

E3 - Kennlinien von Elektronenröhren

Julia Mariella Wiest

Gruppe A06

20.06.2025

Mit der Abgabe dieses Protokolls wird bestätigt, dass es kein Plagiat ist. Falls es dennoch eindeutig als Plagiat erkannt werden sollte, ist bekannt, dass das einen Punkt abzugreifen von 20 Punkten zur Folge, ohne Möglichkeit der Nachbearbeitung, hat. Diese Bewertung wird ausnahmslos zur Gesamtnote im Anfängerpraktikum beitragen.

1 Physikalische Grundlagen

Der nachstehende Versuch wurde mit dem Ziel durchgeführt, die Kennlinien von Elektronenröhren unterschiedlicher Bauart, in diesem Fall bei Benutzung der Elektronenröhre als Diode und Triode, zu untersuchen.

Der einfachste Aufbau einer Vakuum-Diode kann mit zwei Elektroden, einer beheizbaren Kathode und einer Anode realisiert werden. Durch das Anlegen einer Spannung zwischen der negativ geladenen Kathode und der positiv geladenen Anode baut sich eine sogenannte Anodenspannung auf und die negativ geladenen Elektronen treten aus der Kathode aus und werden in Richtung der Anode beschleunigt. Dadurch kann zwischen der Kathode und der Anode ein Anodenstrom gemessen werden (Demtröder, 2017, S. 157), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Durch das Einfügen eines Steuergitters zwischen der Kathode und der Anode wird die Diode zur Triode. Dabei wirkt das Steuergitter wie eine weitere Elektrode. Der Aufbau einer Elektronenröhre als Triode ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

Bei der Elektronenröhre als Diode erhöht sich durch das Erwärmen der Kathode die kinetische Energie der Elektronen, sodass sich diese physikalisch wie ein Elektronengas beschreiben lassen. Deswegen kann für das Verhalten der Elektronen die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung

$$f(v) dv = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left(-\frac{mv^2}{2k_B T} \right) dv$$

herangezogen werden (Tipler und Mosca, 2024, S. 514), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Wegen des anziehenden Potentials der Metallionen im Kathodematerial müssen die austretenden Elektronen dieses zuerst überwinden. Dieser Vorgang wird als Austrittsarbeit bezeichnet. Je höher die Temperatur der Kathode ist, desto einfacher können die Elektronen dieses Potential überwinden und treten aus der Kathode aus. Doch selbst ohne anliegende Anodenspannung, also für $U_A = 0$, gelingt es einigen wenigen Elektronen, aus der Kathode auszutreten und die Anode zu

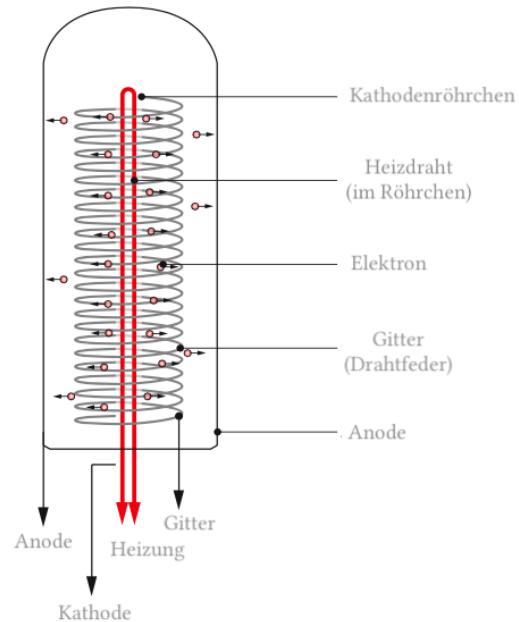


Abb. 1.1: Aufbau einer Elektronenröhre als Triode (Demtröder, 2017, S. 159).

erreichen. Dies ist beim Anodenstrom I_0 der Fall. So kann letztendlich der Anlaufstrom über den Zusammenhang

$$I_A = I_0 \exp\left(\frac{eU_A}{k_B T}\right)$$

beschrieben werden (Meschede, 2010, S. 474), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Die nun bereits herausgelösten Elektronen aus der Kathode bilden um die Kathode herum eine Elektronenwolke, welche das elektrische Feld zwischen der Anode und der Kathode teilweise abschirmt. Dies führt dazu, dass ein weiterer Austritt von Elektronen aus der Kathode verhindert wird. Deswegen wird an die Anode eine positive Spannung angelegt, welche bewirkt, dass die Elektronenwolke aus dem elektrischen Feld aus dem Raum der Kathode abgesaugt werden. Das bedeutet, dass der Anodenstrom I_A von der Anodenspannung U_A abhängig ist (Meschede, 2010, S. 475). Durch das Anlegen einer immer größeren Anodenspannung U_A steigt auch der Anodenstrom I_A an, da die Raumladung abgebaut und der Abschirmeffekt der kleiner werdenden Elektronenwolke geringer wird. Dies wird als Raumladungsgebiet bezeichnet. Für den Anodenstrom gilt

$$I_A = C U_A^{\frac{3}{2}}$$

(Walcher, 1994, S. 277), (Universität Augsburg, SoSe 2025).

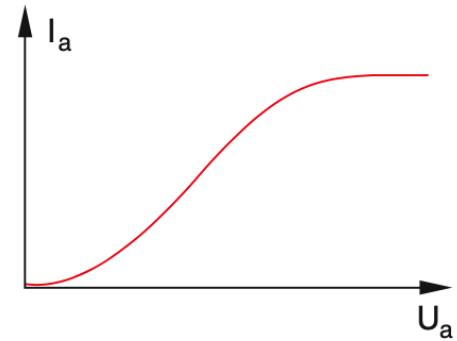


Abb. 1.2: Kennlinie einer Elektronenröhre als Diode (Demtröder, 2017).

Für eine hinreichend große Anodenspannung tritt eine Sättigung des Anodenstroms ein, da die Ausbildung einer Raumladung um die Kathode irgendwann verhindert wird. Dabei ist der Sättigungsstrom $I_A = I_S$ unabhängig von der Anodenspannung (Universität Augsburg, SoSe 2025). Die gesamte Kennlinie einer Elektronenröhre als Diode mit Anlaufstrom-, Raumladungs- und Sättigungsgebiet ist in Abbildung 1.2 nochmals beispielhaft visualisiert.

Das Hinzufügen eines Gitters zur Elektronenröhre bewirkt, dass durch das Anlegen einer Spannung an das Gitter der Anodenstrom gesteuert werden kann. Anhand der Steuerspannung

$$U_{St} = U_G + D \cdot U_A$$

kann nun die Änderung der Anodenspannung durch die Stärke der Gitterspannung so variiert werden, dass der vorherrschende Anodenstrom gleich bleibt. Damit gilt für das Raumladungsgebiet

$$I_A = C(U_G + D \cdot U_A)^{\frac{3}{2}}.$$

Der Parameter D steht dabei für den Durchgriff, welcher das Kapazitätsverhältnis der Röhre angibt und rein von der Geometrie dieser abhängig ist. Anhand zweier weiterer Parameter, der Steilheit und dem Röhrenwiderstand, kann die verwendete Elektronenröhre klar charakterisiert

werden. Für einen ausgewählten Arbeitspunkt im Raumladungsgebiet sind die Parameter folgendermaßen gegeben:

Durchgriff:	$D = -\frac{\partial U_G}{\partial U_A}$	für $I_A = \text{const}$
Steilheit:	$S = \frac{\partial I_A}{\partial U_G}$	für $U_A = \text{const}$
Röhrenwiderstand:	$R = \frac{\partial U_A}{\partial I_A}$	für $U_G = \text{const}$

Alle drei charakterisierenden Parameter sind über die Barkhausen-Beziehung

$$B = D \cdot S \cdot R = 1$$

verknüpft (Universität Augsburg, [SoSe 2025](#)).

2 Kennlinien von Elektronenröhren

2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Im ersten Versuchsteil soll zuerst der Innenwiderstand des verwendeten Amperemeters bestimmt werden. Dafür kommen als Versuchsaufbauten entweder eine stromrichtige Schaltung oder eine Wheatstonesche Brücke in Frage.

Bei der Realisierung der stromrichtigen Schaltung (Abb. 2.1) wird ein Vorwiderstand R_i mit dem Amperemeter in Reihe geschaltet, sodass der gesuchte Innenwiderstand R_i letztendlich über den Zusammenhang

$$U = IR_v + IR_i$$

berechnet werden kann.

Für die Wheatstonesche Messbrücke werden insgesamt vier verschiedene bekannte Widerstände R_n und das Amperemeter, wie in Abbildung 2.2, geschaltet, wobei die Widerstände R_2 und R_3 in der Abbildung einen Schiebewiderstand darstellen. Wenn der Fall auftritt, dass an der Brücke der Strom $I_B = 0$ verschwindet, so kann nach der Messung der Längen L und x im Versuch über die Formel

$$\frac{R_1}{R_i} = \frac{R_3}{R - 2} = \frac{x}{L - x}$$

der Innenwiderstand bestimmt werden.

Aus Zeitgründen wurde die Messung der Innenwiderstände für die drei unterschiedlichen Messbereiche des Amperemeters in A, mA und μ A am Versuchstag nicht durchgeführt. Die zugrundeliegenden Innenwiderstände des in den weiteren Teilversuchen verwendeten Messgerätes wurden bereitgestellt.

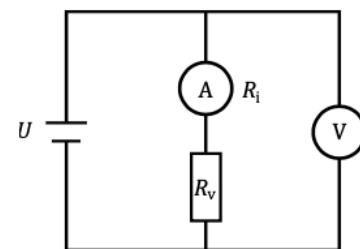


Abb. 2.1: Schaltplan einer stromrichtigen Schaltung
(Universität Augsburg, SoSe 2025).

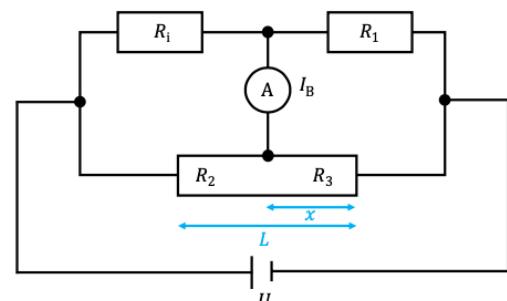


Abb. 2.2: Schaltplan einer Wheatstoneschen Brücke
(Universität Augsburg, SoSe 2025).

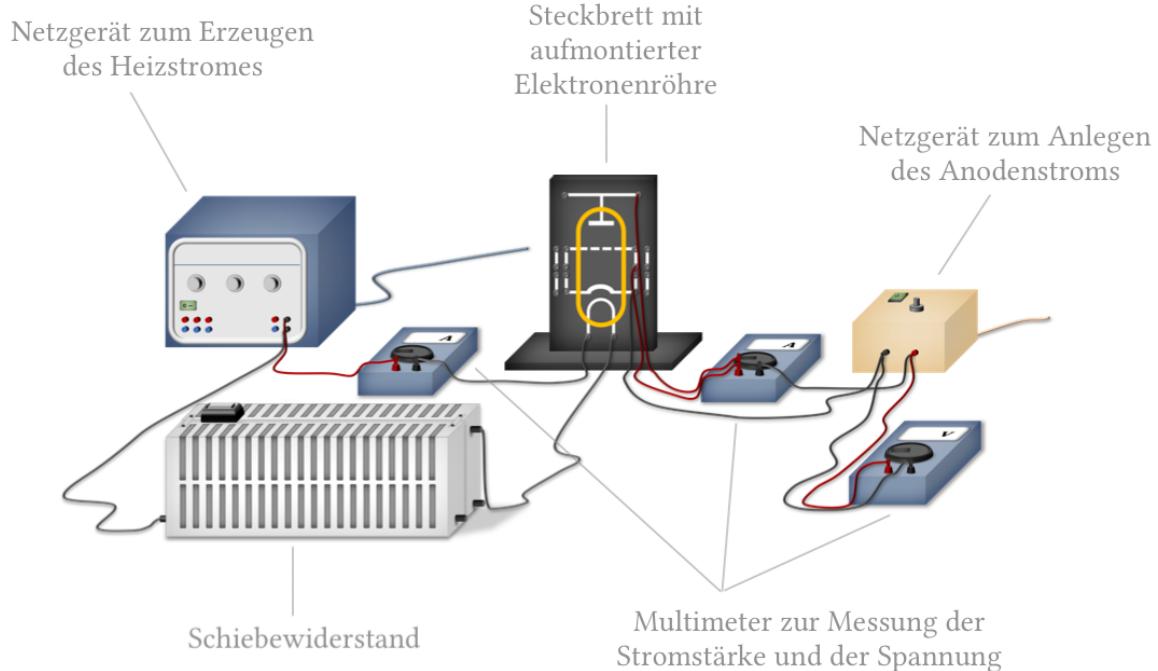


Abb. 2.3: Darstellung des Versuchsaufbaus (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Im zweiten Versuchsteil fungiert die Elektronenröhre als Diode. Dafür wird über den Schiebewiderstand ein Heizstrom I_H an die Kathode in der Elektronenröhre angelegt. Mithilfe des Schiebewiderstandes kann der Heizstrom reguliert werden, sodass beim Zusammenlegen der Messergebnisse mit der Parallelgruppe insgesamt vier verschiedene Heizströme zwischen 110 mA und 140 mA aufgenommen werden konnten. An die Anode wird zugleich eine Anodenstromstärke I_A über ein weiteres zur Verfügung gestelltes Netzgerät angelegt. Die beiden verwendeten Amperemeter zur Messung des Heiz- und Anodenstroms werden, wie im Schaltplan 2.4 zu sehen, in Reihe geschaltet. Während des Versuches wird zuerst der gewünschte Heizstrom I_H über den Schiebewiderstand eingestellt und konstant gehalten, um anschließend die Anodenstromstärke I_A in Abhängigkeit der Anodenspannung U_A zu messen. Hierfür wird das Voltmeter, wie im Schaltplan 2.4 eingezeichnet, parallel zur Elektronenröhre und dem Netzgerät geschaltet. Die Verkabelung der Elektronenröhre erfolgt über Steckverbindungen, sodass die Anode mit dem in der Röhre verbauten Gitter verbunden ist, um eine Diode zu erhalten. Pro gewähltem Heizstrom I_H wurden jeweils ungefähr 40 Messpunkte zwischen $I_A = 0 \text{ mA}$ und 15 mA für den Anodenstrom aufgenommen, wobei ungefähr je 20 Messungen im Anlauf- und Raumladungsgebiet notiert wurden.

