



Eine neue Elektronenröhre

**liefert bei Rundfunkfrequenzen eine Verstärkung von 40 pro Stufe
Von SYLVAN HARRIS**

Seit die große Entwicklung des Rundfunks einsetzte, also innerhalb der letzten fünfzehn oder zwanzig Jahre, gab es einen dringenden Bedarf an einer Elektronenröhre, die uns in die Lage versetzen würde, kleine hochfrequente Spannungen zu verstärken, ohne gezwungen zu sein, einen Kampf mit der immer wieder in Erscheinung tretenden Schwierigkeit auszufechten, die als Rückkopplung bekannt ist. Weiter ist wohlbekannt, dass die Rückkopplung eines Hochfrequenzverstärkers durch Energie aus den Anodenkreisen hervorgerufen wird, die über die Kapazitäten zwischen den Röhrenelektroden auf die Gitterkreise zurückgelangt¹.

Die kleinen inneren Röhrenkapazitäten, die zwischen Gitter und Anode, zwischen Gitter und Heizfaden und zwischen Anode und Heizfaden bestehen, üben, obwohl sie tatsächlich von sehr geringer Größe sind (ungefähr im Bereich von 10 pF bei der Bauart 201A), einen beträchtlichen Einfluß auf die Arbeitsweise eines HF-Verstärkers aus, besonders bei Frequenzen oberhalb von sagen wir einmal 750 tausend Schwingungen pro Sekunde² (400³ m). Genauer gesagt hängt die Rückkopplung der Energie vom Blindwiderstand⁴ der kleinen Röhrenkapazitäten ab; und, dieser wird mit steigender Frequenz – also wenn die Wellenlänge kleiner und kleiner wird – immer niedriger. Wegen dieses Effektes fließt bei höheren Frequenzen durch die kleinen Röhrenkapazitäten ein recht beträchtlicher Rückkopplungsstrom mit dem Ergebnis, dass die Rückkopplungseinflüsse bei diesen Frequenzen verstärkt in Erscheinung treten und manchmal schwierig zu beherrschen sind.

STEUERUNG DER RÜCKKOPPLUNG

Die Rückkopplung in einem Stromkreis mit Elektronenröhren hängt von fünf wichtigen Faktoren ab, als da wären: die Kapazitäten zwischen Röhrenelektroden (im Prinzip diejenige zwischen Gitter und Anode); die Impedanz des an die Anode angeschlossenen Kreises; der Frequenz des zu verstärkenden Signals und dem Widerstand der abgestimmten Kreise. Um den Grad der Rückkopplung unterhalb des kritischen Punktes zu halten, an dem die Selbsterregung beginnt, ist es notwendig, bei der Schaltung Steuerungsmaßnahmen

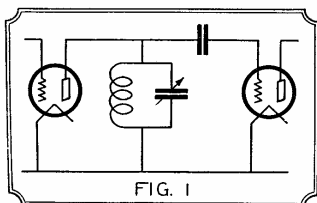


FIG. 1
In a simple circuit like the above, regenerative effects are the drawback of high-amplification tubes.

bezüglich dieser Faktoren zu ergreifen:

(a) Erstens, wir könnten den Einfluss der Gitter-Anoden-Kapazität der Röhre ausschalten, indem wir sie mit Hilfe einer Brückenschaltung neutralisieren oder mit einer anderen neutralisierend wirkenden Schaltung.

(b) Obwohl wir nicht in der Lage sein dürften, die Induktivitäten in den Anodenkreisen der Röhren verschwinden zu lassen, könnten wir ihre Wirkung minimieren, was uns zum so genannten "Anodenkreis mit Blindwiderstand Null" führen würde. Über diese Art der Ausführung einer Schaltung ist bislang noch nichts Gedrucktes erschienen, aber der Autor hat einen Artikel über dieses Thema in Vorbereitung, von dem er hofft,

ihn bald veröffentlichen zu können.

(c) Die Betriebsspannungen an den Röhrenanoden könnten klein gewählt werden. Wenn dies durchgeführt worden ist, werden die Röhren unter Bedingungen betrieben aus denen hohe Anodenwiderstände resultieren. Das bedeutet aber eine beträchtliche Verminderung der Wirksamkeit der Schaltung.

