

III. Mehrgitterröhren

1. Schirmgitterröhren (Tetroden)

Für die Verstärkung einer Röhre sind zwei Größen maßgebend, nämlich der Durchgriff D und die Steilheit S . Um eine große Verstärkung zu erreichen, muß der Durchgriff möglichst klein und die Steilheit möglichst groß sein. Je kleiner D ist, desto geringer ist die Anodenrückwirkung, desto größer die resultierende Steuerspannung $U_{a\sim}$. Je größer S ist, desto größer wird $I_{a\sim}$. Nach Gl. (36) stellt S/D die Güte einer Röhre hinsichtlich der Leistungsverstärkung dar.

Durch die Erfindung der Schirmgitterröhre wurde es möglich, die eine dieser beiden Größen, nämlich den Durchgriff, zu verringern, ohne gleichzeitig die Steilheit zu verschlechtern. Bei dieser Röhre, deren Schema und Schaltungsprinzip im Bild 54

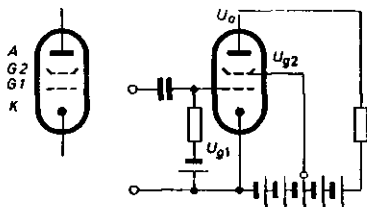


Bild 54. Schaltschema und Schaltungsprinzip einer Schirmgitterröhre.
G1 Steuergitter; G2 Schirmgitter

angegeben sind, ist zwischen Anode und Steuergitter $G1$ ein weiteres Gitter $G2$ eingeschoben. Es erhält eine konstante positive Spannung U_{g2} . Durch das neue Gitter wird die Rückwirkung der Anodenwechselfspannung auf die Steuerung wesentlich verringert. Das Gitter $G2$ schirmt die Anode gegenüber dem Steuergitter ab. Die Anode muß gewissermaßen sowohl durch die Gittermaschen des Schirmgitters als auch durch die des Steuergitters hindurchgreifen, ehe sie im Steuerraum wirksam werden kann. Durch die Ausschaltung der Anodenrückwirkung wird die Verstärkung der Röhre erhöht. Für die resultierende Steuerspannung kann man ansetzen

$$U_{a\sim} = U_{g1} + D_1 U_{g2} + D_1 \cdot D_2 U_a$$

D_1 kennzeichnet den Durchgriff des Schirmgitters durch das Gitter $G1$ und D_2 den Durchgriff der Anode durch das Schirmgitter $G2$. Der resultierende Durchgriff der Anode $D = D_1 \cdot D_2$ kann leicht auf 0,01 gesenkt werden. Damit wird gleichzeitig auch die Gitter/Anoden-Kapazität (wichtig für die Eingangskapazität $C_{a\sim}$) auf wenige 10^{-3} pF heruntergedrückt.

Der Innenwiderstand R_i der Schirmgitterröhren steigt durch diese Maßnahme stark an; denn dadurch, daß man der Anodenspannung ihren Einfluß auf die Größe des Anodenstromes nimmt – er wird im wesentlichen durch U_{g1} und U_{g2} bestimmt –, ändert sich I_a nur wenig mit U_a . Selbst bei großer Anodenspannungsänderung ΔU_a tritt nur eine kleine Stromänderung ΔI_a auf. Infolgedessen ist R_i , das Verhältnis

$\Delta U_a / \Delta I_a$, sehr groß. Hohe Innenwiderstände sind günstig, wenn im Anodenkreis ein Parallelschwingkreis liegt. Durch das hohe R_i wird der Schwingkreis nur wenig bedämpft. Dem Schirmgitter muß eine konstante Spannung erteilt werden; es darf beispielsweise in seiner Zuleitung kein Widerstand liegen, der nicht durch einen großen Kondensator überbrückt ist, weil sonst der Schirmgitterwechselstrom an dem Widerstand eine Wechselspannung aufbauen würde, die genauso wie die Anodenwechselspannung in Gegenphase zur Gitterwechselspannung liegen und die resultierende Steuerwechselspannung schwächen würde.

2. Raumladeröhren

Raumladeröhren sind ebenfalls 4-Elektroden-Röhren. Während jedoch bei der Schirmgitterröhre die Verstärkung durch Verringerung des Durchgriffs angehoben wird, wird sie hier durch die Vergrößerung der Steilheit verbessert. Bei der Raumladeröhre ist in der Nähe der Katode, also im Raumladegebiet, ein auf geringer positiver Spannung liegendes Gitter angebracht. Dieses sogenannte Raumladegitter hilft, die Raumladewolke zu zerstreuen. Es erhöht den insgesamt emittierten Elektronenstrom, so daß bei gleicher Gitterwechselspannung ein größerer Anodenwechselstrom fließt. Das ist aber nach $S = \partial I_a / \partial U_g$, gleichbedeutend mit einer Vergrößerung der Steilheit.

Raumladegitterröhren haben den Vorteil, größere Anodenströme bei kleinen Anodenspannungen zu liefern. Durch eine genügende Weitmaschigkeit des Raumladegitters wird erreicht, daß trotz der positiven Spannung des Raumladegitters der Hauptteil des Emissionsstromes zur Anode und nur ein geringer Teil zum Raumladegitter fließt.

3. Sekundärelektroneneffekt

Nimmt man für eine bestimmte Vorspannung des Steuergitters $G1$ die Kennlinien einer Schirmgitterröhre in Abhängigkeit von der Anodenspannung auf, hat man drei Ströme zu unterscheiden: den Anodenstrom I_a , den Schirmgitterstrom I_{g2} und den Gesamtstrom I_e , der auch Katodenstrom I_k genannt wird, da er gleich dem in der Katodenleitung fließenden Strom ist. Alle drei Ströme sind im Bild 55 eingetragen. Der Gesamtstrom hat bereits bei ganz kleinen Anodenspannungen fast seinen Endwert erreicht. Er wird ja in der Hauptsache nur von der Vorspannung des Steuergitters und der Schirmgitterspannung U_{g2} bestimmt und ist wegen des geringen Durchgriffs und Eingriffs der Anode in die Steuervorgänge weitgehend unabhängig von U_a . Der Emissionsstrom I_e teilt sich in den eigentlichen Anodenstrom I_a und den Schirmgitterstrom I_{g2} auf. Ist die Anodenspannung Null, so wird der gesamte Elektronenschwarm zum positiven Schirmgitter gezogen. Es ist $I_a = 0$ und $I_{g2} = I_e$. Steigt U_a von Null aus an, so ändert sich das Bild sehr schnell. Die Feldverteilung und die Auffangflächen von Anode und Schirmgitter sind so ausgelegt, daß schon bei ganz geringen Anodenspannungen ein großer Teil

des Elektronenstromes zur Anode hinüberwechselt. Man erkennt dies im Schaubild (Bild 55) an dem steilen Anstieg der I_a - und dem steilen Abfall der I_{g2} -Kennlinie im Bereich von $U_a = 0 \dots 10$ V.

