

Elektronenröhren

Ein Rückblick auf die Anfänge der Elektronik

Teil 2

Im ersten Teil dieser Beitragsreihe wurden die allgemeinen Grundlagen der Elektronenröhren behandelt. Erwähnt und erläutert wurden die barkhausensche Röhrenformel, die Unterschiede zwischen Trioden, Pentoden und anderen Mehrgitterröhren. Teil 2 widmet sich den verschiedenen Ausführungen von Röhren, ihren Anschlüssen (Röhrensockel), den Stahlröhren, Katodenstrahlröhren (Bildröhren), der Hochspannungserzeugung und dem Thema Verzerrungen bei Röhren im Vergleich zu Transistoren.

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



Kenndaten

Wir beginnen mit den wichtigsten Kenndaten von Elektronenröhren. Das sind zunächst ihre Typenbezeichnungen, Strom- und Spannungswerte, die Abmessungen und der Verwendungszweck sowie die Anschlusssockel. Bild 1 zeigt eine zunächst wahllose Auflistung von Röhren, gestaffelt nach ihren Heizspannungen.

Ganz zu Beginn stehen dort direkt geheizte Niederspannungs-Subminiaturröhren, wie sie seinerzeit hauptsächlich für den Einsatz in Hörhilfen zur Anwendung kamen (Bild 2). Die Röhre DF 67, die in Vorverstärkerstufen verwendet wurde, hatte eine Heizspannung von nur 0,625 V. Von zwei derartigen Röhren wurden in aller Regel die Heizfäden in Reihe geschaltet, sodass sie zusammen mit der Endröhre DL 67 an eine gemeinsame 1,25-Volt-Speisequelle angeschlossen werden konnten. Direkt geheizte Röhren können zwar auch mit Wechselstrom geheizt werden, das hat aber Nachteile, sodass es selten erfolgte.

Mit dem Buchstaben D wurden damals generell Subminiaturröhren gekennzeichnet. Dieser Röhrentyp besaß eine direkt geheizte Katode. Bei direkt geheizten Röhren liegt die Katode auf Massepotential. Damit ist eine automatische Gittervorspannungs-Erzeugung nicht möglich. Die Heizung mit Wechselstrom zu betreiben ist bei direkt geheizten Röhren zwar möglich, hat aber Nachteile und geschah daher nur selten.

Bei Röhren mit direkter Heizung wurde gelegentlich ein spezieller Effekt beobachtet, der sogenannte Mikrofonie-Effekt. Dieser Effekt äußert sich gelegentlich in Form einer akustischen Rückkopplung zwischen dem schallabstrahlenden Lautsprecher und dem Röhrensystem. Das Mitschwingen des dünnen Heizfadens spielt dabei eine wichtige Rolle. Um dem entgegenzuwirken, hat man bei der D 96er Serie den Heizfaden schon in der Mitte unterstützt.

Der nächste Röhrentyp im Bild 1 beginnt mit dem Buchstaben A als Kennzeichnung für eine mit 4 Volt indirekt geheizte Röhre. Weitere indirekt mit 4 Volt geheizte Röhren sind z. B.

- AD1(Triode), AF 7(Pentode), AL 4 (Pentode), AK 2 (Oktode), AZ1(Doppeldiode, zur Zweiweg-Gleichrichtung) etc.

Die AF 7 war eine HF-Pentode mit Abmessungen von ca. 10 x 4 cm (H x Ø), die ab 1935 viel verwendet wurde, z. B. im Volksempfänger VE 301. Sie hatte einen Außenkontakt für das Steuergitter G1, das meist über eine abgeschirmte Gitterkappe (Bild 3) angeschlossen war, um dadurch Brumm-Einstreuungen vorzubeugen.

Auf die A-Röhren folgte die Röhrenserie, deren Bezeichnung mit dem Buchstaben E begann (EF 12, EF 14 ... EF 86, EL 84, Bild 4). Ihre Heizspannung betrug 6,3 Volt. Mit dieser Spannung wurden die meisten Röhren jener Zeit geheizt. Diese Heizspannung dominierte die Jahre nach dem Krieg bis zu der Zeit, als die Elektronenröhren Schritt für Schritt von der Halbleitertechnik, d. h. von den Transistoren, abgelöst wurden.



Bild 3: HF-Pentode AF 7(1935) mit Außenkontakt für das Steuergitter G1.



