

Auszug aus:

Die neuere Entwicklung der Hochfrequenztelephonie und -telegraphie auf Leitungen,  
Dr. Erich Habann, Vieweg Verlag Braunschweig, 1929.

### 3. Modulationseinrichtungen

.....  
.....

#### Theorie der Modulation

Die Theorie der Modulation sei an Hand der Ventilröhre durchgeführt. An der Ventilröhre sei dann auch beispielsweise gezeigt, wie sich aus der theoretischen Betrachtung zweckmäßige Schaltungen für die Praxis ergeben. Die Ventilröhre ist eine Hochvakuumröhre und enthält (Abb. 26) eine Glühkathode als Elektronenquelle, ein Gitter und zwei Anoden. Die Anoden sind symmetrisch zur Glühkathode angeordnet und stehen zu derselben hochkant. Der Abstand der beiden Anodenplatten voneinander ist gering (1 mm) und vielmals kleiner als die Entfernung vom Glühfaden. Bei der praktischen Ausführung werden an Stelle zweier einfacher Anodenplatten zwei ineinandergeschachtelte Anodenplattensysteme benutzt. Eine hochfrequente Wechselspannung wird in Abb. 26 an die Strecke Gitter-Kathode gelegt, während die beiden voneinander isolierten Anodenplattensysteme durch eine Anodenbatterie die gleiche hohe Anodenspannung  $V_0$  gegenüber der Glühkathode erhalten. Die niederfrequenten Sprachwechselströme werden über den Transformator  $T$  an die beiden Anoden  $A'$  und  $A''$  derart geleitet, daß die Spannung gegenüber dem Glühfaden an der einen Anode um ebensoviel erhöht wie an der andern erniedrigt wird. Die Spulen des Sprachtransformators  $T$  sind für die hochfrequenten Ströme durch Kondensatoren  $K$  überbrückt. Ein Schwingungskreis  $Sch$  ist symmetrisch zur Glühkathode mit den beiden Anoden verbunden.

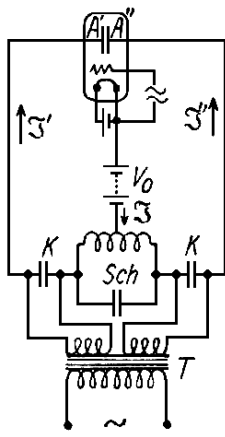


Abb. 26  
Ventilröhre

Die Wirkungsweise ist folgende:

Solange nicht gesprochen wird, durchfließen die Anodenströme  $J'$  und  $J''$  den Schwingungskreis  $Sch$  mit gleicher Stärke im entgegengesetzten Sinne, so daß sie sich in ihrer Wirkung auf den Schwingungskreis aufheben. Sobald aber über den Transformator  $T$  die Wechselspannung der Sprache an die Anodenplatten  $A'$  und  $A''$  gelangt, entsteht zwischen diesen ein elektrisches Feld, das die Elektronen der einen oder anderen Anodenplatte zutreibt. Die Anodenströme  $J'$  und  $J''$  sind jetzt nicht mehr gleich; der Schwingungskreis  $Sch$  führt Hochfrequenzenergie, und diese offenbar den Sprachlauten in Intensität und Rhythmus entsprechend.

Die Berechnungen schaffen die Grundlage für die beste Röhrenkonstruktion und die günstigste Bemessung des Schwingungskreises und des Transformators.

Der Gesamtelektronenstrom in der Röhre sei  $J$ . Derselbe zerteilt sich in die beiden Anodenströme  $J'$  und  $J''$ . Der Gesamtstrom

$$J = J' + J'' \quad (1)$$

schwankt infolge einer hochfrequenten Wechselspannung (Frequenz  $\nu$ ), die aus einem Generator an Gitter-Kathode geleitet wird. Es gilt

$$J = J_0 + J_1 \cdot \sin 2 \pi \nu t \quad (2)$$

wobei  $J_0$  die Gleichstromkomponente von  $J$  bedeutet und  $J_1$  die Amplitude des erzeugten Anodenwechselstromes ist. Die Elektronenverteilung auf die beiden Anodensysteme innerhalb der Röhre ist von der elektrischen Feldstärke zwischen den Platten abhängig. Die Differenz der beiden Anodenströme