Bei etwa 10 V Anodenspannung tritt in der Röhre ein Effekt auf, der bereits im Abschnitt A.I.1. b) bei der Behandlung des Elektronenaustritts aus Metallen erwähnt wurde. Es wurde dort darauf hingewiesen, daß unter bestimmten Umständen

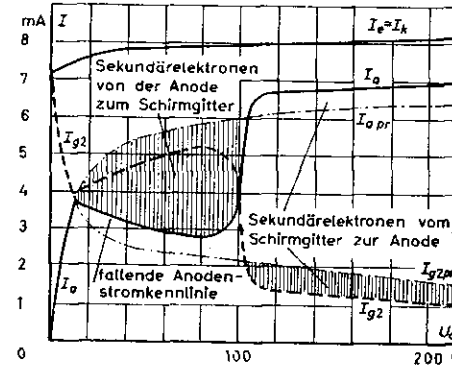


Bild 55. Einfluß der Sekundärelektronenemission auf den Kennlinienverlauf einer Schirmgitterröhre (U_{g2} konstant, beispielsweise = 100 V)

beim Aufprallen von Elektronen auf eine kalte Elektrode aus ihr andere Elektronen herausgeschlagen werden. Versuche haben gezeigt, daß eine Emission solcher „Sekundärelektronen“ immer dann eintritt, wenn die Primärelektronen eine Geschwindigkeit von mehr als „10 V“ haben. Die Primärelektronen übertragen in diesem Fall bei ihrem Aufprall eine so große kinetische Energie auf die Elektronen des Anodenbleches, daß sie zur Überwindung der Austrittsarbeit befähigt werden. Die Anzahl der Sekundärelektronen kann bei schrägem Auftreffen der primären Elektronen größer als bei senkrechtem Aufschlagen und ein Vielfaches der Primärelektronen sein.

Solange das Anodenpotential höher ist als das des Schirmgitters, stören die Sekundärelektronen nicht, da sie alle wieder auf die Anode zurückgezogen werden. Hat aber das Schirmgitter ein positiveres Potential als die Anode, ist zum Beispiel $U_{g2} = 100$ V und liegt U_a zwischen 10 V und 100 V, so fliegen die Sekundärelektronen zum Schirmgitter hinüber. Wie im Bild 55 zu sehen ist, steigt dadurch der Schirmgitterstrom, obgleich er an sich die Tendenz hat abzunehmen, noch einmal stark an, während der Anodenstrom um das gleiche Maß zurückgeht.

Überhalb $U_a = 100$ V tritt das Umgekehrte ein. Hier werden die auf dem Schirmgitter losgelösten Sekundärelektronen vom Schirmgitter weg auf die stärker positive Anode abgezogen. Es wächst I_a , wie ebenfalls im Bild 55 zu erkennen ist, über den Wert $I_{a,p}$ der Primärelektronen an, während I_{g2} um den gleichen Betrag zurückgeht.

Gleichspannungsmäßig kann durch Wahl einer niedrigen Schirmgitterspannung und einer genügend hohen Anodenspannung das kritische Gebiet mit dem fallenden Kennlinienast des Anodenstroms leicht umgangen werden. Damit läßt es sich jedoch nicht verhindern, daß bei großen Anodenwechselspannungen die momentane Anodenspannung $u_a = U_{a-} + \hat{u}_a \sin \omega t$ zeitweilig unter den Wert der Schirmgitterspannung sinkt und durch den Sekundärelektroneneffekt in diesen Zeitmomenten starke Verzerrungen der Anodenstromkurve hervorgerufen werden (Bild 56).

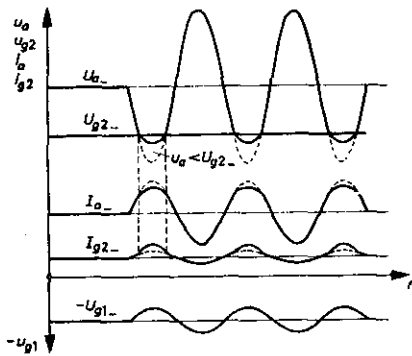


Bild 56. Verzerrungen des Anodenstroms einer Schirmgitterröhre in den Momenten, in denen $u_a < U_{g2}$ ist

Im Auftreten von Sekundärelektronen liegt der Nachteil, den die einfache Schirmgitterröhre bei größeren Anodenwechselspannungen hat. Abhilfe hiergegen kann nur dadurch geschaffen werden, daß man durch konstruktive Maßnahmen dafür sorgt, daß die in den kritischen Momenten entstehenden Sekundärelektronen keinen Weg zum Schirmgitter finden. Das Resultat entsprechender Röhrenentwicklungen sind die Pentode und die „Tetrode mit Elektronenbündelung“ (amerikanisch: beam-power-Röhre). Die Pentode benutzt ein weiteres Gitter, das sogenannte Bremsgitter. Die Tetrode mit Bündelung ist noch eine echte Tetrode mit vier Elektroden. Bei ihr hat man durch Vergrößerung des Abstandes zwischen Schirmgitter

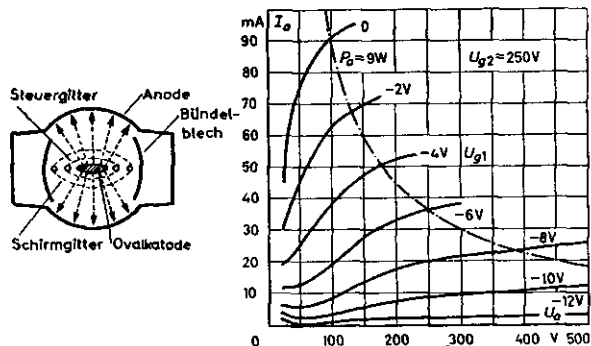


Bild 57. Elektrodenaufbau und Kennlinienfeld einer Tetrode mit Elektronenbündelung

und Anode sowie durch Bündelung des Elektronenstrahls durch seitliche Ablenkbleche eine starke negative Raumladung vor der Anode geschaffen. Die negative Raumladung bildet, jedenfalls bei größeren Anodenströmen, vor der Anode ein Potentialminimum, eine Potentialsenke, die die Sekundärelektronen wegen ihrer zu kleinen Geschwindigkeit nicht überfliegen können und durch die sie zurück zur Anode getrieben werden. Die Kennlinien von Tetroden mit Bündelung erhalten durch diese Maßnahmen Pentodencharakter. Tetroden werden heute noch als Endverstärkerröhren und in der Senderöhrentechnik verwendet. Bild 57 zeigt den Systemaufbau und das Kennlinienfeld solcher Röhren. Bei kleinen Anodenströmen ist wegen der geringen Wirkung der schwachen Raumladung der Einfluß der Sekundärelektronen noch zu erkennen. Bei großen Strömen mit ihrer starken Raumladung ist von dem Sekundärelektroneneffekt nichts mehr zu merken. Beim praktischen Einsatz müssen die Röhren in diesem Gebiet ausgesteuert werden.

