

Quanteneffizienz Messung einer hybriden Elektronenkanone unter TAPE Bedingungen für ELSA

Yannick Schober

Bachelorarbeit in Physik
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Januar 2024

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Bonn,
Datum

.....
Unterschrift

1. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Desch
2. Gutachter: Dr. Dennis Proft

Inhaltsverzeichnis

1	ELSA	1
1.1	LINAC 2	1
1.2	Hybride Elektronenkanone	2
1.2.1	Thermische Kathode	2
1.2.2	Hybrider Betriebsmodus	3
2	Theorie	4
2.1	Quanteneffizienz	4
2.2	Strommessung	4
2.3	Temperaturmessung und thermische Energie	5
3	Versuchsaufbau und Messvorbereitungen	7
3.1	Mechanischer Aufbau	7
3.2	Optischer Aufbau	8
3.3	Temperatur-Sensor	10
3.4	Elektrischer Aufbau	10
4	Vormessung	12
4.1	Aktivierungszyklus	12
4.1.1	Heizleistung und Temperaturüberwachung	13
4.1.2	Überprüfung der Messgeräte	15
4.1.3	Vergleich der Kathoden	17
4.1.4	Betriebspunkt	17
4.2	Raumladung	18
4.3	Photoeffekt	19
5	Quanteneffizienzmessung	23
5.1	Gegenfeld	23
5.2	Quanteneffizienz-Messung	25
6	Zusammenfassung und Ausblick	29
A	Versuchsaufbau	32
A.1	Schaltpläne	33
A.2	Zeichnungen der Halterungen	36

B	Messergebnisse	43
B.1	Aktivierungszyklen	43
B.1.1	Ausdampfen und Vakuumqualität	43
B.1.2	Verschiedene Messwiderstände	44
B.1.3	Betriebspunkt	49
B.1.4	Raumladung	50
B.1.5	2. Kathode	51
B.2	Floating Anode	54
B.3	Gegenfeldmethode	56
B.4	Quanteneffizienzmessung	59
Literatur		73
Abbildungsverzeichnis		75
Tabellenverzeichnis		77

ELSA

Die Elektronen Stretcher Anlage (ELSA) ist ein Elektronen-Synchrotron mit dem polarisierte und unpolarisierte Elektronen auf Energien von 0,5 bis 3,2 GeV beschleunigt und zu verschiedenen Experimente extrahiert werden können. ELSA besteht aus drei Beschleunigerstufen. Im Linearbeschleuniger LINAC 2, werden die Elektronen auf 26 MeV vorbeschleunigt. Danach folgt ein *Combined Function Synchrotron* als Booster-Synchrotron in dem die Elektronen auf 0,5 bis 1,6 GeV weiter beschleunigt werden, bevor sie in den eigentlichen ELSA Stretcherring gelangen und auf ihrer Zielenergie von bis zu 3,2 GeV beschleunigt werden.[1] [2]

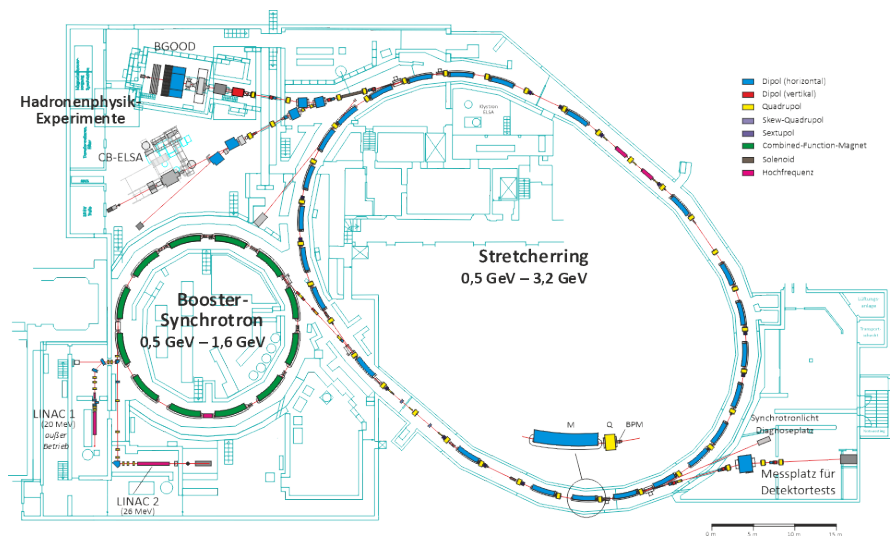


Abbildung 1.1: Elektronenbeschleuniger ELSA [2]

1.1 LINAC 2

Die erste Beschleunigerstufe von ELSA ist der LINAC 2. Dieser ist ein *traveling wave linac* (Wanderwellen Linearbeschleuniger). Er besteht aus einem Wellenleiter (*Cavity*) in dem eine elektromagnetische Welle

propagiert. Die Elektronen propagieren mit der aufsteigenden Flanke der EM-Welle und werden so beschleunigt. Dies führt dazu, dass der LINAC 2 nur einen gepulsten Betrieb ermöglicht, da auf der abfallenden Flanke der EM-Welle keine Elektronen sinnvoll beschleunigt werden können. Tatsächlich ist der nutzbare Bereich der EM-Welle noch kleiner und beschränkt sich auf einen kleinen Teil der aufsteigenden Flanke, an dem die Änderung des E-Feldes näherungsweise linear ist.[3][4]

1.2 Hybride Elektronenkanone

1.2.1 Thermische Kathode

Die hier verwendete Kathode ist eine Y-644B-Elektron Gun von CPI Eimac [5][6][7]. Sie besteht aus einem Heizdraht vor dem sich eine Cäsium-dotierte Wolframschicht befindet. Der Heizdraht heizt diese Schicht auf, bis die Elektronen genug thermische Energie haben, um die Wolframschicht zu verlassen. Das Cäsium verringert die benötigte Austrittsarbeit. Da es sich hierbei um einen thermischen Prozess handelt, haben die Elektronen eine entsprechend Energieverteilung und es lösen sich auch Elektronen, wenn die mittlere thermische Energie kleiner ist als die Austrittsarbeit. Es kann also auch bei geringer Heizleistung zu thermischer Emission kommen (siehe auch Abs. 2.3). Entsprechend wird für die Messung immer eine Stromänderung zwischen hybridem und thermischem Betrieb (siehe Abs. 1.2.2) betrachtet. Eine schematische Zeichnung der Kathode ist in Abbildung 1.2 zu sehen.

