Abhandlungen über Telephonverstärker

Autor(en): **[s. n.]**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung = Bulletin technique / Administration des télégraphes et des téléphones suisses = Bollettino tecnico / Amministrazione dei telegrafi e dei telefoni svizzeri**

Band (Jahr): **3 (1925)**

Heft 5

PDF erstellt am: **20.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-873913

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

Abhandlungen über Telephonverstärker.

Vorwort.

In Altdorf und Brig bestehen seit einigen Jahren kleinere Verstärkerausrüstungen, die auf den Telephonleitungen nach Italien gute Dienste leisten. Sodann werden gegenwärtig Verstärkerstationen grösseren Umfanges in Bern, Zürich und Basel errichtet, deren Erstellung durch den Ausbau des schweizerischen Kabelnetzes bedingt wird. Unter diesen Umständen dürfte eine Darbietung willkommen sein, welche die Geschichte der Telephonverstärker kurz zusammenfasst und auch wichtige Forderungen hervorhebt, die sich aus den im Verstärkerbetrieb bis jetzt gemachten Erfahrungen ergeben. Aus den Laboratorien, die sich mit der Entwicklung der Telephonie befassen und aus Kreisen, welche auf dem Verwendungsfelde der Verstärker Pionierarbeit leisten, ist eine umfangreiche Literatur hervorgegangen. Aus diesem Material sind drei Artikel ausgewählt worden, die mit einigen Kürzungen und Anpassungen in Uebersetzung hiernach veröffentlicht werden sollen. Die mit Erlaubnis der Verfasser benützten Quellen sind:

Telephone Repeaters, by Bancroft Gherardi and Frank Jewett; Telephone Transmission Over Long Cable Circuits, by A. B. Clark; Transmission Maintainance of Telephone Systems, by P. E. Erikson and R. A. Mack. A. S.

Telephonverstärker.[1])

Von Gherardi und Jewett.

ZUSAMMENFASSUNG.

In dieser Abhandlung sind die Verfasser bestrebt, die Geschichte der Untersuchungs- und Entwicklungsarbeit, welche schliesslich zur Herstellung einwandfreier Telephon-Verstärker führte, in kurzer und klarer Weise darzustellen. Die verschiedenen Formen von Verstärkern, welche vorgeschlagen wurden, sind beschrieben und der Wert ihrer Verwendbarkeit sowie ihre Leistungsgrenzen hervorgehoben. Die hauptsächlichsten Anforderungen an künstliche Leitungen, sowie die Leitungsverhältnisse, welche zusammen für einen erfolgreichen Verstärkerbetrieb als unerlässlich gelten, sind auseinandergesetzt und bildlich dargestellt. Endlich werden die Hintereinanderschaltung von Verstärkern und die Vierdrahtschaltung besprochen.

Einleitung.

Der Gedanke, in eine Leitung einen oder mehrere Verstärker einzuschalten, um durch Verwendung einer örtlichen Energiequelle den von der Abgangsstation abgesandten, aber geschwächten Strom zu verstärken, ist älter als das Telephon selbst. Seit dem Erscheinen des Telephons sind von einer grossen Zahl von Erfindern ungezählte Anstrengungen gemacht worden, um die Reichweite der telephonischen Sprachübertragung durch Zuführung von Energie an einer oder mehreren, zwischen den Abgabe- und Empfangsstationen liegenden Stellen der Telephonleitung zu vergrössern.

Obschon die heutige hochentwickelte Verstärkertechnik das Ergebnis all dieser Arbeiten ist, zeigt doch ein Rückblick auf die früheren Anstrengungen, dass diese keinen Erfolg haben konnten, wenn unter Erfolg die Schaffung eines zweckdienlichen Apparates, welcher in einer gewöhnlichen Telephonleitung befriedigend arbeitet, verstanden wird.

Heute wissen wir, dass die erfolgreiche Weiterentwicklung und Verwendung des Telephonverstärkers warten musste, und zwar nicht nur auf die langsame Erkenntnis der für eine erfolgreiche elektrische Sprachübertragung über Drahtleitungen gültigen Gesetze und der verwickelten Beziehungen zwischen Schaltungen und Apparaten in Abhängigkeit von den durch die menschliche Sprache erschwerten Frequenzverhältnissen, sondern auch auf Entwicklungen in der Physik, die an und für sich dem eigentlichen Gebiete der Telephonie fremd waren.

Geschichtliches.

Es war gegeben, dass die angestrengten Untersuchungen, welche die Vergrösserung der Reichweite telephonischer Uebertragung herbeiführen sollten, durch die früheren, auf telegraphischem Gebiete erzielten Erfolge beeinflusst wurden. In der Telegraphie zeigte es sich bei der Nachrichtenübermittlung zwischen zwei weiter auseinanderliegenden Stationen bald, dass die ankommenden Ströme zur Betätigung des Registriermechanismus zu schwach waren. Man suchte natürlich diesem Uebelstande abzuhelfen. So verwendete Morse eine Lokalbatterie, welche Strom für den Registriermechanismus abgab, und welche an ein elektromagnetisches Relais gekoppelt war, das die ankommenden Zeichen empfing.

In dieser Lösung war der Grundbegriff für ein unbeschränktes Hinausrücken der Reichweite einer Verbindung niedergelegt, da ja die Lokalbatterie Strom für eine weitere Verbindungsstrecke abzugeben imstande war. Merkwürdigerweise wurde diese Verstärkungsmöglichkeit mehrere Jahre unbenutzt gelassen, und man fuhr fort, die Zeichenübertragung über lange Strecken auf den Zwischenstellen von Hand statt selbsttätig vorzunehmen.

Die Verzögerung in der natürlichen Entwicklung war dem Umstande zuzuschreiben, dass das Relais von Morse, obschon tatsächlich ein Verstärker, nur in einer Richtung wirkte, da es nur vom Strom der einen der beiden Endstellen betätigt werden konnte. Es bedurfte deshalb zweier solcher Verstärkerelemente und dazu einer geeigneten Schaltung, um eine einseitig wirkende Verstärkerstelle in eine beidseitig wirkende zu verwandeln. Eine der zuerst angegebenen Schaltungen dieser Art war diejenige von Varley. Im Laufe der folgenden Jahre wurde den gegensprechenden Verstärkern grosse Aufmerksamkeit geschenkt. Zwar wurde der uns heute so klar vorschwebende Unterschied zwischen den Verstärkerelementen und der Schaltung, welche gegen-

[1]) Für die Uebersetzung ist das Original in einigen Punkten gekürzt worden. In extenso wurde die Abhandlung am 1. Oktober 1919 erstmals vorgelegt, und zwar anlässlich einer Zusammenkunft des „Institute of Electrical Engineers" und des „Institute of Radio Engineers" in New York. Die Arbeit hat die Herren Bancroft Gherardi, Vize-Präsident und Chefingenieur der „American Telephone and Telegraph Company", und Dr. Frank B. Jewett, Präsident der Laboratorien des Bell Telephone Konzerns, New-York, zu Verfassern. Sie ist im Rahmen eines Berichtes abgefasst.

sprechende Verstärkung durch solche Elemente zuliess, wenig oder nie zur Sprache gebracht.

Für die Vergrösserung der Reichweite in der Telephonie durch Verwendung von Verstärkern war die Eigenschaft des Gegensprechens noch unerlässlicher als in der Telegraphie. Das Problem wurde nicht nur durch die vererbte Begriffsvermengung von Verstärkerelement und Verstärkerschaltung erschwert, sondern auch durch die grössere Wichtigkeit des dritten Faktors dieses Problemes, der Leitungen zu beiden Seiten der Verstärkerstelle.

Schon frühzeitig war man von der Notwendigkeit der Unterscheidung dieser drei Faktoren, nämlich Verstärkerelement, Verstärkerschaltung und Leitungen, durchdrungen. Die genauen, zahlenmässigen Beziehungen zwischen denselben sind seit langer Zeit richtig ausgedrückt worden. Im nachfolgenden ist die durch diese Unterscheidung bedingte Reihenfolge berücksichtigt, und es sind die Faktoren entsprechend getrennt behandelt. Es dürfte vorteilhaft sein, die Notwendigkeit ihrer getrennten Behandlung an dem in den Figuren 1 bis 5 dargestellten Fall zu begründen.

Ein Zustand, welcher bei der Wheatstoneschen Brückenschaltung auftritt, erwies sich bei der Aufstellung von Gegensprech-Schaltungen als äusserst fruchtbringend.

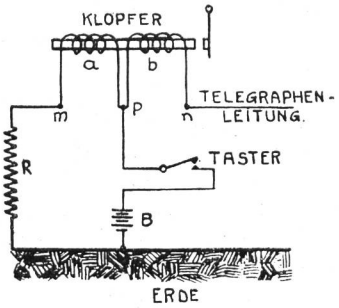

Fig. 1.

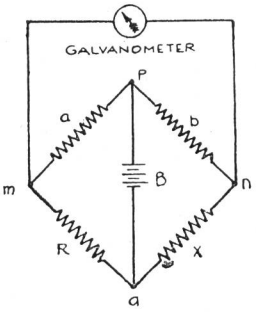

Fig. 2.

So haben wir in Fig. 1 eine frühere Anordnung für Gegensprech-Telegraphie dargestellt, welche augenscheinlich einer einfachen Brückenschaltung entspricht, wie Fig. 2 sie zeigt. Wenn a gleich b und wenn auch R gleich X ist, so ist die Potentialdifferenz der Batterie zwischen m und n gleich Null; somit fliesst im Falle der Fig. 2 kein Strom durch das Galvanometer, und es entsteht kein magnetisches Kraftfeld im Klopfer der Fig. 1.

Die gleiche Anordnung ist verwendbar für den Gegensprechbetrieb einer Telephonleitung, wie aus

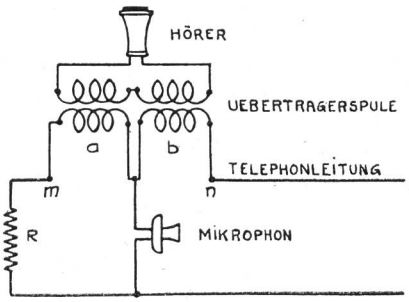

Fig. 3.

Fig. 3 ersichtlich ist, in welcher der Klopfer und der Taster der Fig. 1 durch einen Hörer bzw. ein Mikrophon ersetzt sind. Wenn der Widerstand R nicht dem Werte X gleichkommt, welch letzterer der Impedanz der Telephonleitung entspricht, so ist die Gegensprechanordnung nicht vollkommen „rückwirkungsfrei", da die Betätigung des Mikrophons Strom im Hörer verursacht. Die Stärke des Stromes im Hörer und somit die Bewegungen der Membran sind vom Mikrophonstrom und von der Grösse der Unausgeglichenheit in der Brücke, welche durch die Ungleichheit von R und X verursacht wird, abhängig.

Wenn das Mikrophon und der Hörer, wie in Fig. 4 dargestellt, gegenständig angebracht sind, und jeder Ton des letzteren das Mikrophon betätigen kann,

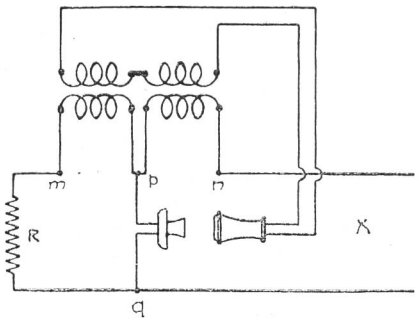

Fig. 4.

so erhält man ein Eigentönen der Anordnung. Durch das blosse Erschüttern der Mikrophonkapsel entsteht ein Strom im Mikrophon und, wenn R und X nicht gleich sind, auch ein solcher im Hörer. Die so verursachte Bewegung der Membran erzeugt eine erneute Erschütterung der Kohlenkörner des Mikrophons, was wiederum einen erneuten Stromstoss im Hörer zur Folge hat. Wenn das Mikrophon-Höreraggregat empfindlich genug ist, so kann sich diese Wechselfolge von Vorgängen andauernd fortsetzen, und es kann hieraus ein gleichmässiger Ton entstehen, dessen Frequenz von den elektrischen und mechanischen Eigenschaften der gesamten Anordnung abhängt. Die Kraftquelle für diese andauernden Schwingungen der Membran liegt natürlich in der Batterie, welche dem Mikrophon zugeschaltet ist. (Der Einfachheit halber ist in Fig. 3 und 4 die Batterie nicht angedeutet; diese kann sowohl dem Mikrophon unmittelbar zugeschaltet, als auch in der entfernten Zentralstelle aufgestellt sein.)

Aus diesen Ausführungen über das Auftreten des Eigentönens ist die Wichtigkeit des Leitungsausgleiches erkenntlich, namentlich wenn noch berücksichtigt wird, dass die Vereinigung von Hörer und Mikrophon ein Verstärkerelement darstellt. Noch deutlicher ist das Element in Fig. 5 dargestellt, wo der Widerstand R der Fig. 4 durch eine Telephonleitung ersetzt ist. Aus dieser Brückenanordnung können wir die drei oben angeführten Faktoren erkennen. Das Verstärkerelement besitzt Eintrittsklemmen 1,2 und Austrittsklemmen 3,4. Es ist zu beiden Seiten durch die Brückenschaltung m n q q so mit den Leitungen verbunden, dass Telephonge-

spräche beidseitig übertragen werden. So werden von einer an der Leitung nach Osten angeschlossenen Sprechstelle die Sprechströme durch die Wirkung des Uebertragers den Klemmen 1, 2 zugeführt. Der erzeugte Strom fliesst dann von den Austrittklemmen 3 und 4 zu gleichen Teilen nach Osten, wo er vom Sprechenden echoartig, und nach Westen, wo er durch den entfernt Horchenden nutzbar empfangen wird.

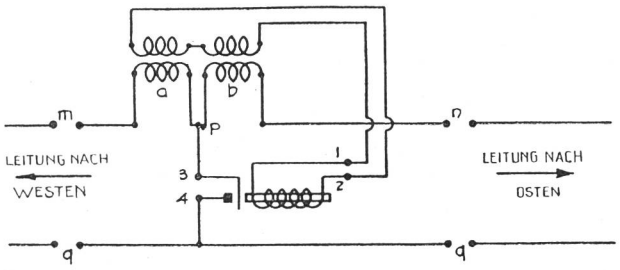

Fig. 5.

Nähere Einzelheiten des Arbeitens einer solchen Anordnung sollen an späterer Stelle betrachtet werden. Es ist hier nur noch anzuführen, dass, wenn die Unausgeglichenheit zwischen den Leitungen nach Osten und denjenigen nach Westen eine gewisse Grenze überschreitet, welche von der Empfindlichkeit des Elementes abhängig ist, das Eigentönen auftritt. In solchen Fällen spricht man von „Singen" (Pfeifen) in den Fernhörern, denn es wird nach beiden Seiten ein starker Dauerton übertragen, welcher eine telephonische Verständigung unmöglich macht.

Die Schwierigkeit, welche sich mit der Möglichkeit des „Singens" einstellte, wurde im Anfang der Telephonverstärkerentwicklung nicht so ernsthaft aufgefasst; erst mit der Erfindung empfindlicherer Verstärkerelemente trat eine Aenderung ein. Die Herstellung solcher Verstärkerelemente war am Anfang eine der schwierigsten Aufgaben. Welcher Art von Bedingungen Genüge geleistet werden musste, wird durch die Tatsache erhellt, dass die Stromstärke an den Klemmen der Abgangsstelle über eine lange Leitung nur 2 oder 3 Milliampères beträgt. Beim Fliessen über die Leitung wird der Strom immer mehr geschwächt, so dass er an der Empfangsstelle nur noch 3 oder 4 Hundertstel seiner ursprünglichen Stärke besitzt. So kleine Ströme bedingten eine grössere Genauigkeit der Einrichtungen, als von manchem der ersten Erfinder angenommen wurde.

Das Verstärkerelement.

Bevor an die Besprechung dieser früheren Einrichtungen herangetreten wird, seien die Anforderungen auseinandergesetzt, die an ein für den Betrieb brauchbares Verstärkerelement gestellt werden müssen. Dabei wollen wir uns an dieser Stelle nicht mit den physikalischen Gesetzen befassen, die für das Arbeiten der Einrichtungen massgebend sind. Wenn wir zunächst nur den Zweck im Auge behalten, so genügt uns der Begriff der Klemmenpaare 1, 2 und

Fig. 6.

3, 4, welche, wie in Fig. 6 dargestellt ist, einer in sich abgeschlossenen und vorerst noch nicht bekannten Schaltung zugehören.

Werden an einem solchen unbekannten Element Messungen mit Wechselstrom vorgenommen, so sind für jede Frequenz verschiedene charakteristische Verhältnisse zu erwarten. So erhalten wir aus dem Verhältnis der an den Klemmen 1, 2 herrschenden Spannung zur erzeugten Stromstärke die Impedanz dieses Stromkreises und in ähnlicher Weise für den Stromkreis der Klemmen 3,4.

Ebenso erhalten wir aus dem Verhältnis der im Stromkreis 3, 4 erzeugten Spannung zur Stromstärke im Stromkreis 1, 2 eine „gekoppelte" Impedanz. Aehnlich lässt sich eine solche in umgekehrter Richtung messen. Ist nur eine dieser „gekoppelten" Impedanzen gleich Null, d. h. wird auf einer Seite keine Spannung erzeugt, während auf der andern ein Strom fliesst, so spricht man von einem Apparat mit „einseitig gekoppelter" Impedanz. Die besten Verstärker für Telephonie sind alle von dieser Art. Ob ein Apparat einseitig oder doppelseitig sei, die Anforderungen, die an ihn gestellt werden, sind doch genau die gleichen; jedoch können sie zutreffender an Hand der einseitigen Apparatenart ausgedrückt werden, wovon die Hörer-Mikrophon- (oder die mechanische) Ausführung der Fig. 4 und 5 ein einfaches Beispiel darstellt.

Die Anforderungen an die Apparate sind folgende:

1. Die einseitig gekoppelte Impedanz muss innerhalb der bei der telephonischen Uebertragung erforderlichen Grenzwerte unabhängig von der Amplitude des aufgedrückten Stromes sein. Mit andern Worten: es muss ein gradliniges Verhältnis zwischen Austrittspannung und Eintrittstrom des Verstärkers bestehen, in welchem Falle der abgegebene Strom unmittelbar proportional dem aufgenommenen Strome ist. Ist dieser Bedingung nicht Genüge geleistet, so entstehen beim Austritt ein oder mehrere höhere Harmonische der aufgedrückten Spannung.

1a. Die Ein- und Austrittimpedanzen des Elementes müssen gleichfalls unabhängig von den aufgedrückten Spannungen sein, ansonst Verzerrung erfolgt.