$$Q = J' - J''$$

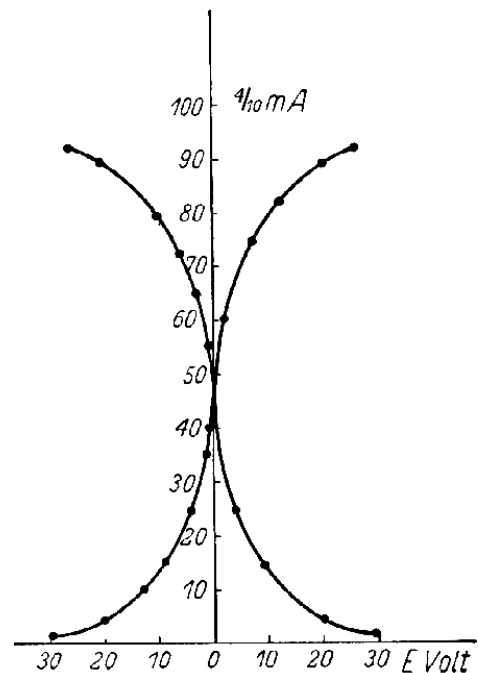


Abb. 27  
Charakteristik einer Ventilröhre

ist mithin direkt proportional der zwischen den Platten herrschenden Spannung  $\varepsilon$  und ferner um so größer, je mehr Elektronen für die Verteilung zur Verfügung stehen, d. h.  $Q$  ist auch dem Gesamtstrom  $J$  proportional. Infolgedessen gilt die Beziehung

$$Q = J' - J'' = k \cdot \varepsilon \cdot J \quad (3)$$

wobei der Proportionalitätsfaktor  $k$  von der Konstruktion der Anoden abhängt und um so größer ist, je dichter die Anodenplatten angeordnet sind. Aus (1) und (3) folgt

$$2 J' = J (1 + k \varepsilon), \quad 2 J'' = J (1 - k \varepsilon) \quad (4)$$

Die Formel wird durch die Abb. 27 bestätigt. Sie zeigt, wie sich bei einer fabrikationsmäßigen Röhre die Ströme  $J'$  und  $J''$  mit der Spannung  $\varepsilon$  ändern. Im allgemeinsten Sinne ist die Ventilröhre, wie aus Fassung (3) hervorgeht, eine Multiplikationseinrichtung.

Es wird der vom Faden ausgehende Strom  $J$  mit der Spannung  $\varepsilon$  multipliziert. Das Produkt ist gleich dem sogenannten Plattenstrom  $Q = J' - J''$ .

Der Schwingungskreis *Sch* ist auf die erregende Frequenz  $\nu$  abgestimmt. Sein Resonanzwiderstand sei  $r_1$ . Ströme aller übrigen Frequenzen passieren ihn verlustlos. Den Strom  $Q$  zerlegen wir in

$$Q = Q_0 + Q_1 \sin 2 \pi \nu t + Q_2 \sin^2 2 \pi \nu t \quad (5)$$

Am Schwingungskreis *Sch* tritt demnach die Spannung

$$r_1 \cdot Q_1 \cdot \sin 2 \pi \nu t$$

auf. Andererseits sei die Spannung des Sprachwechselstromes auf der Sekundärseite des Transformators *T* durch

$$\nu = p \cdot \sin 2 \pi \mu t$$

wiedergegeben, wobei  $\mu$  die Frequenz,  $p$  die Spannungsamplitude eines Sprachlautes sei. Die Gesamtspannung  $\varepsilon$  zwischen den Anodenplatten  $A'$  und  $A''$  ist mithin

$$\varepsilon = \nu - r_1 Q_1 \sin 2 \pi \nu t = p \sin 2 \pi \mu t - r_1 Q_1 \sin 2 \pi \nu t \quad (6)$$

Dies in (3) und (5) eingesetzt, liefert:

$$\begin{aligned} Q &= Q_0 + Q_1 \sin 2 \pi \nu t + Q_2 \sin^2 2 \pi \nu t \\ &= k [p \sin 2 \pi \mu t - r_1 Q_1 \sin 2 \pi \nu t] \cdot [J_0 + J_1 \sin 2 \pi \nu t] \end{aligned} \quad (7)$$

