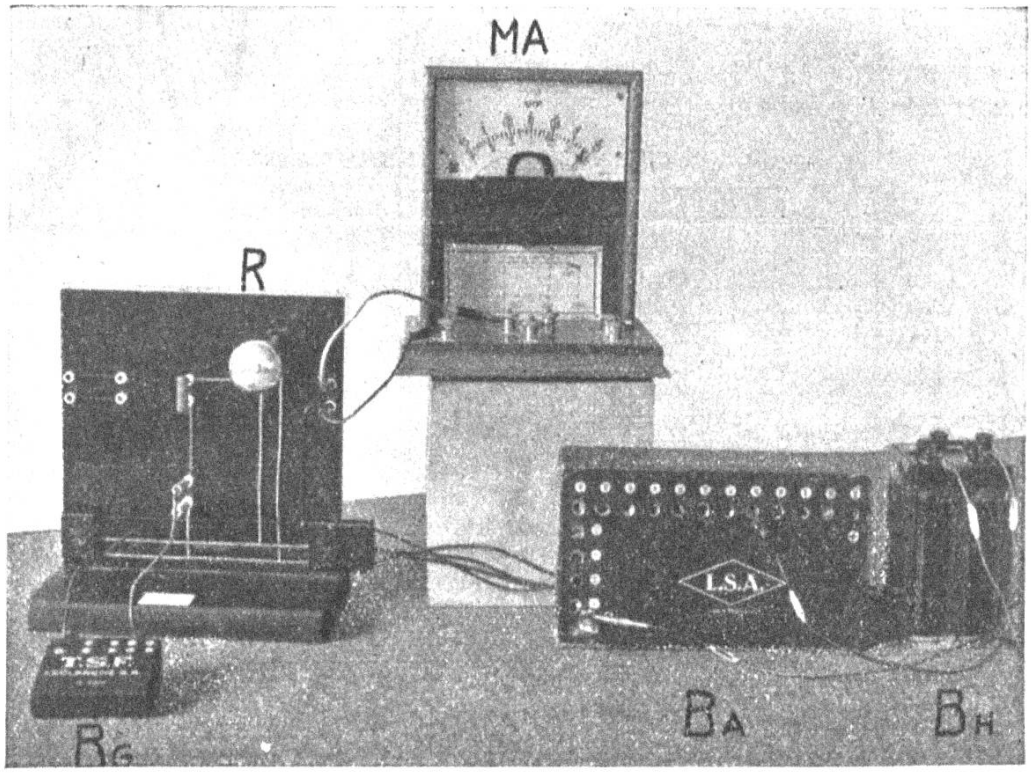

Fig. 10. Meßanordnung.
R Radioröhre. MA Milliampèremeter. B_G Gitterbatterie.
B_A Anodenbatterie. B_H Heizbatterie.

bekommt. Das negativ gewordene Gitter übt auf die durchfliegenden Elektronen eine abstoßende Wirkung aus, der Anodenstrom wird geschwächt. Wir sind in der Lage, das Gitter von außen her elektrisch zu beeinflussen, d. h. durch Anlegen von entsprechenden Spannungen positiv oder negativ zu laden. Negatives Gitter schwächt, positives Gitter unterstützt die Saugwirkung der Anode. Die Steuerwirkung des Gitters veranschaulicht Fig. 9.

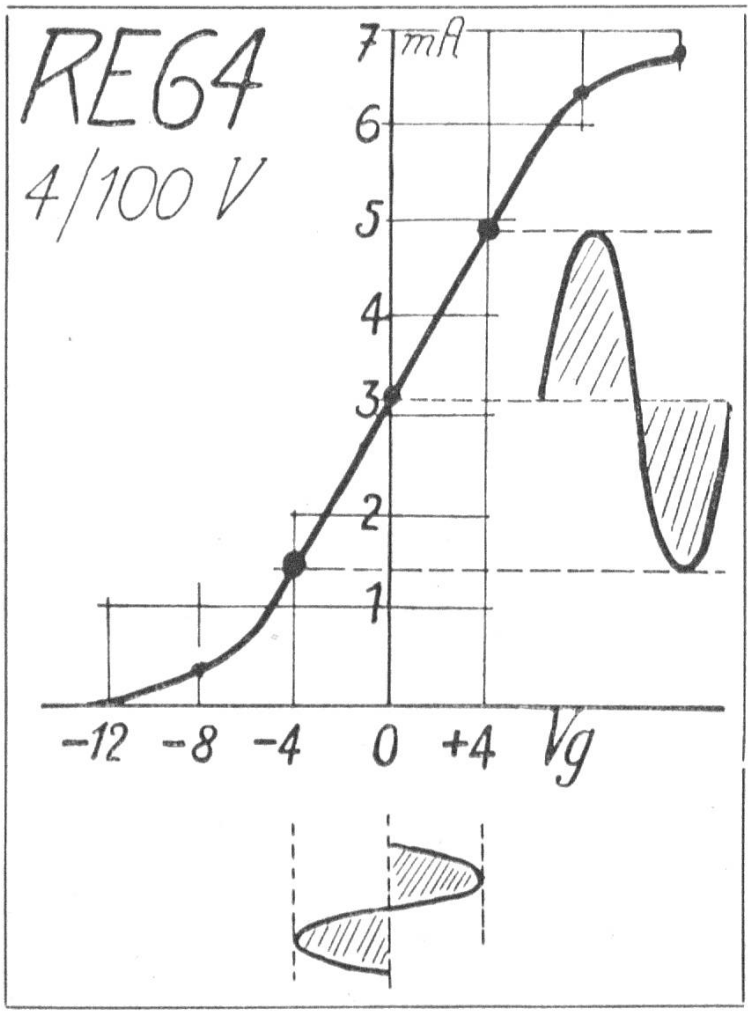

Fig. 11. Charakteristik der Röhre RE 064.
Vg. Gittervorspannung in Volt. mA Anodenstrom in Milliampère.

Die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Gittervorspannung wird durch Versuche festgestellt, deren Anordnung aus den Fig. 10, 12a und 12b ersichtlich ist. Das Resultat wird graphisch dargestellt. Fig. 11 zeigt die sogenannte Kenn-

linie oder Charakteristik der Röhre Telefunken RE 064 bei 4 Volt Heizspannung und 100 Volt Anodenspannung. Aus der Versuchsreihe greifen wir 2 Fälle heraus, Fig. 12:

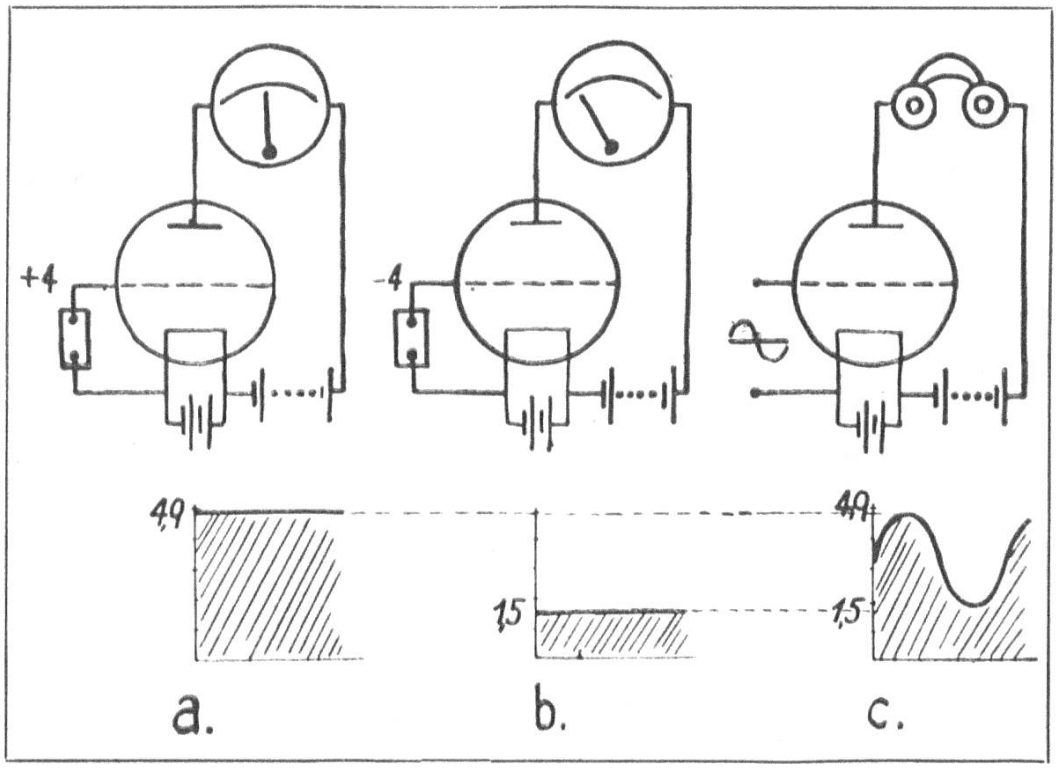

Fig. 12. Aufnahme einer Charakteristik.
a) Anodenstrom bei Gittervorspannung + 4 Volt.
b) Anodenstrom bei Gittervorspannung — 4 Volt.
c) Anodenstrom bei Wechselgitterspannung.

a) Gittervorspannung + 4 Volt : Anodenstrom 4,9 M. A.
b) Gittervorspannung — 4 Volt : Anodenstrom 1,5 M. A.
Wenn wir in rascher Folge die Anschlüsse der Gitterbatterie vertauschen, so schwankt der Anodenstrom zwischen diesen beiden Werten. Anstatt eine Gleichspannung umzupolen, legen wir einfacher eine Wechselspannung an, die wir einem Klingeltransformator entnehmen, Fig. 12c. Die 50 Perioden des Wechselstroms erzeugen 50 Schwankungen des Anodenstromes. Dieser wird zu einem Wellenstrom. Das Galvanometer ist zu träge, um die raschen Stromstärkeänderungen anzuzeigen. An seiner Stelle übersetzt ein Telephonhörer oder Lautsprecher die elektrischen Schwankungen in akustische Schwingungen.

Verstärkung

Wozu dieses Umformen des Wechselstromes in einen Wellenstrom? Der Sinn wird uns sofort klar, wenn wir vergleichsweise den Lautsprecher an dieselbe Wechselspannung anschließen, die wir vorhin an das Gitter gelegt haben. Die Radioröhre *verstärkt* die Schwankungen. Genauer ausgedrückt: Die Gitterwechselspannung erzeugt im Anodenstrom verstärkte Schwankungen. Der Grad der Verstärkung ist bedingt durch die Konstruktion der Röhre, auf deren Einzelheiten wir nicht eintreten können. Der Fachmann liest den Charakter der Röhre aus ihrer Charakteristik.

Die 50-Periodenmusik ist nicht interessant, auch dann nicht, wenn wir sie verstärkt aus dem Lautsprecher erhalten. Wichtiger ist die Verstärkung der schwachen Telephonströme, welche das Pic-Up erzeugt. Durch Zwischenschaltung eines Transformators läßt sich der Wirkungsgrad erhöhen, Fig. 13 u. 14.

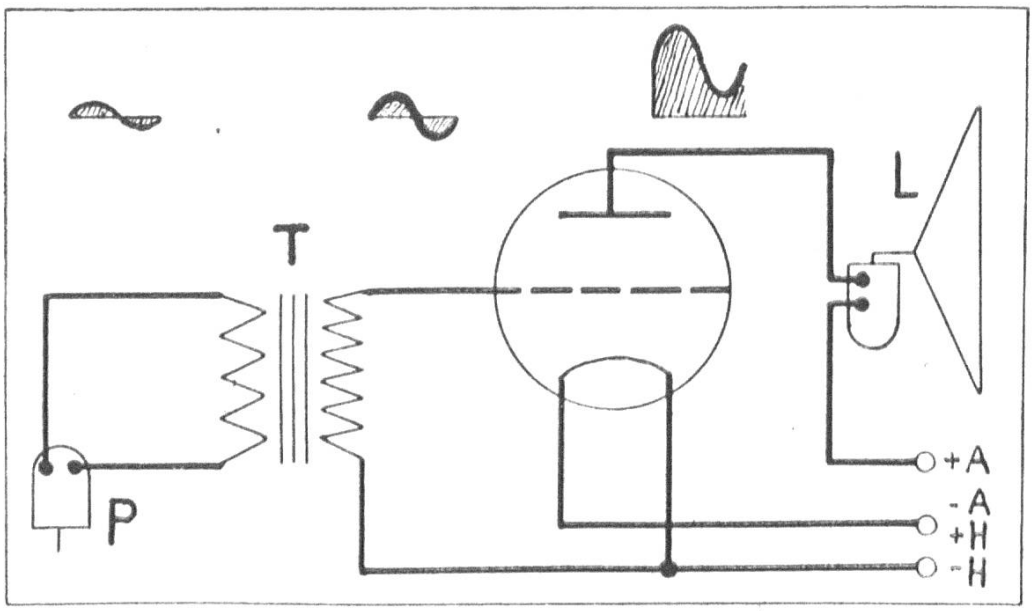

Fig. 13. Grammoverstärkung.

P Pic-Up. T Transformator 1 : 5 (ev. 1 : 4 oder 1 : 3). L Lautsprecher.
+A —A Anschluß für Anodenbatterie.
+H —H Anschluß für Heizbatterie.

Noch lauter! wird gewünscht. Also noch mehr verstärken! Durch eine zweite Röhre, das liegt sehr nahe. Nicht ganz

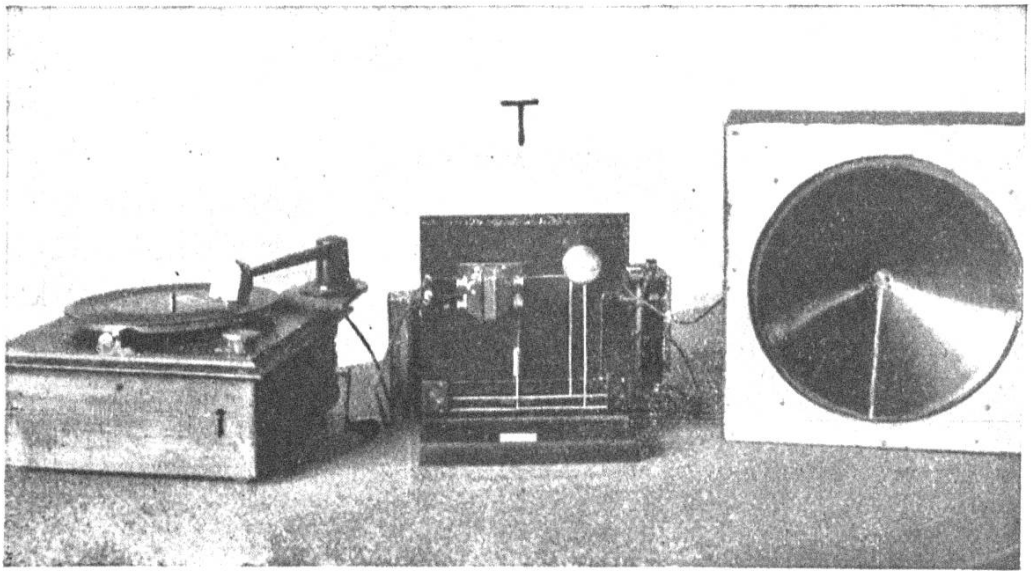

Fig. 14. Grammoverstärkung.
T Lehrmodell „Transformatorverstärker“.

einfach zu finden ist die Kopplung der beiden Stufen. Es stellt sich das Problem, die Anodenstromschwankungen auf das Gitter der zweiten Röhre zu bringen unter gleichzeitiger Fernhaltung der Anodengleichspannung. Es sind zwei Kopplungsarten üblich, die Transformator- und die Widerstandskopplung.

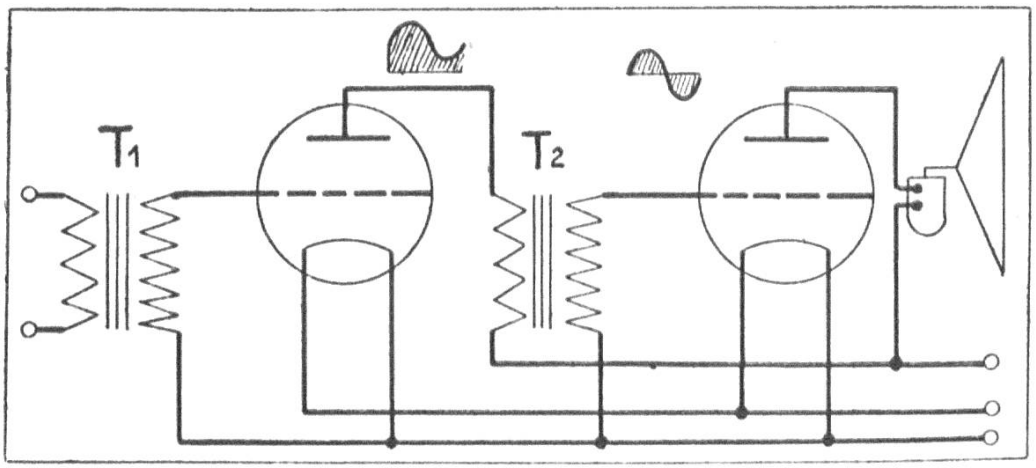

Fig. 15. Zweistufiger Verstärker mit Transformatorkopplung.
T 1 Transformator 1 : 5. T 2 Transformator 1 : 3.

Die Transformatorkopplung

Fig. 15. Der primäre Wellenstrom induziert einen sekundären Wechselstrom, dessen Spannung durch entsprechende Wahl des Windungsverhältnisses noch auftransformiert werden kann. Die erhöhten Spannungsschwankungen steuern den Anodenstrom der zweiten Röhre und rufen in ihm verstärkte Schwankungen hervor. Beide Stufen werden von denselben Batterien gespiesen.

