



Steilheitsmessung nach der Sergejew- Methode, angewendet im Röhrenprüfgerät L1-3 & L3-3

Inhalt

1.	Definition der Steilheit.....	2
2.	Darstellung im Datenblatt.....	2
3.	Mess-Methoden	3
3.1.	statisches Verfahren	3
3.2.	dynamisches Verfahren.....	3
4.	Anwendung in Röhren Prüfgeräten	3
5.	Steilheitsmessung im L1-3/L3-3.....	4
5.1	Das implementierte Verfahren	4
5.2	Technische Hintergründe.....	5
5.3	Beurteilung des Messverfahrens im L1-3/l3-3	6
7.	Sergejew-Methode.....	7
8.	Zusammenfassung	7

1. Definition der Steilheit

Die Steilheit **S** ist einer der wesentlichen Parameter einer Elektronen Röhre. Sie beschreibt die Änderung des Anodenstroms als Folge der Änderung der Steuerspannung am Gitter.

2. Darstellung im Datenblatt

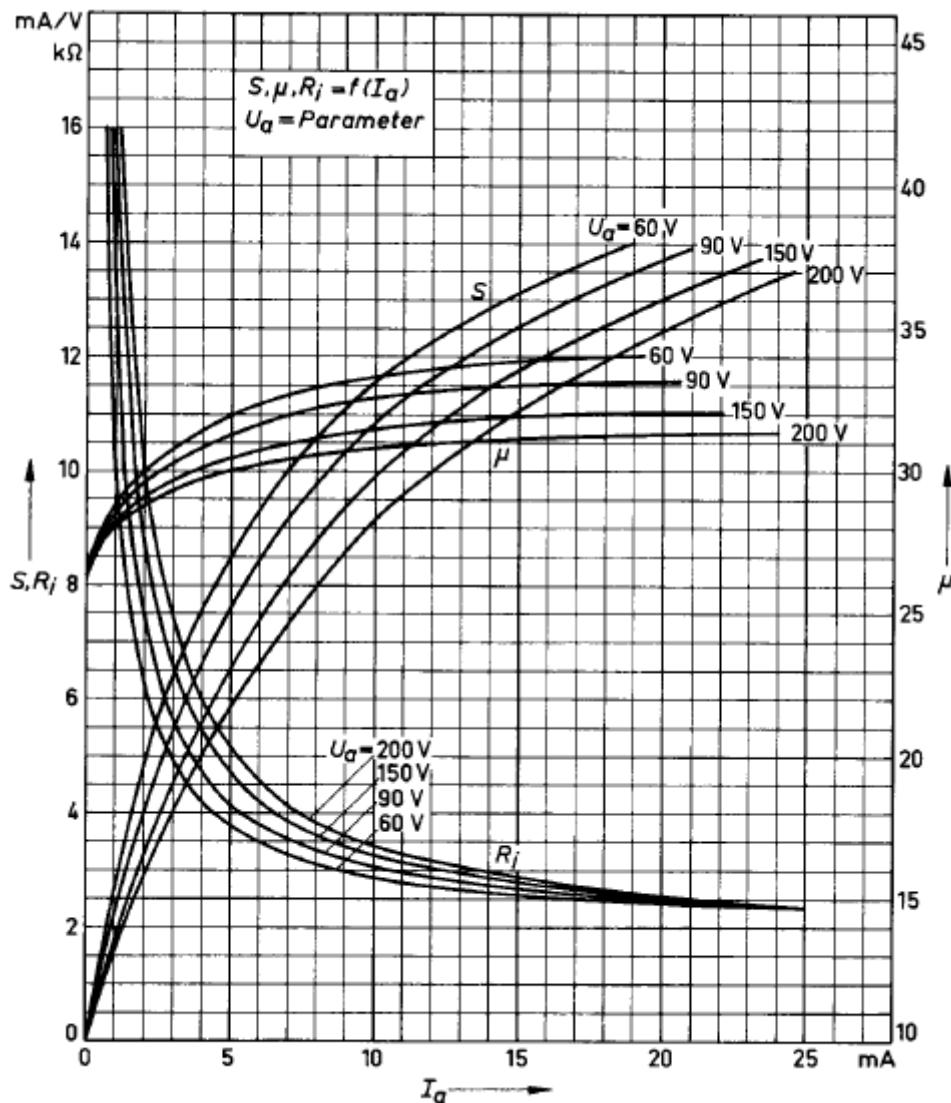


Bild: Datenblatt E88CC, S = Steilheit in Abhängigkeit von Ua, Ia

Die Steilheit ist kein fester Wert, sie hängt bei gegebenem Röhren-Typ von äußeren Parametern wie Anodenspannung und Anodenstrom ab. Darüber hinaus spielen auch Fertigungstoleranzen eine Rolle, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll.

Der Hersteller veröffentlicht typische Werte in Form von Kennlinien und/oder als Tabellenwerte unter Angabe der geltenden Randbedingungen.

Ist die Ua/Ug Kennlinie als Polynom bekannt, so kann die Steilheit durch Bildung der ersten Ableitung der Kennlinien-Funktion nach der Gitterspannung berechnet werden.

$$S = \frac{dI_a}{dU_g} [\text{A/V}]$$

3. Mess-Methoden

Die Messung kann man statisch, d.h. mit zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Messungen oder dynamisch durch Anlegen einer Kleinsignal-Wechselspannung am Gitter durchführen.

3.1. statisches Verfahren

Bei der statischen Messung wählt man zwei Betriebspunkte um einen festgelegten Arbeitspunkt (U_a , I_a) und ermittelt den Quotienten aus der Differenz der Anodenströme und der Differenz der Gitterspannungen.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} [\text{A/V}]$$