2. Die einseitig gekoppelte Impedanz muss innerhalb der bei telephonischer Uebertragung erforderlichen Grenzwerte unabhängig von der Frequenz der aufgedrückten Spannung sein. Ist dieser Bedingung nicht Genüge geleistet, so werden die verschiedenen Obertöne eines so komplizierten sinusoidalen Stromes, wie ihn die menschliche Sprache erzeugt, in den ihnen eigentümlichen Verhältnissen nicht wahrheitsgetreu wiedergegeben.

2a. Die Eintrittsimpedanz des Elementes muss unabhängig von der Frequenz der aufgedrückten Spannung sein, oder aber, sie muss die gleiche Funktion der Frequenz sein, wie es die Impedanz der angeschalteten Telephonleitung ist. Ist dieser Bedingung nicht Genüge geleistet, so kann Verzerrung entstehen, was der Lautübertragung schädlich ist. Die den Verstärker betätigende Spannung ist dann nicht diejenige, welche die Telephonleitung einer andern, ähnlichen Leitung aufdrücken würde, sondern sie ist um einen Betrag, welcher von der Frequenz abhängt, grösser oder kleiner. Es genügt nicht,

dass das Element den aufgenommenen Strom richtig verstärke, es ist auch unerlässlich, dass sein Eintrittstromkreis von der Telephonleitung ohne Verzerrung gespiesen werde.

2b. Die Austrittimpedanz des Elementes muss in ähnlicher Weise unabhängig von der Frequenz sein, oder aber in richtigem Verhältnis zur Impedanz einer Telephonleitung stehen, damit die Leitung ohne Verzerrung den vom Verstärker abgegebenen Strom aufnehmen kann.

3. Das Element muss verstärken; d. h., welches auch die dem Element beigegebene oder im Element selbst enthaltene Stromquelle sei, der Leistungsfaktor, welcher vom Verhältnis aus abgegebener zu aufgenommener Energie der Telephonströme bestimmt wird, muss grösser sein als 1. So wird z. B. bei dem vorstehend abgebildeten mechanischen Elemente die Energie von der der Mikrophonkapsel zugeschalteten Batterie abgegeben. Wir wollen uns nur an die Leistungsfähigkeit desselben in bezug auf die telephonische Uebertragung von den Klemmen 1, 2 zu den Klemmen 3, 4 halten. Wieviel grösser als 100 % diese Leistungsfähigkeit sein muss, hängt offenbar von den Kosten und verschiedenen technischen Notwendigkeiten ab. Von einem Verstärkerelement, welches für unsere Telephoneinrichtungen geeignet sein soll, darf verlangt werden, dass die Verstärkung derart sei, dass der vom Fliessen über 20 Standardkabelmeilen ($b = 2{,}2$) geschwächte Strom durch die Verstärkertätigkeit wieder auf seinen ursprünglichen Wert gebracht werde. In der Telephonsprache gilt der Satz: „Das Element soll einen Gewinn von ungefähr 20 Meilen ergeben." Bei der Uebertragung über 20 Standardkabelmeilen pflegt der Strom, wie auch die Spannung, auf ungefähr $^1/_8$ seines ursprünglichen Wertes abgeschwächt zu werden, und somit die dem Verstärkerstromkreis zugeführte Energie auf $^1/_{64}$ der ursprünglichen Energie. Davon erreicht nur die Hälfte das Empfangselement, der Rest fliesst nutzlos in die Brücke. Es muss deshalb der Leitung an der Abgabeseite des Verstärkerstromkreises 128 mal mehr Energie zugeführt werden als empfangen wurde. Ein Blick auf den Stromkreis der Fig. 5 zeigt jedoch, dass die vom Verstärker abgegebene Energie selbst gleichmässig der abgehenden und der ankommenden Leitung zugeführt wird. Daraus folgt schliesslich, dass das Element imstande sein muss, 256 mal mehr Energie abzugeben, als es erhält. Mit andern Worten ausgedrückt, soll die Telephon-Leistungsfähigkeit des Elementes ungefähr 26,000 % betragen.

4. Die Energiequellen, die dem Element beigegeben sind, und mit deren Hilfe eine Verstärkung möglich ist, müssen betriebssichere und für Telephoneinrichtungen zulässige Spannungen aufweisen. Wenn z. B. ein Verstärker eine höhere Spannung als 250 Volt besässe, so wäre diese in einer Anlage, welche normalerweise Spannungen von wenig über 100 Volt verwendet, unstatthaft.

5. Das Element muss entweder gegen schädliche elektrische Einflüsse von aussen unempfindlich sein, oder aber leicht gegen solche geschützt werden können, damit Uebersprechströme von benachbarten Telephonstromkreisen oder Apparaten es nicht zu betätigen vermögen.

5a. Umgekehrt soll das Element nicht eine Quelle für Uebersprechen in benachbarte Telephonstromkreise oder Apparate sein.

6. Das Element muss im Betriebe beständig, zuverlässig und von genügend langer Lebensdauer sein, soll also weder häufiges Nachsehen erfordern, noch Betriebsverhältnisse zur Voraussetzung haben, wie sie nur in Laboratorien geboten werden könnten.

7. In bezug auf Umfang, Anlage-, Betriebs- und Unterhaltungskosten muss das Element mit den wirtschaftlichen Verhältnissen einer bestehenden Telephonanlage in Einklang gebracht werden.

Die Erkenntnis dieser Anforderungen hat unser Suchen nach neuen Elementen das verflossene fruchtbare Jahrzehnt hindurch geleitet. Sogar schon vorher waren diese Anforderungen bekannt, sie waren aber nicht vollständig erfasst worden. Es ist erstaunlich, wie viele unabhängige Erfinder sich im Laufe der Jahre bei uns meldeten und Apparate vorlegten, welche aus Spulen und Magneten gebildet waren, keine Energiequelle enthielten oder wenigstens keine benutzten, und somit zur Verstärkung ungeeignet waren. Näher betrachtet, stellten solche Apparate gewöhnlich statische Transformatoren dar, in deren niederohmiger Wicklung wohl eine grössere Stromstärke, aber keine grössere Leistung entstehen konnte, als in die hochohmige Wicklung abgegeben wurde. Manchmal wurde dabei angetönt, dass gewisse solcher Apparate für Reihenschaltung in möglichst regelmässigen Abständen in der Leitung bestimmt seien. Irgendein die telephonische Uebertragung begünstigender Einfluss, welcher einer solchen Anordnung zukäme, wäre dann als Folge der Induktanzwirkung in der Leitung erklärlich. Hiermit ergäbe sich ein unvollkommener Ersatz für Dr. Pupins Methode zur Erhöhung der Induktivität der Leiter.

Die meisten der früheren Versuche, die die Herstellung von Telephonverstärkern bezweckten, hielten sich an die bekannten Richtlinien, welche das Gebiet der Telegraphie oder des Starkstromes boten. Das Werden des Telephonverstärkers jedoch fällt zeitlich mit der Entwicklung der neueren Physik zusammen, welche die Entladungen in verdünnten Gasen näher untersuchte und zur Entdeckung des Elektrons und der Elektronenströme in Vakua führte. Die allgemeine Erkenntnis des elektrischen Aufbaues der Materie wuchs in den allerletzten Jahren sprunghaft und mit ihr die praktische Entwicklung des Elektronenverstärkers.

Gestützt auf Obiges können wir daher die Verstärkerelemente in drei Gruppen einteilen, je nachdem ihre beweglichen Teile aus

I. Molekülaggregaten, d. h. in gewöhnlichem Sinne fasslichem Stoff,

II. Elektronen, oder

III. Jonen bestehen.

Die erste Gruppe können wir als „elektrodynamische Verstärker", die zweite als „Elektronenverstärker" und die dritte als „Gasverstärker" bezeichnen. Wir können sie ebenfalls unterscheiden in bezug auf die Eigenschaft der Mittel, durch welche die beweglichen Teile beeinflusst werden und sie also einteilen in

A. elektrostatische, wenn die Beeinflussung von einem elektrischen Feld abhängt, welches vom empfangenen Strome hergestellt oder verändert wird, und

B. elektromagnetische, wenn die Beeinflussung von einem magnetischen Felde abhängt, welches durch den empfangenen Strom verändert wird.

Die elektrostatischen Apparate, welche in mechanischem Sinne bewegliche Teile benutzen, sind zu unempfindlich, um als Telephonverstärker zu dienen. Im Falle der Elektronen- und Gasverstärker jedoch sind derartige Mittel zur Beeinflussung vollkommen brauchbar, ja, für das Elektronensystem in geradezu wunderbarer Weise leistungsfähig. Wir können somit die nachstehende Einteilung vereinfachen, indem wir die Klasse der elektrodynamischen oder mechanischen Verstärker mit elektrostatischer Beeinflussung weglassen. Hinwiederum müssen wir in der Klasse der Gasverstärker noch eine Art von Apparaten aufführen, welche in den andern zwei Klassen keinen Vertreter hat. Die Apparate dieser Art stellen Leiter dar, welche ihre Eigenschaften zu verändern vermögen, wenn sie vom Strom durchflossen werden. Die Techniker, welche sich mit Kohlenlichtbogen beschäftigt haben und dessen Unbeständigkeit kennen, werden mit dieser Eigenschaft bereits vertraut sein. Für unsere Zwecke dürfen wir diese Verstärkerart als durch „negativen Widerstand" beeinflusst bezeichnen und uns dabei vorbehalten, die Erklärung für die Ausdrucksweise später zu geben.

Die Klasseneinteilung der Verstärkerelemente in der Reihenfolge, wie sie nachstehend eingehalten wird, ist demnach folgende:

I. Elektrodynamische Verstärker:
- a. Hörer-Mikrophonausführung,
- b. Generatorenausführung.
  - 1. Gleichstromgenerator,
  - 2. Wechselstromgenerator,
  - 3. Asynchrongenerator.

II. Elektronenverstärker:
- a. Elektrostatisch beeinflusste,
- b. Elektromagnetisch beeinflusste.

III. Gasverstärker:
- a. Elektrostatisch beeinflusste,
- b. Elektromagnetisch beeinflusste,
- c. Von „negativem" Widerstand beeinflusste.

I. a. Die Lösung, die sich in ganz natürlicher Weise den Technikern zu Beginn aufdrängte, war die Vereinigung eines Hörers mit einem Mikrophon. In den ersten Jahren der Telephonentwicklung schien kein anderes Mittel zur Verfügung zu stehen, und schon vor 1903 sind manche erfolglose Versuche in dieser Richtung gemacht worden. Die besten Köpfe der dem Bell-System angehörenden Körperschaft widmeten sich dieser Aufgabe, welche auch von aussenstehenden Erfindern mit Vorliebe aufgegriffen wurde. Zu vermehrten Leistungen wurde die wissenschaftliche Welt auch angespornt, als ein Kapitalist die Summe von 1 Million Dollar als Belohnung für eine erfolgreiche Lösung zur Verfügung stellte.

Die Lösung wurde schliesslich von einem der Bell-Ingenieure, H. E. Shreeve, gefunden, welcher im Jahre 1903 in Würdigung seiner früheren Erfahrung im Entwerfen von Mikrophonen und andern Telephonapparaten mit der Aufgabe betraut wurde. Frühere Erfinder hatten Hörer und Mikrophone zusammengestellt, ohne zu erkennen, dass die Membranen nur zum Zwecke des Tonerzeugens oder Tonsammelns vorhanden waren; Shreeve bediente sich ihrer nicht mehr.

Eine weitere Schwierigkeit früherer Entwürfe bestand im „Zusammenbacken" der Kohlenbestandteile des Mikrophons, und eine von Shreeves ersten Arbeiten richtete sich auf die Ergründung der Ursache dieser Erscheinung und die Beseitigung derselben. Als Ursache stellte er die Ausdehnung fest, welche durch freigewordene Wärme in der Kohlenkammer entstand. Für seinen ersten gelungenen Laboratoriumsentwurf verwendete er einen gezogenen Stahlstift als Bindeglied zwischen Hörer und Mikrophon; das letztere war so gebaut, dass die Ausdehnung seiner Teile durch die Wärme keinen erhöhten Druck auf die zwischen den Elektroden liegenden Kohlenkörner ausüben konnte.

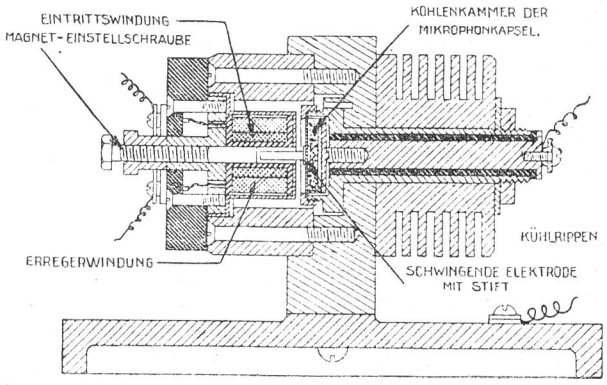

Fig. 7.

Durch diese Anordnung wurden die ersten gelungenen Versuche mit Verstärkern auf einer Telephonleitung ermöglicht. Im Jahre 1904 wurde auf einem Stromkreis zwischen Amesbury, Massachusets und Boston ein Versuch mit dem Apparat gemacht, welcher zeigte, dass auf diese Weise eine bessere Wiedergabe bei der Uebertragung einer grossen Anzahl unzusammenhängender Wörter zu erreichen war als ohne Verstärker.

Der nächste Schritt galt der Verbesserung der Uebertragung; dieses Ziel wurde erreicht durch die Verwendung von leichteren, beweglichen Teilen und durch die Erhöhung der Frequenz der Eigenschwingungen derselben. Der nächste Entwurf, welcher in Fig. 7 dargestellt ist, stand vom August 1904 bis Februar 1905 betriebsmässig im Gebrauche zwischen New York und Chicago. In diesem Entwurf war dem „Zusammenbacken" des Mikrophonelementes durch die thermostatische Tätigkeit der schwingenden Elektrode entgegengearbeitet, und die Frequenz der Eigenschwingungen der beweglichen Teile war derart, dass durch dieselben die wichtigen Schwingungen der Sprache begünstigt wurden. Das Verstärkerelement war mittelst einer einfachen Brückenschaltung,

welche im Jahre 1883 durch Edison patentiert worden war, mit der Leitung in Verbindung gebracht. Die Uebertragung zwischen New York und Chicago erwies sich als bedeutend verbessert.

Die beschriebene Einrichtung enthielt auch ein Organ, welches dazu bestimmt war, die Verstärkung der sogenannten Morse-Induktionserscheinungen zu verhindern, die auftreten, wenn eine verstärkte Leitung simultan geschaltet wird und überlagerte Telegraphenzeichen vermittelt. Zu diesem Zwecke wurde eine Uebertragerspule von geringer gegenseitiger Induktivität zwischen die Leitung und das Empfangselement geschaltet. Diese Spule war unempfindlich für Ströme von geringer Frequenz, aber wirksam in den mit den Sprechströmen übereinstimmenden Frequenzlagen.

Trotz dem Erfolg, welcher dieser ersten Verstärkereinrichtung beschieden war, lag die Lösung der Aufgabe noch in weiter Ferne. Dies zeigte sich mit aller Deutlichkeit, als ein Versuch gemacht wurde, den Musterentwurf nachzubilden. Es erwies sich als äusserst schwierig, schwingende Elektroden herzustellen, welche ausser andern auch noch die nötigen thermostatischen Eigenschaften besassen. Es wurde deshalb versucht, die Einstellung der Empfindlichkeit des Mikrophons mit sicherer wirkenden Mitteln zu erzielen, und der nächste Entwurf (Fig. 8) enthielt dementsprechend einen Thermostat in der Gestalt eines Zinkstreifens. Dieser Zinkstreifen wurde durch eine Spule erwärmt, welche mit dem Mikrophon in Reihe geschaltet war, und sobald der Strom durch das Mikrophon als Folge des Beginnes des „Backens" anzuwachsen pflegte, diente er zum Wegziehen der hintern Elektrode.

Der so entstandene Verstärker ist unter der Bezeichnung Nr. 1-A bekannt. Er erwies sich als genügend bis zu dem Zeitpunkt, wo die Anforderungen grösser wurden; dieser Fall trat ein, als die Verstärker in Reihenschaltung in derselben Leitung verwendet werden sollten, was eine noch vollkommenere Wiedergabe der Sprache bedingte. Es folgte eine eingehende Untersuchung der Verhältnisse mit dem Ergebnis, dass die Frequenz der Eigenschwingungen der beweglichen Teile noch mehr erhöht, ihr Gewicht noch mehr verringert und eine noch empfindlichere Einstellvorrichtung gewählt wurde.

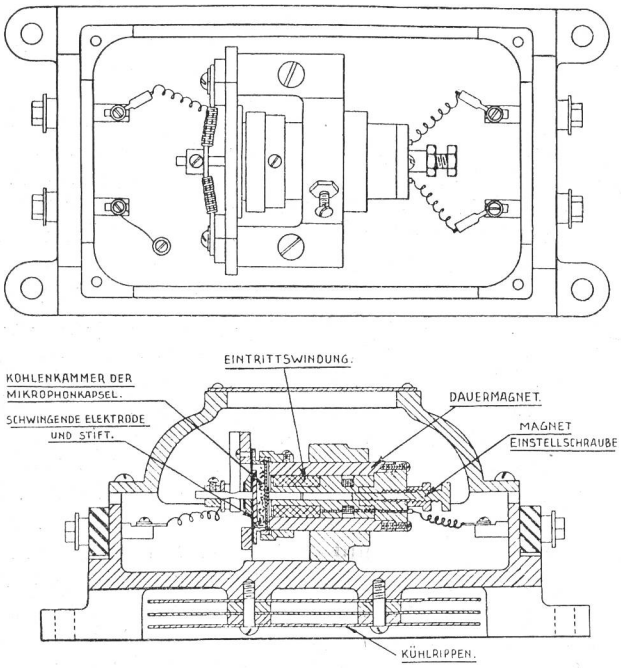

Fig. 8.

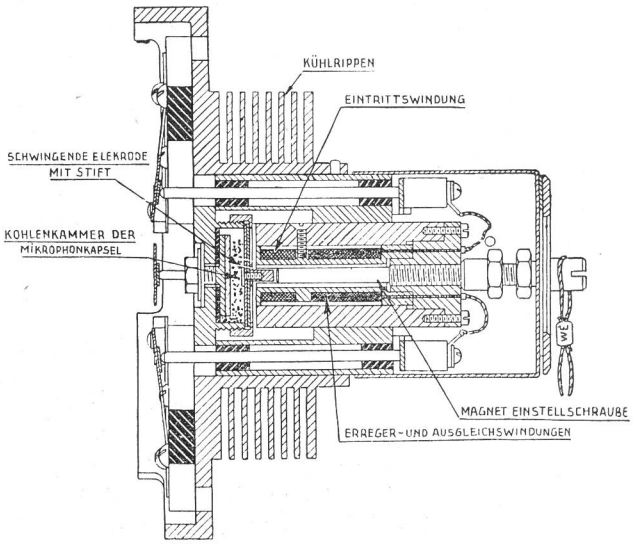

Fig. 9.