Die Widerstandskopplung

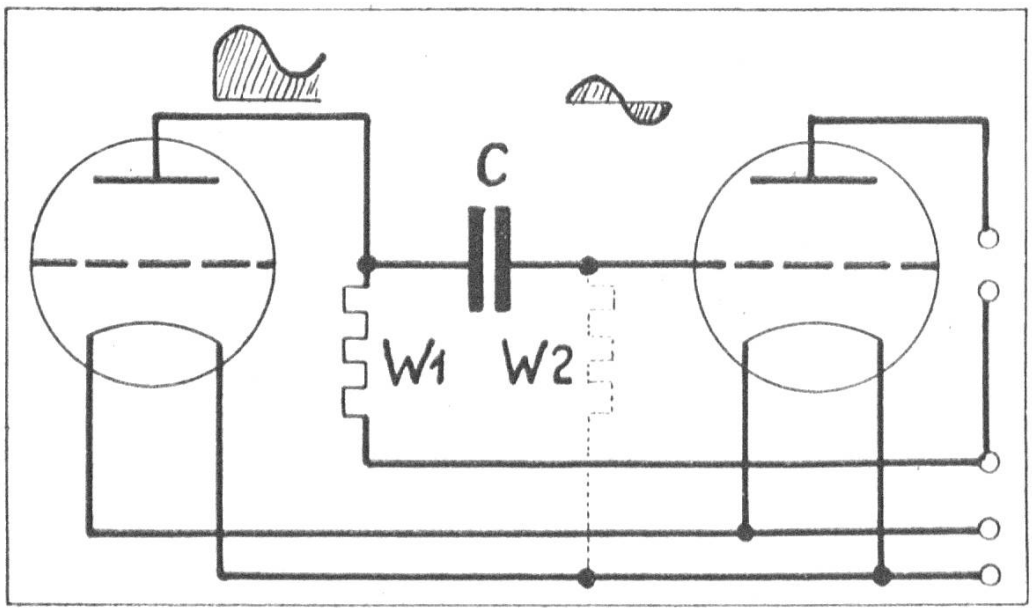

Fig. 16. Widerstandskopplung.
C Blockkondensator, 2 000 bis 10 000 cm Kapazität.
W 1 Anodenwiderstand, 0,05 — 1 Megohm.
W 2 Gitterableitwiderstand, 0,5 — 2 Megohm.

Fig. 16. In dem Anodenkreis der ersten Röhre liegt ein hochohmiger Widerstand W 1, an dessen Enden der Wellenstrom Spannungsschwankungen hervorruft, die sich über den Blockkondensator C dem Gitter mitteilen. Der Kondensator, der, wie der Transformator, den Gleichstrom blockiert und deswegen in dieser Anwendung Blockkondensator genannt

wird, bedeutet für die Wechselspannung kein Hindernis. Wird die linke Kondensatorplatte (Fig. 17a) durch die Anodenstrom-

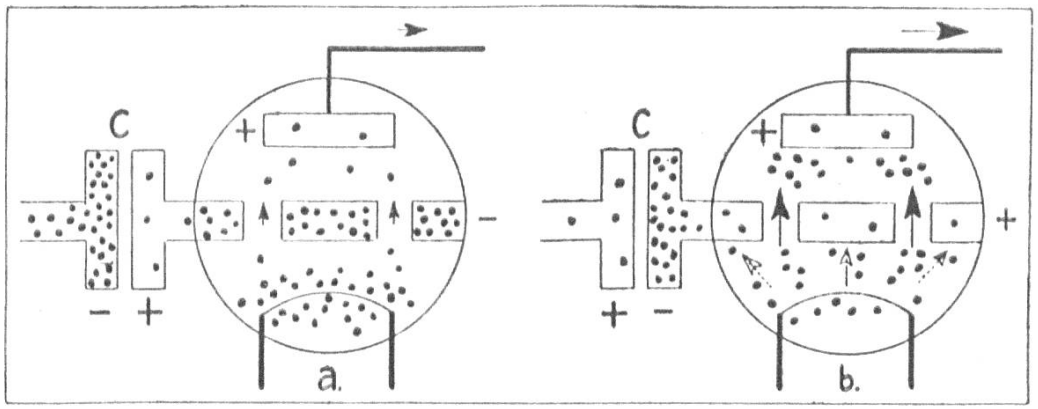

Fig. 17.
Uebertragung einer Wechselstromperiode über den Blockkondensator auf das Gitter, Steuerung des Anodenstromes.
Punktierte Pfeile : Gitterstrom.

schwankungen negativ geladen, so fliehen die Elektronen von der rechten Platte auf das Gitter. Ebenso wird das Gitter positiv, wenn die linke Kondensatorplatte positiv ist (Fig. 17b). Die übliche Ausdrucksweise, „der Kondensator lasse den Wechselstrom durch", ist sehr ungenau und führt zu falschen Vorstellungen. Es handelt sich nicht um ein Durchgehen der Elektrizität, sondern um die Influenzwirkung der einen Platte auf die andere.

Die Spannungsschwankungen auf dem Gitter der zweiten Röhre steuern in bekannter Weise den Anodenstrom. Das Steuer funktioniert jedoch nur kurze Zeit einwandfrei. In der zweiten Hälfte der Periode fließt nämlich ein Teil der von der Kathode emittierten Elektronen auf das Gitter, welches als positiver Körper die gleiche Saugwirkung ausübt wie die Anode. Dieser „Gitterstrom" ist in der Zeichnung durch die punktierten Pfeile angedeutet. Da die auf dem Gitter gelandeten Elektronen nach keiner Seite abfließen können, nimmt die Gitterladung mit jeder neuen Periode zu und erreicht schließlich einen solchen Wert, daß der Anodenstrom dauernd

geschwächt wird und das Gitter als Steuer versagt. Das Gitter muß entlastet werden durch Schaffung eines Abflusses. Mit der Einführung des Hochohmwiderstandes W 2 (in Figur 16 punktiert gezeichnet) wird der Widerstandsverstärker dauernd arbeitsfähig gemacht.

Negative Gittervorspannung

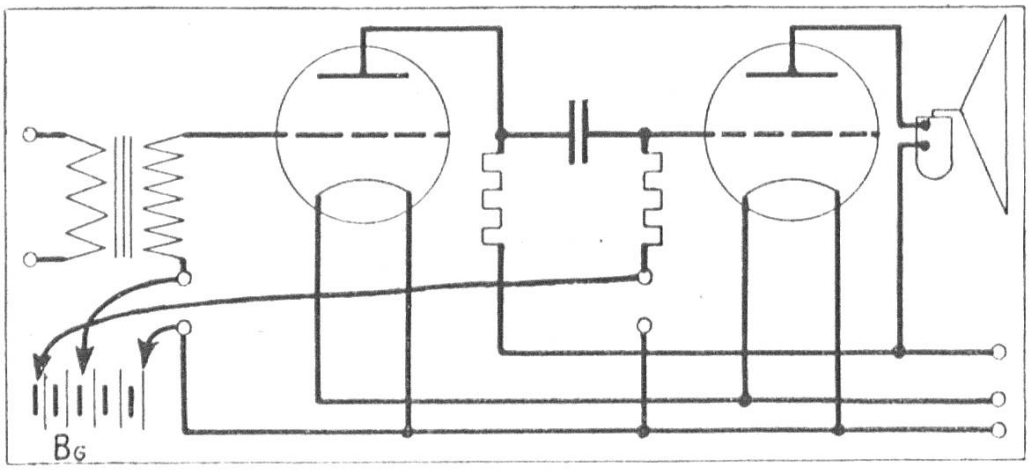

Fig. 18. Zweistufiger Verstärker.
1. Stufe : Transformatorkopplung. 2. Stufe : Widerstandskopplung.
B_G Gittervorspannbatterie.

Die in Figur 18 wiedergegebene Schaltung eines zweistufigen Verstärkers, bestehend aus einer Transformator- und einer Widerstandsstufe, enthält als Ergänzung die sog. Gittervorspannbatterie, deren Funktion die Fig. 20 erläutert:

a) Ohne negative Vorspannung: Die Gitterwechselspannung, schwankend um 0 Volt, erzeugt verzerrte Anodenstromschwankungen.

b) Mit 8 Volt negativer Vorspannung: Die Gitterwechselspannung, schwankend um — 8 Volt, erzeugt proportionale Schwankungen des Anodenstroms.

Die negative Vorspannung ist so zu wählen, daß die Röhre im geradlinigen Teil der Charakteristik arbeitet, was zur verzerrungsfreien Verstärkung unerläßlich ist. Der Wert der Gittervorspannung ist an der Kennlinie abzulesen.

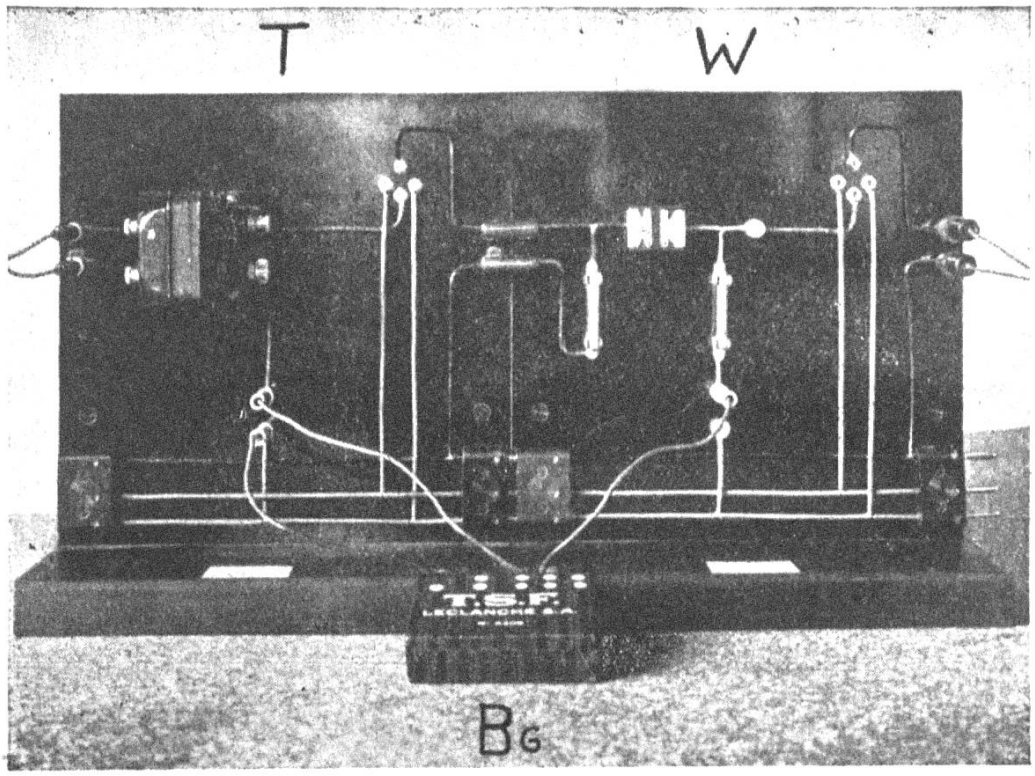

Fig. 19. Zweistufiger Verstärker.
T Lehrmodell „Transformatorverstärker". W Lehrmodell „Widerstandsverstärker". B_G Gittervorspannbatterie.

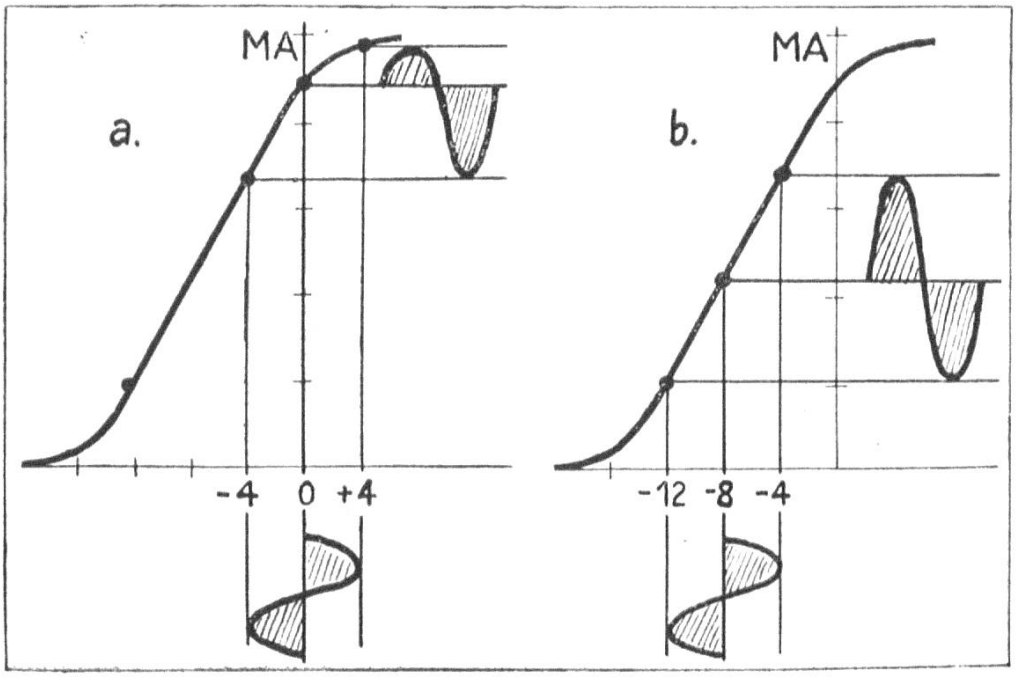

Fig. 20. Gittervorspannung. Verschiebung des Arbeitspunktes in den geradlinigen Teil der Charakteristik.

Fig. 19 zeigt die praktische Ausführung der Schaltung Fig. 18. Solange wir nur schwache Wechselspannungen zu verstärken haben, ist die Gittervorspannung nicht unbedingt erforderlich. Man darf in diesem Falle die Anodenspannung nicht zu hoch wählen und muß auf maximale Verstärkung verzichten. Die beiden Anschlußbuchsen für die Gitterbatterie werden, wie aus Fig. 14 ersichtlich ist, durch Kurzschlußstecker überbrückt.

Verstärker in der Drahttelephonie

Röhrenverstärker finden nicht nur im Radio- und Grammophonbau Verwendung, sondern auch in der Drahttelephonie. Das Telephonieren auf große Distanzen, wie Zürich-Berlin, ist ohne Zwischenschaltung von Verstärkern auf den Hauptämtern nicht denkbar. Aus diesem Grunde ist mein Vorgehen, den Verstärker vor dem eigentlichen Radio zu behandeln, wohl nicht ganz abwegig. Die Apparatur wird uns bei den folgenden Versuchen schätzbare Dienste leisten.

Wechselstromröhren

Ich möchte das Kapitel „Die Radioröhre" nicht abschließen, ohne auf die sog. Wechselstromröhre wenigstens hinzuweisen. Die Batterien waren von Anfang an Sorgenkinder des Radiobesitzers. Als Anodenstromquelle konnte, da bei den früheren Röhren nur geringe Stromstärken in Frage kamen, eine Trokkenbatterie verwendet werden. Ihr Ersatz verursachte immerhin erhebliche Kosten. Der Akkumulator als Heizstromquelle mußte regelmäßig geladen werden, was wiederum mit Mühe und Auslagen verbunden war. Es regte sich der Wunsch, von den Batterien loszukommen und den Apparat aus dem Lichtnetz, das an den meisten Orten Wechselstrom führt, zu speisen. Zuerst konnte die Anodenbatterie verabschiedet werden. Im Anodenspannungsgerät wird der Wechselstrom durch die Gleichrichterröhre in einen pulsierenden Gleichstrom verwandelt, der,

bevor er dem Apparat zugeführt werden kann, durch einen Siebkreis, bestehend aus Drosseln und Kondensatoren, beruhigt werden muß. In ähnlicher Weise wurde versucht, den Akkumulator zu ersetzen durch einen Gleichrichter mit Siebkreis. Die auf dem Markt erhältlichen Geräte haben jedoch nie großen Anklang gefunden.

In Grammophonverstärkern und in Radioendstufen kann die Kathode ohne Schwierigkeiten direkt mit Wechselstrom von geringer Spannung geheizt werden. In den übrigen Stufen eines Radioempfängers taugt die direkt mit Wechselstrom geheizte Röhre nicht, weil die Wärmeschwankungen, hervorgerufen durch den Wechselstrom, im Anodenstrom entsprechende Schwankungen von der Frequenz 50 erzeugen, welche letzten Endes im Lautsprecher als unangenehme Begleitmusik empfunden werden. In der indirekt geheizten Röhre ist die Kathode als eine Art Speicherofen ausgebildet, der geheizt wird von einem Heizfaden, welcher mit der Kathode nicht in leitender Verbindung steht. Die indirekte Kathode wird aus dem Sockel durch einen fünften zentralen Stift herausgeführt.