Bild 4: Vorverstärkerpentode EF 86 und Endpentode EL 84.

$U_{Heiz} = 0,625 \text{ V}$, z. B. bei der Röhre	DF 67
1,25 V		DL 67
4,0 V		AF 7
6,3 V		EF 86, 6AC7
12,6 V		RL12 P35

Bild 1: Überblick über die bei Elektronenröhren normalerweise üblichen, standardisierten Heizspannungen. Bei batteriebetriebenen Rundfunkgeräten betrug die Heizspannung generell 1,25 Volt. Damit wurde die Endröhre (DL 67) geheizt.

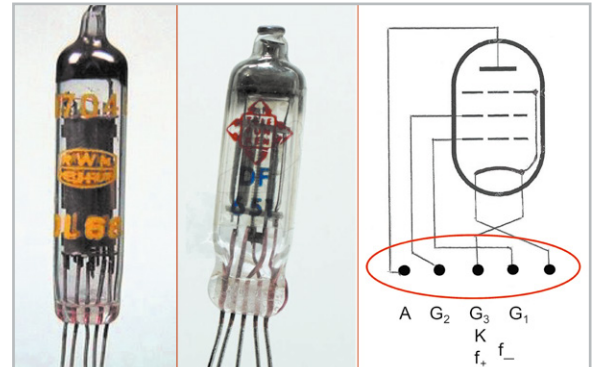


Bild 2: Direkt geheizte Niederspannungs-Subminiaturröhren vom Typ DF 67, DL 67, DF 651 etc. für den Batteriebetrieb. Bei direkt geheizten Elektronenröhren liegt die Katode auf Massepotential. Eine automatische Gittervorspannungs-Erzeugung, wie das bei anderen Röhren normalerweise geschieht, ist hier daher nicht möglich.

Bezüglich der Heizspannung gab es einen weiteren, noch höheren Wert, nämlich 12,6 Volt, z. B. bei der Röhre RL12 P35, siehe Bild 5. Diese Röhre, eine Pentode, war ein Überbleibsel aus den früheren Wehrmachtsbeständen. Aufgrund ihrer besonderen Daten (Anodenspannung: 600 V-max. 800 V (!), Sendeleistung: 35 W) war diese Röhre, insbesondere in den 1950er Jahren, sehr beliebt bei Kurzwellenamateuren für den Aufbau ihrer KW-Sender. Einer der beiden Außenanschlüsse oben auf der Röhre gehört zur Anode, die eine sehr hohe Spannung führt.

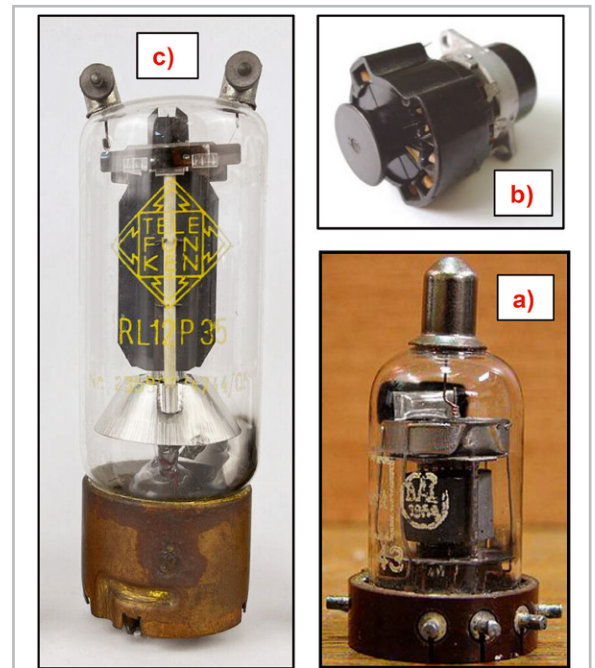


Bild 5: Pentode RV12 P 2000 (a) und RL12 P35 (c). Mit der RV12P 2000 wurden erste Rundfunkempfänger gebaut, und sogar eines der ersten röhrenbestückten Hörgeräte (Siemens Phonophor-Super, [5]) kam 1948 mit dieser Röhre auf den Markt. Für die P2000 gab es eine eigens für sie geschaffene Fassung (b). Die RL12 P35 kam bei Kurzwellenamateuren beim Aufbau ihrer Sender zum Einsatz.