(d) Die abgestimmten Kreise könnten sehr

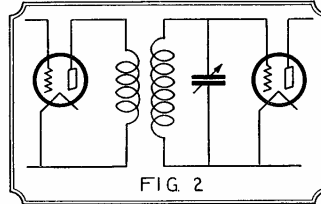


FIG. 2
Another familiar circuit, in which unwanted regeneration is a governing factor.

unwirksam ausgeführt werden, indem man sie hochohmig oder auf andere Weise verlustreich dimensioniert.

Das trifft auch für die Kopplungstransformatoren zwischen den Stufen zu, die i. a. sehr verlustreich sind wegen des sehr kleinen (induktiven) Kopplungsgrads zwischen den beiden Wicklungen.

Nun ist es natürlich klar, dass wir, indem wir alle oder irgendeine dieser Maßnahmen ergreifen außer vielleicht der ersten, die Leistungsfähigkeit des Verstärkers beeinträchtigen. Soweit es das Neutralisieren der Röhrenkapazitäten betrifft, so können wir diesen Punkt hier nicht ausführlicher erörtern. Jedoch ist wohlbekannt, dass diese Neutralisationsschaltungen Grenzen haben, die bei der Konstruktion von Rundfunkempfängern nur Stufenverstärkungen von vielleicht 15 oder in einigen Fällen von 20 zulassen. Viele dieser Brückenschaltungen lassen sich nicht über den gesamten Rundfunk-Frequenzbereich vollständig ausbalancieren; und diejenigen, von denen dies behauptet wird, weisen andere Einschränkungen auf.

VERFAHREN DER KOPPLUNG

Ein Vorschlag: Wir betrachten einen einfachen Schaltkreis wie in Bild 1 gezeigt. Wir können die abstimmbaren Kreise zwischen den Röhren so dimensionieren, dass wir einen sehr kleinen Widerstand⁵ erhalten; und daher erhalten wir, wenn sie auf die Frequenz der zugeführten Signalspannung abgestimmt werden, eine sehr große Kopplungsimpedanz⁶. Unter diesen Bedingungen hätte man wenig oder gar keinen Verstärkungsverlust durch die Kopplungen zwischen den Röhren, und wäre da nicht der Einfluss der Rückkopplung, auf den wir stoßen würden, dann könnten wir die Röhren so bauen, dass sie jede gewünschte Spannungsverstärkung liefern würden, vielleicht sogar einhundertfache oder mehr.

Aber, wie Sie wissen, wenn wir eine Schaltung wie diese ausprobieren, müssen wir ein Potentiometer oder andere Mittel verwenden, um die die Neigung zum Schwingen zu beherrschen; denn im Anodenkreis befinden sich neben einem großen induktiven Blindwiderstand⁷ die inneren Röhrenkapazitäten.

Oder, lassen Sie uns die Schaltung in Bild 2 betrachten, welche die meisten von uns kennen. Wenn wir einfach anfangen könnten und die induktive Kopplung zwischen der Primär- und der Sekundärwicklung steigern bis zu einem Wert, den wir erreichen möchten oder ihn so groß wir können machen würden, dann erhielten wir eine große Verstärkung des Systems, vielleicht mindestens ebenso viel wie mit Bild 1. Aber auch hier laufen

wir wieder in die Falle der Rückkopplung und Selbsterregung; daher müssen wir aufhören, Primärwindungen hinzuzufügen, lange bevor wir einen Resonanz-Transformator vorliegen haben über dessen Wirksamkeit es sich zu sprechen lohnt. In Kenntnis dieser Mängel von Hochfrequenzverstärkern hat man sich hunderte von Verfahren zur Steuerung von Rückkopplung und Schwingen ausgedacht, aber sie sind sich alle mehr oder weniger ähnlich, was die Ergebnisse betrifft, die sie liefern. Die Röhrenhersteller haben lange Zeit versucht, Röhren mit kleinen inneren Kapazitäten zu entwickeln. Sie haben aber bei dem Versuch, die Kapazitäten zwischen den Elektroden zu verringern, herausgefunden, dass sie gleichzeitig den Verstärkungsfaktor herabsetzen oder den inneren Anodenwiderstand heraufsetzen mussten; so dass man schließlich "sechs von dem einem und ein halbes Dutzend von dem anderen" bekam⁸.

