

ANFÄNGERPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK,
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

Versuch Kennlinien der Vakuum-Diode Protokoll

Praktikant: Michael Lohmann
Felix Kurtz
E-Mail: m.lohmann@stud.uni-goettingen.de
felix.kurtz@stud.uni-goettingen.de
Betreuer: Björn Klaas
Versuchsdatum: 12.09.2014

| |
|---------|
| Testat: |
|---------|

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Theorie | 3 |
| 2.1 | Austrittsarbeit der Elektronen | 3 |
| 2.2 | Vakuumdiode | 3 |
| 3 | Durchführung | 5 |
| 4 | Auswertung | 5 |
| 4.1 | Kenmlinien | 5 |
| 4.2 | Raumladung | 6 |
| 4.3 | Exponent im Raumladungsbereich | 8 |
| 5 | Diskussion | 10 |
| | Literatur | 10 |

1 Einleitung

Dioden sind technische Bauelemente, die nur einen Stromfluss in eine Richtung zulassen. Vakuum-Dioden sind die wohl einfachsten, wenn auch heutzutage nicht mehr die gebräuchlichsten. Ihre wichtigsten Kennlinien zu vermessen, kann daher Erkenntnisse für komplexere Aufbauten, wie zum Beispiel Halbleiterdioden, liefern.

2 Theorie

2.1 Austrittsarbeit der Elektronen

Eine Vakuum-Diode besteht aus einem Kathode-Anode-Paar, welches in einem Vakuum-Behältnis eingelassen ist. Die Kathode besteht aus einer Glühlampe, welche regelbar beheizt werden kann. Die Elektronen benötigen eine gewisse Energie W_A um aus dem Draht auszutreten und zur Anode zu gelangen. Sie wird dafür benötigt, sich aus dem positiv geladenen Gitter des Drahtes herauszulösen. Diese Energie ist jedoch relativ hoch, so dass bei den hier verwendeten Spannungen kein Strom zu messen sein sollte. Da die Kathode jedoch auf eine Temperatur T geheizt wird, bekommen die Elektronen im Draht eine thermische (und damit kinetische) Energie. Dies ist auch der Grund, warum die Vakuum-Diode einen Elektronenfluss von der Anode zur Kathode verhindert. Nicht alle Elektronen sind jedoch gleich schnell, so dass einige mehr kinetische besitzen als andere. Die Verteilung der Geschwindigkeiten basiert auf der FERMI-Verteilung. Der sich so ergebende Strom verhält sich laut [Mes10, S. 463] nach der RICHARDSON-Gleichung:

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

Wobei $A_R \approx 6 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$ die Richardson-Konstante darstellt. Sie ist für alle reinen Metalle etwa gleich. Zur Verringerung der Austrittsarbeit W_A können Metalle mit Alkalimetallen oder Barium-Oxid überzogen werden, da diese eine geringere besitzen.

2.2 Vakuumdiode

Eine Vakuumdiode besteht aus einer Anode und einer beheizbaren Kathode, welche zusammen in einem evakuierten Glaskolben eingeschlossen sind. Zwischen ihnen können Elektronen von der Kathode aus sich bewegen, wenn die Heizspannung hoch genug ist. Dies liegt daran, dass die Elektronen durch die bloße Anodenspannung nicht genügend Energie besitzen, um die Austrittsarbeit zu überwinden. Wird der Draht beheizt, so bekommen die Elektronen dadurch eine höhere kinetische Energie. Die mittlere kinetische Energie reicht zwar immer noch nicht, um den Draht zu verlassen. Aber da die Energien MAXWELL-verteilt sind, haben einzelne Elektronen auch bei geringeren Temperaturen eine genügend hohe Energie.