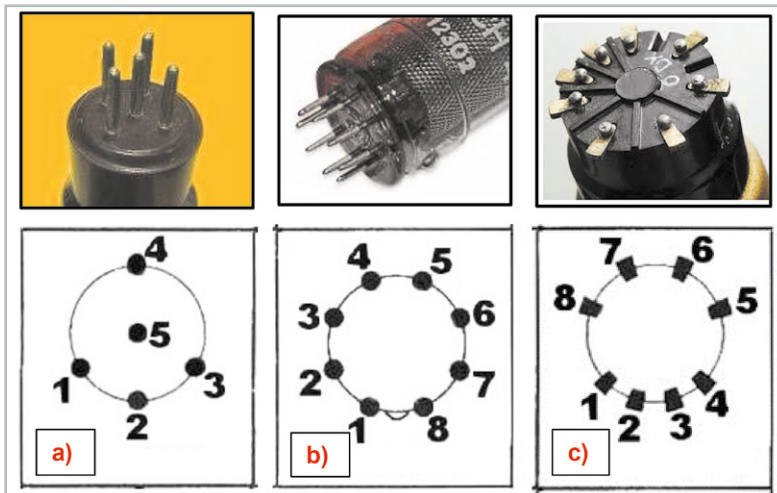


Bild 6: Sockelanschlüsse älterer Röhrentypen: a) 5-Stift-Europa-Sockel, b) Rimlock-Röhre, c) Außenkontaktzöhre, 8-polig

Bleibt nur noch ein Blick auf das Thema Anschlusssockel. Davon gab es eine Fülle. Bild 6 zeigt eine ganz kleine Auswahl. Mit dem dort im Bildteil c) dargestellten 8-poligen Außenkontaktsockel waren beispielsweise alle A-Röhren, d. h. AF 7, AL 4 etc., ausgestattet. Der im Bildteil b) abgebildete und etwa Anfang der 1950er-Jahre entwickelte Rimlock-Sockel bildete den Anfang der nachfolgenden Pressglassockel (Bild 7), z. B. der EF-, EL-Röhrenreihe, die bis zum Auslauf des Röhreneinsatzes Bestand hatte. In den USA gab es andere Sockel wie z. B. bei der Stahlröhre 6AC7.

Stahlröhren

Unter Stahlröhren versteht man Elektronenröhren, deren Kolben aus lackiertem Stahl bestand (Bild 8). Die erste Röhre dieser Art brachte Telefunken 1937 in Deutschland auf den Markt. Bemerkenswert an dieser Röhre ist außer dem Stahlkolben, der sie auch gegenüber Störfeldern gut abschirmt, dass der Systemaufbau in ihr waagrecht liegt und somit stabiler gelagert ist. Auch in den USA gab es zu jener Zeit bereits Stahlröhren, siehe z. B. den Bildteil c).

Später kehrte man aus vielerlei Gründen wieder zur Glaskolbentechnik zurück. Das Röhrenwerk Ulm von Telefunken baute ab dem Jahr 1948 diesen Röhrentyp wieder in Glaskolbentechnik, d. h. Stahlröhrensockel mit Glaskolben und aufgebracht Metallisierung.

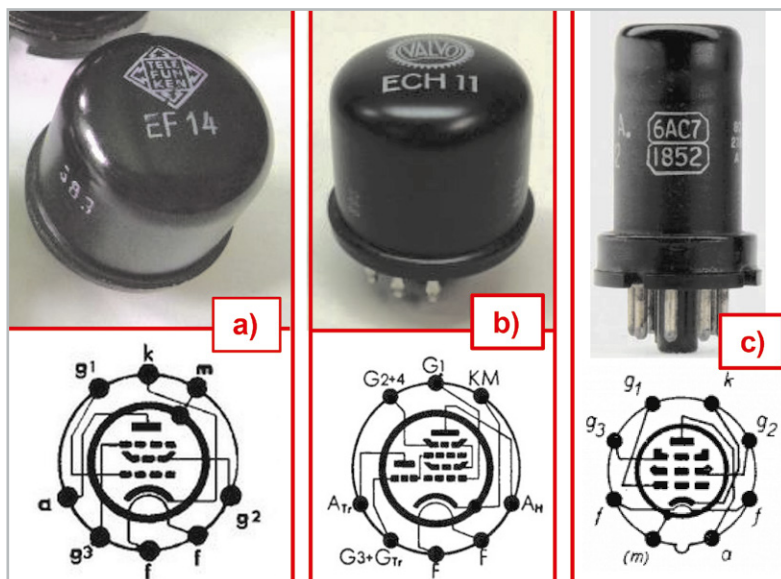


Bild 8: Stahlröhren und ihre Sockelanschlüsse: a) EF 14 Pentode, b) ECH 11 Triode/Pentode, c) 6AC 7 Pentode(USA)