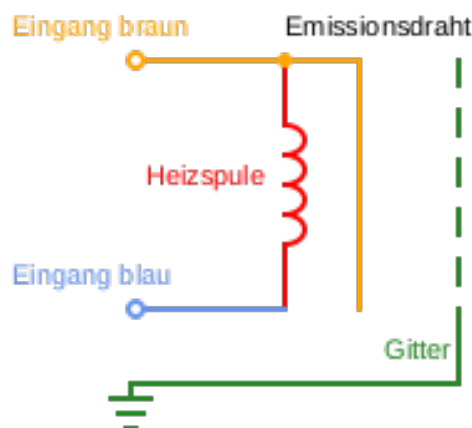


Abbildung 1.2: Schematischer Aufbau thermische Kathode

Die Austrittsarbeit von Wolfram liegt bei 4,54 bis 4,6 eV, die von Caesium bei 1,7 bis 2,14 eV. Die genaue Austrittsarbeit der Kathode ist nicht bekannt. Da die zur Verfügung stehende Kathode bereits im Einsatz war und wegen zu geringer Emission ausgebaut wurden, wird davon ausgegangen, dass ein Großteil des Cäsiums bereits abgedampft ist und das Cäsium dadurch die Austrittsarbeit nur noch geringfügig verringert.

Die Gun wird in einem gepulsten Modus betrieben, wobei ihre Pulsdauer ($> 1 \mu\text{s}$) deutlich größer ist als die zeitliche Akzeptanz einer Schwingung im LINAC 2 (die EM-Welle im LINAC 2 hat eine

Frequenz von $f = 3 \text{ GHz}$ was einer halben Umlaufzeit von $T^{1/2} = 0,16 \text{ ns}$ entspricht). Die Gun emittiert also auch Elektronen, wenn der LINAC 2 diese nicht aufnehmen kann. Um dies zu verhindern befindet sich vor dem LINAC ein Prebuncher, der den Elektronenstrahl von der Gun in Bunche aufteilt und diese an die Phase der beschleunigenden Welle des LINAC anpasst.

1.2.2 Hybrider Betriebsmodus

Im hybriden Betriebsmodus wird die Kathode unterhalb ihrer typischen Betriebstemperatur betrieben (s. Abs. 4.1.4) um die thermische Emission so gering wie möglich zu halten. Zusätzlich zur Heizung wird sie mit einem Laser bestrahlt (*thermally assisted photoemission (TAPE)*), der den Elektronen die restliche Energie für den Austritt aus der Kathode geben soll. Der Laser kann dabei deutlich schneller gepulst werden (in der Frequenz des LINAC) als es mit der Kathode im thermischen Betriebsmodus möglich ist. Dadurch emittiert die Kathode nur Elektronen wenn der LINAC diese auch akzeptiert. Durch die kurze Pulsdauer ist es außerdem möglich einen Single-Bunch Betrieb des ELSA Beschleunigers zu realisieren. Dabei würde immer nur ein Bunch also ein einzelnes Teilchenpakete im Beschleuniger beschleunigt werden.

Theorie

2.1 Quanteneffizienz

Die Quanteneffizienz ist das Verhältnis von einfallenden Photonen zu ausgelösten Elektronen an einem geeigneten Material. Sie wird beschrieben durch:

$$\eta = \frac{r_{el}}{r_{ph}} = \frac{I_{\text{Photo}} \cdot h \cdot c}{P(\lambda) \cdot \lambda \cdot q} \quad (2.1)$$

mit r_{ph} , r_{el} die Raten der einfallenden Photonen bzw. der ausgelösten Elektronen; $P(\lambda)$ der Lichtleistung bei der Wellenlänge λ ; I_{Photo} dem resultierendem Photostrom; $q = e$ die Elementarladung sowie c , h der Lichtgeschwindigkeit und dem Plank'schen Wirkungsquantum[8][9].

Die Photonen kommen aus einem Laser (siehe Abs. 3.2) bei dem Leistung und Wellenlänge bekannt sind. Ziel des Versuchs ist es den Photostrom zu messen.

Eine Abschätzung der Quanteneffizienz kann nach [10] zu $\eta \approx 0.0001$ abgeleitet werden. Daraus kann eine Abschätzung für den erwarteten Photostrom errechnet werden. Für einen Laser mit Wellenlänge 405 nm und einer Leistung von 1 mW ergibt sich:

$$I_{\text{Photo}} = \frac{\eta \cdot P(\lambda) \cdot \lambda \cdot e}{h \cdot c} \quad (2.2)$$

$$= \frac{0.0001 \cdot 1 \text{ mW} \cdot 405 \text{ nm} \cdot e}{h \cdot c} = 33 \text{ nA} \quad (2.3)$$

Es wird erwartet Ströme im Bereich von $\approx 10 \text{ nA}$ zu messen.

2.2 Strommessung

Die Quanteneffizienz soll bestimmt werden, indem der von der Kathode abfließende Strom gemessen wird. Dabei muss der Blindstrom (Emissionsstrom bei abgeschaltetem Laser) berücksichtigt werden. Deshalb wird immer die Stromdifferenz zwischen an- und abgeschaltetem Laser betrachtet. Diese

entspricht dem Strom, der durch den Laser ausgelöst wird. Für die Messung des Kathodenstroms gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Die direkte Messung des Stromes; benötigt ein präzises Amperemeter.
2. Den Strom durch einen großen Widerstand fließen lassen und die über den Widerstand abfallende Spannung zu messen, der Messbereich kann dann über den Widerstand eingestellt werden.

Bei der direkten Strommessung erwartet man keinen Einfluss auf die Messung; bei der Messung über einen Widerstand verschiebt die Spannung die über den Widerstand abfällt das Potential der Kathode (siehe Abs. ??). Des weiteren ändert sich der Verlauf des erwarteten Signals.

Es wird ein Photoemissionsstrom von einigen 10 nA (siehe Abs. 2.1) erwartet. Um diesen in eine messbare Spannung umzuwandeln wird ein Widerstand von 100 MΩ benötigt, dann entspricht 1 V $\hat{=}$ 10 nA. Für eine direkte Strommessung wird ein instantaner Anstieg des Signals (bis auf evtl. Anstiegszeit des Messgerätes), für eine Spannungsmessung über einen großen Widerstand hingegen wird eine größere Anstiegszeit erwartet. Dies kommt daher, dass sich die Kathode mit dem Gitter bzw. der Anode wie ein Kondensator verhalten.

