Funktechnische Arbeitsblätter

DK 621.385.13.028.4

Röhreneingangswiderstand

Rö 82

2 Blätter

Bei langen Wellen erfolgt die Steuerung der Elektronenröhren leistungslos. Der zum Gitter fließende Strom ist ein reiner (kapazitiver) Blindstrom. Bei hohen Frequenzen ist dies nicht mehr der Fall, zu dem Blindstrom tritt ein Wirkstrom, der eine Bedämpfung des angeschlossenen Gitterkreises bedeutet. Hierdurch werden mit zunehmender Frequenz die erzielbare Verstärkung und Empfindlichkeit vermindert. Dieser Effekt wird im Ersatzschaltbild durch den „Eingangswiderstand" der Röhre dargestellt, den man sich als parallel zur Gitter-Katoden-Strecke der Röhre geschaltet denken kann (Bild 1).

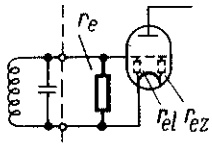


Bild 1. Der Eingangswiderstand im Ersatzschaltbild

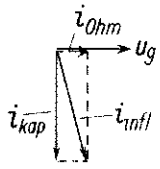


Bild 1a

Bei welcher Frequenz sich dieser Eingangswiderstand praktisch bemerkbar macht, hängt einerseits von dem Resonanzwiderstand des angeschlossenen Gitterkreises und andererseits von der Konstruktion und den Betriebsdaten der Röhre ab. Der Eingangswiderstand ist frequenzabhängig und abhängig von der Konstruktion und den Betriebsdaten der Röhre.

Die Ursachen für das Auftreten des Eingangswiderstandes sind:

1. Dielektrische Verluste und Leitungsverluste. Beide treten bereits an der kalten Röhre auf.
2. Die Elektronenlaufzeiten sind bei hohen Frequenzen nicht mehr verschwindend klein gegen die Periodendauer der steuernden Wechselspannung.
3. Die Zuleitungsinduktivitäten zu den Röhrenelektroden bewirken, daß der sonst rein kapazitive Blindstrom eine ohmsche Komponente erhält.

Nähere Erläuterung zu 1.:

Die dielektrischen Verluste und die Leitungsverluste sind bei UKW so klein gegen die unter Punkt 2 und 3 erwähnten Effekte, daß sie keine Berücksichtigung zu finden brauchen.

Nähere Erläuterung zu 2.:

Im Raume zwischen Katode und Anode (bei der Triode) bzw. zwischen Katode und Schirmgitter (bei der Pentode) bewegen sich Elektronen und diese influenzieren auf dem Steuergitter einen zusätzlichen Strom (Influenzstrom), der außer dem kapazitiven Verschiebungsstrom auftritt. Bei verschwindend kleinen Laufzeiten der Elektronen im Vergleich zur Periodendauer der steuernden Wechselspannung eilt dieser Influenzstrom (ebenso wie der kapazitive Verschiebungsstrom) der Wechselspannung um 90° voraus. Ist jedoch die Laufzeit der Elektronen vergleichbar mit der Periodendauer der Steuerwechselspannung, dann bekommt der durch Influenz zum Gitter fließende Strom eine Phasenverschiebung von weniger als 90° gegen die Steuerwechselspannung. Dieser Strom hat also dann eine ohmsche und eine kapazitive Komponente, wie Bild 1a zeigt.

Die um 90° voreilende Komponente des Influenzstromes entspricht dem Strom durch eine Kapazität (das ist die Raumladungskapazität = Differenz der Eingangskapazität zwischen geheizter Röhre und ungeheizter Röhre), und die mit der Gitterwechselspannung gleichphasige Komponente entspricht dem Strom durch einen ohmschen Widerstand, dem Eingangswiderstandsanteil der Laufzeit r_{el}. Der durch die endliche Elektronenlaufzeit verursachte Anteil des Eingangswiderstandes ist annähernd:

$$r_{el} = \frac{1}{A \cdot S_K \cdot (\omega \cdot \tau_{gk})^2} \qquad (1)$$

S_K = Katodenstromsteilheit
ω = Kreisfrequenz
τ_{gk} = Elektronenlaufzeit zwischen Katode und Gitterebene
A = eine Konstante, die abhängt vom Verhältnis der Anodenspannung (oder Schirmgitterspannung) zum Effektivpotential in der Steuergitterebene und vom Verhältnis

$$\frac{\text{Abstand Katode/Gitter 1}}{\text{Abstand Anode/Gitter 1}} \text{ bzw. } \frac{\text{Abstand Schirmgitter/Gitter 1}}{\text{Abstand Katode/Gitter 1}}$$

oder von der Anoden- und Gitterspannung und dem Verhältnis der Laufzeiten zwischen Anode und Gitter 1 einerseits und Katode und Gitter 1 andererseits. Der Wert von A liegt etwa zwischen den Werten 0,05 und 0,1.

Die Übereinstimmung von Messung und Rechnung für den Eingangswiderstand ist sehr unbefriedigend wegen der notwendigerweise zu machenden vereinfachenden Annahmen. Ursache der Unstimmigkeiten ist die Inhomogenität der Elektronengeschwindigkeit nach Größe und Richtung (Ablenkung der Elektronen in Gitterfeldern). Die Theorie liefert jedoch folgende wichtige qualitative Aussagen, die auch durch die Praxis bestätigt werden:

1. Der elektronische Eingangswiderstand ist proportional dem Quadrat der Wellenlänge. Dieses Gesetz gilt bis herunter zu etwa 1 m Wellenlänge bei UKW-Röhren.
2.* Bei der normalen Raumladungssteuerung ist der Eingangswiderstand stets positiv (er wirkt bedämpfend auf den Gitterkreis).
3. Der Eingangswiderstand ist um so kleiner, je größer die Elektronenlaufzeiten im Katoden-Gitterraum und im Gitter-Schirmgitterraum sind.
4. Die Laufzeit wird also um so größer und damit der Eingangswiderstand um so kleiner,
   a) je größer die Elektrodenabstände werden und
   b) je niedriger (bei konstantem Anodenstrom) die Anodenspannung (bei Trioden) oder die Schirmgitterspannung (bei Pentoden) liegt.

Zu a): Wenn alle Abmessungen des Röhrensystems um einen Faktor A verringert werden, so erhöht sich der Eingangswiderstand um den Faktor A^2. [1., 2.]

Zu b): Wenn die Spannungen um den Faktor B vergrößert werden, so erhöht sich der Eingangswiderstand um den Faktor $\sqrt{B}$. [1., 2.]

Nähere Erläuterungen zu 3.:

Die Zuleitungen zu Katode, Schirmgitter und Anode haben eine gewisse, wenn auch kleine Induktivität, deren Blindwiderstand mit steigender Frequenz zunimmt. Die Zuleitung zur Katode hat den größten Einfluß auf den Eingangswiderstand. Der hier fließende Hf-Wechselstrom erzeugt an dem induktiven Widerstand der Katodenzuleitung einen Span-

* Anmerkung: Bei Sättigungskennlinien treten auch negative Eingangswiderstände auf. Diese haben jedoch zur Entdämpfung der Gittereingangskreise noch keine praktische Bedeutung erlangt, da sie schwer stabil einzustellen sind.

nungsabfall. Diese Spannung hat einen Hf-Strom über die Eingangskapazität der Röhre zum Steuergitter zur Folge, welcher einen Phasenwinkel von weniger als 90° gegenüber der Eingangsgitterwechselspannung aufweist. Das bedeutet, daß eine reelle Komponente vorhanden ist, die denjenigen Anteil des Eingangswiderstandes darstellt, der durch die Zuleitungsinduktivität hervorgerufen wird.