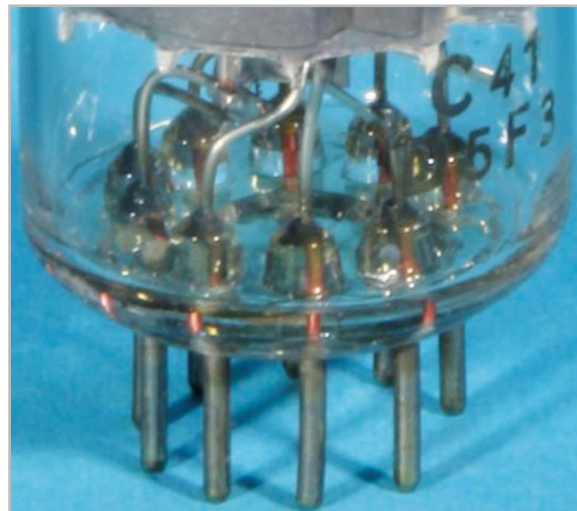


Bild 7: Pressglassockel

Bildröhren

Neben den bislang genannten Röhren, die zur Gleichrichtung oder zur Verstärkung verwendet wurden, gab bzw. gibt es auch noch eine andere Röhrenkategorie, nämlich zur Bilddarstellung. Das waren bzw. sind die braunsche Röhre oder Katodenstrahlröhre, wie sie in jedem älteren Oszilloskop als Bildröhre anzutreffen ist, siehe Bild 9a) und b). Das gleiche gilt natürlich auch für die Bildröhren in älteren Fernsehgeräten. Auch das waren Elektronenröhren [1].

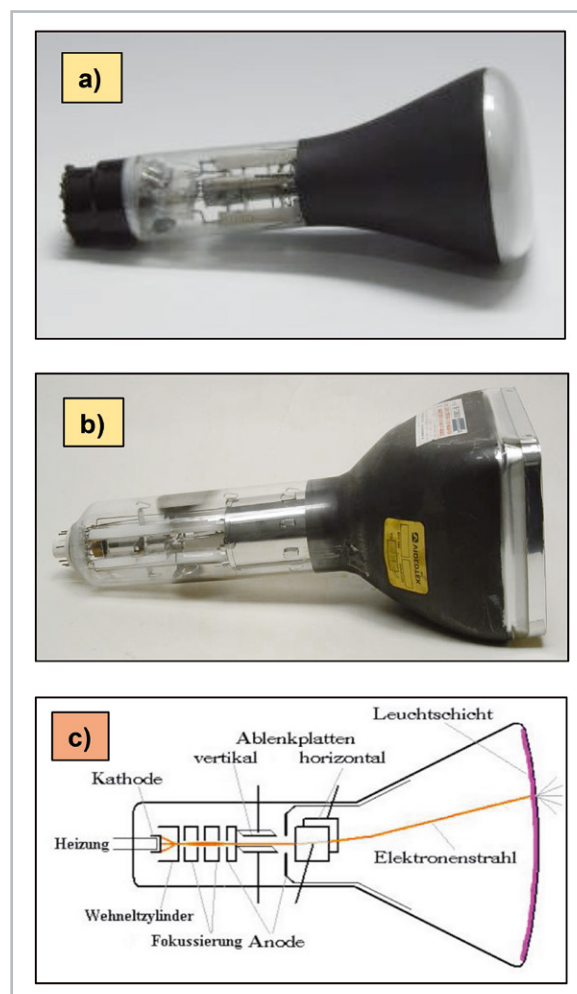


Bild 9: Katodenstrahlröhren (braunsche Röhre)

Bei der Bildröhre werden genauso wie bei jeder anderen Elektronenröhre von einer Glühkatode Elektronen erzeugt und in den hoch-evakuierten Röhreninnenraum entlassen, wo sie von der positiv vorge-spannten Anode angezogen und beschleunigt werden. Die Glühkatode ihrerseits ist von einem zylindrischen Metallkörper mit einem Loch in der Mitte, dem Wehneltzylinder, umgeben, siehe Bild 9c).

