

Arbeitskennlinien

1. statische und dynamische Kennlinien

a) statische Kennlinien

Bei der statischen Kennlinie wird nur die Röhre ohne ihre Umgebungschaltung betrachtet. An eine der Elektroden der Röhre wird eine variable Spannung gelegt. Alle anderen Elektroden erhalten eine fixe Spannung (ohne Vorwiderstände). Je nachdem welche Spannung man variabel macht, kann man U_{g1} , U_a oder U_{g2} -Kennlinien aufnehmen.

Die statischen Kennlinien eignen sich optimal um Röhren zu matchen oder die Röhren mit den Daten der Röhrenhersteller zu vergleichen.

b) dynamische Kennlinien

Diese werden auch als **Arbeitskennlinien** bezeichnet.

Bei dynamischen Kennlinien wird das Verhalten der Röhre in einer Schaltung bestimmt, also mit Lastwiderstand (-Widerständen). Der Unterschied zur statischen Kennlinie besteht darin, dass sich bei Änderung eines Parameters (U_{g1}) auch andere Parameter ändern und nicht fix sind. Beispiel Triode mit Widerstandskopplung: Am Lastwiderstand fällt eine Spannung ab, die vom Röhrenstrom abhängt. Verringert man U_{g1} steigt der Anodenstrom an. Damit erhöht sich die Spannung über den Lastwiderstand, bzw. die Spannung an der Anode sinkt. Die Kennlinie wird also von mehreren Parametern beeinflusst. Bei Pentoden kommt noch der Einfluss durch Beschaltung des Schirmgitters hinzu.

Dynamische Kennlinien sind geeignet um passende Arbeitsbereiche der Röhre in einer Schaltung zu finden; den zu erwartenden Klirrfaktor zu bestimmen; etc.

2. Ermittlung dynamischer Kennlinien

Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten:

a) Zeichnerische Lösung

Dies ist der klassische Lösungsansatz, der in zahlreichen Röhrenbüchern (Barkhausen, Kammerloher, u.a.) beschrieben wird.

Es wird eine statische Kennlinienschar (nach U_a als Variable) aufgenommen. Anschließend wird eine Widerstandgerade nach dem jeweiligen Lastwiderstand eingezeichnet (rechter Teil der Abbildung). Anschließend werden die Werte über eine von U_{g1} abhängiges Diagramm (links) übertragen und man hat die Arbeitskennlinie (hier für eine Triode, bei Pentoden funktioniert es genauso).

