

Elektronenröhren

Ein Rückblick auf die Anfänge der Elektronik

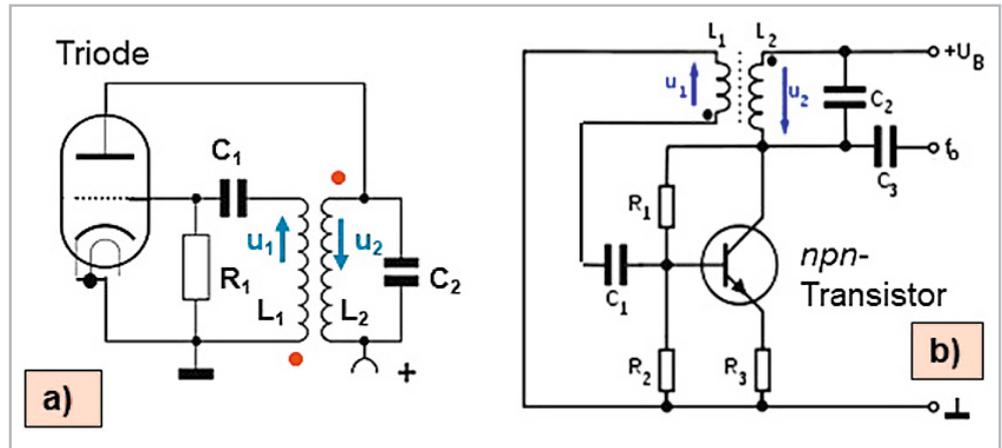
Teil 4

Der letzte Teil dieser Beitragsreihe befasst sich mit dem Einsatz von Elektronenröhren in der Hochfrequenztechnik. Seinerzeit wurde gern auch von „Radoröhren“ gesprochen. Im Gegensatz beispielsweise zur Akustik, wo der menschliche Hörfrequenzbereich genau definiert ist, werden die Frequenzgrenzen der HF-Technik nicht immer ganz einheitlich benannt. Im Folgenden beschränken wir uns auf den Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 MHz. In diesem Bereich wurde die HF-Technik bereits vor 100 Jahren für die Gesamtheit der Erzeugung und Fortleitung elektrischer Wechselströme und elektromagnetischer Felder verwendet, und zwar in den Anfangsjahren zunächst nur (!) mithilfe von Elektronenröhren.

Autor des Beitrags: Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit



Bild 1: Meißner-Oszillator mit einer Triode (Bildteil a)) und einem npn-Transistor (Bildteil b)). Die Transistor-Schaltung entstand erst sehr viel später, nämlich nach dem Aufkommen der Transistoren. Die Schaltung nach Teilbild a) wurde bereits 1913 von der „Gesellschaft für drahtlose Telegrafie“ patentiert. Die Wicklungen der Induktivitäten L1 und L2 haben entgegengesetzten Wicklungssinn (siehe rote bzw. schwarze Punkte), um eine weitere Phasendrehung von 180° zu erreichen. Um eine ungedämpfte Schwingung zu erzeugen, muss die Gesamtrückkopplung der Schaltung in Phase sein (0° oder ein Vielfaches von 360°).



HF-Generatoren mit Elektronenröhren

Wir beginnen vorerst wieder mit der Erzeugung hochfrequenter (Sinus-)Schwingungen, d. h. mit den Generator-Schaltungen, ähnlich wie schon im Teil 3 der Beitragsreihe, jetzt aber mit LC-Gliedern. Dort waren es RC-Glieder. Auch für röhrenbetriebene HF-Generatoren gab es eine ganze Reihe von verschiedenen Schaltungen, wie sie früher – vor etwa 100 Jahren und auch danach – oft benutzt wurden, z. B. bei HF-Generatoren nach dem Prinzip von Meißner, Colpitts, Hartley, Huth-Kühn oder von Heegerener. Hinzu kommen die quarzstabilisierten HF-Generatoren. Heute kennt man diese Schaltungen, leicht abgewandelt, nur noch bestückt mit Bipolartransistoren und mit Feldeffekttransistoren. Als Beispiel dafür sei nachfolgend auf die Sinus-Generatoren nach dem Prinzip von Meißner und Colpitts bzw. Hartley näher eingegangen.

Meißner-Oszillator

Beginnen wir zunächst mit der Meißner-Schaltung, bestehend aus Triode und Koppelspule, siehe dazu Bild 1. Diese Schaltung wurde bereits 1913 von der „Gesellschaft für drahtlose Telegrafie“ zum Patent angemeldet. Es handelt sich hier um einen über die beiden Induktivitäten L1 und L2 rückgekoppelten Verstärker. Bemerkenswert ist hier die Koppelspule L1, die gegenüber der Schwingkreisspule L2 einen entgegengesetzten Wickelsinn hat, um eine Phasendrehung von 180° zu erreichen. Zusammen mit der weiteren Phasendrehung um 180° durch die Triode ergibt das resultierend einen Phasenwinkel von 360°, was zur Selbsterregung der Schaltung führt. Der entgegengesetzte Wicklungssinn ist im Bild 1a) durch zwei rote Punkte an den beiden Enden der Spulen gekennzeichnet. Die Frequenz, mit der dieser Oszillator schwingt, ergibt sich nach der Thomsonschen Schwingungsformel zu

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(L_2 \cdot C_2)}}$$

Das Bild 1b) zeigt den Meißner-Oszillator mit der heute üblichen Bestückung mit einem npn-Transistor. Beim Meißner-Generator handelt es sich um einen „transformatorgekoppelten“ Sinus-Oszillator. In der früheren Technik der Rundfunk- und Fernsehgeräte kamen Meißner-Oszillatoren im gesamten Frequenzbereich zum Einsatz, angefangen bei der Langwelle (einige hundert kHz), über die Mittel- und Kurzwelle bis in den TV-Bereich (bis 300 MHz).

