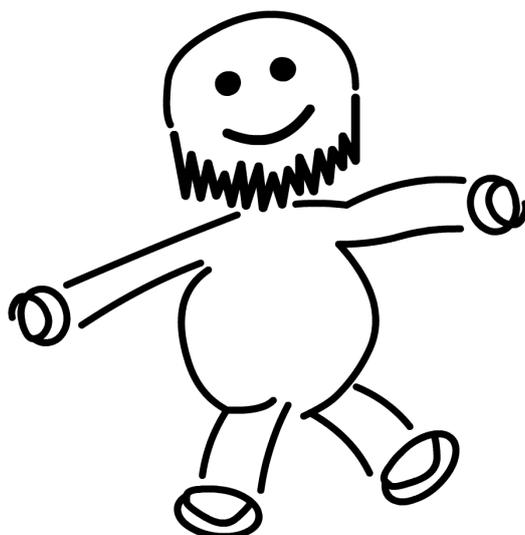


Physikalisches Praktikum für das Hauptfach Physik

Versuch 20

Kennlinie der Vakuum-Diode

Wintersemester 2005 / 2006



Name:	Daniel Scholz
Mitarbeiter:	Hauke Rohmeyer
E-Mail:	physik@mehr-davon.de
Gruppe:	B9
Assistent:	Tobias Liese
Durchgeführt am:	20. September 2005
Protokoll abgeben:	21. September 2005
Protokoll verbessert:	—

Unterschrift:

Testiert: _____

1 Einleitung

In diesem Versuch wird die Abhängigkeit des Stromes von einer anliegenden Spannung bei einer Vakuumdiode bestimmt. Diese Abhängigkeit wird *Kennlinie* genannt.

2 Theorie

2.1 Aufbau der Vakuumdiode

In einem evakuiertem Glaszylinder befindet sich ein Glühdraht, der als Kathode dient, und eine Anode. Führt man dem Glühdraht Energie zu [durch eine sog. Heizspannung], so beginnt dieser Elektronen zu emittieren. Je nach Material wird mehr oder weniger Energie benötigt um ein Elektron zu emittieren. Besonders gering ist die Austrittsarbeit bei Erdalkalimetallen, weswegen sie häufig in solchartigen Dioden verwendet werden.

Herrscht eine Spannung zwischen Kathode und Anode, so werden die emittierten Elektronen beschleunigt und zur Anode hingezogen. Eine solche Spannung nennt man *Beschleunigungs-* oder *Anodenspannung* $[U_A]$.

Die Stärke des entstehenden Elektronenstrahls kann man über die Heizspannung U_H regeln.

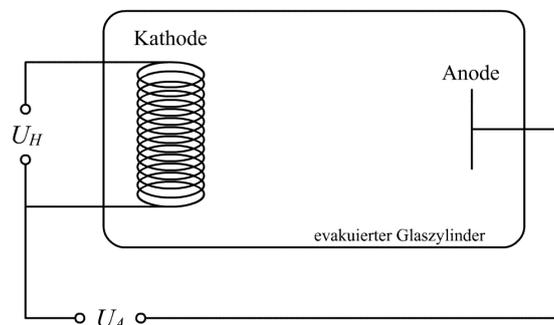


Abbildung 1: Aufbau der Vakuum-Diode

2.2 Anlaufstrom

Durch zufälliges Auftreffen von Elektronen auf die Anode entsteht auch bei nicht angelegter Beschleunigungsspannung ein sogenannter *Anlaufstrom*. Die Kennlinie des Anlaufstromes verhält sich nach dem hochenergetischen Teil der Maxwell-Verteilung:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{e|U|}{k_B T}\right),$$

welche in diesem Bereich annähernd konstant verläuft.

Der Anlaufstrom ist von der Beschaffenheit des Kathodenmaterials abhängig. Ist die zu leistende Austrittsarbeit gering, so ist die Anzahl der Elektronen in der Diode groß und die Stromdichte j ebenfalls. Dieses Verhalten wird durch die **Richardson-Gleichung** beschrieben:

$$j = A_R T^2 \exp\left(\frac{-W_A}{k_B T}\right). \quad (1)$$

Hierbei ist A_R die materialspezifische Richardson-Konstante, T die Temperatur, k_B die Boltzmannkonstante und W_A die Austrittsarbeit.

2.3 Raumladungsgebiet

Mit steigender Beschleunigungsspannung kommen die Elektronen immer schneller von Kathode zu Anode und die Stromdichte j nimmt anfangs schnell zu. Gleichzeitig baut sich aber um die Anode eine Raumladung auf, da die Anode nicht alle Elektronen aufnehmen kann. Diese Raumladung wächst mit steigender Beschleunigungsspannung und wirkt dem Elektronenstrom entgegen. Der Anstieg des Elektronenstroms geht also mit höheren Spannungen zurück. Dieses Verhalten wird durch das **Schottky-Langmuir-Raumladungsgesetz** beschrieben:

$$j = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\left(\frac{2e}{m}\right)} \frac{(U_A - U_K)^{\frac{3}{2}}}{l^2} \quad (2)$$

Hierbei ist ε_0 die Dielektrizitätskonstante, U_A die Anodenspannung, U_K das Kontaktpotential, e die Elektronenladung, m die Elektronenmasse und l die Entfernung zwischen Anode und Kathode.

