

Die Nichtlinearität der Röhrenheizung

Manfred Zollner

Der Heizdraht einer Verstärkerröhre stellt einen nichtlinearen Widerstand dar: Heizdrähte sind Kaltleiter, zwischen Heiß- und Kaltwiderstand liegt ungefähr der Faktor sieben. Nur bei sehr kleinen Spannungen ist der Widerstand linear, ab ca. 2-3% Nennspannung knickt die U/I -Kurve ab. Dieser Zusammenhang lässt sich in guter Näherung auf zwei einfache physikalische Gesetze zurückführen, die im Folgenden ausführlich erläutert werden.

Die Röhrenheizung – braucht's da mehrere Seiten? Reicht nicht $6.3V / 0.15A$, oder was auch immer unter U_f / I_f im Datenblatt steht? Nun, für die Trafodimensionierung reichen diese Angaben, aber als Beispiel für ein nichtlineares System ist die Röhrenheizung schon ein paar Seiten Text wert. Denn: Der Heizdraht, der die Kathode zum Glühen bringt, wird sehr heiß. Und bei Hitze, auch das steht in Datenblättern, erhöht sich der Widerstand eines jeden Metalls ganz erheblich. Ungefähr auf das Siebenfache beim Röhren-Heizdraht – und das ist schon ein gewaltiger Effekt. Heizdrähte, oder wie man auch sagt, -fäden (daher der Index f für *Filum*), sind **Kaltleiter**. Misst man bei sehr kleinen Spannungen, hat der Heizdraht z.B. 6Ω , bei Nennspannung ($6.3V$) hingegen 42Ω . Das an sich wäre auch noch nichts Besonderes, der Verlauf der U/I -Kennlinie ist dann aber doch etwas überraschend (**Abb. 1**): In der doppellogarithmischen Darstellung ergeben sich näherungsweise zwei Gerade, die aber mit unterschiedlicher Steigung verlaufen. Was ist der Grund für diesen Knick? Lässt sich der Kurvenverlauf berechnen, welches Gesetz liegt ihm zugrunde? Ehe auf diese Fragen näher eingegangen wird, soll zuerst ein mögliches Missverständnis ausgeräumt werden: Der Zusammenhang zwischen U und I ist nichtlinear, der Heizdraht ist ein **nichtlinearer Widerstand**. Es wäre aber falsch, daraus nun zu einem sinusförmigen Spannungsverlauf einen "verbogenen" Stromverlauf abzuleiten. Nein, auch der Strom verläuft (bei 50Hz) sinusförmig.

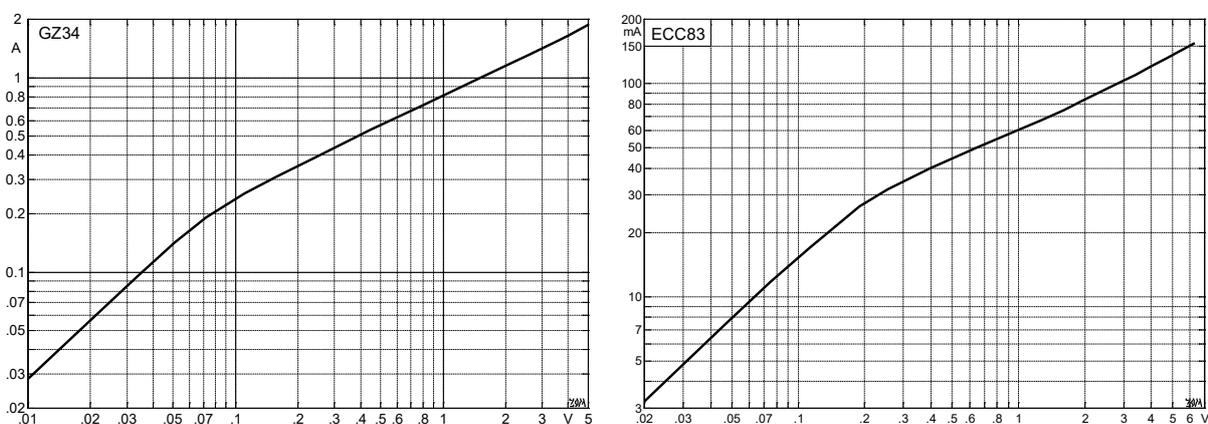


Abb. 1: Mit Gleichspannung gemessene Kennlinien: Heizstrom vs. Heizspannung.