Colpitts- und Hartley-Oszillator

Bei diesem Generatortyp handelt es sich um einen Röhrenoszillator in sogenannter kapazitiver bzw. induktiver Dreipunkt-Schaltung, siehe Bild 2a) und 2 b). Bei der induktiven Spannungsteilung z. B. wird der Rückkopplungsfaktor durch die Wahl der Anzapfung an der Schwingspule (L1 und L2) eingestellt. Die Oszillatorfrequenz für diese beiden Schaltungsvarianten errechnet sich nach den folgenden beiden Formeln:

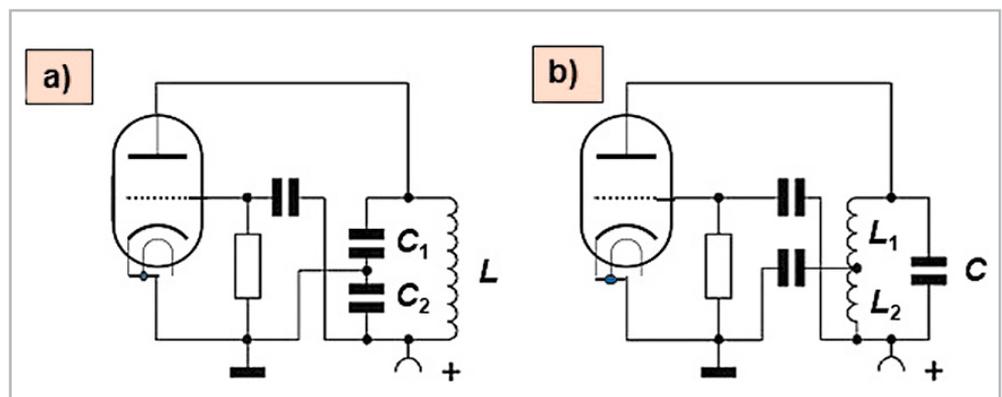
Für den Colpitts-Oszillator:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)}}$$

und für den Hartley-Oszillator:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(L_1 + L_2) \cdot C}}$$

Bild 2: Generatoren in Dreipunkt-Schaltung mit einer Triode: a) Colpitts-Oszillator mit kapazitiver Spannungsteilung, b) Hartley-Oszillator mit induktiver Spannungsteilung



Rundfunkempfänger mit Elektronenröhren

Das Audion

Der erste echte Rundfunkempfänger mit Elektronenröhren nach dem Kristalldetektor war das Audion. Es handelt sich dabei um einen sogenannten Geradeaus-Empfänger. Bekannte Beispiele dafür waren in Deutschland in den 1940er-Jahren der DKE und der VE 301 (Bild 3).

Die Audion-Grundschialtung stellt einen Einkreisempfänger dar zum Empfang amplitudenmodulierter Sendungen (AM-Rundfunk), einschließlich Amateurfunk auf Kurzwelle. Bei der Audion-Demodulation übernimmt die Gitter-Katoden-Strecke die Rolle des Demodulators (Gittergleichrichtung), Bild 4. Durch die Triode erfolgt neben der Demodulation gleichzeitig eine Verstärkung der gewonnenen Niederfrequenz. Da der Eingangskreis durch die Audion-Gleichrichtung stark bedämpft wird, ist zur Erhöhung der Empfindlichkeit und Selektivität eine Entdämpfung notwendig, die durch eine Mitkopplung (CrLr) geschieht. Nachteilig beim Audion ist die Tatsache, dass dort eine automatische Verstärkungsregelung nicht möglich ist.

Im Gerät VE301 wurden meist die Röhren AF7, RES164 und die Gleichrichterröhre RGN1064 verwendet (siehe Schaltbild Bild 3). In der Ansicht des Geräts mit geöffneter Rückwand (Bild 3, oben)

det sich anstelle der Gleichrichterröhre ein Selen-Gleichrichter, wie das zu jener Zeit auch üblich war. Bei der im Bild 5 abgebildeten Gleichrichterröhre, einer Doppeldiode, erkennt man sehr deutlich die beiden Einzeldioden.

Selbst in den 60er-Jahren, als es schon längst Überlagerungsempfänger (Superhet-Prinzip) mit Röhren gab, wurden immer noch höherwertige Audion-Empfänger für Kurzwellenamateure mit Röhren gebaut [1], siehe den Zweikreis-KW-Empfänger für das 20-m-Band (Bild 6), mit regelbarer Vorkreisentdämpfung. Das Audion ist einst wegen seiner hohen Empfindlichkeit sehr viel genutzt worden. Bei „angezogener“ Rückkopplung (Vorstufe und Audion) kann so ein Gerät einem normalen Mittelsuper leistungsmäßig gleichwertig sein.

Das Bild 7 zeigt das Schaltbild eines Zweikreisempfängers für das 20-m-Band (14,0–14,35 MHz) mit regelbarer Vorkreisentdämpfung. Das hier vorgestellte Audion ist ein sogenanntes ECO-Audion