2.4 Sättigungsbereich

Ist die Anodenspannung groß, so werden fast alle emittierten Elektronen von der Anode aufgenommen. Für große Spannungen kann der Strom also nicht mehr zunehmen und strebt gegen einen konstanten Wert, den sogenannten Sättigungsbereich der Diode. Je nach Größe der Heizspannung bzw. der Kathodentemperatur steigt die Anzahl der vorhandenen Elektronen und somit auch der Sättigungsstrom. Um den Sättigungsbereich zu erreichen, muss man nun eine höhere Spannung anlegen, da mehr Elektronen aus der Kathode austreten, also auch mehr Elektronen von der Anode absorbiert werden müssen.

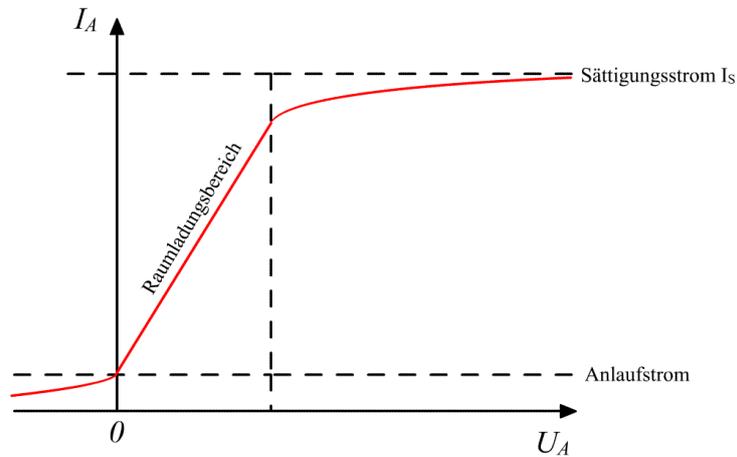


Abbildung 2: Theoretischer Verlauf der Kennlinie

3 Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsaufbau

Die folgende Abbildung zeigt die Schaltskizze des Versuchsaufbaus.

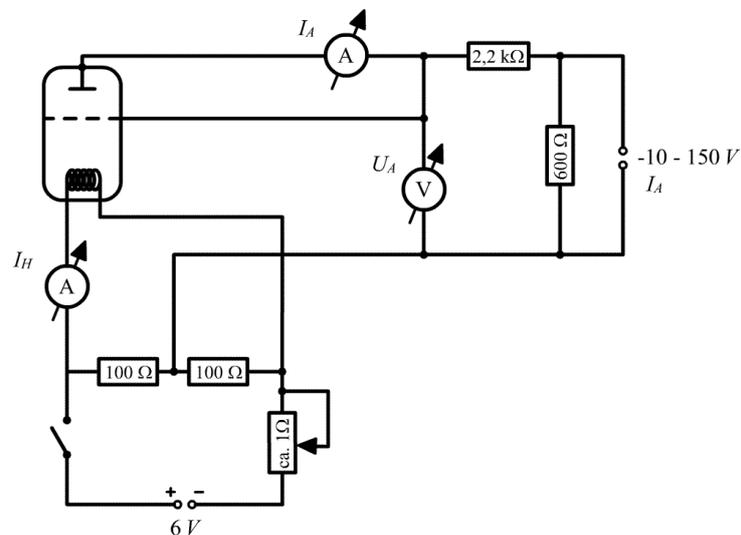


Abbildung 3: Schaltskizze des Versuches

3.2 Versuchsdurchführung

- (1) Der Versuch wird anhand der Schaltskizze [Abbildung 3] vorbereitet.
- (2) Für drei verschiedene Heizströme [1,9 A, 2,0 A, 2,1 A] wird der Anodenstrom in Abhängigkeit von der Anodenspannung $[-10\text{ V} \leq U_A \leq$

150 V] gemessen. Insbesondere soll hierbei der Anlaufstrom und die Spannung gemessen werden, bei welcher der Anodenstrom verschwindet. Um genauere Resultate zu erzielen, kann im unteren Messbereich [ca. -10 bis -2 V] das Analog-Ampèremeter verwendet werden. Im Raumladungsgebiet sollte die Schrittweite beim Verändern der Anodenspannung 2 V nicht überschreiten, im Sättigungsbereich kann sie erhöht werden.