DAS "GESCHIRMTE GITTER"

Kürzlich hat nun Dr. A. W. Hull von General Electric eine Elektronenröhre erfunden, bei der die Kapazität zwischen Anode und Gitter so klein ist, dass sie mit den meisten empfindlichen Geräten nicht mehr messbar ist. Die Maßnahme mit der dies erreicht wurde, war ursprünglich von Dr. Schottky entdeckt worden, einem deutschen Wissenschaftler. Anstatt zu versuchen, die Kapazitäten aus den Röhren zu entfernen (was natürlich unmöglich ist, weil die Elektroden erforderlich sind damit die Röhre überhaupt arbeiten kann) wurde der Einfluss der Kapazitäten beseitigt mit Hilfe des als "geschirmtes Gitter" bekannten Prinzips. Die Idee dabei ist, so weit wie nur irgend möglich zu verhindern, dass von der Anode oder von irgend einem ihrer Verbindungsdrähte ausgehende elektrostatische Kraftlinien (die wir immer zwischen den Platten eines geladenen Kondensators antreffen) das Gitter oder einen seiner Verbindungsdrähte

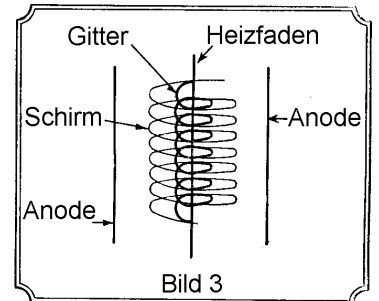


Bild 3
The principle of Dr. Hull's new tube, showing the position of the shield relative to the other elements.

erreichen⁹.

Dies wird erzielt, indem man einen elektrostatischen Schirm zwischen Gitter und Anode platziert, dem man eine bestimmte Vorspannung gibt und der die elektrostatischen Kraftlinien unterbricht. Gleichzeitig muss dieser Schirm so angeordnet werden dass er nicht zusehends die Elektronen blockiert, die vom Heizfaden zur Anode fließen, denn von diesem Elektronenfluss hängt der Betrieb der Röhre ab.

Es gibt zwei Arten der Schirmung. Erstens, das Gitter als solches muss abgeschirmt werden von der Anode durch einen dazwischen gesetzten Schirm. Dieser kann aus einem Draht bestehen, der wie eine Spule um das Gitter herumgewickelt und so platziert wird, dass sich beide Drahtspulen an jedem Punkt exakt gegenüberstehen. Diese Idee ist auf Bild 3 dargestellt. Es zeigt nicht die wirkliche Konstruktion, sondern nur das Prinzip. Messungen von Dr. Hull zeigten jedoch, dass diese Art der Schirmung nicht ausreicht. Die Drähte müssen nämlich, um eine ausreichende

¹ Bekanntlich gibt es noch weitere Rückkopplungspfade

² 750 kHz

³ Bei $f = 750 \text{ kHz}$ ist $\lambda = 400 \text{ m}$ wegen $\lambda = c/f$ mit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

⁴ Die Reaktanz X ist der Imaginärteil des komplexen Wechselstromwiderstandes $Z = R + jX$

⁵ Verlustwiderstand

⁶ Resonanzwiderstand des Parallelschwingkreises

⁷ Wechselstromwiderstand, bei einer idealen Spule ein reiner Blindwiderstand (engl. reactance) $Z = j\omega L$ wegen $R = 0$ (ohmscher Widerstand)

⁸ "Nichts Halbes und nichts Ganzes"

⁹ Oder: "... auf das Gitter durchgreift"

Schirmwirkung zu erhalten, so dicht zusammen sein, dass sie einen beträchtlichen Anteil von Elektronen daran hindern, vom Heizfaden zur Anode zu gelangen.

Mit Rücksicht darauf wurde der Schirm aus dünnen, flachen (Werkstoff-) Streifen hergestellt, hochkant zum Heizfaden (zur Kathode) hin. Auf diese Weise konnte die Schirmung sehr wirksam ausgeführt werden, ohne einen nennenswerten Anteil des Elektronenflusses zu blockieren.

LETZTE VERBESSERUNGEN

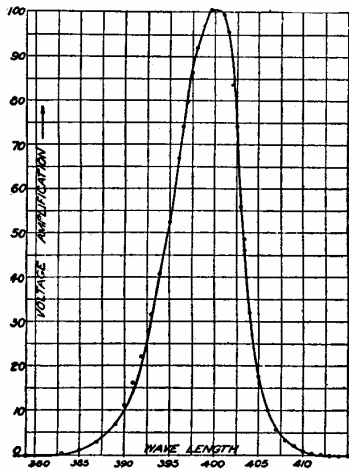
Als Nächstes mussten die Halte- und die Zuführungsdrähte des Gitters wirksam gegen die entsprechenden Teile der Anode und gegen die Anode selbst abgeschirmt werden. Um dies zu erreichen wurde das Gitter von der Röhrenoberseite her abgestützt.