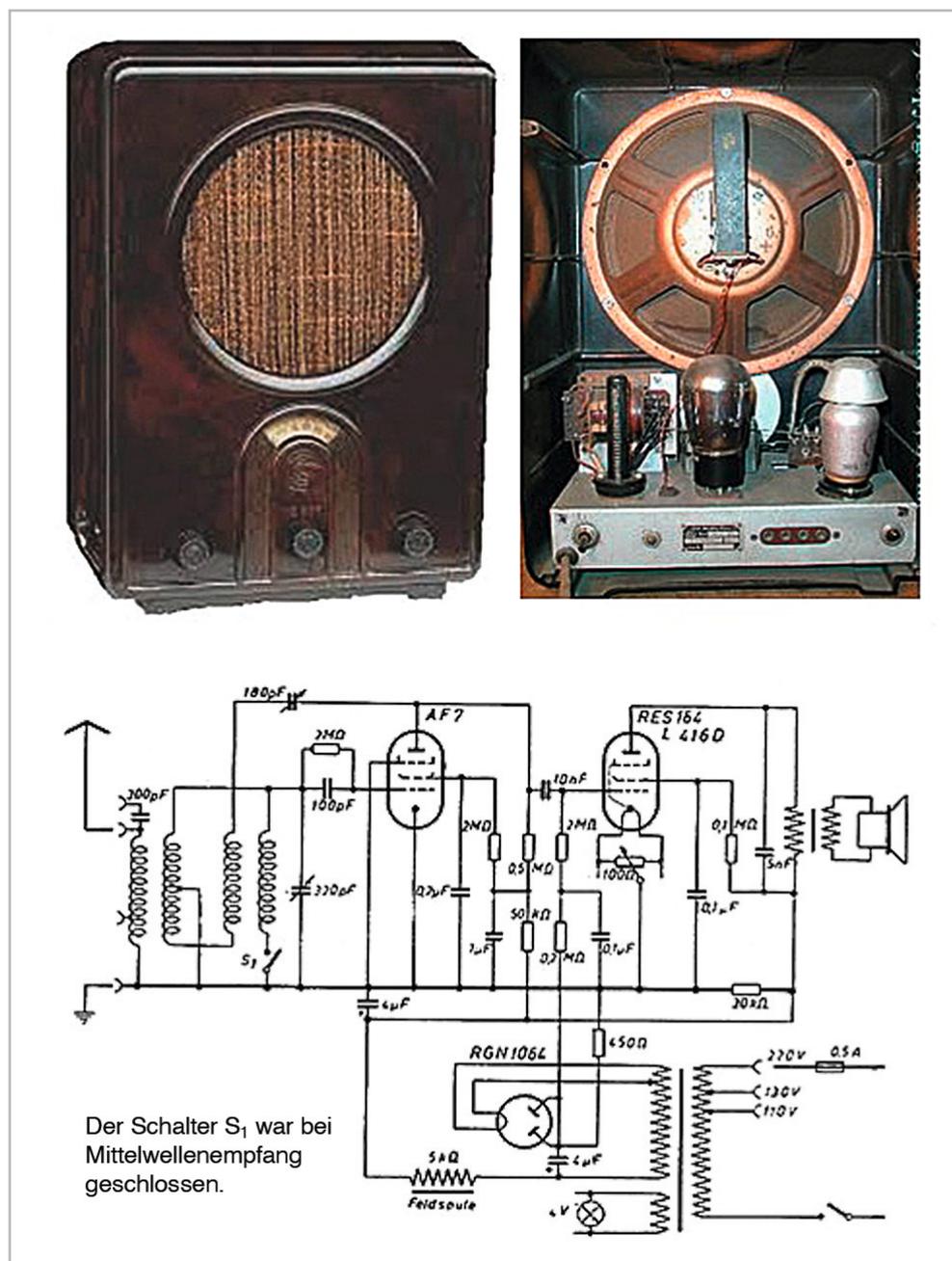


Bild 3: Volksempfänger VE 301: Oben links: Vorderansicht, oben rechts: Rückansicht bei geöffneter Rückwand, unten: Schaltbild der Audion-Schaltung mit den Röhren AF7 und RES164 sowie der Gleichrichterröhre RGN 1064

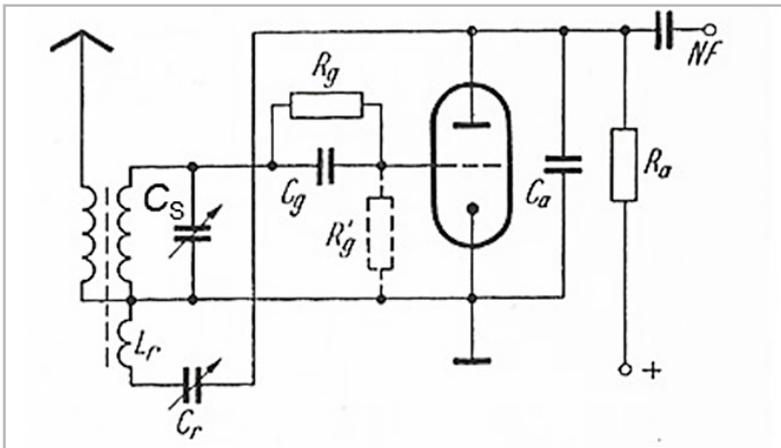


Bild 4: Schaltbild eines einfachen Audion-Empfängers. Mit dem Schwingkreis-(dreh)kondensator C_s konnte der gewünschte Sender eingestellt werden, den man empfangen wollte, und mit dem Rückkopplungsdrehko C_r konnte die Schaltung bis kurz vor den Rückkopplungs-„Einsatz“ gebracht werden, was die Empfangsempfindlichkeit erhöhte.



Bild 5: Die im Empfänger VE 301 häufig verwendeten Elektronenröhren. Anstelle der Gleichrichterröhre RGN 1064 wurde im VE 301 häufig auch ein Selen-Gleichrichter verwendet. Siehe dazu auch das Bild 3, oben rechts.

(Electron Coupled Oscillator), das bei KW-Amateuren in den 50er- bis 70er-Jahren sehr beliebt war. Der wesentliche Unterschied zum normalen Audion (Bild 4) besteht darin, dass die Katode hier nicht an Masse liegt, sondern an einer Anzapfung am unteren Teil der Schwingkreisspule (Bild 8). Der gewünschte weiche Rückkopplungseinsatz geschieht hier über die Änderung der Steilheit der Röhre R_ö 3. Bei Trioden erfolgt das über die Änderung der Anodenspannung, während das bei Pentoden über die Schirmgitterspannung geschieht; siehe dazu das Potentiometer P 2 im Bild 7.