- (3) Für $U_A = 125 V$ wird der Sättigungsstrom in Abhängigkeit vom Heizstrom [$1,8 A \leq I_H \leq 2,15 A$] gemessen. Es empfiehlt sich $\Delta I_H = 0,05 A$ zu wählen.
- (4) Die Innenwiderstände der Messinstrumente werden gemessen.

4 Auswertung

4.1 Kennlinie

Trägt man den Anodenstrom gegen die Anodenspannung auf, so erhält man die Kennlinie der Vakuum-Diode.

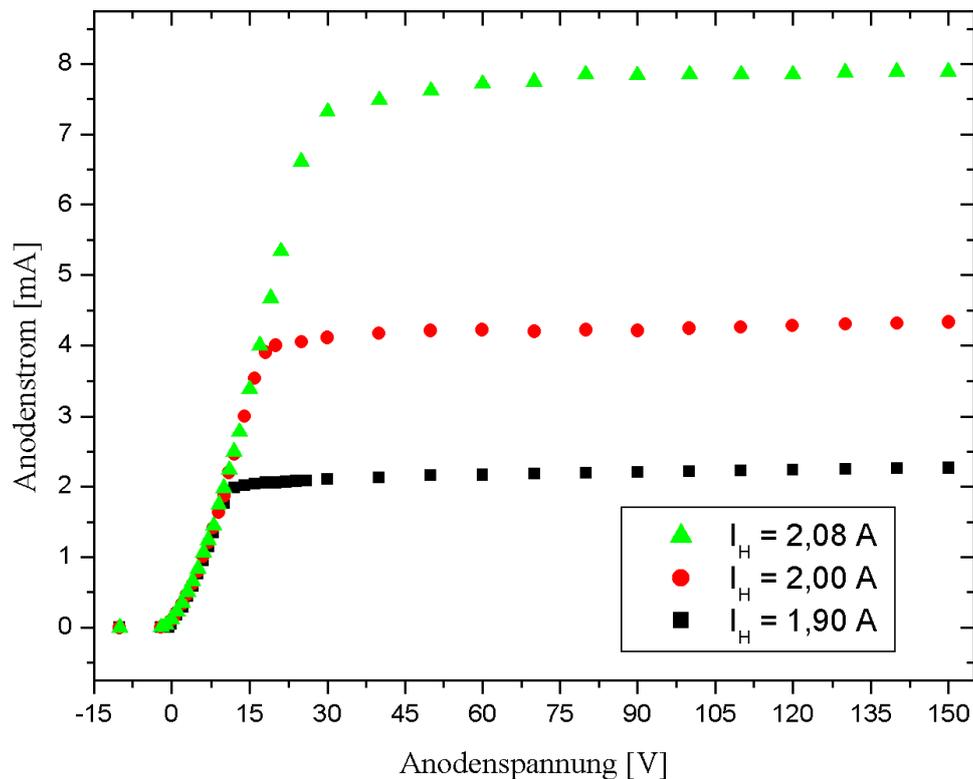


Abbildung 4: Kennlinie der Vakuum-Diode

4.2 Raumladungsgebiet

Mit $I = ja$ und $C := 4\epsilon_0 a / (9l^2) \sqrt{2e/m}$ gilt nach Gleichung (2)

$$I = C(U_A - U_K)^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

wobei a die Fläche ist, die der Strom durchdringt. Vernachlässigt man die Kontaktspannung gilt

$$I \sim U_A^{\frac{3}{2}} \quad \Rightarrow \quad I^{\frac{2}{3}} \sim U_A.$$

Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Für die Auftragung wurden die Daten des Raumladungsgebietes abgegrenzt betrachtet, also diejenigen die im Graphen annähernd linear verlaufen.