3.2. dynamisches Verfahren

Bei der dynamischen Messung betreibt man die Elektronen Röhre gleichstrom-mäßig in einem festgelegten Arbeitspunkt und legt am Gitter überlagert eine Kleinsignal-Wechselspannung an. Anschließend ermittelt man den Wechselstromanteil, der an der Anode verursacht wird und setzt ihn zum angelegten Gittersignal ins Verhältnis.

$$S = \frac{I_a(ac)}{U_g(ac)} [\text{A/V}]$$

Bei beiden Verfahren sollte zur Begrenzung der Komplexität die Anodenspannung auf einem konstanten Wert gehalten werden. Das Ergebnis der Messung unter dieser Bedingung ist nur dann korrekt, wenn der Verlauf der Steigung in Abhängigkeit von Anoden-Strom linear ist. In der Praxis ist dies selten der Fall, daher sollte der maximale Abstand der gemessenen Anodenströme in Bezug auf die angewandte Messtechnik möglichst klein sein. Dadurch wird der Fehler der linearen Approximation minimiert.

4. Anwendung in Röhren Prüfgeräten

Die statische Methode kann manuell mit jedem Röhrentestgerät angewendet werden, das über eine regelbare Anodenspannung und Gitter-Vorspannung verfügt.

Ist das eingesetzte Röhrenprüfgerät prozessorgesteuert, so kann der Hersteller die statische Methode mittels seiner Software automatisiert zum Einsatz bringen (z.B. ROE-Test).

Für den Fall, dass die Steilheit (S) einer Elektronenröhre im Datenblatt nicht graphisch in Abhängigkeit von Anodenspannung und Anodenstrom angegeben ist, sondern an einem festen Arbeitspunkt, so muss das verwendete Röhrenprüfgerät genau diesen Arbeitspunkt einstellen.

In allen Fällen muss neben der ermittelten Steilheit (S) auch der gleichstrom-mäßige Arbeitspunkt dokumentiert werden, ansonsten ist der Messwert zur Qualitätsbeurteilung nicht aussagkräftig.