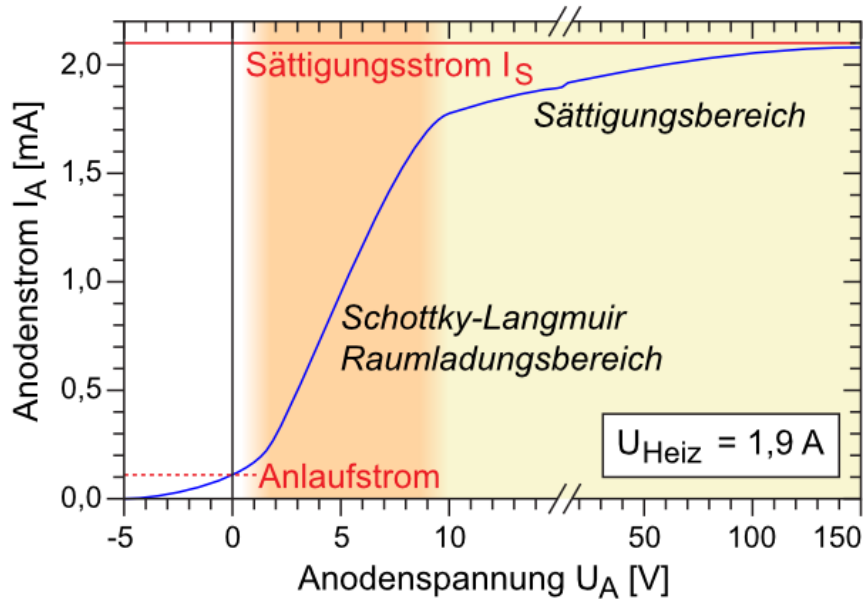


Abbildung 1: Stromfluss gegen die Anodenspannung aufgetragen von [LP1, 8.10.14, 12 Uhr].

Die folgenden Bereiche beziehen sich auf Abb. 1.

Der **Anlaufstrom** ist der Strom, der fließt, ohne, dass eine Spannung zwischen den Elektroden anliegt. Dieser ist nicht verschwindend, da aus der Kathode gelöste Elektronen durch Zufall auf die Anode auftreffen können.

Der **Raumladungsbereich** ist der Bereich in der Anodenspannung, in dem der Anodenstrom ungefähr linear ansteigt. Dies geschieht dadurch, dass genügend Elektronen aus der Kathode durch die thermische Energie herausgelöst werden. Es können sich aber nicht alle herausgelösten Elektronen zur Anode bewegen, da Elektronen, die schon auf dem Weg sind, das elektrische Feld abschirmen. Hier gilt nach [Mes10, S. 475] das SCHOTKY-LAMOURSche Raumladungsgesetz:

$$j = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \cdot \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{U^{3/2}}{d^2}. \quad (2)$$

Wird die **Anodenspannung** jedoch immer größer, so ist irgendwann ein Sättigungsbereich erreicht. In diesem sind keine Elektronen mehr im Raumladungsbereich vorhanden und um einen höheren Anodenstrom zu erzielen, muss die Anodenspannung sehr viel größer werden.

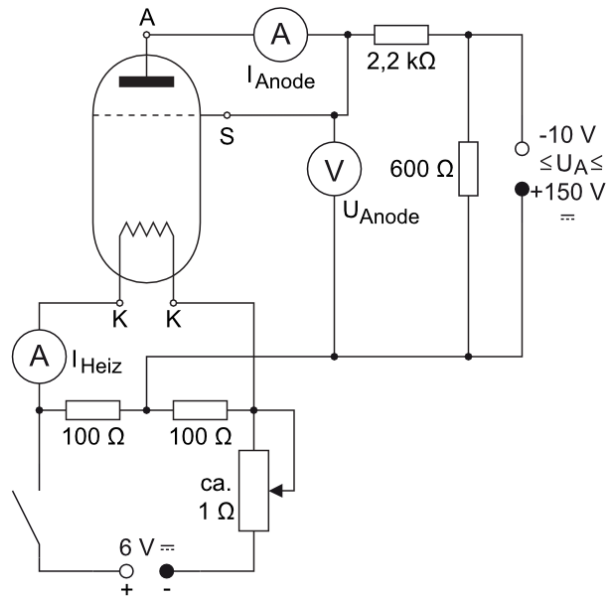


Abbildung 2: Schaltplan der Vakuumdiode aus [LP1, 8.10.14, 12 Uhr].

3 Durchführung

Zunächst baut man die Schaltung aus Abb. 2 auf. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schutzringe zwar auf dem Anodenpotential sind, aber der darüber fließende Strom nicht fälschlicher Weise als Anodenstrom gemessen wird.