Bild 6: Zweikreis-Kurzwellenempfänger für das 20-m-Band [1]. Links: Vorderansicht, rechts: Blick auf das Innere des Geräts, auf das Chassis ohne Gehäuse. Direkt vor der Röhre 2 (EF 11) erkennt man den Doppel-Drehkondensator. Das dazugehörige Schaltbild zeigt das Bild 7.

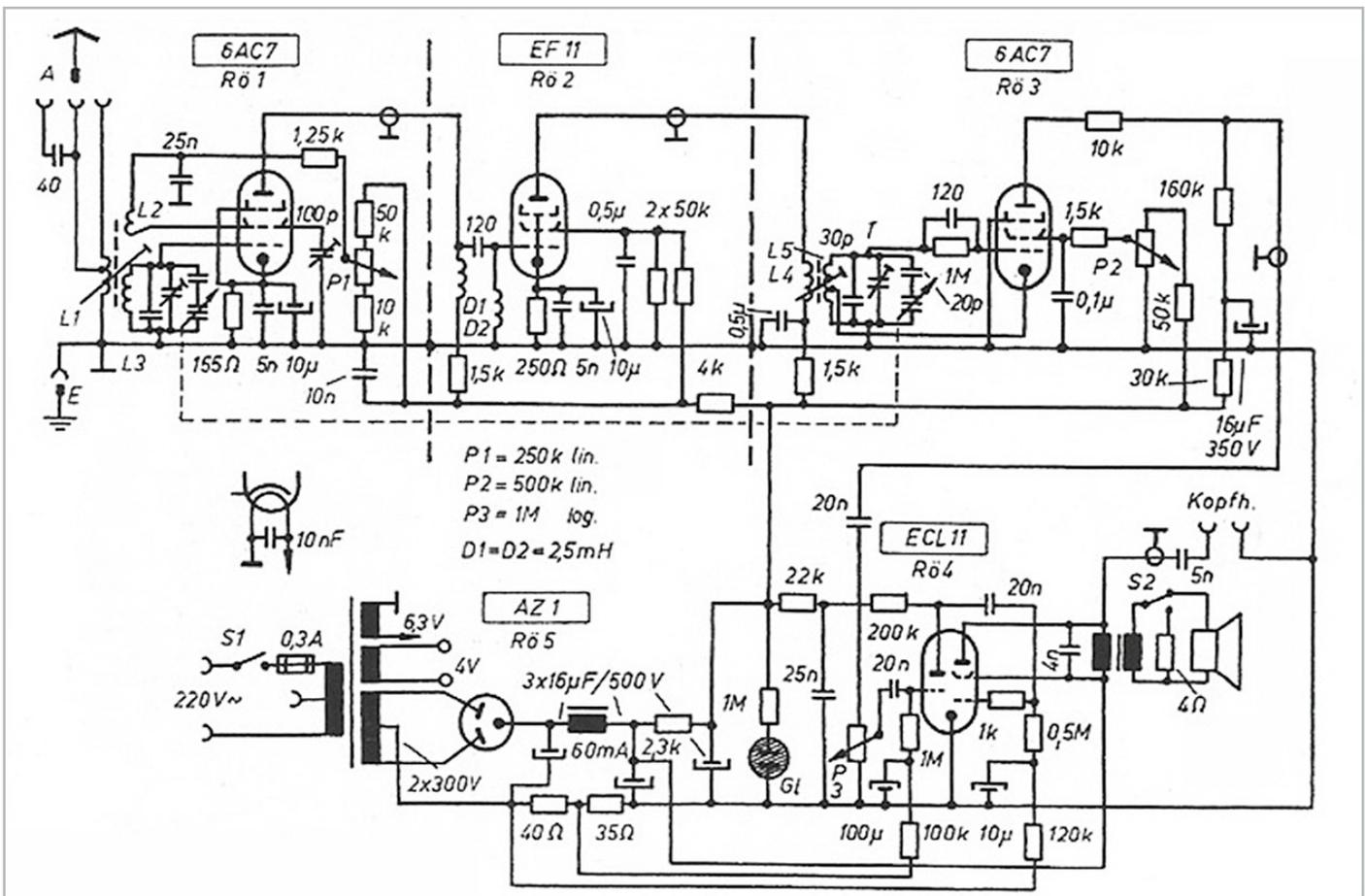


Bild 7: Schaltbild des Zweikreis-Kurzwellenempfängers mit ECO-Audion für das 20-m-Band aus Bild 6.

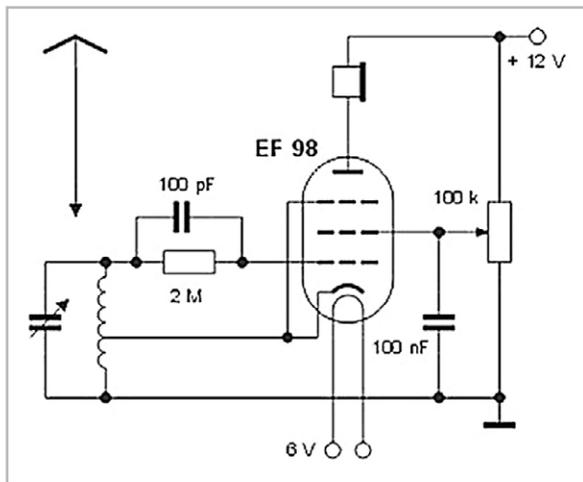


Bild 8: Schaltbild eines ECO-Audions (Electron Coupled Oscillator). Der wesentliche Unterschied zum normalen Audion (s. Bild 4) besteht darin, dass die Kathode hier nicht an Masse liegt, sondern an einer Anzapfung am unteren Teil der Schwingkreisspule angeschlossen ist. Der Rückkopplungseinsatz wird hier durch Veränderung der Steilheit über die Schirmgitterspannung bestimmt (siehe dazu das Potentiometer P2 im Bild 7).