Die Gleichung wird erfüllt, wenn wir setzen:

$$\begin{aligned} Q_0 &= k J_0 p \sin 2 \pi \mu t & ] \\ Q_1 (1 + k J_0 r_1) &= k p J_1 \sin 2 \pi \mu t & ] \quad (8) \\ Q_2 &= - k r_1 Q_1 J_1 & ] \end{aligned}$$

Die Amplitude  $Q_1$  des Stromes von der Frequenz  $\nu$  schwankt hiernach im Rhythmus  $\mu$  und in der Intensität  $p$  der Sprache.  $Q$  läßt sich umformen:

$$\begin{aligned} Q &= k J_0 p \sin 2 \pi \mu t + [(k p J_1) / (1 + k J_0 r_1)] \cdot \sin 2 \pi \nu t \cdot \sin 2 \pi \mu t \\ &\quad - [(k^2 J_1^2 r_1 p) / (1 + k J_0 r_1)] \cdot \sin 2 \pi \mu t \cdot \sin^2 2 \pi \nu t \\ &= [k J_0 p - (k^2 J_1^2 r_1 p) / (2 (1 + k J_0 r_1))] \cdot \sin 2 \pi \mu t \\ &\quad + [(k p J_1) / (2 (1 + k J_0 r_1))] \cdot [\cos 2 \pi (\nu - \mu)t - \cos 2 \pi (\nu + \mu)t] \\ &\quad + [(k^2 J_1^2 r_1 p) / (4 (1 + k J_0 r_1))] \cdot [\sin 2 \pi (2\nu + \mu)t - \sin 2 \pi (2\nu - \mu)t] \end{aligned} \quad (9)$$

$Q$  kann hiernach auch als die Summe von Strömen verschiedener Frequenzen aufgefaßt werden. Der erste Term

$$G = [k J_0 p - (k^2 J_1^2 r_1 p) / (2 (1 + k J_0 r_1))] \sin 2 \pi \mu t$$

$$= [J_0 - (k J_1^2 r_1) / (2 (1 + k J_0 r_1))] k p \sin 2 \pi \mu t \quad (10)$$

stellt in Formel (9) den niederfrequenten Sprachstrom dar, der zweite Term

$$H = [(k p J_1) / (2 (1 + k J_0 r_1))] \cdot [\cos 2 \pi (v - \mu)t - \cos 2 \pi (v + \mu)t] \quad (11)$$

die modulierten hochfrequenten Ströme und die folgenden Terme Oberwellen. Wegen der Siebfähigkeit des Schwingungskreises *Sch* kommen in demselben nur die modulierten Ströme *H* von der Frequenz  $(v - \mu)$  und  $(v + \mu)$  zur Wirksamkeit. Die Energie jeder der beiden Hochfrequenzen ist

$$L = \frac{1}{2} [(k p J_1) / (2 (1 + k J_0 r_1))]^2 r_1 \quad (12)$$

Das Maximum von *L* wird für

$$r_1 = 1 / k J_0 \quad (13)$$

erhalten, wie sich nach den Regeln der Maximorechnung ergibt wenn  $dL / dr_1$  gebildet und dieser Ausdruck gleich Null gesetzt wird.

Für diesen Wert  $r_1 = 1 / k J_0$  wird  $v / G = (4 J_0) / (k (4 J_0^2 - J_1^2))$  und dies ist der Widerstand, den der Transformator auf der Sekundärseite vorfindet und dem er in bekannter Weise durch Wahl des Übersetzungsverhältnisses und der Windungszahl angepaßt sein muß.