Dann wählt man drei verschiedene Heizströme zwischen 1.8 A und 2 A und zeichnet für sie jeweils zu unterschiedlichen Anodenspannungen zwischen -10 V und 150 V die zugehörigen Anodenströme auf. Im Bereich des Anlaufstroms und der Raumladung sollten die Messungen in höchstens 2 V-Schritten erfolgen. Die Spannung soll soweit herunterregelt werden, bis kein Anodenstrom mehr messbar ist. Auch der Bereich um $U_A = 0\text{ V}$ soll sehr genau vermessen werden.

4 Auswertung

4.1 Kennlinien

In Abb. 3 werden für verschiedene Heizströme die gemessenen Anodenströme aufgetragen. Die Achsen sind für die einzelnen Plots bewusst anders skaliert. Die Grafik 4 zeigt alle Messungen zusammen. Dabei kann man klar erkennen, dass mit steigendem Heizstrom auch ein deutlich höherer Anodenstrom fließen kann. Für die Fehler der Anodenspannungsmessung wurde $\sigma_{U_A} = U_A \cdot 0.25\% + 1\text{ Digit}$ verwendet. Der Strommessung des Anodenstroms wurde eine Ungenauigkeit von $\sigma_{I_A} = I_A \cdot 0.8\% + 2\text{ Digits}$ zugewiesen.

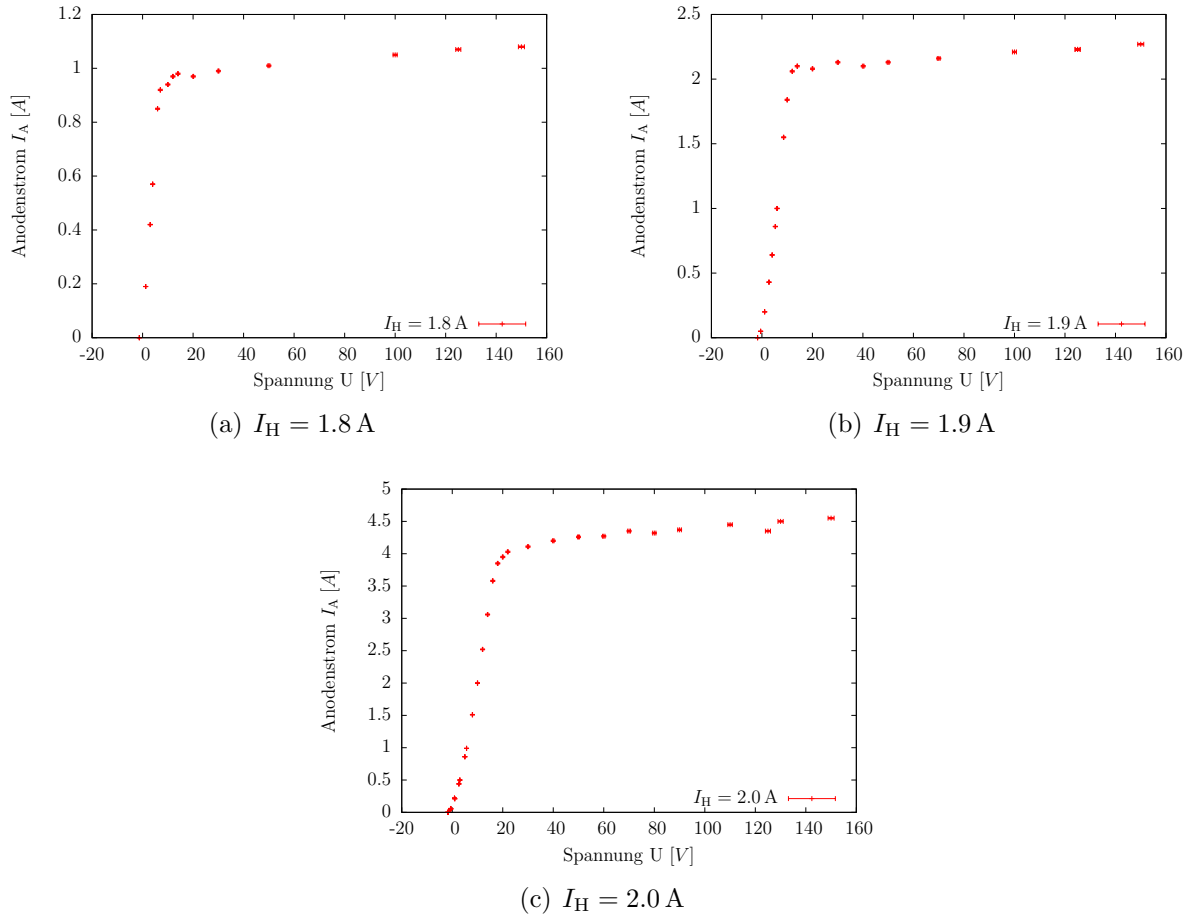


Abbildung 3: Auftragung des Anodenstroms gegen die Anodenspannung bei verschiedenen Heizströmen.