Eine nützliche Anwendung finden die Sekundärelektronen in den „Sekundärelektronen-Vervielfachern“. Sie sind Elektronenröhren, in denen man mit Absicht eine möglichst große Anzahl von Sekundärelektronen dadurch erzeugt, daß man einen Elektronenstrom unter einem günstigen Winkel auf eine auf hoher positiver Spannung liegende Anode prallen läßt. Die Sekundärelektronen werden von einer anderen, noch höher vorgespannten Anode angezogen und veranlaßt, beim Aufprall auf sie eine nochmalig gesteigerte Anzahl von Sekundärelektronen loszuschlagen. Durch geschickte Mehrfachanordnung solcher stufenweise immer höher vorgespannten „Prallanoden“ läßt sich ein anfänglich sehr schwacher Elektronenstrom in starkem Maße vervielfachen. Derartige Vervielfacher werden zum Beispiel in bestimmten Fernsehbildaufnahmeröhren (Orthikon) verwendet, um die äußerst schwachen Photoströme der einzelnen Bildpunkte vorzuverstärken.

4. Pentoden (Fünfpolröhren)

Das Hinüberfliegen von Sekundärelektronen zum Schirmgitter kann verhindert werden, wenn zwischen Anode und Schirmgitter ein sogenanntes Bremsgitter angeordnet wird, dessen Spannung niedriger als die kleinste an der Anode vorkom-

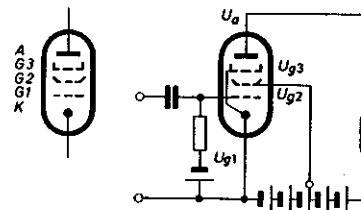


Bild 58. Schaltschema und Schaltungsprinzip einer Pentode.
G 1 Steuergitter;
G 2 Schirmgitter;
G 3 Bremsgitter

mende Spannung gewählt wird. Häufig wird das Bremsgitter, wie im Bild 58 rechts dargestellt ist, bereits innerhalb der Röhre mit der Katode verbunden. Es nimmt dadurch Katodenpotential und, wenn die Katode geerdet ist, Erdpotential an. Die Primärelektronen können wegen ihrer großen Geschwindigkeit ohne weiteres

das in der Umgebung des Bremsgitters geschaffene Potentialminimum überfliegen und auf der Anode landen. Die langsamen Sekundärelektronen dagegen sind nicht in der Lage, durch das Bremsgitter hindurch auf das davorliegende positivere Schirmgitter zu fliegen. Sie werden vom Bremsgitterfeld abgebremst und gegen die Anode zurückgetrieben.

a) Kennlinienverlauf

Bild 59 zeigt den grundsätzlichen Verlauf der Kennlinien einer Pentode. Er unterscheidet sich von dem der Tetroden dadurch, daß das Gebiet fallenden Anodenstromes nicht mehr vorhanden ist. Zum Kennlinienverlauf der Trioden haben die Kennlinien der Pentode keine Beziehung mehr. Sämtliche I_a/U_a -Kennlinien beginnen im Gegensatz zur Triode im Nullpunkt. Der Grund hierfür liegt darin, daß der Emissionsstrom der Pentoden im wesentlichen von der Schirmgitterspannung in Verbindung mit der Gitterspannung, aber wegen des geringen Durchgriffs nicht von der Anodenspannung bestimmt wird. Selbst bei $U_a = 0$ V fließt praktisch schon der volle Emissionsstrom I_e , allerdings noch nicht zur Anode, sondern zum Schirmgitter. In dem Maße, wie U_a von Null aus steigt, übernimmt die Anode wegen ihrer größeren Auffangfläche und der dadurch bedingten Potentialverteilung einen stetig steigenden Anteil des Gesamtstromes. Da dies für jede Gittervorspannung gilt, beginnen alle I_a -Kennlinien im Nullpunkt. Ein weiterer Unterschied gegenüber den Triodenkennlinien liegt darin, daß die Kennlinien der Pentoden, abgesehen vom anfänglichen Verteilungsgebiet, beinahe waagrecht verlaufen. Dies ist das deutlichste Zeichen dafür, daß die Anode durch das Bremsgitter und Schirmgitter fast vollständig gegenüber dem Steuerraum abgeschirmt ist und daher Änderungen und Schwankungen von U_a kaum noch einen Einfluß auf die Höhe des Anodenstromes ausüben.

b) Röhrenkonstanten

Ähnlich wie bei den Trioden werden auch bei den Mehrgitterröhren bestimmte Kennwerte zu Hilfe gezogen, um eine Röhrenschaltung in bezug auf ihre Verstärkungs- und Leistungseigenschaften rein rechnerisch erfassen zu können. Voraussetzung für die Anwendung solcher Kenngrößen ist auch hier, daß die Röhre nur so weit angesteuert wird, wie das Arbeitsfeld als geradlinig angesehen werden kann. Benutzt werden an sich dieselben charakteristischen Größen, wie Steilheit, Durchgriff und Innenwiderstand. Während jedoch bei Trioden der Durchgriff D eine große Rolle spielt und ihm gegenüber in den Formeln die Steilheit etwas zurücktritt, ist es bei den Mehrgitterröhren umgekehrt. Die Pentoden und Tetroden haben einen hohen Innenwiderstand. Im Vergleich zu ihm stellen die praktisch vorkommenden Außenwiderstände schon beinahe einen „Kurzschluß“ dar. Bei derartigen Betriebsverhältnissen gewinnt die Steilheit an Bedeutung, denn sie beschreibt gerade in der Nähe des Kurzschlusses die Strom- und Spannungsverhältnisse sehr gut. Der Durchgriff oder sein reziproker Wert μ charakterisiert die Verhältnisse bei Leerlauf oder in der Nähe des Leerlaufs übersichtlich. Diese Fälle können aber bei den Mehrgitterröhren praktisch nicht vorkommen.

Unter der Steilheit einer Mehrgitterröhre wird nach wie vor das Steigungsmaß der I_a/U_g -Kennlinie, also die Steuerwirkung des Steuergitters $G1$ auf den Anodenstrom, verstanden. Die übrigen Spannungen werden dabei als konstant vorausgesetzt. Es ist also, wenn man die Steilheit aus dem Kennlinienfeld abgreifen will, anzusetzen

$$S_1 = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{g1}} \left| \begin{array}{l} U_a = \text{konstant} \\ U_{g2} = \text{konstant} \\ U_{g3} = \text{konstant} \end{array} \right.$$

Hat eine Mehrgitterröhre, wie das zum Beispiel bei Mischröhren der Fall ist, mehrere Steuergitter, so gibt es neben der Steilheit S_1 des ersten Steuergitters noch die Steilheit S_n des n -ten Gitters.

