

Geschichte und Grundlagen der Elektronenröhre

Von Taro Breuer

Geschichtlicher Hintergrund

Am Anfang stand die Glühlampe. 1880 meldete Thomas Alva Edison (1847-1931) ein Patent für eine in Massenfertigung herstellbare Kohlefadenlampe an. Der gewendelte Kohlefaden wird dabei durch den elektrischen Strom durchflossen, zum Glühen gebracht und spendet dabei Licht, wenn auch nur mit einem geringen Wirkungsgrad. Damit der Faden nicht abbrennt, befindet er sich in einem evakuierten Glaskolben.

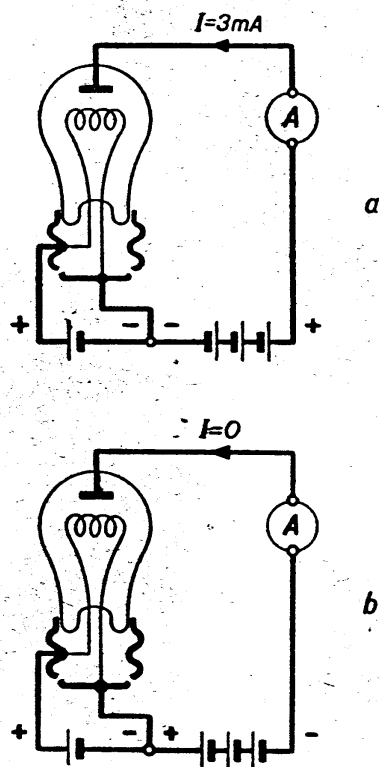


Bild 5: Edison-Effekt

1884 berichtete Edison, daß auch im Vakuum Strom „ohne Drähte“ fließen kann und daß dabei die Stromstärke von der Temperatur des Fadens abhängt. Diese zufällig entdeckte thermische Emission von Elektronen ist heute als „Edison-Effekt“ bekannt, wurde damals aber nicht weiter als nützlich erkannt. Bei Versuchen mit seinen Glühlampen, mit einem Platindraht als zusätzliche Elektrode, konnte Edison nachweisen, daß nur dann ein Strom fließt, wenn man den Pluspol einer außen angelegten Batterie mit der zusätzlichen Elektrode verbindet, bei Umpolung dagegen der Strom verschwindet. Hier wurde also erstmals das Prinzip einer Diode beschrieben.

Bauformen der Elektronenröhre

Die Herkunft von der Glühbirne war bis in die 30er Jahre an der Herstellung mit Quetschfuß erkennbar. Die Zuleitungen kamen von unten aus einem breitgequetschten Glasfuß mit oben angeordneter Anodenkappe. Ein Beispiel ist die Leistungsdiode RG62D von Telefunken. Die hierbei auftretenden Leitungskapazitäten wurden später durch günstigere Anordnungen verringert.



Leistungsdiode RG62D
von Telefunken

Ursprünglich waren die Elektroden nebeneinander angebracht, letztlich setzte sich eine axiale Anordnung durch: Die Glühkathode in der Mitte, das zur Kühlung möglichst großflächige Anodenblech außen, die Gitter dazwischen.

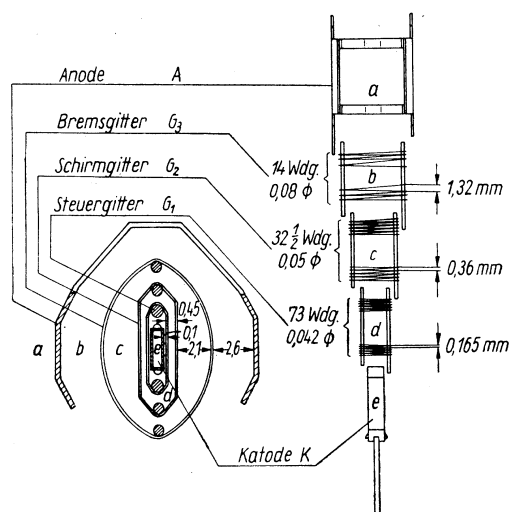


Bild 16b. Aufbau der Pentode EF 80, deren Kennlinien in Bild 16c–g dargestellt sind