Am Wehneltzylinder liegt eine negative Spannung an. Dadurch werden die freien Elektronen von den Innenwänden des Zylinders abgestoßen und zu einem konzentrischen Bündel in der Zylindermitte geformt. Je höher die negative Spannung ist, umso enger werden die Elektro-nen gebündelt und desto heller wird auch der Punkt, den der Elektro-nenstrahl nach dem Durchlaufen der Strecke bis zur fluoreszierenden Schicht auf dem Bildschirm erzeugt. Beschleunigt werden die Elektro-nen durch eine positive Spannung, die an einer ringförmigen Anode an-liegt. Damit der Elektronenstrahl nicht nur einen Punkt, sondern ganze Bilder auf dem Bildschirm schreiben kann, besitzt die Röhre zwei Paare von Ablenkplatten, das eine für die horizontale und das andere für die vertikale Ablenkung. Ähnlich funktionierten auch die Bildröhren früherer Fernsehgeräte, nur dass dort die Strahlablenkung elektromagne-tisch mithilfe von Ablenkspulen erfolgte (Bild 10).

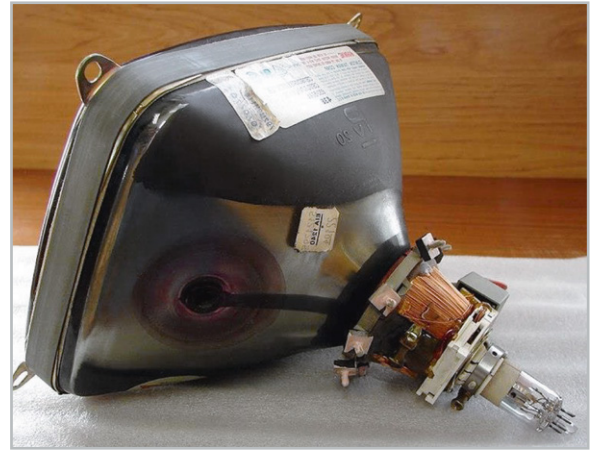


Bild 10: TV-Bildröhre mit magnetischer Ablenkung

Erzeugung hoher Gleichspannungen mithilfe von Röhrendioden

Zur Erzeugung sehr hoher Gleichspannungen, beispielsweise um Elek-tronen in Röhren zu beschleunigen oder um elektronenoptische Gerä-te damit zu versorgen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine sehr einfache davon ist die Verwendung von Vervielfacher-Schaltungen [2]. Unter Zuhilfenahme von Gleichrichtern können ganze Kaskaden von Kondensatoren aufgeladen werden, deren Reihenschaltung zum ge-wünschten Ergebnis führt (siehe Bild 11a).

Anstelle von Gleichrichtern können auch Röhrendioden verwendet werden, insbesondere dann, wenn es sich um sehr hohe Spannungen handelt. Bei Spannungen von mehreren zig kV wurden solche Anord-

nungen aus Sicherheitsgründen sogar in Metalltanks untergebracht, die mit Transformatorenöl [2] gefüllt sind (Bild 11b). In diesem Arbeitsbereich (≥ 40 kV) werden die Dioden oft auch als „Ventile“ bezeichnet, da sie je nach Halbwelle die eine oder andere Kon-densatorreihe aufladen.

Die im Bild 11b dargestellte Schaltung verfügt zusätzlich zur Hochspannungserzeugung über eine automatische Spannungskonstanthaltung, siehe dazu die an der Widerstandskette am Ausgang ab-genommene Regelspannung. Die hier verwendete Generatorfrequenz beträgt 800 Hz [2] – das erlaubt die Verwendung kleinerer Abmessungen für die Übertrager. Die mit diesem Hochspannungsgenera-tor erzeugte Hochspannung beträgt 40 kV (maximal: 50 kV) bei $I_{max} = 100 \mu A$.