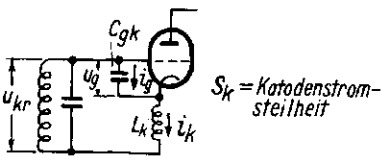


Bild 2. Die Katodeninduktivität L_K als Ursache für einen Teil r_{ez} des Eingangswiderstandes r_e

Nach Bild 2 ist die Wechselspannung zwischen Katode und Gitter

$$u_g = u_{kr} - j\omega L_k i_k$$

Durch die Eingangskapazität C_{gk} der Röhre fließt dadurch ein Wechselstrom i_g zum Steuergitter:

$$i_g = j\omega C_{gk} u_g = j\omega C_{gk} u_{kr} + \omega^2 L_k C_{gk} i_k$$

i_k ist aber annähernd gleich $S_k \cdot u_{kr}$ und damit wird

$$i_g = u_{kr}(j\omega C_{gk} + \omega^2 L_k C_{gk} S_k)$$

Die eine Stromkomponente $u_{kr}\, j\omega\, C_{gk}$ ist ein reiner Blindstrom, die andere ist jedoch mit der Gitterwechselspannung in Phase und bewirkt eine Bedämpfung des Eingangskreises. Diese reelle Stromkomponente kann durch einen Eingangswiderstand r_{ez} dargestellt werden, der die Größe hat

$$r_{ez} = \frac{1}{\omega^2 L_k C_{gk} S_k} \qquad (3)$$

Der Index z bedeutet dabei, daß es sich um den Teil des Eingangswiderstandes handelt, der durch die Zuleitungsinduktivität hervorgerufen wird.

Bei der Betrachtung der Wirkung der Schirmgitterinduktivität allein ergibt sich eine entdämpfende Wirkung auf den Eingangskreis, also ein negativer Eingangswiderstandsteil. Die Wirkung der Katodeninduktivität überwiegt jedoch bei weitem (wenn nicht bewußt eine Schirmgitterinduktivität außen hinzugefügt wird), so daß die Gesamtwirkung der Induktivitäten immer eine Verkleinerung des Röhreneingangswiderstandes hervorruft.

Aus der Formel [3] kann man zwei wichtige Regeln ableiten:

1. Die Kleinhaltung der Katodeninduktivität ist um so wichtiger, je steiler eine UKW-Röhre ist. (Deshalb ist z. B. bei der steilen UKW-Röhre EF 80 die Katode zweimal herausgeführt, d. h., das eine — untere — Ende der Katode ist durch zwei an der Katode parallel geschaltete Drähte mit zwei verschiedenen Sockelstiften verbunden.)

2. Der durch die Zuleitungsinduktivität hervorgerufene Anteil des Eingangswiderstandes r_{ez} ist proportional dem Quadrat der Wellenlänge.

Größe des Anteils r_{ez} und r_{el} vom Gesamteingangswiderstand r_e

Für Grenzempfindlichkeitsbetrachtungen ist es u. U. wichtig, den Anteil r_{el}, der durch Laufzeiteffekt hervorgerufen wird, zu kennen. Dieser Laufzeitanteil rauscht nämlich nicht mit Zimmertemperatur, sondern mit der 1,4-fachen Katodentemperatur, d. h. mit etwa 1400° K. Der Anteil r_{ez} dagegen rauscht praktisch überhaupt nicht. Die Formel [3] läßt eine Abschätzung der Größe r_{ez} zu, wenn die Größe der Katodeninduktivität annähernd festgestellt werden kann. (Für die RV 12 P 2000 ergibt sich z. B. eine Induktivität von etwa 20 cm = $2 \cdot 10^{-8}$ H, für 6 AK 5 ca. $5 \cdot 10^{-9}$ H. Allgemein für Miniaturröhren $5...10 \cdot 10^{-9}$ H, für Metallröhren $12...16 \cdot 10^{-9}$ H laut RCA-Angaben.)

Als Regel für den Anteil r_{el} gilt:

bei Röhren mit normaler Steilheit (≤ 3 mA/V)

$$r_{el} \text{ ca. } 1{,}25 \cdot r_e$$

bei Röhren mit großer Steilheit (≥ 3 mA/V)

$$r_{el} \text{ ca. } 3...5 \cdot r_e.$$

Das durch den Eingangswiderstand hervorgerufene Rauschen ist im äquivalenten Rauschwiderstand nicht mit enthalten, da dieser für kurzgeschlossenen Eingang definiert ist, und muß gesondert berücksichtigt werden.