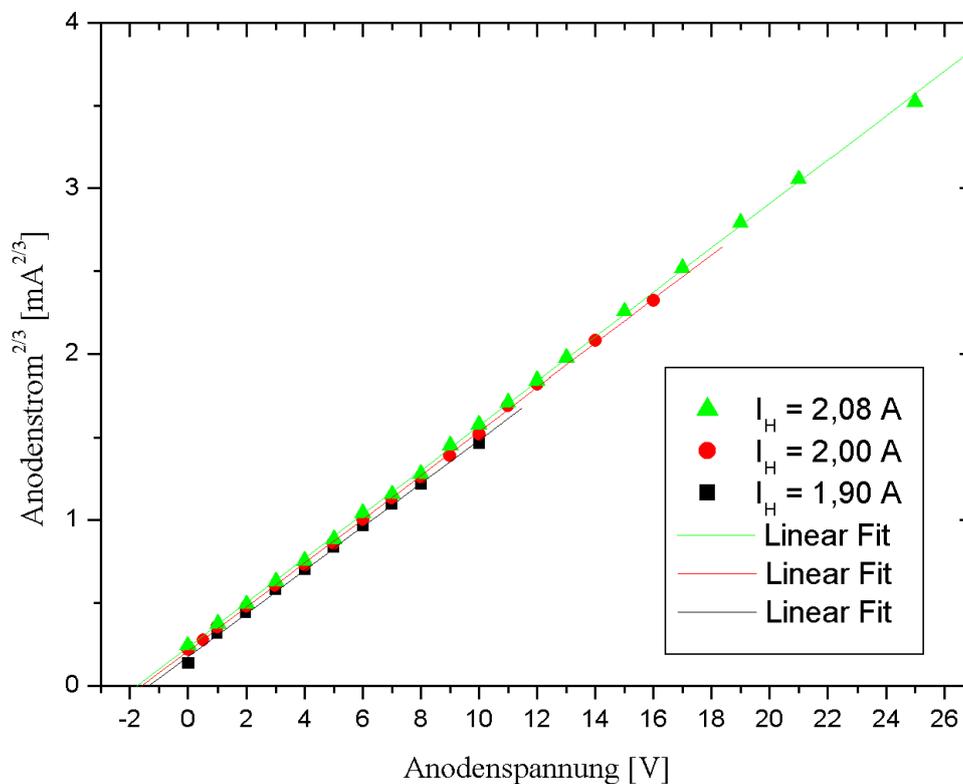


Abbildung 5: Berechnung der Kontaktspannung

Die Kontaktspannung ist nun diejenige, bei welcher der Anodenstrom verschwindet. Es gilt demnach

$$0 = m \cdot U_K + b \quad \Rightarrow \quad U_K = -\frac{b}{m}.$$

Der Fehler berechnet sich aus dem Fehler der linearen Regression mittels dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung:

$$\sigma_{U_K} = \sqrt{\sigma_m^2 \frac{b^2}{m^4} + \sigma_b^2 \frac{1}{m^2}}.$$

Wir berechneten folgende Werte:

	$I_H = 1,90 \text{ A}$	$I_H = 2,00 \text{ A}$	$I_H = 2,08 \text{ A}$
$m [mA^{\frac{2}{3}}/V]$	0.13073	0.13261	0.13354
$b [mA^{\frac{2}{3}}]$	0.17609	0.21027	0.23507
$U_K [V]$	-1.36	-1.59	-1.76
$\sigma_{U_K} [V]$	0.09	0.05	0.06

Es ergibt sich ein gewichteter Mittelwert von $U_K = -1,61 \text{ V}$ mit einem Fehler von $\sigma_{U_K} = 0,04 \text{ V}$.

4.3 Der Exponent im Raumladungsgesetz

Nach Gleichung (3) gilt $I = C(U_A - U_K)^{3/2}$. Bildet man nun den Logarithmus, so folgt

$$\begin{aligned} \ln(I) &= \ln(C \cdot (U_A - U_K)^{\frac{3}{2}}) \\ &= \ln C + \frac{3}{2} \cdot \ln(U_A - U_K). \end{aligned}$$

Somit sollte eine doppelt logarithmische Auftragung von I_A gegen $(U_A - U_K)$ eine Gerade mit der Steigung $3/2$ ergeben.