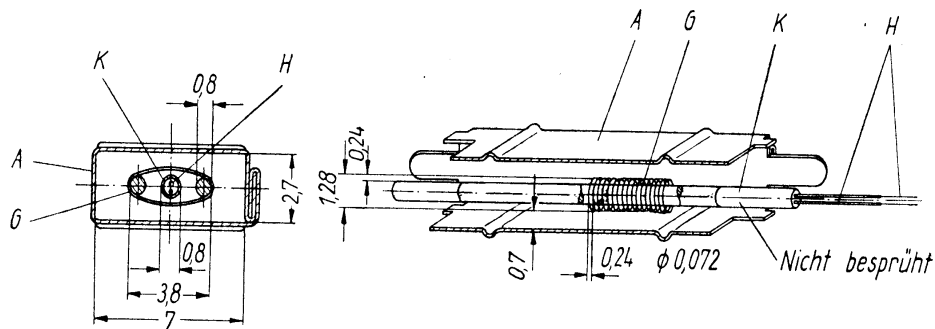


Bild 10a. Triodensystem der Röhre EABC 80 mit indirekt geheizter Katode K, einem Gitter G und Anode A; Gitterdrähte $2c = 0,072 \text{ mm } \varnothing$. Gittersteigung $s = 0,24 \text{ mm}$

Die Forschung an Elektronenröhren fand gleichzeitig in Amerika und Deutschland statt. Große Bemühungen wurden wegen des 1. Weltkrieges gemacht, weil der dringende Bedarf vorhanden war nach verbesserter Nachrichtenübermittlung mit Verstärkern zur Überwindung großer Distanzen. Nach dem Krieg kam ein weiterer Aufschwung durch den Rundfunk, der sich allgemein und politisch großer Beliebtheit erfreute. Zunächst AEG, Siemens, Telefunken (gegr. Berlin 1903) und später Valvo (gegr. Hamburg 1924) waren entscheidend an Entwicklung und Produktion beteiligt.



Triode AC2 von Valvo aus den 1930-er Jahren

Die Diode

Eine Elektrode (Kathode) wird durch einen Heizdraht direkt oder indirekt zum Glühen gebracht. Dabei treten aufgrund des Edison-Effekts Elektronen aus dem festen Material heraus. Befindet sich eine weitere, im Gegensatz zu den negativen Elektronen stark positiv geladene Elektrode in der Nähe, werden die Teilchen in diese Richtung beschleunigt und ein Strom fließt. Eine Diode eignet sich somit zur Gleichrichtung.

Wichtige Voraussetzungen:

- ✍ starke Emission von Elektronen an der Kathode durch geeignetes Kathodenmaterial.
Richardson entdeckte 1901, daß nicht nur die Heizfadentemperatur, sondern auch das verwendete Kathodenmaterial für die Anzahl der emittierten Elektronen wichtig ist. Die Richardson-Konstanten geben seitdem ein Maß für die je nach Material nötige Austrittsarbeit an. Oxidkathoden, das sind gewendelte Wolframdrähte (hohe Schmelztemperatur) mit einer bestimmten Metalloxidbeschichtung (hohe Emission) haben sich als optimal erwiesen.
- ✍ Hochvakuum in der Röhre.
Befindet sich Luft (Sauerstoff) am Heizdraht, brennt dieser ab, ein unzureichendes Vakuum hindert die Elektronen am Flug zur Anode und sorgt für chemische Veränderungen der Kathodenoberfläche, was die Emission stark begrenzt.
- ✍ Maßnahmen zur Beseitigung von Restgasen in Raum und Metall
 - Auspumpen des Glaskolbens
 - Elektronenbombardement (Stromstoß) vor endgültigem Auspumpen
 - Verwendung gering ausgasender Bleche und Drähte
 - Getter. Barium oder Magnesium wird innerhalb des Glaskolbens durch Wirbelströme verdampft und bindet nachhaltig Verunreinigungen des Vakuums. Erkennbar am metallisch glänzenden Niederschlag.



Hochspannungsdiode GY501 aus einem der ersten Farbfernsehgeräte von Ende der 60-er Jahre

Die Triode – Diode plus Steuergitter

Bringt man zwischen Anode und Kathode eine weitere kalte Elektrode an, an der die Elektronen vorbei müssen, läßt sich hier durch gezielte negative Aufladung der Elektronenstrom zur Anode beeinflussen. Dieses Steuergitter wird mit einer Gittervorspannung gleichspannungsmäßig negativ gegenüber der Kathode gehalten, damit es keine Elektronen einfängt (Gitterstrom) und eine leistungslose Steuerung möglich ist.

Das Kennlinienfeld

Für jede Röhre wird ein Eingangskennlinienfeld I_a/U_g sowie ein Ausgangskennlinienfeld I_a/U_a angegeben, woraus sich das Verhalten der Röhre unter verschiedenen Bedingungen ablesen läßt.