Bei der dynamischen Methode stellt sich in der Praxis das Problem, dass der zur Steilheitsmessung eingesetzte Arbeitswiderstand in der Anodenleitung der Test-Röhre die Anodenspannung an der Röhre selbst beeinflusst. Damit würde die Bedingung einer konstanten Anodenspannung verletzt.

5. Steilheitsmessung im L1-3/L3-3

Das russische Röhrenprüfgerät L1-3 und sein Nachfolger L3-3 verwenden das dynamische Messverfahren.

5.1 Das implementierte Verfahren

Der Arbeitspunkt an dem die Steilheitsmessung erfolgt, wird über den Anoden-Spannungsregler und den Gitter Vorspannungsregler manuell eingestellt.

Ein im Gerät integrierter Tongenerator erzeugt eine Wechselspannung. Diese wird anteilig der Gitter-Vorspannung überlagert. Der resultierende Wechselanteil im Anodenstrom wird über einem Mess-Widerstand im Anodenstromkreis entnommen, gleichgerichtet und auf dem Anzeigegerät des Geräts als Steilheit zur Anzeige gebracht.

Um nun angepasst an die zu erwartende Steilheit der Test Röhre immer mit dem gleichen Messwiderstand im Anodenstromkreis und immer gleicher Empfindlichkeit des eingebauten Gleichspannungs-Voltmeters arbeiten zu können, wird die Tongeneratorenspannung (450mVrms/1400Hz) dem Gitter über einen wählbaren (Steckbrett) Spannungsteiler zugeführt.

Der gemessene Anoden-Wechselstrom im Verhältnis zu der am Gitter angelegten Wechselspannung entspricht der am Steckbrett gewählten Skalierung der Steilheit des Test-Objekts.

Um den Einfluss möglicher Brumm Spannungen, insbesondere bei direkt geheizten Röhren und den unvermeidlichen Klirrfaktor des Tongenerators zu minimieren ist dem Röhrenvoltmeter ein hochselektiver aktiver Band Pass um die Mittenfrequenz des Tongenerators vorgeschaltet.

Da sowohl der Tongenerator, als auch in kleinerem Maß der Band Pass einen Temperaturgang aufweisen, ist es erforderlich, dass der Benutzer regelmäßig vor der Steilheitsmessung eine Kalibrierung durchführt.

Dazu wird dem selektivem Röhrenvoltmeter vor der Messung mittels eines Testschalters ein fest verdrahteter Abgriff, der Teil des Spannungsteilers am Ausgang des Tongenerators ist, direkt auf den Messeingang aufgeschaltet. Das System wird dann mit Hilfe eines auf der Frontplatte montierten Potentiometers auf einen Kalibrier (120) Wert am Anzeige-Instrument gestellt.

Um Linearitätsfehler des Anzeigegeräts und Fehler durch die Schleusen-Spannung der Gleichrichter Dioden im Röhrenvoltmeters zu minimieren, sollte die Skalierung so gewählt werden, dass die zu erwartende Steilheit der Test Röhre im oberen Drittel des Anzeigebereichs angesiedelt ist.

5.2 Technische Hintergründe

Zur Messung des Anodenstroms sind im Gerät 7 Widerstände über das Steckbrett als Kette in die Anodenleitung konfigurierbar (4,889 977,776 Ohm). Das Gerät wird immer so konfiguriert, dass für einen Vollausschlag am Anzeige-Instrument maximal 1,45V Gleichspannung zwischen dem Ausgang des Reglers und der Anode der Röhre abfallen. Der gesteckte Widerstandswert ist auch bei der Steilheitsmessung nach wie vor in der Anodenleitung vorhanden. Somit erscheint die vom Benutzer eingestellte und auf dem Anzeigegerät dargestellte Anodenspannung um diesen Abfall reduziert an der Anode der Test-Röhre. Für typische Anodenspannungen ist der Spannungsabfall tolerierbar, bei extrem niederen Anodenspannungen (z.B. 24V) nicht mehr vernachlässigbar.