Aber, trotz alledem, gab es immer noch ein paar elektrostatische Kraftlinien, die durch den Raum vom Gitter zur Anode hindurch treten und damit zum Problem werden könnten.

Um nun auch noch diese zu unterbrechen wurde die Röhre von einem mit dem Massepotential verbundenen Metallzylinder umgeben, der die Röhre dicht umschließt, und schließlich wurde noch eine metallene Scheibe oben auf dem "Abschirmungsgitter" angebracht und mit dem gemassten Zylinder verbunden. Das entsprechende Bild 5 (entnommen aus der *Physical Review*, in der Dr. Hull über seine Arbeiten berichtet), zeigt die Konstruktion der Röhre.

Die statischen Eigenschaften solcher Röhren unterscheiden sich von denjenigen der gebräuchlichen Röhren die wir kennen, aber wir wollen hier nicht weiter darauf eingehen, außer dass dieser Unterschied hauptsächlich auf dem Anodenwiderstand beruht. Die wirksame Kapazität zwischen der Anode und dem Gitter einer dieser Röhren wurde von Dr. Hull mit $0,0278 \mu F^{10}$ gemessen, ein großer Unterschied zu den 10 bis 15 pF bei der gewöhnlichen Röhre der Bauart 201A.

Diese bedeutet eine Verringerung der Gitter-Anode-Kapazität auf etwa ein fünfhundertstel von dem was wir in der 201A vorfinden.



Selectivity curve of a 4-stage amplifier with input untuned, at 1,000 kc.

Beim Durchprüfen dieser Röhren wurde die in Bild 4 gezeigte Schaltung benutzt. Die Abschirmungsgitter wurden mit 60 Volt versorgt und die Anoden mit 110 Volt. Die Ausgangsspannung dieses Hochfrequenz-Verstärkers wurde mit einer kalibrierten Detektorröhre sichergestellt.

Die kleine Spannung, die am Eingang des Verstärkers erforderlich ist, wurde durch die Verbindung des Eingangs über ein kurzes Stück Draht hergestellt, der von einem konzentrischen Rückleiter umgeben ist.

Die Eingangsspannung war dann gleich der Reaktanz dieses kurzen Stücks Kupferrohr, multipliziert mit dem hindurchfließenden Strom, der mit Hilfe eines thermoelektrischen Kopplers gemessen wurde. Während er diese Messungen machte, fand Dr. Hull heraus, dass sich kein Fortschritt durch die Verwendung irgendeiner Aufwärts-Transformator-Schaltung zur Kopplung der Röhren(stufen) erzielen ließ.

Dies liegt an den hohen Anodenwiderständen dieser Röhren, die sie dazu befähigen, wirksam auf sehr hohe Impedanzen zu arbeiten von der Art wie in Bild 1 gezeigt. Diese wurde dann endgültig verwendet, wie die Schaltung von Bild 4 zeigt. Das Schema zeigt die vollständige Schaltung von Dr. Hulls Verstärker und von der Messausrüstung.

ENORME VERSTÄRKUNG

Einige Messungen bei 50 kHz oder 6000 Meter (Wellenlänge) zeigten, dass es möglich war, eine Verstärkung von 200 pro Röhre zu erhalten. Bei der Prüfung mit mittleren Frequenzen, um etwa

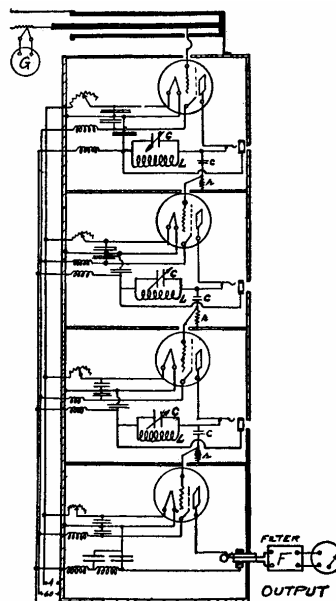


Fig. 4: Diagram of cascade amplifier used for tests at 1,000 and 10,000 kc. Input at upper left.