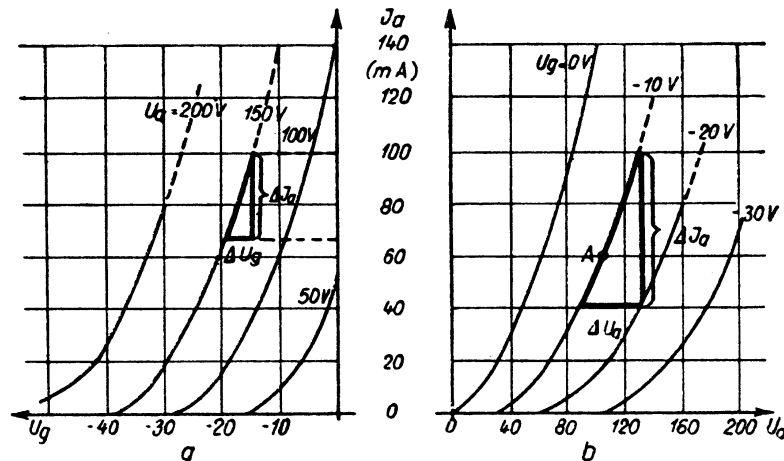
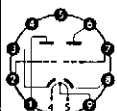


Abb. 10. Triodenkennlinienfelder, zur Erklärung von Steilheit, Durchgriff, Verstärkungsfaktor und innerem Widerstand

34
RÖHREN

Type	Allgemeine Daten General data		Betriebswerte Typical operation	Grenzwerte Maximum ratings
ECC 82 NF-Doppeltriode mit getrennten Kathoden NF-Verstärker Impuls-Trennstufen Multivibrator AF twin triode with separate cathodes AF amplifiers pulse separator stages multivibrators	Pico 9 Noval	$U_f = 6,3/12,6 \text{ V}$ $I_{fca} 300/150 \text{ mA}$	NF-Verstärker in Widerstandsverstärkerschaltung Resistance-coupled amplifier per System $R_a = 100 \text{ k}\Omega$, $R_g' = 330 \text{ k}\Omega$, $R_k = 2,2 \text{ k}\Omega$ $U_b = 200 \quad 250 \quad 300 \quad 350 \quad 400 \text{ V}$ $I_a = 1,3 \quad 1,63 \quad 1,97 \quad 2,3 \quad 2,62 \text{ mA}$ $U_{o\text{eff}}^{1)} = 25 \quad 32 \quad 41 \quad 49 \quad 57 \text{ V}$ $U_o/U_i = 14 \quad 14 \quad 14 \quad 14 \quad 14$ $k^{2)} = 5,8 \quad 5,9 \quad 6,0 \quad 6,1 \quad 6,2 \%$ $R_a = 220 \text{ k}\Omega$, $R_g' = 680 \text{ k}\Omega$, $R_k = 3,9 \text{ k}\Omega$ $U_b = 200 \quad 250 \quad 300 \quad 350 \quad 400 \text{ V}$ $I_a = 0,66 \quad 0,82 \quad 0,98 \quad 1,16 \quad 1,31 \text{ mA}$ $U_{o\text{eff}}^{1)} = 22 \quad 28 \quad 36 \quad 43 \quad 50 \text{ V}$ $U_o/U_i = 14,5 \quad 14,5 \quad 14,5 \quad 14,5 \quad 14,5$ $k^{2)} = 4,7 \quad 4,8 \quad 4,9 \quad 5,0 \quad 5,1 \%$ Kapazitäten • Capacitances System I System II $c_g = 1,8 \quad 1,8 \text{ pF}$ $c_u = 0,37 \quad 0,25 \text{ pF}$ $c_{g/a} = 1,5 \quad 1,5 \text{ pF}$	per System $U_a = 300 \text{ V}$ $N_a = 2,75 \text{ W}$ $I_k = 20 \text{ mA}$ $I_{ksp}^{3)} = 100 \text{ mA}$ $R_{fg}^{3)} = 1 \text{ M}\Omega$ $R_{f/k}^{4)} = 20 \text{ k}\Omega$ $U_{t/ksp} = \pm 180 \text{ V}$
Größe 8 Outlines 8	$I_f = 300 \text{ mA}$ $U_f \text{ ca. } 6,3 \text{ V}$			
Stift • Pin	indirekt geheizt indir. heated			
1 aII	per System			
2 gII	$U_a = 250 \text{ V}$			
3 kII	$U_g = -8,5 \text{ V}$			
4 f	$I_a = 10,5 \text{ mA}$			
5 f	$S = 2,2 \text{ mA/V}$			
6 aI	$R_i = 7,7 \text{ k}\Omega$			
7 gI	$\mu = 17$			
8 kI				
9 f _m				