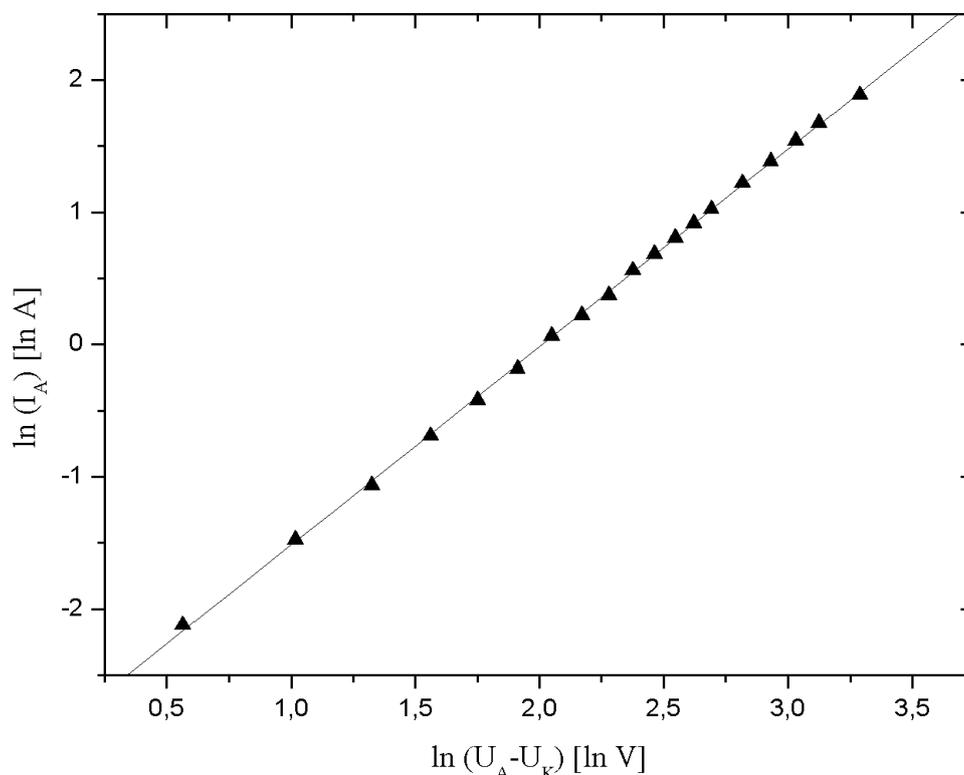


Abbildung 6: Berechnung des Exponenten im Raumladungsgesetz

In der obenstehenden Abbildung haben wir zur besseren Übersicht nur die Werte für den Heizstrom von $I_H = 2,08 A$ aufgetragen. Da der Verlauf der Graphen im Raumladungsgebiet ähnlich ist, ist dieser Graph exemplarisch. Wir haben folgende Werte für den Exponenten errechnet:

	$I_H = 1.90 A$	$I_H = 2.00 A$	$I_H = 2.08 A$
m	1.61024	1.47969	1.49525
σ_m	0.05704	0.00931	0.00679

Die Fehler σ_m stammen aus der linearen Regression. Es ergibt sich ein gewichteter Mittelwert von $m = 1,49$ mit einem Fehler von $\sigma_m = 0,1$.

4.4 Berechnung der Austrittsarbeit

Mit $I = ja$ gilt nach Gleichung (1)

$$I = a \cdot A_R \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{W_A}{k_B T}}.$$

Setzt man nun $a \cdot A_R := C$, so folgt

$$\frac{I}{T^2} = C \cdot e^{-\frac{W_A}{k_B T}} \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{I}{T^2}\right) = \ln C - \frac{W_A}{k_B T}.$$

Trägt man I_S/T^2 gegen $1/T$ halblogarithmisch auf, so ergibt sich eine Gerade mit der Steigung $m = W_A/k_B$. Somit folgt

$$W_A = -m \cdot k_B$$

mit der Boltzmann Konstante $k_B = 8,617385 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}^1$. Die Temperatur der Kathode errechnet sich nach ²

$$T = 579 \frac{\text{K}}{\text{A}} \cdot I_H + 1150,2 \text{ K} .$$

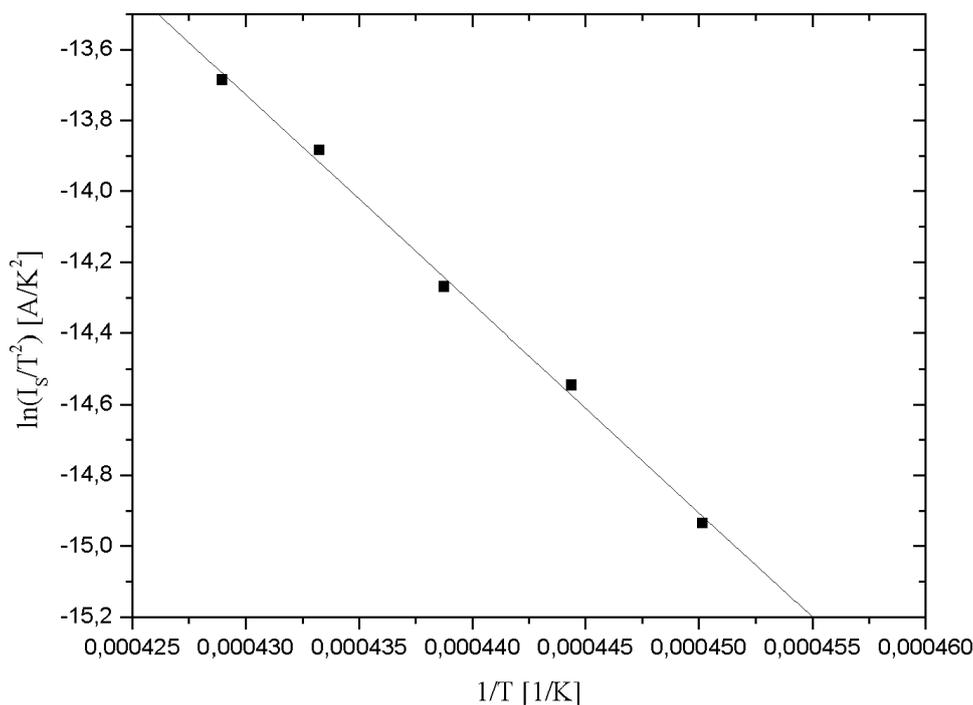


Abbildung 7: Berechnung der Austrittsarbeit

Die Gerade hat eine Steigung von $m = -58902 [1/K]$ mit dem Fehler $\sigma_m = 1309 [1/K]$. Somit ergibt sich für die Austrittsarbeit

$$W_A = 5,08 \text{ eV}$$

mit einem Fehler von

$$\sigma_{W_A} = \sqrt{\sigma_m^2 \left(\frac{\partial W_A}{\partial m} \right)^2} = \sigma_m \cdot k_B = 0,13 \text{ eV} .$$

¹ Peter Schaaf (2005): "Das Physikalische Praktikum". Universitätsdrucke Göttingen.