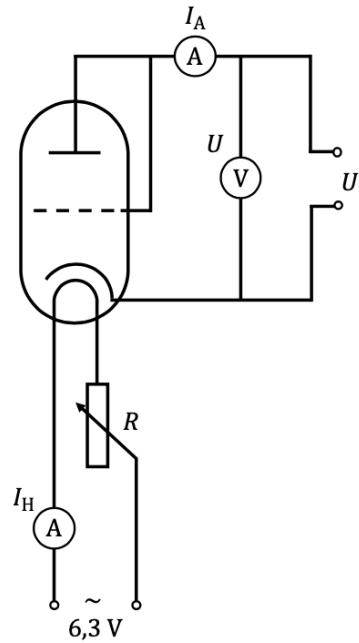


Abb. 2.4: Schaltung zur Messung der Diodenkennlinien (Universität Augsburg, SoSe 2025).

Um die Elektronenröhre als Triode vermessen zu können, wird der Schaltplan aus Abbildung 2.5 realisiert. Zur Beheizung der Kathode wird diese in diesem Fall direkt an das Netzgerät angeschlossen. Zwischen der Schaltung der Kathode und dem Gitter in der Elektronenröhre wird ein kleiner Kondensator zwischengeschaltet, welcher für Hochfrequenzen einen Kurzschluss bildet. Jede der zwei Gruppen übernimmt eine Messung für zwei Anodenspannungen von 50 V und 100 V, um den Anodenstrom I_A in Abhängigkeit der Gitterspannung U_G aufzunehmen. Insgesamt werden hierfür jeweils 20 Messpunkte aufgenommen, wobei ungefähr zehn positive Gitterspannungen bis 15 mA und zehn negative Gitterspannungen bis 0 mA notiert wurden.

Anhand der obigen Messungen wird nun anschließend im linearen Teil der Kennlinie ein Arbeitspunkt für den Anodenstrom I_A gewählt. Bei beiden Messungen für 50 V und 100 V wurde ein Arbeitspunkt für Gitterspannungen U_G im positiven Bereich ausgesucht. Dieser lag bei der Messreihe mit $U_H = 50$ V bei $I_A = 8,54$ A und für $U_H = 100$ V bei $I_A = 6,48$ mA. Um den Arbeitspunkt herum werden nun zwei weitere Messungen vorgenommen, um die Charakteristika der verwendeten Elektronenröhre bestimmen zu können. Zuerst wird die Gitterspannung U_G konstant gehalten und je fünf Wertepaare aus Anodenstrom I_A und Spannung U_A , welche während des Versuches variiert wird, links und rechts des Arbeitspunktes aufgenommen. Anschließend wird der Anodenstrom I_A konstant auf dem Wert des Arbeitspunktes festgehalten und erneut je fünf Wertepaare links und rechts des Arbeitspunktes für die Gitterspannung U_G und U_A aufgenommen. Dabei werden die Spannungen U_G und U_A simultan so eingestellt, dass der Anodenstrom I_A bis auf eine Abweichung von $\Delta I_A = \pm 0,02$ mA mit dem Arbeitspunkt übereinstimmt.

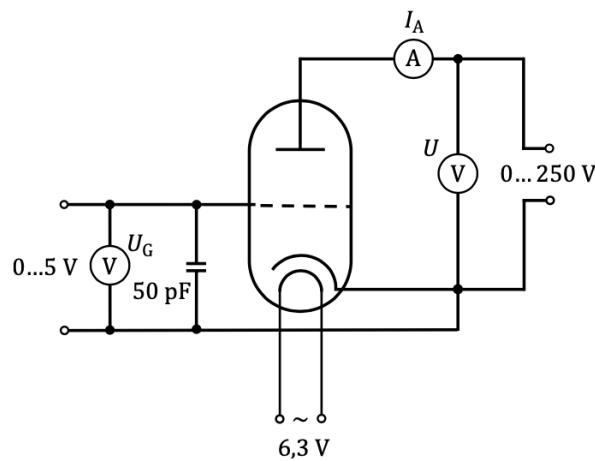


Abb. 2.5: Schaltung zur Messung der Triodenkennlinien (Universität Augsburg, SoSe 2025).

2.2 Auswertung der Messergebnisse

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Versuchsdurchführung werden die damit erlangten Messergebnisse nun ausgewertet.

Bestimmung des Innenwiderstandes des Amperemeters

Die Bestimmung des Innenwiderstandes des verwendeten Amperemeters hätte entweder über die Messergebnisse der stromrichtigen Schaltung oder der Wheatstoneschen Brücke stattgefunden. Jedoch wurde die experimentelle Durchführung beider Methoden zur Bestimmung des Innenwiderstandes aus Zeitgründen ausgelassen, sodass keine explizite Auswertung hierfür erfolgt. Im Folgenden werden für die weiteren Auswertungen die bereitgestellten Ergebnisse aus Tabelle 2.1 zur Berücksichtigung der Innenwiderstände für den jeweiligen Messbereich des Amperemeters verwendet.

	R_{innen} in Ω	ΔR_{innen} in Ω
A	0,050	0,005
mA	2,500	0,050
μA	100,000	5,000

Tabelle 2.1: Innenwiderstände R_i des Amperemeters für verschiedene Messbereiche.

Kennlinien der Elektronenröhre als Diode

Die erlangten Messergebnisse der Elektronenröhre als Diode werden im Folgenden für die vier verschiedenen Heizströme I_H graphisch dargestellt. Bevor dies geschieht, werden die Messungen der Spannung $U_{A,\text{gemessen}}$ um den Innenwiderstand R_i des Amperemeters berichtigt. Die Anpassung der gemessenen Spannung $U_{A,\text{gemessen}}$ erfolgt über die Formel

$$U_{A,\text{berichtigt}} = U_{A,\text{gemessen}} - I_A \cdot R_i.$$

Dabei ist zu beachten, dass die gemessenen Werte in mA um den Innenwiderstand $R_{\text{mA}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ und die gemessenen Werte in μA um den Innenwiderstand $R_{\mu\text{A}} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ korrigiert werden müssen.

Nach Durchführung dieser Korrektur kann nun die Anodenspannung $U_{A,\text{berichtigt}}$, im Folgenden als U_A bezeichnet, gegen den Anodenstrom I_A aufgetragen werden. Dies ist in Abbildung 2.6 für die vier verschiedenen Heizströme $I_H = 110,5 \text{ mA}$ in Orange, $I_H = 119,8 \text{ mA}$ in Hellblau, $I_H = 130,2 \text{ mA}$ in Grün und $I_H = 140,2 \text{ mA}$ in Rot zu sehen. Die zugrundeliegenden Daten sind in den Tabellen 3.1 bis 3.4 im Anhang 3 zu finden.

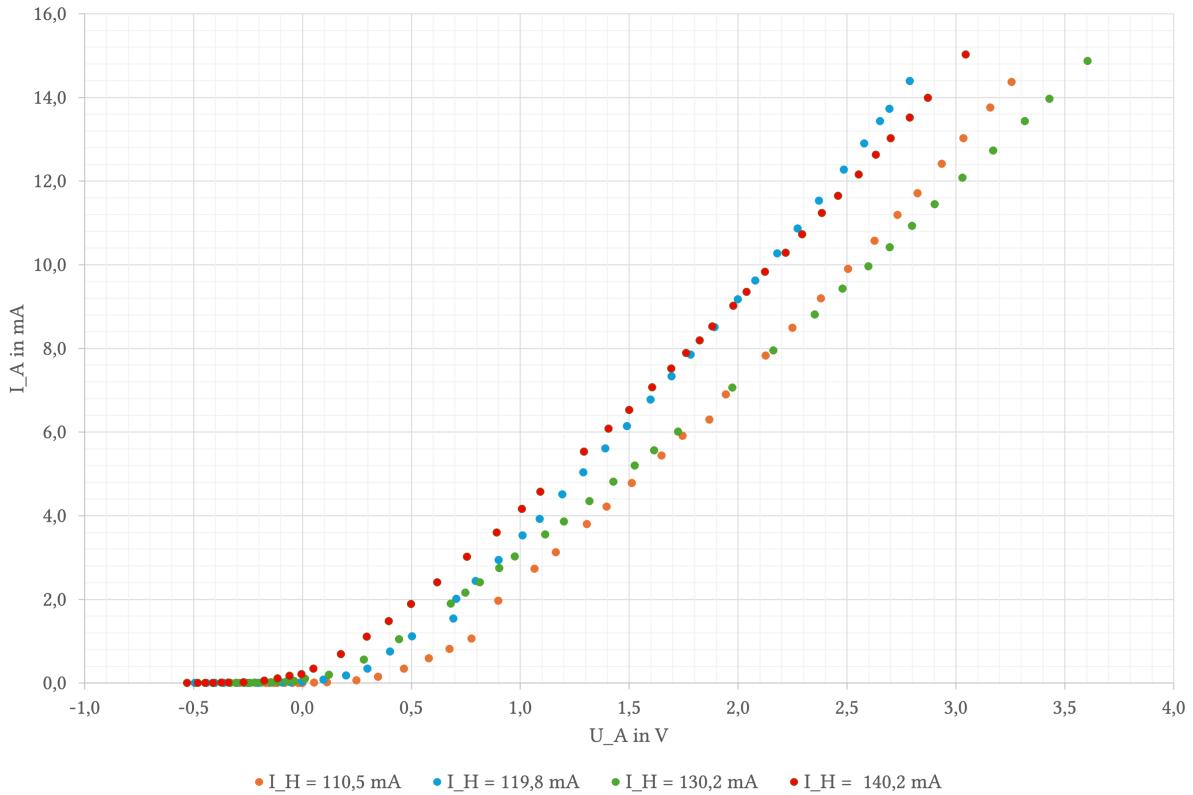


Abb. 2.6: Auftragung der Anodenspannung U_A gegen den Anodenstrom I_A für alle gewählten Heizströme I_H .

Ein Vergleich mit der Strom-Spannungskennlinie einer Hochvakuumdiode aus dem Fachbuch Walcher (1994, S. 276) ergibt, dass die resultierenden Kennlinien den Erwartungen entsprechen. Für das Anlaufstromgebiet der Diode gilt der mathematische Zusammenhang

$$I_{\text{Anl}} = I_0 \exp\left(\frac{eU_A}{k_B T}\right)$$

mit der Elementarladung e , der Boltzmann-Konstante k_B und der Kathodentemperatur T . Das Anlaufstromgebiet der vorliegenden Messungen befindet sich in Abbildung 2.6 ungefähr im Anondenspannungsbereich zwischen $-0,5$ V und $1,0$ V. Wie erwartet verläuft die Kennlinie der Messergebnisse in diesem Bereich exponentiell gegen den Anodenstrom $I_A = 0$.

Im rechts an das Anlaufstromgebiet angrenzenden Raumladungsgebiet lassen sich die Erwartungen des Verlaufs über den Vergleich mit der Grafik aus dem Fachbuch Walcher (1994, S. 276) gleichermaßen bestätigen. Ebenfalls lässt sich die zugrundeliegende mathematische Beschreibung

$$I_{\text{Raum}} = C \cdot U_A^{\frac{3}{2}}$$

mit der Proportionalitätskonstante C durch einen steilen Anstieg der Kennlinien verifizieren. Überraschend ist jedoch, dass die Erwartung, dass bei höheren Heizströmen auch der Anstieg der Kennlinie deutlich steiler ausfällt, nur bedingt bestätigt werden kann. Denn in der Theorie ist für einen höheren Anodenstrom auch die Kathodentemperatur höher. Dadurch besitzen mehr Elektronen die nötige kinetische Energie, um gegen das vorherrschende Feld der die

Kathode umgebende Elektronenwolke anzukommen und zur Anode zu gelangen. Somit müsste für einen höheren Heizstrom I_H auch der Anodenstrom I_A größer sein. Dies ist beispielsweise für die rote Kennlinie für $I_H = 140,2 \text{ mA}$ zunächst auch der Fall. Im Bereich der Anodenspannung $U_A = 1,7 \text{ V}$ jedoch kreuzt die blaue Kennlinie für den Heizstrom $I_H = 119,8 \text{ mA}$ die rote Kennlinie und verläuft nun steiler als diese. Dasselbe Phänomen ist ebenfalls für die grüne und orange Kennlinie mit den Heizströmen $I_H = 130,2 \text{ mA}$ und $I_H = 110,5 \text{ mA}$ zu beobachten. Zudem erscheint es verwunderlich, dass die blaue Kennlinie mit $I_H = 119,8 \text{ mA}$ steiler verläuft, als die der grünen mit $I_H = 130,2 \text{ mA}$. Dies ist eventuell darauf zurückzuführen, dass die Messungen für den Heizstrom $I_H = 110,5 \text{ mA}$ und $I_H = 119,8 \text{ mA}$ in einem zwar exakt gleichen Versuchsaufbau für die Elektronenröhre wie für die Heizströme $I_H = 130,2 \text{ mA}$ und $I_H = 140,2 \text{ mA}$ aufgenommen wurden, sich die beiden Elektronenröhren trotz gleicher Bauart infolge der Jahre im Labor doch leicht unterscheiden. Insgesamt ist das Ergebnis trotz der Kreuzungen der Kennlinien zufriedenstellend.

Anlaufstromgebiet der Elektronenröhre als Diode

Im Folgenden wird nun isoliert das Anlaufstromgebiet der Kennlinien für die Diode näher betrachtet. Zur Bestimmung der Kathodentemperatur T kann der Zusammenhang

$$I_A = I_0 \exp\left(\frac{eU_A}{k_B T}\right) \Rightarrow \ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right) = \underbrace{\frac{e}{k_B T}}_{\hat{=} \text{Steigung } m} U_A$$

herangezogen werden.

Da nur das Anlaufstromgebiet betrachtet werden soll, werden in den Grafiken 2.7 bis 2.10 nur die negativen Werte ober- beziehungsweise unterhalb der Stromstärke I_0 aus den Tabellen 3.1 bis 3.4 verwendet. Durch das Auftragen von $\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$ gegen die berichtigte Anodenspannung U_A kann der Quotient $\frac{e}{k_B T}$ über die Steigung der Ausgleichsgeraden bestimmt werden. Der Fehler wurde über das händische Einzeichnen von Grenzgeraden in Dunkelblau und Lila bestimmt, sodass sich der Gesamtfehler über die Formel

$$\Delta m = \frac{m_{\text{dunkelblau}} - m_{\text{lila}}}{2}$$

ergibt.