Ohne auf alle Entwicklungsstufen zwischen dem einstigen Verstärker I-A und dem letzten, heute gültigen Modell dieser Verstärkerklasse, dem 3-A-Verstärker, näher einzutreten, soll hier bloss auf die Eigenschaften dieses letzteren und den Wirkungsbereich seiner Klasse hingewiesen werden.

Der Verstärker Nr. 3-A, welcher in Fig. 9 dargestellt ist, besteht aus zwei Hauptteilen: der Patrone und dem Sockel. Die Patrone enthält alle Arbeitsteile, welche im Betriebe schadhaft werden können. Sie kann leicht aus der Schaltung entfernt und durch eine andere ersetzt werden. Sie wird im Sockel vermittelst Bajonettgriffes gehalten, und die elektrischen Verbindungen mit ihren Klemmen werden durch Federn im Sockel hergestellt. Die Einstellvorrichtung, welche dazu dient, die Empfindlichkeit des Mikrophons innerhalb äusserst enger Grenzen zu halten, besteht aus einem Elektromagneten mit entgegengesetzt wirkenden Windungen. Das vom Empfangselement erzeugte magnetische Feld entsteht als resultierendes Feld der einen, mit dem Mikrophon in Reihe geschalteten Windung und der andern, entgegengesetzt wirkenden, im Nebenschluss zum Mikrophon liegenden Windung. Wenn der mittlere Widerstand des Mikrophons anwächst, erhält die Reihenwicklung weniger und die Nebenschlusswicklung mehr Strom und umgekehrt. Diese magnetischen Aenderungen verändern die Zugspannung an der biegsamen Elektrode und dienen somit zur Regulierung des Druckes auf die Kohlenkörner.

Ein dieser Apparatenart eigentümlicher Nachteil besteht darin, dass die Empfindlichkeit rasch abnimmt, sobald die ankommende Energie unter einen bestimmten Grenzwert fällt. Bis zur Stunde hat man diese Erscheinung nicht in vollständig überzeugender Weise erklären können. Ein Nachteil

dieser Art ist offensichtlich folgeschwer in einem Betriebe, wo Stromkreisverhältnisse und Energieaufwand, welcher an irgend einem Punkt des Stromkreises aufgedrückt wird, in weiten Grenzen veränderlich sind. So muss der Verstärker in einem gegebenen Stromkreis einmal die Energie von lautsprechenden Personen verarbeiten, deren Sprechstellen in der Nähe des einen Endpunktes der Verstärkerleitung liegen, während ein andermal die Energie von Sprechstellen verarbeitet werden muss, welche über lange Verbindungsleitungen angeschlossen sind. Wenn die Personen im letzteren Falle schwache Stimmen haben, oder wenn sie die Sprechstelle nicht zu gebrauchen wissen, indem sie nicht unmittelbar in den Schalltrichter sprechen, wenn ferner die Zuleitungen selbst ungeeignet sind, so ist klar, dass die Energie an den Verstärkerklemmen mehrere Male geringer sein kann als im ersteren Falle. Da nun aber gerade in solchen Fällen eine Verstärkung besonders erwünscht ist, so ist einleuchtend, dass ein Verstärker, dessen Wirkung mit dem ankommenden Energieaufwand ändert und dazu noch einer, dessen Wirkung am geringsten ist beim geringsten Energieaufwand, für allgemeine Verwendung auf dem Telephongebiete sich nicht besonders eignet. Der mechanische Verstärker von Shreeve ist dessenungeachtet brauchbar, und es stehen deren viele in öffentlichem Betriebe. Die Verstärkung ist jedoch zu sehr von der Amplitude, sowie von der Frequenz des Eintrittstromes abhängig, als dass diese Verstärker mit besten Ergebnissen in Reihenschaltung verwendet werden könnten; immerhin wurden sie mit Vorteil auf Telephonleitungen benützt, deren Länge nicht mehr als drei Verstärkerstellen erforderte.

I b. In den Jahren 1900—1910 strebten die besten Köpfe nach einer Lösung des Telephonverstärkerproblems unter Verwendung der Grundbegriffe über den Bau von Gleich- und Wechselstromgeneratoren. Während dieser Zeit wurde das Problem theoretisch und experimentell untersucht durch H. S. Warren, M. I. Pupin und andere. Die üblichen Ausführungen auf dem Starkstromgebiete führten zu zwei Lösungen:

1. Die erste ging dahin, einen Generator zu verwenden, dessen Feldwicklung den Eintrittstromkreis und dessen Anker den Austrittstromkreis darzustellen hätten. In einer solchen Maschine werden Aenderungen der Feldstromstärke entsprechende Aenderungen der Ankerspannung ergeben. Damit aber durch die Kommutation keine Aenderungen in der Ankerspannung erfolgen, was zu äusserst starkem Lärm im Hörer führen würde, muss eine solche Maschine eine hohe Kommutationsfrequenz besitzen. Wenn diese genügend höher ist als die höchste Frequenz, welche zur treuen Wiedergabe der menschlichen Sprache nötig ist, so dürften die störenden Ströme, die von der Kommutation herrühren, durch Abdrosselung vermittelst Induktanz unschädlich gemacht oder durch gleichschwingenden Nebenschluss, z. B. eine künstliche Leitung, ausgefiltert werden. Wenn berücksichtigt wird, dass Frequenzen von 2500 Perioden in der Sekunde für gute Sprachübertragung erforderlich sind, so sieht man, dass sich bei der praktischen Ausführung von Anker und Kommutator die Umfanggeschwindigkeit dem mechanisch höchst zulässigen Grenzwerte nähern würde.

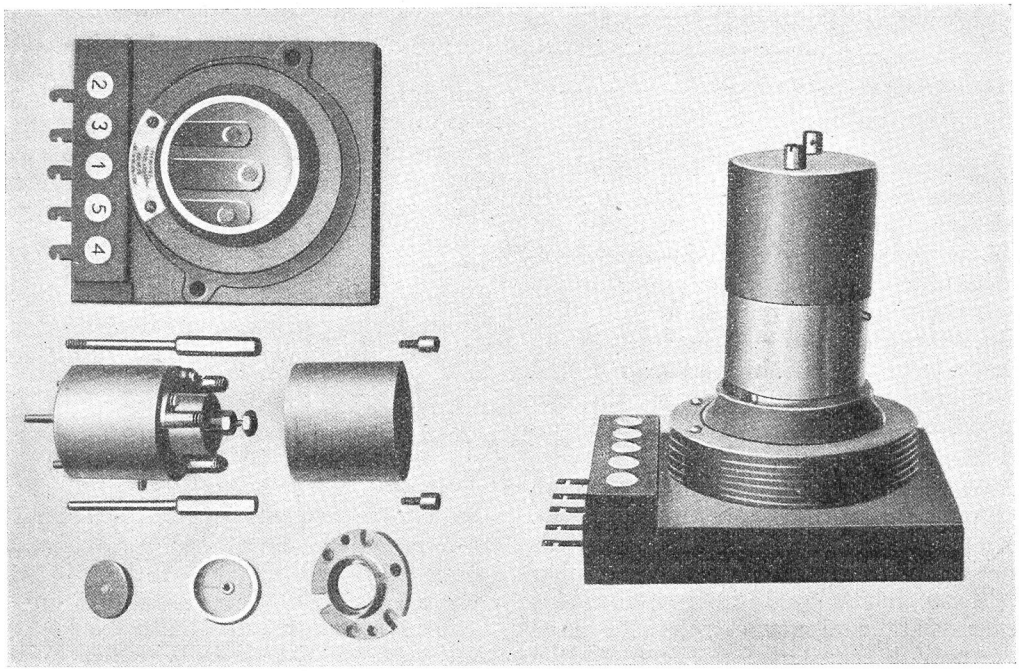

Fig. 9a.

Aus diesem Grunde wurden verschiedene einpolige Ausführungen, bei denen keine Kommutation notwendig ist, in Betracht gezogen. Der darin enthaltene Grundbegriff ist aus Fig. 10 ersichtlich, woselbst die im Jahre 1905 von G. A. Campbell vorgeschlagene Ausführung gezeigt wird. Die Feld-

spule M entspricht einem Solenoid und trägt im Innern fest angebrachte Scheiben w^1, die sowohl als Magnet-Kern wie auch als Kollektoren für die radialen elektromotorischen Kräfte, welche in ähnlichen, auf der Welle sitzenden Scheiben erzeugt werden, dienen.

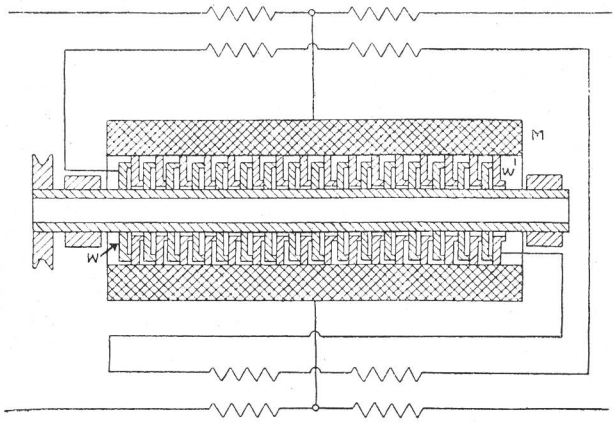

Fig. 10.

Wenn in so gebauten Maschinen der Feldstrom nur von der Grösse der Sprechströme ist, so wird auch die Feldstärke gering ausfallen, und die erzeugte E. M. K. wird bei mechanisch höchstzulässigen Umdrehungszahlen unter die für einen erfolgreichen Verstärkerbetrieb notwendige E. M. K. fallen. Zudem sind die Wirbelstrom- und Eisenverluste der hohen Frequenzen wegen verhältnismässig hoch und die Leistung ist entsprechend verringert. Da nun die Eintrittimpedanz derjenigen eines Elektromagneten entspricht, so wirkt sie den höhern Frequenzen des Tonfrequenzbandes entgegen, statt, wie man es wünscht, von der Frequenz unabhängig zu sein.

Selbst wenn es möglich wäre, einen Generator als Verstärker von schwachen Strömen von so hoher Umdrehungszahl zu bauen und zu betreiben, so würde doch diese Ausführungsart so vieler, für einen guten Verstärkerbetrieb erforderlicher Eigenschaften entbehren, dass ihre Verwendungsmöglichkeit in Frage gestellt wäre. Heute, wo einfachere und praktisch sozusagen vollkommene Verstärker zur Verfügung stehen, ist es fraglich, ob die physikalisch möglichen Grenzwerte dieser Apparatenart jemals herausgearbeitet werden.

2. Die Schwierigkeiten, welche durch Wirbelstrom- und Eisenverlust, Begrenzung der Umdrehungszahlen und kleine Eintrittströme verursacht werden, verhinderten auch die Entwicklung eines brauchbaren Verstärkers, der in ähnlicher Weise, jedoch nach den Grundsätzen des Wechselstromes zu erbauen gewesen wäre und der als 2. Lösung betrachtet wurde.

3. Im Jahre 1900 meldete sich bei uns Joseph Lyons mit seiner Erfindung, einem Telephonverstärker nach dem auf dem Starkstromgebiet durch Hutin und Leblanc entwickelten und patentierten Prinzip. Dieses ist vielleicht besser vom Asynchrongenerator her bekannt, welcher einen Induktionsmotor darstellt, der durch eine örtliche mechanische Kraftquelle über Synchron angetrieben wird. Die Bedingungen, unter welchen sich eine solche Maschine zur Energieabgabe auf einen angeschlossenen Speiseleiter eignet, dürften bekannt sein. Lyons gedachte, den Stator in eine Telephonleitung in Brücke zu schalten und aus demselben zusätzliche Energie, in der gleichen Wellenform wie die erhaltene, als Ergebnis des Zusammenwirkens des empfangenen und des im kurzgeschlossenen Rotor erzeugten Stromes abzugeben. Die bezügliche Schaltungsanordnung ist in Fig. 11 dargestellt.

Um jedoch eine jeder Telephonfrequenz entsprechende Energie abzugeben, muss die Umdrehungszahl des Rotors mindestens so gross sein wie der Bruchwert aus der gegebenen Frequenz und der Anzahl der Polpaare des Stators. So würde im Falle eines 12poligen Stators die Umdrehungszahl für eine Frequenz von 2400 Perioden 400 in der Sekunde betragen. Diese Anforderungen an die Geschwindigkeit sind zu hoch, um an eine tatsächliche Ausführungsmöglichkeit der Maschine zu denken, und zudem würde letztere der zweiten Anforderung, die an einen Verstärker gestellt werden muss, nicht genügen. Die Verstärkerwirkung für jede Frequenz würde vom negativen Schlupf bei der betreffenden Frequenz abhängig sein, und somit würden die niedrigen Frequenzen des Sprechstromes in höherem Masse verstärkt als die höhern. Zu jener Zeit wurde von Dr. Pupin die Meinung geäussert, dass eine derartige Verzerrung durch die Verwendung mehrerer solcher, an verschiedenen Stellen der Leitung eingeschalteter Asynchrongeneratoren vermieden werden könnte, wenn jeder nur eine Gruppe von Frequenzen

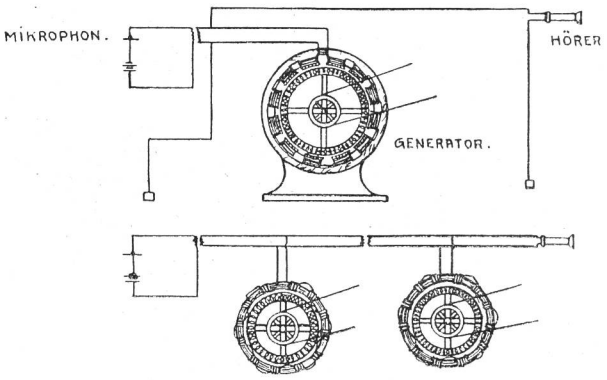

Fig. 11.

zu verstärken hätte. Selbst wenn es möglich gewesen wäre, zur Verstärkung der verschiedenen Gruppen leistungsfähige Maschinen zu bauen, ist es doch fraglich, ob die Anordnung jemals für eine Telephonanlage befriedigend gewesen wäre, da zwischen dem ersten und letzten Generator keine Stelle der Leitung richtige Sprachverhältnisse aufgewiesen hätte. Diese Eigenschaft der Anordnung würde selbstverständlich eine grosse Unzulänglichkeit für einen richtigen Betrieb bedeutet haben, da es geradezu unmöglich gewesen wäre zu sagen, ob die Leitung gestört sei oder nicht.

Es dürfte übrigens verständlich sein, dass die mechanische Geschwindigkeitsgrenze, Blechdicke und die den Dynamobauern bekannten andern Faktoren die Entwicklung eines solchen Generators verhindert hätten, wenn man bedenkt, dass die telepho-

nischen Verhältnisse im Generatorbau hätten berücksichtigt werden müssen. Was verlangt war, kam einem Generator gleich, welcher imstande war, mit einem halben Milliampère als Feldstromstärke zu arbeiten. Um nun eine 256fache Energieverstärkung zu ermöglichen, müssten seine Feldverluste weniger als 1 % der abgegebenen Energie betragen haben. Der Wert eines halben Milliampères ist aber der eftektive Wert einer zusammengesetzten Welle, und alle seine Sinuskomponenten müssen beim Austritt mit gleicher Verstärkung wieder erscheinen.

II. a. Beim Elektronenverstärker sind die beweglichen Teile Elektronen, die sich frei fortbewegen können und denen keine Körper von molekularer Beschaffenheit im Wege stehen. Solche Apparate erfordern deshalb ein genügend hohes Vakuum, damit die Bewegungen ungehindert seien und denjenigen freier Elektronen gleichkommen. Ferner müssen Mittel vorhanden sein, um die freien Elektronen aus der Molekularmasse, in welcher sie enthalten sind, zu befreien. Das beste Mittel besteht im „Hinausglühen" derselben aus einem Stück Metall oder Metalloxyd. Unsere heutigen Elektronenverstärker sind deshalb „thermionische" Apparate.

Man kann sagen, dass die Geschichte dieser Apparate mit einer im Jahre 1902/1903 erfolgten Veröffentlichung O. W. Richardsons begonnen habe, in welcher er eine Theorie über die thermionische Entsendung von Elektronen aufstellte, die dann von der wissenschaftlichen Welt zum grössten Teile angenommen wurde, und die heute als endgültig erwiesen angesehen werden darf. Nach dieser Theorie (welche auch eine Theorie für metallische Leiter ist) enthalten Metalle und Elektrizitätsleiter innerhalb der Grenzen ihrer Oberflächen ungeheure Mengen von freien Elektronen, welche ähnlich auftreten wie eigentliche Gasmoleküle. Wird ein Metall erhitzt, so wächst die kinetische Energie der Elektronen und ebenso die Zahl derer, welche über die begrenzende Oberfläche entweichen. J. J. Thompson hat die Theorie in seiner Abhandlung über Leitung von Elektrizität durch Gase folgendermassen gestaltet:

„Die Aussendung von Körperchen aus glühenden Metallen und Kohle erklärt sich ohne weiteres aus der Ansicht — welche übrigens durch manche Erscheinung bestätigt wird — dass Körperchen in Metallen und Kohle zerstreut liegen, und zwar nicht nur, wenn letztere in glühendem Zustande sind, sondern bei jeder Temperatur. Dabei sind die Körperchen so klein, dass sie frei durch das Metall wandern können. Man kann somit annehmen, dass sie sich in einem dem des Metalls entsprechenden Volumen verhalten wie ein vollkommenes Gas. Die Körperchen werden vom Metall angezogen und können deshalb in den Aussenraum nur dann entweichen, wenn sie genügend kinetische Energie besitzen, um die Schicht an der Oberfläche zu durchbrechen, wo die Anziehung zwischen Metall und Körperchen bedeutend ist. Ist die mittlere kinetische Energie eines Körperchens, gleich derjenigen eines Gasmoleküls, der absoluten Temperatur proportional, so werden bei stets zunehmender Temperatur mehr und mehr Körperchen aus dem Metall in den Aussenraum entweichen können."