1) bis zum Gitterstrom-Einsatz ausgerechnet
driven to grid current starting

2) k ist U_o etwa proportional
k is nearly proportional to U_o

3) Impulsdauer = 4% einer Periode,
 $t_{\text{max}} = 0,8 \text{ ms}$
pulse time = 4% per period,
 $t_{\text{max}} = 0,8 \text{ ms}$

4) in Phasenumkehrstufe • in phase-splitting stage
max. 150 k Ω



Doppeltriode ECC82 (Telefunken 1970)

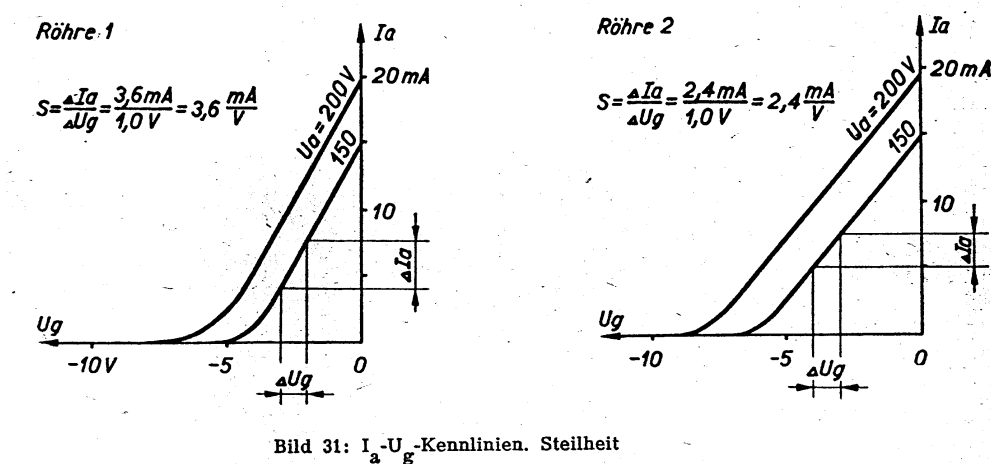
Röhrenkennwerte nach Barkhausen

Für jede Röhre unter normalen Betriebsbedingungen können Kennwerte angegeben werden, die in einem festen Zusammenhang stehen. Es gilt ohne physikalische Voraussetzungen ganz allgemein:

$$S \cdot D \cdot R_i = 1 \quad (\text{Barkhausen Bd. 1, S. 159})$$

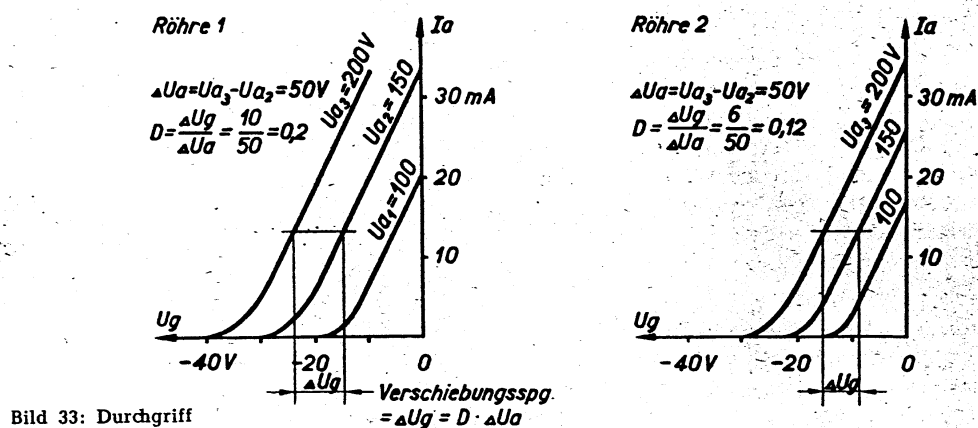
$$S = \frac{dI_a}{dU_g} \quad U_a = \text{const.} \quad \text{Steilheit}$$

Die Steilheit ist aus dem Eingangskennlinienfeld ablesbar und beschreibt, wie stark der Anodenstrom auf eine Gitterspannungsänderung reagiert. Hier läßt sich also direkt auf die mögliche Verstärkung schließen.



$$D = \frac{dU_g}{dU_a} \quad I_a = \text{const.} \quad \text{Durchgriff}$$

Der Durchgriff gibt an, wie stark die Anodenspannung durchgreift, also Wirkung auf den Anodenstrom hat im Verhältnis zur Spannung am Steuergitter U_g .



$$\mu = 1/D$$

(Leerlauf-)Verstärkungsfaktor

Der Verstärkungsfaktor ist ein Hinweis auf die maximal mögliche Verstärkung bei der Triode. In Amerika wird er anstelle von D angegeben.