Drahtlose Energieübertragung

Induktion

Grundversuch Fig. 21: Ein primärer Wechselstrom induziert in der sekundären Spule einen Wechselstrom von derselben Frequenz. Das Lämpchen leuchtet, selbst wenn der Abstand zwischen den beiden Spulen einige Centimeter beträgt. Bei größerem Spulenabstand fließt wohl auch noch sekundärer Strom, nur genügt er nicht mehr, um das Lämpchen zum Glühen zu bringen. Da wir es mit Wechselstrom zu tun haben, schalten wir als feineren Stromanzeiger den Lautsprecher ein, der Spulenabstand kann vergrößert werden. Doch nicht allzu weit, bald verstummt der Lautsprecher wieder. Jedenfalls fließt immer noch Strom, aber von ungenügender Stärke. Was machen? Wir schalten unsern zweistufigen Verstärker zwischen

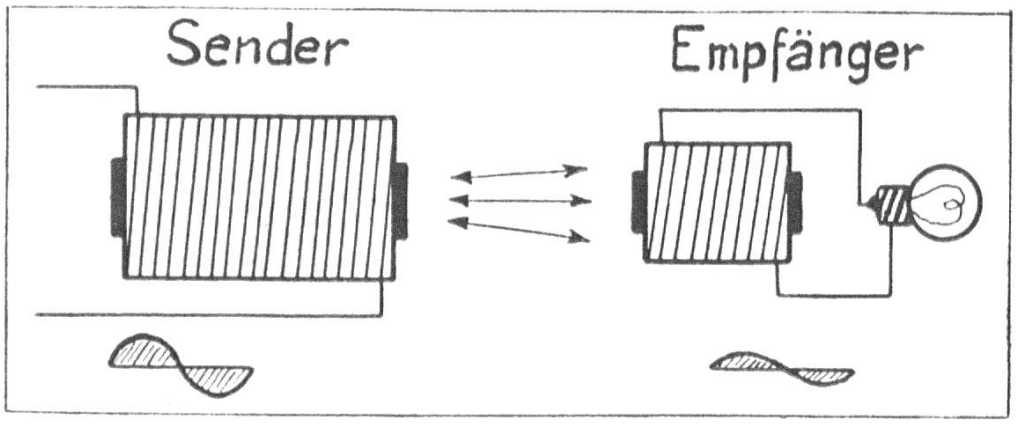

Fig. 21. Induktive Energieübertragung.
Primärspule angeschlossen an 110 — 220 Volt Wechselstrom.
Sekundärspule mit 4-Volt-Glühlämpchen.

sekundäre Spule und Lautsprecher, Fig. 22. Der Erfolg ist derart, daß wir den Spulenabstand auf einige Meter steigern können. Schließlich verlegen wir Sender und Empfänger in zwei getrennte Räume, um zu zeigen, daß die magnetischen

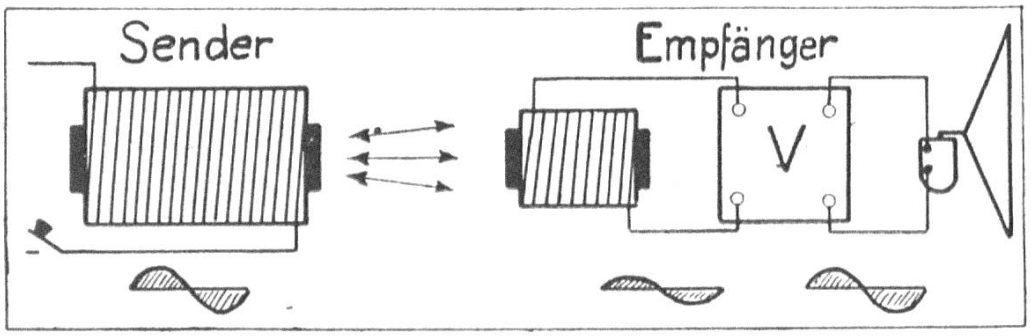

Fig. 22. Induktive Energieübertragung.
V Verstärker.

Kraftlinien Mauerwerk und Holz durchdringen. Ein Taster in der Zuleitung der primären Spule ermöglicht, drahtlos zu telegraphieren. Von der Telegraphie zur Telephonie ist ein kleiner Schritt. Wir schließen die primäre Spule an ein Pic-Up statt ans Wechselstromnetz, und die drahtlose Musikübertragung ist erreicht. Das Resultat wird besser, wenn wir nicht nur sekundär, sondern auch primär verstärken, Fig. 23. Als zweiter Verstärker kann irgend ein Radioapparat mit Grammophon-

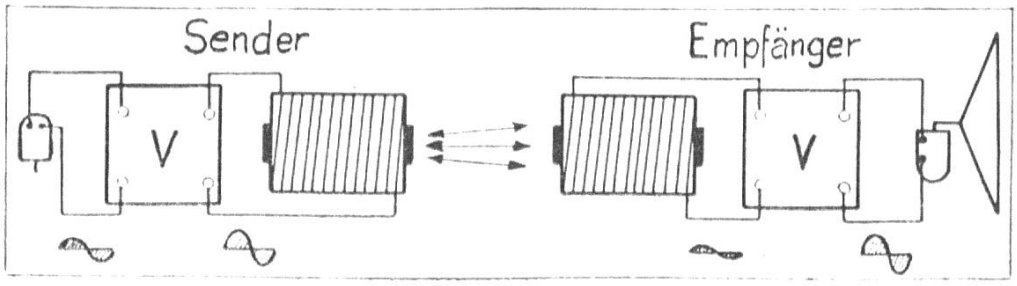

Fig. 23. Induktive Uebertragung eines Grammostromes.

anschluß dienen. Steht ein solcher nicht zur Verfügung, so beschränken wir uns auf geringere Verstärkung und verwenden unsere Modelle je einstufig.

Auf große Distanzen wird diese Musikübertragung allerdings nicht gelingen, auch nicht bei Verwendung von sehr leistungsfähigen Verstärkern. Die Wirkung der magnetischen Felder, hervorgerufen durch die Telephonströme, nimmt mit der Entfernung sehr rasch ab. Wie man in der Drahttelephonie schwache Schwankungen einem stärkeren Strom auflädt (Fig. 4), so handelt es sich in der Telephonie ohne Draht darum, die schwachen magnetischen Wechselfelder einem stärkeren Feld zu überlagern. Zur Erzeugung magnetischer Wechselfelder benötigen wir Wechselstrom. Solcher steht uns beinahe überall zur Verfügung. Es fragt sich nur, ob die Periodenzahl 50 zum Tragen der akustischen Frequenzen, die zwischen 16 und 40000 liegen, geeignet ist. Das Brummen des Trägerstroms würde die schwächeren akustischen Schwingungen überdecken. Die Trägerfrequenz muß entweder unter 16 oder über 40000, also außerhalb des Hörbereiches liegen. Daß der hinkende Strom geringer Frequenz sich als Träger für viel raschere Schwingungen nicht eignet, ist leicht einzusehen. Zudem lehrt die Erfahrung, daß die Strahlungsfähigkeit mit zunehmender Frequenz wächst. Die Trägerströme, welche in der drahtlosen Telephonie verwendet werden, haben Frequenzen von über 100000. Man nennt sie hochfrequente Ströme, während man die Telephonieströme als niederfrequent bezeichnet.

Hochfrequente Ströme

Ein Generator mit 6 Polpaaren liefert 50 Perioden bei 500 Umdrehungen pro Minute. Um die Frequenz 100000 zu erreichen, müßte die Tourenzahl auf 1000000 gesteigert werden, was sich theoretisch zwar denken, praktisch jedoch wegen der wachsenden Zentrifugalkraft nicht ausführen läßt. Die Erzeugung der hochfrequenten Ströme ist ein Problem für sich, das wir hier nur streifen können. Von der ursprünglichen „Funkerei" ist nicht mehr viel anderes als der Name geblieben. Dann kamen Lichtbogensender und Hochfrequenzmaschine. Heute dominiert der Röhrensender. Wir wollen uns nur soweit mit dem Sendeproblem befassen, als dies zum Verständnis des Radioempfangs notwendig ist und bedienen uns der für uns einfachsten Methode des elektrischen Funkens.

Dauer des elektrischen Funkens

Versuch: Entladung eines Kondensators (Leidenerflasche). Frage: Wie lange dauert ein Funke? Die Untersuchung stützt sich auf folgende optische Erscheinung: Eine im Kreise geschwungene Fackel erscheint dem Auge als glühender Kreis. Die Täuschung rührt davon her, daß das Auge die Fackel nicht nur da sieht, wo sie wirklich ist, sondern auch da, wo sie kurze Zeit vorher war.

Versuch Fig. 24. Am Rande der einem Motor oder einer Schwungmaschine aufgesetzten Scheibe sind schwarze Kreise aufgezeichnet. Auf der rotierenden Scheibe erscheinen die Kreise nicht einzeln, sondern als zusammenhängender Kreisring. Wir verlegen den Versuch in den verdunkelten Raum, um die Scheibe im Lichte elektrischer Funken, die wir mit Hilfe einer Influenzmaschine oder eines Funkeninduktors erzeugen, zu betrachten. Das Resultat ist überraschend: Die rotierende Scheibe scheint stille zu stehen. Erklärung: Das Auge sieht die Scheibe nur so lange, als der Funke leuchtet, und diese Belichtungszeit ist so kurz, daß die schwarzen Kreise nicht, zum minde-

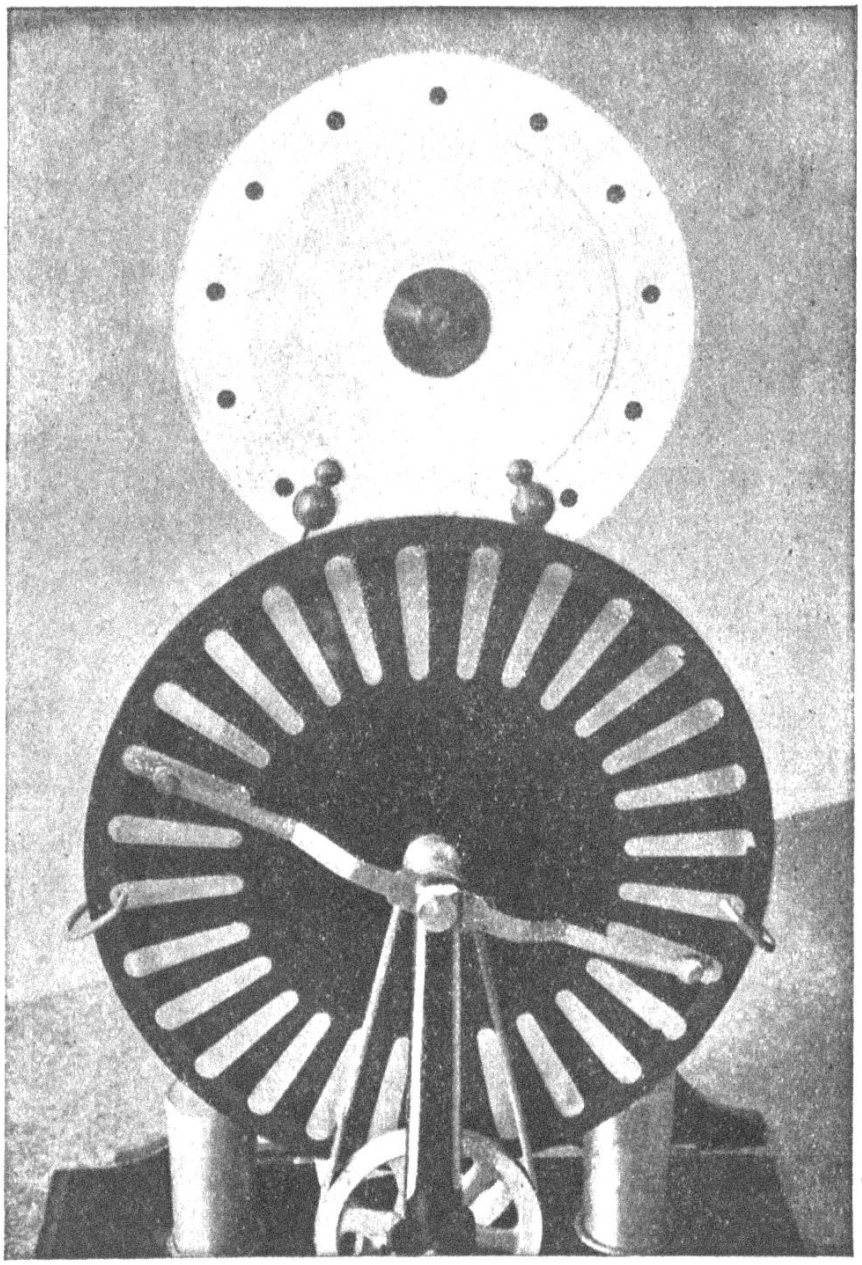

Fig. 24. Dauer eines elektrischen Funkens.
Kreisscheibe auf Schwungmaschine.
Influenzmaschine zur Erzeugung der Funken.

sten nicht sichtbar, vorwärts kommen. Nicht einmal eine Formveränderung läßt sich beobachten. Wir rechnen aus, wie lange die Belichtung dauern müßte, damit der einzelne Kreis um 1 mm gestreckt und damit zur Ellipse würde:

Tourenzahl des Motors = 24 pro Sekunde
Umfang der Scheibe = 60 cm

Weg eines Punktes pro Sek. = 24 . 60 cm = 1440 cm = 14400 mm
1 mm Weg wird zurückgelegt in $^1/_{14400}$ Sekunde.

Wir verfeinern die Methode, indem wir am Rande der Scheibe radial parallele Striche von $^1/_{10}$ mm Dicke im Abstande von je $^1/_{10}$ mm anbringen. Wie lange müßte belichtet werden, damit die Zwischenräume gerade ausgefüllt würden?

$^1/_{14400}$ Sekunde : 10 = $^1/_{144000}$ Sekunde.

Die Beobachtung ergibt, daß bei Belichtung durch einen Funken die Zwischenräume leer bleiben. Wenn auch unsere Methode keine eigentliche Messung gestattet, so liefert sie doch den Beweis, daß der elektrische Funke weniger als $^1/_{144000}$ Sekunde dauert.

Gedämpfte Schwingungen

In welcher Richtung geht die Entladung des Kondensators vor sich? Um dies zu untersuchen, halten wir zwischen die beiden Elektroden ein Stück Papier, welches vom Funken durchschlagen wird. Sehen wir nach, auf welcher Seite das Papier ausgefetzt ist. Merkwürdigerweise beidseitig. Die Elektronen haben sich demnach hin und her bewegt. Die Entladung der Leidenerflasche läßt sich vergleichen mit dem Ausgleich des Wassers in einer U-Röhre, Fig. 25.

a) Beim Oeffnen des Hahnens schießt das Wasser über die Gleichgewichtslage hinaus, so daß im andern Schenkel Ueberdruck entsteht. Das Wasser fließt zurück, um beinahe wieder den ursprünglichen Stand zu erreichen. Es schaukelt einige Male hin und her, die Schwingungen werden allmählich schwächer, bis das Wasser schließlich ganz zur Ruhe kommt.

b) Auch die Elektronen schießen beim Ausgleich über die Gleichgewichtslage hinaus und fließen wieder zurück, schwingen hin und her, bis sie schließlich zur Ruhe kommen.

Ein Funke ist demnach keine einfache Entladung, sondern ein Wechselstrom von abnehmender Amplitude, er ist eine sog. gedämpfte Schwingung. Da die ganze Schwingungsfolge

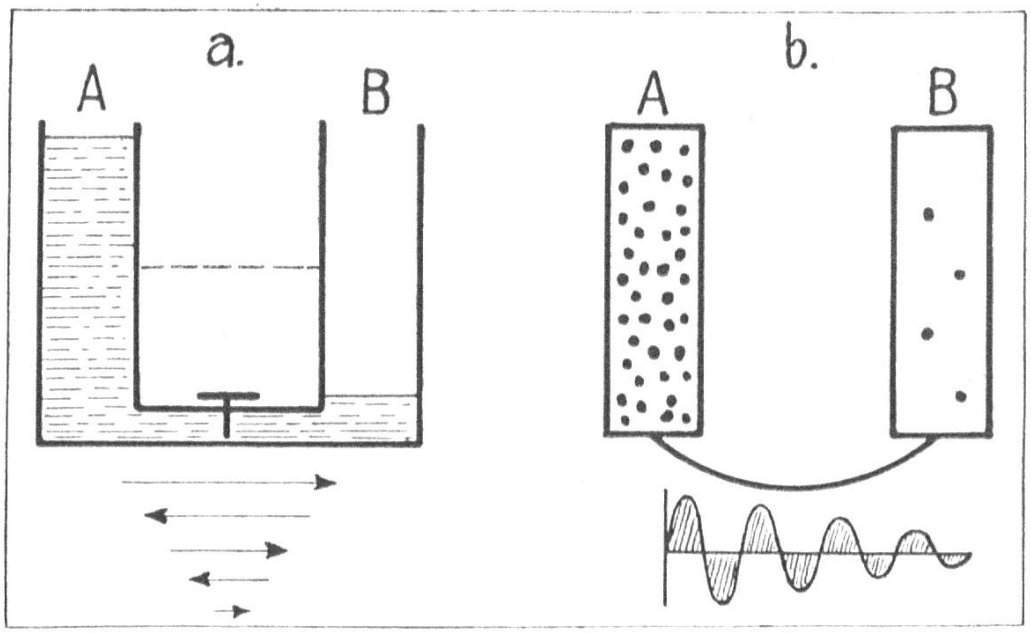

Fig. 25. Gedämpfte Schwingung.
a) Wasserschwingung im U-Rohr, in A Ueberdruck, in B Unterdruck.
b) Elektrische Schwingung bei der Entladung eines Kondensators, A negative Platte, B positive Platte

sich in einem Zeitraum von weniger als $^1/_{144000}$ Sekunde abspielt, so bleibt für die einzelne Schwingung noch weniger Zeit. Wir erkennen daraus die hochfrequente Natur der Funkenentladung.