Aus den Formeln für die Spannung 2.7 bzw. den Stromfluss 2.6 bei der Aufladung eines Kondensators, sowie dem Ohmschen Gesetz 2.4 und der Kirchhoffschen Knotenregel 2.5 für den Anodenstrom kann der Spannungsverlauf über dem Messwiderstand beschrieben werden [11].

$$U_{\text{Wid}}(t) = R_{\text{Wid}} \cdot I_{\text{Wid}}(t) \quad (2.4)$$

$$\Delta I_{\text{Kath}} = I_{\text{Kond}}(t) + I_{\text{Wid}}(t) = \text{const} \quad (2.5)$$

$$I_{\text{Kond}}(t) = I_{\text{Kond},0} \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad (2.6)$$

$$U_{\text{kond}}(t) = I_{\text{Kond},0} \cdot R_{\text{Kond}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right) \quad (2.7)$$

$$(2.8)$$

Mit der Annahme, dass der Kondensatorwiderstand des Versuchsaufbaus deutlich größer als der Widerstand ist über den gemessen wird ($R_{\text{Kond}} \ll R_{\text{Wid}}$), kann vom Start der Messung ausgehend ($U_{\text{Kond}}(0) = I_{\text{Kond},0} \cdot R_{\text{Kond}}$) genähert werden, dass $I_{\text{Kond},0} = \Delta I_{\text{Kath}}$ ist. Daraus ergibt sich dann

$$\Rightarrow I_{\text{Wid}}(t) = \Delta I_{\text{Kath}} \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right) \quad (2.9)$$

$$\Rightarrow U_{\text{Wid}}(t) = R_{\text{Wid}} \cdot \Delta I_{\text{Kath}} \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right) \quad (2.10)$$

für das Ausschalten des Laser erhalten wir analog:

$$U_{\text{Wid}} = R_{\text{Wid}} \cdot \Delta I_{\text{Kath}} e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad (2.11)$$

2.3 Temperaturmessung und thermische Energie

Die Quanteneffizienz soll in Abhängigkeit der Temperatur der Kathode gemessen werden (siehe Abs. 3.3) Der dafür verwendete Infrarot-Sensor misst die emittierte Strahlung der Kathode bei der festen Wellenlänge 1,6 μm . Der Sensor rechnet die emittierte Strahlung dann in eine Schwarzkörpertemperatur

um. Er zeigt also nicht die tatsächliche Temperatur der Kathode an, sondern die Temperatur die ein Schwarzkörper bei gleicher Emission hätte. Als Umrechnungsfaktor dient hierbei der Emissionsgrad, welcher für Wolfram (dem Hauptbestandteil der Kathode) für die vom Sensor verwendete Wellenlänge bei $\epsilon \approx 0,1$ bis $0,3$ liegt. Der Sensor misst die spektrale spezifische Ausstrahlung; durch Gleichsetzen der spektrale spezifische Ausstrahlung eines Schwarzkörpers mit der gemessenen lässt sich die tatsächliche Temperatur der Kathode errechnen [12][13]:

$$M_{\nu}^{\text{Schwarz}}(\nu, T) = \sigma T_{\text{gemessen}}^4 \quad \text{spektrale spezifische Ausstrahlung Schwarzkörper} \quad (2.12)$$

$$M_{\nu}^{\text{Kathode}}(\nu, T) = \sigma T_{\text{Kathode}}^4 \quad \text{spektrale spezifische Ausstrahlung Kathode} \quad (2.13)$$

$$\Rightarrow T_{\text{Kathode}} = \frac{T_{\text{gemessen}}}{\sqrt[4]{\epsilon(\nu, T)}} \quad (2.14)$$

Aus der Temperatur der Kathode lässt sich dann mit Hilfe der *Maxwell-Boltzmann-Verteilung* [14] die Energie der Elektronen bestimmen. Für den Versuchsteil *Floating Anode* (Abs. 4.3) ist die maximale kinetische Energie der Elektronen von Bedeutung. Da die Verteilung jedoch zu hohen Geschwindigkeiten offen ist, lässt sich kein exakter Maximalwert für die Energie finden. Im Folgenden nehmen wir die Geschwindigkeit als Maximalgeschwindigkeit an, die schneller ist als die Geschwindigkeit von 99,9 % der Elektronen. Aus dieser Maximalgeschwindigkeit lässt sich dann eine kinetische Energie der Elektronen berechnen. Die Maxwell-Boltzmann-Verteilung ist gegeben durch 2.15:

$$p(v) = c_1(T) \cdot v^2 \cdot e^{-c_2(T) \cdot v^2} \quad (2.15)$$

$$\text{mit} \quad c_1(T) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{und} \quad c_2(T) = \frac{m}{2k_B T} \quad (2.16)$$

Um die gesuchte Geschwindigkeit zu erhalten, die größer ist als 99,9 % der Geschwindigkeit aller Elektronen, wird die obere Grenze des Geschwindigkeitsintegrals über die Maxwell-Boltzmann-Verteilung gesucht, bei der das Integral den Wert 0.999 annimmt.

$$0.999 = \int_0^{v_{\max}} p(v) dv = \left[c_1(T) \left(\frac{-1}{2} \cdot \frac{v \cdot e^{-c_2(T) v^2}}{c_2(T)} - \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\pi} \frac{\text{erf} \left(-\sqrt{c_2(T)} \cdot v \right)}{(c_2(T))^{\frac{3}{2}}} \right) \right]_0^{v_{\max}} \quad (2.17)$$

$$\Rightarrow v_{\max} = e^{c_2(T) \cdot v_{\max}^2} \left(\frac{-0.999 \cdot 2 \cdot c_2(T)}{c_1(T)} + \frac{\sqrt{\pi} \cdot \text{erf} \left(\sqrt{c_2(T)} \cdot v_{\max} \right)}{2 \cdot c_1(T) \cdot c_2(T)^{1/2}} \right) \quad (2.18)$$

Die Berechnung der „maximalen“ Geschwindigkeit (Definition siehe oben) und der dazugehörigen Energie kann mit einem numerischen Algorithmus gelöst werden[15].

Versuchsaufbau und Messvorbereitungen

3.1 Mechanischer Aufbau

Das Grundgerüst des Versuchsaufbaus bildet eine Vakuumkammer mit drei CF-Flanschen, wobei zwei sich direkt gegenüber voneinander befinden. Ein Foto der Vakuumkammer ist im Anhang (Abb. A.2) zu finden.

Am Boden der Vakuumkammer ist eine *Pfeiffer TCP 350*-Vakuumpumpe mit einer *Pfeiffer MVP 070-3* und einer *Pfeiffer MVP 015-4* als Vorpumpen angeschlossen. Die erstgenannte dient dem schnellen Vakuumieren am Anfang der Experimentierphase bzw. nach dem Belüften des Versuchsaufbaus; die zweitgenannte Pumpe ist mit der Hauptpumpe gekoppelt und läuft dauerhaft im Intervallbetrieb um das Vakuum aufrecht zu erhalten. Während des Versuchzeitraumes kam es zu einem Ausfall der zweiten Vorpumpe, sodass ab dann die *Pfeiffer MVP 070-3*-Pumpe im Dauerbetrieb lief.

An den zwei sich gegenüberliegenden Flanschen sind die Kathode und ein Sichtfenster zum einstrahlen der Laser montiert. Am dritten Flansch sind elektrische Durchführungen angebracht, durch welche die Anode und weitere Messelektronik, wie der Infrarotsensor, für den Einbau innerhalb der Vakuumkammer, versorgt werden können.

Von der Decke der Vakuumkammer hängen drei Stelzen an denen Objekte in die Vakuumkammer gehängt und festgeschraubt werden können.