Abb. 2 erweitert die Messkurve für negative Werte, und zeigt im rechten Bild einen aus dieser Kurve (für sinusförmige Spannung) abgeleiteten Stromverlauf. Einen falschen Verlauf, denn die links gezeichnete Kurve entsteht nur, wenn sich die zur jeweiligen Spannung gehörende Temperatur einstellen kann. Die **thermische Trägheit** des Heizdrahts ist groß, einige zig Sekunden muss man schon warten, bis sich der jeweilige Messwert stabilisiert hat. Demgegenüber ändert sich eine 50-Hz-Schwingung so schnell, dass das Metall keine Zeit hat, seine Temperatur wesentlich zu verändern. Für eine sinusförmig verlaufende 50-Hz-Spannung ist der U/I -Zusammenhang deshalb **linear** – jedoch ist der Quotient (der Widerstand) vom Effektivwert abhängig. Bei einer Sinusspannung, deren Effektivwert $\tilde{U} = 5\text{V}$ beträgt, pendelt der Momentanwert zwischen -7V und $+7\text{V}$. Der für die Erwärmung wichtige Leistungsmittelwert ergibt sich aber nicht aus dem Produkt der Momentanwerte von Strom und Spannung, sondern aus dem Produkt der Effektivwerte ($5\text{V} \cdot 1.87\text{A} = 9.35\text{W}$). Der Momentanwert läuft in **Abb. 3** auf der flachsten Linie. Reduziert man die Spannung auf 2V_{eff} , verringert sich der Widerstand, die Linie verläuft steiler. Bei nicht zu niedriger Frequenz (also z.B. bei 50Hz) läuft der Momentanwert aber immer auf einer geraden Linie, für sinusförmige Spannungen ist auch der Stromverlauf sinusförmig.

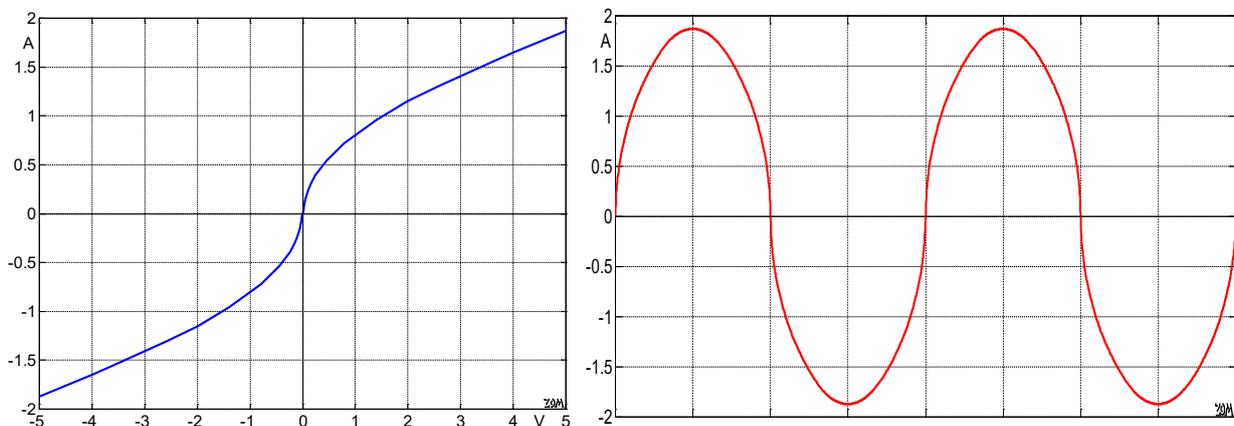


Abb. 2: Gemessener U/I -Zusammenhang (links), falsch zugeordneter Stromverlauf (rechts).

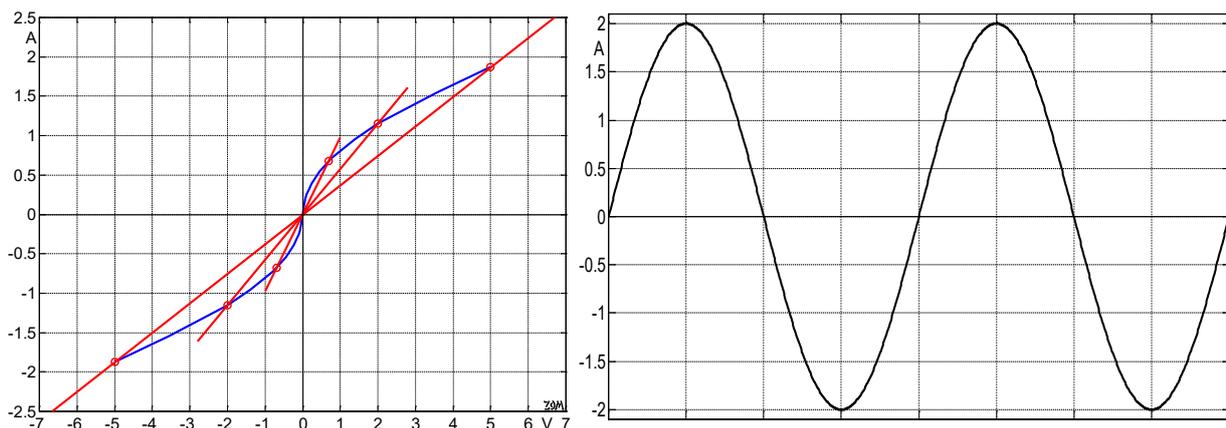


Abb. 3: Drei Wechselstrom-Arbeitsgerade (links), sinusförmiger Stromverlauf (rechts).