Die graphische Auswertung erfolgte gleichermaßen für alle vier aufgenommenen Heizströme von $I_H = 110,5 \text{ mA}$ bis $I_H = 140,2 \text{ mA}$.

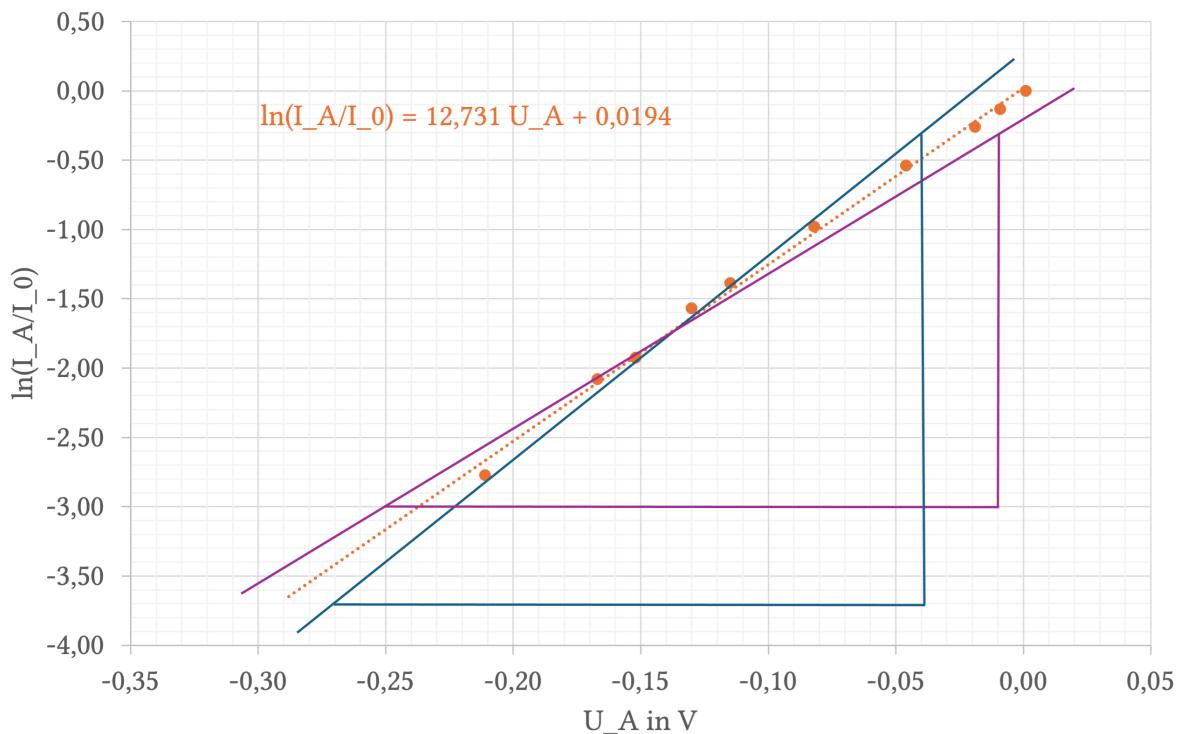


Abb. 2.7: Auftragung von $\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$ gegen U_A des Anlaufstromgebiets für den Heizstrom $I_H = 110,5$ mA.

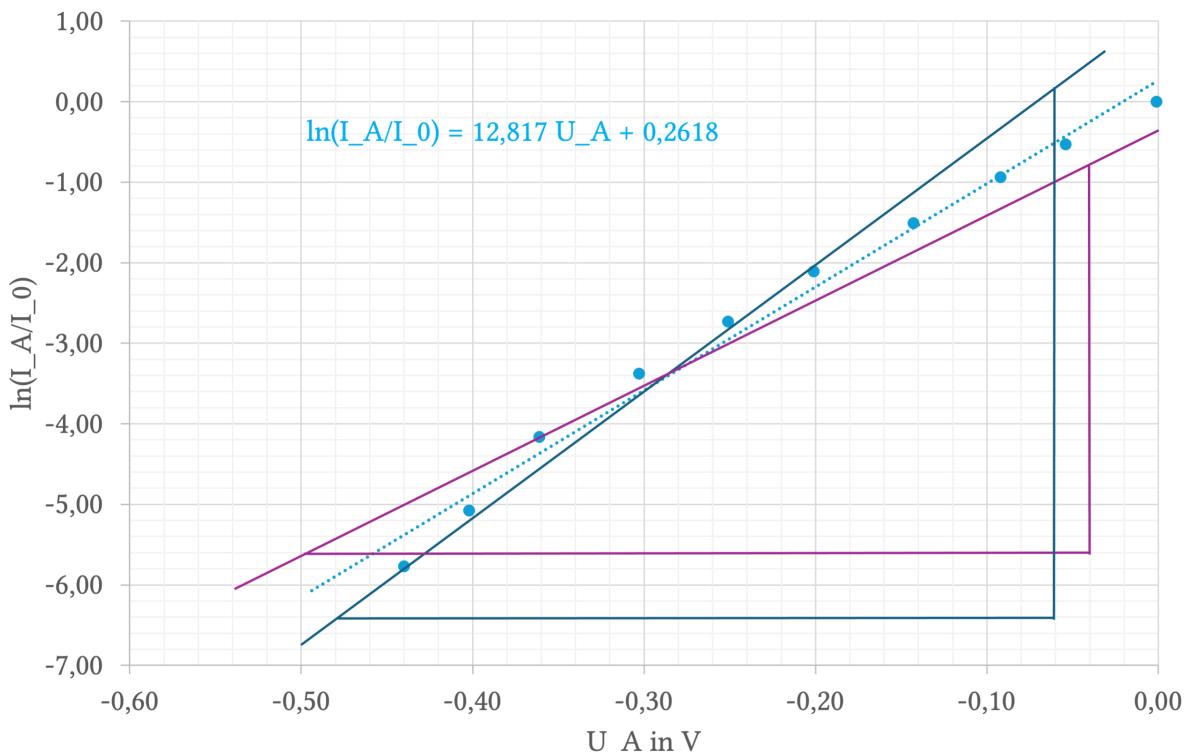


Abb. 2.8: Auftragung von $\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$ gegen U_A des Anlaufstromgebiets für den Heizstrom $I_H = 119,8$ mA.

2 Kennlinien von Elektronenröhren

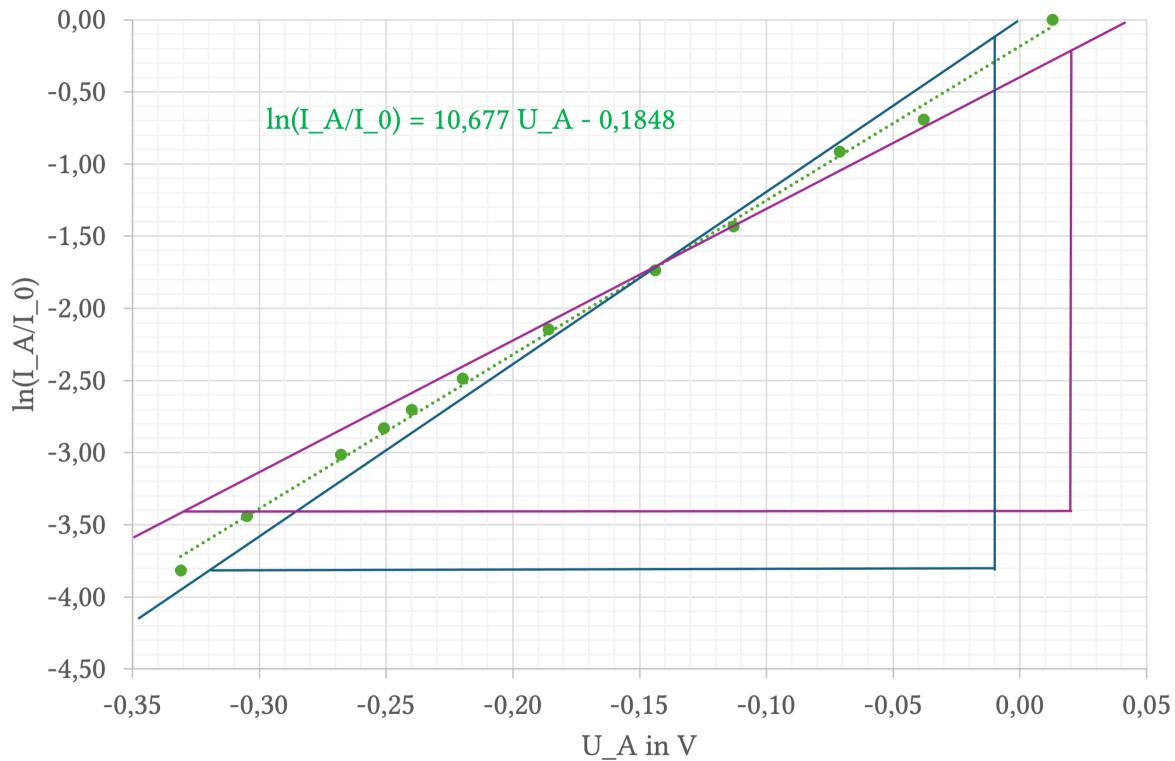


Abb. 2.9: Auftragung von $\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$ gegen U_A des Anlaufstromgebiets für den Heizstrom $I_H = 130,2$ mA.

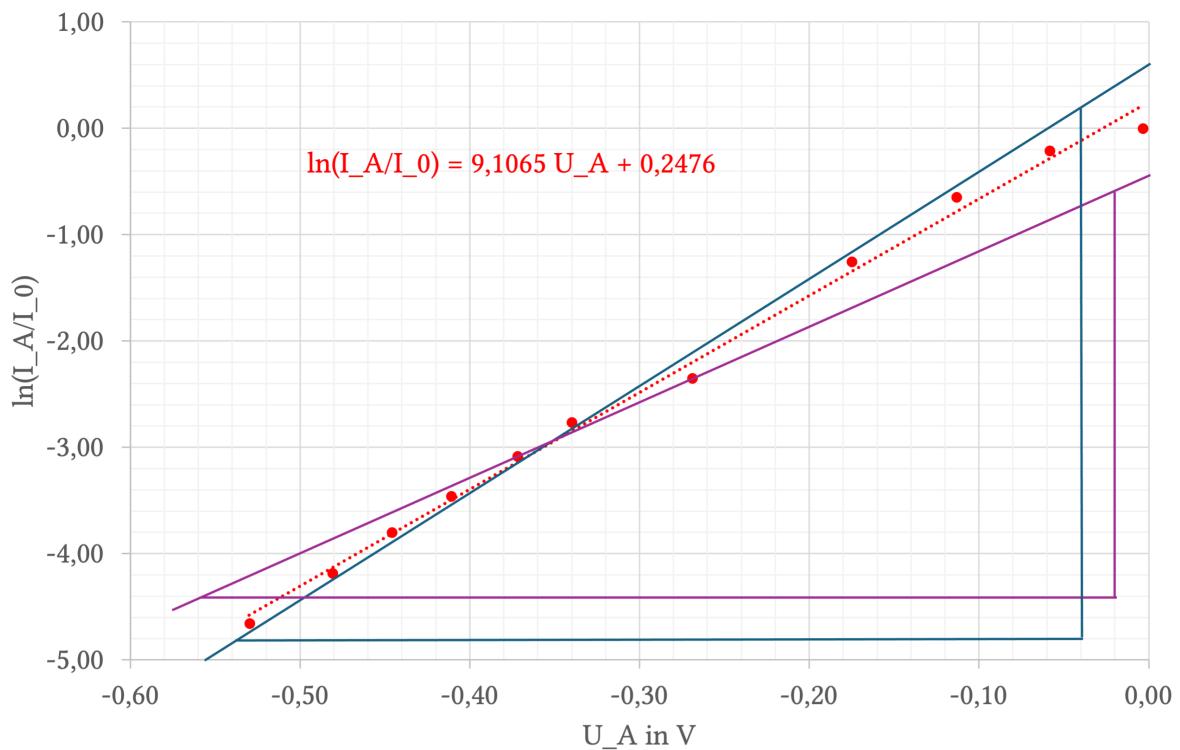


Abb. 2.10: Auftragung von $\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$ gegen U_A des Anlaufstromgebiets für den Heizstrom $I_H = 140,2$ mA.

Die resultierenden Steigungen der Ausgleichs- und Grenzgeraden sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Steigung \ I_H in mA	110,5	119,8	130,2	140,2
Ausgleichsgerade m	12,73	12,82	10,68	9,11
$m_{\text{dunkelblau}}$	14,78	16,50	11,94	10,00
m_{lila}	11,25	10,91	10,32	7,04
Δm	1,77	2,80	0,81	1,48

Tabelle 2.2: Auswertung der Grenz- und Ausgleichsgeraden aller Heizströme für das Anlaufstromgebiet.

Die Temperatur der Kathode kann nun über den Zusammenhang

$$T = \frac{e}{k_B \cdot m}$$

mit der Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ und der Boltzmann-Konstante $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ (Tipler und Mosca, 2024, S. 1347) und deren Größtfehler

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial m} \right| \cdot \Delta m = \frac{T}{m} \cdot \Delta m$$

berechnet werden.

Die Ergebnisse aus dem Einsetzen der obigen Steigungen in die Formel sind in Tabelle 2.3 zu finden.

Aufbauend darauf kann nun die mittlere und die wahrscheinlichste Geschwindigkeit der Elektronen bestimmt werden. Die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} ergibt sich über die Formel

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_e}}$$

mit der Elektronenmasse $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ (Tipler und Mosca, 2024, S. 1347) und dem Größtfehler

$$\Delta \bar{v} = \left| \frac{\partial \bar{v}}{\partial T} \right| \cdot \Delta T = \frac{\bar{v}}{2T} \cdot \Delta T$$

Die wahrscheinlichste Geschwindigkeit kann über die Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$f(v) dv = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left(-\frac{mv^2}{2k_B T} \right) dv$$

bestimmt werden.