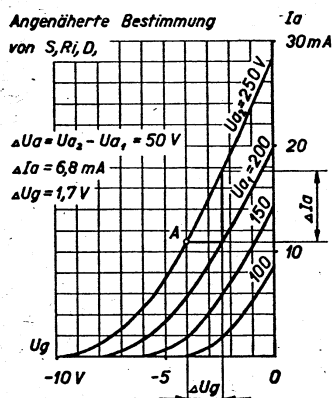
$$R_i = dU_a/dI_a \text{ } U_g = \text{const.}$$

Innenwiderstand

Aus dem Ausgangskennlinienfeld läßt sich der Innenwiderstand der Röhre bestimmen, je steiler der Strom ansteigt bei Erhöhung der Anodenspannung, je kleiner ist der Innenwiderstand.

Auswertung der Kennlinien

Angenäherte Bestimmung
von S, R_i, D



$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{6,8 \text{ mA}}{1,7 \text{ V}} = 4,0 \text{ mA/V}$$

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{50 \text{ V}}{0,0068 \text{ A}} = 7370 \Omega$$

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} = \frac{1,7}{50} = 0,034 = 3,4\%$$

Bild 37: Angenäherte Ermittlung von S, D, R_i aus dem I_a - U_g -Kennlinienfeld

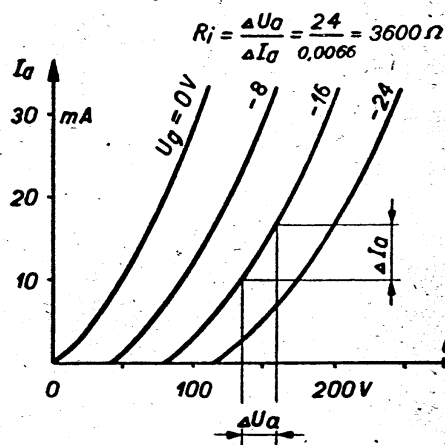
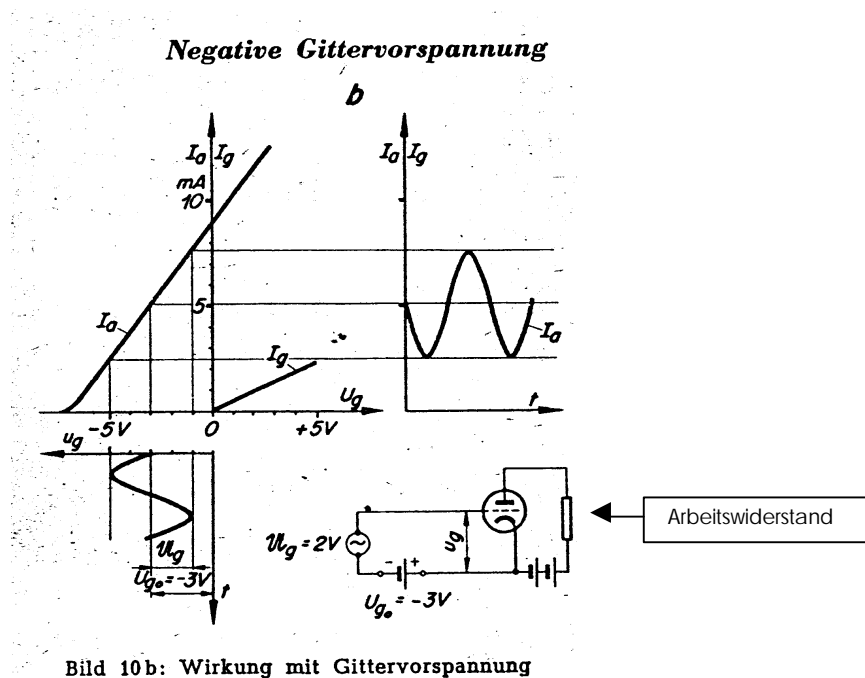


Bild 36: I_a - U_a -Kennlinienfeld, Innenwiderstand

Funktionsprinzip des einfachen Triodenverstärkers

- ✎ Steuerspannung wird weniger negativ --> Strom durch die Röhre nimmt zu.
Steigt die anliegende Eingangsspannung an, wird die im Elektronenstrom liegende hinderliche negative Aufladung geringer und der Anodenstrom kann ansteigen.
- ✎ Kleine Änderung der Eingangsspannung --> große Änderung der Ausgangsspannung
Durch den wachsenden Anodenstrom fällt über dem Arbeitswiderstand eine größere Spannung ab und die an der Anode abzugreifende Ausgangsspannung fällt.