Ab hier wird die Heizung wieder mit **Gleichstrom** (bzw. Gleichspannung) betrieben, dabei entsteht der in Abb. 1 dargestellte U/I -Zusammenhang: Näherungsweise zwei Geraden mit unterschiedlicher Steigung. In einer doppellogarithmischen Darstellung weist eine Gerade auf eine **Potenzfunktion*** hin: $y = x^k \Rightarrow \log(y) = k \cdot \log(x)$. Bei sehr kleinen Spannungen gilt $k = 1$, da spielt die Erwärmung noch keine Rolle, der Zusammenhang ist linear (**Abb. 4**).

* also nicht, wie z.B. bei der Halbleiterdiode, auf eine Exponentialfunktion

Bei höheren Spannungen nähert sich der Strom an eine Wurzelfunktion an ($I \sim \sqrt{U}$), wie im Bild mit der roten Geraden dargestellt. Anders ausgedrückt: Bei kleinen Spannungen steigt die Leistung proportional zum Quadrat der Spannung ($P = U^2/R$), R ist hierbei näherungsweise konstant. Im Bereich der Nennspannung steigt die Leistung hingegen proportional zu dritten Potenz des Stroms – beziehungsweise zur 1.5-ten Potenz der Spannung.

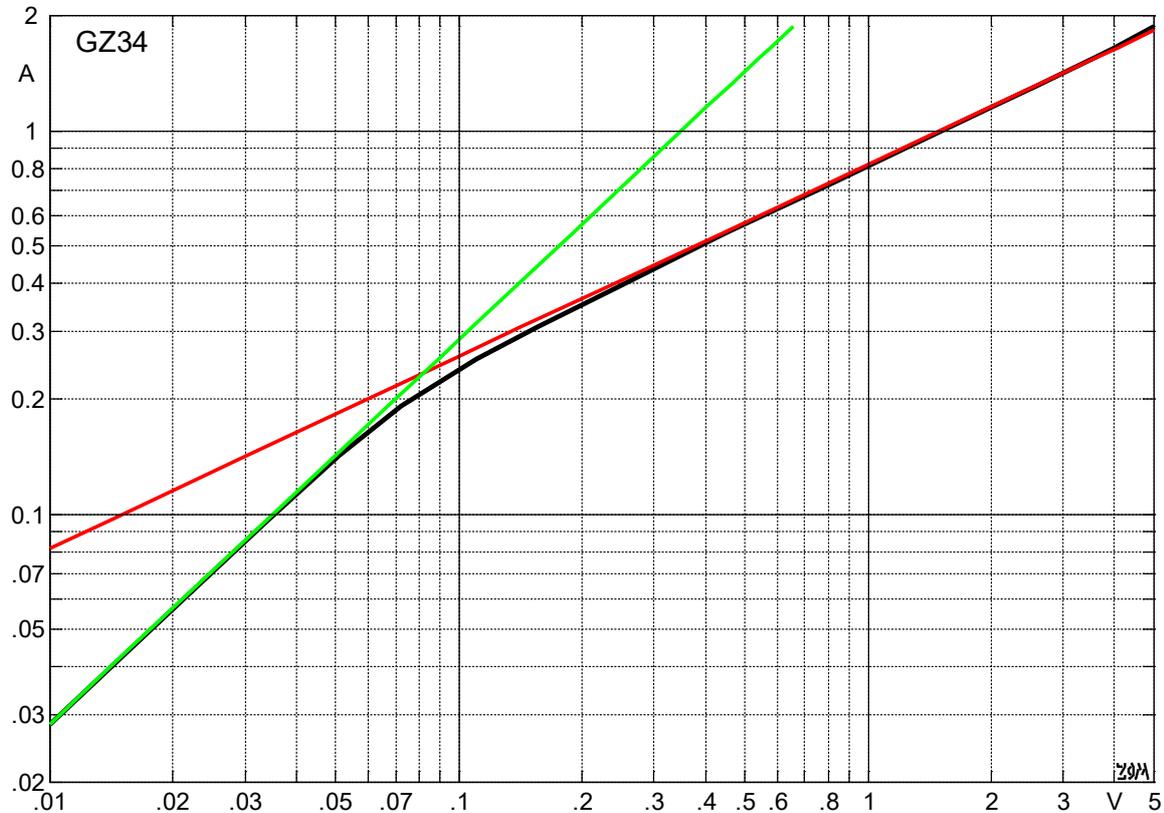


Abb. 4: Messkurve (schwarz), lineare Näherung (grün), Wurzel-Näherung (rot).