Durch das Nullsetzen der ersten Ableitung der Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(v)$

$$f'(v) = \underbrace{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{k_B T}\right)^{\frac{3}{2}} 2v \cdot \left(1 - v^2 \cdot \frac{m}{2k_B T}\right)}_{=0 \text{ für } v=0} \stackrel{!}{=} 0$$

kann die wahrscheinlichste Geschwindigkeit \hat{v} bestimmt werden. Der erste Teil der ersten Ableitung ist nur dann gleich null, wenn die Geschwindigkeit v bereits null ist. Somit genügt es, zur Bestimmung der wahrscheinlichsten Geschwindigkeit \hat{v} , den hinteren Teil der Gleichung weiter zu betrachten:

$$\left(1 - v^2 \cdot \frac{m}{2k_B T}\right) \stackrel{!}{=} 0 \Leftrightarrow \hat{v} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m_e}}$$

mit dem Größtfehler

$$\Delta \hat{v} = \left| \frac{\partial \hat{v}}{\partial T} \right| \cdot \Delta T = \frac{\hat{v}}{2T} \cdot \Delta T.$$

Die Ergebnisse der mittleren und wahrscheinlichsten Geschwindigkeiten der Elektronen sind ebenfalls wie die Temperatur in Tabelle 2.3 angegeben.

I_H in mA	m	Δm	T in K	ΔT in K	\bar{v} in m/s	$\Delta \bar{v}$ in m/s	\hat{v} in m/s	$\Delta \hat{v}$ in m/s
110,5	12,73	1,77	911,18	126,68	$1,88 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^4$	$1,66 \cdot 10^5$	$1,16 \cdot 10^4$
119,8	12,82	2,80	905,07	197,72	$1,87 \cdot 10^5$	$2,04 \cdot 10^4$	$1,66 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^4$
130,2	10,68	0,81	1086,47	82,42	$2,05 \cdot 10^5$	$7,77 \cdot 10^3$	$1,82 \cdot 10^5$	$6,88 \cdot 10^3$
140,2	9,11	1,48	1273,78	207,00	$2,22 \cdot 10^5$	$1,80 \cdot 10^4$	$1,97 \cdot 10^5$	$1,60 \cdot 10^4$

Tabelle 2.3: Auswertung der Kathodentemperatur und der mittleren und wahrscheinlichsten Geschwindigkeit der Elektronen für alle Heizströme im Anlaufstromgebiet.

Die Erwartung, dass die Temperaturen mit der Erhöhung des Heizstromes steigen, konnte bis auf bei $I_H = 119,8$ mA bestätigt werden, denn die Temperatur des Heizstromes $I_H = 110,5$ mA ist in etwa 6 K höher, als die des höheren Heizstromes $I_H = 119,8$ mA. Für die Heizströme $I_H = 110,5$ mA, $I_H = 130,2$ mA und $I_H = 140,2$ mA trifft jedoch der erwartete, deutliche Temperaturunterschied zu. Werden die berechneten Fehlerterme in die Interpretation miteinbezogen, so gleicht sich der Fauxpas bei $I_H = 110,5$ mA und $I_H = 119,8$ mA durch den deutlich größeren Fehlerwert bei $I_H = 119,8$ mA wieder aus. Die mittleren und wahrscheinlichen Geschwindigkeiten sind aufgrund ihrer Berechnung von den ermittelten Kathodentemperaturen abhängig, sodass aufgrund der zufriedenstellenden Ergebnisse der Kathodentemperaturen auch hier gute Werte anzunehmen sind. Die mittlere Geschwindigkeit ist bei allen Heizströmen größer als die der wahrscheinlichsten Geschwindigkeiten. Dieses Ergebnis ist im Sinne der Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilung nicht überraschend und deckt sich damit mit der Theorie.

Als mögliche systematische Fehler während der Messung ist beispielsweise zu beachten, dass nicht nur das Ampermeter einen Innenwiderstand besitzt, sondern auch andere technische Bauteile wie die Kabel einen geringfügigen Innenwiderstand besitzen, was zu einer Verfälschung der Spannungsmesswerte führen kann. Zudem erfolgt die Fehlerbetrachtung über das händische Einzeichnen der Fehlergeraden anhand einer subjektiven Abschätzung.

Raumladungsgebiet der Elektronenröhre als Diode

Anschließend an die nähere Betrachtung des Anodenstromgebiets wird nun das Raumladungsgebiet der Diode detaillierter untersucht.

Für das Raumladungsgebiet gilt für den Anodenstrom

$$I_A = C U_A^{\frac{3}{2}}$$

mit der Proportionalitätskonstante C . Das Logarithmieren der obigen Formel

$$\ln(I_A) = \ln(C) + \frac{3}{2} \ln(U_A)$$

ergibt, dass das graphische Auftragen des logarithmierten Anodenstroms $\ln(I_A)$ gegen die logarithmierte Anodenspannung $\ln(U_A)$ theoretisch eine Steigung von $m = \frac{3}{2}$ der Ausgleichsgeraden ergeben sollte.

Hierfür wurden die positiven Werte oberhalb beziehungsweise unterhalb des Anodenstroms I_0 logarithmiert und in den Grafiken 2.11 bis 2.14, wie beschrieben, gegeneinander aufgetragen. Die resultierenden Steigungen der Ausgleichs- und der Grenzgeraden, welche analog zum obigen Teilkapitel ermittelt wurden, sind in Tabelle 2.4 zu finden.

I_H in mA Steigung	110,5	119,8	130,2	140,2
Ausgleichsgerade m	1,97	1,60	1,28	1,11
$m_{\text{dunkelblau}}$	2,41	1,93	1,44	1,27
m_{lila}	1,70	1,29	1,14	0,96
Δm	0,36	0,32	0,15	0,15

Tabelle 2.4: Auswertung der Grenz- und Ausgleichsgeraden aller Heizströme für das Anlaufstromgebiet.

2 Kennlinien von Elektronenröhren

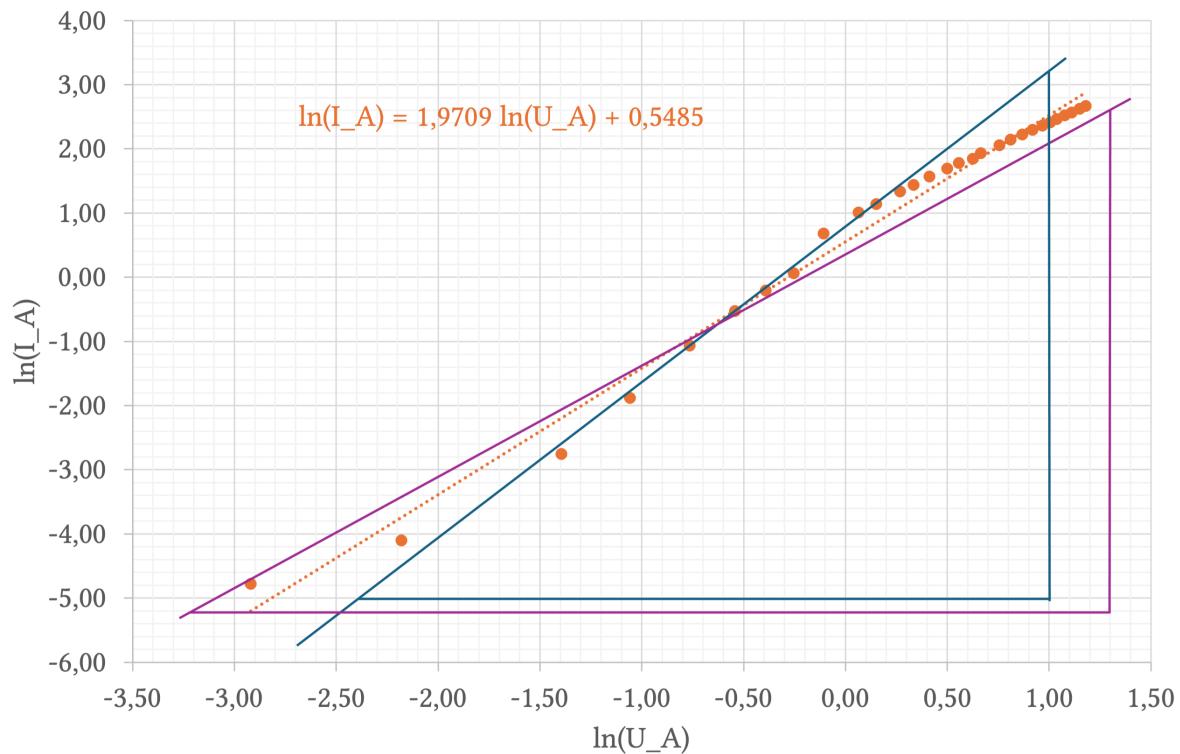


Abb. 2.11: Auftragung von $\ln(I_A)$ $\ln(U_A)$ des Raumladungsgebiets für den Heizstrom $I_H = 110,4$ mA.

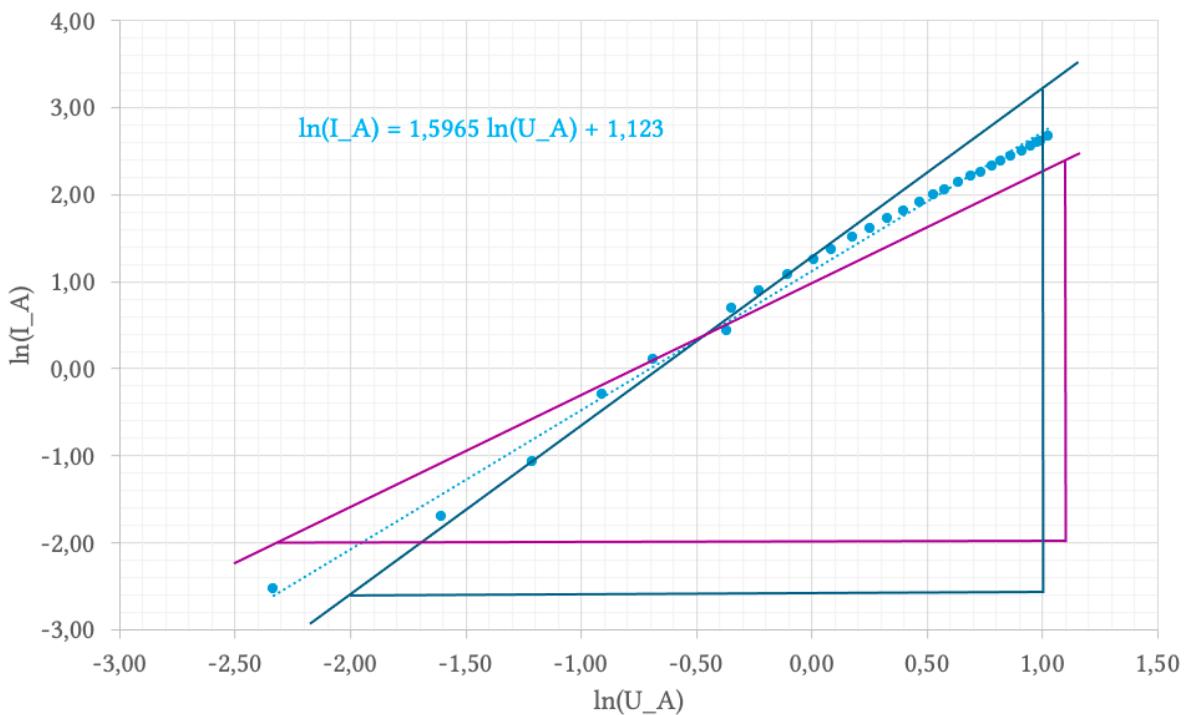


Abb. 2.12: Auftragung von $\ln(I_A)$ $\ln(U_A)$ des Raumladungsgebiets für den Heizstrom $I_H = 119,8$ mA.

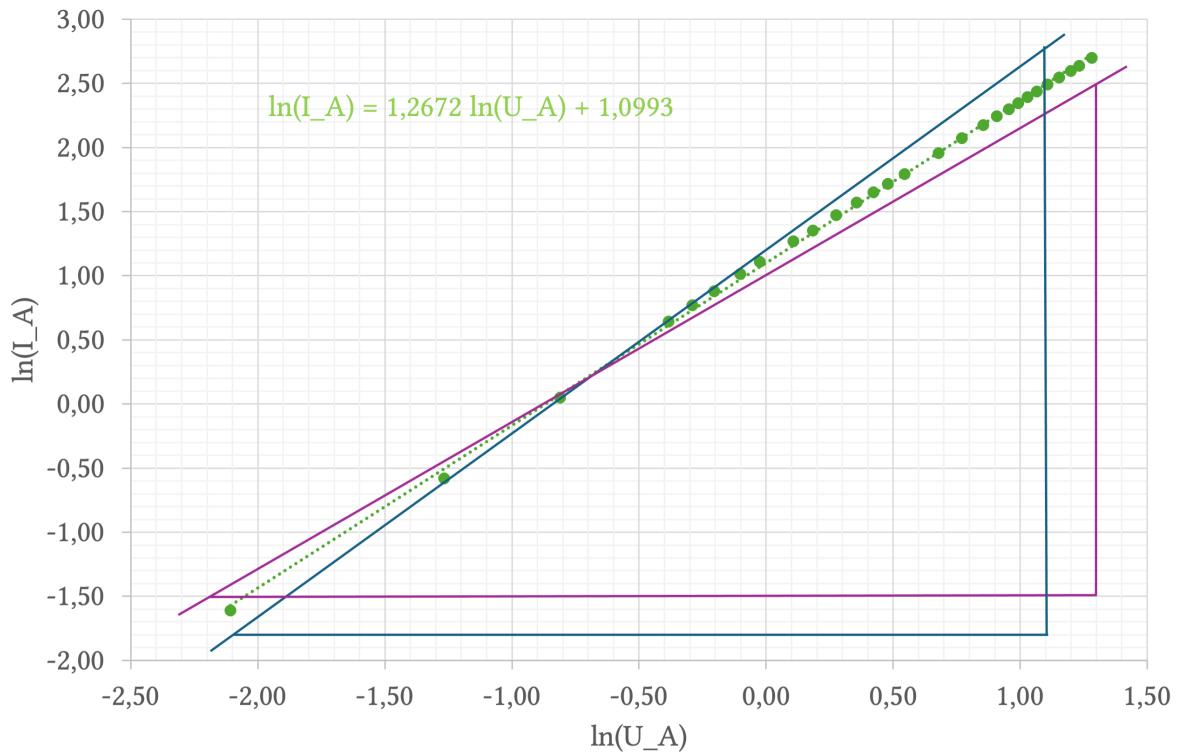


Abb. 2.13: Auftragung von $\ln(I_A)$ $\ln(U_A)$ des Raumladungsgebiets für den Heizstrom $I_H = 130,2$ mA.