In der ersten Iteration des Versuchsaufbaus sollte ein Kupferdraht als Ringanode mit einer Kunststoffschraube an einer der Stelzen befestigt werden. Die Kunststoffschraube sollte dabei als Isolator zwischen der Anode und dem Rest des Aufbaus dienen. Dieser erste Entwurf des Aufbaus wurde jedoch verworfen, da zum einen der Kupferdraht nicht die gewünschte Stabilität aufwies und das Verhalten des Kunststoffes im Vakuum als problematisch angesehen wurde. Um einen stabilen und vakuumtauglichen Aufbau zu erhalten, wurde ein Halter konstruiert und gebaut. Da der Halter im Rahmen dieser Arbeit konstruiert wurde, konnte beim Design auch eine Halterung für den Infrarotsensor (siehe Abs. 3.3) integriert werden. Der zusammengesetzte Aufbau ist in Abb. 3.1 zu sehen. Der Sensorhalter (4) wird durch langen Schrauben mit der Hauptplatte (1) verbunden, dabei hängt der Sensorhalter lose auf an den Schrauben angeschraubten Muttern. Dadurch kann die Position des Sensorhalters angepasst werden und der Sensor auf die Kathode ausgerichtet werden.

Die Anode wird an den Anodenhalter (3) fest angeschraubt, weshalb sich dieser auch auf Anodenpotential befindet. Durch die Keramikisolatoren (2) werden sie vom Rest des Aufbaus getrennt. Die Anode selber besteht aus einer Kupferplatte mit einem Loch durch das sowohl der Laser, als auch der Infrarotsensor auf die Kathode gerichtet werden (siehe Abb. 3.2). Genauere Zeichnungen mit Maßen befinden sich im Anhang A.2

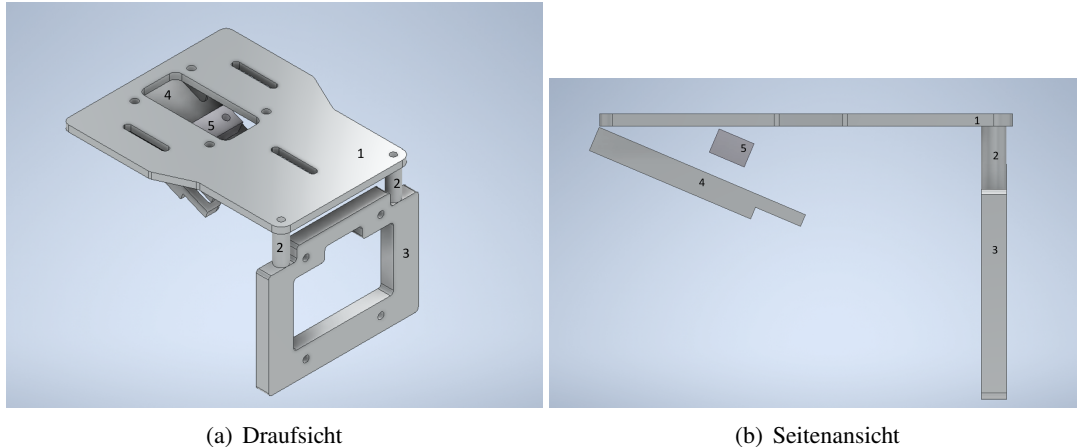


Abbildung 3.1: Zusammengesetzter Aufbau der Sensor und Kathodenhalterung: 1. Hauptbefestigungsplatte in Vakuumkammer, 2. Keramikisolator zur Anode, 3. Anodenhalterung, 4. Halterung für Infrarotsensor, 5. Klemme für Infrarotsensor

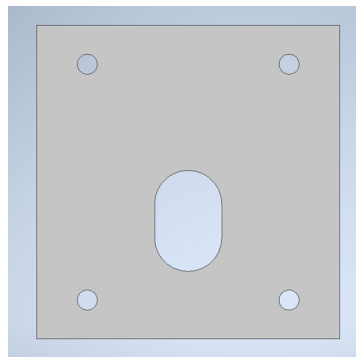


Abbildung 3.2: Anode

3.2 Optischer Aufbau

Für wellenlängenabhängige Messungen der Quanteneffizienz stehen 5 Laser mit verschiedenen Wellenlängen und Leistungen zur Verfügung. Da der Versuch nicht in einem Laserlabor stattfindet dürfen die Laser Laserschutzklasse 2 nicht überschreiten. Laser höherer Schutzklassen können jedoch mit Abschwächern auf eine niedrigere Schutzklasse gebracht werden. Dazu wurden die zur Verfügung stehenden Laser im Laserlabor von ELSA durchgemessen und es werden für die Laser passende Abschwächer bestimmt.

Das Ziel dabei war es die Laser in Laserschutzklasse 2 zu drosseln, dabei aber so viel Leistung wie Möglich zu erhalten, da der zu messende Strom direkt von der Laserleistung abhängt (siehe Abs. 2.1). Dafür ist es außerdem wichtig zu wissen, mit welcher Leistung die Laser auf die Kathode strahlen. Die Laserleistung wurde also einmal direkt aus dem Laser, einmal nach verschiedenen Abschwächern und einmal nach dem Durchlaufen des gesamten optischen Aufbaus, inklusive des Fensters durch das in die Vakuumkammer geschossen wird, gemessen. Die Messungen sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Laser	Gesamt Leistung	Abschwächer (Optische Dichte)				nach Fenster	
		0,1	0,5	0,6	1,0	mit Linse	ohne Linse
405 nm	8 100 μW	3 300 μW	1 200 μW	940 μW	350 μW	548 μW	770 μW
410 nm	650 μW	-	-	150 μW	-	-	595 μW
450 nm	15,9 μW	-	-	-	-	-	12,1 μW
635 nm	2 770 μW	2 190 μW	763 μW	661 μW	-	-	649 μW
532 nm	760 μW	-	-	-	-	-	680 μW

Tabelle 3.1: Messung der Laserleistung

Der Tabelle kann entnommen werden, dass nur für die Laser mit 405 nm und 635 nm ein Abschwächer benötigt wird. Die anderen Laser haben bereits ohne Abschwächer eine genügend geringe Leistung. Der 405 nm-Laser wurde zusätzlich mit einer Linse vermessen, da er einen sehr breiten Strahl hat, der auf die Kathode fokussiert werden muss.

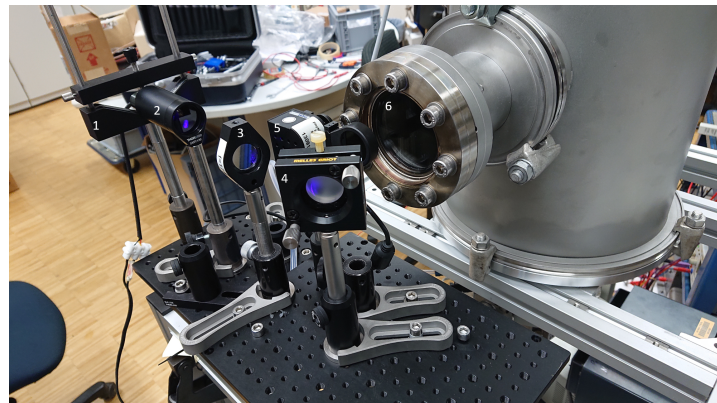


Abbildung 3.3: Optischer Aufbau

Am Gun-Teststand besteht der Optische Aufbau aus einer Halterung für den Laser (1); einer Einschiebung in der auch, wenn nötig, die Abschwächer eingebaut werden (2); einer Linse ((3), nur für den 405 nm-Laser), sowie einem Spiegel (4) der für die Feinjustage der Laser verwendet werden kann. Hinter dem Spiegel kommt ein Shutter (5), dieser ist extern triggerbar und hat eine optische Dichte von OD2,0 (Abschwächung von 2 Größenordnungen). Er wird verwendet um den Einfluss des Lasers besser untersuchen zu können, da so in den Messungen direkt gesehen werden kann, was der Unterschied in der Messung mit und ohne Laserstrahlung ist.