Die Verwendung dieser Anoden-Widerstände für die Steilheits-Messung erschien den Entwicklern des Geräts nicht praktikabel. Bei niedrigen Widerstandswerten (z.B. 4,889 Ohm) wäre die zu messende Wechselspannung sehr klein, das hätte den Aufwand im selektiven Röhren Voltmeter in die Höhe getrieben. Es hätte zur Folge, dass nun nicht mehr mit einem einzigen Steilheits-Messwiderstand gearbeitet werden könnte, sondern der Messabgriff umschaltbar sein müsste. Das im Gerät angewandte Kalibrier-Verfahren hätte sich ebenfalls nicht realisieren lassen.

Stattdessen hat man beschlossen den Steilheits-Messwiderstand (R57) innerhalb des Anodenspannungs-Regelkreises zu platzieren. Er liegt in der Strecke zwischen der Kathode der beiden Längsröhren und dem Summationspunkts des Ausgangs-Spannungsteilers. Er hat somit keinen Einfluss auf die Anodenspannung am Ausgang des Reglers. Somit war man in gewissen Grenzen frei in der Wahl des Widerstandwertes. Sein Widerstand muss groß genug sein, dass bei hinreichend kleinen Wechselströmen an der Anode vernünftig auswertbare Wechselspannungen entstehen. Der Regler entspricht in allen übrigen Aspekten und Dimensionierungen einem Standard Entwurf. Das Mess-Signal wird kapazitiv ausgekoppelt.

Besondere Beachtung verdient der Umstand, dass der Messwiderstand im Anodenstromkreis nicht Teil des Kalibrier Prozesses ist. Jede Abweichung wirkt sich direkt auf den Messwert aus. Daher muss er eng toleriert sein und einen möglichst geringen Temperaturgang besitzen.

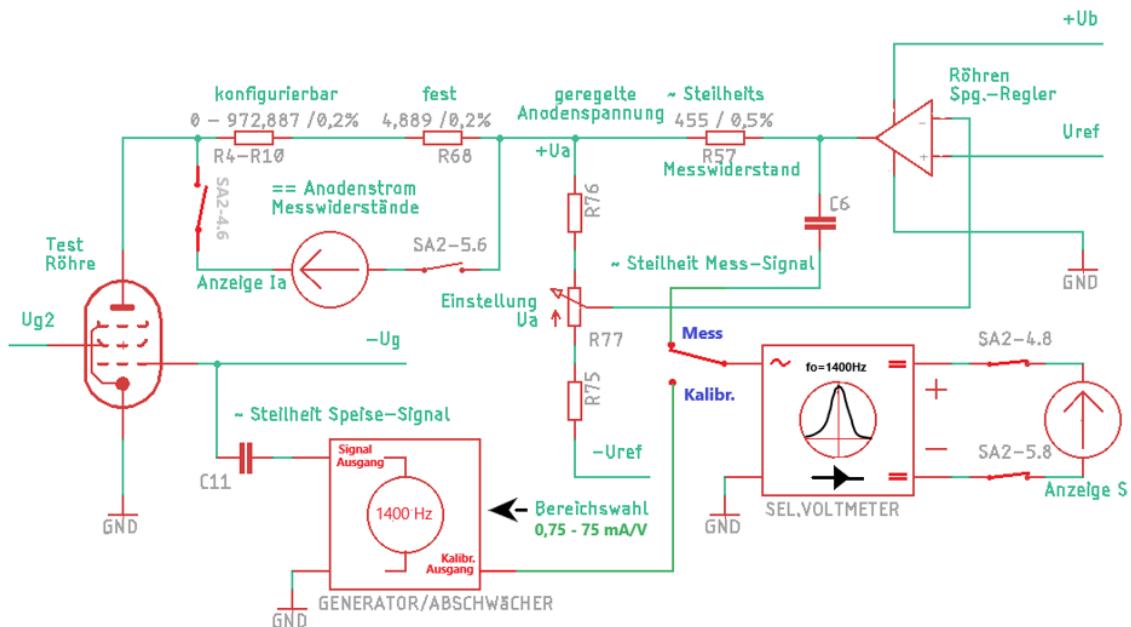


Bild: Vereinfachtes Blockschaltbild der Steilheits-Messung. Bezug: L3-3, Baujahr 1974