Die Röhre RÖ 2 (EF 11) bildet in dieser Schaltung eine Trennstufe zwischen dem Audion (RÖ 3) und der Vorstufe (RÖ 1), wodurch störende Rückwirkungen zwischen beiden vermieden wurden [5], siehe Bild 7.

Der Überlagerungsempfänger (Superhet)

Das Überlagerungsverfahren bietet den großen Vorteil einer beachtlichen Verbesserung der Empfangstrennschärfe gegenüber dem Geradeaus-Empfänger. Das ist inzwischen alles von den heutigen transistorbestückten Rundfunkempfängern her hinreichend bekannt. Wir können uns hier daher auf die schaltungstechnischen Besonderheiten bei Röhrengeräten beschränken, ohne dabei auf viele Besonderheiten (z. B. Mischstufen mit Doppeltrioden oder additive Mischschaltungen mit Pentoden) tiefer einzugehen. Beliebte waren seinerzeit die Mischschaltungen mit Verbundröhren z. B. mit der ECH 11 (Bild 9). Bei der multiplikativen Mischung wurden die Eingangsspannung und die Oszillatorspan-

nung zwei getrennten Steuergittern einer Verbundröhre (Hexode, Heptode oder Oktode) zugeführt. Da sich zwischen beiden Steuergittern mindestens ein wechselstrommäßig geerdetes Gitter befand, waren Eingangs- und Oszillatorkreis bereits hinreichend entkoppelt.

Bei den Zwischenfrequenzen hat sich seit der Röhrenzeit nichts Wesentliches verändert: AM (455 kHz, früher: 468 kHz) und FM (10,8 MHz)

Andere Verwendungsmöglichkeiten für Elektronenröhren

Grid-Dipmeter

Ein Grid-Dipmeter oder kurz ein Dipmeter ist ein freischwingender, durchstimmbarer HF-Oszillator, bei dem die Schwingkreisspule von außen zugänglich ist [2]. Der Grid-Dipper ist ein Gerät zur Messung von Resonanzfrequenzen. Die ersten Dipmeter gab es bereits mit Elektronenröhren (Bild 10 und 11). Heute werden sie auch transistorbestückt verwendet. Sie waren schon seinerzeit ein hilfreiches Messgerät für jeden, der mit Hochfrequenz zu tun hatte. Dipmeter bestanden und bestehen immer noch aus einem abstimmbaren HF-Oszillator mit einem Satz von aufsteckbaren Schwingkreisspulen. Durch Spulentausch ist der jeweilige Messbereich in Schritten frei wählbar. Bei der Messung wird die passende Schwingkreisspule des Dipmeters in die Nähe des zu prüfenden Schwingkreises gehalten. Wenn die Frequenzen beider Kreise übereinstimmen, entzieht das Messobjekt dem Oszillator Energie. Das verändert den Gitterstrom der Oszillatorröhre, was durch einen „Dip“ am Messgerät (siehe auch Bild 10) angezeigt wird, und das kann man messen.

Mit Grid-Dipmetern kann man elektrische Schwingkreise, aber auch Antennen durchmessen. Des Weiteren können mit Dipmetern Oszillator-, ZF- und Abstimmkreise von HF-Sendern und -Empfängern geprüft werden. Der Messbereich liegt zwischen etwa 100 kHz und 500 MHz und er kann in groben Schritten durch Austausch von Steckspulen gewählt werden.

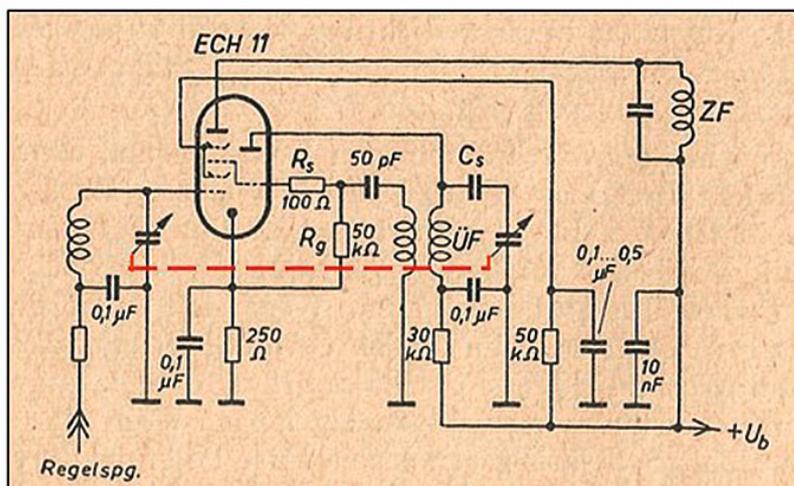


Bild 9: Mischschaltung mit einer Verbundröhre: ECH 11. Bei Verbundröhren, bei denen die Verbindung der beiden Systeme (Oszillatorgitter mit dem Gitter 3 der Mischröhre) im Inneren nicht vorlag, wurde diese Verbindung an der Röhrenfassung vorgenommen. Die rot gestrichelte Linie im Schaltbild deutet an, dass beide Drehkondensatoren über eine gemeinsame „Drehko“-Achse miteinander verbunden waren. Moderne Verbundröhren gestatteten bereits damals ein problemloses Arbeiten auch im UKW-Bereich.



Bild 10: Grid-Dipmeter: Prinzip-Schaltbild (links), fertig dimensionierte Schaltung eines Grid-Dipmeters mit einer Triode EC94 bzw. EC86 (rechts)[2]. Die Abstimmung erfolgt hier mit einem Doppel-Drehkondensator, der in der Mitte an Masse liegt.