² Peter Schaaf (2005): "Das Physikalische Praktikum". Universitätsdrucke Göttingen.

Der Literaturwert³ für die Austrittsarbeit bei Wolfram liegt bei $4,50 \text{ eV}$.

5 Diskussion

5.1 Fehlerbetrachtung

Der Fehler der von den Innenwiderständen der verwendeten Messgeräte herrührt ist vernachlässigbar klein. Beim Voltmeter für den Heizstrom haben wir $10,5 \text{ M}\Omega$ gemessen. Da die Spannungsmessung bei einem Voltmeter über eine Strommessung erfolgt, versucht man den Innenwiderstand bei Voltmetern möglichst hoch zu halten. Der Strom der durch diesen Widerstand fließt, ist vernachlässigbar klein.

Die Innenwiderstände der Ampèremeter [$10,4 \Omega$ bzw. $99,8 \Omega$] können vernachlässigt werden, da sie mit wesentlich größeren Widerständen in Reihe geschaltet sind [siehe Abbildung 3].

Die gemessene Kennlinie der Diode weist alle Eigenschaften aus, die in der Theorie vorhergesagt wurden. Der Exponent des Raumladungsgesetztes liegt in unserem Fehlerbalken, die Austrittsarbeit weicht dagegen stark vom Literaturwert ab. Ein Vergleich mit den Vorgängerprotokollen ergab, dass unser Ergebnis jedoch auch schon von früheren Jahrgängen gemessen wurde.

5.2 Verbesserungsvorschläge

Der Drehwiderstand sollte ausgetauscht werden.

5.3 Abschließende Kommentare

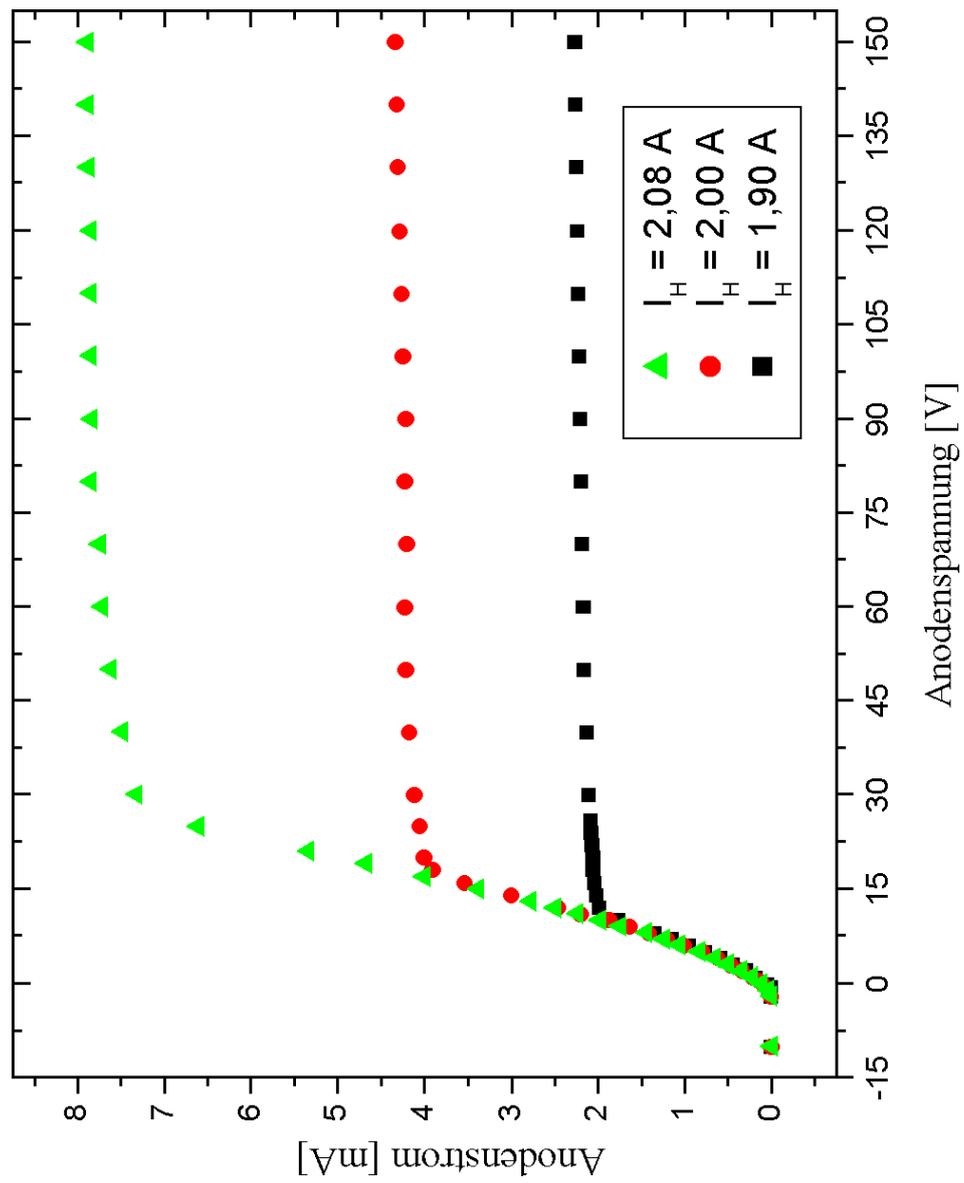
[Der Versuch war gut und auch die Theorie war gut verständlich und nicht zu umfangreich. Die Auswertung ist im Bereich des Machbaren, anders wird es vermutlich bei Versuch 11 und vor allem bei Versuch 12 sein!]_{Daniel}