Die Ventilröhre hat den Vorzug, daß die Güte des übermittelten Gesprächs unabhängig von der Heizung des Glühfadens und der Höhe der Anodenspannung  $V_0$  ist. Eine Heizungsänderung beeinflusst aber weitgehend die Lautstärke, die auf diese Weise bequem und sicher reguliert werden kann. Die Sprachaufdrückung ist intensiv: ein

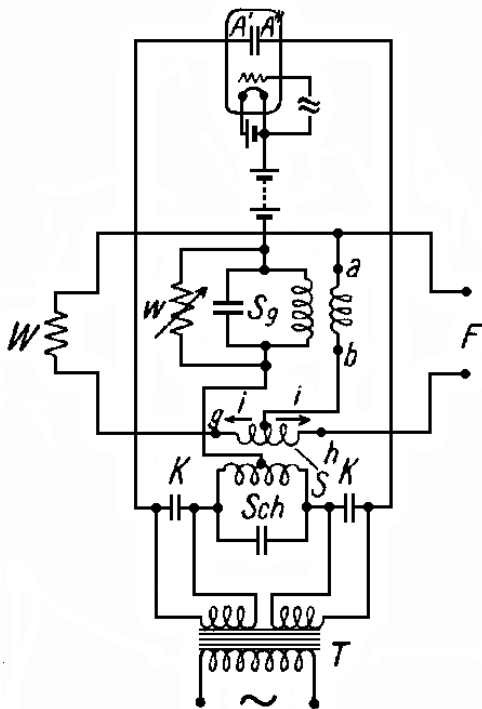


Abb. 28  
Schaltung einer Ventilröhre

Gespräch wird noch bei einer Gesamtdämpfung  $\beta l = 4$  Neper bei größter Klangreinheit lautstark übertragen. Da infolge der eingangs erwähnten Schaltung des Transformators *T* in Abb. 26 die mittlere Spannung der beiden Anoden *A'* und *A''* gegenüber der Glühkathode durch die Wechselspannungen der Sprache nicht verändert wird, so ist auch der Anodenstrom (*J*) in seiner Gesamtheit von der im Kreise *A'—K—Sch—K—A''* stattfindenden Modulation völlig unabhängig. Wenn daher ein auf die Frequenz  $\nu$  abgestimmter Schwingungskreis *Sg* in den gemeinsamen Anodenkreis gelegt wird (Abb. 28), so wird er, unbeeinflusst von den Vorgängen im Kreise *A'—K—Sch—K—A''*, nur solche Energien führen, die lediglich durch die dem Gitter aufgedrückten Spannungen bestimmt sind, d.h. die Ventilröhre ist nicht nur ein empfindliches Besprechungsrohr, sondern gleichzeitig und unabhängig davon ein vollkommener Verstärker. Da in unserem Falle dem Gitter eine ungedämpfte Wechselspannung der Hochfrequenz  $\nu$  aufgedrückt wird, kann aus dem Schwingungskreis *Sg* eine verstärkte Energie derselben Frequenz bei *a* und *b* entnommen und etwa für Anrufzwecke verwendet werden. Die modulierten Hochfrequenzströme werden dem Schwingungskreis *Sch* bei *g h* entzogen. Für den Fall, daß derselben Ventilröhre modulierte und unmodulierte Hochfrequenzenergie gleichzeitig entnommen werden soll, empfiehlt es sich einen Widerstand *W* nach Abb. 28 einzuschalten und so zu bemessen, daß die Spule *S* gleich starke Ströme *i* differential durchfließen. Dann beeinflussen

sich die beiden Kreise *Sg* und *Sch* nicht, trotzdem sie auf eine gemeinsame Fernleitung *F* arbeiten. Die Entnahme der unmodulierten Energie kann durch einen Ohmschen Widerstand *w*, der dem Schwingungskreis *Sg* parallel geschaltet ist, von Null bis zu einem Maximum reguliert werden.

Wie gezeigt worden ist, besteht die Besprechung darin, die Amplituden der gegebenen Hochfrequenzströme in Sprachrhythmus und Sprachstärke schwanken zu lassen. Die resultierende modulierte Hochfrequenz läßt sich auflösen in Ströme der Frequenz  $\nu + \mu$  und  $\nu - \mu$ , wenn  $\mu$  die Frequenz des Sprachlautes ist. Das Resultat gilt unabhängig von der besonderen technischen Besprechungseinrichtung. Nimmt man nun an, daß die Sprachlaute aus allen möglichen Frequenzen zwischen  $\mu = 0$  und  $\mu = \mu_1$  bestehen, so reicht das „Sprachspektrum“ von  $\nu + \mu_1$  bis  $\nu - \mu_1$ . Ob in der Hochfrequenztelephonie das ganze Spektrum übertragen werden muß, oder ob die Übertragung eines Teiles des Spektrums genügt, ob ferner außer den Strömen modulierter Hochfrequenz noch ein unmodulierter hochfrequenter Dauerstrom notwendig sein wird, der, wie wir gesehen haben, mit der erläuterten Ventilröhre ebenso leicht in großer Stärke zusätzlich erzeugt wie völlig unterdrückt werden kann - über alle diese Fragen zu entscheiden, steht der Empfangseinrichtung zu.