4.2 Raumladung

In Abbildung 5 wird der Anodenstrom zur Potenz $\frac{2}{3}$ gegen die Anodenspannung aufgetragen. Die Unterabbildungen zeigen hierbei die Daten für verschiedene Heizströme im Raumladungsgebiet. Nach Formel (2) ist ein linearer Zusammenhang hier zu erwarten. Dieser gilt natürlich nur im Raumladungsgebiet, so dass auch nur dieser aufgetragen ist. Die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung liefert $\sigma_{I_A^{2/3}} = \frac{2\sigma_a}{3\sqrt[3]{a}}$. Die Werte der linearen Regression sind in Tabelle 1 zu finden. Die ermittelten Werte haben eine Unsicherheit von höchstens $\sigma_a = 2.3\%$ und $\sigma_b = 5.9\%$ und das reduzierte χ^2 beträgt höchstens 0.2% . Dies bedeutet, dass die Werte eine deutliche lineare Korrelation aufweisen.

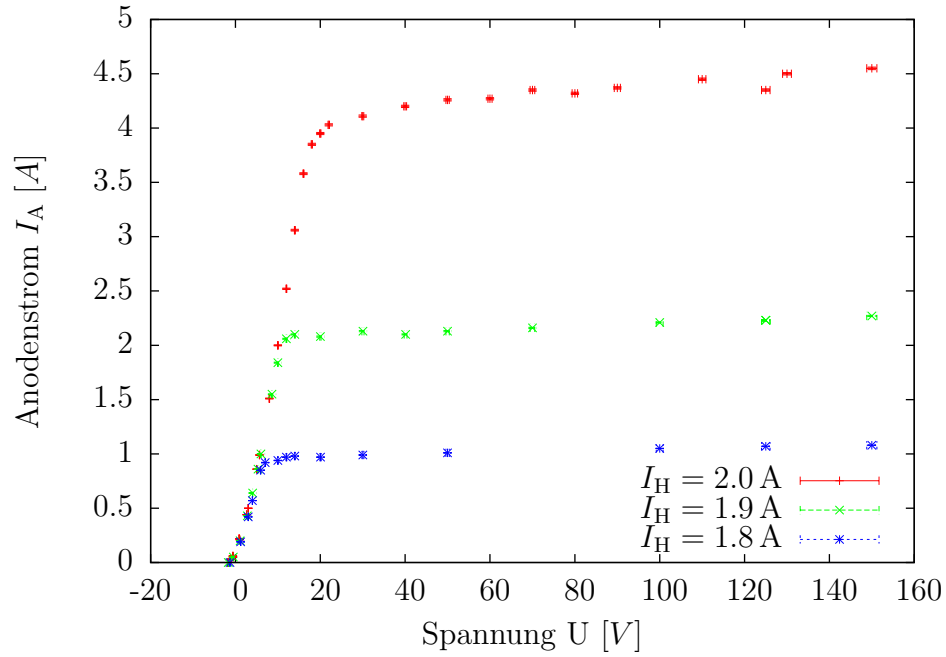


Abbildung 4: Auftragung des Anodenstroms gegen die Anodenspannung bei unterschiedlichen Heizströmen.