Im Jahre 1904 entdeckte Wehnelt, dass die thermionische Entsendung aus Leitern, welche mit gewissen Oxyden überzogen sind, ungeheuer viel grösser ist als aus reinen Metallen. Seit jener Zeit sind die Untersuchungen über thermionische Entsendung in sehr schnellem Tempo fortgesetzt worden, und die praktischen Anwendungen der Entdeckungen haben im Verlaufe der letzten acht Jahre mindestens Schritt damit gehalten.

Erscheinungen thermionischer Entsendung sind selbstverständlich schon lange vor der Aufstellung einer zutreffenden Theorie beobachtet worden. Die erste dieser Beobachtungen fällt zusammen mit der von Edison im Jahre 1884 gemachten Entdeckung einer Erscheinung, welche nun unter seinem Namen bekannt ist. Edison fand, dass zwischen einer in das Innere eines Glühfadenlampenkörpers eingeführten und mit dem positiven Pol des Glühfadens verbundenen metallischen Platte und dem Glühfaden ein Strom fliesst, welcher an einem nach Fig. 12 angeschlossenen Galvanometer abgelesen werden kann. Die Leitungsfähigkeit des Raumes zwischen der Platte und dem Glühfaden ist einseitig, denn wird

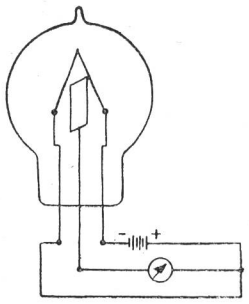

Fig. 12.

die Platte an den andern Pol der Batterie angeschlossen, so fliesst kein Strom. Die Erklärung der Erscheinung ging aus den Arbeiten von Fleming im Jahre 1896 und von J. J. Thompson im Jahre 1899 hervor; diese Arbeiten erfolgten an Hand der Vorarbeiten von Elster und Geitel. Fleming untersuchte die Arbeitsweise einer Vakuumröhre mit zwei Elektroden — einem glühenden Faden und einer kalten Platte — und Thompson führte vor, dass der Mechanismus für Stromüberleitung zwischen Faden und Platte von der Entsendung von negativen Elektronen aus dem Faden herrühre.

Der Durchgang eines Stromes wird in einer solchen Röhre möglich, sobald Elektronen ausströmen, was durch eine gegenüber dem Heizdraht positive Platte, welche die ausgesandten Elektronen anzieht, bewirkt wird. Der Gedanke, einen solchen Apparat mit zwei Elementen als Gleichrichter und somit als Empfänger für drahtlose Wellen zu verwenden, ist im Jahre 1905 von Wehnelt und von Fleming, die unabhängig von einander arbeiteten, verwirklicht worden.

Während der nächsten Jahre lag die eigentliche Weiterentwicklung thermionischer Apparate in den Händen der Radio-Techniker. In seiner im Jahre 1906 in „American Institute of Electrical Engineers" erschienenen Abhandlung zeigte De Forest, dass die Entladung zwischen der glühenden Kathode und

der Platte durch zusätzliche Elektroden nach Belieben verändert werden kann. In einer Patentschrift, welche im darauffolgenden Jahre erschien, zeigt er in seinem „Audion" innerhalb der Röhre eine solche Veränderungen erzeugende Elektrode, welcher er die Gestalt eines Gitters gab. Mit der Entdeckung des Mittels, den Elektronenstrom nach Belieben zu verändern, war das empfindlichste der Verstärkerelemente geschaffen. Es brauchte jedoch noch Jahre sorgfältiger technischer Entwicklungsarbeit, bevor dieser ursprüngliche Gedankengang so weit vervollkommnet war, dass er all den starren Anforderungen, welche die Verwendung in einem öffentlichen Telephonbetrieb erheischt, Genüge zu leisten vermochte.

Zum besseren Verständnis der Verbesserungen, welche getroffen werden mussten, um das erste für die Radio-Telegraphie gebaute brauchbare „Audion" zu Telephonzwecken geeignet zu machen, wollen wir vorerst den Aufbau und die physikalischen Grundlagen des Apparates etwas näher betrachten.

Das „Audion" besteht aus einer luftleeren Röhre, welche drei Elektroden enthält, wovon die eine zur thermionischen Entsendung von Elektronen bestimmt ist. Der eigentliche Aufbau ist in Fig. 13 dargestellt. Der Faden (Fig. 14) wird bei Stromdurchfluss erhitzt; die zwei andern Elektroden bestehen aus einer Platte und einem Gitter. Werden, wie dies in Fig. 14 gezeigt ist, an den Heizdraht und die Platte die Pole einer Batterie angeschlossen, so

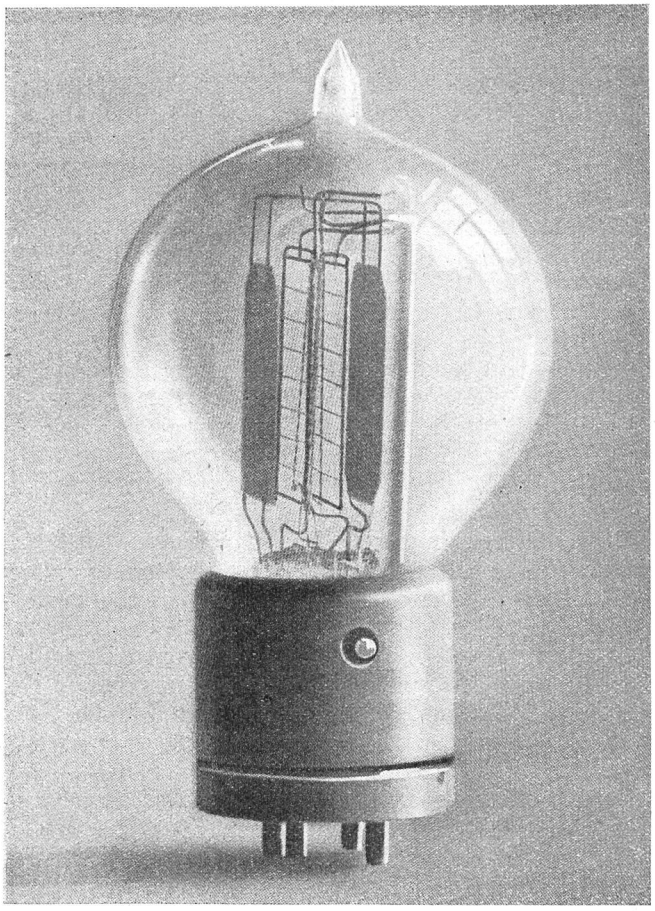

Fig. 13.

dass die Platte gegenüber dem Heizdraht ein positives Potential aufweist, so wird in der so gebildeten Schaltung ein Strom fliessen. Die Elektronen, die aus dem Heizdraht ausströmen, werden von dem elektrischen Feld, welches die Batterie B im Plattenstromkreis erzeugt, durch die vermittelnde Vakuumstrecke hindurch hinübergezogen. Tritt nun, her-

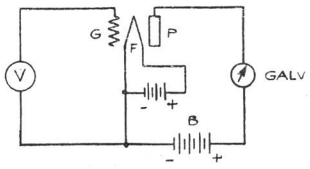

Fig. 14.

rührend von der in der Abbildung mit V bezeichneten Stromquelle, eine E. M. Kraft zwischen Gitter und Heizdraht auf, so wird das Feld zwischen Platte und Heizdraht geändert und dementsprechend auch der Strom im Plattenstromkreis. Erscheint das Gitter in bezug auf den Heizdraht positiv, so werden mehr Elektronen durch die Strecke zwischen Gitter und Heizdraht strömen. Während ein Teil dieser vermehrt auftretenden Elektronen auf das Gitter auftrifft und damit einen Strom im Gitterstromkreis erzeugt, setzt die weitaus grössere Anzahl ihren Weg durch die Maschen des Gitters hindurch zur Platte fort. Dadurch entsteht ein Anwachsen des Stromes im Plattenstromkreis. Erscheint umgekehrt das Gitter negativ, so erfolgt ein Abnehmen des Plattenstromes. In diesem Falle wird jedoch kein Strom im Gitterstromkreis entstehen, da sich die Elektronen nur gegen eine in bezug auf die Elektronenquelle positiv erscheinende Elektrode hin bewegen.

Die charakteristische Beziehung zwischen Gitterspannung V und Plattenstrom I_B ist aus Fig. 15 ersichtlich. Mit der Plattenspannung ändert auch der Strom, nicht aber die Kurvenform; dies ist aus Fig. 16 ersichtlich, wo eine Anzahl solcher Kurven

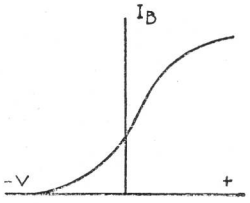

Fig. 15.

gezeigt wird. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass der Betrag an negativen Volt, welcher dem Gitter aufgedrückt werden muss, damit der Plattenstrom auf Null sinkt, stets der gleichbleibende Bruchteil der Voltzahl ist, welche der Plattenstromkreis aufweist. Daraus ergibt sich, dass der Strom im Plattenstromkreis verändert werden kann, entweder durch die Aenderung der aufgedrückten Plattenspannung oder durch viel geringere Aenderungen der Gitterspannung. Der Apparat ergibt somit Spannungsverstärkung.

Solange das Gitter negativ erscheint, kann kein Strom im Gitterstromkreis fliessen, und irgendwelche

Aenderungen in der Spannung ergeben keine Stromstärkeänderungen. Sie bleiben somit wattlos. Dieselben Aenderungen jedoch sind von Stromstärkeänderungen im Plattenstromkreis begleitet und erzeugen eine Energieabgabe in diesem Stromkreis. Daraus ersieht man, dass die telephonische Leistungsfähigkeit nahezu unbegrenzt ist, indem aus einer wattlosen Aenderung der Eintrittsspannung eine Energieabgabe erhältlich ist.

Die Abflachung der charakteristischen Kurve der Fig. 15 durch eine Zunahme des positiven Potentials des Gitters lässt sich durch zwei physikalische Erscheinungen, welche beim Stromübertritt durch die Strecke Heizdraht—Platte auftreten, erklären. Die erste entspricht der thermionischen Entsendung von

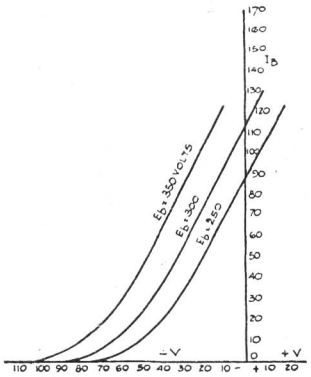

Fig. 16.

Elektronen aus dem Heizdraht, und die zweite entspricht ihrem aufgezwungenen und gesteuerten Uebertritt zwischen Heizdraht und Platte. Die Entsendung geht unabhängig davon, ob der Platte—Heizdraht-Strecke eine Spannung aufgedrückt werde oder nicht, vor sich und ist nur von der Heizdrahttemperatur abhängig. Der Vorgang weist eine grosse Aehnlichkeit mit der Verdampfung in einem geschlossenen Kessel auf; er erreicht bald einen statischen Gleichgewichtszustand, bei welchem dem Heizdraht während der gleichen Zeit gleichviel Elektronen zufliessen wie ihm entnommen wurden. Wird nun der Platte ein positives Potential erteilt, so wird der Gleichgewichtszustand gestört, indem Elektronen aus der Röhre entführt werden. Ist dieses Potential gering, so wird eine verhältnismässig geringe Zahl in der Sekunde entführt; d. h. der Strom ist klein, entsprechend dem untern Teil der Kurve. Steigt nun die Spannung, so steigt der Strom, bis er bei derjenigen Spannung ein bleibendes Maximum erreicht, bei welcher so viele Elektronen die Strecke durchfliessen, als der Heizdraht bei der Betriebstemperatur zu entsenden imstande ist.

Obschon also die Zahl der Elektronen, welche in der Sekunde zwischen Heizdraht und Platte übertreten — und infolgedessen auch der Strom — begrenzt ist, wird die Geschwindigkeit der sich bewegenden einzelnen Elektronen mit der Spannung zunehmen. Ist ein Rest von Gas in der Röhre verblieben, so werden die Gasmoleküle beim Auftreffen der Elektronen ionisiert, vorausgesetzt, dass die Geschwindigkeit der letzteren gross genug ist, das Elektronengebilde dieser Moleküle zu zertrümmern. Diese Ionisation erhöht jedoch die Zahl der Elektrizitätsträger und somit die Elektrizitätsmenge in der Sekunde, welche übergesetzt werden kann. Das Vorhandensein von Gas in einer Röhre wird deshalb allgemein durch eine Kurve, wie sie in Fig. 17 voll ausgezogen gezeigt wird, nachgewiesen.

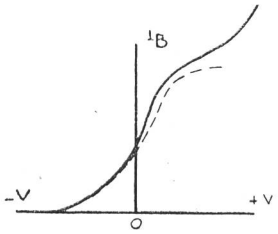

Fig. 17.

Die Spannungen im Audion bei Radioempfang von telegraphischen Zeichen sind bedeutend kleiner als die in der Telephonie gebräuchlichen, weshalb durch Gasresten keine Unzukömmlichkeit entsteht. Aus diesem Grunde fand es De Forest nicht für notwendig, alle die bekannten Mittel anzuwenden, durch welche ein möglichst hohes Vakuum erzeugt werden kann.

Bei der Behandlung der viel grösseren Energien, die im Telephonverstärkerbetrieb entstehen, ist es notwendig, Fabrikationswege einzuschlagen, welche die Entfernung jedes Gasmaterials aus der Röhre sicherstellen; hierin inbegriffen ist auch das Gasmaterial, welches in den Glaswänden und den Metallteilen eingeschlossen sein könnte. Wenn dieser Grad von Entleerung erreicht ist, so verbleiben alle Vorteile einer reinen Elektronenentladung auch für die höheren Spannungen und Ströme, welche in einem Telephonverstärker aufzutreten pflegen. Mit andern Worten ausgedrückt: es ergibt sich für eine gegebene Plattenspannung ein grösserer Spielraum für die Spannungen, welche dem Gitter aufgedrückt werden können, ohne dass vom wahren thermionischen Charakter, wie in Fig. 15 angedeutet, abgewichen wird.

Nebst der Erweiterung der oben angeführten Begriffe wurden gleichzeitig zahlreiche Untersuchungen ausgeführt, um für die Röhren die richtige Gestalt und die richtigen Grössenverhältnisse zur Erzielung der besten Ergebnisse in den verschiedenen Arten Verstärkerschaltungen herauszufinden, und ferner ein Heizdrahtelement zu schaffen, welches für die Verstärkerröhre längste Lebensdauer, kleinsten Kraftbedarf und gleichbleibende Arbeitscharakteristik während der ganzen Lebensdauer der Röhre gewährleistete. Man lernte auch, Röhren von gleichen Eigenschaften in grosser Menge herzustellen, ein Ergebnis, welches für den Telephonverstärkerbetrieb von grösster, für den Radiogebrauch jedoch von geringerer Bedeutung ist. Ungleichheiten in den Röhren würden im öffentlichen Verstärkerbetrieb eine ernste Unzukömmlichkeit darstellen, da es notwendig würde, die Apparate der Schaltung jedesmal neu einzustellen, wenn eine verbrauchte oder beschädigte Röhre zu ersetzen wäre.

Das Audion in seiner ursprünglichen Form war nicht nur vom Standpunkt seiner Energieverhältnisse aus ungeeignet, als Telephonverstärker zu dienen; es bestand auch ein eigentlicher Unterschied zwischen den Verhältnissen beim Gebrauch des Audions für Radioempfang und denjenigen, die in einer

Telephonverstärkerschaltung vorkommen. Diese Tatsache dürfte bezeichnend ausgedrückt werden, indem gesagt wird, dass wir beim Radioempfang Gebrauch machen von der Eignung des Apparates zum Verzerren einer Sinuswelle, welche er aufgedrückt empfängt, während für Telephonzwecke nur das äusserste Minimum von Verzerrung zulässig ist.

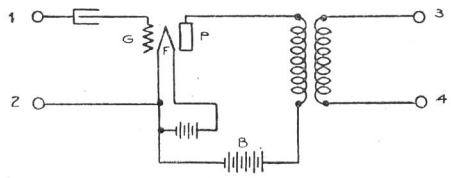

Fig. 18.

Beim Audion von De Forest war ein Kondensator im Gitterstromkreis eingeschaltet, wie in Fig. 18 veranschaulicht ist. Die Eintrittsklemmen sind dort mit 1, 2 und die Austrittsklemmen mit 3, 4 an der Uebertragerspule bezeichnet. Wird das Audion als Verstärker in einer Telephonleitung benützt, so dient die Uebertragerspule dazu, die Aenderungen des Stromes im Plattenstromkreis, der von der Batterie B gespiesen wird, und welche Aenderungen durch Spannungsänderungen im Eintrittsstromkreis entstanden sein können, der Leitung aufzudrücken. Der Kondensator verhält sich aber, wenn den Klemmen 1, 2 eine nach einer Sinuskurve verlaufende E. M.-Kraft aufgedrückt wird, wie eine Elektronenfalle. Nehmen wir an, dass die erste Wellenhälfte der Sinuswelle das Gitter in bezug auf den Heizdraht negativ erscheinen lasse. Dieser Polarität entspricht das Bestreben, Elektronen vom Gitter nach dem Heizdraht zu entsenden; da jedoch das Gitter keine Elektronen entsendet, so erfolgt kein Uebertritt. Wird das Gitter negativ, so wird aber auch, wie in Fig. 15 gezeigt, der Strom im Plattenstromkreis verringert. Nun wird die folgende Wellenhälfte versuchen, Elektronen in der entgegengesetzten Richtung zu entsenden, d. h. vom Heizdraht zum Gitter, welche Richtung des Uebertrittweges in diesem einseitig gerichteten Stromkreis eingeschlagen werden kann. Die zum Gitter entsendeten Elektronen können nun aber den Gitterstromkreis nicht durchlaufen, da der Kondensator für sie ein Hindernis bildet, obschon andere, vom entgegengesetzten Belag des Kondensators entsendete Elektronen gezwungen sind, den Rest des Weges zu machen. Das Ergebnis ist, dass jede positive halbe Welle die Zahl der Elektronen im Gitter und im angeschalteten Kondensatorenbelag vergrössert, wodurch ein erneutes Anwachsen des negativen Potentials erfolgt. Je stärker das Gitter aber negativ wird, um so geringer wird der Strom im Plattenstromkreis und um so tiefer liegt der entsprechende Punkt in der charakteristischen Kurve, nach welcher wir wellenförmige Aenderungen erzeugen.