Zur Berechnung des o.a. Verhaltens sind vor allem zwei Funktionen von Bedeutung: Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes und die der Wärmestrahlung. Bei Metallen wird gerne eine temperaturproportionale Widerstandserhöhung angesetzt. Dies ist praxisgerecht, so lange es sich um eher kleine Temperaturänderungen handelt. Bei einer auf Rotglut erhitzten Röhrenkathode ist die Temperaturerhöhung aber gewaltig, da muss auch der quadratische Term berücksichtigt werden. Als Formel:

$$R(\Delta T) = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta T^2)$$

Hierbei ist R_{20} der Widerstand bei 20°C , ΔT ist die Temperaturerhöhung, α und β sind die Temperaturkoeffizienten. Der Röhren-Literatur [z.B. Brück] ist zu entnehmen, dass die Betriebstemperatur gewöhnlicher Oxidkathoden bei $1000 - 1100^\circ\text{K}$ liegt, während der Heizdraht $1100 - 1600^\circ\text{K}$ erreicht. Die Datenlage zu dessen Widerstandswert ist dünn: Er besteht aus Wolfram oder einer Wolfram-Rhenium-Legierung und wird zur Isolierung mit Al_2O_3 beschichtet. Die beiden in Abb. 1 analysierten Röhren sind indirekt geheizt, ihren Heizdraht wird vom Kathodenrohr umschlossen. **Abb. 5** vermittelt einen Eindruck vom Aufbau: Links der weiß beschichtete, gewendelte Heizdraht, in der Mitte das glänzende Kathodenrohr, ganz rechts das Anodenblech. Im rechten Bild ist für Wolfram der Zusammenhang zwischen dem auf 293°K normierten Widerstand und der Temperatur dargestellt.

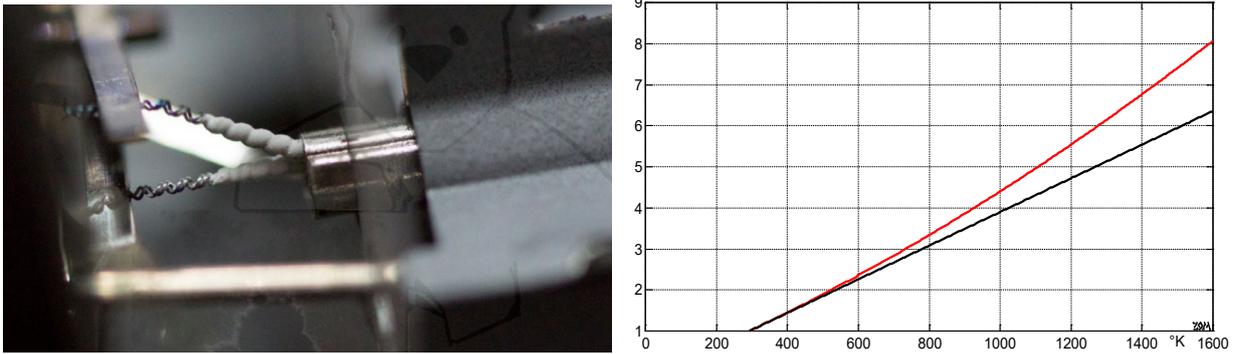


Abb. 5: Aufbau einer GZ34 [Patric-Sokoll.de]. Das rechte Bild zeigt die auf 293°K normierte Widerstandserhöhung eines Wolframdrahtes; lineare (schwarz) und quadratische Näherung (rot).

Fließt Strom durch den Heizdraht, wird ihm Energie zugeführt – seine Temperatur steigt, er "strahlt Wärme ab". Der Strahlungsfluss Φ ergibt sich nach dem Stefan/Boltzmann-Gesetz* wie folgt:

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_U^4); \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