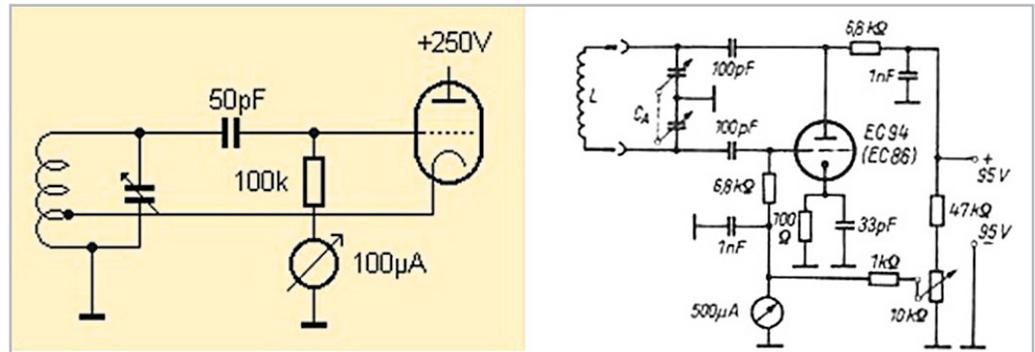


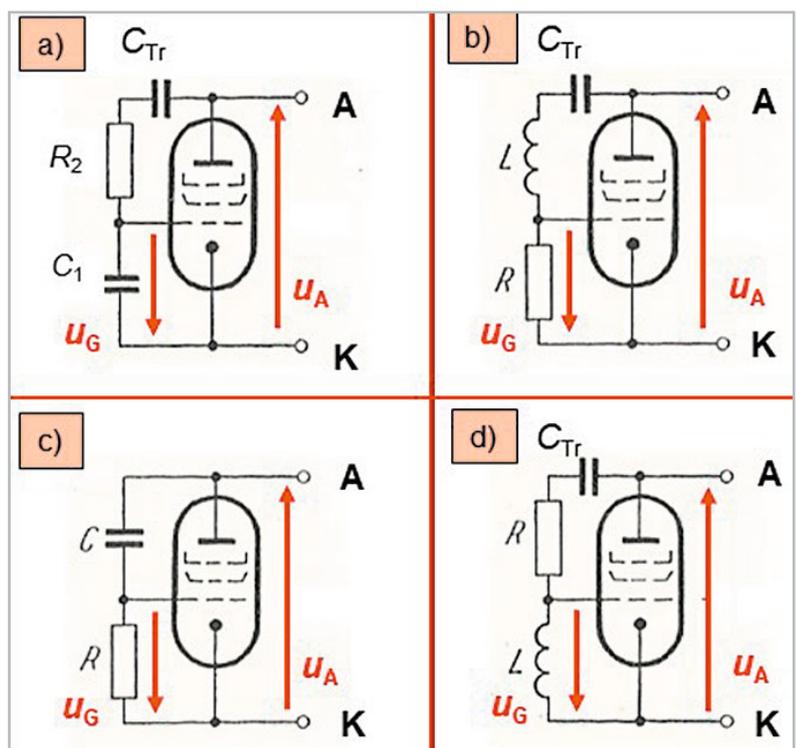
Bild 11: Praktische Ausführungen von Grid-Dipmetern. Weitere Geräte dieser Art gab es von Grundig, RFT und vielen anderen Herstellern – alles Röhrengeräte. Das Gerät hier rechts außen stammt z. B. von Heathkit, mit sieben Steckspulen. Beim Gerät im Bild links außen erkennt man die Elektronenröhre im Zentrum des Chassis und den Doppel-Drehkondensator, der in der Mitte elektrisch an Masse liegt, siehe dazu auch Bild 10.

Elektronenröhren als regelbare Induktivitäten und Kapazitäten

Elektronenröhren können auch als regelbare Induktivitäten und Kapazitäten eingesetzt werden [3], siehe dazu das Bild 12. Betrachten wir zur Erklärung der Funktion das Teilbild 12a). Der aus R_2 und C_1 bestehende frequenzabhängige Spannungsteiler wird so dimensioniert, dass die Wechselspannung u_G am Kondensator C_1 der Anoden-Wechsel-Spannung u_A um 90° nacheilt. Da aber die Gitter-Wechselspannung u_G den Anodenstrom gleichphasig steuert, eilt dieser der Spannung u_A um 90° (entsprechend: $\pi/2$) nach. Mit anderen Worten: Bezogen auf die Anschlüsse A und K verhält sich die Röhrenschaltung somit wie eine Induktivität, d. h., der Strom eilt der Spannung um 90° nach [4].

Bild 12: Elektronenröhren als regelbare Induktivitäten und Kapazitäten. Als Röhren wurden stets Pentoden verwendet, wobei solche mit großer Steilheitsänderung bei kleinen Gitterspannungsänderungen bevorzugt wurden.

- a) Röhre als regelbare Induktivität mit RC-Spannungsteiler
 - b) Röhre als regelbare Induktivität mit LR-Spannungsteiler
 - c) Röhre als regelbare Kapazität mit CR-Spannungsteiler
 - d) Röhre als regelbare Kapazität mit RL-Spannungsteiler
- C_{Tr} = Trennkondensator