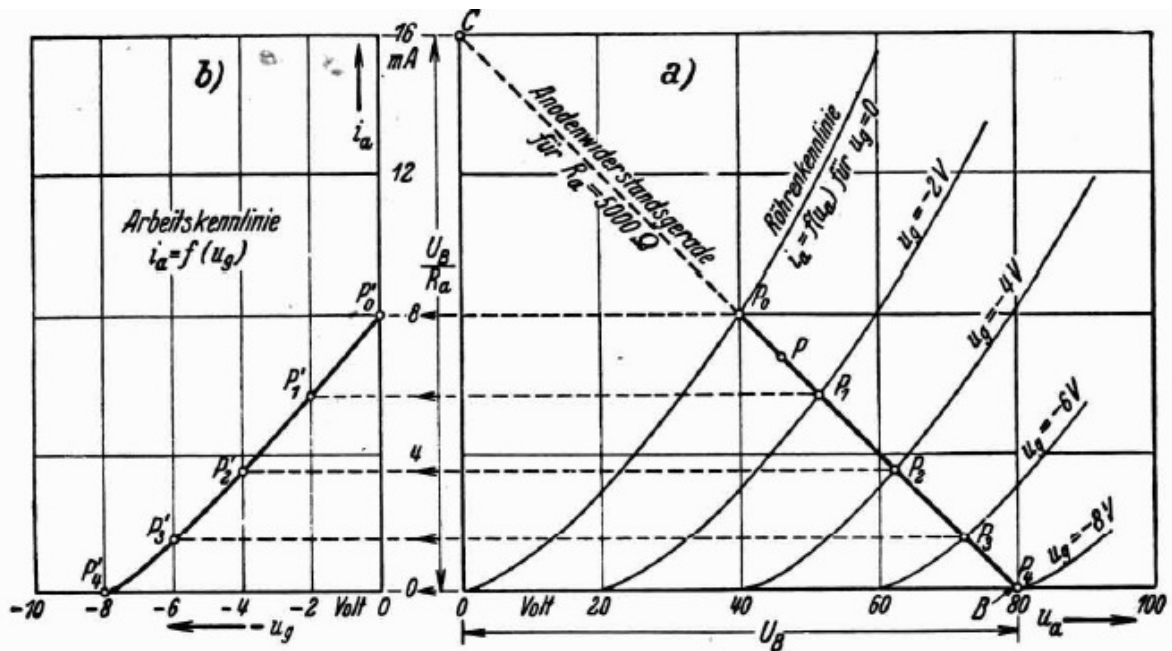


Abb. 185. Konstruktion der Anodenwiderstandsgeraden und der Arbeitskennlinie $i_a = f(u_g)$.

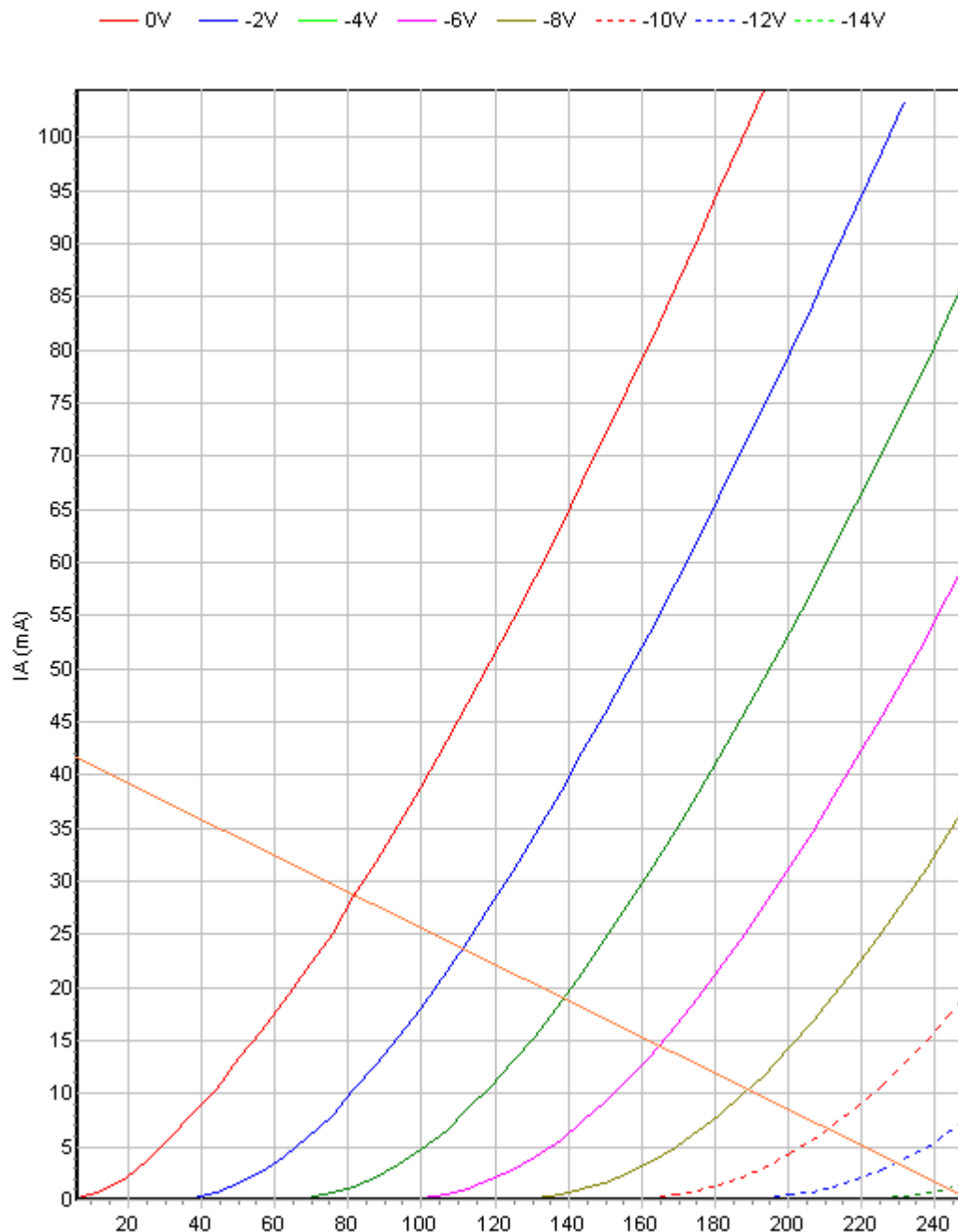
Aus der Arbeitskennlinie kann man den optimalen Aussteuerbereich für niedrigen Klirrfaktor, optimale Anpassung, und die erforderliche Gitterwechselspannung entnehmen. Vorstehende Zeichnungen geben die Verhältnisse bei Widerstandskopplung wieder ($U_a = 80V$).