Es ist einleuchtend, dass eine solche Wirkungsweise sehr geeignet ist, im Eintrittstromkreis das Auftreten einer Schar von Sinuswellen von kleiner Amplitude anzuzeigen, da die Wirkung kumulierend ist. Ebenso einleuchtend ist aber, dass eine solche Wirkungsweise den Durchgang von einer Schar Sprechwellen durch das System glatt verhindern würde, denn ein oder zwei Worte dürften das Gitter so stark negativ machen, dass die Plattenstromstärke auf Null sinken würde, während die Uebertragung der Welle gerade von seinen Aenderungen abhängig ist.

Die Verbesserung der Stromkreisanordnung durch die Weglassung dieses Kondensators, welcher die Verzerrung vermehrte, war nur eine Einzelheit unserer ausgedehnten Untersuchungen über die Verwendung thermionischer Apparate. Diese Arbeit umfasste das Studium von Stromkreisen, welche zur Verwendung mit Röhren geeignet sind, von thermionischen Erscheinungen, Mitteln und Wegen zur Erzeugung hoher Vakua, von Messapparaten zur Bestimmung des Verdünnungsgrades, von verschiedenen Heizdrahtmaterialien, um Leistungsfähigkeit und Gleichförmigkeit zu erreichen, sowie das Studium der physikalischen Beziehungen der geometrischen Formen und der Abstände der Elektroden in Drei-Element-Vakuumröhren. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen, so die der Arbeiten von Van der Gijl, W. Wilson und andern, sind bereits veröffentlicht worden.

Durch diese Untersuchungen wurde es uns möglich, Röhren zu bauen, die jedem Zweck der Telephontechnik genügen. In der Endform, die eine als Telephonverstärker brauchbare Vakuumröhre darstellt, ergibt sich eine charakteristische Beziehung zwischen Eintrittspannung und Austrittstrom, welche, soweit wir solche Wirkungen erkennen können, frei von Verzerrung ist. Dies ist teils durch die Bauart der Röhre, teils durch die bezüglichen Eigenschaften der zugeschalteten Stromkreise erreicht.

In erster Linie sorgen wir dafür, dass der Verstärker eine unveränderliche und abgeschlossene Eintrittimpedanz besitzt, indem im Nebenschluss zu Gitter und Heizdraht ein hoher Widerstand eingeschaltet wird. Diesem Widerstand wird durch den Transformator erhöhter Strom zugeführt, wie aus Fig. 19 ersichtlich ist.

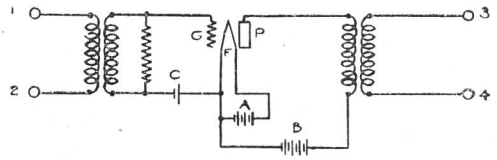

Fig. 19.

Die effektive Spannung im Gitter-Heizdrahtstromkreis ist dann der Spannungsabfall im Widerstand. In zweiter Linie sorgen wir allgemein dafür, dass das Gitter während der Periode der aufgedrückten Spannung nie positiv wird. Dies wird durch das Einschalten einer Batterie C in den Gitterstromkreis erreicht. Auf diese Weise wirkt die Röhre als Apparat zur Verstärkung der aufgedrückten Spannung und weist keine durch die einseitige Leitungsfähigkeit des Gitterstromkreises verursachte Verzerrung auf.

Die charakteristische Beziehung zwischen Gitterspannung und Plattenstrom, welche in den Kurven von Fig. 16 angedeutet ist, entspricht, wie leicht ersichtlich, nicht derjenigen eines vollkommenen Verstärkers, da kein geradliniges Verhältnis zwischen

Eintrittspannung und Austrittstrom besteht. Die Spannungen, die in diesen Kurven eingetragen sind, entsprechen denjenigen der Batterie im Plattenstromkreis. Die Bedingung, unter welcher sie erhalten wurden, lautet: Kein äusserer Widerstand in diesem Batteriestromkreis, so dass die Spannungen tatsächlich diejenigen sind, welche in der Röhre zwischen Platte und Heizdraht effektiv wirkten. Die als Ordinatenwerte eingetragenen Stromstärken sind aus den vereinten Wirkungen dieser effektiven Spannungen und der Spannungen, welche dem Gitterstromkreis aufgedrückt wurden, entstanden. Für jede dieser Kurven bleibt die effektive Plattenspannung unverändert, und die Kurve ergibt die Beziehung zwischen der Eintrittspannung und dem Austrittstrom. Ist jedoch äusserer Widerstand im Plattenstromkreis vorhanden, so wird die effektive Spannung zwischen Platte und Heizdraht nicht gleich der Batteriespannung sein, sondern dem Spannungsabfall IR in der äussern Leitung entsprechend kleiner. Einem Anwachsen der Gitterspannung entspricht dann nicht ein proportionales Anwachsen im Plattenstromkreis; denn die bei unveränderlicher Plattenspannung erzeugte Zunahme wird teilweise durch eine vom Spannungsabfall IR verursachte Abnahme der effektiven Plattenspannung aufgehoben.

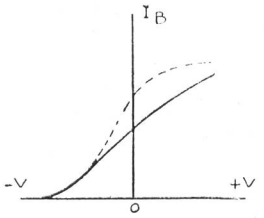

Fig. 20.

Bei richtiger Bemessung des äussern Widerstandes des Stromkreises Platte—Heizdraht ergibt sich eine ausgesprochen geradlinige, charakteristische Beziehung zwischen Gitterspannung und Plattenstrom, welche in Fig. 20 durch die ausgezogene Kurve dargestellt ist.

Den früher aufgestellten Anforderungen an einen Telephonverstärker ist deshalb durch unsern Aufbau des Audions und durch die zu seinem Betrieb nötige Schaltungsanordnung vollkommen Genüge geleistet.

II. b. Beim Audion ist die Betätigung des Elektronenstromes elektrostatisch. Es ist natürlich möglich, eine solche Ueberführung von Elektronen durch elektromagnetische Mittel zu beeinflussen, denn die Ueberführung besitzt tatsächlich die Eigenschaften eines Stromes.

Eine solche Beeinflussung ist jedoch an und für sich weniger leistungsfähig und empfindlich als diejenige des durch Spannung beeinflussten, beschriebenen Apparates. Wir werden deshalb solche Lösungen nicht weiter behandeln, sondern zur Besprechung von Apparaten übergehen, bei denen vorhandene Gasmoleküle eine Ionisation und somit die Bildung von positiven Körperchen mit molekularer Beschaffenheit und von negativen Elektronen verursachen.

III. Die Unterscheidung zwischen Elektronen- und Gasverstärkern hängt nicht davon ab, ob Gas vorhanden sei oder nicht, da ein vollkommenes Vakuum unerhältlich ist. Es handelt sich eher darum, ob das Gas ein nutzloses und unerwünschtes oder aber ein unerlässliches Element der Röhre bildet. Wie wir gesehen haben, war das Gas in der Vakuumröhre von De Forest nicht unerlässlich, und die vorhandenen Gasreste begrenzten den Spannungsbereich, in welchem die Röhre die zu Verstärkungszwecken notwendigen Eigenschaften besass.

III a. Beim Verstärkerelement von v. Lieben, welches einige Zeit, nachdem das Audion in Amerika entstanden war, in Europa erfunden wurde, bildet das Gas einen unerlässlichen Bestandteil. Dieser Apparat besitzt eine Wehnelt-Kathode, d. h. einen mit Oxyden alkalischer Erden überzogenen Glühkörper, von welchem Elektronen thermionisch ausströmen. Die Wirkung der Kathode dient hier jedoch nicht zur Erzeugung aller Elektrizitätsträger, wie im Falle des Audions der Heizdraht, sondern eher zur Ionisierung des Gases, welches in der Röhre enthalten ist.

Die Röhre ist ein Drei-Elektroden-Apparat; sie besitzt nebst der Glühkathode eine Anode aus Aluminium (der Platte im Audion entsprechend) und eine zwischengelagerte, siebartige Elektrode in Gestalt eines durchlöcherten Aluminiumbleches. Der Zweck des Siebes besteht darin, die Entladung, welche zwischen Anode und Kathode entsteht, durch eine aufgedrückte Spannung entsprechend zu steuern. Das Ausströmen von Elektronen von der Kathode zur Anode wird durch die Anwesenheit von Gasmolekülen erschwert. Die Ionisierung eines Teiles der Gasmoleküle erfolgt durch das Aufprallen der Elektronen aber erst dann, wenn ihre Geschwindigkeit gross genug ist; letztere hängt von der dem Stromkreis aufgedrückten Spannung ab. Aus der Ionisierung entstehen wiederum sowohl Elektronen, welche die Strömung verstärken, als auch positive Ionen von molekularer Beschaffenheit, welche nutzbar sind, sich aber in entgegengesetzter Richtung bewegen. Wird eine Potentialdifferenz zwischen Glühkörper und Sieb angewendet, so können die Bewegungen der Elektronen und positiven Ionen durch Anziehen der ersteren und Abstossen der letzteren oder umgekehrt beeinflusst werden.

Kleine Aenderungen des Potentials, welches dem Siebe aufgedrückt wird, können verhältnismässig grosse Aenderungen in der Ionisierung und somit in der Stromstärke des Anoden-Stromkreises zur Folge haben. Der Apparat kann somit zur Verstärkung verwendet werden, jedoch eignet er sich aus den nachstehend angeführten Gründen für Telephonbetrieb nicht.

Da die Röhre beide Arten Träger enthält, so werden die einen oder die andern derselben unvermeidlich zum Siebe strömen, und somit wird in jenem Stromkreise ein Strom entstehen, welcher mit bezug auf seine Richtung von der Polarität der aufgedrückten Spannung, und mit bezug auf seinen Umfang von der Leitungsfähigkeit der Gasstrecke in der Röhre abhängt. Würden nun, ähnlich wie beim Gitter — Heizdraht-Stromkreis des Audions, Kathode und

Sieb als Eintrittsstromkreis benützt, so müsste die Impedanz des Eintrittsstromkreises mit der aufgedrückten Spannung ändern. Eine derartige Aenderung hätte aber eine bedeutende Verzerrung zur Folge und entspräche somit unsern Anforderungen an ein Verstärkerelement nicht.

Die Anwesenheit von Trägern beider Arten verunmöglicht auch das einfache, beim Audion mit Vorteil angewendete Mittel der Ausnützung des einseitigen Leitungsvermögens des Gitter-Heizdrahtstromkreises. Ferner ist der Gasdruck innerhalb der Röhren Schwankungen unterworfen, auf die einen Einfluss auszuüben, fast unmöglich ist. Das Ergebnis hiervon sind grosse Aenderungen in der Verstärkerwirkung. Die Liebenröhre ist im Vergleich zum Elektronenapparat als Telephonverstärker mit erheblichen Fehlern behaftet, und es hat sich gezeigt, dass die elektrostatische Beeinflussung von Gasapparaten nicht in solch leistungsfähiger und einfacher Weise wie die elektrostatische Beeinflussung von Elektronenapparaten für Telephonprobleme verwendet werden kann.

III. b. Die elektromagnetische Beeinflussung von Gas enthaltenden Apparaten ist im Hinblick auf deren Verwendung für Telephonzwecke ebenfalls untersucht worden. Die entgegengesetzt gerichteten Ströme positiver und negativer Träger werden von einem magnetischen Feld in derselben Richtung abgelenkt. Wenn die Bewegung eines solchen Entladestromes zu einer brauchbaren Veränderung der Leitfähigkeit des Entladestromes selbst oder eines Nebenstromkreises verwendet werden kann, so ist die Möglichkeit zur Bildung eines Verstärkerelementes geschaffen.

Ein Teil der frühesten Untersuchungsarbeiten über solche Anordnungen ist Hewitt zuzuschreiben, dessen Versuche mit Quecksilberdampfstrecken bekannt sind. Die Anordnung, welche er zur Verwendung vorschlug, ist in Fig. 21 angeführt. Die dort

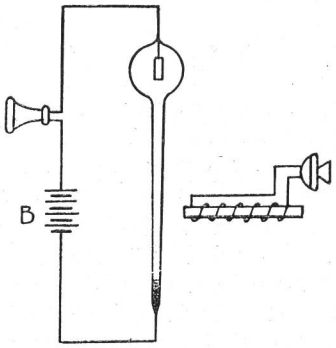

Fig. 21.

gezeigte Röhre enthält Quecksilberdampf, durch welchen ein Strom aus der Batterie B hindurchgeht. Ein Hörer ist mit der Batterie und der Bogenstrecke in Reihe geschaltet. Die Strömung in der Bogenstrecke wird durch den Elektromagneten beeinflusst, welcher seinerseits durch das Mikrophon erregt wird. Diese Anordnung, welche einen sehr unempfindlichen, einseitig wirkenden Verstärkerapparat darstellt, ist, soviel bekannt, im Telephonverstärkerbetrieb niemals zur Anwendung gekommen. Zu den bereits genannten Nachteilen gesellen sich noch die andern Mängel der Anordnung, wie Lärm, Verzerrung und veränderliche Verstärkungsweise.

Ein weiterer Schritt in der Entwicklung eines elektromagnetisch beeinflussten Quecksilberdampfverstärkers wurde später durch Dr. H. D. Arnold unternommen. Der Forscher benützte einen Nebenstromkreis als Austrittstromkreis und legte ihn so an, dass seine Leitfähigkeit in Uebereinstimmung mit der Bewegung des Bogenstromes veränderlich erschien. Im allgemeinen Gedankengang über die Verwendung einer Quecksilberdampfstrecke und der magnetischen Beeinflussung derselben tritt Arnold in die Spuren von Hewitt.

Der von Arnold entworfene Nebenstromkreis steht senkrecht zur Bogenstrecke und enthält drei Elektroden; die eine davon befindet sich in der Mitte der Strecke und die zwei andern ungefähr gleich weit entfernt auf beiden Seiten der Mitte, wie ein Schnitt durch die Röhre (Fig. 22) zeigt, worin die Hauptstrecke senkrecht zur Ebene des Bildes steht.

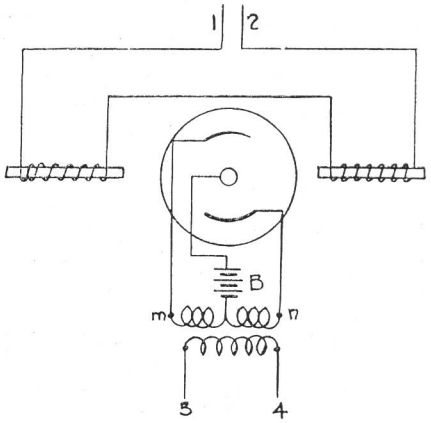

Fig. 22.

Der Elektromagnet befindet sich in der Ebene dieser Elektroden und dient somit dazu, die Strömung in der Hauptstrecke gegen die eine oder die andere Seitenelektrode abzulenken, je nach der Polarität des Magneten. Die Ionen der Hauptstrecke können als Stromträger zwischen diesen Elektroden und der Mittelelektrode dienen, wenn zwischen denselben eine Potentialdifferenz aufrecht erhalten wird, wie die Batterie B sie erzeugt.

Im Ruhezustand, in welchem die Strömung unbeeinflusst ist, sind zwischen der Mittelelektrode und den Seitenelektroden gleiche Teilströmungen vorhanden. Die Leitfähigkeit der beiden dem Batteriepotential so gebotenen Wege ist dann die gleiche, und somit entsteht kein Spannungsunterschied zwischen den Klemmen m, n der Spule und der Klemme im Mittelpunkt derselben, an welche die Batterie angeschlossen ist. Wenn in diesem Zustand die Leitfähigkeit dieser beiden Zweige der Brückenschaltung infolge der Aenderung der Ionisierung in der Strömung der Bogenstrecke trotzdem zu schwanken beginnt, so wird doch kein Spannungsunterschied an den Spulenklemmen entstehen können, da die Aenderungen in den leitenden Zweigen infolge der gemeinschaftlichen Quelle gleichmässig auftreten. Starke gelegentliche Aenderungen in der Strecken-

strömung werden deshalb nicht auf den äussern Stromkreis übertragen, und somit ist auch das im Zusammenhang damit auftretende Geräusch vermieden. Wird jedoch die Strömung in der Bogenstrecke durch den von den Sprechwellen betätigten Elektromagneten abgelenkt, so ändern sich die Leitfähigkeiten der Zweige in entgegengesetztem Sinne und es kann ein Strom entstehen.

Den Apparat, wie er in der Patentschrift beschrieben ist, zeigt Fig. 23.

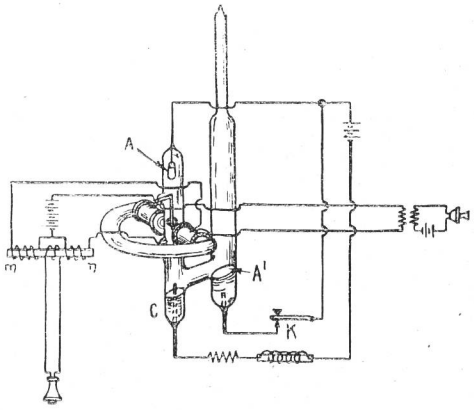

Fig. 23.

Eine aus einer Quecksilberelektrode bestehende Hilfsanode, welche in der Fig. 23 mit A^1 bezeichnet ist, wird zur Einleitung der Streckenströmung benützt. Hierzu wird die Röhre gekippt, so dass das Quecksilber der Anode A^1 durch Ueberfliessen in Berührung mit demjenigen der Hauptkathode C gelangt. In dem Augenblick, wo die Röhre in ihre Grundstellung zurückgebracht wird, und vorausgesetzt, dass der Schlüssel K niedergedrückt ist, entsteht eine Strömung zwischen A^1 und C. Wird deren Stromkreis bei K geöffnet, so bildet sich die Strömung zwischen C und A.

Dieser Gas enthaltende Apparat ist für eine gute Verstärkung geeignet und zudem ziemlich frei von Verzerrungen mit Ausnahme derjenigen, welche ihre Ursache in der Verschiedenheit der Impedanz des Elektromagneten von derjenigen einer Telephonleitung haben. Er ist auf Telephonleitungen versuchsweise eingeschaltet worden, jedoch nie für längere Zeit und stets nur unter besonderer fachmännischer Ueberwachung. So waren z. B. solche Einheiten auf den wichtigen Fernleitungen zwischen New York und San Franzisko eingeschaltet, ohne dass sie aber für den öffentlichen Betrieb benützt worden wären.

III. c. Die dritte Klasse von Gasapparaten, welche wir auf ihre Eignung als Telephonverstärker

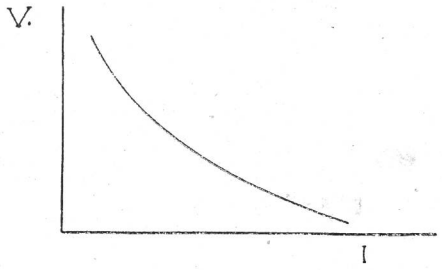

Fig. 24.

untersuchten, ist die vom „negativen Widerstand" beeinflusste. Eine charakteristische Kurve für die Beziehung von Spannung zu Stromstärke für eine Entladestrecke ist in Fig. 24 dargestellt, worin in den Abszissen der resultierende Strom und in den Ordinaten die aufgedrückten Spannungen aufgetragen sind.