Der Innenwiderstand einer Röhre ergibt sich aus der Änderung ΔI_a , die der Anodenstrom bei einer Änderung ΔU_a der Anodenspannung erfährt, zu

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \left| \begin{array}{l} U_{g1} = \text{konstant} \\ U_{g2} = \text{konstant} \\ U_{g3} = \text{konstant} \end{array} \right.$$

Er ist sehr groß, wie der flache Kennlinienverlauf im Bild 59 veranschaulicht. Hochfrequenzpentoden und Niederfrequenzpentoden haben Innenwiderstände in der Größenordnung von 0,5...2 MΩ. Bei Leistungspentoden geht R_i auf Werte um 40...80 kΩ herunter.

Die Begriffe Durchgriff D und Verstärkungsfaktor μ haben, wie schon ausgeführt wurde, bei Mehrgitterröhren an Bedeutung verloren. Sie kennzeichnen die Leerlauf-

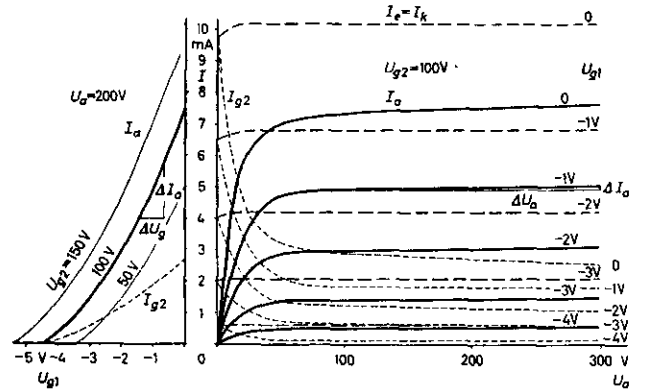


Bild 60. Kennlinienverlauf einer Pentode. Ausgezogene Kurven = Anodenstrom I_a ; kurzgestrichelte Kurven = Schirmgitterstrom I_{g2} ; langgestrichelte Kurven = Emissionsstrom I_e .

verstärkung einer Röhre. Da aber Pentoden nie mit einem Widerstand belastet werden können, der wesentlich größer als ihr Innenwiderstand ist, läßt sich diese Verstärkungszahl nie erreichen. Hinzu kommt, daß der Durchgriff in seiner Definition als Quotient $\Delta U_{g1}/\Delta U_a$ bei konstantem I_a – in dieser Form steckt er in der inneren Röhrgleichung $SDR_i = 1$ – kaum noch etwas mit dem elektrostatischen Durchgriff $D = D_1 \cdot D_2 \cdot D_3$ der Anode durch die verschiedenen Gitter zu tun hat. Denn als solcher müßte er wie bei den Trioden im ganzen Kennlinienfeld konstant sein. In Wirklichkeit ist aber der schaltungsmäßige Durchgriff nach der Definition $D = \Delta U_{g1}/\Delta U_a$ wegen der Stromaufteilung keineswegs mehr eine konstante Größe, zum mindesten nicht im Gebiet kleiner Anodenspannungen.

Zur Berechnung der Verstärkung oder der Anodenwechselspannung werden weniger die Gl. (24) und (26), sondern die Gl. (23) und (25) herangezogen, die beide mit S operieren. Aus Gl. (25) folgt zum Beispiel hinsichtlich der Verstärkung

$$v = \frac{U_{a\sim}}{U_{g\sim}} = S \frac{R_i \cdot R_{a\sim}}{R_i + R_{a\sim}} \quad (39)$$

Ist $R_{a\sim}$ sehr klein im Verhältnis zu R_i , kann die bequeme Näherungsformel

$$v \approx S R_a \quad (40)$$

verwendet werden. Die Verstärkungs- und Leistungsprobleme werden grafisch genauso wie bei der Triode behandelt. Man trägt in das Kennlinienfeld von U_B aus die Gleichstromwiderstandsgerade ein, sucht sich durch Wahl der Gittervorspannung einen geeigneten Arbeitspunkt aus und legt dann durch ihn die Wechselstromwiderstandsgerade. Je nach dem Spitze-zu-Spitze-Wert der Gitterwechselspannung erhält man verschieden große Verstärkungs- und Leistungsdreiecke.

Im Bild 59 ist als Parameter für die I_a/U_g -Kennlinien nicht die Anoden-, sondern die Schirmgitterspannung gewählt worden. Wie würden im Fall der Kennlinien der EF 80 (Bild 60) die I_a/U_g -Kennlinien mit U_a als Parameter aussehen (siehe Aufgabe 19)?

Überträgt man die Widerstandsgerade aus dem I_a/U_a -Kennlinienfeld in das I_a/U_g -Kennlinienfeld, so erhält man dort die dynamische Kennlinie, auch Arbeitskennlinie genannt (Abschnitt A. II. 8.). Je nach der Größe des Anodenwiderstandes haben die dynamischen Kennlinien einer Pentode die Form eines mehr oder weniger symmetrischen „S“. Dies ist für die Fragen der Verzerrung wichtig. Im Abschnitt A. IV. 1. wird gezeigt, daß die einseitige Durchbiegung der dynamischen Kennlinie einer Triode das Auftreten geradzahlgiger Oberwellen der Grundschwingung bedingt, die doppelte Krümmung der S-förmigen Arbeitskennlinie einer Pentode hingegen die Ursache für das Auftreten ungeradzahlgiger Oberwellen bildet.

Man unterscheidet im wesentlichen drei Pentodenarten: HF-Pentoden, NF-Verstärkerpentoden und NF-Leistungspentoden oder Endpentoden. In ihrer Arbeits-

weise sind alle drei gleich. Bei den HF-Pentoden, die hauptsächlich zur Spannungsverstärkung dienen und mit Schwingkreisen im Anodenweg arbeiten, hat man Wert auf einen hohen Innenwiderstand (wichtig für eine geringe Bedämpfung der Schwingkreise) und in Verbindung damit auf eine kleine Gitter/Anoden-Kapazität und einen kleinen elektrostatischen Durchgriff gelegt. Ihre Kennlinien verlaufen im I_a/U_a -Kennlinienfeld beinahe horizontal (Bild 60).