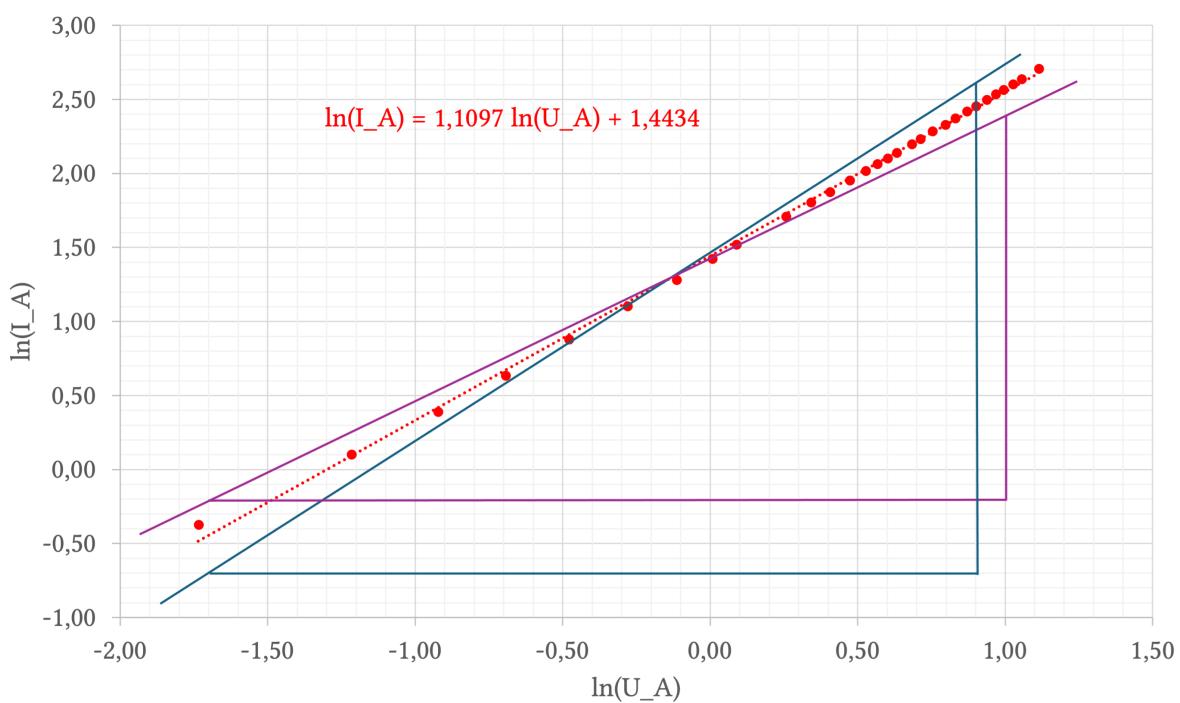


Abb. 2.14: Auftragung von $\ln(I_A)$ $\ln(U_A)$ des Raumladungsgebiets für den Heizstrom $I_H = 140,2$ mA.

Ziel war es, den theoretischen Steigungswert $m = 1,5$ zu erreichen, um die Theorie bestätigen zu können. Für den Heizstrom $I_H = 110,4 \text{ mA}$ liegt die Steigung $m = 1,61$ nach der Berücksichtigung des Fehlerwertes relativ nah. Die theoretisch erwartete Steigung kann für den Heizstrom $I_H = 119,8 \text{ mA}$ nach der Berücksichtigung des Fehlers bestätigt werden. Nach Berücksichtigung der Fehlerbetrachtung des Heizstromes $I_H = 130,2 \text{ mA}$ liegt die Steigung mit $m = 1,43$ sehr nah am theoretisch erwarteten Wert. Die schlechteste Steigung mit Berücksichtigung des Fehlers mit $m = 1,25$ weist Heizstrom $I_H = 140,2 \text{ mA}$ auf. Beim Vergleich mit den beiden zuerst genannten Heizströmen fällt jedoch auf, dass deren Fehlerwert doppelt so groß ist, wie der der zuletzt genannten. Dies lässt sich vor allem auf das händische Einzeichnen der Grenzgeraden zur Fehlerermittlung zurückführen, sodass letztendlich für alle Werte die Theorie als bestätigt angenommen werden kann. Mögliche systematische Messfehler wurden bereits im vorherigen Teilkapitel diskutiert.

Steuerkennlinien der Elektronenröhre als Triode

Zunächst werden die in Versuchsteil 3 aufgenommenen Steuerkennlinien aus Tabelle 3.5 und 3.9 graphisch dargestellt. Dafür wird die Spannung des Gitters U_G gegen den Anodenstrom I_A aufgetragen wie in Abbildung 2.15 zu sehen.

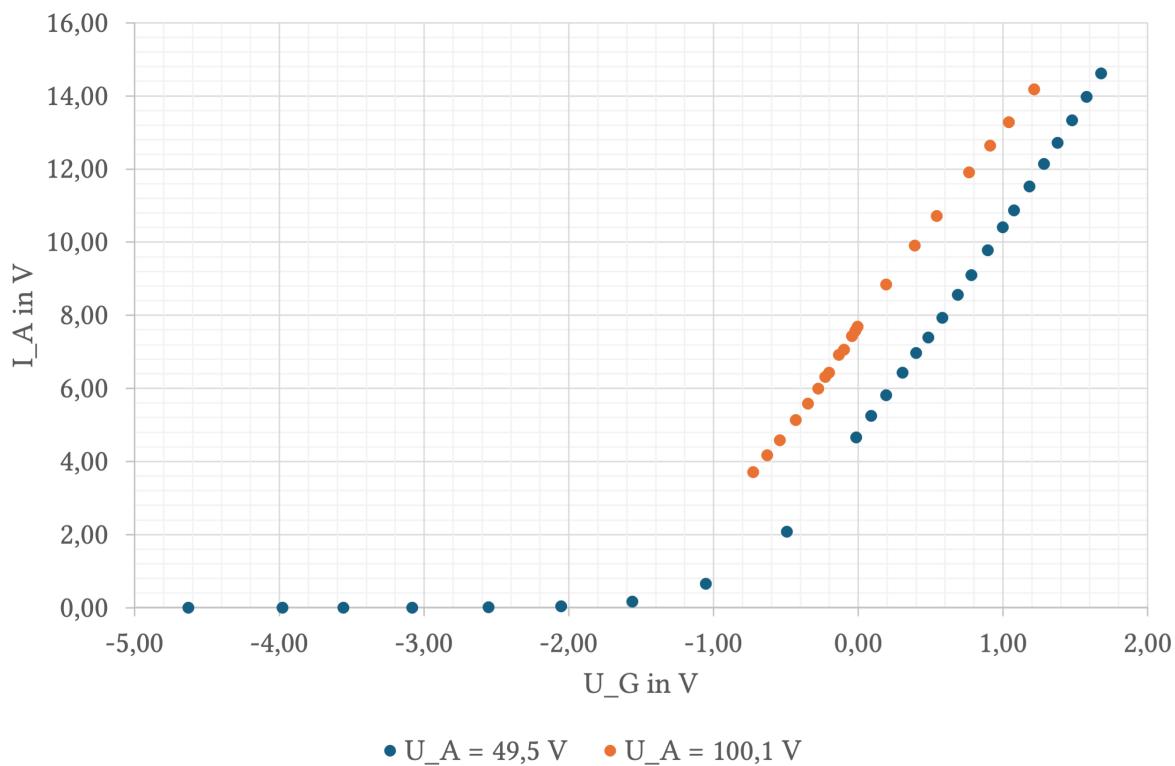


Abb. 2.15: Steuerkennlinien der Triode für die Anodenspannungen $U_A = 49,5 \text{ V}$ und $U_A = 100,1 \text{ V}$

Ein Vergleich mit der Literatur für die Steuerkennlinien einer Triode ergibt, dass die experimentell Bestimmten Kennlinien den Erwartungen entsprechen (Walcher, 1994, S. 278). Bei der Messung der Kennlinie für die Anodenspannung $U_A = 100,1 \text{ V}$ wurde nicht bis zu einem

Anodenstrom von $I_A = 0,0 \text{ mA}$ gemessen, sodass der untere Bereich der orangen Kennlinie nur vermutet werden kann. Dieser Fehler ist menschlichem Versagen zuzuordnen. An der blauen Kennlinie lässt sich gut erkennen, dass bei negativen Gitterspannungen das Feld abschwächt und die Gitterspannung sehr gering ist. Mit steigender Gitterspannung U_G wird das elektrische Feld immer stärker und der Anodenstrom I_A beginnt zu steigen. Für immer stärkere Anodenströme wird auch die Anodenspannung größer und der Anstieg steiler.

Bestimmung der Charakteristika der Elektronenröhre als Triode

Für beide angelegten Anodenspannungen $U_A = 49,5 \text{ V}$ und $U_A = 100,1 \text{ V}$ wird nun im linearen Teil der Steuerkennlinie ein Arbeitspunkt ausgewählt. Dieser liegt für $U_A = 49,5 \text{ V}$ bei $I_A = 8,54 \text{ mA}$ und für $U_A = 100,1 \text{ V}$ bei $I_A = 6,48 \text{ mA}$. Anhand der Arbeitspunkte können auf Grundlage von drei weiteren Messungen die Charakteristika Steilheit, Durchgriff und Röhrenwiderstand der Elektronenröhre als Triode bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Steilheit wird die Anodenstromstärke I_A gegen die Gitterspannung U_G aufgetragen. Die Steigung m der Ausgleichsgerade liefert gemäß dem Zusammenhang

$$S = \frac{\partial I_A}{\partial U_G} \quad \text{für } U_A = \text{const}$$

die Steilheit S der Triode.

Für den Durchgriff wird die Gitterspannung U_G gegen die Anodenspannung U_A aufgetragen, um anhand der Steigung die Kenngröße des Durchgriffs

$$D = -\frac{\partial U_G}{\partial U_A} \quad \text{für } I_A = \text{const}$$

zu erhalten.

Zuletzt wird für den Röhrenwiderstand die Anodenspannung U_A gegen die Anodenstromstärke I_A aufgetragen, sodass gemäß

$$R = \frac{\partial U_A}{\partial I_A} \quad \text{für } U_G = \text{const}$$

die Steigung m der Ausgleichsgeraden dem Röhrenwiderstand entspricht.

Die zugrundeliegenden Werte für $U_A = 49,5 \text{ V}$ sind in den Tabellen 3.6 bis 3.8 zu finden. Die zugehörigen Graphiken zur Bestimmung der Steilheit, des Durchgriffs und des Röhrenwiderstandes für die Anodenspannung $U_A = 49,5 \text{ V}$ befinden sich in den Abbildungen 2.16 bis 2.18. Dabei ist bei der Platzierung der Grenzgeraden zu beachten, dass diese durch den Arbeitspunkt verlaufen.

2 Kennlinien von Elektronenröhren

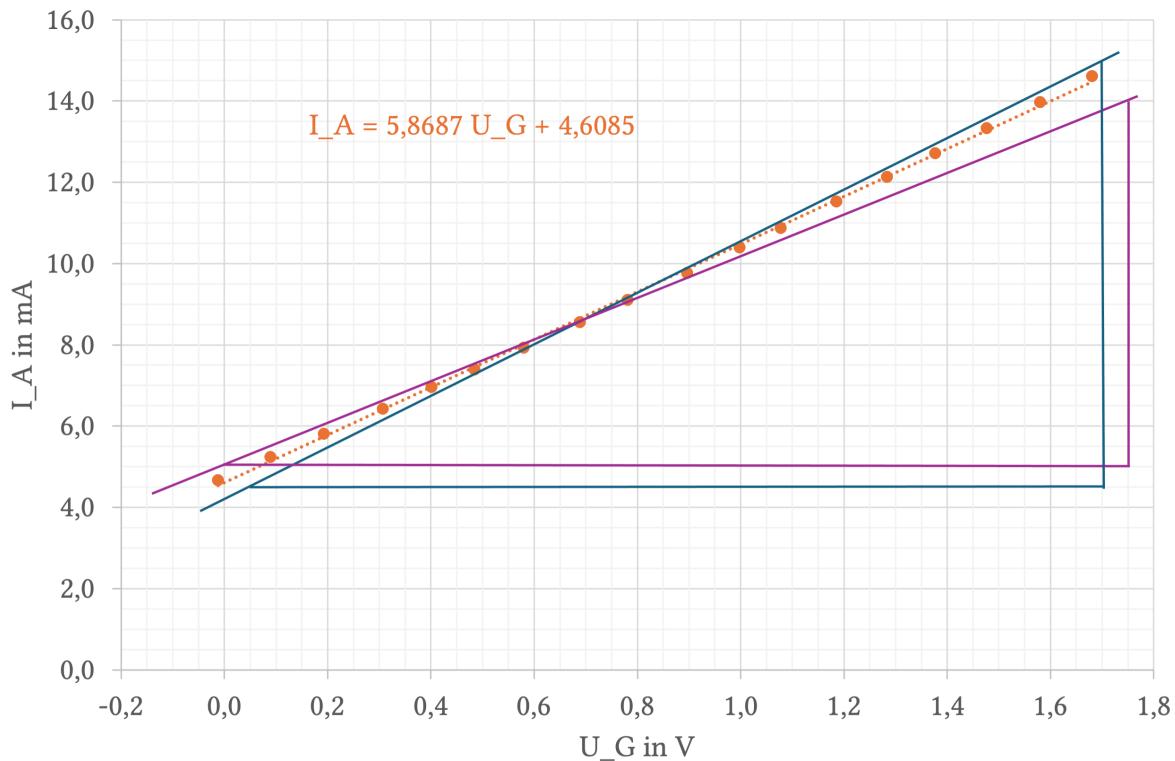


Abb. 2.16: Auftragung von I_A gegen U_G zur Bestimmung der Steilheit für $U_A = 49,5$ V.