Uebertragung von hochfrequenten Schwingungen

Um eine raschere Funkenfolge zu erhalten, laden wir in den folgenden Versuchen die Leidenerflasche mit Hilfe eines Funkeninduktors auf. Der hochfrequente Wechselstrom wird die hochfrequenten magnetischen Felder erzeugen, die ihrerseits in einem benachbarten Leiter einen hochfrequenten Strom induzieren sollen. Wir kommen somit zurück auf den in Fig. 21 dargestellten Grundversuch. Um möglichst kräftige magnetische Felder zu erhalten, schickten wir damals den niederfrequenten Strom durch eine Spule mit vielen Windungen. Ein analoges Experiment, für das wir eine alte eisenlose Spule opfern, orientiert uns über das besondere Verhalten der Hochfrequenz. Das prächtige Funkenschauspiel zwischen den Windungen der

Spule zeigt, daß der hochfrequente Wechselstrom den geraden Weg dem gewundenen vorzieht. Er folgt dem Weg des geringsten Widerstandes. Und wenn er die Isolierung durchschlägt, so bedeutet dies nichts anderes, als daß der hohe Widerstand der Isolierung kleiner ist als derjenige der Drahtwindung. Wir erkennen, daß der Selbstinduktionswiderstand, der schon in der Technik des niederfrequenten Wechselstromes in Rechnung gezogen werden muß, in der Hochfrequenz enorme Werte annimmt.

Versuche von Hertz, Resonanz

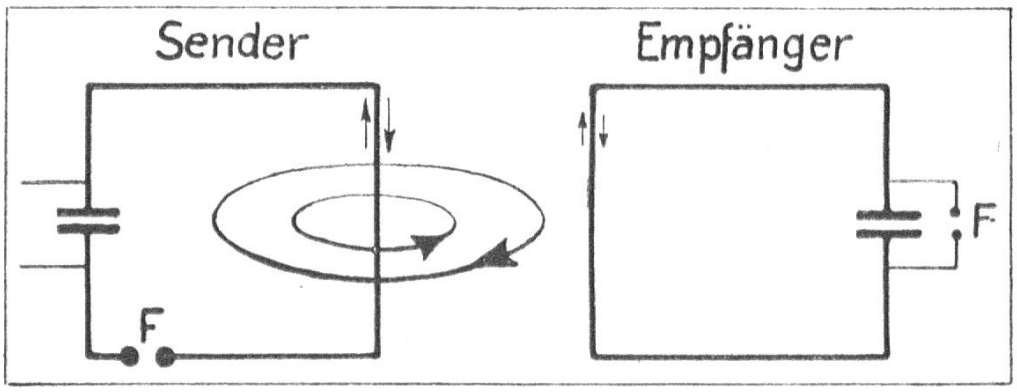

Fig. 27. Uebertragung des hochfrequenten Wechselstroms.

Durch den Mißerfolg mit der Spule gewitzigt, beschränken wir uns in den folgenden Versuchen (Fig. 26 und 27) auf eine einzige große Windung. Sender und Empfänger sollen zunächst in Bezug auf Kapazität des Kondensators und Länge des Drahtes gleich beschaffen sein. Die Funkenstrecke des Empfängers ist möglichst klein einzustellen. Es empfiehlt sich, die kleinen Fünklein zwischen den Elektroden des Empfängers durch eine Glimmlampe besser sichtbar zu machen. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger wird nach Möglichkeit vergrößert. Die Energieübertragung ist vorläufig als Induktionserscheinung ohne weiteres verständlich. Jede Periode des primären Wechselstroms erzeugt ein magnetisches Wechselfeld, das im sekundären Leiter eine Periode Wechselstrom induziert. Der hochfrequente Wech-

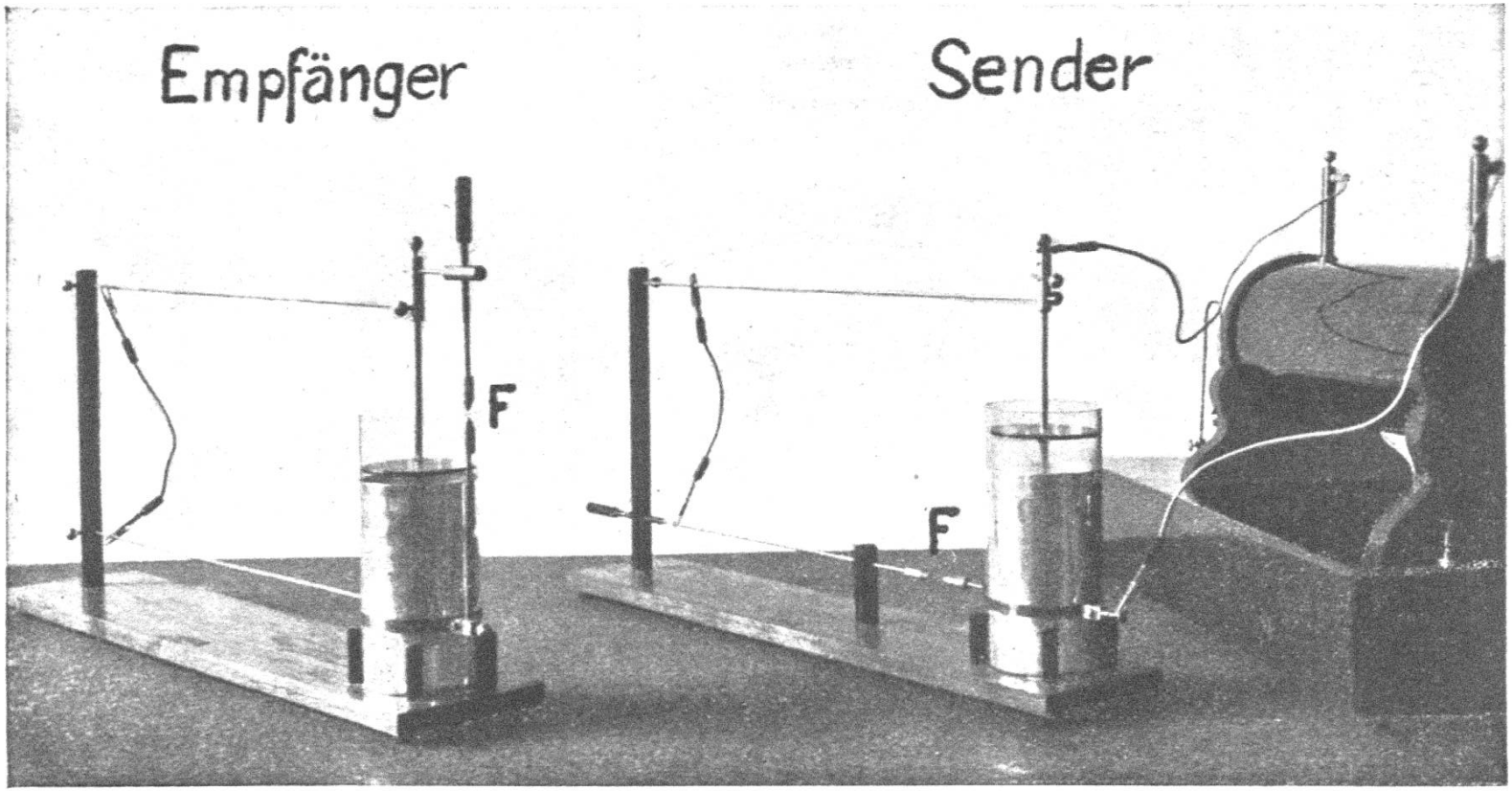

Fig. 26. Uebertragung von hochfrequenten Schwingungen.
2 elektrische Schwingungskreise in Resonanz. F Funkenstrecke.

selstrom scheint sich in dieser Beziehung den Wechselstromgesetzen zu fügen. Seine besonderen Eigenschaften verrät er in den folgenden Versuchen. Durch Verschieben des beweglichen, angeklemmten Kabelstückes gegen die Leidenerflasche verkürzen wir den sekundären Stromweg, Resultat: Die Glimmlampe bleibt dunkel. Gleicher Mißerfolg, wenn wir umgekehrt den primären Stromweg kürzer machen als den sekundären. Wir probieren die verschiedensten Kombinationen und finden, daß die maximale Energieübertragung und die größte Reichweite erzielt werden bei Gleichheit der Stromwege. Diese Feststellung erinnert an eine Erscheinung, die man in der Akustik als Resonanz bezeichnet, Fig. 28. Eine tönende Stimmgabel erregt

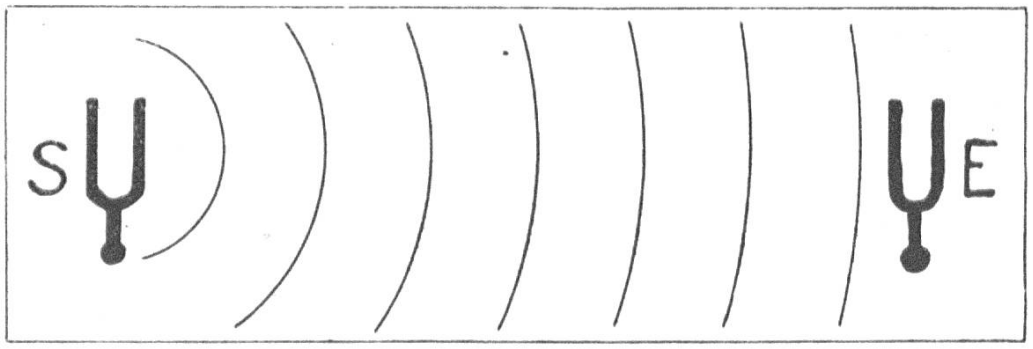

Fig. 28. Uebertragung von Schallschwingungen.
2 Stimmgabeln in Resonanz. S Sender. E Empfänger.

eine andere. Auch diese Energieübertragung gelingt nur bei Gleichheit der Gabeln, d. h. wenn beide die gleiche Eigenschwingung haben. Die Gabel E kann nur mitschwingen, wenn die Schallwellen im Takte ihrer Eigenschwingung auftreffen. Kommen sie rascher oder langsamer, so wird die Stimmgabel E von einer Schallwelle wohl angestossen, aber die Schwingung wird von der nächsten Welle nicht unterstützt, sondern gehemmt oder gar vernichtet. — An Stelle der Stimmgabel S verwende ich irgend ein abstimmbares Musikinstrument, mit Vorteil eine kleine Orgelpfeife mit verschiebbarem Rohr. Die Stimmgabel spricht nur an, wenn die Pfeife auf den Ton, bezw. die Schwingungszahl, der Stimmgabel abgestimmt ist.

Ein weiterer Vergleich: Ein Pendel, angestossen durch die Hand, schwingt gedämpft. Um die Schwingung zu unterhalten, sind weitere Impulse notwendig. Die Stöße wirken aber nur dann, wenn sie im Takte der Pendelschwingungen erfolgen. Entweder ist die Frequenz der Stöße dem Pendel oder die Eigenschwingung des Pendels der Stoßzahl anzupassen. Zwei Schwingungssysteme sind in Resonanz, wenn sie auf dieselbe Schwingungszahl abgestimmt sind.

Trifft eine magnetische Welle einen elektrischen Schwingungskreis, so werden die Elektronen desselben in Schwingung versetzt. Die Bewegung kommt als gedämpfte Schwingung bald zur Ruhe. Um sie zu unterhalten, ist die Einwirkung weiterer Wellen notwendig. Diese Wellen sind aber nur dann wirksam, wenn sie im richtigen Moment eintreffen. Zu früh oder zu spät ankommende Wellen hemmen oder zerstören gar die junge Schwingung. Die maximale Energieübertragung findet statt, wenn die Kreise in Resonanz stehen. Ein Pendel wird abgestimmt durch Verändern seiner Länge, desgleichen eine Pfeife oder eine Saite. Dieses einfache Rezept gilt, wie die Versuche gezeigt haben, auch in der Hochfrequenz. Die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Länge des Stromweges ist verständlich. Die Elektronen brauchen Zeit, um von einer Kondensatorplatte zur andern zu gelangen. Die Reisezeit ist umso größer, je länger der Weg ist. Je rascher die Schwingungen, d.h. je höher die Frequenz, desto kürzer ist der Weg zu gestalten.

Selbstinduktion

Versuch Fig. 29. Wir ersetzen bei Sender und Empfänger das verschiebbare kurze Drahtstück durch je 1 Meter dick isoliertes Kabel, dem wir vorerst beiderseits die Form einer einfachen Schleife geben, und stimmen möglichst genau ab. Die Kreise sind in Resonanz, wenn die größte Reichweite erzielt wird. Hierauf wickeln wir beim Sender das genannte Kabel, ohne dessen Lage zu verändern, zu einer Spule mit mehreren Windungen. Resultat: Die Kreise sind vollkommen verstimmt. Es erhebt sich die Frage: Ist durch das Aufwickeln die Schwingung langsamer oder schneller geworden? Um dies zu untersuchen,

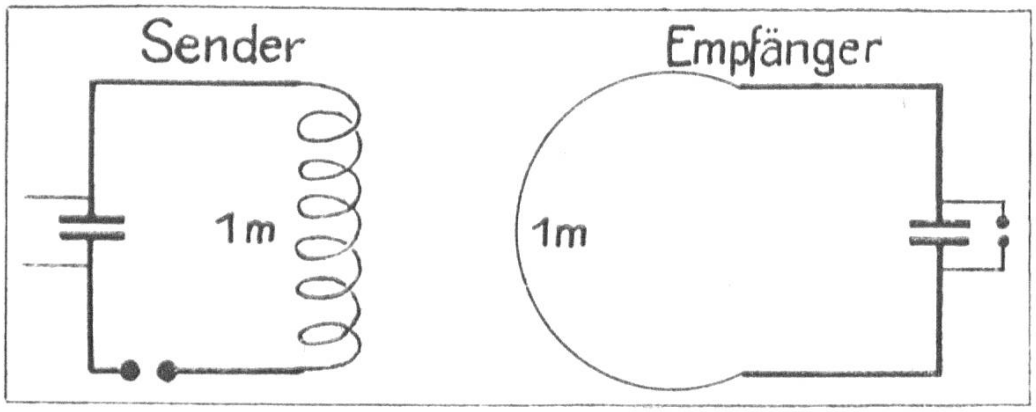

Fig. 29. Selbstinduktion. Sender und Empfänger verstimmt.

stimmen wir den Empfänger auf die veränderte Sendefrequenz ab. Ist der Stromweg des Empfängers zu verlängern oder zu kürzen? Wir kommen wieder in Resonanz, wenn wir verlängern. Die Spule bietet dem hochfrequenten Strom einen viel größeren Widerstand als der gleichlange gestreckte Leiter. In der die Schwingung hemmenden Selbstinduktion besitzen wir ein wertvolles Abstimm-Mittel.

Kapazität

Um kräftigere magnetische Felder und damit größere Reichweiten zu erzielen, bauen wir die Spule im Schwingungskreis des Senders aus zur Rahmenantenne, Fig. 30 und 31. Auch der Empfänger erfährt eine Umgestaltung. An Stelle der Lei-

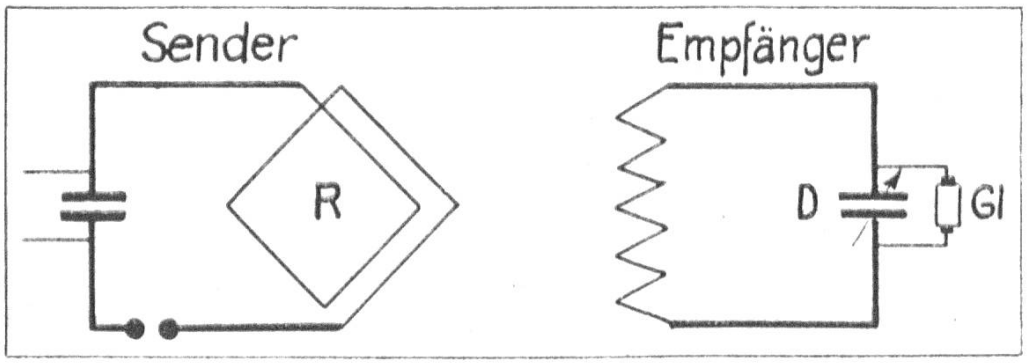

Fig. 31. Sender und Empfänger von Fig 30 in schematischer Darstellung.

R Rahmenantenne. Gl Glimmlampe. D Drehkondensator.