1.000 kHz oder 300 Meter, gab es Spannungsverstärkungen zwischen 40 und 45 für den Betrieb einer einzelnen Röhre. Im Kaskadenbetrieb mit zwei Röhren fand man eine Verstärkung von 1.700 heraus, und bei drei Röhren 75.000. Mit anderen Worten, bei diesen Frequenzen konnte mit einer Verstärkung von etwa 40 bis 45 pro Röhre gerechnet werden. Dies ist ein interessanter Gegensatz im Vergleich zur Verstärkung unserer üblichen Hochfrequenzverstärker, mit denen wir nicht mehr als 15fache Verstärkung¹¹ erhalten. Bezüglich des tatsächlichen Einflusses solcher Röhren auf einen Abhörverstärker, wenn wir sie also in einem handelsüblichen Empfänger einsetzen, dürfen wir nicht vergessen, dass der Detektor nach einer quadratischen Gesetzmäßigkeit arbeitet.

Das bedeutet, wenn wir eine Spannung e anlegen, ist die Ausgangsspannung der Anordnung proportional zu e^2 .

Nehmen wir einmal an, dass wir mit einem sehr empfindlichen Verstärker der üblichen Bauart eine Verstärkungsziffer von 10 je Stufe erhalten können. Mit Dr. Hulls Empfänger bekämen wir eine Stufenverstärkung von 40 bei 1.000 kHz. Das ist vier mal so viel pro Stufe.

Angenommen, wir betrachten nun drei HF-Stufen. Das bedeutet dann eine 64 fache Verstärkung von dem, was unser guter handelsüblicher Empfänger zu leisten vermag. Und durch die Quadratur in der Detektorschaltung bekommen wir schließlich eine Ausgangsspannung von 64 mal 64 oder etwa 4.000

mal so viel wie aus dem Detektor unseres guten handelsüblichen Empfängers.

Und das bedeutet, unter Vernachlässigung von statischen und anderen Störungen, dass es möglich sein würde, Signale zu verarbeiten, die (nur) ein viertausendstel so stark sind!

Bei der Verwendung eines vollständigen Satzes von fünf Röhren, die letzte als Detektor, konnte eine Gesamtverstärkung von zwei Millionen erzielt werden.

Während aller dieser Prüfungen gab es keinerlei Ärger mit Rückkopplungen, einmal abgesehen vom Anfang.

Als bei mehreren Stufen getrennte Batterien benutzt wurden, verschwand dieser Ärger, so wie er wohl auch verschwunden wäre, wenn man eine bessere Filterung oder Durchleitung der Hochfrequenz in den verschiedenen Stufen erreicht hätte.

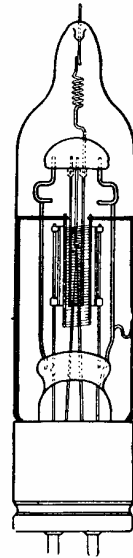


Bild 5: Aufriss der Röhre von Dr. Hull, der das Verfahren der Abschirmung des Steuergitters gegen die Anode zeigt. Die Bilder auf dieser Seite wurden freundlicherweise von der *Physical Review* zur Verfügung gestellt.

Bei hohen Frequenzen ist es nicht möglich, derart hohe Verstärkungen zu erhalten, weil der Widerstand und die dielektrischen Verluste so groß sind. Das macht es schwierig, hohe Impedanzen bei Resonanz zu erhalten.

Jedoch wurden bei 30 Metern (10 kHz) mehrere Prüfungen durchgeführt, und eine Gesamtverstärkung von 250 wurde mit fünf Röhren erzielt. Bei einem anderen Test, bei dem man spezielle verlustarme Spulen aus Kupferrohr einsetzte und andere Verluste wesentlich herabsetzte, konnte die Spannungsverstärkung pro Stufe von drei auf sieben heraufgesetzt werden.

Und man fand heraus, dass es möglich war, eine Gesamtverstärkung von 10.000 bis 15.000 unter Benutzung von fünf Röhren zu erreichen.

Röhren dieser Bauart werden jedoch Dr. Hulls Artikel in der *Physical Review* zufolge weder fabrikmäßig hergestellt noch ist an die Aufnahme ihrer Produktion in naher Zukunft gedacht.

¹⁰ pF

¹¹ pro Stufe