Hinter dem Shutter liegt das Fenster zur Vakuumkammer (5) durch das der Laserstrahl in die Vakuumkammer und auf die Kathode gelangt.

3.3 Temperatur-Sensor

Die Quanteneffizienz der Kathode soll auch in Abhängigkeit ihrer Temperatur gemessen werden. Dafür soll die Temperatur während den Messungen mit aufgezeichnet werden.

Zunächst wurde eine Temperaturmessung durch das Laserfenster (siehe Abs.:3.2) mit einer sogenannten Infrarot-Pistole erwägt. Die Infrarot-Pistole war bereits vorhanden, sodass dies die einfachste Variante gewesen wäre die Temperatur zu messen. Die Durchlässigkeit des Fensters bei der Messwellenlänge der IR-Pistole wurde mit Hilfe einer Glühlampe gemessen. Dafür wurde die Temperatur eine Glühlampe mit und ohne Fenster zwischen der Lampe und der IR-Pistole gemessen. Dabei kamen folgende Ergebnisse zustande:

$$T_{\text{direkt}} = (277 \pm 6) ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{Fenster}} = (46 \pm 2) ^\circ\text{C}$$

bei einer Raumtemperatur von $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Das Fenster ist also im Infrarot-Wellenlängenbereich in dem die IR-Pistole misst schlecht durchlässig.

Demnach ist eine Temperaturmessung durch das Fenster nicht sinnvoll. Stattdessen wurde ein andere Sensor besorgt, welcher in die Vakuumkammer gehängt werden kann (siehe Abs.:3.1). Dabei handelt es sich um das Modell *optris CT 2MHCF* welcher bei einer Wellenlänge von $1,6 \mu\text{m}$ Temperaturen von 385 bis $1\,600 ^\circ\text{C}$ messen kann[12]. Der Sensor gibt dabei die Temperatur direkt an. Eine Messung der Temperatur war somit möglich.

3.4 Elektrischer Aufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei voneinander getrennten Wagen. Auf dem ersten Wagen auf dem sich die Vakuumkammer befindet, sind auch die Vakuumpumpen sowie der Optische Aufbau mit Lasern und zugehöriger Elektronik (siehe Abb. A.2). Auf dem zweiten Wagen ist die Mess- und Versorgungselektronik für die Kathode und die Anode. Die Kathode wird mit einem Netzgerät sowohl mit ihrer Heizspannung als auch mit der Gitterbeschleunigungsspannung versorgt. Ein zweites Netzteil versorgt die Anode mit dem Anodenpotential. Außerdem sind hier noch Messgeräte (Präzisionsamperemeter und Präzisionsvoltmeter) sowie ein Oszilloskop angeschlossen. Die für die Aktivierungszyklen benötigte Gitterwechselspannung (siehe Abs. 4.1) wird von einem Trafo aus dem Stromnetz auf die benötigte Spannung herunter transformiert. Alle Verbraucher auf diesem Wagen sind über einen Trenntrafo an den Strom angeschlossen. Dies reduziert auftretende Dunkelströme, da alle für die Messung relevanten Bauteile auf deinem gemeinsamen Erdpotential liegen.

Für die Strommessung durch eine Spannungsmessung über einen Widerstand wird ein Operationsverstärker in Spannungsfolgeschaltung aufgebaut. Da die erwarteten Ströme sehr klein sind soll ein entsprechend großer Widerstand benutzt werden. Dieser ist größer als die Innenwiderstände der Messgeräte, wodurch eine direkte Spannungsmessung über dem Widerstand nicht möglich ist. Der Operationsverstärker sorgt dafür, dass die Spannung über dem Widerstand gemessen werden kann, ohne dass sich der Stromfluss auf den Widerstand und das Messgerät aufteilt. Ein Schaltplan ist in Abb 3.4 zu sehen. Die Schaltpläne für die Messungen sind im Anhang unter A.1 zu finden.

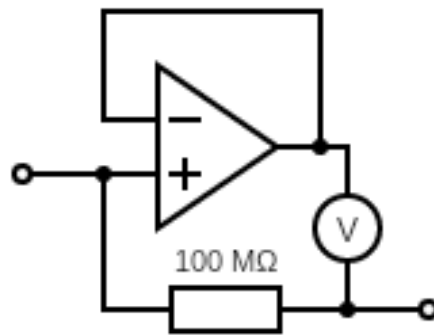


Abbildung 3.4: Schaltplan: Strommessung durch Spannungsmessung über Widerstand

Vormessung

Um die Handhabung der Kathode zu üben und das generelle Verhalten dieser zu verstehen wurden zuerst zwei alte aussortierte Kathoden eingebaut. Diese Kathoden waren bereits bei ELSA im Einsatz und wurden wegen zu geringer Elektronenausläute ausgebaut. Für Test- und Lernzwecke an diesem Aufbau sollten sie jedoch ausreichen. Um den Zustand der Kathoden zu überprüfen, vor allem im Bezug auf ihrer Emissionseigenschaften, wurden sie zunächst im thermischen Betriebsmodus getestet. Da die Kathoden seit ihrer letzten Nutzung ungeschützt gelagert wurden, wird mit ihnen zuerst ein Aktivierungszyklus durchlaufen um eventuelle Verschmutzungen der emittierenden Oberfläche zu reinigen. Die erste Kathode wurde nach dem Ausfall der Vakuumvorpumpe und der daraus folgenden Belüftung des Aufbaus getauscht. Die zweite Kathode emittierte in den Vormessungen weniger Elektronen als die erste, sodass für die eigentlichen Quanteneffizienzmessungen wieder die erste Kathode eingebaut wurde.

4.1 Aktivierungszyklus

Für den Aktivierungszyklus wird das Vakuum des Versuchsaufbaus auf unter $1,5 \cdot 10^{-6}$ mbar gebracht. Während des gesamten Aktivierungszykluses darf es nicht unter $5,3 \cdot 10^{-5}$ mbar fallen. Sonst könnten sich zum einen Teilchen auf der Kathode absetzen und die Emissionseigenschaften dieser verschlechtern und zum anderen würde Raumladungseffekte (siehe Abs. 4.2) eine immer größere Rolle spielen. Entsprechend muss die Kathode so geheizt werden, dass das Vakuum ausreichend gut bleibt[5]. Das erste Aufheizen der Kathoden ist in den Tabellen B.1, B.2, B.1.5, B.1.5 im Anhang festgehalten. Während des Aufheizens steigt der Druck in der Vakuumkammer zwischenzeitlich leicht an, was darauf zurückzuführen ist, dass sich etwas auf der Kathode abgesetzt hatte, was sich nun ins Vakuum löst, die Verschlechterung des Vakuums ist jedoch zu keinem Zeitpunkt so drastisch, dass dies den Aufheizvorgang verzögert.