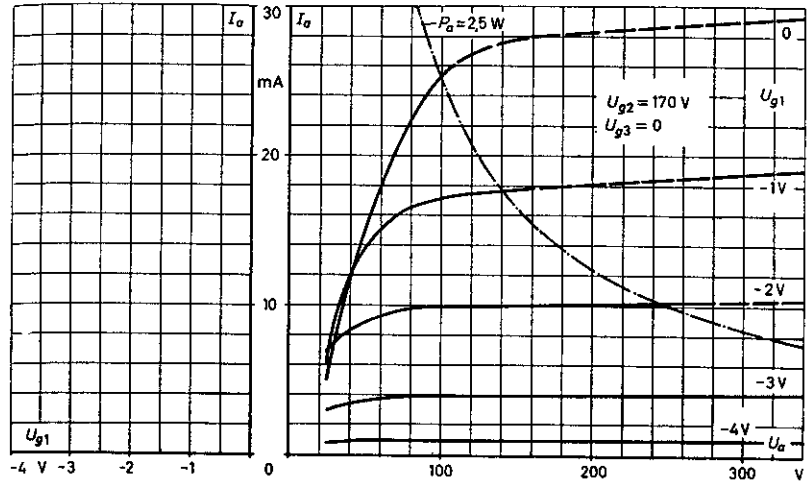


Bild 60. Kennlinienfeld einer HF-Pentode (EF 80)

Das gleiche gilt hinsichtlich des Innenwiderstandes für NF-Verstärkerpentoden. NF-Pentoden müssen möglichst brummfrei arbeiten, da die Brummfrequenz genau in dem Frequenzgebiet liegt, das sie übertragen sollen. Man erreicht dies zum Teil dadurch, daß man in dem Röhrenkolben unterhalb des eigentlichen Elektroden-systems noch ein besonderes Abschirmblech anordnet, das die Heizfäden mit ihrem 50-Hz-Wechselpotential gegen die übrigen Elektrodenanschlußleitungen und -stifte abschirmt. (Die Brummstörspannung der NF-Pentode EF 86 wird bei Verwendung von Gitterwiderständen $< 500 \text{ k}\Omega$ und Katodenkondensatoren $> 100 \mu\text{F}$ mit kleiner als $0,5 \mu\text{V}$ angegeben.) Darüber hinaus sollen NF-Pentoden eine große Klingsicherheit oder, was das gleiche ist, einen kleinen Mikrofonieffekt zeigen. Sie werden in den Rundfunkgeräten mit eingebauten Lautsprechern von den Schallwellen getroffen oder bei nichtschüttelfreiem Betrieb mechanisch angestoßen. In beiden Fällen dürfen die eingebauten Elektroden-systeme nicht gegeneinander ins Schwingen kommen, da dies den Anodenstrom modulieren würde und im Lautsprecher als Klängen hörbar wäre. Auch hinsichtlich des Rauschens werden an die NF-Pentode, zumal, wenn sie in der Eingangsstufe eines hochverstärkenden NF-Verstärkers sitzt, hohe Anforderungen gestellt. Eine der günstigsten NF-Pentoden

ist in dieser Hinsicht zur Zeit die EF 86, deren Kennlinienfeld im *Bild 61* wieder- gegeben ist. Da NF-Pentoden mit sehr großen Gleichstromwiderständen von 100 bis 200 kΩ im Anodenkreis arbeiten und dementsprechend nur kleine Anodenströme führen, sind bei ihnen nicht so hohe Steilheitswerte wie bei den HF-Pentoden er- reichbar.

Leistungs- oder Endpentoden zeigen einen wesentlich kleineren Innenwiderstand als die HF- und NF-Pentoden; sie sollen ja Leistung abgeben. Dies setzt voraus,

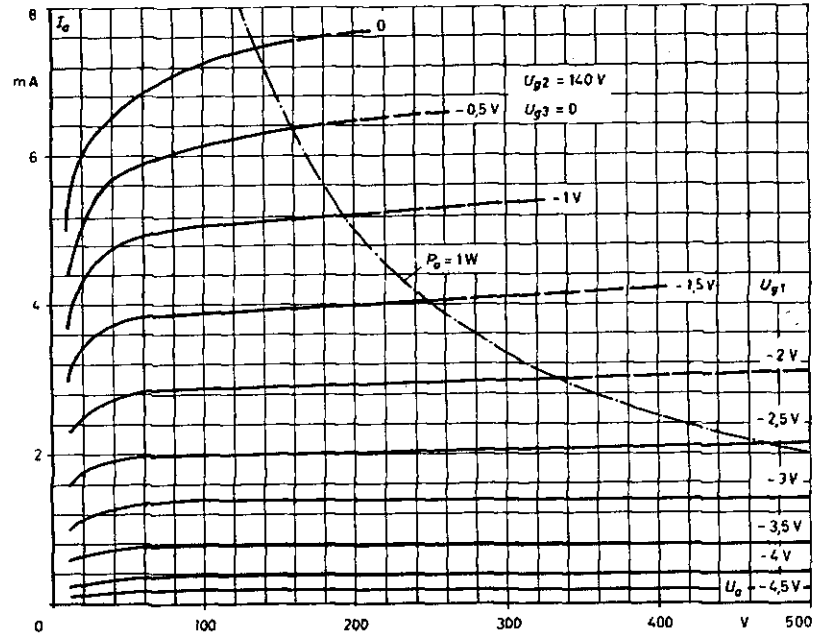


Bild 61. Kennlinienfeld einer NF-Pentode (EF 86)

daß sich Innenwiderstand und Belastungswiderstand einander nähern. Sie sollen, um neben großen Wechselspannungen große Wechselströme hervorbringen zu kön- nen, eine möglichst große Steilheit aufweisen. Man erreicht dies durch eine Katode mit großer Oberfläche. Der größeren Wechselstromleistung muß natürlich eine höhere Belastbarkeit der Anode zugeordnet sein. *Bild 62* zeigt das Kennlinienfeld der EL 95. Die stärkere Neigung der Kennlinien und ihr größerer gegenseitiger Ab- stand lassen gut den niedrigeren Innenwiderstand (80 kΩ im Arbeitspunkt) und die größere Steilheit erkennen. Noch deutlicher wird dies im *Bild 73* an den Kenn- linien der EL 84 sichtbar, deren Innenwiderstand mit 40 kΩ angegeben wird. In der *Tabelle 2* sind an Hand je eines Vertreters der drei Pentodengattungen die wich- tigsten Kenngrößen zusammengestellt.

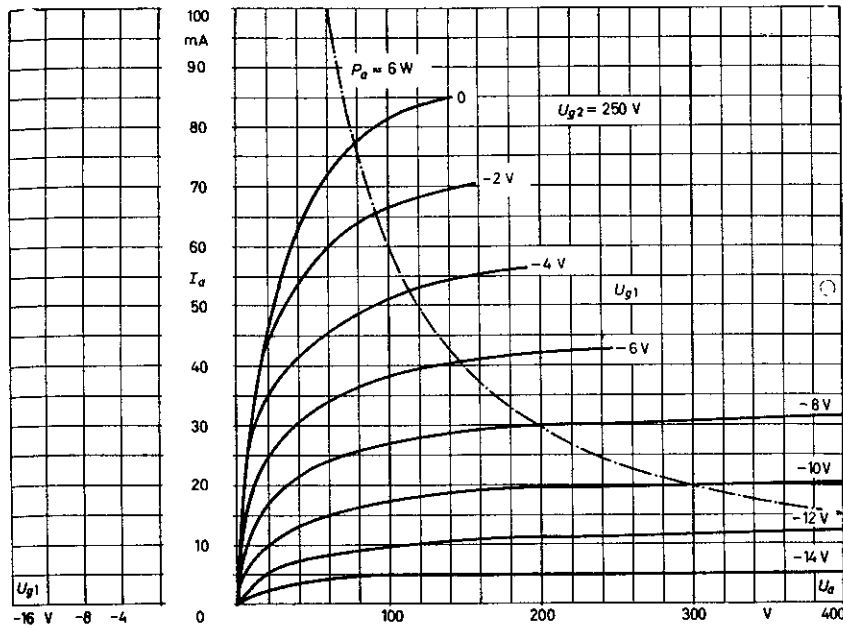


Bild 62. Kennlinienfeld einer Leistungspentode (EL 95)