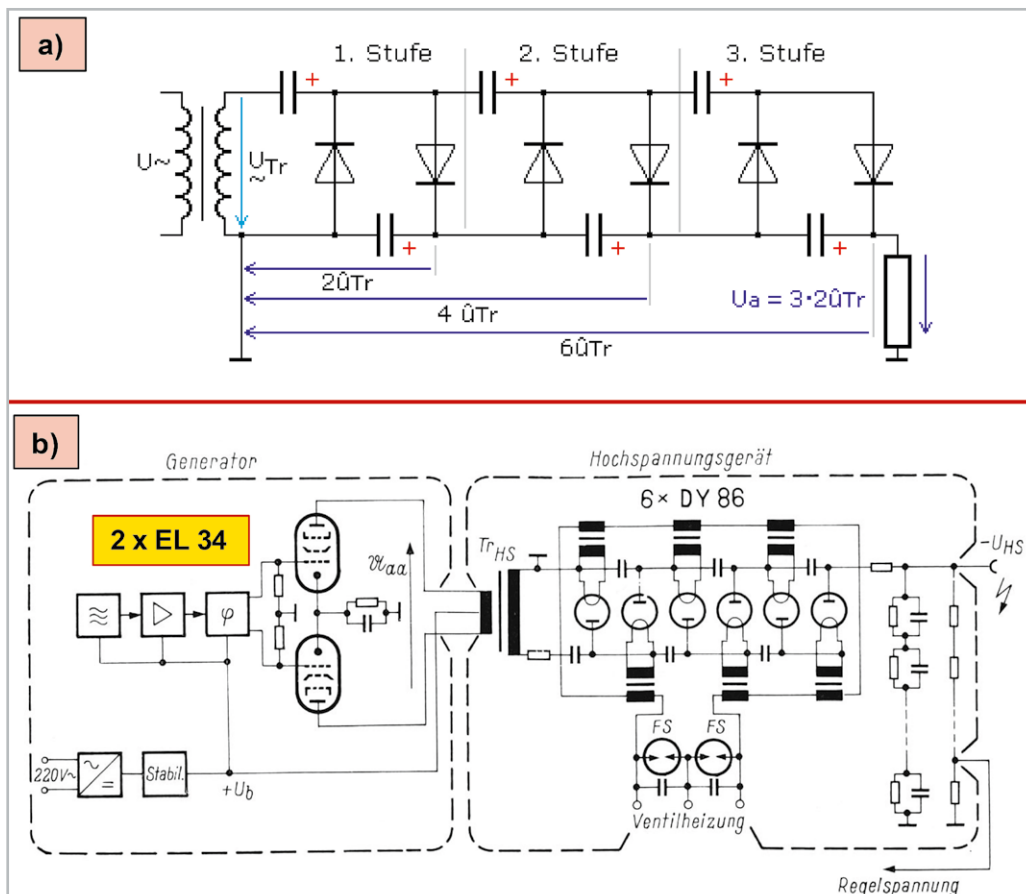


Bild 11: Spannungs-Vervielfacher-schaltung zur Erzeugung sehr hoher Gleichspannungen:
a) mit einfachen Dioden
b) mit Röhrendioden am Ausgang eines Hochspannungsgenerators für Ausgangsspannungen bis zu 40 kV, maximal: 50 kV bei $I_{max} = 100 \mu A$



Bild 12: Hochspannungs-Gleichrichterdioden, Heizspannung: 1,4 V, Heizstrom: 530 mA
Links: DY 51 (älterer Röhrentyp; $U_{\text{Sperr}} = 15 \text{ kV}$), Rechts: DY 86 ($U_{\text{Sperr}} = 20 \text{ kV}$)

Die hier verwendeten Gleichrichterdiolen DY 86 werden, wie alle Röhren vom D-Typ, mit $U_H = 1,4 \text{ Volt}$ geheizt (Bild 12). Der Heizstrom beträgt $I_H = 530 \text{ mA}$. Diese Röhre wurde seinerzeit u. A. zur Gleichrichtung der Zeilenrücklauf-Impulse in Fernsehgeräten verwendet. Die Heizung geschieht indirekt, wobei die Katode im Röhreninneren mit einem Ende des Heizfadens verbunden ist.

Die linke Darstellung zeigt einen älteren Röhrentyp: DY 51, mit dem ähnliche Hochspannungsgeneratoren gebaut wurden. Die Anodenspitzenspannung beträgt hier maximal 15 kV in der Sperrphase. Bei der DY 86 lag dieser Wert bei 20 bzw. 24 kV.

Elektronenröhren und Verzerrungen

Bei Diskussionen – Röhren kontra Transistoren – hört man gelegentlich, dass sich Übertragungen mit Röhrenverstärkern angenehmer anhören als mit Transistorverstärkern. Es gibt sogar namhafte Unternehmen, die derartige Verstärker im Hochpreissegment wieder auf den Markt bringen. Nachfolgend wird versucht zu klären, was es damit auf sich hat.