5.3 Beurteilung des Messverfahrens im L1-3/I3-3

Die Eingangs-Empfindlichkeit des selektiven Röhrenvoltmeters liegt bei ca. $150\text{mV}_{\text{eff}}$. Damit fließt, unter Berücksichtigung des S-Messwiderstands von 455 Ohm ein maximaler Wechselstrom-Anteil von $0,33\text{ mA}_{\text{eff}} (= 0,47\text{mA}_s = 0,94\text{mA}_{ss})$ während der Steilheits-Messung durch die Test-Röhre.

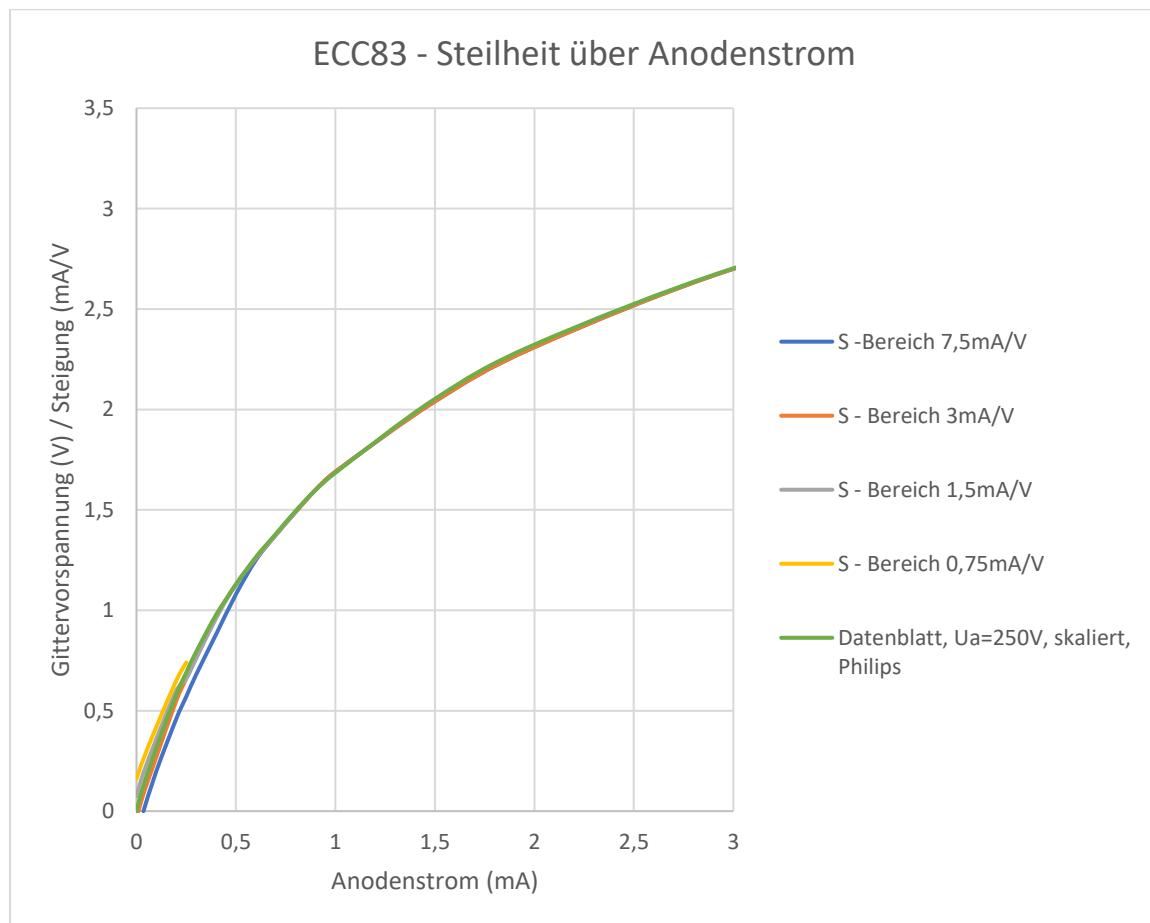
Dieser Strom fließt auch durch die dem Regler nachgelagerte konfigurierbare Anodenstrom-Widerstands Kette. Je nach gestecktem Widerstandswert oszilliert die Anodenspannung an der Test-Röhre somit zwischen $3,22\text{mV}_{\text{eff}}$ und $322\text{mV}_{\text{eff}}$.