| | EF 80 HF-Pentode | EF 86 NF-Pentode | EL 84 Leistungspentode |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------------|
| U_a | 170 V | 250 V | 250 V |
| U_{g2} | 170 V | 140 V | 210 V |
| U_{g1} | -2 V | -2 V | -6,4 V |
| I_a | 10 mA | 3 mA | 36 mA |
| I_{g2} | 2,5 mA | 0,6 mA | 3,9 mA |
| S | 7,4 mA/V | 2 mA/V | 10,4 mA/V |
| R_i | 0,5 MΩ | 2,5 MΩ | 40 kΩ |
| P_a | 2,5 W | 1 W | 12 W |

Tabelle 2. Gegenüberstellung der wichtigsten Kenngrößen einer HF-, NF- und Leistungspentode

Aufgabe 19

Zeichne in das vorbereitete I_a/U_g -Kennlinienfeld der EF 80 (*Bild 60*) die Kennlinien für U_a als Parameter ein. Wähle dabei $U_a = 100, 150, 200, 250$ und 300 V. Wie kann man das Ergebnis kurz zusammenfassen?

Aufgabe 20

Trage in das vorbereitete I_a/U_g -Kennlinienfeld der EL 95 (*Bild 62*) die dynamischen Kennlinien für den Arbeitspunkt A mit den Koordinaten $I_a = 24$ mA, $U_{g1} = -9$ V,

$U_a \approx 240 \text{ V}$ und die Außenwiderstände $R_{a\sim} = 6,7 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$ und $12 \text{ k}\Omega$ ein. Erkenne den S-förmigen Charakter dieser Arbeitskennlinien. Welche der drei Kurven verläuft, vom Arbeitspunkt aus betrachtet, einigermaßen symmetrisch nach beiden Seiten?

Aufgabe 21

Zeichne in das I_a/U_a -Kennlinienfeld der EL 95 (Bild 62) für den in Aufgabe 20 benutzten Arbeitspunkt und die Widerstandsgerade $R_{a\sim} = 10 \text{ k}\Omega$ die Leistungsfächen für P_a und P_{\sim} ein. Die Röhre werde gitterseitig mit $u_g = 5 \text{ V}$ angesteuert. Welchen Wirkungsgrad hat die Röhre in diesem Betriebsfall? Wie groß ist der Gleichstromwiderstand des Ausgangsübertragers, wenn die Speisepannung den Wert $U_B = 250 \text{ V}$ hat?
(Antwort: $P_{\sim} \approx 1,8 \text{ W}$, $\eta \approx 31\%$, $R_{a\sim} = 420 \Omega$)

5. Mischröhren (Hexoden, Septoden und Oktoden)

Fügt man den fünf Elektroden einer Pentode ein weiteres Gitter hinzu, entsteht eine Sechspolröhre oder Hexode. Im Bild 63 ist ihr Schaltschema angegeben. Eine Sechspolröhre bietet die Möglichkeit, den Anodenstrom an zwei verschiedenen, gegeneinander abgeschirmten Gittern zu steuern. An die Gitter $G1$ und $G3$ werden

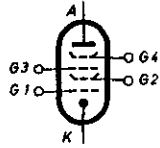


Bild 63
Schaltschema einer Hexode.
G 1 1. Steuergitter;
G 2 1. Schirmgitter;
G 3 2. Steuergitter;
G 4 2. Schirmgitter

außer einer Gleichspannung als Vorspannung zwei verschiedene Wechselspannungen gelegt, zum Beispiel im Fall eines Überlagerungsempfängers an das Gitter $G1$ die empfangene Hochfrequenz f_h und an das Gitter $G3$ die im Gerät erzeugte Überlagerungs- oder Oszillatorfrequenz f_a . Die Gitter $G2$ und $G4$ führen nur Gleichspannungen. $G2$ hat die Aufgabe, die beiden Steuergitter $G1$ und $G3$ gegeneinander abzuschirmen. Gleichzeitig hat es die Funktion einer Triodenanode zu erfüllen, nämlich die Elektronen aus dem Katodenraum abziehen. Das Gitter $G4$ soll die Rückwirkung der Anodenwechselspannung auf die Steuerung ausschalten. Die Hexode besteht gewissermaßen aus zwei hintereinandergeschalteten Röhren, einer Triode mit den Elektroden K , $G1$ und $G2$ und einer Tetrode mit der Elektrode $G2$ als Elektronen liefernde „Kathode“ und den Gittern $G3$, $G4$ und A . Das Triodensystem mit der konstanten „Anodenspannung“ U_{a2} liefert einen im Rhythmus von ω_{p1} schwankenden Elektronenstrom. Er wird im Tetrodensystem nochmals angesteuert, und zwar im Rhythmus der Wechselspannung ω_{p2} .

Da der Anodenstrom sowohl von der Wechselspannung an $G1$ als auch von der an $G3$ abhängt, kann der Anodenstrom einer solchen Röhre im Rhythmus zweier verschiedener Frequenzen gesteuert werden. Dabei entstehen im Anodenkreis, wie im Abschnitt J.V. 4. über Modulation im I. Band näher ausgeführt ist, die Summen-

und Differenzfrequenzen der ursprünglichen Schwingungen. Von ihnen interessiert im allgemeinen nur die Differenzfrequenz $f_a - f_h$. Sie wird durch Bandfilter aus dem Gemisch der übrigen Frequenzen ausgefiltert. Die Stärke dieser Differenzfrequenz im Anodenstrom der Hexode, die man die Zwischenfrequenz ZF nennt, im Verhältnis zur angewendeten Wechselspannung $U_{g2\sim}$ von der Frequenz f_h bezeichnet man als die „Mischsteilheit“ S_c der Hexode.

Aus der Hexode wird eine Heptode oder Siebenpolröhre, wenn man, ähnlich wie beim Übergang von der Tetrode zur Pentode, zwischen Schirmgitter $G4$ und Anode ein weiteres Gitter $G5$ anordnet. Mit der Kathode verbunden, erfüllt dieses Gitter die Funktion eines Bremsgitters. Es verhindert das Hinüberfliegen von Sekundärelektronen von der Anode zum Schirmgitter.