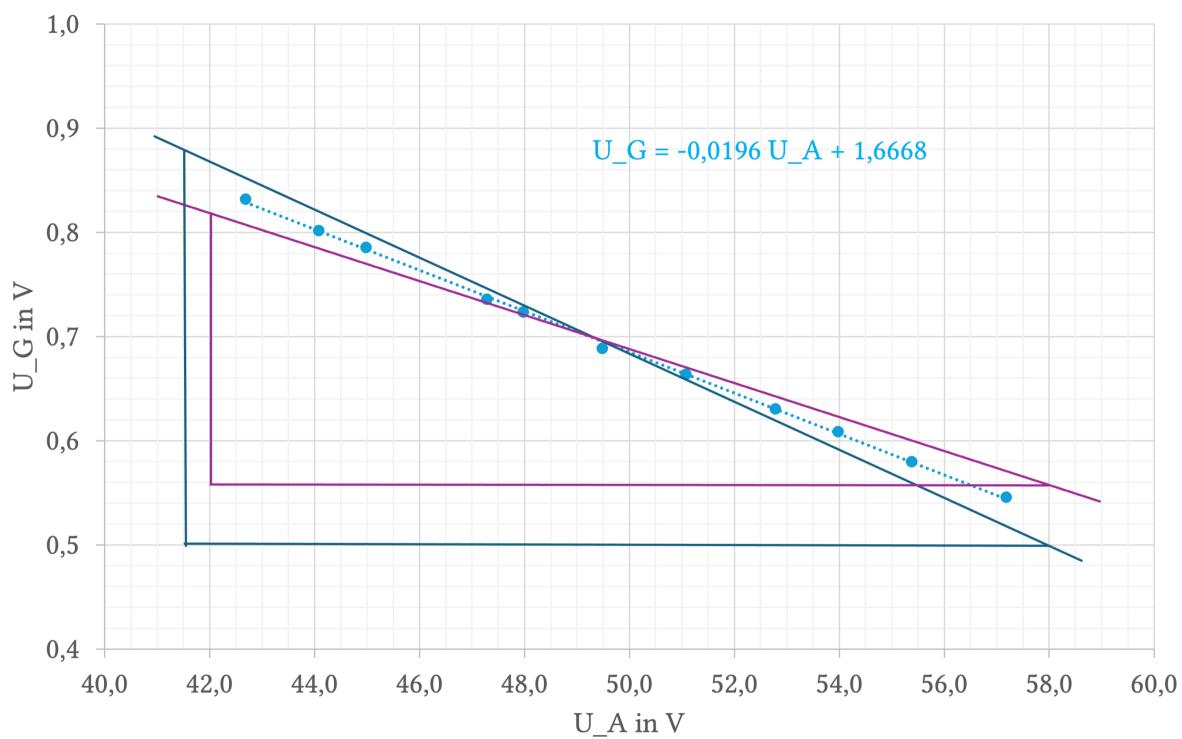


Abb. 2.17: Auftragung von U_G gegen U_A zur Bestimmung des Durchgriffs für $U_A = 49,5$ V.

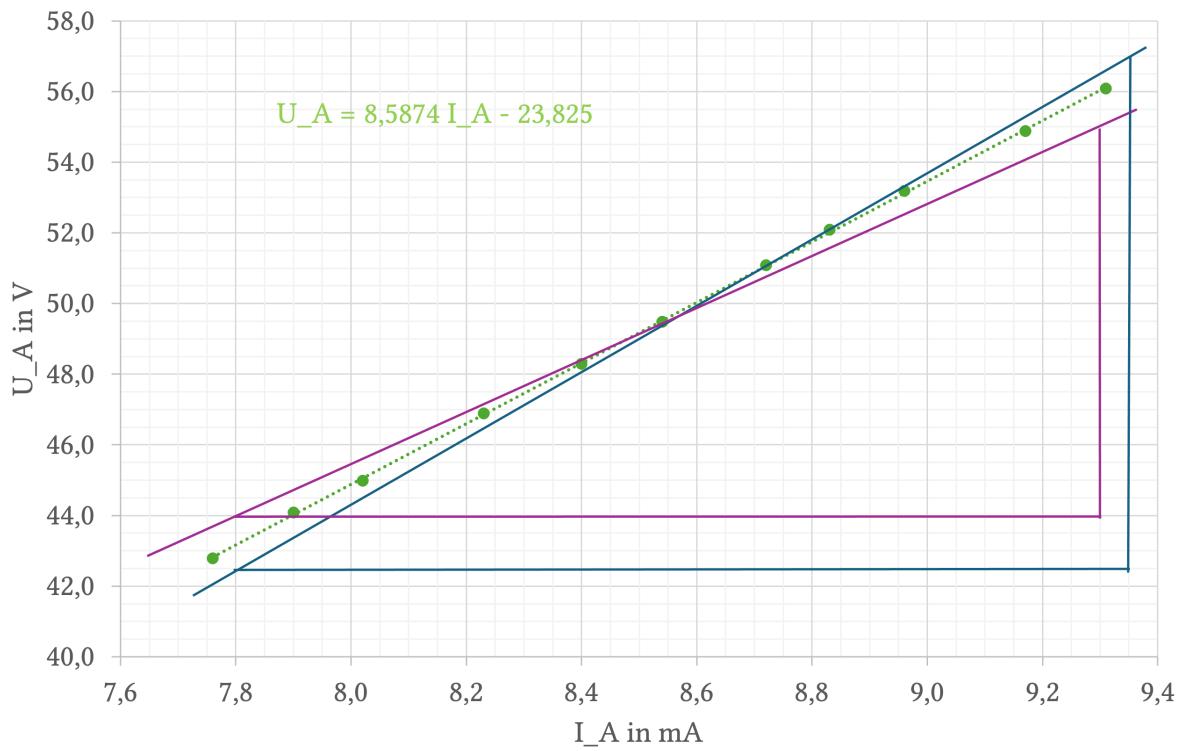


Abb. 2.18: Auftragung von U_A gegen I_A zur Bestimmung des Röhrenwiderstandes für $U_A = 49,5$ V.

Die Auswertung der Ausgleichsgeraden und deren Grenzgeraden, welche sich über die Formel

$$\Delta m = \frac{m_{\text{dunkelblau}} - m_{\text{lila}}}{2}$$

ergeben, ist in Tabelle 2.5 zu finden. Aufgrund der negativen partiellen Ableitung für den Durchgriff D muss die vorliegende negative Steigung aus Abbildung 2.17 um ein Minus ergänzt werden, sodass letztendlich ein positiver Wert für den Durchgriff resultiert.

	Steilheit	Durchgriff	Röhrenwiderstand
Ausgleichsgerade m	5,867	0,020	8,587
$m_{\text{dunkelblau}}$	6,364	0,023	9,355
m_{lila}	5,143	0,016	7,333
Δm	0,610	0,003	1,011

Tabelle 2.5: Auswertung der Grenz- und Ausgleichsgeraden für $U_A = 49,5$ V zur Bestimmung der Steilheit, des Durchgriffs und des Röhrenwiderstandes.

Die Auswertung für die Anodenspannung $U_A = 100,1$ V erfolgt analog auf Grundlage der Messwerte in den Tabellen 3.10 bis 3.12. Die zugehörige graphische Auswertung ist in den Abbildungen 2.19 bis 2.21 und die Auswertung der Ausgleichs- und Grenzgeraden ist in Tabelle 2.6 zu finden. Auch hier wurde das Vorzeichen des Durchgriffs korrigiert.

2 Kennlinien von Elektronenröhren

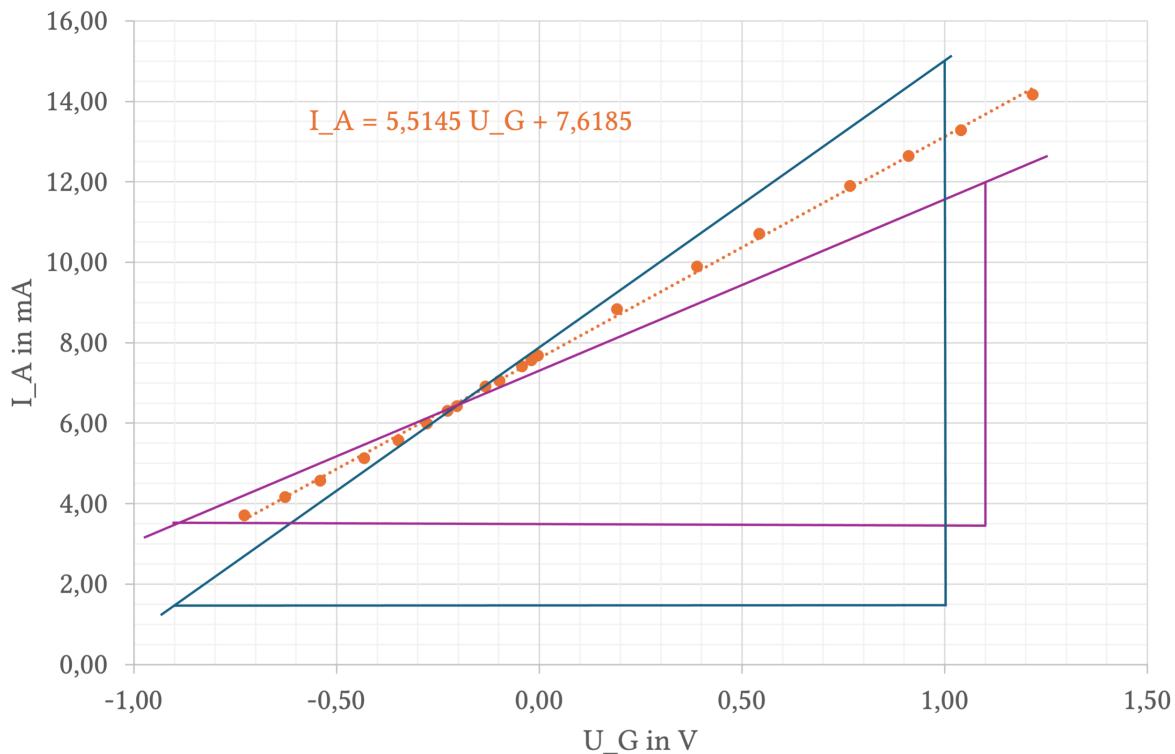


Abb. 2.19: Auftragung von I_A gegen U_G zur Bestimmung der Steilheit für $U_A = 100,1$ V.

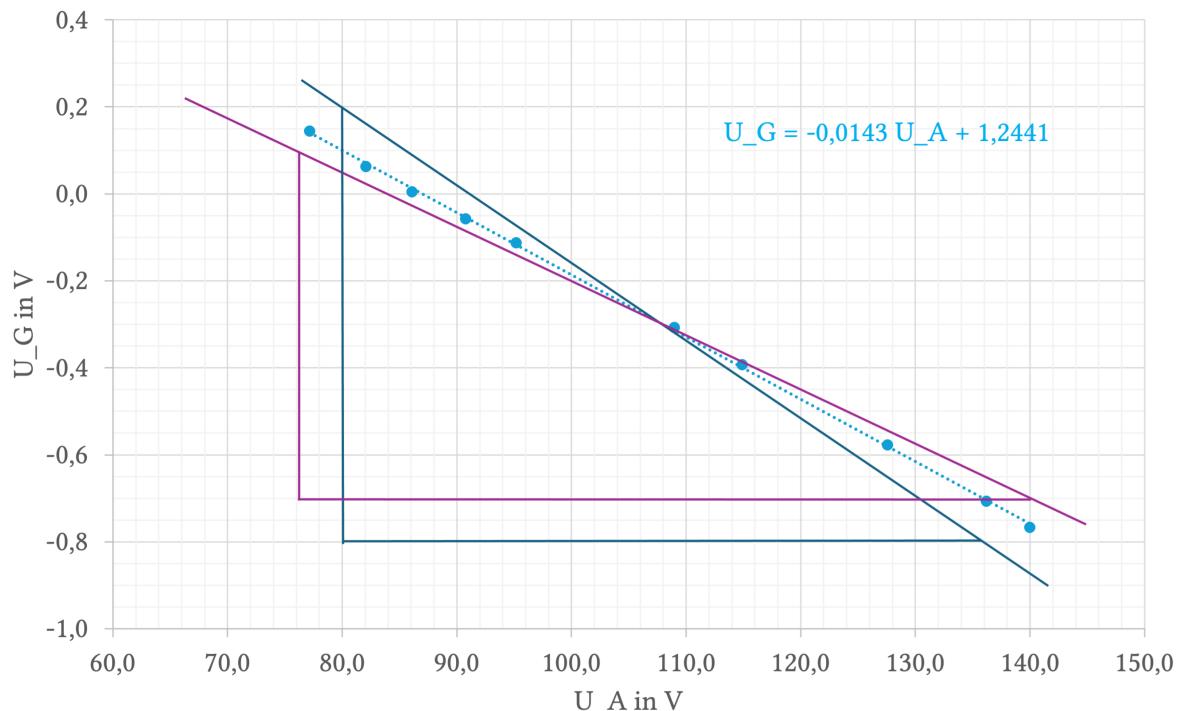


Abb. 2.20: Auftragung von U_G gegen U_A zur Bestimmung des Durchgriffs für $U_A = 100,1$ V.