Größe des gesamten Eingangswiderstandes r_e

Die bedämpfenden Wirkungen der Anteile r_{el} und r_{ez} addieren sich und ergeben so den gesamten Eingangswiderstand:

$$r_e = \frac{r_{el} \cdot r_{ez}}{r_{el} + r_{ez}}$$

Nur der Gesamtwiderstand r_e ist der Messung zugänglich, r_{el} und r_{ez} lassen sich meßtechnisch nicht trennen, weil beide die gleiche quadratische Frequenzabhängigkeit aufweisen.

Auch der Gesamt-Eingangswiderstand r_e wächst also mit dem Quadrat der Wellenlänge. Von der Steilheit ist der Eingangswiderstand linear abhängig, er nimmt mit wachsender Steilheit ab. Die übrigen Einflüsse (Elektrodenabstände usw.) kann man in einem für jeden Röhrentyp charakteristischen Faktor K zusammenfassen, so daß sich für die Berechnung des Eingangswiderstandes die Formel ergibt:

$$r_{e(k\Omega)} = \frac{K \cdot \lambda^2_{(m)}}{S_{(mA/V)}} \qquad (4)$$

Der Wert K ist im Kennlinienfeld der Röhre annähernd konstant. Ist der r_e-Wert für eine bestimmte Röhre (bei gegebener Wellenlänge wird der Wert in den Röhrenkennblättern auf den normalen Arbeitspunkt bezogen) gegeben, so errechnet sich der Faktor K zu:

$$K = \frac{r_{e(k\Omega)} \, S_{(mA/V)}}{\lambda^2_{(m)}} \qquad (5)$$

Dieser Faktor K gibt ein Maß für die Brauchbarkeit der Röhre in UKW-Schaltungen. Tabelle 1 bringt eine Zusammenstellung des Faktors K und der Eingangswiderstände bei verschiedenen Frequenzen für die Steilheit im Arbeitspunkt. Die K-Werte sind unter Zugrundelegung des normalen Arbeitspunktes errechnet. An Hand dieser Tabelle und mit Hilfe von Formel (4) kann man also für beliebige Arbeitspunkte den Eingangswiderstand errechnen. Mit Hilfe der Kurvenschar in Bild 3 kann man die Frequenzabhängigkeit des Eingangswiderstandes für eine Anzahl gebräuchlicher Röhren direkt ablesen. Die Werte gelten für die Steilheit im normalen Arbeitspunkt.

Wenn man bei einer Pentode an die Stelle des Schirmgitters eine massive Anode setzen würde (es entsteht dann eine Triode), so erhält man einen um den Faktor 2 bis 3 höheren Eingangswiderstand. Das beruht offenbar darauf, daß in einer Pentode die Elektronen während einer längeren Flugzeit Ladungen auf dem Steuergitter influenzieren, als dies bei einer Triode der Fall ist.

Nachdruck verboten!

Für die Eingangsschaltung (Antennenkreis) ist die Größe $S\sqrt{r_e}$ ebenfalls von Bedeutung: Wenn die Kreisverluste zu vernachlässigen sind, dann wird die maximale Spannungsüberhöhung erzielt, wenn das Antennenübersetzungsverhältnis gleich der Wurzel aus dem Verhältnis von Röhreneingangswiderstand und Antennenwiderstand R_a ist $\left(\ddot{u}_A = \sqrt{\frac{r_e}{R_A}}\right)$, d. h. wenn der Antennenwiderstand auf den Röhreneingangswiderstand angepaßt wird. Die Gesamtverstärkung der Vorröhre von Antenne zu Anode der Röhre ist damit proportional $S\sqrt{r_e}$.