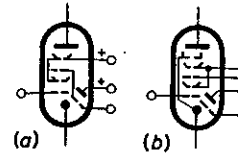


Bild 64
Verbundröhren.
(a) Triode-Hexode;
(b) Triode-Heptode

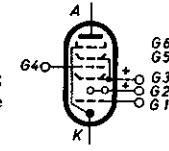


Bild 65. Schaltschema einer Oktode.
G 1 1. Steuergitter;
G 2 Hilfsanode;
G 3 1. Schirm-(Raumlade-)Gitter;
G 4 2. Steuergitter;
G 5 2. Schirmgitter;
G 6 Bremsgitter

Eine besondere Ausführung der Mischröhren stellen die Verbundröhren in der Form der Triode-Hexode beziehungsweise Triode-Heptode dar. Die Bilder 64 (a und b) zeigen ihre Schaltschemen. Über einer gemeinsamen Kathode sind zwei Röhrensysteme aufgebaut, ein Triodenteil zur Erzeugung der Überlagerungsfrequenz f_a (Oszillatorteil) und ein Hexoden- beziehungsweise Heptodenteil für die eigentlichen Mischungszwecke. Bei den Trioden-Hexoden ist das Steuergitter des Oszillators innerhalb der Röhre mit dem zweiten Steuergitter $G3$ des Hexodensystems verbunden. Die Schwingungszwecke dieser Röhre muß so ausgelegt werden, daß die am Gitter der Triode sich ausbildende Schwingamplitude der Frequenz f_a ausreicht, die Hexode richtig auszusteuern. Diese direkte Verbindung fehlt bei den Trioden-Heptoden, wodurch hier mehr Freiheit in der Verwendung der Einzelsysteme und der Auslegung der Schaltung besteht.

Die Oktode vereinigt in einem einzigen Elektrodensystem die Oszillatortriode mit dem Mischröhrenteil. Ihr Elektrodenaufbau ist aus dem Schaltschema vom Bild 65 ersichtlich. Zwischen dem ersten Steuergitter $G1$ und dem sogenannten Raumladegitter $G3$ ist eine „Hilfsanode“ $G2$, bestehend aus zwei Stäben, angeordnet. Der untere Teil dieser Röhre mit K , $G1$ und $G2$ dient zur Erzeugung der Überlagerungsfrequenz. Die Hochfrequenz f_h wird dem Steuergitter $G4$ zugeführt.

6. Regelröhren

Regelröhren sind Röhren, die sich in ihrem Verstärkungsgrad gleichmäßig und in weiten Grenzen verändern lassen. Man benötigt sie zum Beispiel für die automatische Schwund- und Lautstärkeregelung in Rundfunkempfängern. Die Verstärkung

einer Mehrgitterröhre hängt entsprechend der Näherungsformel $v \approx SR_a$ von der Röhrenseite aus hauptsächlich von der Steilheit S ab. Eine Regelung der Verstärkung ist demnach möglich, wenn es gelingt, die Steilheit einer Röhre zu variieren. Dies läßt sich durch Verändern der Gittervorspannung erreichen, denn S ist

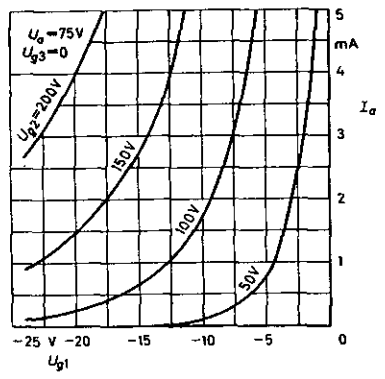


Bild 66. I_a/U_g -Kennlinienfeld einer NF-Regelpentode (EF 83)

das Steigungsmaß einer I_a/U_g -Kennlinie und auf einer solchen nicht konstant. Hieraus folgt, daß grundsätzlich schon bei normalen Röhren durch Verändern der Gittervorspannung die Steilheit und damit die Verstärkung variiert werden kann. Dennoch sind normale Röhren für Regelzwecke nicht recht geeignet, weil ihre Kennlinien im oberen Teil fast geradlinig verlaufen und damit nur geringe Steilheitsänderungen haben, dagegen im unteren Teil stark gekrümmt sind und eine

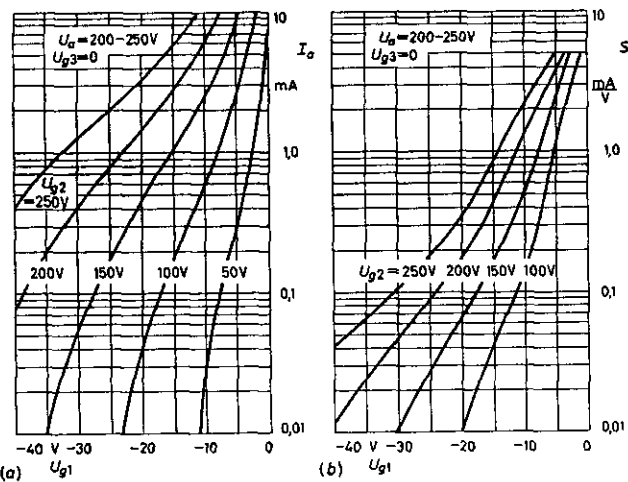


Bild 67. (a) Anodenstrom I_a und (b) Steilheit S einer HF-Regelpentode (EF 89) als Funktion der Gittervorspannung U_{g1} für verschiedene Schirmgitterspannungen U_{g2} in halblogarithmischer Darstellung

sehr starke Steilheitsabnahme zeigen. Hinzu kommt, daß bei Arbeitspunkten in sehr stark gekrümmten Gebieten die Verzerrungen leicht unzulässig groß werden. Bei einer Regelröhre hat man den I_a/U_g -Kennlinienverlauf so gezüchtet, daß er eine stetige, sanfte Krümmung mit großem Auslauf aufweist. Dadurch bleiben die Verzerrungen über die ganze Kennlinie hin in zulässigen Grenzen. Bild 66 zeigt das Kennlinienfeld der NF-Regelpentode EF 83 mit der Schirmgitterspannung U_{g2} als Parameter. Vergleiche hierzu die im Bild 59 dargestellten Kennlinien einer normalen Pentode. Zur besseren Darstellung des Kennlinienverlaufs und der Steilheit im unteren Teil der Kennlinien verwendet man oft für die Anodenstrom- und die Steilheitsordinate den logarithmischen Maßstab. Im Bild 67 ist dies für die Regelkennlinien der modernen HF-Regelpentode EF 89 geschehen.

Als Regelröhren werden hauptsächlich Pentoden und Hexoden benutzt. Die langsame, gleichmäßige Kennlinienkrümmung hat man durch verschieden große Gittermaschenweite erzielt (Bild 68). Bei geringer negativer Vorspannung ist die ganze

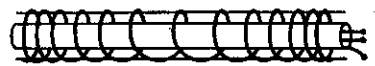


Bild 68. Katode und Gitterwende einer Regelröhre

Katodenoberfläche an der Elektronenemission beteiligt, da auch die engen Gittermaschen Elektronen durchlassen. Mit zunehmender negativer Vorspannung wird die wirksame Oberfläche der emittierenden Katode immer mehr verkleinert, weil die engen Teile der Gitterwende den Elektronendurchtritt immer stärker sperren und nur noch die weiten Teile ihn gestatten. Die Verkleinerung der wirksamen Katodenoberfläche ist gleichbedeutend mit einer Verkleinerung der Gesamtmenge der steuerbaren Elektronen. Dem entspricht aber eine Abnahme der Steilheit, das heißt der Stromänderung bei 1 V Gitterspannungsänderung.