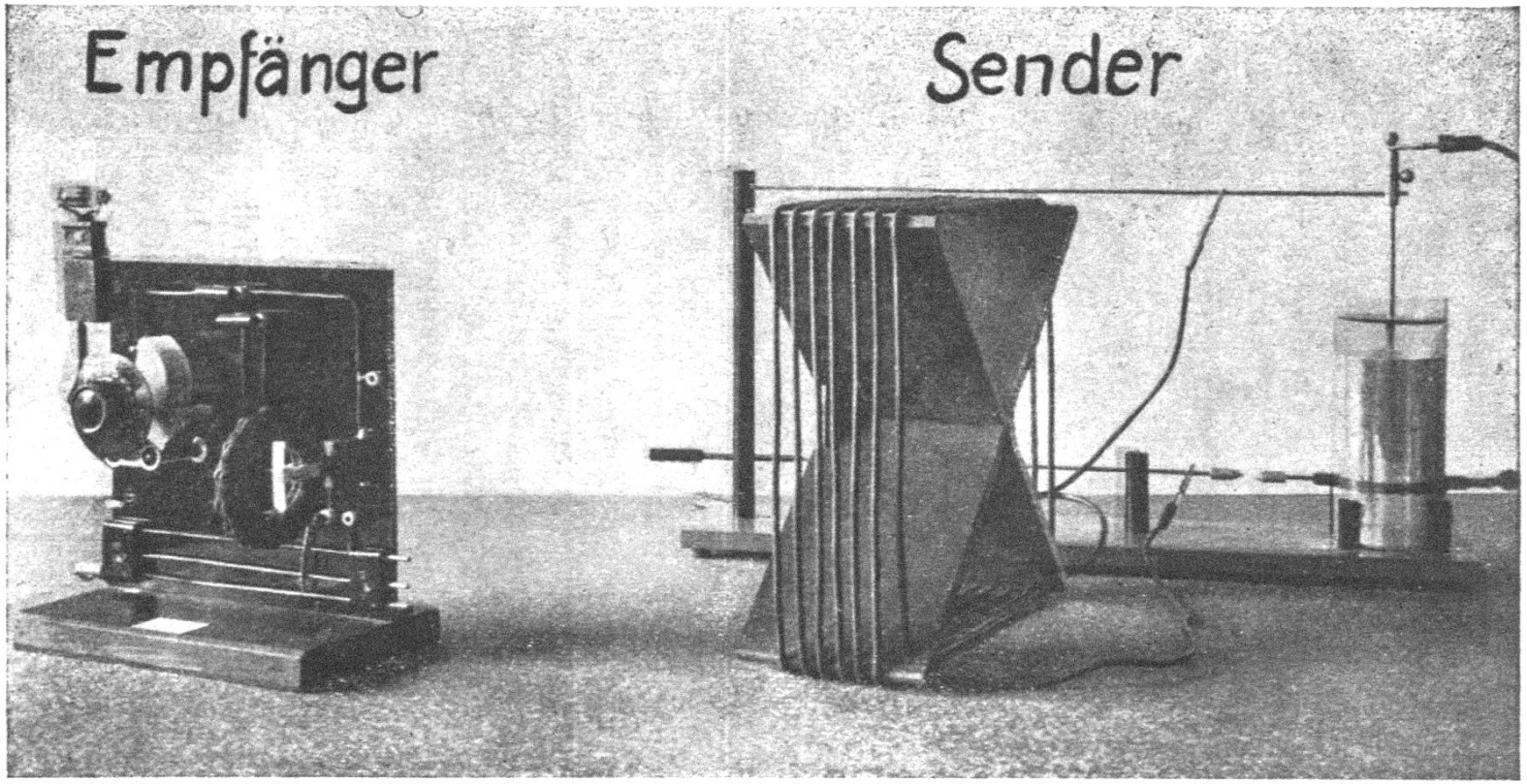

Fig. 30. Uebertragung von hochfrequenten Schwingungen.

Schwingungskreis des Senders aus Leidenerflasche und Rahmenantenne. Schwingungskreis des Empfängers aus Selbstinduktionsspule und Drehkondensator, links oben Glimmlampe.

denerflasche mit fester Kapazität tritt der Drehkondensator D, dessen Kapazität sich durch Drehen des einen Plattensatzes verändern läßt. Der Selbstinduktion geben wir durch Auswechseln der Spule verschiedene Werte und stimmen auf den Sender ab durch Verändern der Kapazität. Wir stellen fest, daß der Kapazitätswert umso größer gewählt werden muß, je kleiner die Selbstinduktion ist. Vermehrung der Kapazität verlangsamt die Schwingung.

Die Frequenz eines Schwingungskreises ist somit von zwei Größen abhängig:

1. von der Selbstinduktion,
2. von der Kapazität.

Die in den Radioempfangsapparaten gebräuchlichen Abstimmkreise bestehen entweder aus fester Kapazität und veränderlicher Selbstinduktion oder aus fester Selbstinduktion und veränderlicher Kapazität.

Wie wir den Sender mit Rahmenantenne ausgerüstet haben, um den Schwingungskreis möglichst strahlungsfähig zu gestalten, so kann man die Aufnahmefähigkeit des Empfängers steigern durch räumliche Vergrößerung der Selbstinduktionsspule. Diese Ueberlegung führt dazu, die Empfängerspule ebenfalls zu ersetzen durch eine Rahmenantenne. Mit passend gewählten Schwingungskreisen läßt sich auf einige Meter drahtlos telegraphieren. Das ist, verglichen mit den Entfernungen, welche die heutige Radiotechnik überbrückt, außerordentlich wenig, bedeutet jedoch, wenn man die aufgewendete Sendeenergie in Rechnung zieht, immerhin ein Resultat, das sich sehen lassen darf. Der in Fig. 26 abgebildete Funkeninduktor nimmt ungefähr 100 Watt auf, während moderne Großsender mit Hunderten von Kilowatt arbeiten. Ferner ist zu bedenken, daß die Glimmlampe, welche den Empfang anzeigt, erst bei etwa 100 Volt zündet. Durch Verfeinerung der Empfangsapparatur, insbesondere durch Einführung eines Verstärkers ließe sich die Reichweite wesentlich steigern.

Das elektrische Feld

Das Geheimnis der drahtlosen Energieübertragung liegt in der geschickten Auswertung längst bekannter Kräfte. Unsere bisherigen Versuche stützten sich auf die Fernwirkung des magnetischen Wechselfeldes, welches der stromdurchflossene Leiter ausstrahlt. In der Praxis spielt neben den magnetischen Kräften das elektrische Feld eine ebenso wichtige Rolle. Wie ein Magnetpol magnetische Kraftlinien aussendet, so gehen von einem elektrisch geladenen Körper unsichtbare elektrische Kraftlinien aus. Die Anziehung von Haaren, Papierschnitzeln usw. ist eine längst bekannte Wirkung des elektrischen Feldes. Wichtiger ist die als Influenz bekannte Erscheinung, die Wirkung, welche ein elektrisch geladener Körper auf die Elektronen eines Leiters ausübt. Fig. 32 veranschaulicht die bekannten Ver-

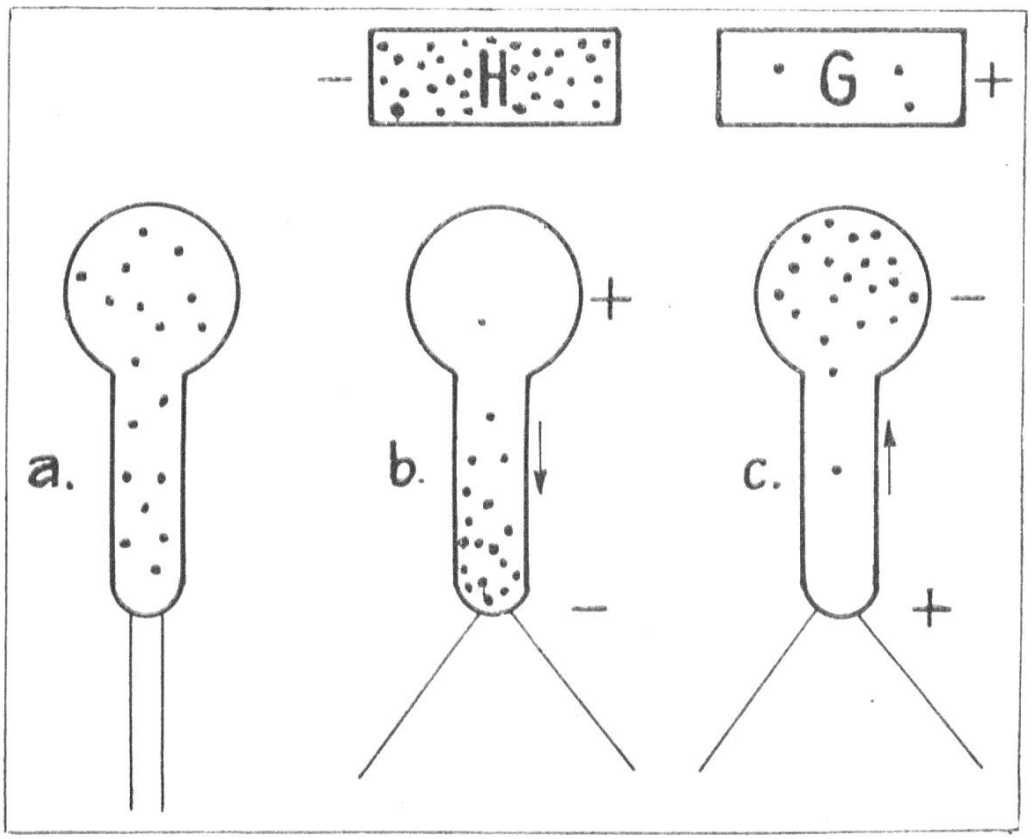

Fig. 32. Influenz. Wirkung des elektrischen Feldes auf die Elektronen des neutralen Elektroskops.
G negativer Hartgummistab. G positiver Glasstab.

suche mit dem Elektroskop. Ein geriebener Hartgummi-, bezw. Glasstab wird über das neutrale Elektroskop gehalten:

a) Elektronen im Elektroskop gleichmäßig verteilt.

b) Unter dem Einfluß des negativen Hartgummistabes fliehen die Elektronen nach unten.

c) Der positive Glasstab zieht die Elektronen nach oben.

Ein wechselndes elektrisches Feld über dem Elektroskop würde in demselben einen Wechselstrom erzeugen. Das elektrische Wechselfeld übt auf die Elektronen im Leiter den gleichen Einfluß aus wie das magnetische Wechselfeld. Die beiden Felder sind somit geeignet, sich in ihrer Wirkung gegenseitig zu unterstützen.

Ein elektrisches Feld besteht zwischen den entgegengesetzt geladenen Platten eines Kondensators, wobei wir die willkürliche Annahme machen, daß die Kraftlinien von der positiven Platte zur negativen verlaufen. Da im elektrischen Schwingungskreis die Elektrizität hin und her pendelt, vertauschen die beiden Kondensatorplatten ihren Ladungszustand mit jeder Schwingung, und es wechselt somit auch die Richtung der elektrischen Kraftlinien. Das elektrische Feld erreicht seine maximale Stärke jeweils dann, wenn die Spannung ein Maximum aufweist. Dies ist der Fall im Moment der Stromumkehr, also wenn die Stromstärke null ist. Umgekehrt ist das elektrische Feld null, wenn

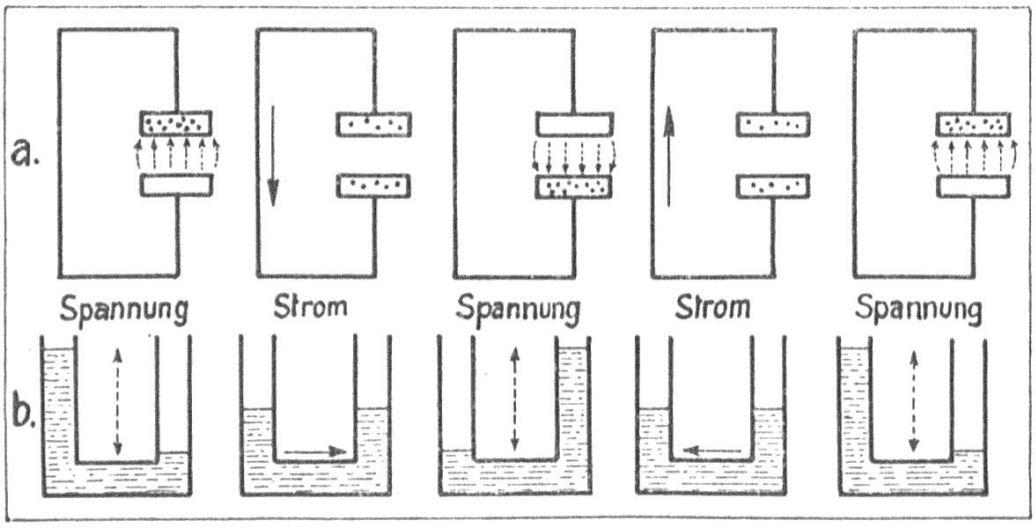

Fig. 33. Strom und Spannung.
a) elektrische Schwingung. b) Wasserschwingung.

der Strom das Maximum erreicht, da der Kondensator dann spannungslos ist. Das Wechselspiel zwischen Spannung und Strom veranschaulicht die Figur 33 a. Zum Vergleich ist in Fig. 33b die Wasserschwingung herbeigezogen.

Kurzschluß. Offener Schwingungskreis

Die Kraftlinien des elektrischen Feldes zwischen den beiden Kondensatorplatten haben einen kurzen Verlauf, sie sind „kurzgeschlossen", und es läßt sich nicht erwarten, daß sie auf das übertragende Medium, den hypothetischen Aether, einen merklichen Einfluß auszuüben imstande sind. Um das Strahlungsvermögen zu erhöhen, wird der Kondensator geöffnet, der Kraftlinienweg verlängert, der Kurzschluß also vermieden. Der geschlossene Schwingungskreis wird zum offenen Schwingungskreis, Fig. 34. Die eine Kondensatorplatte wird zur Hochantenne, die andere zum Gegengewicht ausgebildet. An Stelle des letzteren tritt häufig eine Erdverbindung.

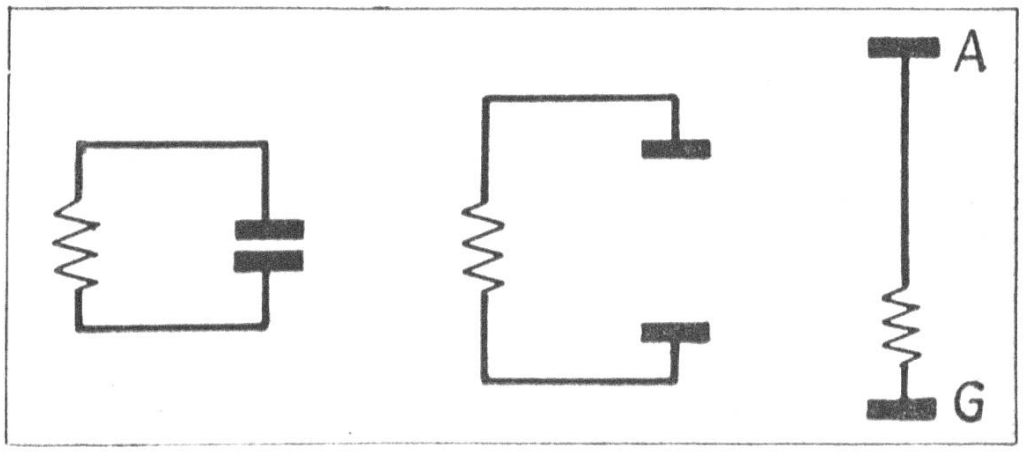

Fig. 34. Vom geschlossenen Schwingungskreis zum offenen Schwingungskreis.
A Antenne. G Gegengewicht.

Beiläufig mag daran erinnert werden, daß man in der Akustik von ähnlichen Kurzschlüssen spricht. Der Lautsprecherkonus Fig. 5 strahlt beidseitig, d. h. innen und außen, Schallwellen ab. Ein Teil der Schallwellen gleicht sich jedoch aus über den

Rand der Membran, pflanzt sich nicht fort in den Raum und kann somit nicht gehört werden. Diesen akustischen Kurzschluß, der namentlich die Wiedergabe der tiefen Töne beeinträchtigt, sucht man zu vermeiden, indem man das Uebergreifen der Schallwellen verunmöglicht durch Aufstellung einer Strahlwand.

Ein akustischer Kurzschluß besteht auch zwischen den beiden Aesten einer Stimmgabel. Zwingen wir die akustischen Kraftlinien, sich über einen weiten Weg auszugleichen, so wächst das Strahlungsvermögen bedeutend. Eine Stimmgabel, welche, kurzgeschlossen, im Raum nur noch schwach hörbar ist, tönt laut, wenn man sie an den passenden Ausschnitt einer Strahlwand aus Karton hält. Der Versuch wirkt überzeugend.

Beim Bau eines Senders handelt es sich darum, das Gebilde, bestehend aus Antenne und Gegenwicht oder Erde, so strahlungsfähig wie möglich zu gestalten, und zwar in bezug auf die magnetischen wie auf die elektrischen Wechselfelder. Fig. 35 veranschaulicht das Zusammenwirken beider Felder, welche in ihrer Gesamtheit das ausmachen, was man schlechthin als Radiowellen oder Radiostrahlen bezeichnet.

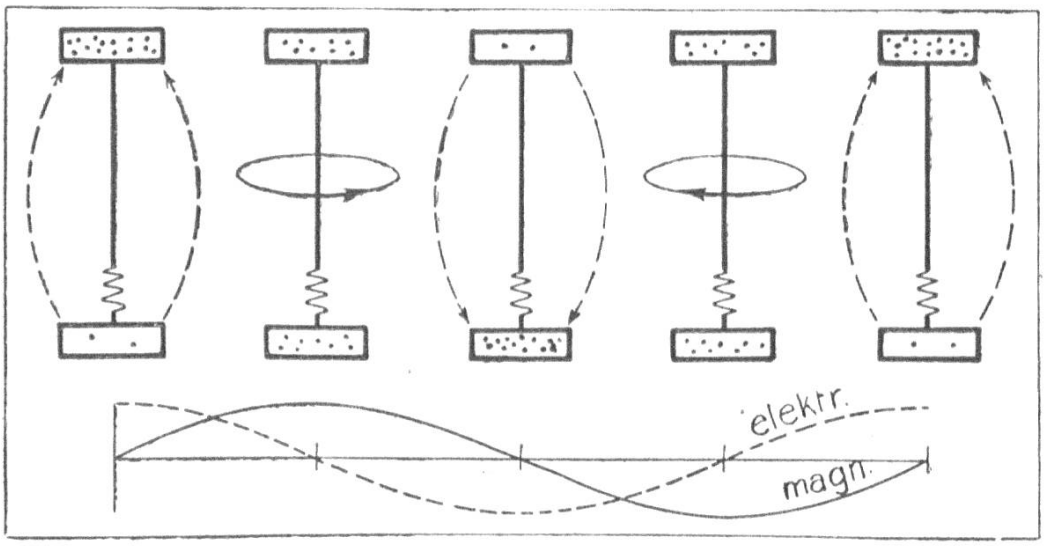

Fig. 35. Radiowellen.

Magnetisches Feld (Kraftlinien ausgezogen).
Elektrisches Feld (Kraftlinien punktiert).