#### 4. Der Empfänger

.....  
 .....  
 .....

Einen anders gearteten Empfänger zeigt Abb. 30. Die ankommende Hochfrequenzenergie wird dem Gitter und gleichzeitig im verstärkten Zustand über den Schwingungskreis  $S_1$  den

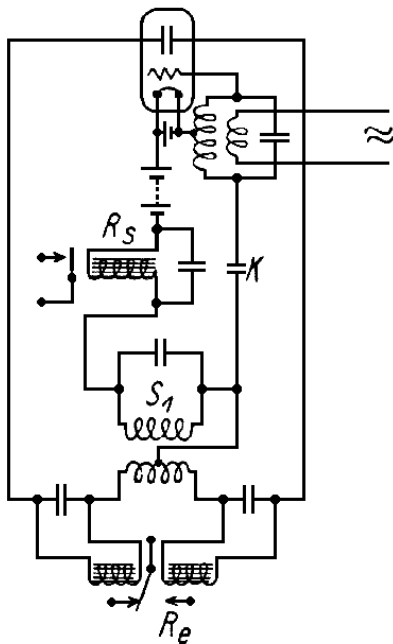


Abb. 30 Ventilröhre als Anrufempfänger

Platten einer Ventilröhre (S. 18) zugeführt.  $k$  ist ein kleiner Neutrodynecondensator, der Eigenschwingungen der Röhre unterdrückt. Wenn nun der eine Wechsel der ankommenden Hochfrequenzspannung das Gitter positiv auflädt, also den gesamten Anodenstrom in der Röhre verstärkt, so wird infolge der Schaltung im selben Augenblick die eine Platte, etwa die linke, positiv gegenüber der anderen aufgeladen. Der Elektronenstrahl wird im verstärkten Zustand der linken Platte, im geschwächten Zustand der rechten Platte zugeführt. Der von der Glühkathode ausgehende Elektronenstrahl stellt gewissermaßen ein Pendel dar, das je nach der Aufladung der Platten zu der einen oder anderen Anode hinübergezogen wird. Daß das Elektronenpendel immer zu derselben Platte hinübergelenkt wird, wenn gerade der Elektronenstrom am größten ist, bewirkt wie beim mechanischen Pendelgleichrichter eine Gleichrichtung. Ein Relais  $R_e$ , nach Abb. 30 eingeschaltet, spricht an, weil es dann nicht mehr von gleich starken Strömen durchflossen wird. Bei einem Transformator nach Abb. 31 hört man in einem bei  $g h$  an den

geschalteten Telephone den demodulierten Sprachlaut. Da der mittlere Anodenstrom

durch den Pendeleffekt nicht beeinflusst wird — es wird bei diesem Empfänger stets im geradlinigen Teil der Verstärkercharakteristik gearbeitet —, so ist der mittlere Anodenstrom mit dem Ruheanodenstrom identisch und dieser ist demnach unverändert geblieben. Man kann daher in Abb. 30 in den gemeinsamen Anodenkreis ein Sicherungsrelais  $R_s$  hineinlegen, das — unberührt von den Vorgängen im Relais  $R_e$  — nur anspricht, wenn etwas an der Röhre nicht in Ordnung ist, wenn etwa der Faden der Röhre durchbrennt oder die Anodenspannung fehlt.

Oder man kann beim Sprachempfang die bei  $g h$  resultierenden niederfrequenten Ströme an das Gitter derselben Ventilröhre leiten (Abb. 31). Sie werden in der Röhre verstärkt und aus dem Anodenkreis über den Transformator  $T$  dem Teilnehmerapparat zugeleitet.