[Der Versuch war recht einfach, vor allem das Zusammenstecken des Versuchsaufbaus war spassig. Leider war der Heizungsstrom scheinbar nicht so leicht einzustellen, und der Drehwiderstand war zu stark.]_{Hauke}

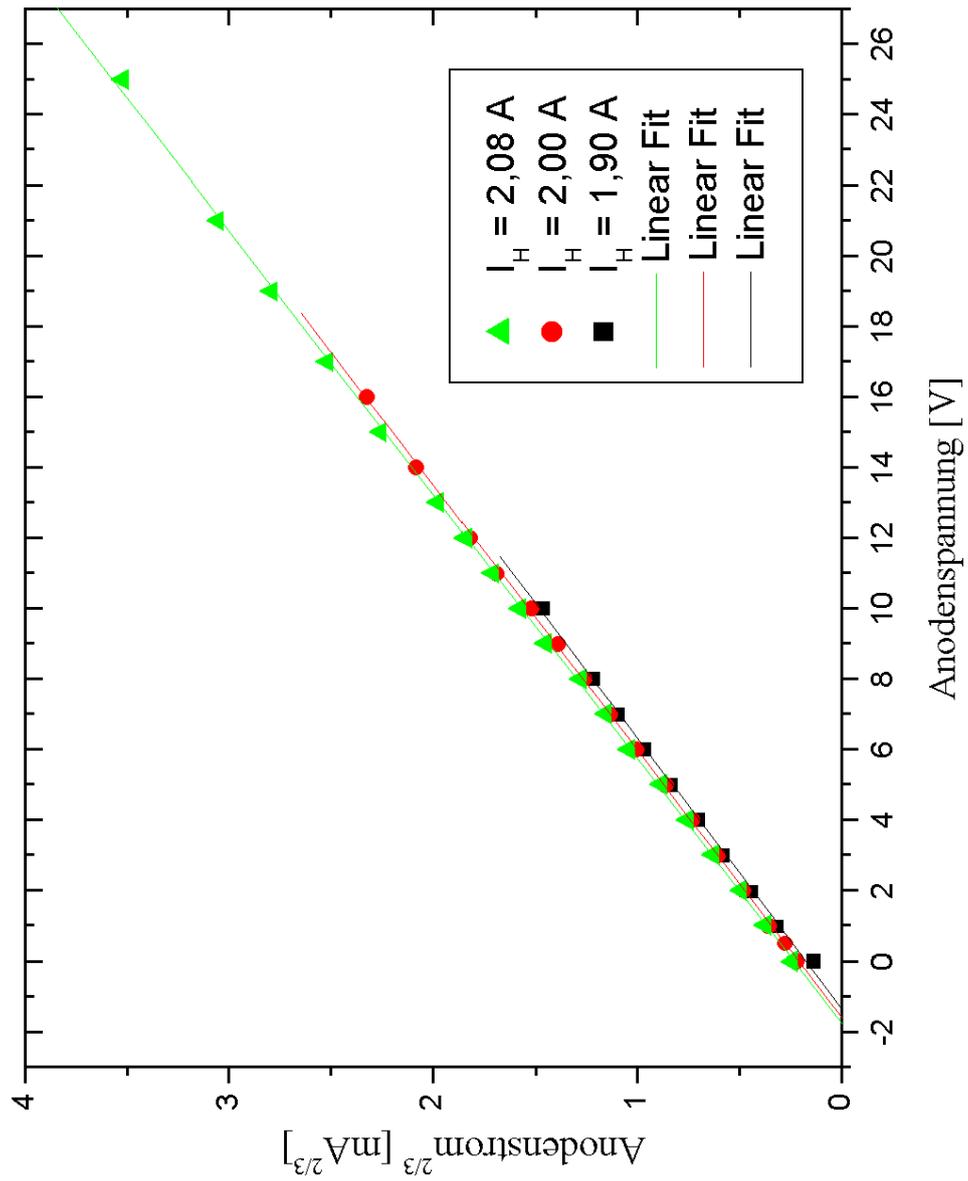
³ Peter Schaaf (2005): "Das Physikalische Praktikum". Universitätsdrucke Göttingen.