Wellenlänge

Wir haben unseren Empfänger auf die Frequenz des Senders abgestimmt. Bei den Radiohörern ist das „Abstimmen auf die Wellenlänge“ gebräuchlicher. Die Wellenlänge errechnet sich analog der Länge einer Schallwelle aus Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Frequenz. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Radiowellen ist gleich der Lichtgeschwindigkeit, also 300000 Kilometer pro Sekunde. Die Gleichheit der beiden Geschwindigkeiten läßt sich während eines Gewitters mit Hilfe eines Radioempfängers leicht nachweisen. Im Moment, da ich einen Blitz sehe, meldet sich auch schon die elektrische Welle als Krachen im Lautsprecher, während der Donner erst später hörbar wird. Würde in einer Sekunde eine einzige Radiowelle ausgestrahlt, so könnte sie sich in dieser Sekunde 300000 km weit ausbreiten, ihre Wellenlänge wäre somit 300000 km. Werden pro Sekunde 100000 Wellen ausgestrahlt, so beträgt die Wellenlänge

$$300000 \text{ km} : 100000 = 3 \text{ km}$$

Beromünster sendet mit 653 Kilohertz, d. h. mit der Frequenz 653000. Es ergibt sich daraus die Wellenlänge:

$$300000 \text{ km} : 653000 = 0{,}4594 \text{ km} = 459{,}4 \text{ m}.$$

Modulation

In der Radiotelephonie werden die hochfrequenten Wellen ausgestrahlt zum Zwecke, die niederfrequenten Schwingungen in den Raum hinauszutragen. Wie man in der Drahttelephonie den Trägerstrom (in Fig. 4 ein Gleichstrom) durch die Schallwellen moduliert, so handelt es sich bei der Radioübertragung darum, den hochfrequenten Schwingungen die Telephonströme zu überlagern.

Die Strahlung unseres Funkensenders ist aus folgenden Gründen als Träger für die Telephonie unbrauchbar: Die einzelne Funkenentladung liefert einen gedämpften Schwingungszug, der, wie wir mit Hilfe der rotierenden Scheibe festgestellt haben, weniger als $^1/_{100000}$ Sekunde dauert. Um eine ununterbrochene Trägerwelle zu erzeugen, müßten pro Sekunde somit

mehr als 100000 Funkenentladungen stattfinden. Da die Funkenzahl eines Induktors relativ klein ist, so sind die ausgestrahlten Wellen nicht nur gedämpft, sondern auch noch unterbrochen.

Ungedämpfte und ununterbrochene Schwingungen lassen sich mit Hilfe eines Röhrensenders erzeugen. Für die folgenden Sendeversuche ziehe ich eine uns bestbekannte hochfrequente Schwingung heran, das Licht, welches, physikalisch betrachtet, sich von den üblichen Radiowellen nur in der Wellenlänge unterscheidet. Diese schwankt je nach der Farbe des Lichtes zwischen 0,0004 und 0,0007 Millimetern. Lichtstrahlen sind gewissermassen sichtbare Radiowellen, während letztere als unsichtbares Licht aufgefaßt werden können.

Die Photozelle

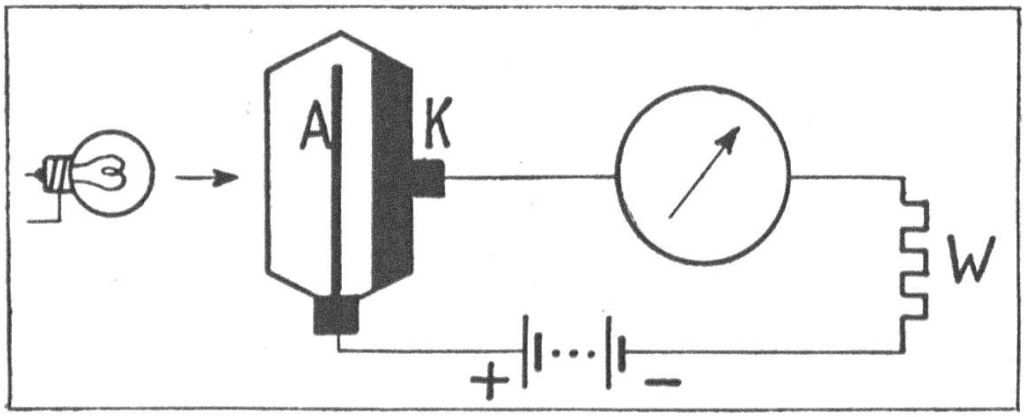

Fig. 36. Photozelle.
K Kathode. A Anode. W Widerstand von 0,1 bis 3 Megohm.

Zur Vorbereitung des Experimentes müssen wir zunächst Bekanntschaft machen mit der in Fig. 36 dargestellten Photozelle. Das Vakuumrohr ist innen zur Hälfte mit einem lichtelektrisch empfindlichen Niederschlag, z. B. mit kolloidem Kalium bedeckt. Diese als Kathode dienende Schicht steht mit der seitlichen Klemme in Verbindung, während die frei im Innern stehende Anode unten herausgeführt ist. In der für den Grundversuch gewählten Schaltung schützt ein Hochohmwiderstand die Zelle vor Ueberlastung. Die Spannung ist so zu wählen, daß ein Stromdurchgang durch das Vakuum ohne besondere Veranlassung nicht stattfindet. Solange die Zelle im Dunkeln steht,

zeigt das Meßinstrument keinen Strom. Sobald die Kaliumschicht belichtet wird, fließt ein Strom, dessen Stärke allerdings nur ein kleiner Bruchteil eines Milliampères beträgt. Die Erscheinung erinnert an die Radioröhre. Dort emittiert die Kathode, wenn sie erwärmt, hier, wenn sie belichtet wird. Es läßt sich weiter nachweisen, daß, gleiche Spannung vorausgesetzt, die Stärke des Photostroms abhängig ist von der Lichtintensität. Die Photozelle übersetzt somit Lichtschwankungen in Stromschwankungen. Belichte ich die Zelle mit einer Wechselstromlampe, so vernehme ich im Telephonhörer, den ich an die Stelle des Meßinstrumentes setze, einen Ton, dessen Höhe der Zahl der durch die Wechselstromfrequenz bedingten Lichtschwankungen entspricht.

Lichttelephonie

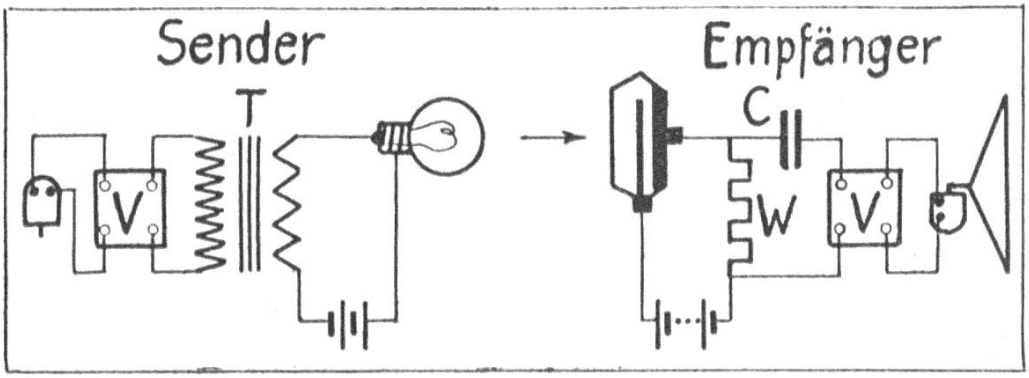

Fig. 37. Lichttelephonie.

Sender: V Verstärker. T Transformator, primär hohe Windungszahl, sekundär geringer Gleichstromwiderstand.

Empfänger: C Blockkondensator, 10000 bis 100000 cm. W Widerstand 0,1 bis 3 Megohm. V Verstärker.

In der Sendeschaltung Fig. 37 wird ein Grammophonstrom nach erfolgter Verstärkung über den Transformator dem Gleichstrom, welcher die Sendelampe speist, überlagert. Das Lämpchen strahlt die niederfrequenten Stromschwankungen als Lichtschwankungen aus, welche durch die Photozelle des Empfängers in Stromschwankungen rückverwandelt werden. Die Uebertragung kann man mit Hilfe eines Telephonhörers, den wir

in Serie zum Widerstand schalten, direkt abgehört werden. In der Empfangsschaltung Fig. 37 werden die Spannungsschwankungen, die sich an den Enden des Widerstandes ergeben, in bekannter Weise verstärkt, um die Töne einer größeren Zahl von Zuhörern wahrnehmbar zu machen.

Es ist zweckmäßig, die Strahlen unseres Lichtwellensenders mit Hilfe eines Parabolspiegels auf den Sender zu dirigieren und das Licht vor der Photozelle durch eine Konvexlinse zu sammeln. Von der Güte der Optik hängt es ab, ob die Uebertragung auf ein paar Meter oder auf größere Distanz gelingt.

Ich möchte nicht unterlassen, darauf hinzuweisen, daß das Experimentieren mit Photozellen einiges Geschick verlangt, und daß es ratsam ist, die Betriebsanleitung sorgfältig zu beachten.

Tonfilm

In der obigen prächtigen Anwendung der Photozelle liegt der Schlüssel für das Verständnis des Tonfilms. Bei der Verfilmung der Lichtsendung werden die Lichtschwankungen auf dem Filmstreifen als Helligkeitsschwankungen aufgezeichnet. Im Wiedergabeapparat läuft der Filmstreifen durch den Lichtstrahl einer Lampe und moduliert deren Licht. Eine Photozelle verwandelt die Lichtschwankungen in Stromschwankungen, welche nach erfolgter Verstärkung den Lautsprecher betätigen.

Radioempfang

Abstimmung der Empfangsantenne

Der geschlossene Schwingungskreis, bestehend aus Drehkondensator und Spule oder Rahmenantenne, mit dem wir in früheren Versuchen die Strahlung unseres Funkensenders empfangen haben, reagiert hauptsächlich auf magnetische Felder. Um auch der elektrischen Felder, die ein Radiosender ausstrahlt, teilhaftig zu werden, gehen wir gemäß Fig. 34 über

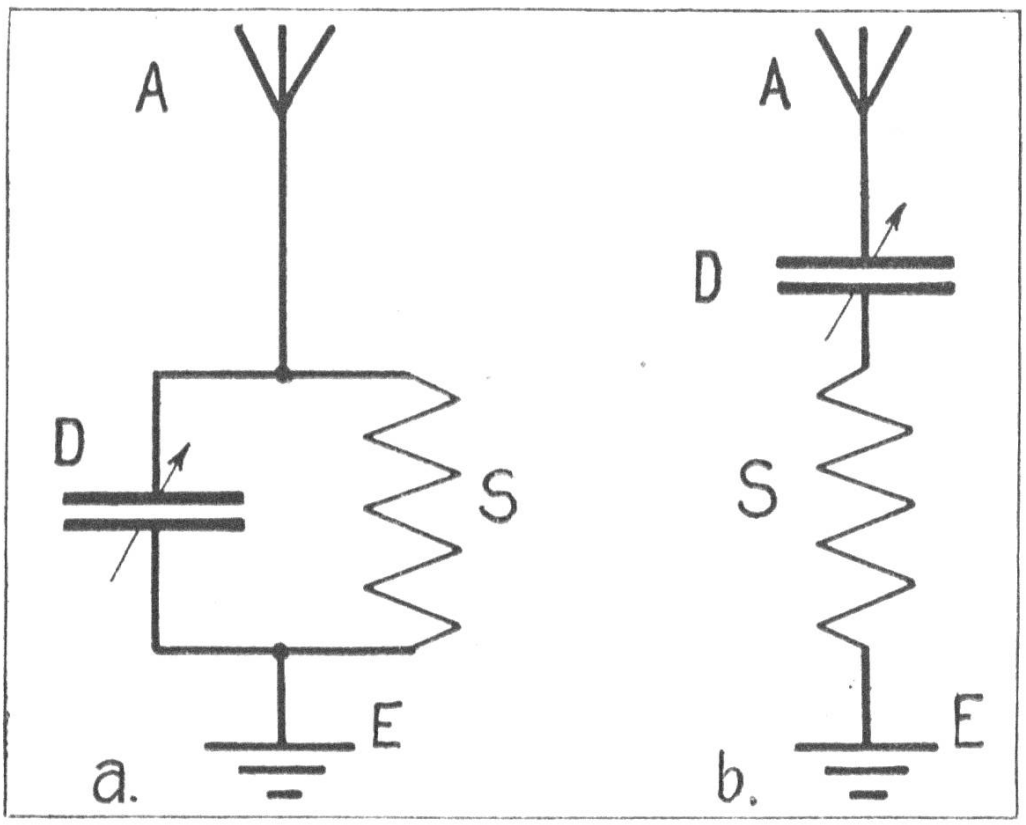

Fig. 38. Abstimmung der Empfangsantenne.
D Drehkondensator 500 cm. S Selbstinduktionsspule, auswechselbar 25 bis 200 Windungen. A Antenne. E Erde. a) Schaltung „lang". b) Schaltung „kurz".

zum offenen Schwingungskreis mit Antenne und Erde, Fig. 38. Die Antenne wird gebildet durch einen 10 bis 30 Meter langen Draht, der möglichst hoch, entweder im Freien oder im Estrich, gut isoliert ausgespannt wird. Die Erdverbindung wird am einfachsten durch Anschluß an die Wasserleitung erhalten. Drehkondensator und Spule werden entweder parallel (Fig. 38a) oder in Serie (Fig. 38b) geschaltet. Die erstere Anordnung bedarf wohl keiner weiteren Erklärung. Bei der Serieschaltung unterteilt der Kondensator den Stromweg in zwei Abschnitte, was jedoch für den hochfrequenten Wechselstrom kein Hindernis bedeutet. Die Schwingung im obern Abschnitte influenziert im untern Teil eine Schwingung von derselben Frequenz. Die Unterteilung in 2 Schwingungssysteme verkürzt den Weg, die Schaltung ist somit geeignet für den Empfang hoher Fre-

quenzen, bezw. kurzer Wellen. Die Radiosprache bezeichnet die Anordnung a als Schaltung „kurz“, die Anordnung b als Schaltung „lang“.

Der Kristallempfänger

In der auf Beromünster abgestimmten Empfangsantenne fließt ein hochfrequenter Wechselstrom von 653 Kilohertz. Die an der Spule oder am Drehkondensator auftretenden Spannungsschwankungen genügen jedoch nicht, um die Glimmlampe zum Leuchten zu bringen. Der Telephonhörer, der uns sonst geholfen hat, schwache Wechselströme nachzuweisen, versagt infolge des für Hochfrequenz enormen Selbstinduktionswiderstandes der Magnetspulen. Uebrigens hat es gar keinen Sinn, die hochfrequenten elektrischen Schwingungen in Schallwellen umzusetzen, da das menschliche Ohr die Töne als zu hoch doch nicht wahrnehmen könnte. Es handelt sich vielmehr darum, dem hochfrequenten Trägerstrom die niederfrequente Ladung, den überlagerten Telephonstrom, abzunehmen. Dies besorgt nach Schaltung Fig. 40 der Kristalldetektor, dessen Bau die Fig. 39a erläutert. Eine federnde Metallspitze wird auf einen

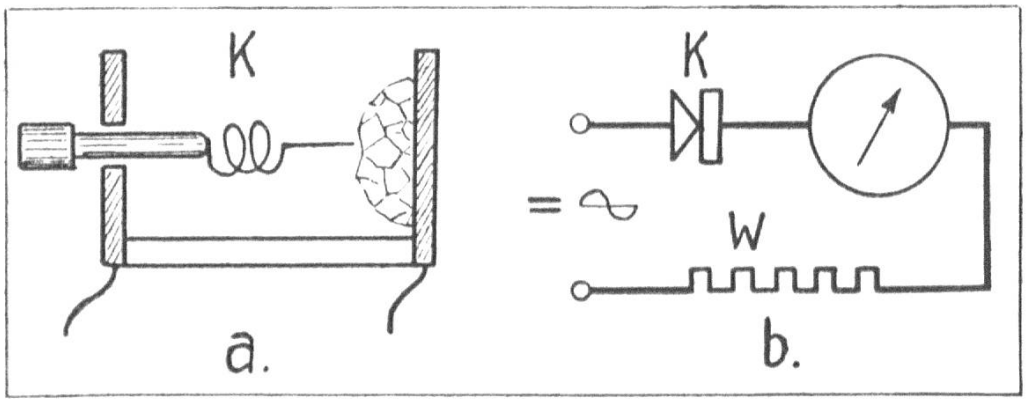

Fig. 39. Kristalldetektor K.
a) Ansicht. b) Nachweis der Gleichrichterwirkung.