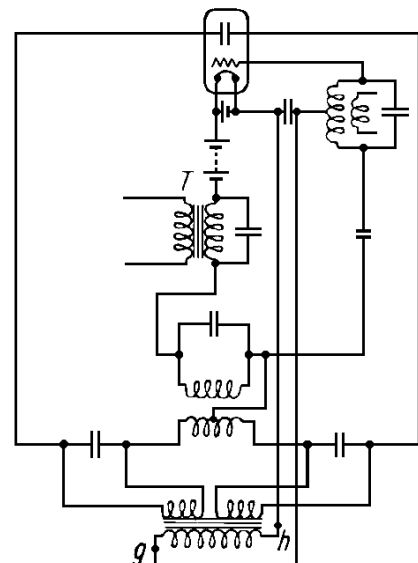


Abb. 31. Ventilröhre als Sprachempfänger.

### Theorie des Empfangs

Bei einer Verstärkerröhre ist der Anodenstrom  $J_a$  bei konstanter Anodenspannung eine Funktion der Gitterspannung  $V_g$  (Abb. 3). Wir können also schreiben  $J_a = f(V_g)$ . Überlagern wir dieser Gittergleichspannung zwei kleine hochfrequente Spannungen

$$v_1 = h_1 \sin 2 \pi \nu t \quad \text{und} \quad v_2 = h_2 \sin 2 \pi (\nu + \mu) t$$

so folgt nach Maclaurin:

$$\begin{aligned} J_a = f[V_g + (v_1 + v_2)] &= f(V_g) \\ &+ [(v_1 + v_2) / 1!] f'(V_g) \\ &+ [(v_1 + v_2)^2 / 2!] f''(V_g) \\ &+ [(v_1 + v_2)^3 / 3!] f'''(V_g) \\ &+ \dots \\ &+ \dots \end{aligned} \quad (14)$$

Für unsere Zwecke genügt es, die ersten drei Glieder der Reihe in Betracht zu ziehen:

$$\begin{aligned} J_a &= f(V_g) + [(v_1 + v_2) / 1!] f'(V_g) + [(v_1 + v_2)^2 / 2!] f''(V_g) \\ &= f(V_g) + [h_1 \sin 2 \pi \nu t + h_2 \sin 2 \pi (\nu + \mu) t] f'(V_g) \\ &\quad + \frac{1}{2} [h_1^2 \sin^2 2 \pi \nu t + 2 h_1 h_2 \sin 2 \pi \nu t \cdot \sin 2 \pi (\nu + \mu) t \\ &\quad + h_2^2 \sin^2 2 \pi (\nu + \mu) t] f''(V_g) \end{aligned} \quad (15)$$

Nach bekannten trigonometrischen Formeln können wir hierfür schreiben:

$$\begin{aligned} J_a &= [f(V_g) + \frac{1}{4} (h_1^2 + h_2^2) f''(V_g)] + [h_1 f'(V_g) \cdot \sin 2 \pi \nu t \\ &\quad + h_2 f'(V_g) \cdot \sin 2 \pi (\nu + \mu) t - \frac{1}{4} h_1^2 f''(V_g) \cos 2 \pi (2\nu) t \\ &\quad - \frac{1}{4} h_2^2 f''(V_g) \cos 2 \pi (2\nu + 2\mu) t - \frac{1}{2} h_1 h_2 f''(V_g) \cos 2 \pi (2\nu + \mu) t] \\ &\quad + \frac{1}{2} h_1 h_2 f''(V_g) \cos 2 \pi \mu t \end{aligned} \quad (16)$$

Der Anodenstrom  $J_a$  besteht hiernach außer einem Gleichstrom

$$J_1 = f(V_g) + \frac{1}{4} (h_1^2 + h_2^2) f''(V_g) \quad (17)$$

aus Stromkomponenten der verschiedenen Frequenzen

$$\nu, \nu + \mu, 2\nu, 2\nu + \mu, 2\nu + 2\mu, \mu$$

Die Amplituden der Stromkomponenten von  $J_a$  sind dem Produkt der Amplituden  $h_1, h_2$  der gegebenen Spannungen proportional. Der Anodenstrom  $J_a$  enthält als Stromkomponente des demodulierten Sprachlautes:

$$J_3 = \frac{1}{2} h_1 h_2 f''(V_g) \cos 2 \pi \mu t \quad (18)$$

Die Amplitude von  $J_3$  ist hiernach außer von  $h_1$  und  $h_2$  noch von  $f''(V_g)$  abhängig.  $f''(V_g)$  ist proportional der Krümmung, welche die Charakteristik an der Stelle  $V_g$  aufweist. Um große Amplituden für  $J_3$  zu erzielen, müssen wir also an Stellen starker Krümmung arbeiten.