Für einen gewöhnlichen Widerstand ist die Steigung des Verhältnisses von Spannung zu Stromstärke im gewöhnlichen Sinne positiv, denn für irgend einen Punkt der Kurve ist dV/dI positiv und stellt im entgegengesetzten Uhrzeigersinn, von der I-Axe gemessen, eine Steigung von weniger als 90 Grad dar. Für die Entladestrecke mit ihrer fallenden Charakteristik ist jedoch die Steigung negativ. Der Widerstand, welchen die Strecke einer Aenderung ihres Zustandes bietet, kann somit als negativ bezeichnet werden.

Wird eine Entladestrecke in Reihe mit einem Ohmschen Widerstand an eine Kraftquelle angeschlossen, wie dies in Fig. 25 gezeigt wird, und was der von Hewitt vorgeschlagenen Anordnung entspricht, so verursacht die Bogenstrecke infolge ihrer

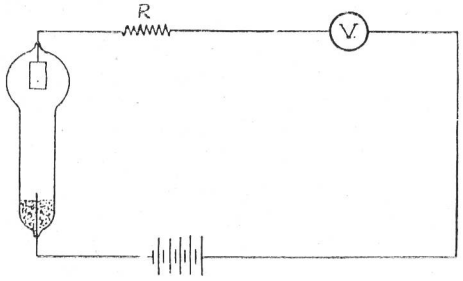

Fig. 25.

fallenden Charakteristik, dass der Gesamtwiderstand des Stromkreises, wenn kleine Stromschwankungen stattfinden, geringer ausfällt, als wenn die Verhältnisse unverändert bleiben.

Der Grund ist darin zu suchen, dass irgend ein kleines Anwachsen des Stromes von einer Abnahme der Klemmenspannung an der Bogenstrecke selbst begleitet ist, somit am Ohmschen Widerstande eine noch grössere Klemmenspannung belässt, als wenn der Stromkreis aus Elementen, welche nur den Ohmschen Gesetzen gehorchen, zusammengesetzt wäre. Ist die Quelle V ein Mikrophon und befindet sich im Stromkreis auch ein Hörer, so ergibt sich, dass unter günstigen Bedingungen die erhaltene Energie im Hörer grösser sein kann, als die vom Mikrophon an den Stromkreis abgegebene. Mit andern Worten, es besteht die Möglichkeit einer Verstärkung.

Der Umfang der Verstärkung mit dem Hewitt-Apparat hängt offenbar sowohl von der Grösse des negativen Widerstandes als von derjenigen des äussern Ohmschen Widerstandes ab. Der äussere Widerstand kann zum Teil einer Telephonleitung angehören. Dies ist auch der Grund, warum die Anordnung als Mittel zur Telephonverstärkung in Betracht gezogen worden ist. Der negative Widerstand der Bogenstrecke kann aber nie mehr als einen kleinen Teil des äusseren Widerstandes aufheben. Könnte er mehr leisten, so würde sicherlich „Eigen-

tönen" auftreten. Wir haben auch herausgefunden, dass das System niemals die Tonstärke der telephonierten Laute erhöhen kann, wenn der Leitungswiderstand zu klein ist, um die Strecke ruhig zu halten. Im Betriebe würde die Bogenstrecke an verschiedene Telephonleitungen anzuschalten sein, von welcher jede eine verschiedene Charakteristik hätte. Damit nun in einer zur Verstärkung geeigneten Bogenstrecke im Augenblicke des Anschlusses an eine Leitung mit niedrigem Widerstand keine Schwingungen auftreten können, muss ein gewisser Betrag von äusserem Widerstand dem Streckenstromkreis beigefügt werden, welcher Widerstand für jede verschiedene Leitungsart verschieden ausfallen müsste. Für Telephonbetriebsverhältnisse ist deshalb diese Ausführung mit negativem Widerstandselement unbrauchbar.

Selbst für den Fall, dass die gebotene Verstärkung für gegebene Verhältnisse noch genügend wäre, bliebe immer noch die Tatsache, dass die dynamische Charakteristik der Bogenstrecke sich mit der Frequenz der aufgedrückten Telephonwellen verändert und durch das Auftreten von Verzerrung und veränderlicher Verstärkung unzulässige Verhältnisse schafft. Ferner ist der auf dem „negativen Widerstand" fussende Apparat, gleich wie die oben beschriebenen, Gas enthaltenden Apparate, für den betriebsmässigen Gebrauch zu unbeständig.

Die zwei Ausführungen, welche den hohen Anforderungen des öffentlichen Telephonbetriebes zu genügen vermögen, sind das Hörer-Mikrophonelement und die Dreielektroden-Vakuumröhre oder das Audion. Die elektromagnetisch beeinflusste Bogenströmung mit Hilfselektroden, von welcher wir teilweise zu Versuchszwecken Gebrauch machten, ist, wie oben ausgeführt, in ihrem heutigen Entwicklungszustand zur allgemeinen Verwendung in der Telephonie nicht geeignet, obschon sie viele Eigenschaften eines für den öffentlichen Betrieb brauchbaren Verstärkers besitzt. Von den drei Gruppen: den elektrodynamischen oder mechanischen Verstärkern, den Elektronenverstärkern und den Gasverstärkern, kommt der Elektronenapparat mit thermionischer Entsendung der Vollkommenheit am nächsten. Tatsächlich sind die Mängel gegenüber einem vollkommenen Verstärker so gering, dass sie, wenn nicht äusserst strenge Bedingungen gestellt werden, vernachlässigt werden dürfen.

Verstärkerschaltung.

Die Drahtverbindungen, mittelst welcher ein oder mehrere Verstärker mit einer Telephonleitung verbunden werden, stellen, wie früher ausgeführt, die „Verstärkerschaltung" dar. Im gegenseitigen Betrieb, wie er in der Telephonie nötig ist, kann man drei Hauptarten solcher Schaltungen unterscheiden, von welchen die Brücken- oder „ausgeglichene" Schaltung, wie an früherer Stelle gesagt, die gebräuchlichste darstellt.

Bei den andern Arten hängt das erfolgreiche Arbeiten nicht vom Gleichgewichtszustand ab. Eine derselben wird gewöhnlich als „booster" Schaltung bezeichnet. Fig. 26 zeigt eine Anordnung für „booster" Schaltung in Reihe, wobei Eintritt und Austritt des Elementes unter sich und mit der Leitung in Reihe geschaltet sind. Eine Anordnung für „booster" Schaltung im Nebenschluss ist in Fig. 27 dargestellt. „Booster" Schaltungen in andern Anordnungen sind in grosser Zahl möglich. Ihrer Natur nach sind „Negativ-Widerstand"-Apparate für Betrieb mit „booster" Schaltung geeignet.

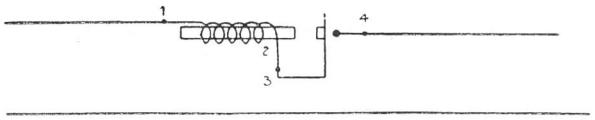

Fig. 26.

Bei Verwendung von „booster" Schaltungen besteht zur Vermeidung des Eigentönens ein begrenzter Abhängigkeitszustand zwischen dem Verstärkungsgrad, für welchen das Element eingestellt ist, und der Impedanz der Leitung, in welche es eingeschaltet ist. Ein Teil der Austrittströme des Elementes muss durch den Eintrittstromkreis desselben Elementes fliessen. Somit hängt die Verstärkung des ankommenden Telephonstromes vom „Hinaufschaukeln" durch die Wechselwirkung von Eintritt und Austritt von Strömen im Stromkreise ab. Es ist klar, dass ein solcher Stromkreis mit seinem Element als Schwingungserzeuger wirken könnte, wenn die Leitungen nicht eine genügende Induktivität besässen; mit andern Worten: es könnte „Singwirkung" auftreten.

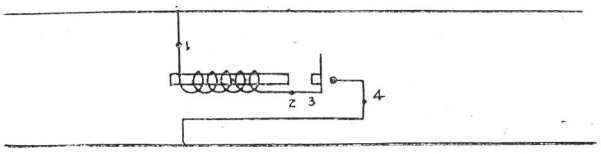

Fig. 27.

Die dritte Art Verstärkerschaltung gleicht einigermassen der einfachen Anordnung für Telegraphverstärker- (Translations-) Betrieb. Die ankommenden Sprechströme betätigen empfindliche Relais, welche die Klemmen des Elementes je nach der Richtung, aus welcher die Sprechströme herkommen, so umschalten, dass der Stromkreis zu jeder Zeit einer einseitigen Verstärkerschaltung entspricht.

Diese Schaltungsarten, obschon vom Gleichgewichtszustand unabhängig, haben sich für die allgemeine Verwendung nicht so zweckdienlich erwiesen wie die in Brücke angeordnete Gegensprechschaltung und werden deshalb nicht weiter besprochen.

Die Brückenschaltungsarten scheiden wir in zwei Klassen, je nachdem man ein einziges Verstärkerelement zur Verstärkung der Uebertragung nach beiden Seiten oder getrennte Elemente für die entgegengesetzten Richtungen verwendet. Die Schaltung, welche in Fig. 28 gezeigt wird, vertritt, wie ersichtlich, die erste dieser Klassen. Eine solche Schaltung pflegen wir als „Schaltung 21" zu bezeichnen und deuten damit an, dass sie mit 1 Verstärkerelement nach 2 Seiten wirkt. Die andere Klasse werden wir etwas später besprechen. Sie umschliesst die „Schaltung 22", welche Bezeichnung eine nach 2 Seiten wirkende Schaltung mit 2 Verstärkerelementen andeutet.

Die Eintritt- und Austrittklemmen des Elementes in der „Schaltung 21", Fig. 28, können offenbar gegeneinander ausgetauscht werden, ohne dass deswegen die physikalische Arbeitsweise der Schaltung geändert wird, da das Element nach beiden Seiten im Nebenschluss tätig ist und nicht in Reihe. Die Wahl der Anschlussweise wird in hohem Masse von der mehr oder weniger grossen Leichtigkeit beeinflusst, mit der vermittelst der Uebertragerspulen die Eintritt- und Austrittimpedanzen des Elementes den Impedanzen des Leitungsnetzes, an welche sie gekoppelt sind, ähnlich gemacht werden können.

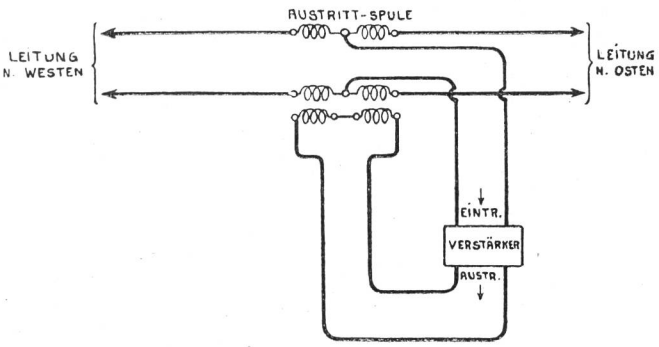

Fig. 28.

Eine zweckentsprechende Anordnung für die Schaltung 21 wird in Fig. 29 im Zusammenhang mit ihrer Verstärkerröhre gezeigt. Die ankommende Energie wird über eine Eintrittsübertragerspule zugeführt, wobei zwischen der Spule und den Telephonleitungen eine in der Abbildung nicht angegebene Art Filter gelagert ist. Dieses Filter stellt eine physikalische Schwingungsanordnung dar (viele solcher sind von Dr. G. A. Campbell angegeben worden), welche aus einer Reihenschaltung gleichartiger Kettenglieder besteht und so beschaffen ist, dass der Durchgang

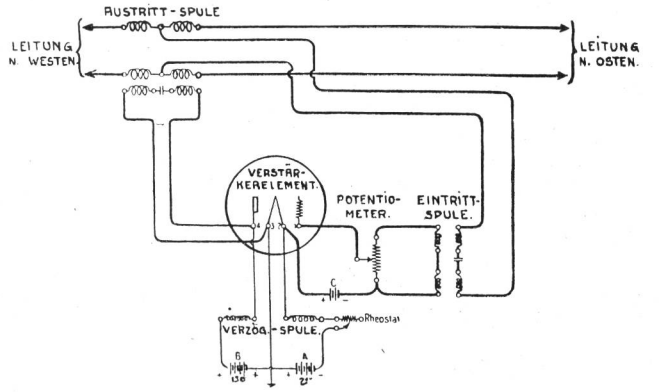

Fig. 29.

von sinusoidalen Strömen mit höhern oder niedrigeren Frequenzen als derjenigen der Sprechströme, welche von der gleichzeitigen Benützung der Telephonschleifen für Telegraphen- und andere Signalströme herrühren können, verhindert wird. Das Potentiometer ist zum Einstellen der Leistung des Verstärkers bestimmt. Die Verzögerungsspulen und Kondensatoren verhindern das Uebersprechen in benachbarte Telephonstromkreise und ermöglichen die Benutzung einer gemeinschaftlichen Batterie zur Bedienung aller Einheiten einer Verstärkerstation. Der angedeutete Rheostat wird benötigt, um den Strom des Heizdrahtes und damit die thermionische Ausströmung in richtigen Grenzen zu halten.

Bevor wir an die Beschreibung der Schaltung 22 gehen, wollen wir die physikalische Arbeitsweise der Schaltung 21 noch in einer anderen als der bisherigen Weise angeben. Folgen wir hierzu dem Telephonstrom und nehmen wir einmal an, dass er von Westen nach Osten verlaufe: Der Strom, der von Westen zum Verstärker gelangt, wird von der Schaltung zum Teil auf die Leitung nach Osten übertragen; der grössere Teil davon wird jedoch in die Eintritt- und Austrittstromkreise des Telephonverstärkerelementes verteilt. Die Energie, welche in den Austrittstromkreis fliesst, bleibt ohne Wirkung. Diejenige, welche in den Eintrittstromkreis fliesst, wird vom Element verstärkt, und der verstärkte Strom fliesst zur Austrittspule. Von diesem Punkte aus verteilt sich die Energie — vorausgesetzt, dass die Leitung nach Westen und diejenige nach Osten in bezug auf ihre Charakteristiken einander ähnlich sind — zu gleichen Teilen auf die nach Osten und die nach Westen führende Leitung. Die Hälfte, welche nach Westen geht, d. h. nach der Richtung, von welcher die Uebertragung kommt, ist verloren. Die Hälfte, die nach Osten geht (gemeinsam mit dem geringen Betrag an Energie, welcher direkt durch die Schaltung ging), kann bedeutend grösser sein als die ursprüngliche von der westlichen Leitung kommende Energie und ist somit nutzbar.

Wenn die Leitungen nach Westen und Osten in ihren Charakteristiken übereinstimmen, so wird, entsprechend der Symmetrie in der Brücke, keine Klemmenspannung am Eintrittstromkreis auftreten, und es besteht somit keine Möglichkeit zum „Singen" (Eigentönen), wie hoch die Verstärkung auch getrieben werde. Diese Schaltung erlaubt deshalb gegensprechende Uebertragung über ähnliche Leitungen.

Wenn aber die Leitungen nach Westen und Osten in ihren Impedanz-Eigenschaften für irgend eine Lage im Bereich der Tonfrequenzen verschieden sind, so entstehen bei solchen Frequenzen Klemmenspannungen am Eintrittstromkreis, welche vom Strom aus dem Austrittstromkreis verursacht werden. Es besteht dann Tendenz zum „Singen" und zur Verzerrung; die Bedingungen, welche im Falle solcher Ungleichheiten gelten, werden später beschrieben.

Die in Fig. 3 angegebene Gegensprech-Brückenschaltung, welche früher besprochen wurde, ist als Endstellenschaltung zu gleichzeitiger Uebertragung von zwei Gesprächen über eine einzige Schleife geeignet. Für solchen Betrieb wird die Telephonleitung, durch Einschaltung einer künstlichen Leitung von ähnlicher Impedanz-Frequenzeigenschaft in den gegenüberliegenden Brückenzweig, im Gleichgewicht gehalten. Wir können somit in einer Verstärkerstation beide ankommenden Leitungen in Brückenschaltung endigen lassen, jede Leitung durch eine künstliche Leitung im Gleichgewichte halten und beide Leitungen als durchgehende Verbindung für Gegengespräch betreiben, vorausgesetzt, dass wir den Eintrittzweig jeder Brücke mit dem Austritt-

zweig der andern verbinden und je einen einseitig wirkenden Verstärker in jeden dieser Zweige zwischenschalten (siehe Fig. 30.).

Die so entstandene Schaltung ist die in ihren Grundzügen schon angeführte Schaltung 22, obschon deren Entwicklungsgang eigentlich nicht an Hand der Ueberlegungen, welche wir im vorher-

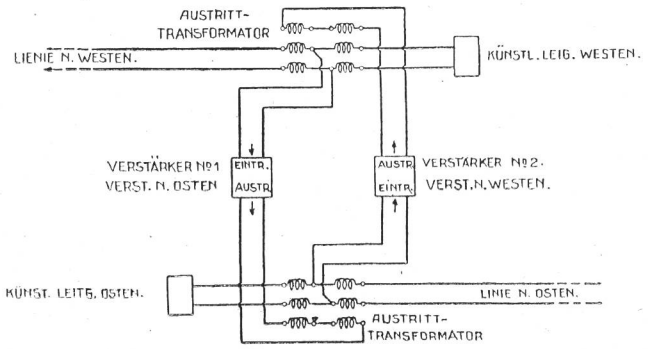

Fig. 30.

gehenden ihrer Einfachheit halber erwähnten, erfolgte. Es ist ersichtlich, dass diese Schaltung für die Uebertragung von Westen nach Osten ein Verstärkerelement verwendet, das von dem für die Uebertragung von Osten nach Westen benutzten unabhängig ist, dass sie zwei „Austrittübertrager" benötigt, und zugleich bedingt, dass jede Leitung, anstatt durch diejenige nach der entgegengesetzten Richtung, durch eine künstliche Leitung (mit „künstliche Leitung Westen" oder „künstliche Leitung Osten" bezeichnet) im Gleichgewicht gehalten wird. Wenn wir annehmen, dass die Uebertragung wiederum von Westen komme, so lassen sich die Ströme durch die Verstärkerschaltung wie nachstehend auseinandergesetzt verfolgen: Ein kleiner Teil der Energie fliesst wieder in die „künstliche Leitung Westen"; der grössere Teil verteilt sich jedoch auf den Eintrittstromkreis von Verstärker Nr. 1 und den Austrittstromkreis von Verstärker Nr. 2. Der Teil, welcher dem Austrittstromkreis von Verstärker Nr. 2 zufliesst, verläuft, ohne irgendwelche nützliche Arbeit zu leisten. Der Teil, welcher den Eintrittstromkreis von Verstärker Nr. 1 erreicht, wird verstärkt, und die so verstärkte Energie fliesst durch den Austrittübertrager, welcher an die Leitung nach Osten angeschlossen ist. Die „künstliche Leitung Osten" wird so angelegt, dass sie für den vollen Bereich der Tonfrequenzen möglichst die gleiche Impedanz besitzt wie die eigentliche Leitung. Wäre die Ausgleichung vollkommen, so würde keine Klemmenspannung am Eintrittstromkreis des Verstärkers Nr. 2 auftreten, und somit würde keine Ursache zum „Singen" geschaffen, wie hoch auch die Verstärkung getrieben würde.