Kristall, meist Bleiglanz, aufgesetzt. Die Kontaktstelle wirkt als elektrisches Ventil, das den Strom nur in der einen Richtung passieren läßt. Der experimentelle Nachweis dieser

physikalisch nicht restlos aufgeklärten Erscheinung ist gemäß Versuchsschaltung Fig. 39b leicht zu erbringen. Der Stromkreis, Detektor-Galvanometer-Widerstand, wird zunächst mit Gleichstrom verschiedener Richtung, hernach mit Wechselstrom gespiesen. Dabei sind Spannung und Widerstand so zu wählen, daß die Stromstärke einige Milliampères nicht übersteigt. Dem Empfangswechselstrom (Fig. 40) stehen in Richtung Antenne-

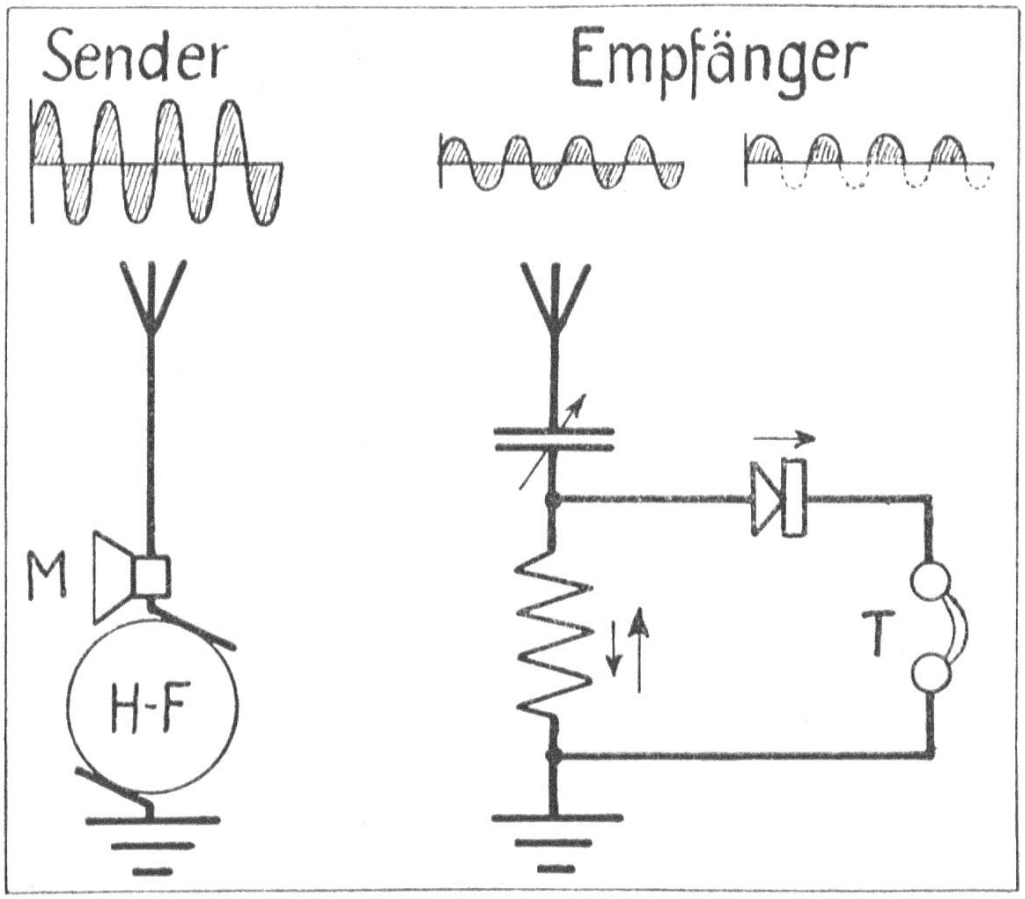

Fig. 40. Radiotelephonie (Trägerstrom unmoduliert).
Sender (stark schematisiert): H-F Apparatur zur Erzeugung des hochfrequenten Trägerstromes. M Mikrophon.
Empfänger: Kristallempfänger. Schaltung „kurz". T Kopfhörer.

Erde zwei Wege offen, ein erster via Spule, ein zweiter via Kristall-Telephonhörer. In umgekehrter Richtung ist der letztere Weg als „Einbahnstraße" gesperrt. Der Einwegstrom ist zwar kein ruhiger und gleichmäßiger, sondern ein pulsierender und unterbrochener Gleichstrom, der aber zufolge der hohen Pulszahl wie ein regelrechter Gleichstrom wirkt.

Die Sendeschaltung Fig. 40 ist stark schematisiert gezeichnet. In Wirklichkeit sind Sendeanlage und Mikrophon räumlich voneinander getrennt. So wird z. B. der deutsch-schweizerische Landessender Beromünster aus den Studios Bern, Basel oder Zürich besprochen. Der Mikrophonstrom wird per Kabel nach dem Sender geleitet, wo er, nach vorangegangener wiederholter Verstärkung, den hochfrequenten Trägerstrom moduliert. Der letztere wird unter großem Energieaufwand durch eine Reihe mächtiger Senderöhren, die sich prinzipiell von der besprochenen Radioröhre nur in der Größenordnung unterscheiden, geliefert.

Die Stärke des Detektorgleichstromes ist letzten Endes abhängig von der Stärke der ankommenden Wellen. Solange der Sender unmodulierte Wellen ausstrahlt, ist der Empfangswechselstrom konstant, ebenso der Detektorgleichstrom, der

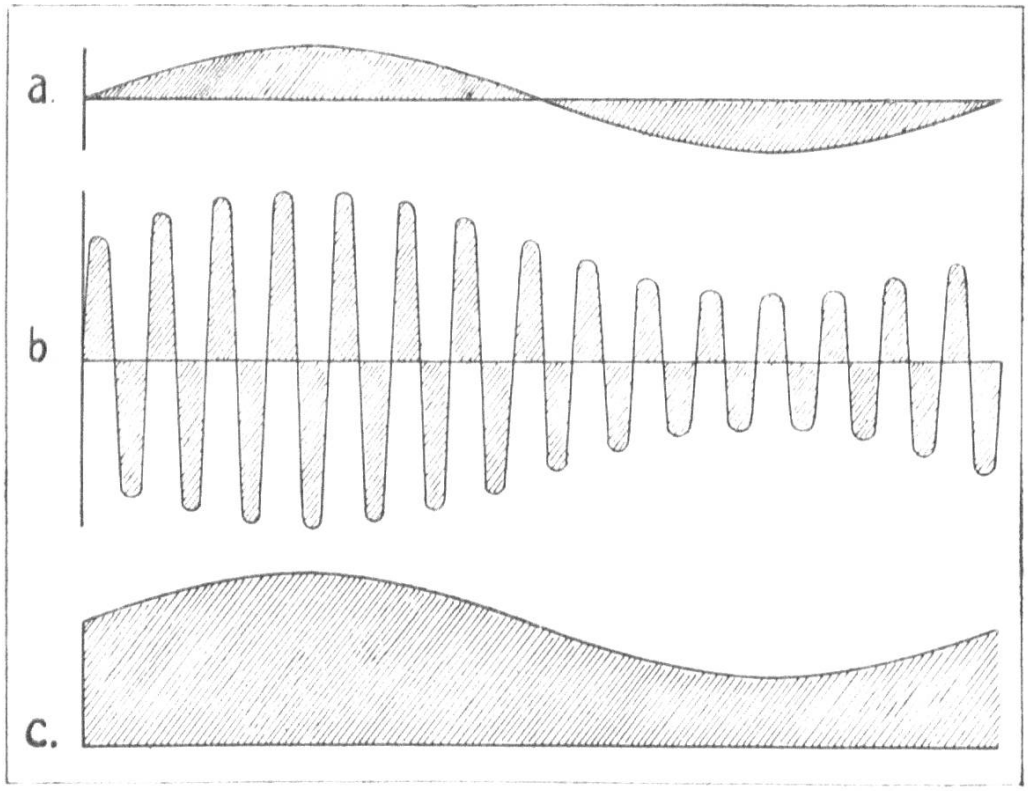

Fig. 41. Modulation des hochfrequenten Trägerstromes.
a) 1 Periode des Mikrophonstromes. b) Hochfrequenter Trägerstrom mit 1 überlagerten Telephonschwingung. c) Detektorgleichstrom mit 1 Telephonschwingung.

Telephonhörer schweigt. Anders bei besprochenem Mikrophon, Fig. 41. Die niederfrequenten Telephonschwingungen a werden dem Trägerstrom b überlagert. Die Wellen schwankender Amplitude erzeugen in der Empfangsantenne einen schwankenden sekundären Wechselstrom und im Detektorkreis einen Wellenstrom c, dessen Schwankungen durch den Telephonhörer in Schallwellen umgesetzt werden.

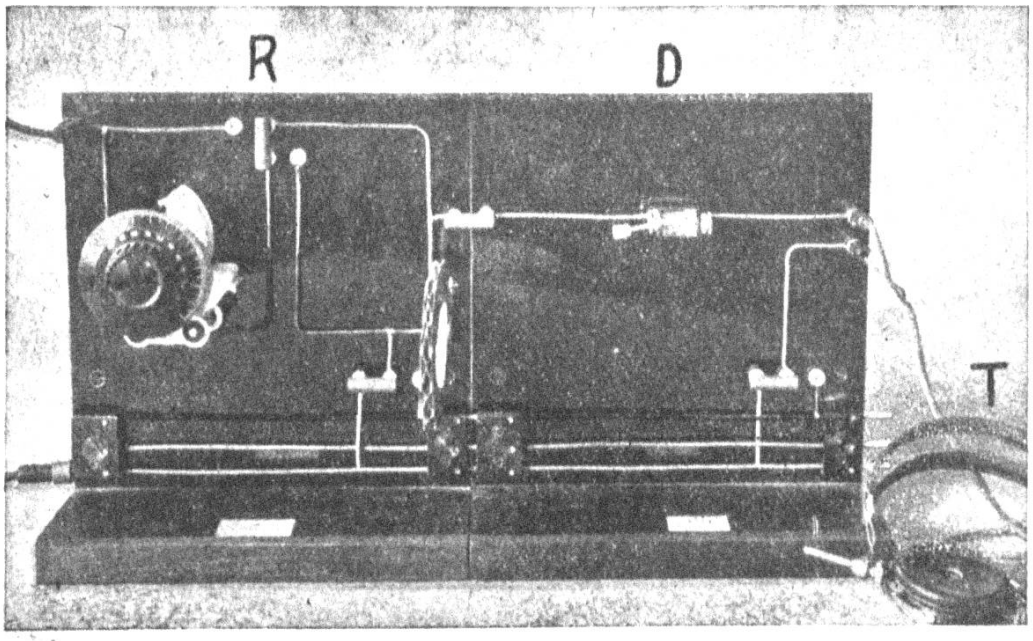

Fig. 42. Kristallempfänger, Schaltung „kurz".
R Lehrmodell „Resonanz". D Lehrmodell „Detektor". T Kopfhörer.

Für Lautsprecherempfang reicht die Detektorschaltung, deren praktische Ausführung Fig. 42 zeigt, allerdings nicht. Wir sind jedoch in der Lage, den niederfrequenten Telephonstrom zu verstärken. Die Schaltung Fig. 43 und deren Ausführung Fig. 44 bedürfen keiner weiteren Erklärung. Ist die Lautstärke immer noch nicht ausreichend, so schließen wir gemäß Fig. 19 eine weitere Verstärkerstufe an.

Der Kristallempfänger kommt nur in Frage für den Empfang starker oder naher Sender. Bei geringer Eingangsenergie versagt er, und es kann die beste Niederfrequenzverstärkung

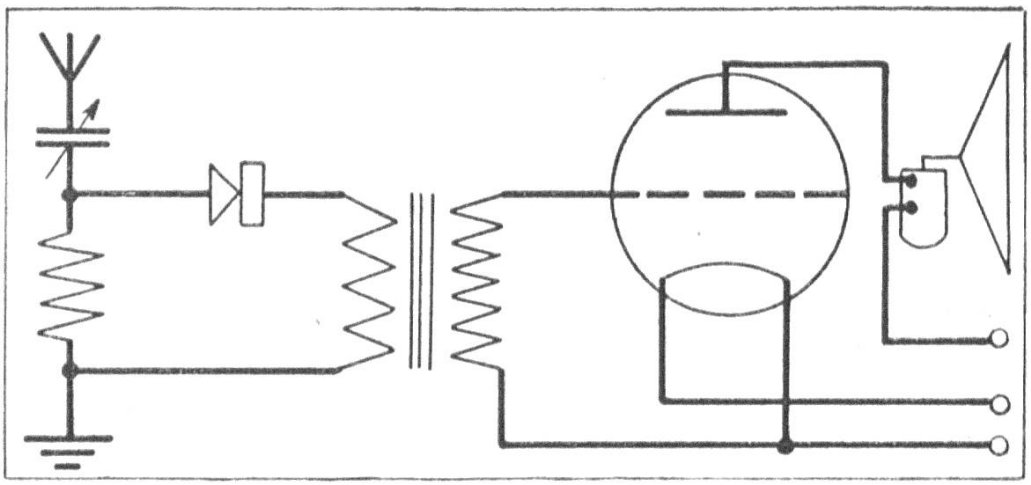

Fig. 43. Kristallempfänger mit einstufiger Niederfrequenzverstärkung, Schaltung „kurz".

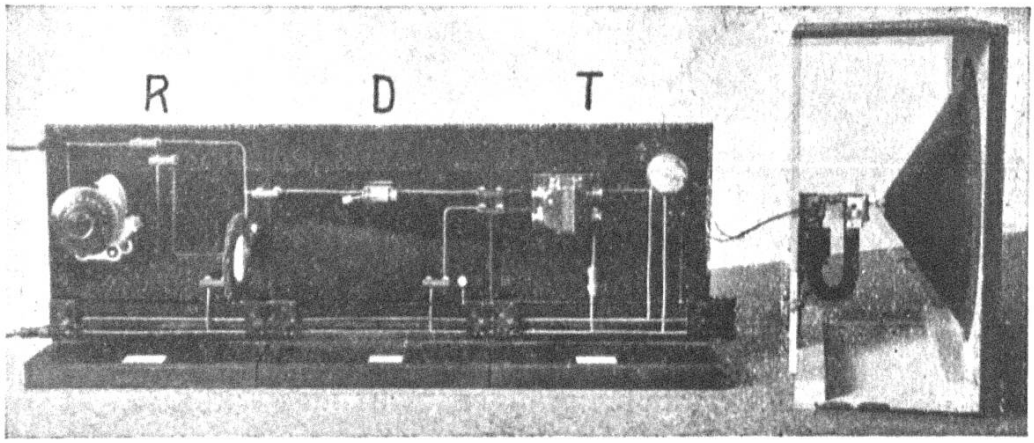

Fig. 44. Kristallempfänger mit einstufiger Niederfrequenzverstärkung, Schaltung „lang".
R Lehrmodell „Resonanz". D Lehrmodell „Detektor".
T Lehrmodell „Transformatorverstärker".

nicht zum Erfolg verhelfen. Die Kombination von Kristall und Röhren hat höchstens für den Bastler noch einige Bedeutung, in leistungsfähigen Apparaten ist sie kaum je angewendet worden.

Die Herstellung eines Kristallempfängers ohne nachfolgende Verstärkung hat den Vorteil, nicht viel zu kosten. Als Abstimmorgan genügt die Spule, die man aus dünnem, isolier-

tem Kupferdraht auf eine Kartonrolle von einigen Centimetern Durchmesser wickelt. Die Windungszahl wird durch den Versuch ermittelt. Auf den Drehkondensator läßt sich verzichten, da der Apparat doch nur für den Empfang einer einzigen Station taugt.

Das Audion

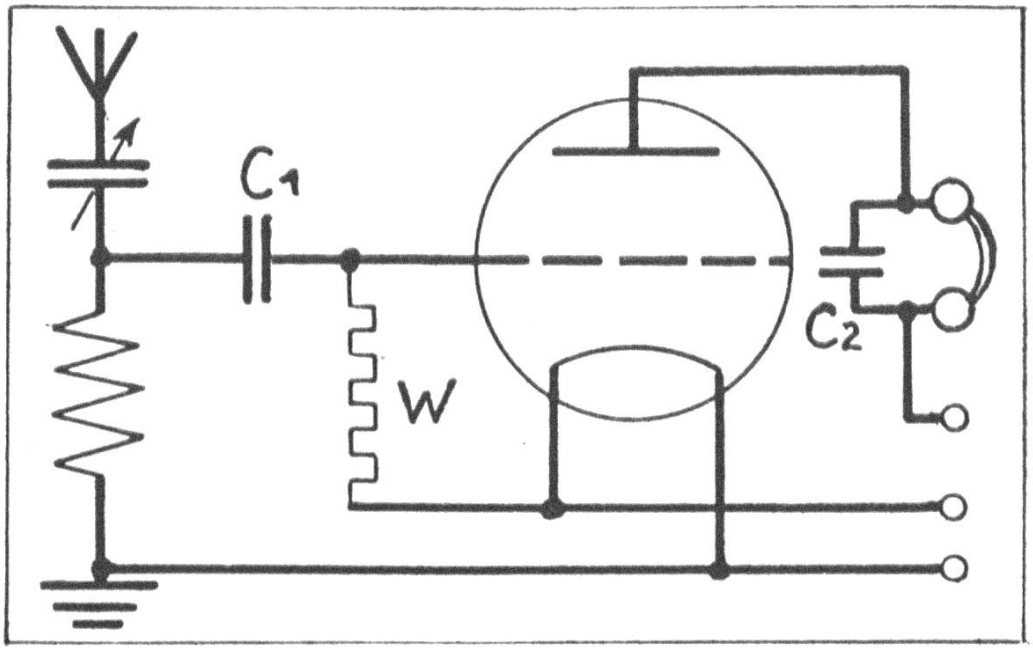

Fig. 45. Audion, Schaltung „kurz".
C1 Blockkondensator, 200 bis 300 cm. C2 Blockkondensator, 2000 cm.
W Widerstand 1 bis 3 Megohm.