Ersetzt man den Widerstand durch einen Ausgangsübertrager ändern sich die Verhältnisse: Unter Annahme eines idealen Übertragers (ohmscher Widerstand = 0 Ohm) fällt bei Nichtaussteuerung der Röhre keine Spannung über die Last ab. Im Ruhezustand liegt also die volle Betriebsspannung an der Röhre. Bei Aussteuerung schwankt die Anodenspannung um die Betriebsspannung. Die zeichnerische Lösung ist auch hier möglich und wird in den genannten Büchern erläutert.

Vorteile dieser Methode: Anschaulich und nachvollziehbar.

Nachteile: Die Aufnahme vieler Kennlinien ist nötig. Durch zeichnerische Ungenauigkeiten kommt es leicht zu Verzerrungen. Die wenigen Punkte geben die Arbeitskennlinie nur in grobem Raster wieder. Bei komplexeren Schaltungen (z.B. zusätzlichen Widerstand vor Schirmgitter oder Ultraliniearschaltung - das Schirmgitter liegt an einer Anzapfung des Ausgangstrafos - kommt man mit dieser Methode nicht mehr zu einer Lösung.

Nachstehend ein Beispiel:



EL84 als Triode, Kennlinienschaar U_a bei konstanten U_{g1} mit orange eingezeichneter Widerstandsgeraden für $R_a = 5400 \Omega$
(stat. Kennlinien mit RoeTest aufgenommen - Die Ableitung der Arbeitskennlinie muss man noch von Hand zeichnen).

b) mathematische Lösung

Ob es tatsächlich auf mathematischem Wege möglich ist aus der statischen Kennlinienschaar, bzw. Messpunkten, eine Arbeitskennlinie zu errechnen, entzieht meinen mathematischen Fähigkeiten. Auf jeden Fall wird dies sehr aufwändig sein. Bei Einfluß mehrerer Faktoren (z.B. zusätzlichem Schirmgitter mit Beschaltung) wird der Aufwand sicherlich ins Unermessliche steigen, vermutlich unmöglich sein. Ich habe diesen Ansatz nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

c) Arbeitskennlinie durch Annäherung

Es ist auch möglich eine Arbeitskennlinie durch Annäherung ohne jeglichen Vorwiderstand aufzunehmen.

Man misst einen Punkt der Kennlinie U_{g1} und erhält einen bestimmten Strom. Nimmt man dann einen bestimmten Ausgangswiderstand an fällt über diesen die Spannung ($I_a \times R_a$) ab. Man reduziert dann U_a im Messgerät um diesen Betrag und erhält anschließend einen neuen I_a . Die Annäherung führt man solange fort bis sich ein Gleichgewicht ergibt. Dies macht man für alle Messpunkte von U_{g1} und erhält so eine Arbeitskennlinie.

Vorteile:

- ohne Vorwiderstand möglich

Nachteile:

- sehr aufwändig - nur durch eine automatische Lösung sinnvoll
- Ungenauigkeiten durch Messgeräteaflösung
- bei komplexen Schaltungen uferlos (Schirmgitter!)

d) Arbeitskennlinie durch Simulation

Stichwort: Spice. Mit den Simulationsprogrammen lassen sich auch kompliziertere Schaltungen simulieren. Das Problem liegt hier in den Röhrenmodellen. Es gibt nur für wenige Röhrentypen mehr oder weniger genaue Röhrenmodelle.