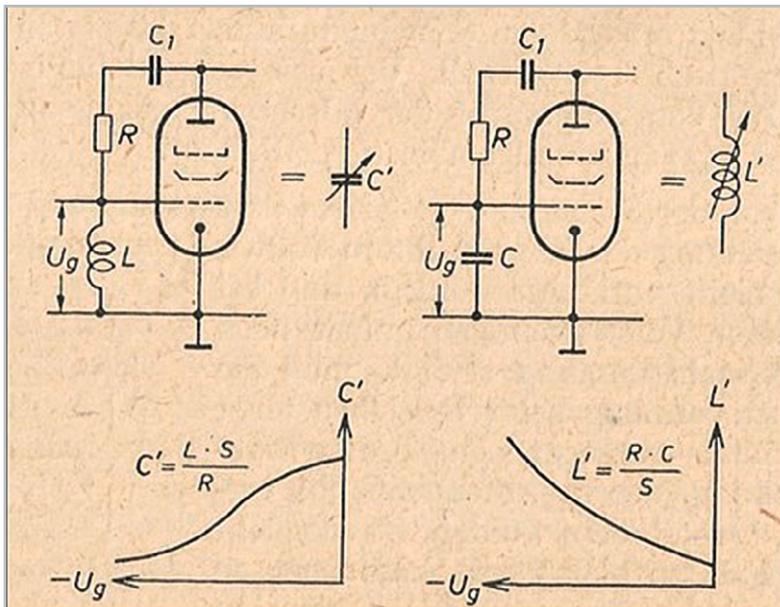


Bild 13: Blindwiderstandsrohren: Röhren mit möglichst großer Steilheitsänderung bei kleiner Gitterspannungsänderung waren vom Prinzip her am besten für diesen Zweck geeignet [5]. Zwischen Steuergitter und Anode befand sich bei allen derartigen Schaltungen ein Trennkondensator C_1 (oder: C_{Tr}) zur gleichstrommäßigen Trennung von Steuergitter und Anode.

Ähnlich erklärt sich auch die Funktionsweise der anderen Schaltungen, siehe Bild 12b bis 12d). Ein Trennkondensator C_{Tr} (etwa 50 nF) sorgt dafür, dass das Steuergitter und die Anode gleichstrommäßig voneinander getrennt sind.

Durch Einflussnahme auf den Arbeitspunkt der Röhre kann man den induktiven bzw. kapazitiven Blindwiderstand verändern, siehe dazu Bild 13. Röhren mit möglichst großer Steilheitsänderung bei relativ kleiner Änderung der Gitterspannung sind bzw. waren vom Prinzip her am besten dazu geeignet, als Blindwiderstandsrohre eingesetzt zu werden [6]. Für die Grundschaltungen nach Bild 12a) und 12d) lauten die Beziehungen zur Bestimmung der mit ihnen erreichbaren Induktivität L' bzw. der erreichbaren Kapazität C' [6]:

$$L' = R \cdot C / S \text{ bzw. } C' = L \cdot S / R$$

Darin bedeutet S die Steilheit der Röhre im Arbeitspunkt. Bleibt nur noch die Frage nach dem praktischen Einsatz für derartige Blindröhrenschaltungen. Der Hauptanwendungsbereich für Blindröhren lag seinerzeit bei der automatischen Scharfabstimmung von Überlagerungsempfängern, siehe dazu auch K.-A. Springstein [5].

Kurzwellensender mit Elektronenröhren für den Amateurfunk

Dieses Thema könnte ein ganzes Buch füllen. Im Rahmen dieses Übersichtsbeitrags über Elektronenröhren ist das natürlich nicht möglich. An dieser Stelle folgt daher nur ein Schaltungsbeispiel für einen einfachen Zweikreis-Kurzwellensender für das 80-m-Band (Bild 14). Es

handelt sich dabei um einen einfachen Sender in ECO-Schaltung, bei der die Katode nicht direkt auf Masse liegt, sondern an einer Anzapfung am unteren Teil der Schwingkreisspule angeschlossen ist. Schaltungen dieser Art waren etwas zum Selbstbau für Anfänger im Amateurbetrieb. Die hier abgebildete Schaltung schaffte eine HF-Nutzleistung von bis zu 3 W.

Es gab vergleichbare Schaltungen für Anfänger zum Selbstbau, aber schon mit Quarzkristallsteuerung, wodurch das Problem der Frequenzkonstanz befriedigend gelöst werden konnte. Mit einer EL84 als Endröhre wurden zu jener Zeit im CW-Betrieb (Morse-Betrieb) HF-Leistungen bis zu etwa 20 W erreicht, während für Telefonie etwa 12–15 W geschafft wurden.

Tesla-Generator mit Elektronenröhre

Zum Abschluss dieses vierten Beitrags der Artikelserie noch eine ganz spezielle Anwendung von Elektronenröhren, und zwar für den Einsatz bei Tesla-Generatoren (benannt nach ihrem Erfinder Nikola Tesla (1856–1943)). Das sind „Transformatoren“ mit zwei Luftspulen, d. h. ohne den sonst üblichen Eisenkern. Die Primärspule besteht aus fünf bis zehn Windungen, während die Sekundärwicklung bis zu 1000 Windungen und mehr besitzen kann. Die Anregung erfolgt primärseitig von einem HF-Generator, z. B. mit 1–3 MHz, der mit einer Sendepentode PL504 bestückt war.

Für alle Anschlüsse hat diese Röhre einen 9-poligen Sockel, bis auf die Anode. Deren Anschluss befindet sich oben separat (Bild 15).

Diese Röhre besitzt im Übrigen sehr ungewöhnliche Kenndaten, z. B.