Tatsache ist, dass Transistoren bei großen Lautstärken, bedingt durch eine symmetrische Kennlinie, nichtlineare Verzerrungen mit kubischem Klirrfaktor ($k_3, k_5, k_7 \dots$) erzeugen, siehe Bild 13, während Röhrenverstärker, vor allem Trioden, nichtlineare Verzerrungen mit quadratischem Klirrfaktor (k_2, k_4, k_6) produzieren, die geradzahlige Harmonische zur Folge haben [3]. Kubische Verzerrungen äußern sich durch Nulldurchgangsverzerrungen, auf die unser Ohr aber sehr empfindlich reagiert.

Am besten lässt sich das über die Verständlichkeit von Sprache beschreiben, die quantitativ am besten über die Messung der Satz-, Wort- und Silbenverständlichkeit festgestellt werden kann. Am deutlichsten kommt dieser Effekt durch die Bestimmung der Silbenverständlichkeit zum Ausdruck, siehe Bild 14. Der Unterschied zwischen der Verständlichkeit von Silben bei einer Begrenzung der Amplituden und bei einer Störung der Nulldurchgänge ist sehr groß. Übrigens können Nulldurchgangsverzerrungen auch bei schlecht dimensionierten AB-Gegentaktendstufen entstehen.

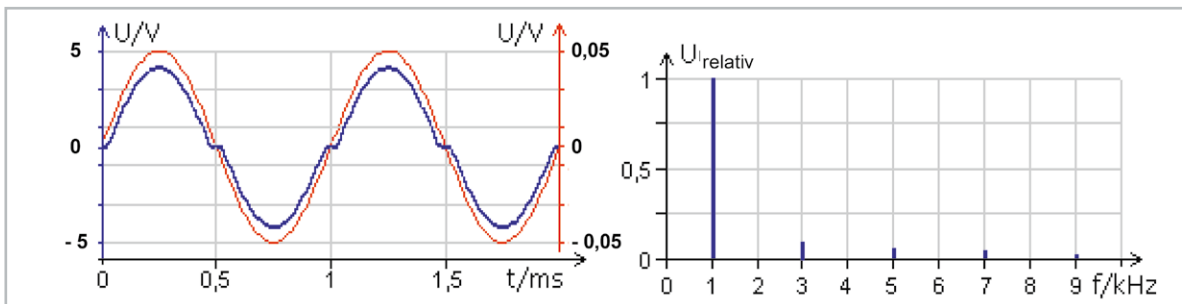


Bild 13: Nulldurchgangsverzerrungen, hervorgerufen durch eine kubische Kennlinie, die im Ausgangssignal eine Folge von ungeradzahligen Harmonischen ($k_3, k_5, k_7 \dots$) enthält. — Eingangssignal — Ausgangssignal

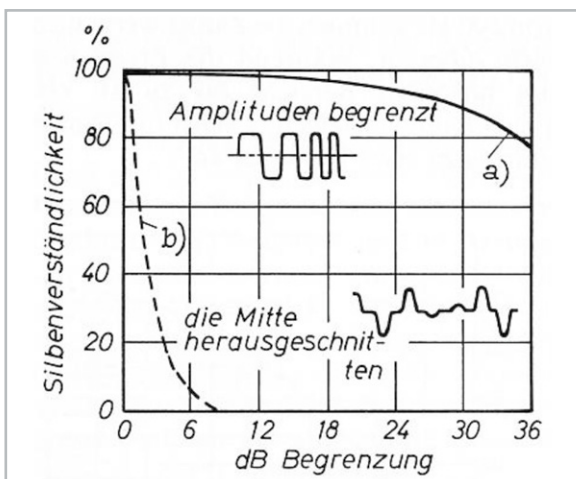


Bild 14: Abhängigkeit der Silbenverständlichkeit elektroakustisch übertragener Sprache vom Grad und der Art der Verzerrungen
a) bei einer Amplitudenbegrenzung
b) bei einer Verzerrung der Nulldurchgänge