Schirmgitterröhren

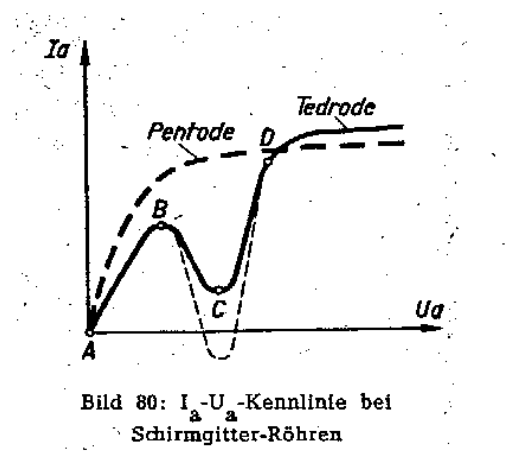
Bei höheren Frequenzen wirkt sich die parasitäre Kapazität zwischen Anode und Gitter zunehmend als störend aus. Fügt man nun ein Schirmgitter dazwischen, das sich zwar auch auf stark positivem Potential befindet, aber wechsellspannungsmäßig geerdet ist, läßt sich das Problem beheben. Der Durchgriff wird klein, der Innenwiderstand groß und der Aussteuerungsbereich erweitert sich.

Tetrode

Betrachtet man das Ausgangskennlinienfeld einer solchen Tetrode, bemerkt man einen ungünstigen Nebeneffekt:

Haben nämlich die Primärelektronen von der Kathode kommend, eine bestimmte Mindest-Geschwindigkeit (Anodenspannung), schlagen sie beim Aufprall auf der Anodenoberfläche eine größere Anzahl an Sekundärelektronen heraus. Ist die Anodenspannung nicht groß genug, diese selbst wieder einzufangen, werden diese vom Schirmgitter angezogen und sorgen für ein Einbrechen des Anodenstroms durch diesen entgegenlaufenden Elektronenstrom.

Dieser Effekt läßt sich durch Bündelung der Elektronen mit Ablenkblechen zu einem Strahl durchführen, der einen entgegenlaufenden Strom nicht zuläßt. Diese Typen nennt man Strahl-Tetrode oder Beam-(Power-)Tetrode. Diese Röhren werden jedoch ausschließlich in Form von leistungsstarken Endröhren hergestellt.



Beam-Power-Tetrode KT88

Pentode

Eine andere Möglichkeit ist die Einführung eines Bremsgitters nahe der Anode, das sich meist auf Kathodenpotential befindet. Dieses Bremsgitter treibt die Sekundärelektronen zurück zur Anode, läßt aber den Anodenstrom nicht so ideal vorbei wie es bei der Beam-Power-Tetrode am deutlich sichtbaren Knick in der Ausgangskennlinie sichtbar ist (Seeley, S. 26.)

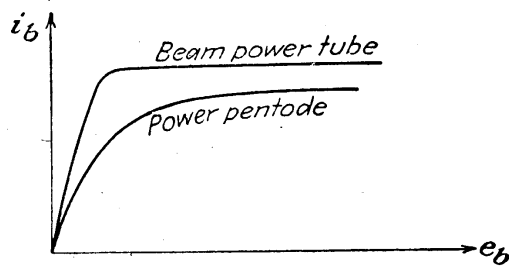


FIG. 1-25. The plate characteristics of a beam power tube and a power pentode.