Heizspannung	$U_H = 2,7$ Volt
Anodenspannung	$U_A = 50$ Volt
Anodenstrom	$I_A = 440$ Milliampere

Die Sekundärspule befand sich meist auf einem langen Kunststoff- oder PVC-Rohr, gewickelt z. B. mit 0,3-mm-CuL-Draht. Die in ihr entstehende Spannung kann Werte von 80–100 kV erreichen, die aber infolge ihrer hohen Frequenz relativ ungefährlich ist. Tesla wollte damals mit seiner Erfindung die „Ungefährlichkeit“ von Wechselstrom demonstrieren. Bei geeignet geformter Elektrode (Spitze, Kugel o. Ä.) können von oben, von der langen Spule her, imposante Funkenentladungen ausgehen. **ELV**

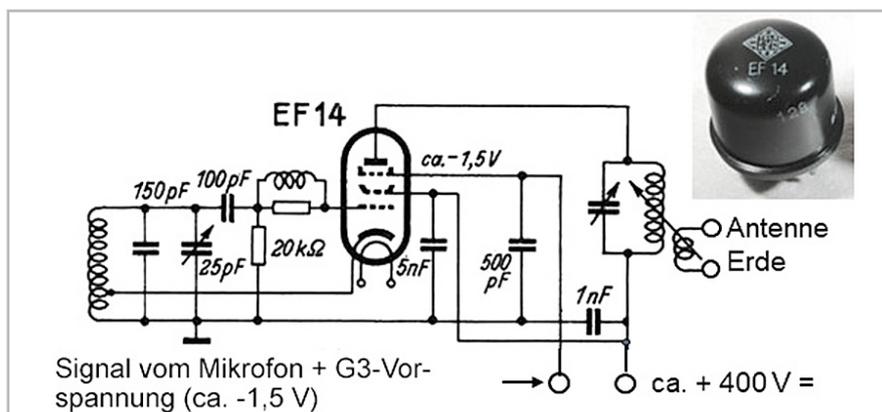
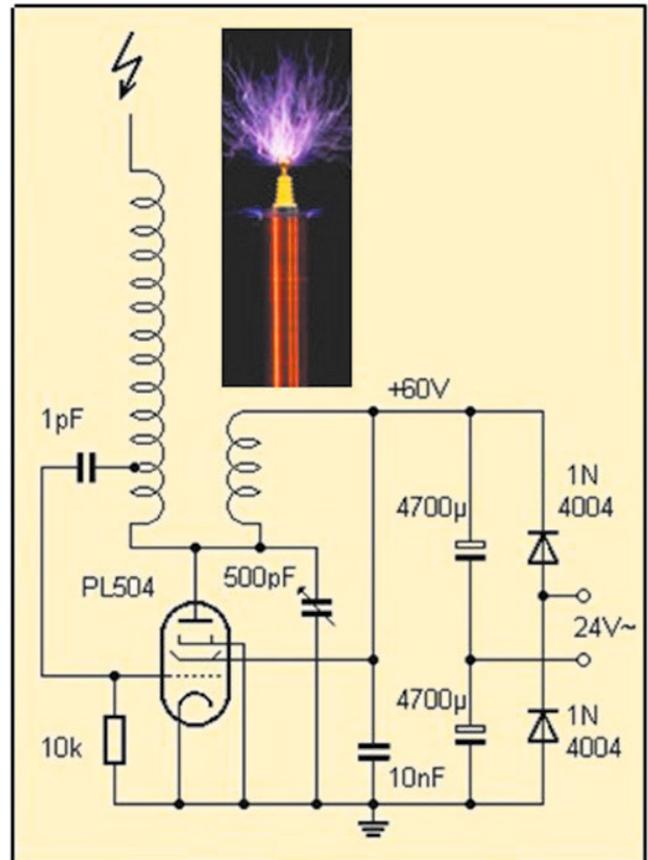
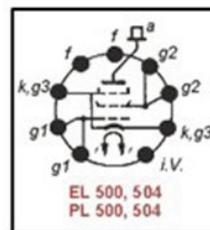


Bild 14: Kleiner Zweikreis-ECO-Kurzwellensender für das 80-m-Band mit einer HF-Nutzleistung von etwa 3 Watt (ECO = Electron Coupled Oscillator)

Bild 15: Tesla-Transformator mit einer Endpentode PL504 und NOVAL-Sockel. Die Anschlüsse sind dem Teilbild links unten zu entnehmen. Der Anodenanschluss befindet sich oben, getrennt von den übrigen Anschlüssen. Gespeist werden kann so ein Generator z. B. von einem Stecker-netzteil. Von der Teslaspule können imposante Lichtblitze austreten.



i Weitere Infos

- [1] Veit, I.: Ein Zweikreisempfänger für das 20-m-Band mit regelbarer Vorkreisentdämpfung, Funkamateurl, Heft 12/1959, S. 2–6
- [2] Rothammels Antennenbuch, DARC-Verlag, Baunatal, 12. erweiterte und aktualisierte Auflage, S. 727
- [3] Die Elektronenröhre als regelbare Induktivität und Kapazität
Funkschau, Heft 9 und 13, 1958 (auch: Funktechnische Arbeitsblätter, Ag 31)
- [4] Philippow, E.: Grundlagen der Elektrotechnik, Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Portig, Leipzig, 1959, S. 388–389
- [5] Springstein, K.-A.: Einführung in die Kurzwellen- und Ultrakurzwellen-Empfänger-Praxis
3. Auflage, 1955, Fachbuchverlag Leipzig, S. 109–115 und S. 286–288
- [6] Philippow, E.: Taschenbuch der Elektrotechnik, Band 3: Nachrichtentechnik, Verlag Technik Berlin, 1969, S. 1178–1179

Ihr Feedback zählt!

Das ELVjournal steht seit 40 Jahren für selbst entwickelte, qualitativ hochwertige Bausätze und Hintergrundartikel zu verschiedenen Technik-Themen. Aus den Elektronik-Entwicklungen des ELVjournals sind viele Geräte im Smart Home Bereich hervorgegangen. Wir möchten uns für Sie, liebe Leser, ständig weiterentwickeln und benötigen daher Ihre Rückmeldung:

Was gefällt Ihnen besonders gut am ELVjournal? Welche Themen lesen Sie gerne?
Welche Wünsche bezüglich Bausätzen und Technik-Wissen haben Sie?
Was können wir in Zukunft für Sie besser machen?

Senden Sie Ihr Feedback an:



redaktion@elvjournal.com



ELV Elektronik AG
Redaktion ELVjournal
Maiburger Str. 29-36
26789 Leer

Vorab schon einmal vielen Dank vom Team des ELVjournals.