Der Einfluß des Eingangswiderstandes auf die Grenzempfindlichkeit

In denjenigen Frequenzgebieten, in denen das Außenrauschen (Antennenrauschen) klein wird gegen das Rauschen des Empfängers (Kreise und Röhren), ist das Verhältnis des Eingangswiderstandes einer Röhrenschaltung zum äquivalenten Gitterrauschwiderstand $r_{ä}$ ein eindeutiges Maß für die Grenzempfindlichkeit eines Verstärkers. Bei UKW werden nun die Eingangswiderstände der Röhren so klein, daß sie (bei guten Kreisen) fast allein den gesamten Eingangswiderstand der Röhrenschaltung bestimmen. In diesem Bereich (UKW-Rundfunk und Fernsehen) ist also die Röhrengröße $\frac{r_e}{r_{ä}}$ ein eindeutiges Maß für die mit dieser Röhre erzielbare Grenzempfindlichkeit. Wird die Eingangsstufe allein betrachtet, so ist die Grenzempfindlichkeit auch unabhängig von der Art der Schaltung; es ist also gleichgültig, ob die Röhre in Katodenbasis-Schaltung, Gitterbasis-Schaltung oder Anodenbasis-Schaltung verwendet wird. Auch das optimale Antennenübersetzungsverhältnis bleibt von der Art der Schaltung unberührt. Somit ist die Kenntnis des Wertes $\frac{r_e}{r_{ä}}$ sehr wichtig für die Beurteilung der Röhre als UKW-Vorstufenverstärker. Eine Zusammenstellung der $\frac{r_e}{r_{ä}}$-Werte bei 100 MHz für gebräuchliche Röhrentypen bringt die Tabelle 3.

Tabelle 2

Steilheit und $\frac{S}{2}\sqrt{r_e}$ (Maß für die Stufenverstärkung) für eine Anzahl gebräuchlicher Röhren

Röhrentyp	Steilheit S (mA/V)	$\frac{S}{2}\sqrt{r_e}$ bei einer Frequenz von: 200 MHz (1,5 m)	150 MHz (2 m)	100 MHz (3 m)	50 MHz (6 m)	30 MHz (10 m)	
AF 7	2,1	0,5	0,7	1	2,1	3,5	
AF 100	10,5	1,9	2,5	3,9	7,4	13	
AL 4	9	—	—	—	—	3,7	
CF 1	2,3	0,38	0,5	0,8	1,6	2,6	
ECF 12	2	0,95	1,3	1,9	3,8	6,3	Pentodenteil
EF 12	2,1	0,95	1,3	1,9	3,8	6,3	
EF 14	7	1,25	1,7	2,6	5,2	8,6	
EF 15	5,5	1	1,4	2,1	4,3	7,1	
EF 42	9,5	2,6	3,5	5,3	11	18	
EF 50	6,5	1,6	2,2	3,2	6,5	11	
EFF 50	10	4,2	5,5	8,4	16,5	28	je System
EF 80	7,2	3,1	4,1	6,2	12,5	21	
EF 85	5,7	2,7	3,5	5,3	10,5	18	
EF 91	7,7	2,55	3,4	5,1	10	17	
LV 1	9,5	2,1	2,85	4,3	8,5	14	
LV 2	2,2	2,1	2,8	4,25	8,5	14	
LV 4	8,5	3,7	5	7,4	15	25	je System
RD 12 P 6	2,6	1,2	1,65	2,5	5	8	
RV 2 P 800	1	0,45	0,6	0,9	1,8	3	
RV 2,4 P 700	1	0,75	1	1,5	3	5	
RV 2,4 P 701	0,9	0,8	1,05	1,6	3,2	5,5	
RV 2,4 P 1400	3,3	0,95	1,3	1,9	3,9	6,4	
RV 12 P 2000	1,5	1	1,35	2	4	6,7	
RV 12 P 2001	1,4	1,15	1,5	2,3	4,6	7,7	
RV 12 P 3000	10	1,8	2,4	3,5	7,1	12	
RV 12 P 4000	2,3	0,65	0,9	1,3	2,6	4,5	
UF 42	8,5	2,1	2,8	4,1	8,3	14	
6 AB 7	4,7	1,3	1,75	2,6	5,25	8,8	
6 AC 7	9	1,6	2,2	3,3	6,7	11	
6 AG 5	5	2,3	3,1	4,6	9,2	15	
6 AH 6	10	3,1	4,1	6,1	12	20	
6 AK 5	5,1	3,6	4,8	7,2	14,5	24	
6 AU 6	5,2	1,7	2,25	3,4	6,8	11,3	
6 SG 7	5	1,6	2,15	3,2	6,4	10,6	
6 SH 7	5,5	1,75	2,3	3,5	7	11,5	
6 SJ 7	1,5	0,52	0,69	1,03	2,05	3,4	
6 SK 7	2	0,7	0,95	1,4	2,8	4,7	
9001	1,5	1,5	2	3	6	10	
9003	1,9	1,85	2,45	3,7	7,35	12,2	
ECC 81	6	3,15	4,25	6,4	13	21	Doppeltriode, je System
LV 2	2,7	2,55	3,4	5,1	10,3	17	als Triode
RV 12 P 2000	2	1,3	1,75	2,6	5,3	8,8	als Triode
6 AK 5	6,7	4,7	6,3	9,5	19	32	als Triode
6 J 6	5,3	2,9	3,8	5,8	12	19,5	Doppeltriode, je System
12 AT 7	= ECC 81						