Elektrotechnisch verhält sich die Kathode wie eine Diode. Liegt eine Beschleunigungsspannung an, die das Gitter bzw. die Anode positiver machen als die Kathode, fließt (bei genügend Heizleistung) ein Strom, liegt die Spannung in die Gegenrichtung an, fließt (fast) kein Strom. Dieses Verhalten kann mit einem Oszilloskop sichtbar gemacht werden (siehe Abb.: 4.1). Für eine sinusförmige Beschleunigungsspannung (gelb) zwischen Gitter und Kathode ist der Gitterstrom (blau) dann vorhanden, wenn die Kathode auf negativem Potential liegt. Es fließt ein (technisch) negativer Strom zum Gitter.

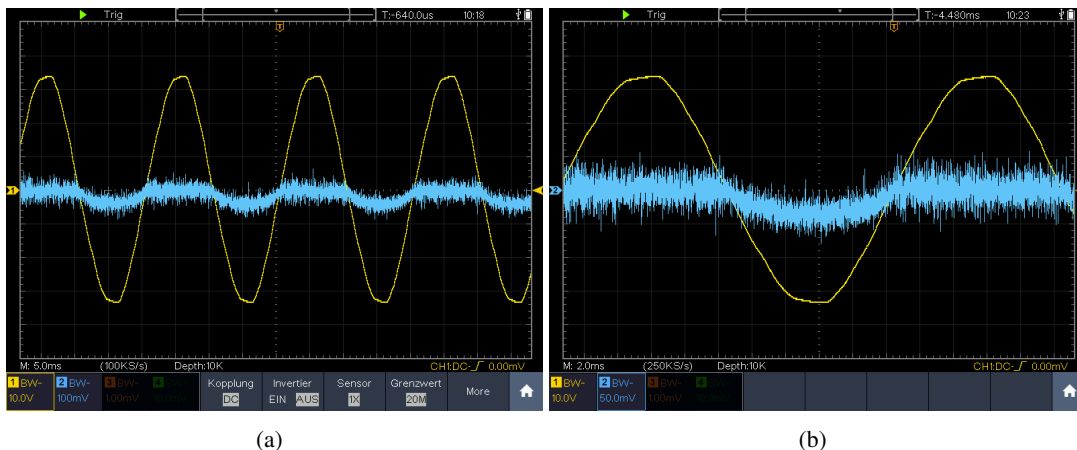


Abbildung 4.1: Verhalten der Kathode bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen

4.1.1 Heizleistung und Temperaturüberwachung

Die Heizleistung wird am Netzgerät der Kathode eingestellt. Um die Genauigkeit der Anzeige des Netzgerätes zu überprüfen, wurde in einem Aktivierungszyklus der Heizstrom und die Heizspannung auch mit einem DMM (digital Multimeter) gemessen. In Abbildung 4.2 sind die Differenzen der Heizleistung sowie des Heizstromes und der Heizspannung in Abhängigkeit der am Netzgerät eingestellten Heizleistung, -spannung, -strom aufgetragen und es wurde eine Ausgleichsgerade angepasst. In allen zukünftigen Messungen sind die vom Netzgerät aufgenommenen Werte entsprechend korrigiert.

Mit dem Infrarotsensor wurde während der Aktivierungszyklen die Temperatur aufgenommen (siehe Abb. 4.3). Dabei konnten die in der Aktivierungsanleitung der Kathode[5] vorgegebenen Temperaturen nicht erreicht werden, was zu der Vermutung führt, dass der Sensor nicht korrekt ausgerichtet war. Beim Wechsel der Kathode wurde der Sensor neu ausgerichtet, danach konnten aber nur noch geringere Temperaturen gemessen werden, was auf eine schlechtere Ausrichtung zurückzuführen ist. Wenn der Sensor nicht perfekt auf die Kathode ausgerichtet ist, misst er weniger Infrarotstrahlung und somit eine zu geringe Temperatur. Die gemessene Temperatur ist also nur eine untere Abschätzung für die tatsächliche Temperatur der Kathode.

Nach dem erneuten Wechseln der Kathoden zurück auf die erste Kathode hat der Sensor keine Temperaturen mehr messen können. Es wird vermutet, dass es ein unzureichender Kontakt der Stecker an der Vakuumdurchführung dafür Ursächlich ist. Ein solcher Fehler kann nur behoben werden, wenn die Vakuumkammer belüftet wird. Der befürchtete negative Einfluss auf die Kathode bei einer erneuten Belüftung überwog hier die Vorteile weitere Temperaturmessungen, weshalb ohne den Sensor weiter gemessen wurde. Mit den vorhandenen Temperaturmessungen kann jedoch eine Abhängigkeit der Heizleistung von der Temperatur hergestellt werden. In Abbildung 4.3 ist die Temperatur gegen die Heizleistung für beide Sensoreinstellungen aufgetragen. Zusätzlich ist eine Funktion an die Messwerte angefügt, um für die Messreihen ohne Temperatursensor die Temperatur in Abhängigkeit ausrechnen zu können.