Vorteile:

- schnelle Schaltungsentwicklung

Nachteile:

- gewisse Abweichungen vom ist

Meine Meinung: Wem's gefällt. Ich bin mehr der Praktiker und übe mich lieber in realen Schaltungen.

e) messtechnische Lösung

Dies ist mein bevorzugter Ansatz. Deshalb führe ich diese Möglichkeit etwas weiter aus.

Was liegt näher, als einfach real die Röhre mit Bauteilen zu beschalten und dann die Kennlinie zu messen? Dazu sind einige Überlegungen notwendig. Bei der Kennlinienaufnahme arbeiten wir mit reinen Gleichspannungen. Aus diesem Grunde können wir keine Übertrager, sondern nur Lastwiderstände bei der Messung verwenden.

Widerstandskopplung:

Hat die Röhre einen Widerstand als Last (Widerstandskopplung) braucht man auch nur einen entsprechenden Widerstand in die Anodenzuführung einzuschleifen. U_b des Messgeräts = U_b der realen Schaltung.

Übertragerkopplung:

Hat die Röhre eine induktive Last (Ausgangstrafo), dann gilt das unter a) gesagte. Es wird anstelle des Übertragers ein ohmscher Widerstand in die Messvorrichtung geschaltet, der dem Wechselstromwiderstand entspricht. Die Betriebsspannung der Messvorrichtung muß gegenüber der realen Schaltung um die Hälfte der Aussteuerung (Spannungsschwankung an Anode) erhöht werden. Da man am Anfang die Aussteuerung nicht kennt sind evtl. mehrere Versuche mit verschiedenen Betriebsspannungen nötig. Dabei ist zu

berücksichtigen, dass die tatsächlichen Verhältnisse wegen der nicht bekannten Phasenverschiebungen bei induktiver Last vom Ergebnis diese Methode abweichen können. Für eine Grobeinschätzung reicht diese Methode aber (mit der zeichnerischen Methode geht es auch nicht besser).