Literatur

1. Telefunkenröhre, Heft 9 (April 1937), Seite 33—65, H. Rothe: Das Verhalten von Elektronenröhren bei hohen Frequenzen.
2. F. E. Termann, Radio Engineers Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York 1943.
3. Deketh: Grundlagen der Röhrentechnik, 1. Band, 3. Auflage, 1945, (Philips Technische Bibliothek).
4. Strutt: Moderne Mehrgitter-Elektronenröhren, II: Band, Springer, Berlin 1938.

Tabelle 3

$\frac{r_e}{r_{ä}}$-Werte (Maß für die erzielbare UKW-Grenzempfindlichkeit) für gebräuchliche Röhrentypen

Röhrentyp	$\frac{r_e}{r_{ä}}$ bei 100 MHz (3 m)	$r_{ä}$ (kΩ)	
AF 7	0,2	5	
AF 100	1,08	0,5	
ECF 12	1,44	2,5	Pentodenteil
EF 12	0,58	5,5	
EF 14	0,64	0,85	
EF 15	0,4	1,5	
EF 42	1,67	0,75	
EF 50	0,71	1,4	
EFF 50	4,65	0,6	je System
EF 80	3	1	
EF 85	2,3	1,5	
EF 91	1,45	1,2	
LV 1	1	0,8	
LV 2	4,3	3,5	
LV 4	3,33	0,9	je System
RD 12 P b	1,2	3	
RV 2 P 800	0,28	11	
RV 2,4 P 700	1,12	8	
RV 2,4 P 701	1,14	11	
RV 2,4 P 1400	0,68	2	
RV 12 P 2000	1,6	4,5	
RV 12 P 2001	1,57	7	
RV 12 P 3000	0,62	0,8	
RV 12 P 4000	0,32	4	
UF 42	1	0,94	
6 AC 7	0,83	0,65	
6 AG 5	1,8	1,9	
6 AK 5	4,2	1,9	
6 AU 6	0,63	2,7	
6 BA 6	0,45	3,8	
ECC 81	9	0,5	Doppeltriode, je System
LV 2	15,5	0,93	als Triode
RV 12 P 2000	5,6	1,25	als Triode
6 AK 5	21	0,38	als Triode
6 J 6	10	0,47	Doppeltriode, je System
12 AT 7	= ECC 81		

Nachdruck verboten!

Einfluß des Eingangswiderstandes auf die Stufenverstärkung bei UKW

Folgen in einem Verstärker zwei oder mehr Röhren aufeinander, so ist das Verhältnis der Gitterwechselspannung u_{g2} der zweiten (n-ten) Röhre zu der Gitterwechselspannung u_{g1} der vorhergehenden (n-1ten) Röhre als Stufenverstärkung V_{st} definiert (Bild 4). Bei nicht unendlich hohem Eingangswiderstand der Röhren ist die Stufenverstärkung nicht gleich der herkömmlich definierten Verstärkung $\left(\frac{u_a}{u_g}\right)$, sondern kleiner.