7. Kennzeichnung der Röhren

a) Rundfunk- und Fernschröhren

Zur Kennzeichnung der europäischen Rundfunk-Ton- und -Fernschröhren ist ein einheitliches Bezeichnungsschema eingeführt. Es besteht aus einem System von zwei oder drei Großbuchstaben mit einer anschließenden ein- oder zweistelligen Kennzahl. Die Buchstaben gestatten einen Schluß auf die Heizart und den Elektrodenaufbau und damit auf die Anwendungsmöglichkeit der betreffenden Röhre. Die Kennzahl gibt einen Aufschluß über den konstruktiven Aufbau der Röhre, hauptsächlich ihre Sockelung.

Der erste Buchstabe kennzeichnet die Heizart. Aus ihm wird beispielsweise ersichtlich, für welchen Empfängertyp (Batterie-, Auto-, Wechselstrom- oder Allstromgerät) die Röhre geeignet ist. Röhren mit dem gleichen Anfangsbuchstaben bilden eine sogenannte Röhrenserie, zum Beispiel die E- oder U-Serie.

| Erster Kennbuchstabe | Heizart | Anwendung | Bemerkungen |
|----------------------|---------------------------|---------------------------------|--|
| A | 4 V \sim | Wechselstromgeräte | Parallelheizung (überholte Serie) |
| B | 180 mA $-$ | Gleichstromgeräte | Serienheizung (überholte Serie) |
| C | 200 mA \approx | Allstromgeräte | Serienheizung (überholte Serie) |
| D | 1,25...1,4 V _B | Batteriegeräte | Parallelheizung moderne Standardserie |
| E | 6,3 V \sim | Wechselstrom- und Autogeräte | Parallelheizung moderne Standardserie |
| H | 150 mA \approx | Allstrom- und Autogeräte | Serienheizung moderne Standardserie |
| K | 2 V _B | Batteriegeräte | Parallelheizung (überholte Serie) |
| F | 300 mA \approx | Fernsehgeräte | Serienheizung moderne Standardserie |
| U | 100 mA \approx | Allstromgeräte | Serienheizung moderne Standardserie |
| V | 50 mA \approx | Allstromgeräte | Spezialserie für Hoch- voltaparröhren |

| Zweiter und weiterer Kennbuchstabe | Elektroden- system | Anwendung | Beispiel |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------|
| A | Diode | HF-Gleichrichtung Meßgleichrichter | UAF 42 EAA 91 |
| B | Duodiode mit gemeinsamer Katode | AM-Gleichrichtung FM-Demodulation (dann mit getrennten Katoden) | EBF 80 PABC 80 |
| C | Triode | NF-Verstärkung, UKW-Ver- stärkung, Oszillator | ECL 80 ECC 83 |
| D | Leistungsdiode | Leistungsverstärkung | AD 1 EDD 11 |
| E | Tetrode | NF-Verstärkung | VEL 11 |
| F | Pentode | HF-, ZF-, NF-Verstärkung | EF 89 UBF 89 |
| H | Hexode Heptode | Mischröhre | ECH 81 EH 90 |
| K | Oktode | Mischröhre + Oszillator | AK 2 |
| L | Leistungs- pentode | Leistungsverstärkung | EL 84 PCL 82 |
| M | Magisches Auge | Abstimmanzeige | EM 80 |
| Q | Nonode Enneode | FM-Demodulation + NF-Verstärkung | EQ 80 |
| Y | Einwegnetz- gleichrichter | Netzgleichrichtung | EY 51 |
| Z | Zweiwegnetz- gleichrichter | Netzgleichrichtung | EZ 81 |

Tabelle 3. Bedeutung der Buchstabenkennzeichen europäischer Rundfunk-Ton- und -Fernsehrohren

Der an zweiter, dritter oder vierter Stelle stehende Buchstabe sagt etwas über den Aufbau des Elektrodensystems und damit die Funktion und den schaltungsmäßigen Einsatz der Röhre aus. Ein Doppelbuchstabe an zweiter und dritter Stelle oder ein Dreifachbuchstabe deutet an, daß die Röhre zwei oder drei verschiedene Systeme, beispielsweise ein Trioden- und ein Hexodensystem oder ein Gleichrichter- und ein Verstärkersystem, enthält. Die *Tabelle 3* gibt Auskunft über die genauere Bedeutung der einzelnen Buchstaben.

b) Kommerzielle Röhren

Unter kommerziellen Röhren versteht man solche Röhren, die nicht für Rundfunk-Ton- und -Fernsehgeräte bestimmt sind, sondern für Geräte der Post, Eisenbahn und Schifffahrt sowie für industrielle Anlagen und sonstige Spezialzwecke. Sie werden auch Spezialröhren²⁾ genannt. An die kommerziellen Röhren werden hinsichtlich Lebensdauer, Gleichmäßigkeit der Fabrikation (enge Toleranzen) und Robustheit der Konstruktion (Stoßfestigkeit) besonders hohe Anforderungen gestellt. Für diese Röhren wird oft, wenn sie zum Beispiel an unzugänglichen Stellen vorkommen, eine Garantie von 10000 Betriebsstunden gefordert. Solche Röhren tragen dann die Bezeichnung Langlebensröhren oder Weitverkehrsröhren.

In kommerziellen Röhren werden häufig, um eine thermische Emission des Gitters zu verhindern, vergoldete Gitter oder zirkonisierte Elektroden verwendet; beide Metalle haben eine hohe Elektronenausstrittsarbeit. Die Röhren werden vielfach mit Katoden aus Materialien ausgerüstet, bei denen sich keine störende „Zwischenschicht“ ausbilden kann. Sie können längere Zeit geheizt werden, ohne daß ihre Emissionsfähigkeit leidet, wenn kein Anodenstrom entnommen wird.

Die Kennzeichnung kommerzieller Röhren geschieht nicht einheitlich. Einige Firmen lassen auf den ersten Buchstaben erst die Kennzahl folgen und geben anschließend die Buchstaben zur Charakterisierung des Systems an (zum Beispiel E 88 CC). Andere Firmen verwenden das gleiche Buchstabenschema wie bei den Normalröhren, benutzen aber durch Zufügen einer Null eine dreistellige Kennzahl (zum Beispiel EF 800). Röhren für die speziellen Belange der Post werden nach einem eigenen Bezeichnungssystem gekennzeichnet (zum Beispiel C 3 m).