Diese Werte gelten, wie oben erwähnt, für einen Messwert am oberen Ende des jeweils gewählten Messbereiches. Fällt das Ergebnis geringer aus, reduziert sich diese Wechselspannung entsprechend.

In der praktischen Auswirkung kann die Spannung an der Anode der Test-Röhre daher als konstant angenommen werden.

In Betriebshandbuch des L1-3 sind diese Widerstände im Detail-Schaltbild des Steilheits-Messers noch dargestellt. Im Betriebshandbuch des L3-3 wurden sie an dieser Stelle unterschlagen.

Das folgend Diagramm zeigt die Messung einer beispielhaft gewählten Doppeltriode ECC83 (JJ). Als Referenz dient hier das Datenblatt für $U_a = 250\text{V}$ des Herstellers Philips.



Eine detaillierte Analyse der Messung am Beispiel der ECC83 findet sich in (1)

7. Sergejew-Methode

Im Betriebshandbuch des L3-3 wird erwähnt, dass die Platzierung des Steilheits-Messwiderstands innerhalb des Anodenspannungsreglers dazu führt, dass die Anodenspannung an der Test-Röhre konstant gehalten wird und somit die Röhre im statischen Betrieb bezüglich der Anodenspannung arbeitet. Dies wird als Sergejew-Methode bezeichnet.

Als Namensgeber könnte **Alexander Michailowitsch Sergejew** ein russischer Physiker und Hochschullehrer in Frage kommen, einen konkreten Hinweis konnte in der Recherche aber nicht gefunden werden.

8. Zusammenfassung

Das im Gerät implementierte Steilheits-Messverfahren weist folgende Eigenschaften auf:

- Typ: dynamische Messung.
- Messbereichswahl durch Aufschaltung des Tongenerator-Signals über Spannungsteiler.
- Messung mit einem einzigen Widerstand.
- freie Wahl des Widerstandswerts durch Verlagerung in den Anodenspannungsregler.
- der Spannungsabfall über den Messwiderstand, der durch den Wechselstrom der Messung verursacht wird, hat keinen relevanten Einfluss auf die Anodenspannung am Regler Ausgang.
- selektives Röhrenvoltmeter mit konstanter Eingangsempfindlichkeit.
- Rauschen, Brumm, und Klirrfaktoren bis 10% werden durch das selektive Filter unterdrückt.
- Kalibrierung des Systems mittels Aufschaltung eines dedizierten Abgriffs des Spannungsteilers auf den Röhrenvoltmeter.
- genaueste Ergebnisse werden erzielt, wenn der Messwert im Bereich von 2/3 des Anzeigewerts liegt, und der von der Prüfmodulation überdeckte Bereich der I_a/U_g -Kennlinie des Prüfobjekts einen hinreichend linearen Teil überdeckt.
- unterhalb von etwa 17% des Skalenwerts werden die Messergebnisse durch den Einfluss der Schwellenspannung der Dioden des Gleichrichters im Röhrenvoltmeter in allen Messbereichen unzuverlässig. (2)

- (1) Beurteilung der Steigungs-Messvorrichtung des L3-3 am Beispiel der Elektronenröhre ECC83, Wolfgang Trinks, Dezember 2025
- (2) Marc Michalzik, Reparaturbericht, Restauration eines russischen Röhrenprüfgeräts Kalibr L3-3 8/2012