Um die Kontaktspannung U_K zu ermitteln, kann $0 = a \cdot x + b$ umgestellt werden nach

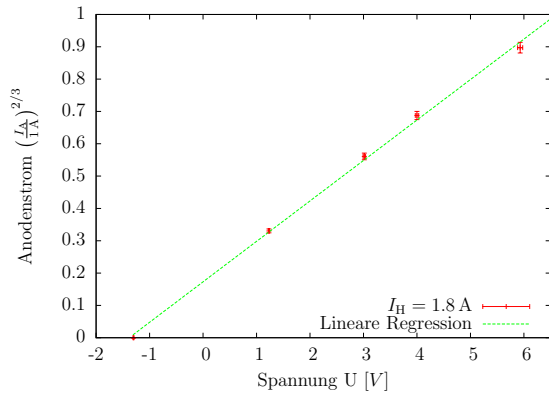
$$U_K = -\frac{b}{a} \text{ mit}$$

$$\sigma_{U_K} = \sqrt{\frac{\sigma_b^2}{a^2} + \frac{\sigma_a^2 \cdot b^2}{a^4}}.$$

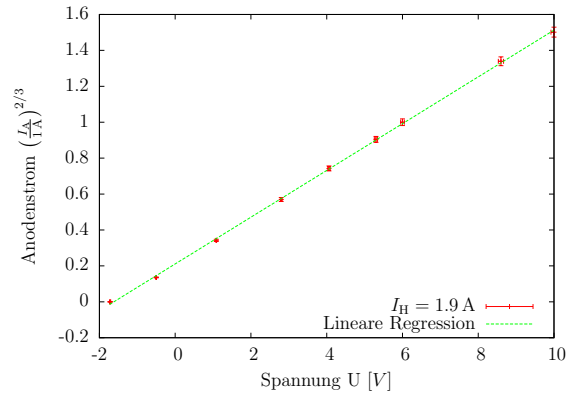
Die sich ergebenden Werte können ebenfalls in Tabelle 1 entnommen werden. Es ergibt sich ein gewichteter Mittelwert von $\bar{U}_K = (-1.62 \pm 0.03)\text{V}$

| I_H [A] | a $\left[\frac{\text{A}^{2/3}}{\text{V}}\right]$ | b $\left[\text{A}^{2/3}\right]$ | U_K [V] |
|-----------|--|-----------------------------------|------------------|
| 1.8 | 0.125 ± 0.003 | 0.173 ± 0.011 | -1.38 ± 0.09 |
| 1.9 | 0.1302 ± 0.0009 | 0.211 ± 0.005 | -1.62 ± 0.04 |
| 2.0 | 0.1302 ± 0.0016 | 0.242 ± 0.014 | -1.9 ± 0.1 |

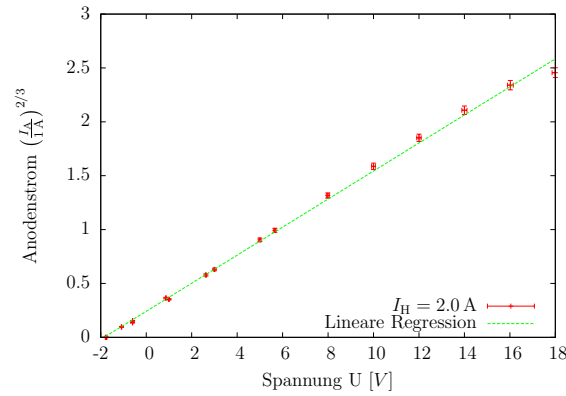
Tabelle 1: Parameter aus den Linearen Regressionen von Abb. 5 und die sich ergebende Kontaktspannung.



(a) $I_A = 1.8 \text{ A}$



(b) $I_A = 1.9 \text{ A}$



(c) $I_A = 2.0 \text{ A}$

Abbildung 5: Auftragung des Anodenstroms zur Potenz $\frac{2}{3}$ gegen die Anodenspannung bei verschiedenen Heizströmen im Raumladungsgebiet.

4.3 Exponent im Raumladungsgebiet

Nach Gl. (2) ist für I und U_{ges} eine Relation

$$I = c \cdot U_{\text{ges}} = c \cdot (U_K + U_B) \quad (3)$$

$$\Rightarrow \ln(I) = \ln c + \frac{2}{3} \ln(U_K + U_B) \quad (4)$$

für ein c zu erwarten.