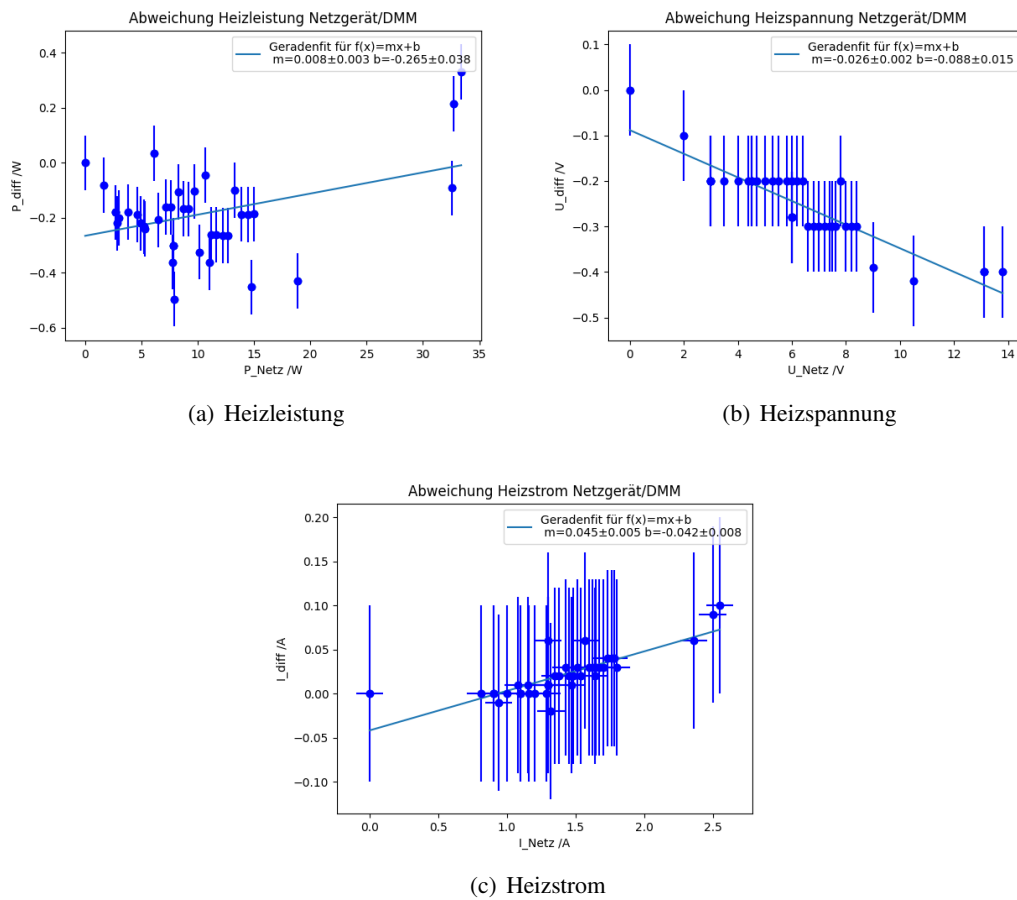


Abbildung 4.2: Korrektur von Heizleistung, -spannung, -strom

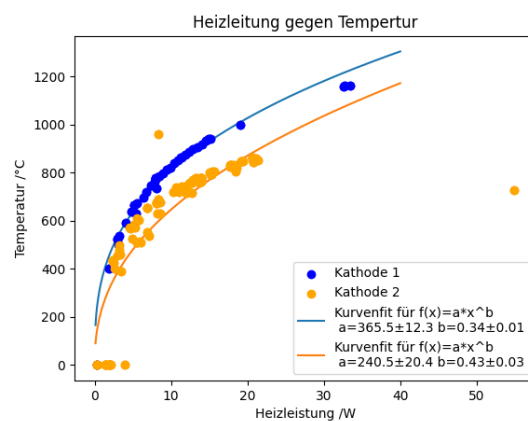


Abbildung 4.3: Temperatur in Abhängigkeit der Heizleistung

4.1.2 Überprüfung der Messgeräte

Die Messung des Emissionsstroms erfolgt über die Messung einer Spannung über einen Widerstand (siehe Abs. 2.2). Durch die Wahl des Widerstandes kann der Messbereich eingestellt werden. Ein größerer Widerstand ermöglicht eine Messung von kleinere Strömen, sorgt jedoch auch dafür, dass sich das Potential der Kathode/Anode ändert. Um dem entgegenzusteuern muss dann die Spannung Gitterspannung (für die Kathode) oder die Anodenspannung (für die Anode) erhöht werden. Dies ist jedoch, limitiert durch die verwendeten Netzgeräte, bedingt möglich. Auch ist die maximal messbare Spannung durch die Messgeräte limitiert. Es wurde außerdem untersucht, ob die Wahl des Widerstandes einen weiteren Einfluss auf die Messung hat. Es wurde eine 50 Hz Wechselspannung zwischen Gitter und Kathode angelegt und der Gitterstrom für verschiedene Messwiderstände gemessen. Die tatsächlich anliegende Beschleunigungsspannung ist nun die eingestellte Wechselspannung minus der über dem Widerstand abfallenden Spannung. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.4 zu sehen. Es lässt sich gut

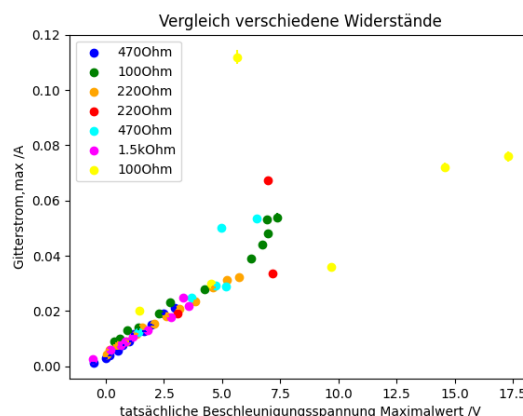
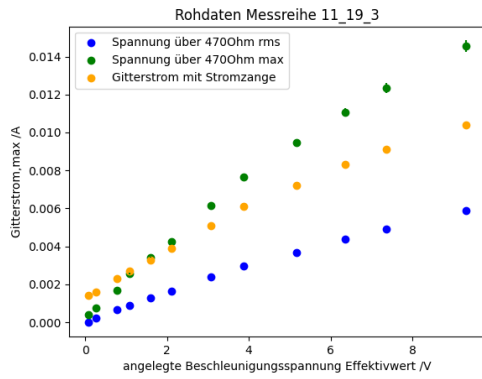


Abbildung 4.4: Einfluss verschiedener Widerstände auf die Messung

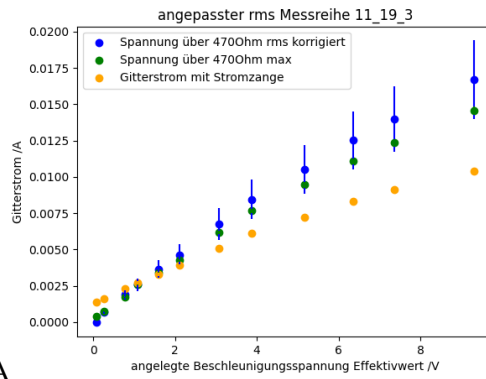
erkennen, dass die Wahl des Widerstandes keinen Einfluss auf den Stromfluss hat, und dieser entsprechend frei wählen werden kann, sodass man den gewünschten Messbereich erhält. Der hier aufgetragene Strom ist der Maximalgitterstrom im Peak der anliegenden Wechselspannung. Dieser lässt sich vom Oszilloskop ausgeben. Es wurde außerdem auch der rms (*root mean square* - quadratisches Mittel) Strom mit einem DMM gemessen. Gemäß des elektrischen Verhaltens der Kathode (siehe Abb.:4.1) wird erwartet, dass der rms-Wert um den Faktor $2 \cdot \sqrt{2} \approx 2.83$ unter dem Maximalwert liegt (für die Anliegende sinusförmige Wechselspannung). Der Faktor 2 kommt daher, dass nur eine Halbwelle betrachtet wird (Kathode verhält sich ähnlich einer Diode) und der Faktor $\sqrt{2}$ kommt aus der Umrechnung des Maximums des Sinus in seinen Effektivwert. Über alle Aktivierungszyklen gemittelt ist der Faktor zwischen rms und Maximalwert $2,84 \pm 0,16$ und entspricht damit den Erwartungen. Für die weiteren Messungen kann also sowohl der Maximalwert als auch der rms-Wert verwendet werden, da die Werte einander entsprechen. In Abbildung 4.5 sind Beispielhaft für drei Messreihen der Gitterstrom gegen die angelegte Gitterspannung aufgetragen. In Graph 4.5(b) ist die gemessene rms-Spannung um den oben bestimmten Wert korrigiert. Die gemessenen rms-Werte passen gut zu den gemessenen max-Werten