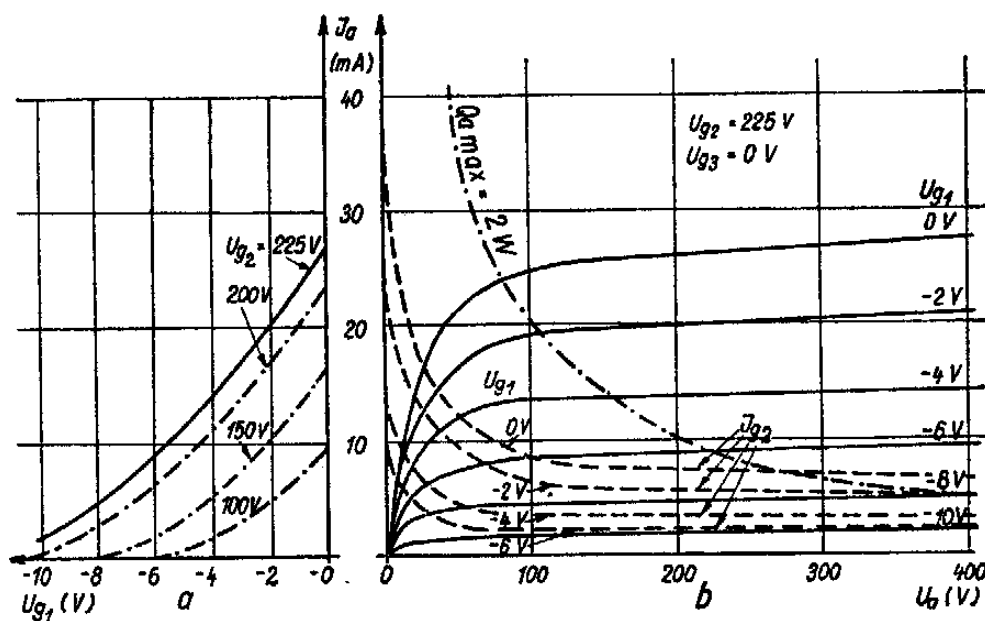


Abb. 15. Das $J_a U_{g1}$ - und $J_a U_a$ -Kennlinienfeld der Pentode RV 12 P 2000 für eine Schirmgitterspannung von $U_{g2} = 225 \text{ V}$



Pentode RV12P2000

Rauschquellen

Schwankungen im Ruhestrom zur Anode treten aus unterschiedlichen Gründen auf und werden als Rauschen wahrgenommen.

Thermisches Rauschen:

In jedem Leiter entsteht durch die thermische Bewegung der Elektronen ein Widerstandsrauschen.

Schrotrauschen:

statistisch ungleichmäßige Emission an der Kathode durch zufällige Verteilung der Elektronen

Funkelrauschen:

hervorgerufen durch lokale Temperaturunterschiede auf der Kathode, die sich auf die Emissionsfähigkeit auswirken. Eine vollkommen gleichmäßige Heizung ist unmöglich.

Stromverteilungsrauschen:

auf dem Schirmgitter. Je nach Bereich des Gitters sind unterschiedliche Stromdichten vorhanden.

Da das Stromverteilungsrauschen als bedeutende Rauschquelle nur bei der Triode nicht auftritt, wird diese bevorzugt in Audio-Vorstufen als Eingangsröhre verwendet. Es gibt deshalb auch nur wenige rauscharme NF-Pentoden wie die EF86, die allerdings den Vorteil einer größeren Verstärkung haben. (Kulp, S. 182.)

Kaskode-Schaltung

Schaltet man zwei Trioden direkt „übereinander“, unten die Eingangstriode in Kathodenbasisschaltung und darüber quasi als Ausßenwiderstand dazu eine weitere Triode in Gitterbasisschaltung, erhält man den Kaskode-Verstärker.

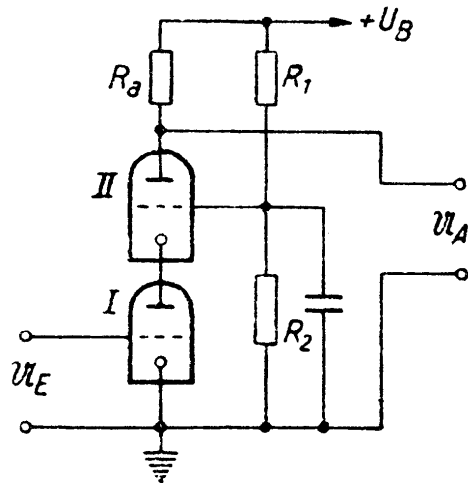
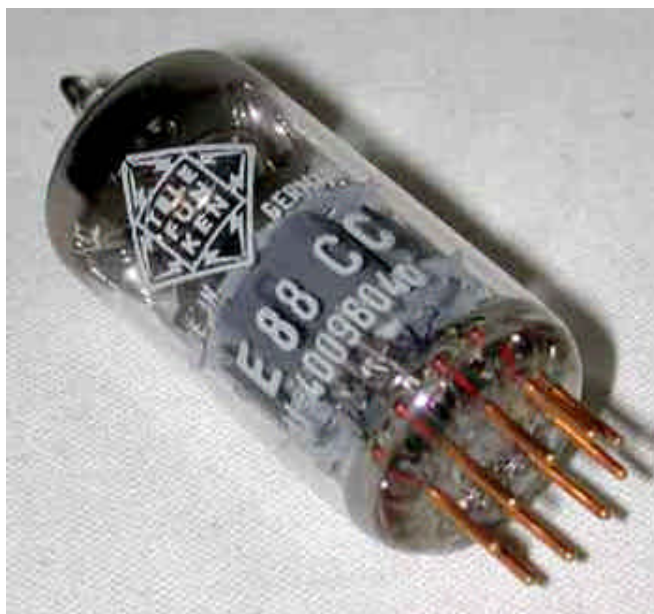


Abb. 183. CASCODE-Verstärker mit galvanischer Kopplung

Diese Schaltung vereint den Vorteil des geringen Rauschens der Triode mit der hohen Verstärkung der Pentode ohne daß Schirmgitterstrom bereitgestellt werden muß.