6 Anhang

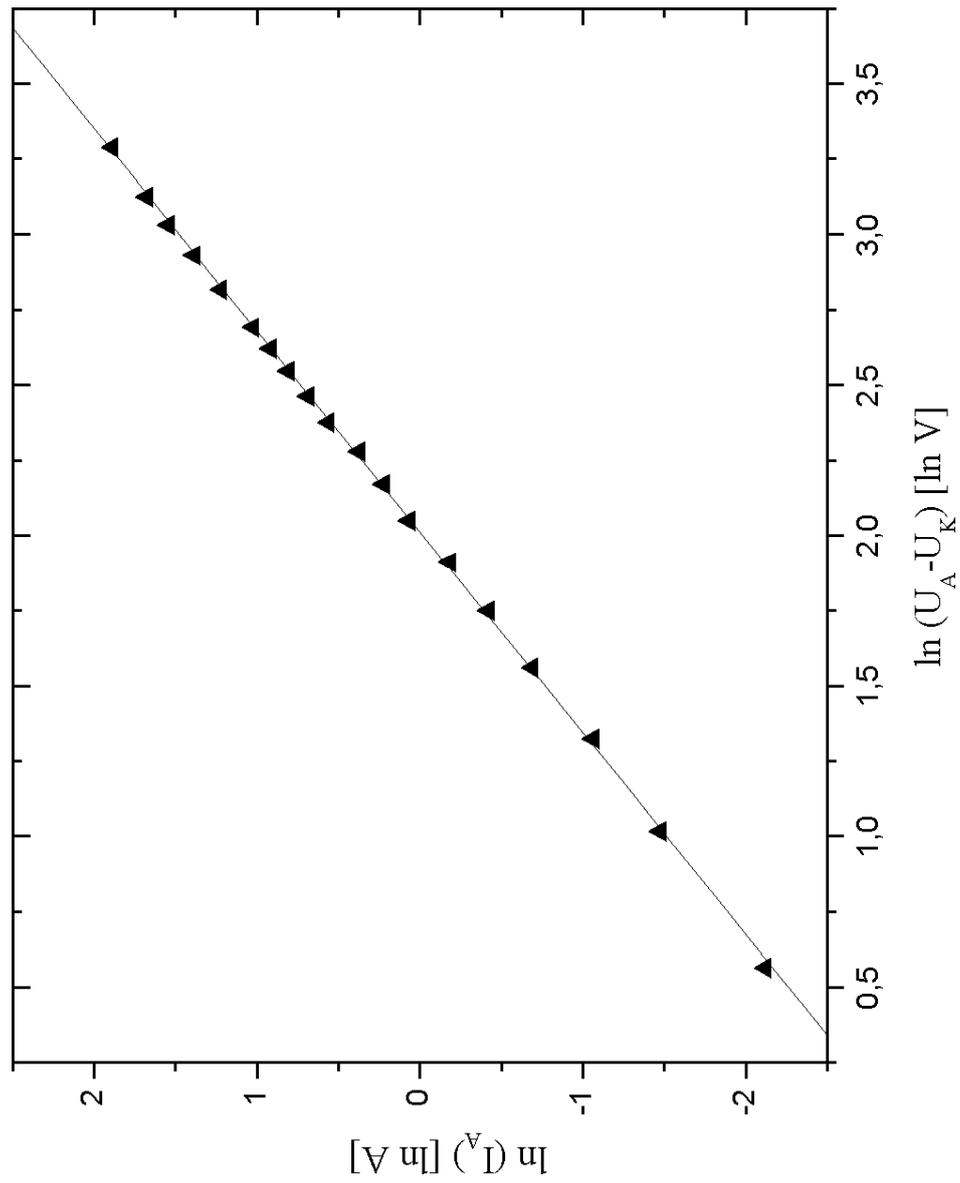
6.1 Abbildung 4 - Kennlinie



6.2 Abbildung 5 - Berechnung der Kontaktspannung



6.3 Abbildung 6 - Berechnung des Exponenten im Raumladungsgesetz



6.4 Abbildung 7 - Berechnung der Austrittsarbeit