T = Strahlertemperatur, T_U = Umgebungstemperatur, A = Strahlerfläche, ε = Emissionsgrad. Alle diese Daten sind nur ungefähr bekannt, und auch der Aufbau entspricht ja nicht dem klassischen Versuch – gleichwohl ist eine näherungsweise Berechnung informativ. **Abb. 6** zeigt, dass der grundsätzliche U/I -Zusammenhang ganz gut wiedergegeben wird: Lineares Verhalten bis ungefähr 1/5 der Nennspannung, darüber ein Stromanstieg proportional zur Wurzel aus der Spannung. Die grünen Kurven in Abb. 6 wurden mit Temperaturkoeffizienten berechnet, die größer sind als die für reines Wolfram angegebenen ($\alpha = 7e-3$, $\beta = 8e-7$), für die Umgebungstemperatur wurde $T_U = 293\text{K}$ angesetzt. Speziell der letzte Wert ist problematisch: Der Heizdraht wird sehr heiß, er strahlt von einer relativ kleinen Fläche ab. Aber nicht in eine Umgebung mit 293°K, sondern zum überwiegenden Teil in eine (nicht mehr ganz so heiße) Kathodenröhre. Deren Fläche ist nun schon deutlich größer, deswegen hat sie auch die geringere Temperatur (gleicher Strahlungsfluss). Doch auch die Kathode strahlt ihre Wärme nicht in die 293°K kalte Umgebung, ihr Strahlungsfluss trifft auf die (noch einmal größere) Anode – und erst die strahlt in die kalte Umgebung (das Glas ist zu Beginn der Messung noch kalt). Alles in allem also eine nicht ganz triviale Anordnung.

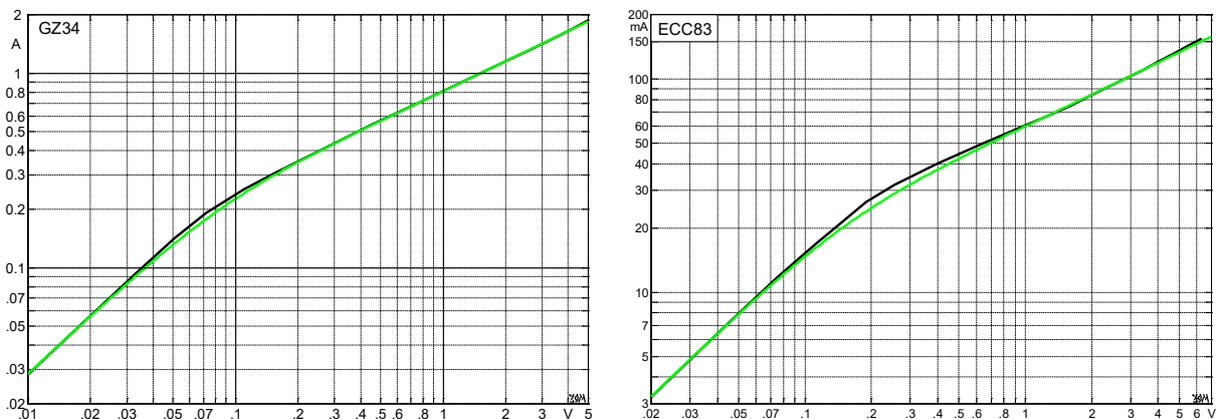


Abb. 6: Strom/Spannungs-Kennlinien. Messwerte (schwarz), Matlab-Berechnung (grün).

* J. Stefan 1835 – 1893; L. Boltzmann 1844 – 1906.

Bei hohen Temperaturen gewinnt beim Strahlungsgesetz die Strahlertemperatur wegen ihrer 4. Potenz, da spielt die exakte Umgebungstemperatur keine große Rolle. Aber im Bereich des Kurvenknicks, beim Übergang von der Linearität zur Wurzelfunktion, da müsste man das gegenseitige Bestrahlen genauer erfassen. Müsste man? Für eine orientierende Betrachtung, und nur die soll hier erfolgen, geht's auch einfacher, **Abb. 7** zeigt eine alternative Berechnung. Im rechten Bild ist die Umgebungstemperatur 293°K, der Temperaturkoeffizient ist größer als bei den Wolfram-Datenblattangaben. Die sind (mit $\alpha = 4.1e-3$) im rechten Diagramm eingehalten, jedoch muss nun, um die Messkurve zu treffen, ein erhöhter T_U -Wert eingesetzt werden. Beide Approximationen sind brauchbar, sie zeigen die wesentlichen physikalischen Effekte: Temperaturbedingte Widerstandserhöhung und Wärmestrahlung.