Wird nun I gegen U_{ges} doppelt logarithmisch aufgetragen, so sollte sich eine Geraden-

| I_H [A] | Steigung m [$\ln \frac{A}{V}$] |
|-----------|------------------------------------|
| 1.8 | 1.47 ± 0.04 |
| 1.9 | 1.547 ± 0.009 |
| 2 | 1.61 ± 0.03 |
| \bar{m} | 1.549 ± 0.008 |

Tabelle 2: gefittete Geradensteigung aus Abb. 6.

steigung von $m = \frac{2}{3}$ ergeben. Die Fehlerrechnung nach Gauss fñhrt zu

$$\sigma_{\ln(U_K+U_B)}^2 = \frac{\sigma_{U_K}^2 + \sigma_{U_B}^2}{U_K + U_B} \text{ und} \quad (5)$$

$$\sigma_{\ln I} = \frac{\sigma_I}{I}. \quad (6)$$

Dieser Plot ist in Abb. 6 zu sehen und die gefitteten Parameter in Tabelle 2.

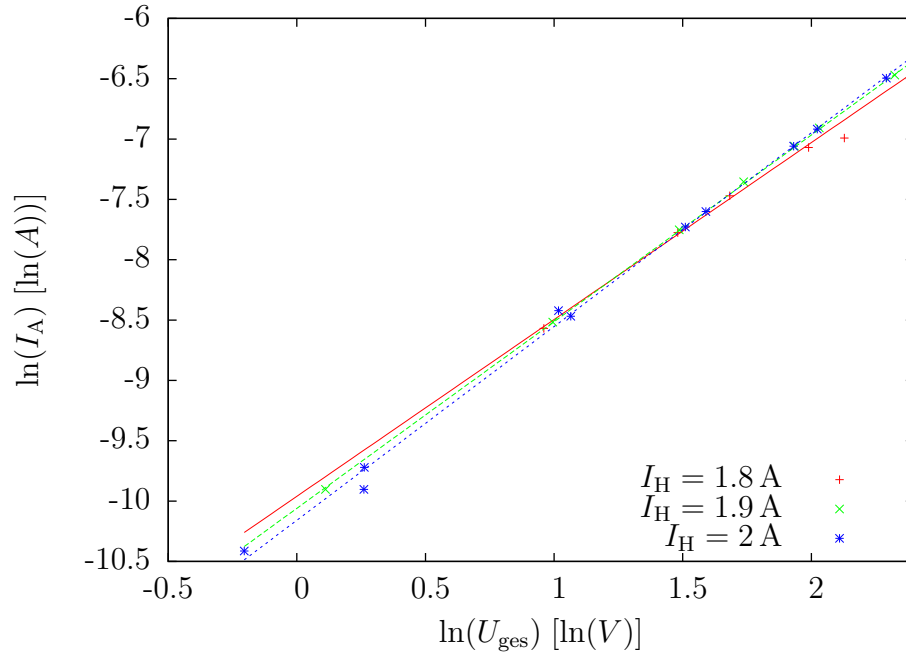


Abbildung 6: Doppeltlogarithmische Auftragung von des Anodenstroms gegen die Gesamtspannung.

5 Diskussion

Das extra bereitstehende genauere analoge Amperemeter konnte leider auch die niedrigen Ströme nicht messen, da auch sie zu groß für das Gerät waren. Auch bei der Messung des Anlaufstroms wirkte es nicht zuverlässig, da es über einen mehrere Volt großen Bereich keinen Strom anzeigte. Daraufhin verwendeten wir nur die digitalen Messgeräte.

In Abb. 3 kann man erkennen, dass für die 2 A Messungen viele Messungen im Anlaufstrombereich gemacht wurden. Für die 1.8 A Messung wurden jedoch nur ca. 6 Messungen vor dem Sättigungsbereich gemacht, so dass sich hier kaum Aussagen für diesen Bereich machen lassen.

Dennoch lassen die Werte aus Tabelle 1 den Raumladungsbereich eingrenzen.

Der berechnete Exponent im Raumladungsbereich von 1.549 ± 0.008 weicht von den erwarteten $\frac{3}{2}$ um 5% ab. Der erwartete Wert liegt zwar nicht im Fehlerintervall, dies liegt jedoch vermutlich an den zu gering angenommenen Fehlern.

Die berechneten Werte der Kontaktspannung U_K liegen in einem Intervall von $[-1.9, -1.39]$ V bei einem Fehler von höchstens 0.1 V. Diese Streuung ist mit 37% der höchsten zur geringsten Messung sehr groß.

Literatur

- [LP1] *Lehrportal der Universität Göttingen.* <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4256>.
- [Mes10] Meschede, Dieter: *Gerthsen Physik.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 24. Auflage, 2010, ISBN 978-3-642-12893-6.