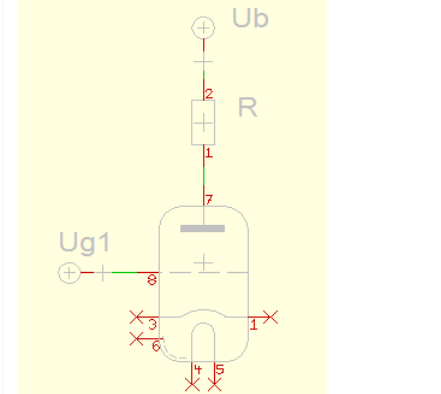
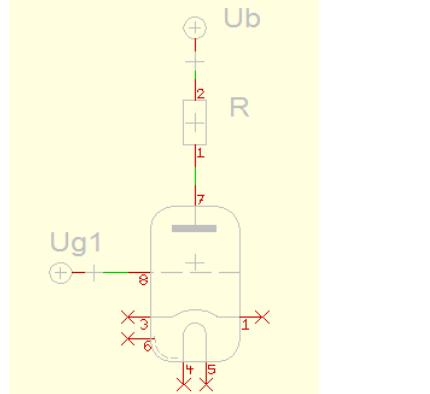
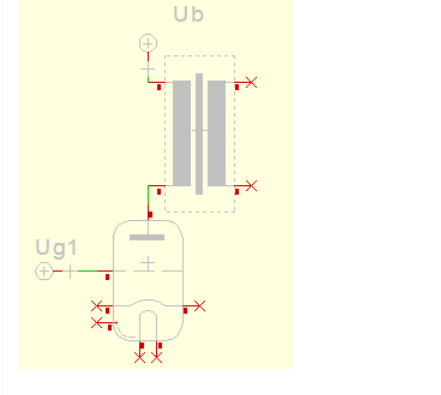
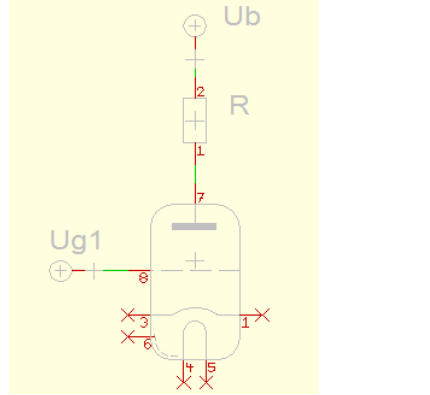
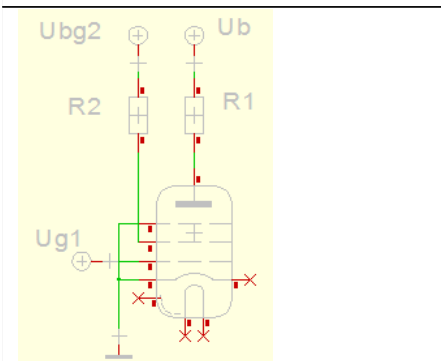
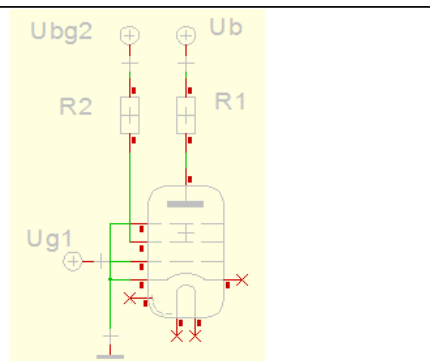
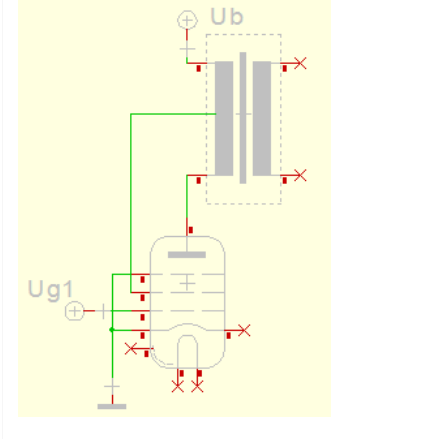
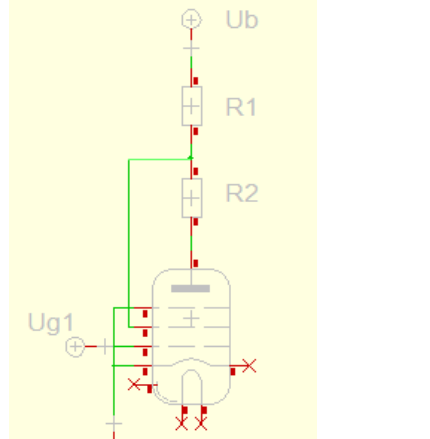
Vorteile:

- Einfach durchzuführen
- mit nur einer Kennlinienaufnahme hat man schon eine Arbeitskennlinie ($f(U_{g1})$)
- bei genügender Anzahl von Messpunkten bekommt man eine genaue Kennlinie
- auch für komplexere Schaltungen ist eine Kennlinienaufnahme möglich (Beschaltung Schirmgitter)

Nachteile:

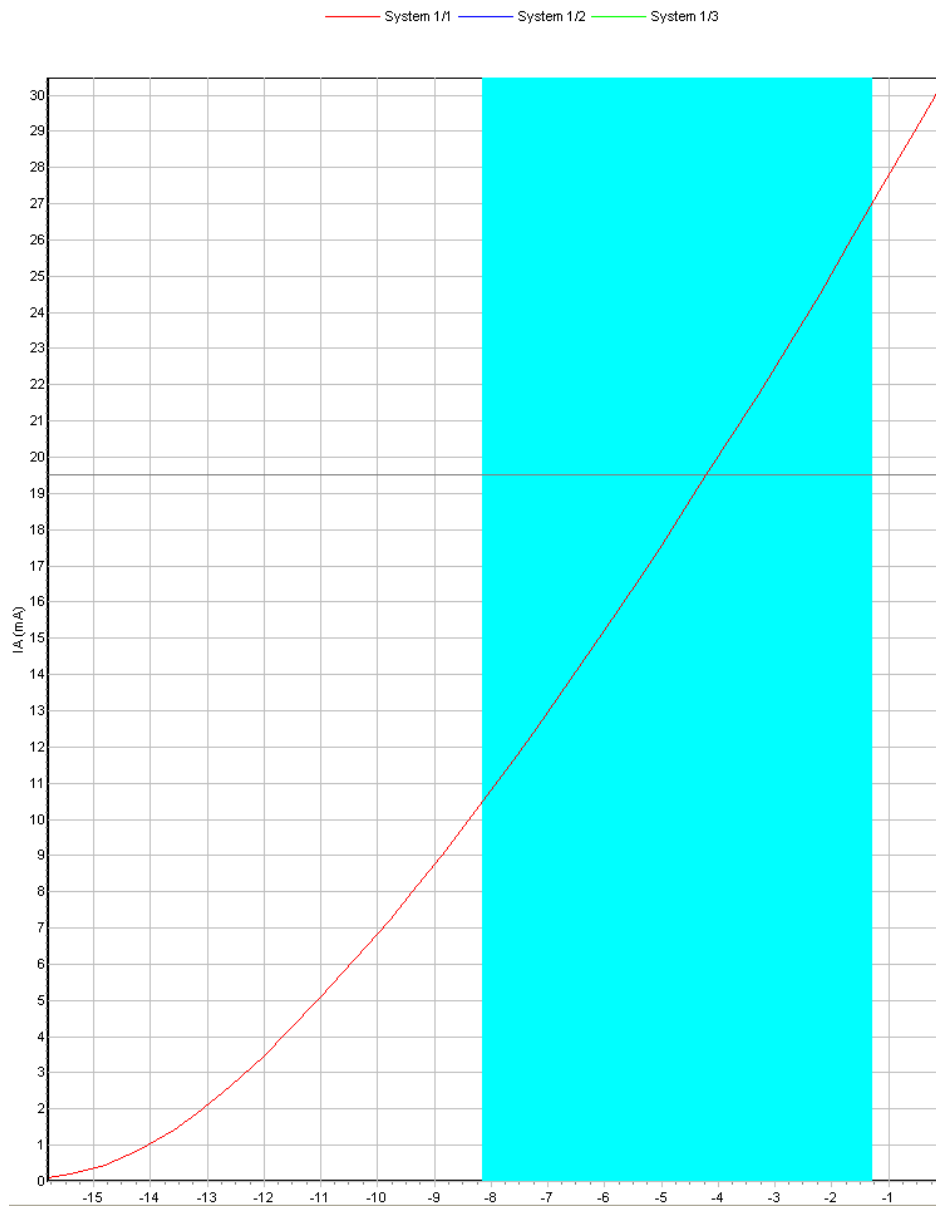
- man muss manuell passende Widerstände in die Zuleitungen zur Röhre einschleifen
- bei komplexeren Schaltungen oder Ausgangsübertrager muss man etwas überlegen.

Einige Beispiele für Messanordnungen:

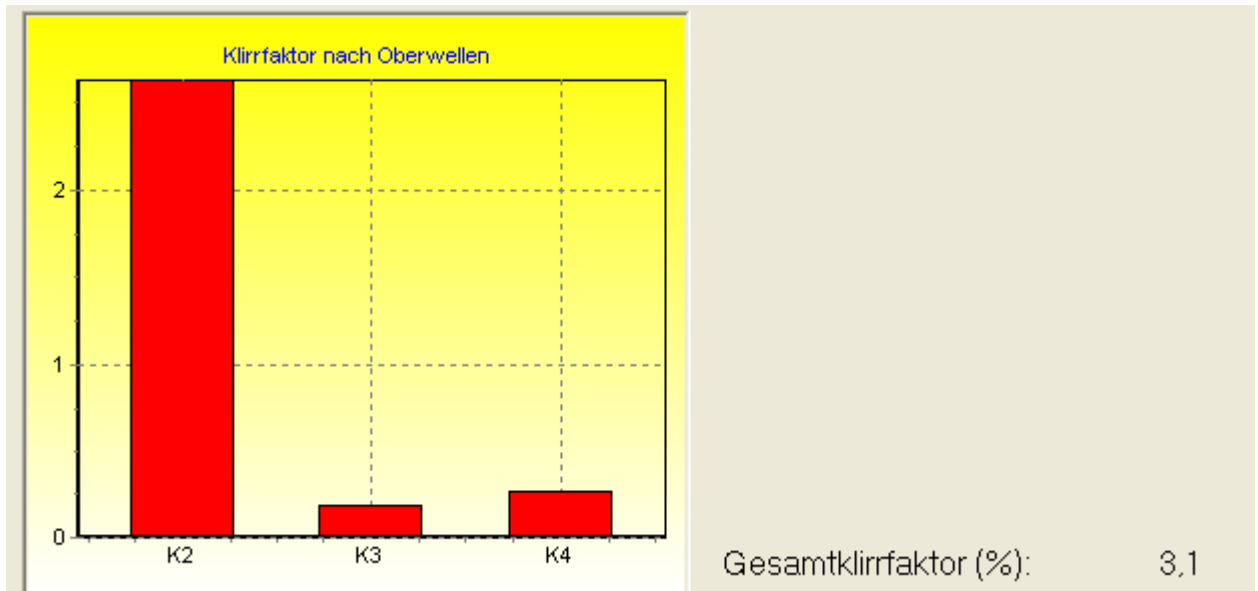
reale Schaltung	Schaltung der Messanordnung	Bemerkungen
		<p>Triode mit Widerstandskopplung R Messgerät = R reale Schaltung U_b Messgerät = U_b reale Schaltung</p>
		<p>Triode mit Ausgangsübertrager R Messgerät = primärer Wechselstromwiderstand des Übertragers (= sekundäre Belastung * Übersetzungsverhältnis²) U_b Messgerät = U_b reale Schaltung+1/2 Aussteuerung</p>
		<p>Pentode mit Widerstandskopplung R_1, R_2 Messgerät = R_1, R_2 reale Schaltung U_b Messgerät = U_b Messgerät U_{bg2} Messgerät = U_{bg2}</p>
		<p>Pentode mit Übertragerkopplung und Ultraliniearschaltung $R_1 + R_2$ = primärer Wechselstromwiderstand des Übertragers. Verhältnis $R_1 : R_2$ entsprechend Anzapfung am Übertrager U_b Messgerät = U_b reale Schaltung+1/2 Aussteuerung</p>

Weitere Möglichkeiten lassen sich fortsetzen.

Nachstehend ein Beispiel:

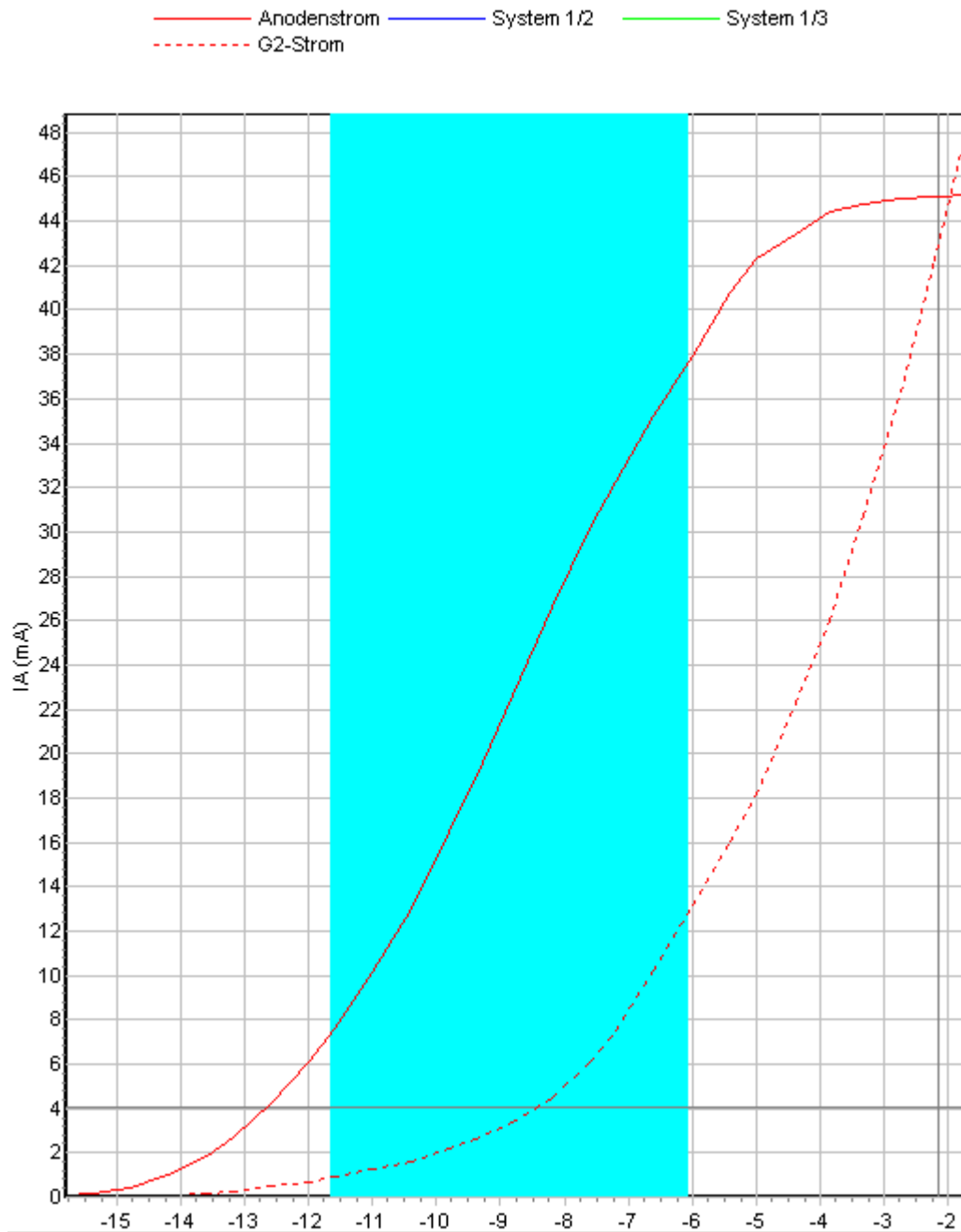


reale Messung Arbeitskennlinie EL84 als Triode, $R_a=5400$ Ohm (Widerstandskopplung - eingeschleift ist ein Widerstand von 5400 Ohm in die Anoden- /G2-Zuleitung).



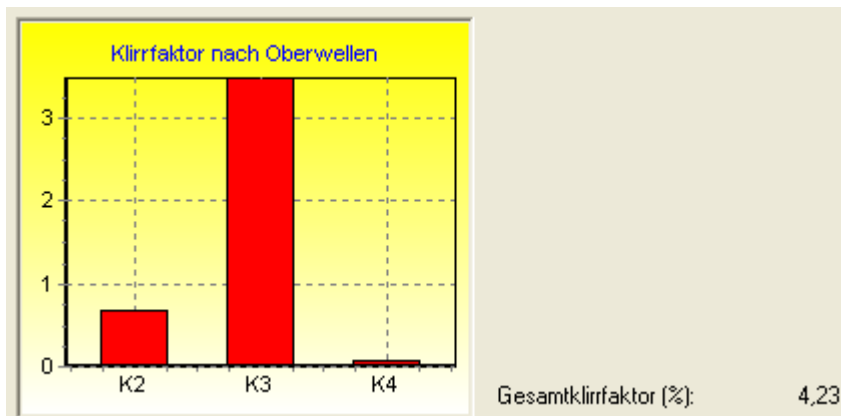
Klirrfaktor - ermittelt aus vorstehender Arbeitskennlinie (RoeTest). Vor allem K2 (der so ermittelte Klirrfaktor wird immer minimal über dem tatsächlichen Klirr liegen, da die aufgenommene Kennlinie nicht unendlich viele Messpunkte hat und es an jedem Messpunkt sozusagen einen winzigen "Knick" gibt).

weiteres Beispiel - Pentode:



EL84 als Pentode. $R_a=5400\ \Omega$, $U_b=250\text{V}$ (Widerstand $5400\ \Omega$ vor Anode), $U_{g2}=250\text{V}$ (fix)

EL84 mit Arbeitsbereich und dem sich darauf ergebenden Klirrfaktor:



wie erwartet: Größere Anodenströme bei gleicher Last gegenüber der Triodenschaltung, aber Klirrfaktor K_3 höher.

Literatur:

- Lehrbuch der Elektronenröhren, Barkhausen, Band 1, S.Hirzel Verlag Leipzig (Ausgabe 1965)
- Elektronenröhren und Verstärker, J. Kammerloher, C.F. WINTER'SCHE VERLAGSHANDLUNGIFÜSSEN, (7. Auflage 1958)
- Inside the vakuum tube, John F. Rider, John F. Rider Publisher Inc. (1945)