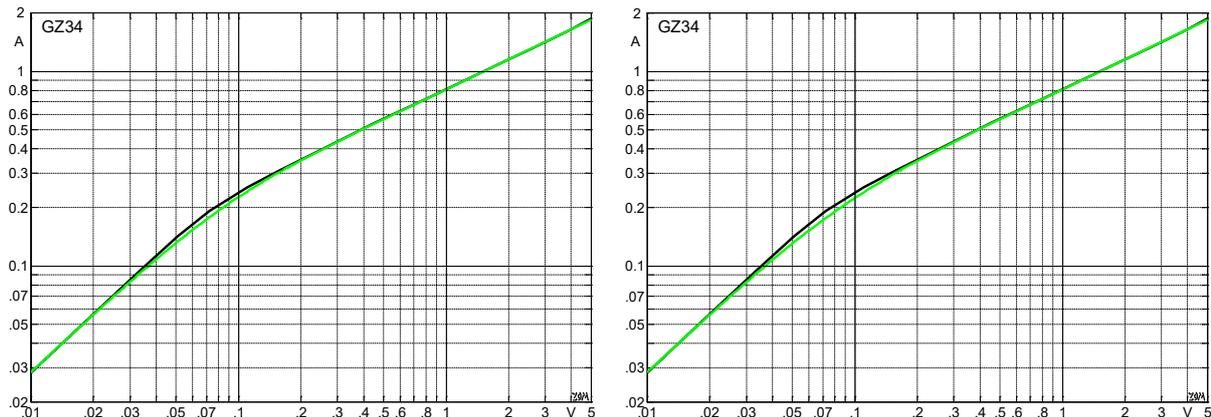


Abb. 7: Wie Abb. 6. $\alpha = 7e-3$, $\beta = 8e-7$, $T_U = 293^\circ\text{K}$ (links); $\alpha = 4.1e-3$, $\beta = 6e-7$, $T_U = 430^\circ\text{K}$ (rechts). εA wurde für bestmögliche Übereinstimmung optimiert.

Dem U/I -Zusammenhang kann eine für die Praxis wichtige Erkenntnis entnommen werden: Bei Stromeinprägung gelten schärfere Toleranzbedingungen als bei Spannungseinprägung. Das Abflachen der Kurve im $I(U)$ -Diagramm bedeutet, dass für eine bestimmte Stromänderung (z.B. +5%) die Spannungsänderung (und damit die Leistungsänderung) um so größer wird, je flacher die Kurve verläuft. Die Röhrenhersteller verweisen in ihren Empfehlungen mit Nachdruck darauf, dass die Heizungsdaten genau eingehalten werden müssen; als maximale Toleranz wird zumeist $\pm 5\%$ zugelassen. Bei E- und G-Röhren, die für Spannungseinprägung entwickelt wurden, gilt diese Maximaltoleranz für die Spannung – nicht für den Strom! Wäre der Heizdraht-Widerstand auch bei Nennleistung linear, so würde sich bei einer 5%-igen Spannungs- oder Stromänderung die Leistung um 10% ändern. Ganz anders beim nichtlinearen Heizdraht: 5% Spannungsänderung geben hier 3 – 4% Leistungsänderung, 10% Stromänderung hingegen bis zu 15% Leistungsänderung.

Sind derartige Abweichungen nun "Peanuts" oder "Coconuts"? Wenn's denn nur 5% wären... Alle richtig alten Röhrenverstärker wurden, wenn sie für das frühere deutsche Stromnetz bestimmt waren, für 220V ausgelegt. Seit 1987 hat sich dessen Nennspannung aber auf 230V erhöht – das sind schon mal 4.6% Zuwachs. Schlimmer noch: Diese 230V halten die Netzbetreiber auf $\pm 10\%$ ein... so werden aus 230V schon mal (worstcase) **253V**. Also **15% mehr** als die ursprüngliche Nennspannung! Derart große Abweichungen halten die Hersteller für kontraproduktiv: Ist die Heizspannung zu hoch, sinkt die Röhrenlebensdauer – ist sie zu niedrig, bildet sich in der Kathode eine "Zwischenschicht", die die Steilheit verringert.

Es gibt Gründe, die Röhrenheizung von Spannungs- auf Stromeinprägung umzustellen. An erster Stelle ist hier der Einschalt-Stromstoß zu nennen: Sind die 5V bei der GZ34 tatsächlich eingepreßt, fließen im Moment des Einschaltens mehr als 14A durch den Heizdraht.

Auch wenn in der Realität der Trafo-Innenwiderstand diese Spitze etwas abmildert – es könnte der Wunsch aufkommen, der Röhre diesen Alarmstart zu ersparen (manche Röhren glühen beim Einschalten ja so hell auf, dass man jedes Mal befürchtet, es könnte das letzte Mal gewesen sein). Der im Datenblatt einer E-Röhre angegebene Stromwert ist jedoch nicht als Sollwert zu interpretieren – er dient lediglich zur Orientierung, zur Dimensionierung der Heizleistung (Trafo, oder was auch immer verwendet wird). **E-Röhren** sind für **6.3V** gebaut, dieser Wert muss möglichst gut erreicht werden. Der dabei entstehende Heizstrom ist nicht Ursache, sondern Wirkung, mit nicht unerheblicher Toleranz. Bei einer kleinen Stichprobe (15 Röhren) lagen Siemens, Valvo, Brimar, RSD, Tungram und Mazda im Strom-Bereich 149 – 154mA (ECC83, 150mA Nennstrom pro System). Bei den neueren Röhren (TAD, Ruby, Ultron) ergaben sich Stromwerte bis zu 189mA, also 26% zu hoch. Würde man diese Röhren mit eingepprägtem Nennstrom (150mA) betreiben, wäre die Heizleistung um ca. ein Viertel zu klein. Wenn denn der Einschaltstrom begrenzt werden soll, ist eine kombinierte Strom/Spannungs-Einprägung sinnvoll: Der Maximalstrom wird auf z.B. den doppelten Nennstrom begrenzt, die aufgewärmte Röhre wird dann mit Spannungseinprägung betrieben.