In der Wirklichkeit kann jedoch die Ausgleichung nie vollkommen sein, so dass eine gewisse Klemmenspannung an diesem Eintrittstromkreis tatsächlich auftritt. Diese wird ihrerseits vom Verstärker Nr. 2 verstärkt. Die verstärkten Ströme fliessen dann durch den Austrittübertrager, welcher an die Leitung nach Westen angeschlossen ist. Hat die „künstliche Leitung Westen" genau die gleiche Impedanz wie die Leitung nach Westen, so verteilt sich die Energie gleichmässig auf beide, und es wird keine Klemmenspannung am Eintrittstromkreis des Verstärkers Nr. 1 auftreten. Dies würde jede Möglichkeit zum „Singen" ausschliessen. Aber auch hier wird in Wirklichkeit immer einige Ungleichheit bestehen, so dass eine geringe Klemmenspannung an diesem Eintrittstromkreis tatsächlich auftreten wird. Sind beide Ungleichheiten, d. h. Leitung nach Osten gegen „künstliche Leitung Osten" und Leitung nach Westen gegen „künstliche Leitung Westen" gross genug, so ist klar, dass die Telephonströme einen geschlossenen Weg über zwei Verstärker und über diese Ungleichheiten vorfinden, und dass somit „Singen" auftreten kann.

Diese Schaltung ist jedoch viel „ruhiger" als die Schaltung 21. Man kann sich darauf verlassen, dass kein Singen auftritt, solange irgend eine der künst-

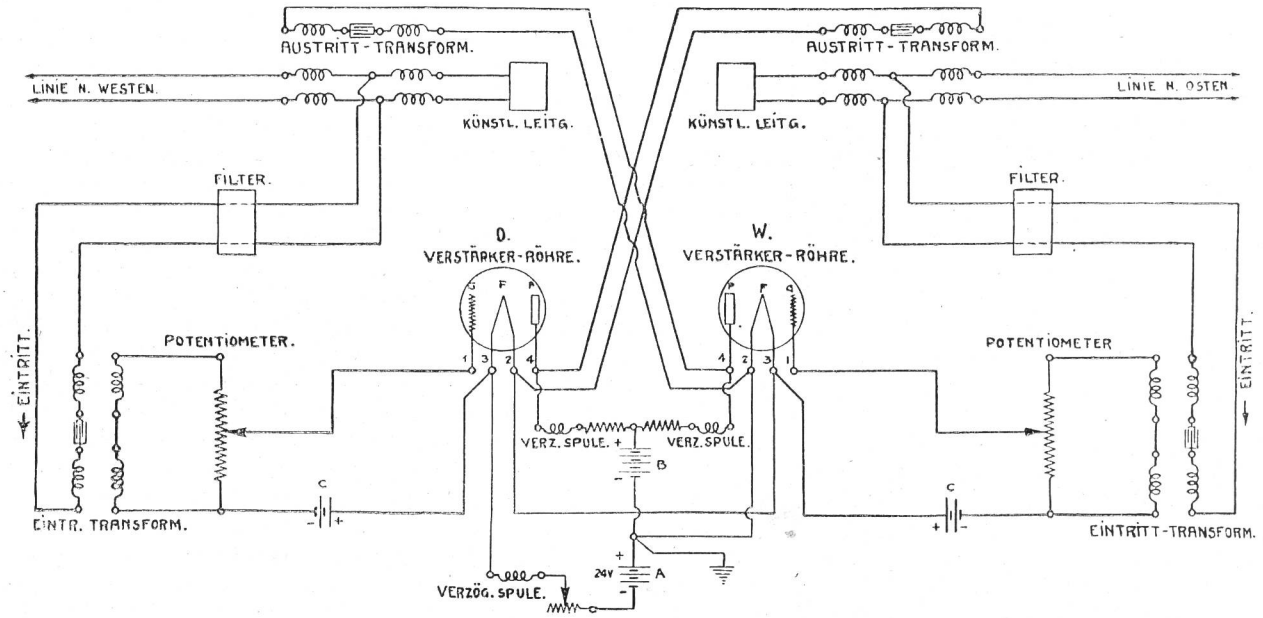

Fig. 31.

lichen Leitungen die zugehörige Leitung genau im Gleichgewicht hält, auch wenn die Ungleichheit zwischen der andern künstlichen Leitung und ihrer zugehörigen Leitung noch so gross ist. Die Tatsache, dass ein Anstoss zum „Singen" zwei Ungleichheiten zur Voraussetzung hat, gewährleistet im allgemeinen „ruhigere" Verhältnisse.

Die Schaltung 22 weist ferner noch eine andere Eigenschaft auf, welche im Zusammenhang mit der Reihenschaltung von Verstärkern, d. h. wenn zwei oder mehrere Verstärker an verschiedenen Punkten einer Leitung verwendet werden, von grosser Bedeutung ist. Wie darauf hingewiesen wurde, erzeugt die Uebertragung aus der Leitung nach Westen, wenn sie von einem nach Schaltung 21 geschalteten Verstärker (Fig. 28) empfangen wird, einen verstärkten, nach der Ost-Leitung fliessenden Strom; sie erzeugt aber auch einen gleich grossen in die Leitung nach Westen fliessenden Strom. Bei der Schaltung 22 jedoch wird sehr wenig Energie in die Leitung nach Westen zurückgesandt, wenn die Uebertragung aus der West-Leitung kommt, und der Gleichgewichtszustand zwischen der „künstlichen Leitung Osten" und der wirklichen Leitung nach Osten ein guter ist. Diese Eigenschaft der Schaltung 22 bietet einen grossen Vorteil, wie unter „Reihenbetrieb von Verstärkern" näher ausgeführt wird, indem die auf der Leitung nach Westen zurückgesandte Energie auf irgend einen Verstärker, welcher sich auf dieser Leitung befände, einwirken würde.

Eine Schaltung 22 mit Vakuumröhren-Verstärkerelementen ist in Fig. 31 vorgeführt.

In Verbindung mit der Vorführung der Schaltung 22 erscheint es angezeigt, daran zu erinnern, dass diese Schaltung, welche heute das bestbekannte Hilfsmittel ist, um gegensprechenden Verstärkerbetrieb mit einseitig wirkenden Verstärkerapparaten zu ermöglichen, die Erfindung von W. L. Richards, einem Techniker des Bell-Systems, ist, welcher die Anordnung im Jahre 1895 entwarf und patentieren liess, d. h. Jahre bevor brauchbare Telephonverstärker zur Verfügung standen.

Gleichgewichtszustand von Leitungen.

Wie vorstehend hervorgehoben wurde, hängt die ruhige Arbeitsweise der Schaltung 21 vom Gleichgewichtszustand der Leitung nach Osten und der Leitung nach Westen ab, und ebenso die Arbeitsweise der Schaltung 22 vom Gleichgewichtszustand jeder der Leitungen und einer künstlichen Leitung. Das „im Gleichgewicht halten" oder die gegenseitige „Ausgleichung" bedingt, dass die zwei Leitungen oder die Leitung und ihre künstliche Leitung, nachdem sie gegeneinander ausgeglichen sind, nahezu die gleiche Impedanz für den ganzen Bereich der Tonfrequenzen aufweisen.

Unter der Voraussetzung, dass wir Verstärkerelemente besitzen, die eine genügende Verstärkung zulassen, ohne dass die Güte der Uebertragung merkbar beeinträchtigt wird, hängt der Umfang der Verstärkung, den wir in irgend einem gegebenen Falle erreichen können, davon ab, bis zu welchem Grade die Güte des Gleichgewichtszustandes gehoben werden kann. Dies hängt wiederum von den Leitungszuständen ab, wie wir bald sehen werden. Es sind somit die Leitungszustände, die letzten Endes in jedem gegebenen Falle die Grenze der Verstärkung, welche mit einem Verstärkerelement erreicht werden kann, bestimmen.

Ueberlegen wir uns daher, wie die Impedanz einer Telephonleitung, von den Verstärkerklemmen aus betrachtet, aussehen mag.

Impedanz der Telephonleitung.

Nehmen wir eine sehr lange Freileitungsschleife von Nr. 8 B. w. g. (4,19 mm) Kupferdraht, also von der gröbsten im Telephonbetrieb verwendeten Drahtsorte, und setzen wir vollständige Gleichförmigkeit im elektrischen Charakter über die ganze Länge voraus, so entspricht die Impedanz dieser Anordnung, d. h. das Verhältnis der Klemmenspannung zur Stromstärke, den Kurven 1 und 2 in Fig. 32, woselbst Kurve 1 den Widerstand und Kurve 2 die negative Reaktanz der Impedanz darstellt.

Für eine solche Leitung können wir auf sehr einfache Weise eine künstliche Leitung herstellen, welche annähernd die gleiche Impedanz besitzt, und in einer Verstärkerschaltung zum Herstellen des Gleichgewichtszustandes verwendet werden kann. Kurven 3 und 4 in Fig. 32 zeigen die Impedanz einer künstlichen Leitung, welche nur aus Widerstand und aus einem in Reihe geschalteten Kondensator besteht.

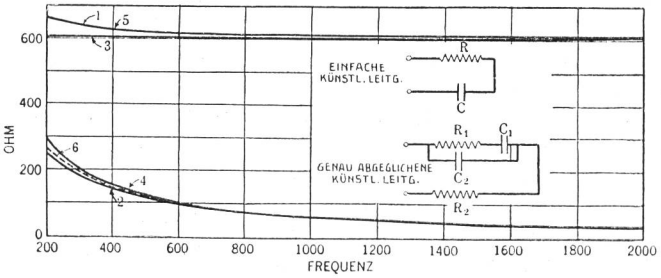

Fig. 32.

Es ist ersichtlich, dass sogar diese einfache Stromkreisanordnung einen sehr guten Ersatz für die Impedanz einer langen Freileitung bietet, ausgenommen bei niederen Frequenzen. Die Kurven 5 und 6 zeigen die Impedanz einer etwas besser ausgeglichenen künstlichen Stromkreisanordnung (Fig. 32, untere Figur), welche einen sehr guten Ersatz innerhalb des ganzen Bereiches der Tonfrequenzen darstellt.

In Wirklichkeit besitzt jede Leitung leichte Unregelmässigkeiten, welche die Impedanz einigermassen beeinflussen. Kurven 1 und 2 in Fig. 33 zeigen die Impedanzkurve einer tatsächlich bestehenden, jedoch verhältnismässig noch gleichförmigen Leitung. Bei den Messungen wurden die Enden der Leitung über eine Brücke von ähnlicher Impedanz, wie sie ein langes Stück der Leitung darstellen würde, miteinander verbunden. Kurven 5 und 6 sind aus Fig. 32 zum Vergleiche herübergeholt.

Es ist nun aber schwer, eine lange Freileitung gänzlich frei von kurzen Kabelstrecken zu halten. Fig. 34 zeigt beide Impedanzkomponenten einer 4,19 mm (Nr. 8 B. w. g., ungefähr 265 km langen) Schleife, welche, wie vorher angedeutet, über eine

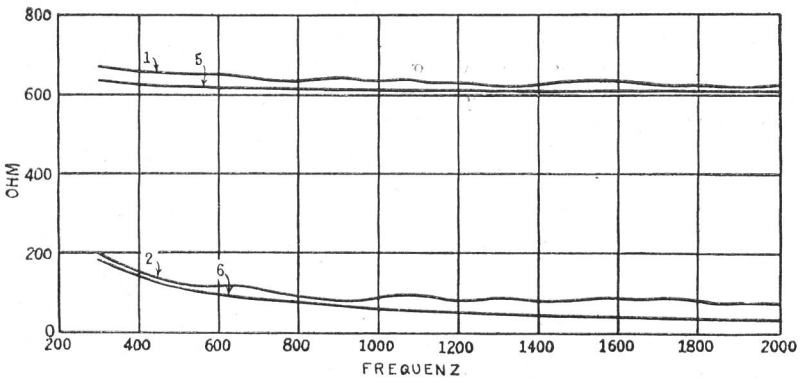

Fig. 33.

Impedanzbrücke von gleicher Beschaffenheit, wie sie ein langes Stück der Leitung selbst darstellen würde, am entgegengesetzten Ende geschlossen wurde, jedoch eine 2 km lange Kabelstrecke enthält, die 169 km vom Ende, an welchem die Messungen vorgenommen wurden, entfernt ist.

Es ist begreiflich, dass eine künstliche Leitung, welche die gleiche Impedanz wie diese Leitung aufweisen soll, schwer herzustellen ist. Es kann jedoch mit verhältnismässig einfachen Mitteln auf folgende Weise Ersatz geschaffen werden: Es wird eine künstliche Leitung hergestellt, welche die 169 km lange Freileitungsstrecke vom einen Ende bis zu dem Punkte, wo die Kabelstrecke beginnt, darstellt; mit dieser wird ferner eine die Kabelstrecke ersetzende künstliche Anordnung in Reihe geschaltet, an welche zudem noch eine andere künstliche Anordnung angeschlossen wird. Letztere ersetzt die Impedanz einer langen Freileitung und kann in diesem Falle ein mit einem Kondensator in Reihe geschalteter Widerstand sein.

Wenn eine Leitung viele Unregelmässigkeiten aufweist, so pflegt die Zusammenstellung einer künstlichen Leitung zur Herstellung des Gleichgewichtszustandes sehr teuer und umständlich zu werden, obschon die Möglichkeit hierzu theoretisch stets besteht. Für einen guten Verstärkerbetrieb in einer Leitung ist somit ein Haupterfordernis, dass auf die Wahrung eines hohen Grades von Gleichförmigkeit im elektrischen Charakter der Leitung Bedacht genommen werde.

In dem eben beschriebenen besondern Fall kann den von der Kabelstrecke verursachten Unregelmässigkeiten wirksam dadurch begegnet werden, dass in das Kabel eine oder mehrere Induktanzspulen eingeschaltet werden, so dass die Impedanz des Kabels annähernd gleich derjenigen der Freileitung wird. Tatsächlich wurde im angeführten Falle in das Kabel, nahe bei seinem Mittelpunkt, eine einzelne Spule eingeschaltet; in Fig. 35 ist die hierauf gemessene Impedanz dargestellt. Die nach der induktiven Belastung erhaltenen Kurven sind in dieser Abbildung stärker ausgezogen, während die früheren Kurven zum Vergleiche dünner eingetragen sind.

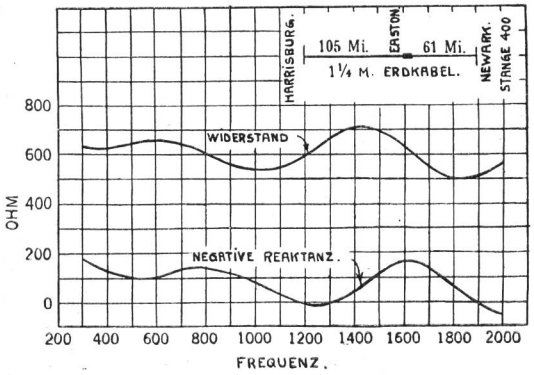

Fig. 34.

Bei induktiv belasteten Leitungen wird die Wahrung genügender Gleichförmigkeit im elektrischen Charakter zur Erzeugung befriedigender Impedanzverhältnisse zu einem bedeutend schwierigeren Problem, woran die Unterschiede in den Induktanzen der Spulen und in den Abständen zwischen denselben schuld sind. Um dies bildlich zu belegen, seien von einigen belasteten Leitungen die Impedanzkurven vorgeführt, welche vom Einfluss der Unregelmässigkeiten im Impedanzcharakter zeugen. Der Einfachheit halber seien für diese Kurven nur die Widerstandskomponenten angeführt, da die Reaktanzkomponenten bedeutend kleiner sind und übrigens annähernd den gleichen Verlauf nehmen wie die Widerstandskurven.

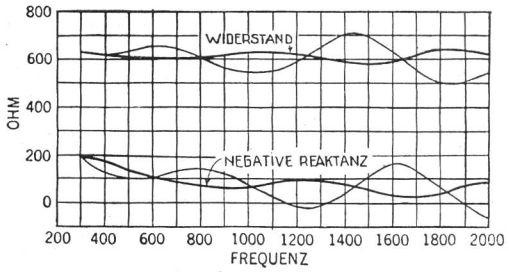

Fig. 35.

Fig. 36 zeigt die Impedanzeigenschaft einer Freileitung, welche in Abständen von ungefähr 12,9 km mit Induktanzspulen von je ¼ Henry belastet ist. Dieser Stromkreis würde, vom Standpunkt der Uebertragung aus betrachtet, für öffentlichen Betrieb geeignet sein. Tatsächlich ist die Impedanzeigenschaft jedoch äusserst ungleichförmig, und es wäre schwierig, auf dieser Leitung einen Telephonverstärker mit Vorteil zu verwenden.

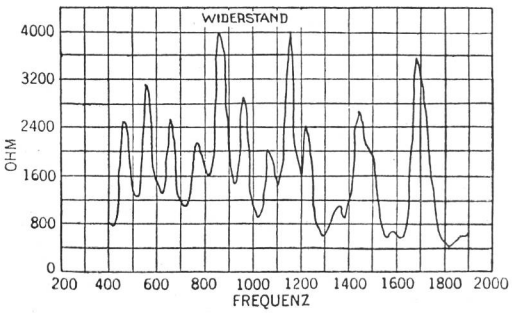

Fig. 36.

Fig. 37 zeigt den Widerstand eines Stromkreises, welcher ähnliche Konstanten besitzt, aber einen weniger ungleichförmigen Zustand aufweist. Vor dem Erscheinen der Verstärker wurde ein derartiger Stromkreis, soweit Unregelmässigkeit in Frage kommt als ziemlich gut erachtet. Die Unregelmässigkeiten wurden in diesem Falle zum grössten Teile durch verhältnismässig kleine Unterschiede in den Abständen der Spulen und in den Induktanzen derselben verursacht.