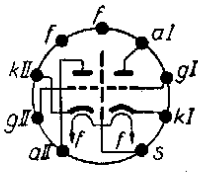
Da die beiden Röhren „übereinander“ angeordnet sind, ist eine ausreichend hohe Anodenspannung erforderlich, wobei bei der oberen Röhre eine hohe Gleichspannung zwischen Heizfaden und Kathode auftritt.

Für diese besonderen Bedingungen ist die Doppeltriode ECC88/E88CC entwickelt worden.



Doppeltriode E88CC

55

Typ und Anwendung	Heizung		Betriebs-Richtwerte		Grenzwerte
	statische Werte				
ECC 88 TGL 9636 Steife Doppeltriode in Spanngittertechnik, die besonders für Kaskode-Schaltungen geeignet ist. System I wird in Katodenbasis- und System II in Gitterbasis-Schaltung benutzt. Ferner läßt sich die Röhre für HF-Verstärkung, für Kippschaltungen sowie als Misch- bzw. Phasenumkehrer verwenden.	$U_f = 6,3 \text{ V}$ $I_f \text{ ca. } 335 \text{ mA}$	$U_a = 90 \text{ V}$ $U_g = -1,3 \text{ V}$ $I_a = 15 \text{ mA}$	$S = 12,5 \text{ mA/V}$	je System $U_{aL} \text{ max } 550 \text{ V}$ $U_a \text{ max } 130 \text{ V}$ $P_a \text{ max } 1,8 \text{ W}$ $-U_g \text{ max } 50 \text{ V}$ $R_g(f) \text{ max } 1 \text{ M}\Omega$ $R_g(k) \text{ max } 1 \text{ M}\Omega$ $I_k \text{ max } 25 \text{ mA}$ $U_{f/kl} \text{ max } 50 \text{ V}$ $R_{f/k} \text{ max } 20 \text{ k}\Omega$ $U_{-f/kl} \text{ max}^{1)} 150 \text{ V}$ $t_{kolb} \text{ max } 170 \text{ }^\circ\text{C}$ ¹⁾ davon Gleichspannungsanteil max. 130 V	
 Novalsockel	je System $U_a = 90 \text{ V}$ $U_g = -1,3 \text{ V}$ $I_a = 15 \text{ mA}$ $S = 12,5 \text{ mA/V}$ $\mu = 33$ $r_a = 300 \text{ }\Omega$	Kapazitäten ohne äußere Abschirmung $c_{gl/klfs} 3,3 \text{ pF}$ $c_{al/klfs} 1,8 \text{ pF}$ $c_{glal} 1,4 \text{ pF}$ $c_{glf} < 0,13 \text{ pF}$ $c_{kl/gllfs} 6,0 \text{ pF}$ $c_{al/gllfs} 2,8 \text{ pF}$ $c_{allgl} < 1,4 \text{ pF}$ $c_{alkll} 0,16 \text{ pF}$ $c_{klif} < 2,7 \text{ pF}$ $c_{alall} < 0,045 \text{ pF}$ $c_{glall} < 0,005 \text{ pF}$ mit Abschirmung 22,5 mm \varnothing gemessen $c_{gl/klfs} 3,3 \text{ pF}$ $c_{al/klfs} 2,5 \text{ pF}$ $c_{glal} 1,4 \text{ pF}$			

Nenngröße 40 nach
 TGL 0-41 539
 Fassung nach TGL 11 608
 Masse: ca. 10 g

c_{glf}	$< 0,13 \text{ pF}$
$c_{kl/gllfs}$	$6,0 \text{ pF}$
$c_{al/gllfs}$	$3,7 \text{ pF}$
c_{allgl}	$< 1,4 \text{ pF}$
c_{alkll}	$0,16 \text{ pF}$
c_{klif}	$< 2,7 \text{ pF}$
c_{alall}	$< 0,015 \text{ pF}$
c_{glall}	$< 0,005 \text{ pF}$

- Beim Einsatz in Kaskode-Schaltungen muß die Gittervorspannung des Gitterbasissystems (II) über einen Spannungsteiler der Anodenspannungsquelle entnommen werden.
- Die Anodenspannung des Eingangssystems (I) darf im ungeregelten Zustand 75 V nicht übersteigen, wenn die Grundvorspannung dieser Stufe durch Gitterstrom erzeugt wird.

Datenblatt der ECC88