Zur Reindarstellung, des Tones  $\mu$ , also der Sprache, sind, wie wir aus der Ableitung umgekehrt folgern können, zwei hochfrequente Spannungen von den Frequenzen  $\nu$  und  $(\nu + \mu)$  auf der Eingangsseite notwendig. Man kann auch sagen: die beiden gegebenen Spannungen  $v_1$  und  $v_2$  von der Frequenz  $(\nu)$  und  $(\nu + \mu)$  interferieren miteinander im Empfänger in allen möglichen Summations- und Differenzfrequenzen, von denen für den Sprachempfang allerdings nur der Interferenzton  $\mu$  interessiert, weil er der demodulierte Sprachlaut ist. Derselbe Interferenzton  $\mu$  muß auftreten, wenn an Stelle der Spannungen von der Frequenz  $\nu$  und  $\nu + \mu$  solche von der Frequenz  $\nu$  und  $\nu - \mu$

gegeben sind, und die Rechnung, hierfür durchgeführt, bestätigt das. Auch das Experiment: Es werden von einer Sendeeinrichtung die Frequenzen  $\nu + \mu$ ,  $\nu$ ,  $\nu - \mu$  einem mit scharfen Abstimmitteln ausgerüsteten Empfänger zugeleitet, dann hört man im Empfänger den Ton  $\mu$  bei zwei Einstellungen, einmal, wenn die Abstimmittel des Empfängers  $\nu$  und  $\nu + \mu$  hindurchlassen, das andere Mal, wenn sie Strömen der Frequenz  $\nu$  und  $\nu - \mu$  den Durchgang gestatten. Nun liefert die Sendeeinrichtung an modulierter Hochfrequenz die Frequenzen  $\nu + \mu$  und  $\nu - \mu$ . Im Empfänger wäre als Interferenzton — schickte ihm der Sender nur diese beiden Frequenzen zu — der Ton  $2\mu$  an Stelle von  $\mu$  zu hören. Die Verdopplung der Frequenz  $\mu$  ist die Ursache einer Sprachverzerrung und der Grund, warum bei allen derartigen Empfängern nicht nur modulierte hochfrequente Ströme, sondern auch ein unmodulierter hochfrequenter Dauerstrom dem Empfänger zugeführt werden muß. Wenn so für klaren Sprachempfang unbedingt noch die Frequenz  $\nu$  notwendig ist, so genügt es andererseits nicht nur, dem Empfänger außer Strömen der Frequenz  $\nu$  Ströme der Frequenz  $\nu + \mu$  oder  $\nu - \mu$  zuzuführen, es ist sogar vorteilhaft, dies zu tun, um Sprachverzerrung zu vermeiden. Dann resultiert als niederfrequenter Interferenzton lediglich  $\mu$  und die Sprache ist rein. Das Resultat läßt sich verallgemeinern, es gilt innerhalb gewisser Grenzen auch für die Audionröhre und andere Empfangseinrichtungen.

Beim Anruf empfängt die Röhre nur Spannungen der einen Frequenz  $\nu$ . Die Gleichstromkomponente des Anodenstroms beträgt dann

$$J_1 = f(V_g) + \frac{1}{4} h_1^2 f''(V_g)$$

Der Ruhestrom  $J = f(V_g)$  ist also um den Betrag  $\frac{1}{4} h_1^2 f''(V_g)$  gestiegen oder gefallen, je nachdem  $f''(V_g)$  positiv oder negativ ist, je nachdem also, ob wir am unteren oder oberen Knick der Charakteristik arbeiten. Der Stromunterschied bringt das Anrufrelais zum Ansprechen.

In den folgenden Schaltungen, bei denen der Schwerpunkt der Darstellung auf anderem Gebiet liegt, werden wir uns des öfteren auf eine der verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten beschränken. Um Mißdeutungen zu vermeiden, sei aber betont, daß andere Ausführungsmöglichkeiten gleichberechtigt sind.