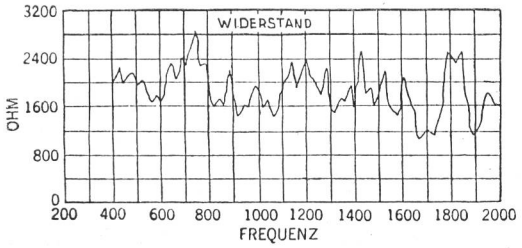

Fig. 37.

Die Induktanzspulen müssen in eine Telephonleitung an bestimmten Punkten des Ueberführungssystems eingeschaltet werden, damit Uebersprechen zwischen dieser und andern Leitungen der gleichen Linie vermieden werde. Es ist jedoch schwierig, die Abstände der Ueberführungspunkte genau in Uebereinstimmung zu bringen, was den Abweichungen vom gleichmässigen Verlauf einer Linie, den eingeschalteten Kabelstrecken und den Abzweigstellen von Teillinienstrecken usw. zuzuschreiben ist. Diese Verhältnisse führten früher zu Unterschieden in den Abständen zwischen den aufeinanderfolgenden Belastungspunkten. Die Spulen der Freileitungen sind ferner den Einwirkungen fremder elektrischer Einflüsse ausgesetzt, und für einige Arten von Spulen, welche im Gebrauche standen, hat dies Unterschiede in der Induktanz zur Folge gehabt. Für irgendeine gegebene Frequenz mag es vorkommen, dass der Einfluss einer grossen Zahl solcher Unregelmässigkeiten die Impedanz des Stromkreises für diese Frequenz erhöht erscheinen lässt, während sie für eine andere Frequenz, welche von der ersten nur wenig verschieden ist, unter dem Einfluss der Unregelmässigkeit geringer erscheint. Die Wirkung einer solchen Impedanz ist in Fig. 37 gezeigt, bei der die Abweichungen nicht von wenigen grossen, sondern von vielen kleinen Unregelmässigkeiten herrühren.

Der hier gezeigte besondere Stromkreis gehörte der transkontinentalen Leitung an und wurde somit äusserst sorgfältig überprüft; wo es nötig war, wurden die Kreuzungen verlegt, die Spulen durch andere, in hohem Grade unveränderliche und gleichförmige, ersetzt und die Abstände möglichst ausgeglichen. Der Erfolg dieser Arbeit ist aus Fig. 38 ersichtlich, worin die stark ausgezogene Kurve die Impedanz darstellt, nachdem die „Säuberungsarbeit" getan war, während die dünnausgezogene Kurve zum Vergleiche aus Fig. 37 herübergeholt ist. Auf einem solchen Stromkreis können nun die Vorteile des Verstärkerbetriebes voll zur Auswirkung gelangen.

In Fällen, wo grosse Abweichungen in der Impedanz von einer oder mehreren Unregelmässigkeiten verursacht werden, bieten die Impedanzkurven oft eine sehr nützliche und zweckdienliche Methode zur Bestimmung der Fehlerstelle. Zum Beispiel zeigt Fig. 39 die Impedanz eines Stromkreises von einem Ende aus gemessen, wobei die wellenförmige Abweichung von fehlerhafter Apparatur in einem

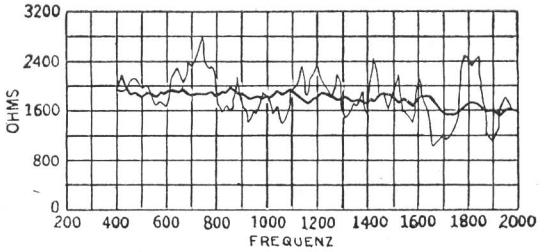

Fig. 38.

Punkte des Stromkreises herrührt. Durch Messung des Frequenzunterschiedes zwischen den verschiedenen Wellenscheiteln ist es möglich, den Abstand vom Sendepunkt bis zur Fehlerstelle zu bestimmen. Tatsächlich sind auf diese Weise schon manche Fehler ermittelt worden, z. B. die Weglassung von Spulen, Beschädigungen an solchen und andere Unregelmässigkeiten.

Wurden bei Flussübergängen, beim Passieren von Stadtgebieten usw. kurze Kabelstrecken verwendet, so war es sehr schwierig, die Gleichförmigkeit im elektrischen Charakter der Leitung zu wahren. Es war aber nicht immer leicht, Personen, die zwar auf dem Gebiete der Telephonie nicht bewandert waren, die aber doch davon Kenntnis hatten, dass durch induktive Belastung und Verstärkung eine Uebertragung über grosse Kabelstrecken möglich ist, von den Schwierigkeiten zu überzeugen, die aus der Verwendung von kurzen Kabelstrecken in wichtigen Fernleitungen entstehen. Wenn man jedoch bedenkt, dass ein 150 Meter langes Kabel so viel Kapazität wie eine 1200 Meter lange Freileitung aufweist, so ist es klar, dass selbst ein kurzes Kabelstück einen grossen Einfluss auf die Tätigkeit irgend

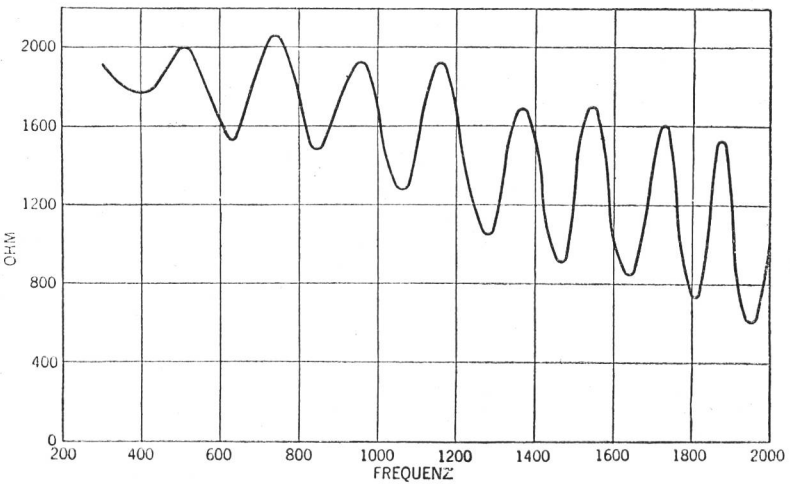

Fig. 39.

eines Verstärkers der Leitung ausüben muss. Bei der Neuanlegung eines Stromkreises kann dem nachteiligen Einfluss solcher kurzer Kabelstrecken durch die Einteilung der Abstände der Belastungsspulen teilweise entgegengewirkt werden. Nachträgliche Aenderungen sind selbstverständlich viel schwieriger auszuführen.

Werden an Stelle von Freileitungen Kabel verwendet, so gelten für das Problem der Wahrung der Gleichförmigkeit ähnliche Grundsätze; deren Verwirklichung erheischt sowohl sehr genaue Innehaltung der Spulenabstände, als auch Spulen von äusserst gleichförmigen Eigenschaften und hoher elektrischer Beständigkeit.

Ausgleichung mit künstlichen Leitungen.

Nimmt man in irgend einem Falle an, die Leitung sei elektrisch so ausgeglichen, wie dies die Wirtschaftlichkeit zulässt, so bleibt immer noch die Aufgabe der Zusammenstellung künstlicher Leitungen, von welchen die gleiche Impedanz verlangt wird, wie sie die zu ersetzende Leitung besitzt. Hierbei ist zu beachten, dass bei diesen künstlichen Leitungen nicht Uebertragungseigenschaften, sondern nur Impedanzeigenschaften berücksichtigt werden müssen.

Eine sehr einfache Ausführung ist die oben angeführte Zusammenstellung, welche in Verbindung mit einer nicht induktiv belasteten Freileitung verwendet werden kann. Sie besteht aus einem mit einem einzigen Kondensator in Reihe geschalteten Widerstand. Wie schon angedeutet, kann eine bessere Ausgleichung gegenüber einer nicht belasteten Freileitung dadurch erreicht werden, dass ein weiterer Widerstand und ein weiterer Kondensator beigefügt werden (siehe Fig. 32).

Für induktiv belastete Leitungen sind etwas umständlichere künstliche Leitungen nötig, obschon auch hier die Grundlagen verhältnismässig einfache sind. Zum Vergleiche werden in Fig. 40 gezeigt: eine dünnlinige Impedanzkurve, welche derjenigen in Fig. 38 sehr ähnlich ist, und eine dicklinige Kurve, welche die Impedanz einer künstlichen Leitung darstellt; letztere ist aus zwei Kondensatoren, einem Widerstand und zwei Verzögerungsspulen zusammengestellt. Zur Vervollständigung sind sowohl der Widerstand als die Reaktanz der Impedanz in der Abbildung angeführt.

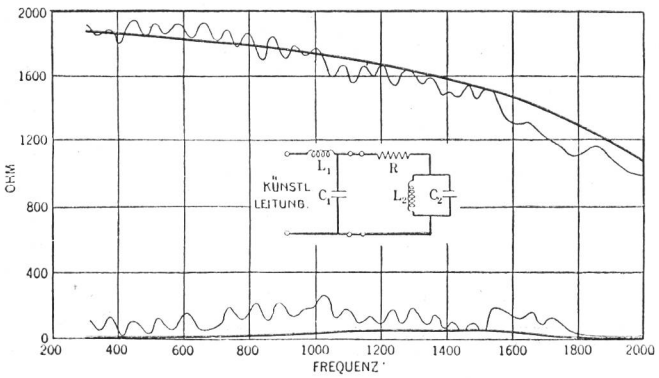

Fig. 40.

Bei einer belasteten Leitung hängt die Impedanz in bedeutendem Masse von der Stelle im Belastungsabschnitt ab, von wo aus der Stromkreis gemessen wird. Im allgemeinen münden die Leitungen in der Mitte eines Abschnittes oder einer Spule aus, weil diese Punkte symmetrische Punkte der Belastungsanordnung sind und zum Durchschalten der Stromkreise die besten Verhältnisse bieten. Die meisten Angaben dieser Abhandlung beziehen sich auf die Mitte der Spulen.

Es ist ferner leicht verständlich, dass die ausgleichende künstliche Leitung nicht nur die eigentliche Leitung selbst im Gleichgewichte halten muss, sondern auch alle Apparate, welche zwischen Leitung und Verstärker eingeschaltet sein können. Alle Spulen und Simultanapparate oder andere in Reihe in die Leitung geschaltete Vorrichtungen müssen daher mit der nötigen Genauigkeit durch entsprechende, der künstlichen Leitungsanordnung beigefügte Spulen, Kondensatoren usw. im Gleichgewicht gehalten werden.

Reihenschaltung von Verstärkern.

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich fast ausschliesslich auf den Betrieb eines einzelnen Verstärkers in einem Stromkreis. Wenn mehrere, an verschiedenen Punkten einer Leitung verwendete Verstärker in Reihe geschaltet werden, so gelten die gleichen Ueberlegungen. Dazu kommt die weitere Ueberlegung, dass dabei Rückkoppelungsströme entstehen können, die nicht nur jeden einzelnen Verstärker zu beeinflussen imstande sind — so dass „Singen“ oder Sprachverzerrung entsteht — sondern die auch Bahnen einschlagen können, in denen eine zusammenwirkende Beeinflussung zweier oder mehrerer Verstärker möglich ist. Wie vorausgehend bemerkt, lässt sich die Schaltung 22 für Reihenschaltung der Verstärker mit mehr Vorteil verwenden als die Schaltung 21, da beim Sprechen kein Zurückwerfen eines Teiles der Energie nach der Ursprungsrichtung erfolgt, wie dies bei Schaltung 21 der Fall ist. Dementsprechend tritt bei der Schaltung 22 viel weniger wechselseitige Beeinflussung durch Rückkoppelung zwischen Verstärkern auf.

Zweckentsprechender Reihenbetrieb von Verstärkern bedingt somit einen hohen Grad elektrischer Gleichförmigkeit und ebenso, dass die Rückkoppelung zwischen Verstärkern und angeschalteten Leitungen so gering wie irgend möglich ausfalle.

Die Vier-Draht-Schaltung.

Wir haben im vorstehenden die Verwendung von Verstärkern in gewöhnlichen Stromkreisen besprochen, bei denen zur Uebertragung nach Osten wie nach Westen das gleiche Drahtpaar verwendet wird. Nach den Ausführungen über den Gleichgewichtszustand ist es klar, dass es für die Lautwirkung von Vorteil wäre, wenn für die Uebertragung nach Osten und diejenige nach Westen getrennte Drahtpaare verwendet würden. Eine Schaltung dieser Art, welche als „Vier-Draht-Schaltung“ bezeichnet werden kann, ist in Fig. 41 schematisch dargestellt.

Der Ausdruck „Vier-Draht“ ist so aufzufassen, dass nicht notwendigerweise vier Drähte, wohl aber

verschiedene Schleifen für die Uebertragung nach Osten und diejenige nach Westen verwendet werden. Jede dieser Schleifen kann aus zwei Drähten bestehen oder aber ein Phantomstromkreis usw. sein.

In einem Stromkreis dieser Art werden einseitige Verstärker in jeder der Schleifen verwendet. Die beiden Schleifen müssen zum Anschluss an eine Zwei-Draht-Leitung oder an eine Teilnehmerschleife an ihren Enden vereinigt werden.

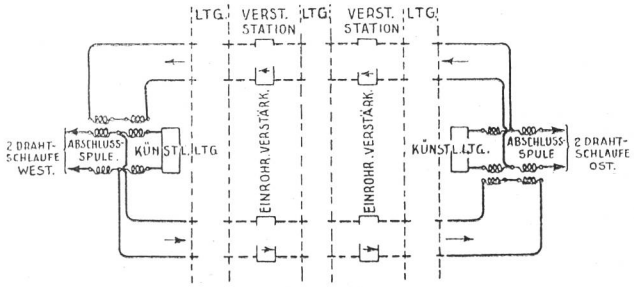

Fig. 41.

Es ist somit die Möglichkeit vorhanden, dass Rückkoppelungsströme entstehen, welche die Schleifen nacheinander durchfliessen. Um derartige Ströme auf ein geringstes Mass zurückzuführen, sind an den Stellen, wo der Vier-Draht in den Zwei-Draht mündet, in ähnlicher Weise wie bei der Schaltung 22, künstliche Leitungen angeschlossen. Es ist zu beachten, dass, solange die Gesamtverstärkung der beiden Zweige der Vier-Draht-Schaltung in Reihe geringer ist als der Gesamtdämpfungswert, der Stromkreis nicht „singen" kann. Ist der Gleichgewichtszustand an den Enden ein guter, so können die Gewinne sogar grösser sein als die Uebertragungsverluste, ohne dass „Singen" auftritt. Gleich wie bei einfachem Schleifenbetrieb kann jedoch durch die verursachten Rückkoppelungsströme grosse Verzerrung im Stromkreise auftreten, und zwar auch dann, wenn die Verstärkung und der Gleichgewichtszustand kein „Singen" verursachen würden.

Die Schaltungen dieser Art verwenden somit doppelt so viel Drähte wie gewöhnliche Stromkreise. Sie lassen aber den Gebrauch von dünnern Drähten zu. Es ist deshalb eine Frage der Wirtschaftlichkeit, ob eine Schaltung dieser Art in irgend einem Falle Vorteile bietet oder nicht. Im Betrieb über lange Fernleitungskabel und in anderen besonderen Fällen bestehen Verhältnisse, welche zugunsten dieser Vier-Draht-Schaltung sprechen.

Verwendungsmethoden der Verstärker.

Im eigentlichen Betriebe mit Verstärkern gelten für deren Einschaltung in die Leitungen zwei Methoden, welche allgemein üblich geworden sind, nämlich:

a) „Verstärker in Leitung",
b) „Verstärker in Schnurstromkreisen".

Der Verstärker in Leitung ist einer bestimmten Leitung zugeteilt und unmittelbar in dieselbe geschaltet. Die Telephonistinnen können somit keinen Einfluss auf ihn ausüben. Er ist im allgemeinen für eine bestimmte Verstärkung eingestellt, welche von den Eigenschaften der Leitung abhängt.

Der Verstärker im Schnurstromkreis ist in eine Schnur eingeschaltet, welche einer Telephonistin zur Bedienung zugewiesen ist. Die beiden Enden des Stromkreises endigen am Bedienungsplatz an zwei Stöpseln, welche die Telephonistin mit irgend einem Leitungspaar verbinden kann, das für Verstärkerbetrieb geeignet ist. Der Umfang der Verstärkung durch den Schnurstromkreis steht gewöhnlich unter dem Einfluss der Telephonistin und hängt in jedem Falle vom Leitungspaar ab.

Die Leitungen, welche mit demselben Verstärker im Schnurstromkreis bedient werden, weichen in ihren Eigenschaften oft bedeutend von einander ab, weshalb die künstlichen Leitungen mit den Betriebsleitungen häufig nicht übereinstimmen. Es müssen daher verschiedene Mittel angewandt werden, damit beim Durchverbinden künstliche Leitungen, welche mit den eigentlichen Leitungen richtig ausgeglichen sind, in die Schaltung treten. Die gebräuchlichste Lösung besteht im Anbringen einer Klinke im Bedienungsschrank, unmittelbar unter jeder Fernleitungsklinke. Diese besondere Klinke ist an eine künstliche Leitung angeschlossen, welche mit der eigentlichen Leitung übereinstimmt. Die Verstärkerschaltung endigt dann an Doppelstöpseln, welche so angeordnet sind, dass die eigentliche und die künstliche Leitung gleichzeitig gestöpselt werden.

Réception des ondes très courtes.

Par H. Fellrath.

L'émission et la réception des ondes très courtes (0-200 m) sont entrées dans une phase intéressante. Il se fait actuellement de nombreux essais, tant par les postes d'amateurs que par quelques postes officiels, qui étudient la question complexe de propagation des ondes courtes.

Pour des motifs qui n'entrent pas dans le cadre de cet article, la gamme de 0-200 m a été réservée aux émissions d'amateurs. Celles-ci ont pris, déjà actuellement, un développement extraordinaire.

Avec des moyens, nous dirons presque de fortune, nous avons déjà perçu plus de 150 émissions sur la gamme 0-200, y compris quelques américaines.

Depuis le 1er juillet dernier, les amateurs suisses sont autorisés à émettre sous certaines conditions. Notre pays, profitant d'expériences faites ailleurs, tient à s'entourer de certaines garanties, dont les principales sont la justification d'une instruction technique et pratique adéquate. Ceux dont les goûts font passer de longs moments „à l'écoute" ne pourront qu'approuver ces mesures; car il est franchement navrant de devoir parfois deviner certaines manipu-