Die in Abb. 1 untersuchte ECC83 ist **indirekt geheizt**, der Heizdraht ist bei derartigen Röhren von der Kathode isoliert. Extrem hohe Spannungen sollte man so einer Isolierung aber nicht zumuten, die Datenblätter geben Maximalwerte von 100 – 300V vor (ECC83 = 180V). Die GZ34 ist **halbindirekt geheizt**, hierbei ist der Heizdraht an einer Seite mit der Kathode verbunden. Bei beiden Röhren existiert also ein eigener Heizdraht. Anders ist das bei **direkt geheizten** Röhren wie der 5Y3GT (**Abb. 8**), bei ihnen fließt der Heizstrom direkt durch die Kathode. Deren Beschichtung scheint aber auf den Heizwiderstand praktisch keinen Einfluss zu haben, Rechnung und Messung passen (bei dieser Röhre) gut zusammen.

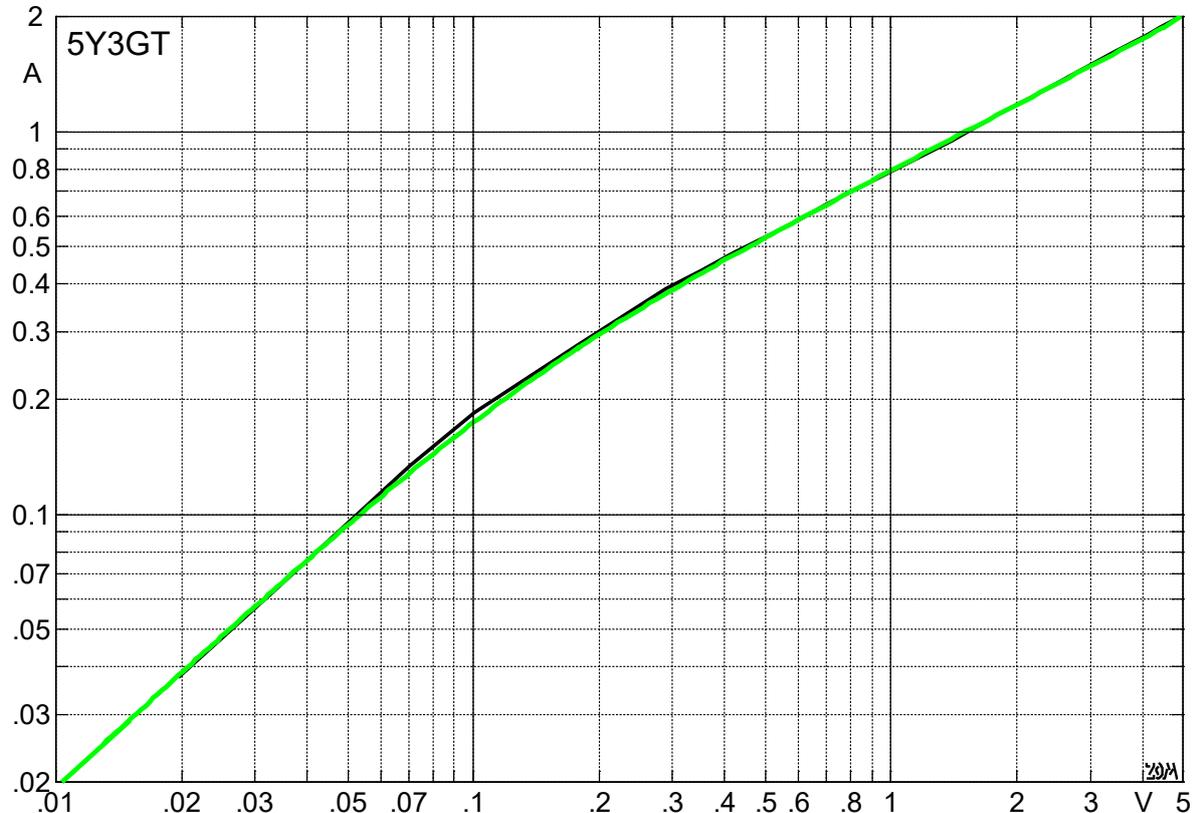


Abb. 8: $I(U)$ -Kennlinie für die direkt geheizte Gleichrichterröhre 5Y3GT. Messung = schwarz, Rechnung = grün.