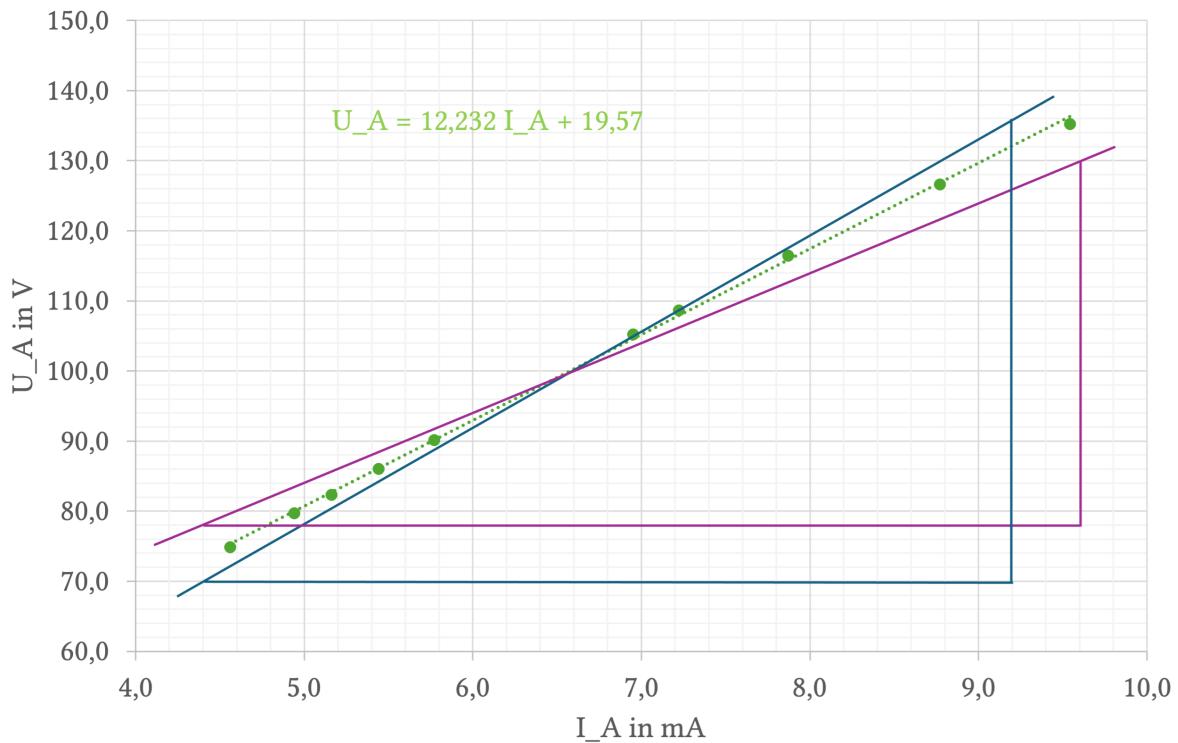


Abb. 2.21: Auftragung von U_A gegen I_A zur Bestimmung des Röhrenwiderstandes für $U_A = 100,1$ V.

	Steilheit	Durchgriff	Röhrenwiderstand
Ausgleichsgerade m	5,515	0,014	12,232
$m_{\text{dunkelblau}}$	7,105	0,018	13,750
m_{lila}	4,250	0,013	10,000
Δm	1,428	0,002	1,875

Tabelle 2.6: Auswertung der Grenz- und Ausgleichsgeraden für $U_A = 49,5$ V zur Bestimmung der Steilheit, des Durchgriffs und des Röhrenwiderstandes.

Um nun die Qualität der berechneten Bauteilcharakteristika beurteilen zu können wird die sogenannte Barkhausen-Beziehung

$$B = D \cdot S \cdot R = 1$$

mit dem Größtfehler

$$\Delta B = \left| \frac{\partial B}{\partial S} \right| \cdot \Delta S + \left| \frac{\partial B}{\partial D} \right| \cdot \Delta D + \left| \frac{\partial B}{\partial R} \right| \cdot \Delta R = D \cdot R \Delta S + R \cdot S \Delta D + D \cdot S \cdot \Delta R$$

auf die einzelnen Kenngrößen angewandt.

Die benötigten Größen hierfür sind in der Tabelle 2.7 nochmals zusammengetragen.

2 Kennlinien von Elektronenröhren

	$U_A = 49,5 \text{ V}$		$U_A = 100,1 \text{ V}$	
	m	Δm	m	Δm
S	5,867	0,61	5,515	1,428
D	0,02	0,003	0,014	0,002
R	8,587	1,011	12,232	1,875

Tabelle 2.7: Benötigte Kenngrößen zur Bestimmung der Barkhausen-Beziehung für $U_A = 49,5 \text{ V}$ und $U_A = 100,1 \text{ V}$.

Insgesamt ergibt sich für die Barkhausen-Beziehung für die Anodenspannung $U_A = 49,5 \text{ V}$ ein Wert von

$$B_{49,5 \text{ V}} = 1,008 \pm 0,375$$

und für die Anodenspannung $U_A = 100,1 \text{ V}$ ein Wert von

$$B_{100,1 \text{ V}} = 0,944 \pm 0,524.$$

Für beide aufgenommenen Messreihen liegt die Kenngröße der Barkhausen-Beziehung innerhalb des Fehlerwertes, sodass die Charakteristika der Elektronenröhre als Triode anhand der gewählten Arbeitspunkte in einer sehr guten Qualität bestimmt werden konnten.

Literatur

- Demtröder, Wolfgang (2017). *Experimentalphysik* 2. 7. Aufl. Kaiserslautern: Springer Spektrum.
- Meschede, Dieter (2010). *Gerthsen Physik*. 24. Aufl. Heidelberg: Springer.
- Tipler, Paul und Gene Mosca (2024). *Tipler Physik*. 9. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Universität Augsburg (SoSe 2025). *Versuchsanleitung E3 - Kennlinien von Elektronenröhren*.
- Walcher, Wilhelm (1994). *Praktikum Der Physik*. 7. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner.

3 Anhang

Messergebnisse und Auswertung der Diode

Heizstrom $I_H = 110,5 \text{ mA}$

U_{gem} in V	U_A in V	I_A in mA	$\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$	$\ln(U_A)$	$\ln(I_A)$
-0,288	-0,2880	0,0000			
-0,211	-0,2110	0,0003	-2,7726		-8,1117
-0,167	-0,1670	0,0006	-2,0794		-7,4186
-0,152	-0,1520	0,0007	-1,9253		-7,2644
-0,130	-0,1300	0,001	-1,5686		-6,9078
-0,115	-0,1150	0,0012	-1,3863		-6,7254
-0,082	-0,0820	0,0018	-0,9808		-6,3200
-0,046	-0,0460	0,0028	-0,5390		-5,8781
-0,019	-0,0190	0,0037	-0,2603		-5,5994
-0,009	-0,0090	0,0042	-0,1335		-5,4727
0,001	0,0010	0,0048	0,0000	-6,9082	-5,3391
0,054	0,0540	0,0084	0,5596	-2,9188	-4,7795
0,113	0,1130	0,0165	1,2347	-2,1804	-4,1044
0,248	0,2480	0,0637	2,5856	-1,3944	-2,7536
0,347	0,3470	0,1519	3,4546	-1,0585	-1,8845
0,466	0,4660	0,3442	4,2726	-0,7636	-1,0665
0,581	0,5809	0,5883	4,8086	-0,5431	-0,5305
0,676	0,6759	0,813	5,1321	-0,3917	-0,2070
0,776	0,7759	1,064	5,4012	-0,2537	0,0620
0,904	0,8991	1,9700	6,0172	-0,1064	0,6780
1,073	1,0662	2,7300	6,3434	0,0641	1,0043
1,172	1,1642	3,1300	6,4802	0,1520	1,1410
1,316	1,3065	3,8000	6,6741	0,2674	1,3350
1,408	1,3975	4,2200	6,7790	0,3346	1,4398
1,524	1,5121	4,7800	6,9036	0,4135	1,5644
1,662	1,6484	5,4400	7,0329	0,4998	1,6938
1,760	1,7452	5,9100	7,1158	0,5569	1,7766
1,884	1,8683	6,3000	7,1797	0,6250	1,8405
1,961	1,9438	6,9000	7,2707	0,6646	1,9315
2,147	2,1274	7,8300	7,3971	0,7549	2,0580

2,271	2,2498	8,4900	7,4780	0,8108	2,1389
2,403	2,3800	9,2000	7,5583	0,8671	2,2192
2,530	2,5053	9,9000	7,6317	0,9184	2,2925
2,653	2,6266	10,5700	7,6972	0,9657	2,3580
2,760	2,7320	11,1900	7,7542	1,0050	2,4150
2,853	2,8237	11,7100	7,7996	1,0381	2,4604
2,967	2,9360	12,4100	7,8576	1,0770	2,5185
3,068	3,0355	13,0200	7,9056	1,1104	2,5665
3,193	3,1586	13,7600	7,9609	1,1501	2,6218
3,292	3,2561	14,3700	8,0043	1,1805	2,6651

Tabelle 3.1: Messergebnisse und Auswertung der Diode für $I_H = 110,5 \text{ mA}$.

Die Werte U_{gem} oberhalb der Abtrennung wurden in μA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-6}$ korrigiert. Die Werte unterhalb der Abtrennung wurden in mA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-3}$ korrigiert. Die blau hinterlegte Zeile stellt I_0 dar. In diesem Bereich ist die angelegte Spannung U_A nahezu null.

Heizstrom $I_H = 119,8 \text{ mA}$

U_{gem} in V	U_A in V	I_A in mA	$\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$	$\ln(U_A)$	$\ln(I_A)$
-0,494	-0,4940	0,0000			
-0,440	-0,4400	0,0001	-5,7714		-9,2103
-0,402	-0,4020	0,0002	-5,0783		-8,5172
-0,361	-0,3610	0,0005	-4,1620		-7,6009
-0,303	-0,3030	0,0011	-3,3735		-6,8124
-0,251	-0,2510	0,0021	-2,7269		-6,1658
-0,201	-0,2010	0,0039	-2,1079		-5,5468
-0,143	-0,1430	0,0071	-1,5088		-4,9477
-0,092	-0,0920	0,0126	-0,9352		-4,3741
-0,054	-0,0540	0,0189	-0,5297		-3,9686
-0,001	-0,0010	0,0321	0,0000		-3,4389
0,097	0,0970	0,0796	0,9082	-2,3331	-2,5307
0,201	0,2010	0,1828	1,7395	-1,6045	-1,6994
0,298	0,2980	0,3458	2,3770	-1,2108	-1,0619
0,404	0,4021	0,7500	3,1512	-0,9110	-0,2877
0,506	0,5032	1,1200	3,5522	-0,6868	0,1133
0,697	0,6932	1,5400	3,8707	-0,3665	0,4318
0,712	0,7070	2,0100	4,1370	-0,3468	0,6981
0,802	0,7959	2,4400	4,3309	-0,2283	0,8920
0,908	0,9007	2,9400	4,5173	-0,1046	1,0784

1,020	1,0112	3,5300	4,7002	0,0111	1,2613
1,100	1,0902	3,9200	4,8050	0,0864	1,3661
1,204	1,1927	4,5100	4,9452	0,1762	1,5063
1,303	1,2904	5,0400	5,0563	0,2550	1,6174
1,405	1,3910	5,6100	5,1634	0,3300	1,7246
1,506	1,4907	6,1400	5,2537	0,3992	1,8148
1,615	1,5981	6,7800	5,3529	0,4688	1,9140
1,714	1,6957	7,3300	5,4309	0,5281	1,9920
1,802	1,7824	7,8500	5,4994	0,5779	2,0605
1,914	1,8927	8,5100	5,5801	0,6380	2,1412
2,022	1,9991	9,1700	5,6548	0,6927	2,2159
2,103	2,0790	9,6200	5,7027	0,7319	2,2638
2,206	2,1803	10,2700	5,7681	0,7795	2,3292
2,301	2,2738	10,8700	5,8249	0,8215	2,3860
2,401	2,3722	11,5300	5,8839	0,8638	2,4450
2,516	2,4853	12,2700	5,9461	0,9104	2,5072
2,612	2,5798	12,9000	5,9961	0,9477	2,5572
2,686	2,6524	13,4300	6,0364	0,9755	2,5975
2,729	2,6947	13,7300	6,0585	0,9913	2,6196
2,825	2,7890	14,3900	6,1054	1,0257	2,6665

Tabelle 3.2: Messergebnisse und Auswertung der Diode für $I_H = 119,8 \text{ mA}$.

Die Werte U_{gem} oberhalb der Abtrennung wurden in μA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-6}$ korrigiert. Die Werte unterhalb der Abtrennung wurden in mA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-3}$ korrigiert. Die blau hinterlegte Zeile stellt I_0 dar. In diesem Bereich ist die angelegte Spannung U_A nahezu null.

Heizstrom $I_H = 130,2 \text{ mA}$

U_{gem} in V	U_A in V	I_A in mA	$\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$	$\ln(U_A)$	$\ln(I_A)$
3,642	3,6048	14,8700	5,0019	1,2823	2,6993
3,465	3,4301	13,9700	4,9395	1,2326	2,6369
3,350	3,3164	13,4300	4,9001	1,1989	2,5975
3,203	3,1712	12,7300	4,8465	1,1541	2,5440
3,060	3,0298	12,0800	4,7941	1,1085	2,4916
2,931	2,9024	11,4500	4,7406	1,0655	2,4380
2,827	2,7997	10,9300	4,6941	1,0295	2,3915
2,723	2,6970	10,4200	4,6463	0,9921	2,3437
2,623	2,5981	9,9600	4,6012	0,9548	2,2986
2,503	2,4794	9,4300	4,5465	0,9080	2,2439

2,375	2,3530	8,8100	4,4785	0,8557	2,1759
2,182	2,1621	7,9500	4,3758	0,7711	2,0732
1,991	1,9734	7,0600	4,2570	0,6797	1,9544
1,740	1,7250	6,0100	4,0960	0,5452	1,7934
1,629	1,6151	5,5600	4,0182	0,4794	1,7156
1,539	1,5260	5,2000	3,9512	0,4226	1,6487
1,440	1,4280	4,8100	3,8733	0,3563	1,5707
1,329	1,3181	4,3500	3,7728	0,2762	1,4702
1,211	1,2014	3,8600	3,6533	0,1834	1,3507
1,123	1,1141	3,5500	3,5695	0,1081	1,2669
0,983	0,9754	3,0300	3,4111	-0,0249	1,1086
0,911	0,9041	2,7500	3,3142	-0,1008	1,0116
0,821	0,8150	2,4100	3,1822	-0,2046	0,8796
0,754	0,7486	2,1600	3,0727	-0,2896	0,7701
0,686	0,6813	1,9000	2,9444	-0,3838	0,6419
0,447	0,4444	1,0500	2,3514	-0,8111	0,0488
0,283	0,2816	0,5600	1,7228	-1,2673	-0,5798
0,122	0,1215	0,2000	0,6931	-2,1078	-1,6094
0,013	0,0128	0,1000	0,0000	-4,3622	-2,3026
-0,038	-0,0381	0,0500	-0,6931		-2,9957
-0,071	-0,0711	0,0400	-0,9163		-3,2189
-0,113	-0,1130	0,0239	-1,4313		-3,7339
-0,144	-0,1440	0,0176	-1,7373		-4,0399
-0,186	-0,1860	0,0117	-2,1456		-4,4482
-0,220	-0,2200	0,0083	-2,4889		-4,7915
-0,240	-0,2400	0,0067	-2,7031		-5,0056
-0,251	-0,2510	0,0059	-2,8302		-5,1328
-0,268	-0,2680	0,0049	-3,0159		-5,3185
-0,305	-0,3050	0,0032	-3,4420		-5,7446
-0,331	-0,3310	0,0022	-3,8167		-6,1193

Tabelle 3.3: Messergebnisse und Auswertung der Diode für $I_H = 130,2 \text{ mA}$.