Die Parallelschaltung R_p von Außenwiderstand und Innenwiderstand der Röhre ist mit dem Eingangswiderstand der folgenden Röhre belastet. Für maximale Verstärkung muß dieser Eingangswiderstand an den resultierenden Außenwiderstand R_p angepaßt werden (Bild 4). Bei Anpassung von r_e wird R_p halbiert, ferner wird die Spannung am Gitter im Verhältnis ü untersetzt. Die Stufenverstärkung ist

$$V_{st} = S \cdot \frac{R_{p/2}}{\ddot{u}}$$

Tabelle 1
Faktor K und Eingangswiderstände für gebräuchliche Röhrentypen im UKW-Bereich

Röhrentyp	K	Eingangswiderstand r_e bei normaler Steilheit (kΩ) bei 200 MHz (1,5 m)	bei 150 MHz (2 m)	bei 100 MHz (3 m)	bei 50 MHz (6 m)	bei 30 MHz (10 m)	
AF 7	0,23	0,25	0,45	1	4	11	
AF 100	0,6	0,13	0,23	0,54	2,2	6	
AL 4	0,06	—	—	—	—	0,67	
CF 1	0,115	0,11	0,2	0,45	1,8	5	
ECF 12	0,8	0,9	1,6	3,6	14,5	40	Pentodenteil
EF 12	0,76	0,8	1,45	3,2	13	36	
EF 14	0,4	0,13	0,23	0,54	2,2	6	
EF 15	0,37	0,15	0,27	0,6	2,4	6,7	
EF 42	1,32	0,3	0,55	1,25	5	14	
EF 50	0,72	0,25	0,45	1	4	11	
EFF 50	3,1	0,7	1,24	2,8	11	31	je System beide Kat.-Anschl. verb.
EF 80	2,4	0,75	1,33	3	12	33	
EF 85	2,2	0,87	1,55	3,5	14	39	
EF 91	1,5	0,44	0,78	1,75	7	20	
LV 1	0,85	0,2	0,36	0,8	3,2	8,5	
LV 2	3,6	3,7	6,5	15	60	160	
LV 4	2,9	0,77	1,4	3	12	34	je System
RD 12 Pb	1,04	0,9	1,6	3,6	14,5	40	
RV 2 P 800	0,35	0,8	1,4	3,1	12,5	35	
RV 2,4 P 700	1	2,25	4	9	36	100	
RV 2,4 P 701	1,4	3,15	5,6	12,5	50	150	
RV 2,4 P 1400	0,5	0,34	0,6	1,35	5,5	15	
RV 12 P 2000	1,2	1,8	3,2	7,2	29	80	
RV 12 P 2001	1,7	2,7	4,8	11	44	120	
RV 12 P 3000	0,6	0,13	0,23	0,50	2,0	5,7	
RV 12 P 4000	0,34	0,33	0,6	1,3	5,3	15	
UF 42	0,9	0,24	0,43	0,95	3,8	11	
6 AB 7	0,65	0,31	0,55	1,25	5	14	
6 AC 7	0,54	0,13	0,23	0,54	2,2	6	
6 AG 5	1,9	0,85	1,5	3,4	13,7	38	
6 AH 6	1,67	0,38	0,67	1,5	6	17	
6 AK 5	4,55	2	3,5	8	32	90	
6 AU 6	0,98	0,43	0,75	1,7	6,8	19	
6 BA 6	0,83	0,43	0,75	1,7	6,8	19	
6 SG 7	0,915	0,41	0,73	1,65	6,6	18	
6 SH 7	0,98	0,4	0,71	1,6	6,4	17,5	
6 SJ 7	0,317	0,48	0,85	1,9	7,6	21	
6 SK 7	0,445	0,5	0,9	2	8	22	
9001	2,7	4	7,2	16,2	65	180	
9003	3,2	3,8	6,7	15,1	60	166	
ECC 81	3	1,1	2	4,5	18	50	Doppeltriode, je System
LV 2	4,35	3,6	6,4	14,5	58	160	als Triode
RV 12 P 2000	1,54	1,7	3,1	7	28	77	als Triode
6 AK 5	5,9	2	3,5	8	32	90	als Triode
6 J 6	2,85	1,2	2,1	4,8	20	54	Doppeltriode, je System
12 AT 7	=	ECC 81					