Sprachverständlichkeit

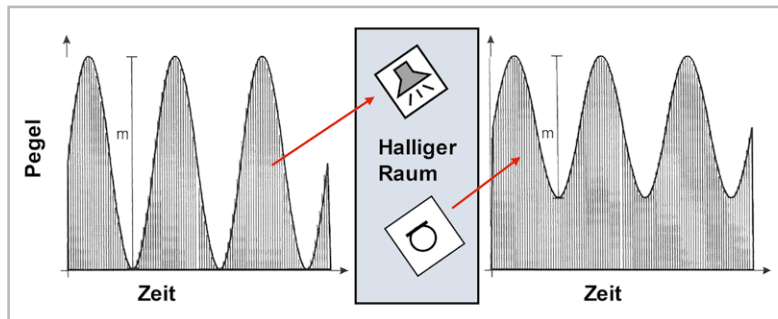
Der Einfluss von Verzerrungen auf die elektroakustische Übertragung von Sprache kann, wie im vorigen Abschnitt schon erwähnt, mit genau definierten subjektiven Tests über die Verständlichkeit von gesprochenen Sätzen, Wörtern oder auch Silben erfolgen [4].

Es gibt aber auch objektive Verfahren, die ohne Zutun von Versuchspersonen funktionieren. Das sind der STI- (Speech-Transmissions-Test) und der RASTI-Test (Rapid-Speech-Transmissions-Test).

Beim STI-Test werden Rauschsignale (rosa Rauschen) stellvertretend für die menschliche Stimme verwendet, die nacheinander in sieben aufeinander folgenden Oktavbändern mit Mittenfrequenzen zwischen 125 Hz und 8 kHz von einem Lautsprecher abgestrahlt werden. Die Prüfsignale werden in jedem dieser Bänder mit zwei verschiedenen Frequenzen

amplitudenmoduliert, und zwar mit einer Modulations-Übertragungsfunktion vom $m = 1,0$. Das an den einzelnen Plätzen eines Raumes empfangene Signal wird hinsichtlich seiner dort noch vorhandenen Modulations-Übertragungsfunktion ($m \leq 1$) analysiert. Aus dem Ergebnis erhält man den Verlust an Modulationstiefe (Bild 15) und somit eine objektive Aussage über die Höhe der Sprachverständlichkeit am jeweiligen Messort. Zahlenmäßig geschieht das in Form des sogenannten STI-Werts (Speech-Transmissions-Index) gemäß DIN-IEC 60268. Dieser Index kann Werte zwischen 0 (= weitgehend unverständlich) und 1 (= ausgezeichnete Verständlichkeit) erreichen. Für die Messung gibt es spezielle Messgeräte, siehe Bild 16.

Bild 15: Messung der Sprachverständlichkeit STI in einem halligen Raum. Aus der Messung des Verlusts an Modulationstiefe wird der STI-Wert ermittelt.



Ausblick

Im nächsten Teil zu den Grundlagen der Elektronenröhren werden besonders interessante Schaltungen gezeigt und erläutert, wie z. B. der Wienbrücken-Generator, Multivibratoren, Tongeneratoren, Audion- und Pendelaudion-Schaltungen, Phasenumkehrstufen, ein elektronisch stabilisiertes Netzteil und weitere Schaltungen. **ELV**



Bild 16: Direkte Messung der Sprachverständlichkeit STI-PA (gemäß IEC 60268-16). Auf dem Display des Messgeräts wird gerade ein Messwert von 0,71 STI angezeigt, wobei der Schalldruckpegel SPL während der Messung 76,5 dB(A) betrug. Auf der unteren Skala erkennt man zusätzlich noch die Bewertung: BAD - POOR - FAIR - GOOD - EXCELLENT. Der Messwert 0,71 wird dort als „excellent“ bewertet. (Werkfoto: Schalltechnik Süd, Regensburg)

i Weitere Infos

- [1] Czech, J.: Oszillographen, S. 23, S. 61, Hochspannung EY 51 Diodenkaskaden
- [2] Veit, I.: Ein elektronisch stabilisiertes 40-kV-Gerät für elektronenoptische Zwecke, ELEKTRONIK, 1962, Nr. 10. S. 295–299
- [3] Sengpiel, Berlin: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-harmonische.htm>
- [4] Veit, I.: Sprachverständlichkeitstests im Allgemeinen und deren Bedeutung für die Beurteilung von Hörstörungen im Besonderen, Hörakustik (2014), Nr. 2, S. 8–12
- [5] Veit, I.: Hörgeräte-Elektronik – Von der Elektronenröhre über den integrierten Schaltkreis bis zur Digitaltechnik, ELVjournal 6/2021, S. 80–87: Artikel-Nr. 252348

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 auch viele Geräte aus dem 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.