Die Werte oberhalb der Abtrennung wurden in mA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-3}$ korrigiert. Die Werte U_{gem} unterhalb der Abtrennung wurden in μA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-6}$ korrigiert. Die blau hinterlegte Zeile stellt I_0 dar. In diesem Bereich ist die angelegte Spannung U_A nahezu null.

Heizstrom $I_H = 140,2 \text{ mA}$

U_{gem} in V	U_A in V	I_A in mA	$\ln\left(\frac{I_A}{I_0}\right)$	$\ln(U_A)$	$\ln(I_A)$
3,083	3,0454	15,0300	4,2707	1,1136	2,7100
2,907	2,8720	13,9900	4,1990	1,0550	2,6383
2,822	2,7882	13,5200	4,1648	1,0254	2,6042
2,734	2,7015	13,0200	4,1271	0,9938	2,5665
2,665	2,6334	12,6300	4,0967	0,9683	2,5361
2,584	2,5536	12,1600	4,0588	0,9375	2,4982
2,489	2,4599	11,6500	4,0160	0,9001	2,4553
2,413	2,3849	11,2400	3,9801	0,8692	2,4195
2,322	2,2952	10,7300	3,9337	0,8308	2,3730
2,245	2,2193	10,2900	3,8918	0,7972	2,3312
2,148	2,1234	9,8300	3,8461	0,7530	2,2854
2,062	2,0386	9,3500	3,7960	0,7123	2,2354
2,001	1,9785	9,0200	3,7601	0,6823	2,1994
1,903	1,8817	8,5200	3,7031	0,6322	2,1424
1,844	1,8235	8,1900	3,6636	0,6008	2,1029
1,782	1,7623	7,8900	3,6262	0,5666	2,0656
1,713	1,6942	7,5200	3,5782	0,5272	2,0176
1,623	1,6053	7,0700	3,5165	0,4733	1,9559
1,517	1,5007	6,5300	3,4371	0,4059	1,8764
1,421	1,4058	6,0800	3,3657	0,3406	1,8050
1,306	1,2922	5,5300	3,2708	0,2563	1,7102
1,104	1,0926	4,5700	3,0802	0,0885	1,5195
1,018	1,0076	4,1600	2,9862	0,0076	1,4255
0,901	0,8920	3,6000	2,8416	-0,1143	1,2809
0,763	0,7555	3,0200	2,6659	-0,2804	1,1053
0,625	0,6190	2,4100	2,4403	-0,4797	0,8796
0,504	0,4993	1,8900	2,1972	-0,6946	0,6366
0,401	0,3973	1,4800	1,9527	-0,9231	0,3920
0,299	0,2962	1,1100	1,6650	-1,2166	0,1044
0,178	0,1763	0,6900	1,1896	-1,7357	-0,3711
0,051	0,0502	0,3400	0,4818	-2,9927	-1,0788
-0,003	-0,0035	0,2100	0,0000		-1,5606
-0,058	-0,0584	0,1700	-0,2113		-1,7720
-0,113	-0,1133	0,1100	-0,6466		-2,2073
-0,175	-0,1752	0,0600	-1,2528		-2,8134
-0,269	-0,2691	0,0200	-2,3514		-3,9120
-0,340	-0,3400	0,0132	-2,7669		-4,3275
-0,372	-0,3720	0,0096	-3,0853		-4,6460
-0,411	-0,4110	0,0066	-3,4600		-5,0207

-0,446	-0,4460	0,0047	-3,7995		-5,3602
-0,481	-0,4810	0,0032	-4,1840		-5,7446
-0,530	-0,5300	0,0020	-4,6540		-6,2146

Tabelle 3.4: Messergebnisse und Auswertung der Diode für $I_H = 140,2 \text{ mA}$.

Die Werte oberhalb der Abtrennung wurden in mA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-3}$ korrigiert. Die Werte U_{gem} unterhalb der Abtrennung wurden in μA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-6}$ korrigiert. Die blau hinterlegte Zeile stellt I_0 dar. In diesem Bereich ist die angelegte Spannung U_A nahezu null.

Messergebnisse und Auswertung der Triode

Anodenstrom $U_A = 49,5 \text{ V}$

U_G in V	$U_{\text{berichtigt}}$ in V	I_A in mA
-4,630	-4,630	0,0006
-3,980	-3,980	0,0006
-3,558	-3,558	0,0007
-3,082	-3,082	0,0011
-2,556	-2,556	0,0052
-2,052	-2,052	0,0331
-1,562	-1,562	0,1667
-1,051	-1,051	0,6446
-0,492	-0,492	2,0810
-0,001	-0,013	4,6600
0,102	0,089	5,2400
0,207	0,192	5,8100
0,323	0,307	6,4200
0,419	0,402	6,9600
0,503	0,485	7,3900
0,600	0,580	7,9300
0,710	0,689	8,5600
0,804	0,781	9,1000
0,921	0,897	9,7700
1,024	0,998	10,4000
1,105	1,078	10,8700
1,214	1,185	11,5200
1,314	1,284	12,1300
1,409	1,377	12,7100
1,510	1,477	13,3300

1,615	1,580	13,9700
1,717	1,680	14,6100

Tabelle 3.5: Messergebnisse und Auswertung der Triode für $U_A = 49,5 \text{ V}$.

Die Werte U_G oberhalb der Abtrennung wurden in μA aufgenommen und demnach um $U_{\text{berichtigt}} = U_G - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-6}$ korrigiert.

U_G in V	$U_{\text{berichtigt}}$ in V	I_A in mA
-0,001	-0,001	4,6600
0,102	0,102	5,2400
0,207	0,207	5,8100
0,323	0,323	6,4200
0,419	0,419	6,9600
0,503	0,503	7,3900
0,600	0,600	7,9300
0,710	0,710	8,5600
0,804	0,804	9,1000
0,921	0,921	9,7700
1,024	1,024	10,4000
1,105	1,105	10,8700
1,214	1,214	11,5200
1,314	1,314	12,1300
1,409	1,409	12,7100
1,510	1,510	13,3300
1,615	1,615	13,9700
1,717	1,717	14,6100

Tabelle 3.6: Messergebnisse und Auswertung der Steilheit der Triode für ein konstantes $U_A = 49,5 \text{ V}$.

U_A in V	U_G in V	$U_{A,\text{berichtigt}}$ in V	$U_{G,\text{berichtigt}}$ in V
42,7	0,853	42,700	0,853
44,1	0,823	44,100	0,823
45,0	0,807	45,000	0,807
47,3	0,757	47,300	0,757
48,0	0,745	48,000	0,745
49,5	0,710	49,500	0,710
51,1	0,685	51,100	0,685
52,8	0,652	52,800	0,652
54,0	0,630	54,000	0,630
55,4	0,601	55,400	0,601
57,2	0,567	57,200	0,567

Tabelle 3.7: Messergebnisse und Auswertung des Durchgriffs der Triode für ein konstantes $I_A = 8,54 \text{ V}$.

U_A in V	$U_{A,\text{berichtigt}}$ in V	I_A in mA
42,8	7,76	42,800
44,1	7,90	44,100
45,0	8,02	45,000
46,9	8,23	46,900
48,3	8,40	48,300
49,5	8,54	49,500
51,1	8,72	51,100
52,1	8,83	52,100
53,2	8,96	53,200
54,9	9,17	54,900
56,1	9,31	56,100

Tabelle 3.8: Messergebnisse und Auswertung des Durchgriffs der Triode für ein konstantes $U_G = 0,71 \text{ V}$.

Anodenstrom $U_A = 100,1 \text{ V}$

$U_G \text{ in V}$	$U_{\text{berichtigt}} \text{ in V}$	$I_A \text{ in mA}$
1,252	1,217	14,17
1,073	1,040	13,28
0,943	0,911	12,64
0,796	0,766	11,90
0,569	0,542	10,71
0,414	0,389	9,90
0,214	0,192	8,84
0,016	-0,003	7,68
-0,001	-0,020	7,57
-0,024	-0,043	7,42
-0,081	-0,099	7,05
-0,116	-0,133	6,91
-0,187	-0,203	6,43
-0,211	-0,227	6,31
-0,262	-0,277	5,99
-0,334	-0,348	5,58
-0,419	-0,432	5,13
-0,529	-0,540	4,58
-0,617	-0,627	4,17
-0,718	-0,727	3,71

Tabelle 3.9: Messergebnisse und Auswertung der Triode für $U_A = 100,1 \text{ V}$.

Alle Werte wurden in mA aufgenommen und demnach um $U_A = U_{\text{gem}} - I_A R_i \cdot 10 \cdot 10^{-3}$ korrigiert.

U_G in V	$U_{\text{berichtigt}}$ in V	I_A in mA
1,252	1,252	14,17
1,073	1,073	13,28
0,943	0,943	12,64
0,796	0,796	11,90
0,569	0,569	10,71
0,414	0,414	9,90
0,214	0,214	8,84
0,016	0,016	7,68
-0,001	-0,001	7,57
-0,024	-0,024	7,42
-0,081	-0,081	7,05
-0,116	-0,116	6,91
-0,187	-0,187	6,43
-0,211	-0,211	6,31
-0,262	-0,262	5,99
-0,334	-0,334	5,58
-0,419	-0,419	5,13
-0,529	-0,529	4,58
-0,617	-0,617	4,17
-0,718	-0,718	3,71

Tabelle 3.10: Messergebnisse und Auswertung der Steilheit der Triode für ein konstantes $U_A = 100,1$ V.

U_A in V	U_G in V	$U_{A,\text{berichtigt}}$ in V	$U_{G,\text{berichtigt}}$ in V
140,0	-0,750	140,000	-0,750
136,2	-0,690	136,200	-0,690
127,6	-0,561	127,600	-0,561
114,9	-0,376	114,900	-0,376
109,0	-0,291	109,000	-0,291
95,2	-0,096	95,200	-0,096
90,8	-0,041	90,800	-0,041
86,1	0,021	86,100	0,021
82,1	0,079	82,100	0,079
77,2	0,161	77,200	0,161

Tabelle 3.11: Messergebnisse und Auswertung des Durchgriffs der Triode für ein konstantes $I_A = 6,48$ V.

U_A in V	$U_{A,\text{berichtigt}}$ in V	I_A in mA
135,3	135,300	9,54
126,7	126,700	8,77
116,5	116,500	7,87
108,7	108,700	7,22
105,3	105,300	6,95
90,2	90,200	5,77
86,1	86,100	5,44
82,4	82,400	5,16
79,8	79,800	4,94
74,9	74,900	4,56

Tabelle 3.12: Messergebnisse und Auswertung des Durchgriffs der Triode für ein konstantes $U_G = -0,164$ V.

$\textcircled{1} I_H = 130,2 \text{ mA}$	$\Delta I_H = \pm 0,2 \text{ mA}$	$\textcircled{2} I_H = 140,2 \text{ mA}$	Versuch 2 Gruppe A06 20.06.2025
$U \text{ in V}$	$I_A \text{ in mA}$	$U \text{ in V}$	$I_A \text{ in mA}$
3,642	14,87	3,083	15,03
3,465	13,97	2,907	13,99
3,350	13,43	2,822	13,52
3,263	12,73	2,734	13,02
3,060	12,08	2,665	12,63
2,931	11,45	2,584	12,16
2,827	10,93	2,489	11,65
2,723	10,42	2,413	11,24
2,623	9,96	2,322	10,73
2,503	9,43	2,148	9,83
2,375	8,81	2,062	9,35
2,182	7,95	2,001	9,02
1,991	7,06	1,903	8,52
1,740	6,01	1,844	8,19
1,629	5,56	1,782	7,89
1,539	5,20	1,713	7,52
1,440	4,81	1,623	7,07
1,329	4,35	1,517	6,53
1,211	3,86	1,421	6,08
1,123	3,55	1,306	5,53
0,983	3,03	1,104	4,57
0,911	2,75	1,018	4,16
0,821	2,41	0,901	3,60
0,754	2,16	0,763	3,02
0,686	1,90	0,625	2,41
0,447	1,05	0,504	1,89
0,283	0,56	0,401	1,48
0,182	0,26	0,299	1,11
0,013	0,10	0,178	0,69
-0,038	0,05	0,051	0,34
-0,071	0,04	-0,003	0,21
-0,113	23,9	-0,053	0,17
-0,144	17,6	-0,113	0,11
-0,186	11,7	-0,175	0,06
-0,220	8,3	-0,269	0,02
-0,240	6,7	-0,346	ab hier $I_A \text{ in } \mu\text{A}$
-0,251	5,9	-0,372	13,20
-0,268	4,9	-0,411	9,6
-0,305	3,2	-0,446	6,6
-0,331	2,02	-0,481	4,7
		-0,530	3,20
			2,0

Versuch 1

	Innenwiderstand	Delta
A	0,050 Ω	0,005 Ω
mA	2,50 Ω	0,05 Ω
mA	100 Ω	5 Ω

Versuch 3

$$U_A = 100,1 \text{ V}$$

$$\Delta U_A = \pm 0,2 \text{ V}$$

U_A in V	I_A in mA	U_G in V	I_A in mA
1,252	14,17	-0,081	7,05
1,073	13,28	-0,116	6,91
0,943	12,64	-0,187	6,43
0,796	11,90	-0,211	6,31
0,569	10,71	-0,262	5,93
0,414	9,90	-0,334	5,58
0,214	8,84	-0,419	5,13
0,016	7,68	-0,529	4,58
-0,001	7,57	-0,617	4,17
-0,024	7,42	-0,718	3,71

Arbeitspunkt: $I_A = 6,48 \text{ mA}$ $U_G = -0,164 \text{ V}$

U_A in V	I_A in mA	U_A in V	I_A in mA
90,2	5,77	105,3	6,95
86,1	5,44	108,7	7,22
82,4	5,16	116,5	7,87
79,8	4,84	126,7	8,77
74,9	4,56	135,3	9,54

U_A in V	U_G in V	U_A in V	U_G in V
95,2	-0,096	109,0	-0,291
90,8	-0,041	114,9	-0,376
86,1	0,021	127,6	-0,561
82,1	0,079	136,2	-0,690
77,2	0,161	140,0	-0,750

$$\Delta I_A = \pm 0,02$$

10

E3

Gruppe A05