In Schaltung Fig. 45 wird die Funktion des Detektors, dem Trägerstrom die niederfrequente Ueberlagerung abzunehmen, von einer Radioröhre besorgt. Die hochfrequenten Schwingungen, die sich ähnlich wie bei der Widerstandsschaltung über einen Blockkondensator dem Gitter übermitteln, rufen im Anodenstrom hochfrequente Schwankungen hervor, die jedoch die Telephonspule nicht passieren können. Ihr Ausgleich wird ermöglicht durch den parallel zum Hörer liegenden Blockkondensator. Bei der Besprechung des Widerstandsverstärkers habe ich auf die Rolle des Gitterstroms (in Fig. 17 durch punktierte

Pfeile angedeutet) hingewiesen. Der Gitterstrom fließt von der Kathode zum Gitter und muß über einen hochohmigen Widerstand abgeleitet werden, um das Gitter wieder frei zu machen. Der Gitterstrom fließt umso stärker, je positiver das Gitter ist. Je kräftiger die Spannungsschwankungen sind, welche von der Antenne auf das Gitter gelangen, desto mehr Elektronen fließen jeweils in der positiven Hälfte der Periode auf das Gitter. Der Gitterstrom ist somit abhängig von der Stärke der empfangenen Radiowellen. Gleichmäßige, also unmodulierte Wellen erzeugen einen gleichmäßigen Gitterstrom. Nun ist der Ableitwiderstand so bemessen, daß er gerade ausreicht, um diesen Gitterstrom mittlerer Stärke ohne Verzug abzuführen. Bei Empfang von modulierten Wellen wechseln Serien von stärkeren mit Serien von schwächeren Wellen ab, Fig. 41b. Eine Reihe von kräftigen Wellen erzeugt einen so starken Gitterstrom, daß die Gitterableitung mit dem Abführen der Elektronen nicht nachkommt. Die Ladung staut sich auf dem Gitter, der Anodenstrom nimmt ab. Während der darauffolgenden Serie von schwachen Wellen ist der Gitterstrom verhältnismäßig gering, derart, daß die Gitterabteilung ihrer Aufgabe wieder gerecht wird und das Gitter entlastet, was ein Anwachsen des Anodenstroms zur Folge hat. Der Anodenstrom wird somit durch die dem Trägerstrom überlagerten Telephonströme gesteuert; er wird zum niederfrequenten Wellenstrom, dessen Schwankungen in bekannter Weise in Schallwellen umgesetzt werden. Weil die Röhre zugleich verstärkt, ist die unter dem Namen Audion bekannte Schaltung wirksamer als der Kristalldetektor. Wichtig ist die richtige Dimensionierung der einzelnen Schaltelemente. Die Kapazität des parallel zum Telephonhörer liegenden Kondensators, der den hochfrequenten Schwankungen den Ausgleich ermöglichen soll, darf nicht zu groß sein, da sonst auch die höheren Telephonfrequenzen „kurzgeschlossen“ und dadurch der Umwandlung in Schallwellen entzogen würden. Anderseits darf sich die Drosselwirkung der Telephonspule nur auf die Hochfrequenz erstrecken. Die richtige Wahl dieser Werte ist von großem Einfluß auf die Natürlichkeit der Wiedergabe von Musik und Sprache.

Rückkopplung

Die Wirksamkeit des Audions kann bedeutend gesteigert werden durch Einführung der Rückkopplung, Figur 46. Im

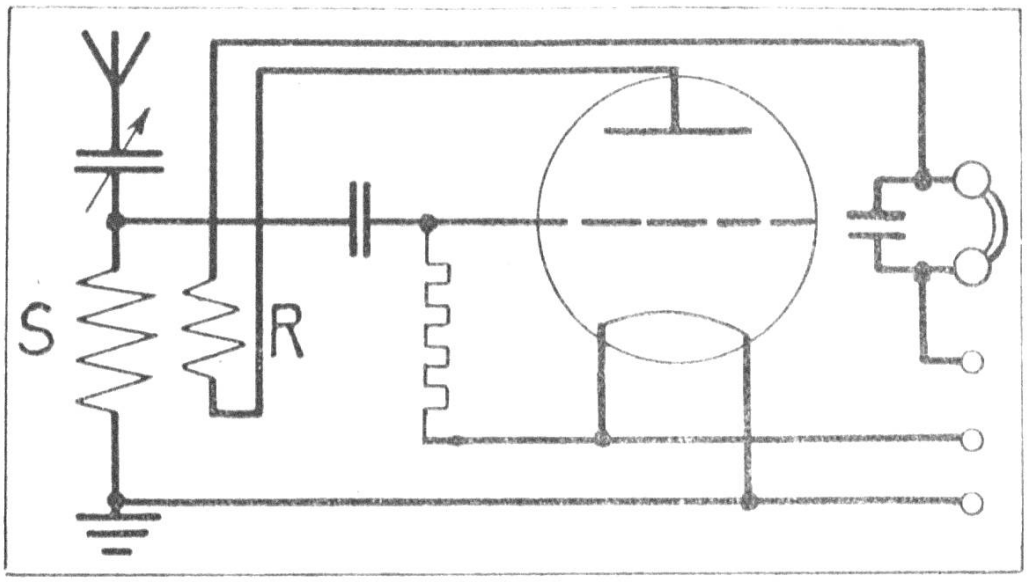

Fig. 46. Rückkopplungsaudion, Schaltung „kurz".
S Abstimmspule 50 bis 75 Windungen.
R Rückkopplungsspule 25 bis 50 Windungen.

Anodenkreis liegt die Spule R. Die Schwankungen des Anodenstromes erzeugen um diese Spule ein schwankendes magnetisches Feld, welches wir induktiv auf die Abstimmspule S einwirken lassen. Wir koppeln also induktiv rückwärts auf die Antenne und verstärken dadurch den Empfangswechselstrom. Daraus ergeben sich größere Amplituden des Anodenwellenstromes mit erhöhter Wirkung auf die Telephonmembran. Das Endresultat ist vermehrte Lautstärke. Die Rückkopplung läßt sich regulieren durch Verändern des Spulenabstandes. Fig. 47 zeigt die Ausführung des rückgekoppelten Audionempfängers. Die Schaltung läßt sich in bekannter Weise ergänzen durch ein bis zwei Niederfrequenzstufen.

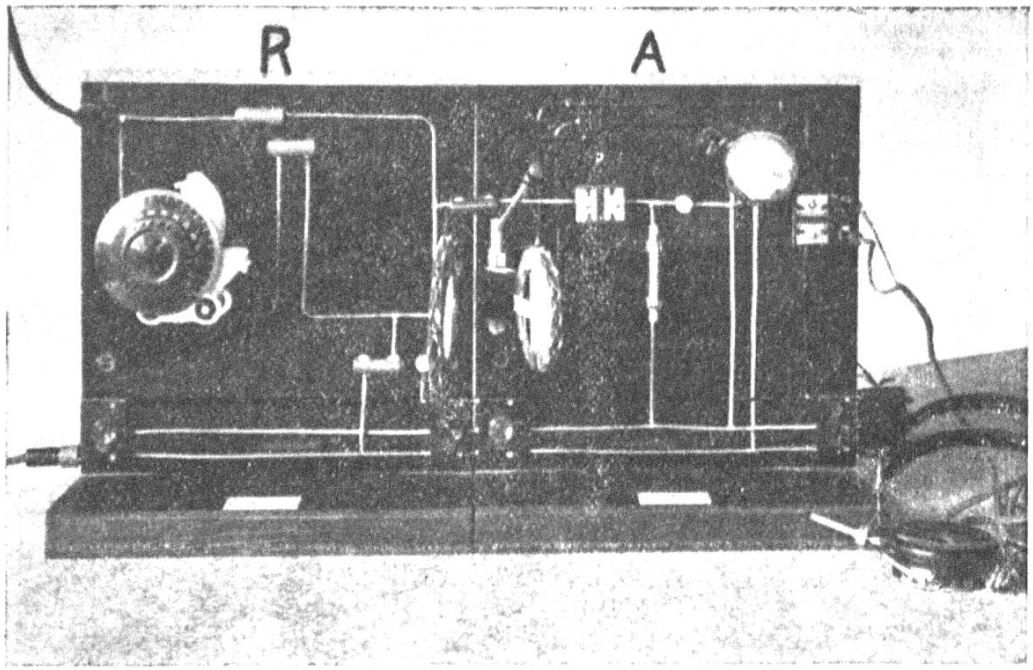

Fig. 47. Rückkopplungsaudion, Schaltung „lang".
R Lehrmodell „Resonanz". A Lehrmodell „Audion".
Spulen auswechselbar, Rückkopplungsspule schwenkbar.

Hochfrequenzverstärkung

Die Empfindlichkeit des Rückkopplungsaudions ist hinreichend, um die wichtigsten europäischen Sender zu empfangen. Voraussetzung ist jedoch eine genügend große Antenne. Eine solche läßt sich aber nicht überall bequem erstellen. Je kürzer die Antenne ist, desto weniger fängt sie von der vom Sender ausgestrahlten Energie auf. Das Audion arbeitet aber nicht unter einer gewissen minimalen Eingangsenergie. Bleibt der Antennenwechselstrom unter der sog. Reizschwelle, so spricht das Audion überhaupt nicht an, und der Mangel an Energie kann durch die beste Niederfrequenzverstärkung nicht wettgemacht werden. Wenn wir nicht auf den Empfang verzichten wollen, so müssen wir hochfrequent verstärken und zwar vor dem Audion. In der Schaltung Fig. 48, deren Ausführung Fig. 49 zeigt, wird der Empfangswechselstrom durch eine Radioröhre soweit verstärkt, bis er mindestens die Reizschwelle des Audions erreicht. Da

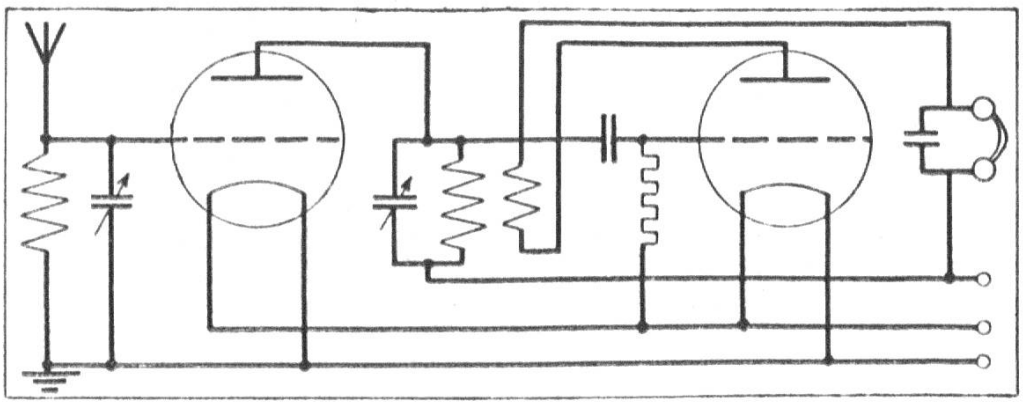

Fig. 48. Rückkopplungsaudion mit Hochfrequenzverstärkung.

der Anodenkreis der Hochfrequenzstufe von hochfrequenten Schwingungen durchflossen wird, so ist er, wie die Empfangsantenne, auf die Sendefrequenz abzustimmen. Die Bedienung von zwei Abstimmkreisen gestaltet die Einstellung des Empfängers etwas umständlich. In den Empfängern neuern Datums wird dieser Nachteil dadurch beseitigt, daß man die Drehkondensatoren mechanisch koppelt, so daß sie sich mit Hilfe eines einzigen Knopfes gleichzeitig einstellen lassen.

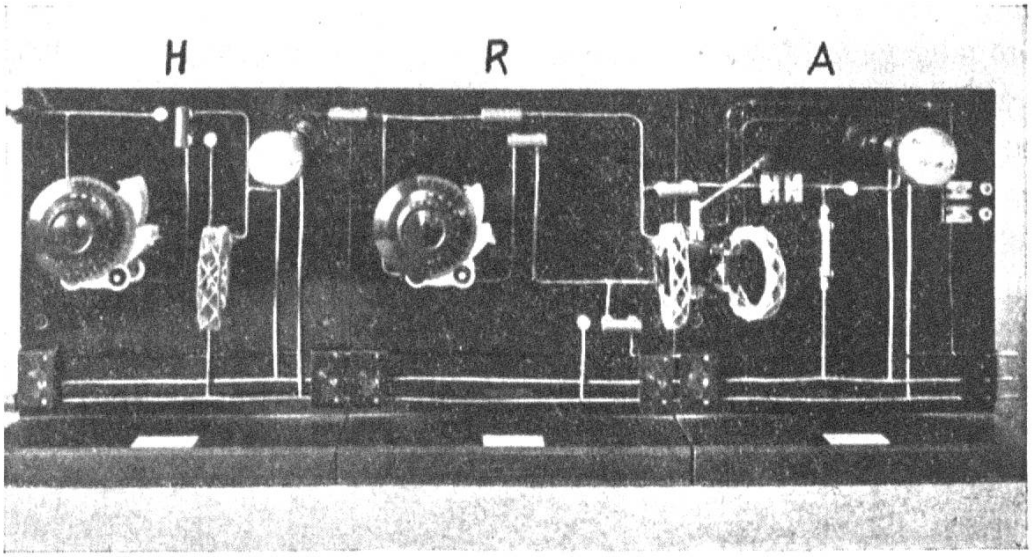

Fig. 49. Rückkopplungsaudion mit Hochfrequenzverstärkung.
H Lehrmodell „Hochfrequenz". R Lehrmodell „Resonanz".
A Lehrmodell „Audion".

Die Hochfrequenzverstärkung erhöht die Empfindlichkeit des Empfängers, die Niederfrequenzverstärkung vermehrt die Lautstärke. In größeren Apparaten wendet man beide Verstärkungsarten an, 1-3 Hochfrequenzstufen vor, 1-2 Niederfrequenzstufen nach dem Audion. Mit dem Vierröhrengerät Figur 50 schließe ich meine experimentelle Einführung in die Radiotechnik und wünsche guten Erfolg.

Lehrmodelle

Neuer Lehrstoff ruft nach neuen Apparaten. Spulen, Magnete, Meßinstrumente usw. sind in jeder physikalischen Sammlung zu finden. Was aber heute noch fehlt, das sind eigentliche Radio-Lehrmodelle. Wer schon versucht hat, aus dem Wirrwarr der Bestandteile und Leitungen eines für normale Bedürfnisse gebauten Empfängers die Schaltung herauszulesen, versteht, daß ein Radiolehrgerät speziell für seine Zwecke gebaut sein muß. Es muß so beschaffen sein, daß die Schaltung mühelos gelesen und nachgezeichnet werden kann. Der Verfasser hat sich zur Aufgabe gestellt, zu dem vorliegenden Lehrgang auch die notwendigen Geräte zu konstruieren. Wie die Abbildungen zeigen, besteht die Apparatur aus 6 Modellen, die sich beliebig kombinieren lassen. Die Verbindung mittels Dreifach- und Kurzschlußstecker gestattet ein bequemes Zusammenschalten der einzelnen Teile. Fehlschaltungen, die zu Kurzschlüssen oder zur Zerstörung kostbarer Röhren führen, sind praktisch ausgeschlossen. Die genannte Verbindungsart gibt der Apparatur zugleich die nötige mechanische Stabilität. Die Schaltdrähte sind absichtlich alle auf der Vorderseite der Montageplatten verlegt, farbige Isolierröhrchen erhöhen die Sichtbarkeit und Uebersichtlichkeit der Schaltung.

Die zum Patent angemeldete Apparatur ist vorläufig im Handel nicht erhältlich. Man wende sich an den Verfasser,

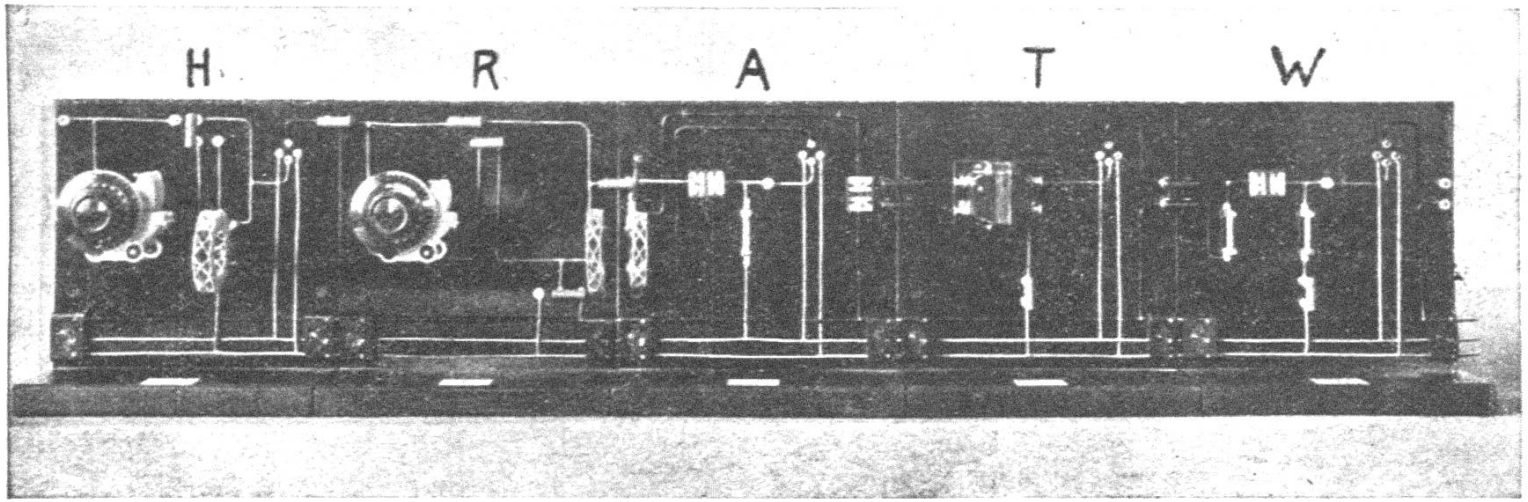

Fig. 50. Mehrstufiger Empfänger.

H Lehrmodell „Hochfrequenz“. R Lehrmodell „Resonanz“.
A Lehrmodell „Audion“. T Lehrmodell „Transformatorverstärker.
W Lehrmodell „Widerstandsverstärker“.