Nicht nur die Stromaufnahme typgleicher Röhren kann unterschiedlich sein, auch bei der thermischen Trägheit zeigen sich Unterschiede (**Abb. 9**). Bei beiden Röhren ist nur ein Heizdraht in Betrieb, ab $t = 0.04\text{s}$ wird eine Spannung von 6.3V eingeprägt. Die (neue) TAD-Röhre hat einen höheren Anfangsstrom, und auch der Strom-Endwert ist höher als bei der alten Siemens-Röhre. Deren thermische Trägheit ist etwas größer als bei der TAD-Röhre. Könnte ein zusätzliches Kriterium sein, um angebliche NOS-Röhren zu enttarnen.

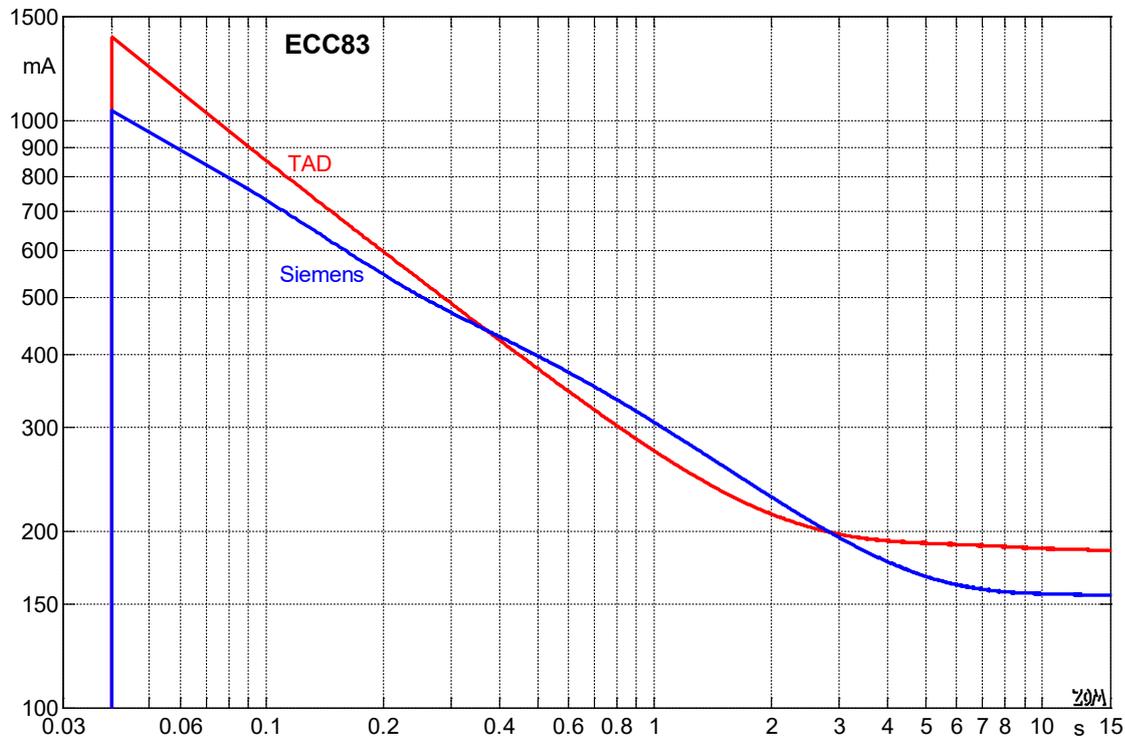


Abb. 9: Stromverlauf nach dem Einschalten für 6.3V Spannungseinprägung. Einschaltet wird bei $t = 0.04\text{s}$ (die log-Skala hat keinen Nullpunkt).

Literatur:

- Barkhausen H.: Lehrbuch der Elektronenröhren, 4 Bände. Hirzel, Stuttgart.
- Brück L.: Aufbau der Elektronenröhren; in Meinke/Gundlach.
- Happell G., Hesselberth W.: Engineering Electronics, McGraw Hill 1953.
- Langford-Smith F.: Radio Designer's Handbook, Newnes 4th Edition 1997 (Original: Iliffe & Sons 1953).
- Meinke H., Gundlach F.: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. Springer 1968.
- RCA Receiving Tube Manual, RCA, Harrison, N.J., 1964±. (Auch: Antique Electronic Supply 1994).
- Röhren-Taschentabelle, Franzis, München 1964.
- Schröder H.: Elektrische Nachrichtentechnik, Band 2, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH, Berlin.
- Spangenberg K.: Vacuum Tubes, McGraw Hill 1948.
- Telefunken-Laborbuch, München 1957/1961.
- Terman F.E.: Radio Engineer's Handbook, McGraw Hill 1943.
- Zollner M.: Physik der Elektrogitarre, 2014. www.gitarrenphysik.de