ü wird bei Anpassung ü = $\sqrt{\frac{R_p}{r_e}}$

und damit wird

$$V_{st} = \frac{S}{2}\sqrt{R_p \cdot r_e} \qquad (6)$$

Die Stufenverstärkung wird also mit der Wurzel aus der Vergrößerung von r_e größer. Wenn r_e infolge höherer Frequenz mit $1/f^2$ abnimmt, so nimmt die Stufenverstärkung nur mit 1/f ab. Die frequenzabhängige Größe $\frac{S}{2}\sqrt{r_e}$ ist ein Maß für die Stufenverstärkung einer Röhre. Je höher der Wert, um so besser ist sie zur UKW-Verstärkung geeignet. Eine Zusammenstellung für gebräuchliche Röhren bringt Tabelle 2. Bei bekanntem Wert R_p braucht der Wert in der Tabelle nur mit der Wurzel aus R_p multipliziert zu werden, um die Stufenverstärkung zu erhalten.

Also $V_{st} = \frac{S}{2}\sqrt{r_e} \cdot \sqrt{R_p}$

z. B. EF 80, 100 MHz, Kreiswiderstand (R_p) 5 kΩ.
$V_{st} = 6{,}2 \cdot 5 = 31$fach.

Das gilt natürlich nur für die Frequenz, für die auch $\frac{S}{2}\sqrt{r_e}$ angegeben ist.

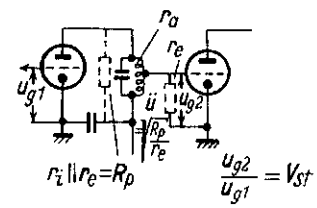


Bild 4. Erläuterung der Stufenverstärkung. Maximale Verstärkung tritt auf bei Anpassung von r_e an R_p.

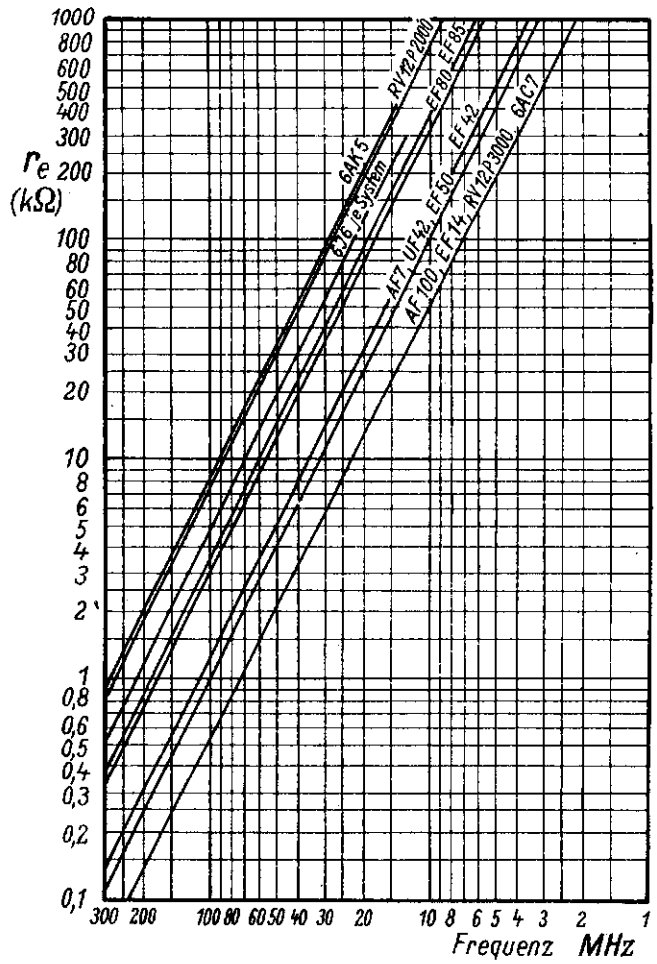


Bild 3. Eingangswiderstand einiger Röhren in Abhängigkeit von der Frequenz. Als Steilheit ist diejenige im normalen Arbeitspunkt zugrundegelegt.