Zusätzlich zu der Messung über die Widerstände kann für Ströme im μA Bereich und darüber eine Strommesszange mit dem Oszilloskop verwendet werden. Vergleicht man die beiden Messmethoden

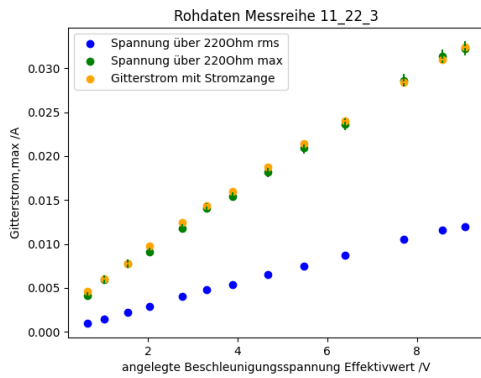


(a) große Abweichung zwischen Strommessungen direkt und über Widerstand

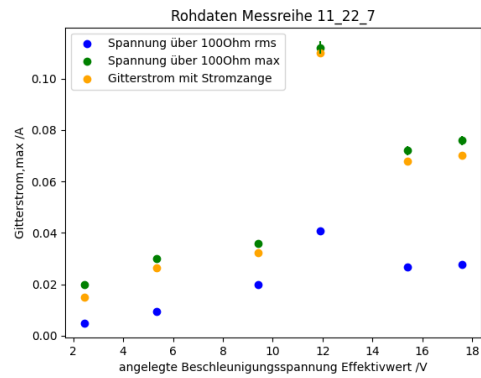
A



(b) rms Spannungsmesswert um Faktor $2,84 \pm 0,16$ korrigiert



(c) kleine Abweichung zwischen Strommessungen direkt und über Widerstand



(d) Verhalten der Kathode

Abbildung 4.5: Auftragung aus den Messreihen der Aktivierungszyklen: Beschleunigungsspannung gegen Gitterstrom

fällt auf, dass die Messwerte bei manchen Messreihen gut zueinander passen, bei anderen Messreihen aber deutlich voneinander abweichen. In Graph 4.5(a) ist die Abweichung der Messwerte zwischen der direkten Strommessung und der Strommessung über einen Widerstand gut zu erkennen, während Messmethoden in Graph 4.5(c) sehr ähnliche Werte liefern. Die Stromzange ist leicht durch äußere Störungen zu beeinflussen. Deshalb wird davon ausgegangen, dass direkte Strommessungen und solche als Spannungsmessung über einen Widerstand die genaueren Werte liefern. Dieser wird im folgenden für die Auswertung betrachtet werden.

Im Graph ?? erkennt man, dass ein Messwert (bei 12 V angelegter Beschleunigungsspannung) nicht zu den anderen passt. Es ist während der Messungen immer mal wieder passiert, dass die Kathode auf einmal für einen kurzen Zeitraum deutlich mehr Elektronen emittiert hat, als sonst. Die Vermutung ist, dass sich zu diesen Zeitpunkten doch noch ein Cäsiumatom an die Oberfläche der Kathode begeben hat und so die Emission kurzzeitig erhöht hat, das Cäsium dann aber wieder relativ schnell von der Kathodenoberfläche abgedampft wurde und die Emission wieder auf das normale Niveau zurückgefallen ist.

4.1.3 Vergleich der Kathoden

Um zu entscheiden mit welcher der beiden Kathode die späteren Messungen der Quanteneffizienz (siehe Abs. 5) durchgeführt werden, wird der Gitterstrom der beiden Kathoden miteinander verglichen. In Abbildung 4.6 sind die Gitterströme für jeweils zwei Messreihen von beiden Kathoden gegen die anliegende Gitter-Beschleunigungsspannung aufgetragen. Es lässt sich sofort erkennen, dass die erste Kathode deutlich mehr Elektronen emittiert als die zweite Kathode. Daraus lässt sich schließen, dass die erste Kathode in einem besseren Zustand als die zweite Kathode ist und deshalb für Quanteneffizienzmessungen verwendet werden wird.

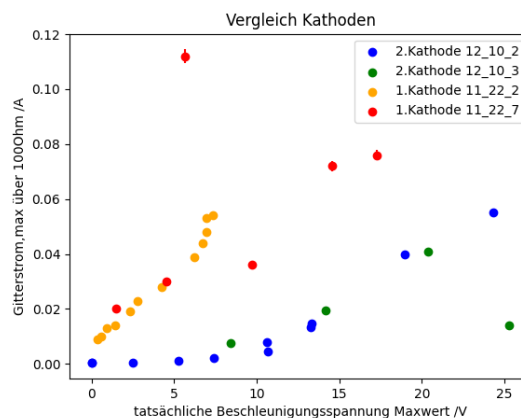


Abbildung 4.6: Vergleich der Gitterströme der Kathoden

4.1.4 Betriebspunkt

Zum Aktivierungszyklus gehört auch ein Ausloten des Betriebspunktes für den thermischen Betriebsmodus. Dabei wird bei konstantem Gitterstrom die Heizleistung so weit heruntergefahren, bis ein

signifikanter Einbruch des Gitterstromes zu erkennen ist. Ab dieser (kritischen) Heizleistung reicht die mittlere thermische Energie nicht mehr aus, um Elektronen aus der Kathode herauszulösen. Bei einer Heizleistung knapp über der (kritischen) Heizleistung ist der thermische Betriebspunkt der Kathode. Für den hybriden Betrieb befindet sich der Betriebspunkt unterhalb der (kritischen) Heizleistung. Dazu wird die Arbeitspunktkurve auch zu kleineren Heizleistungen/Temperaturen aufgenommen.

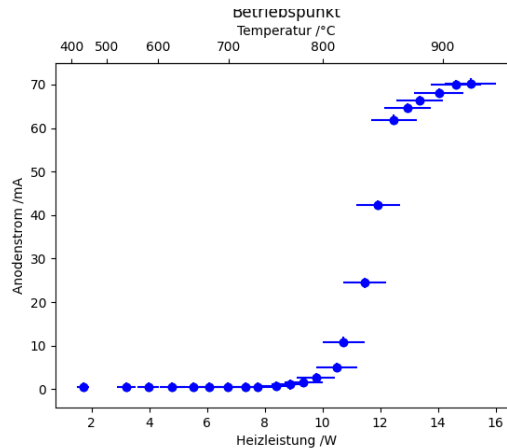


Abbildung 4.7: Messung des Arbeitspunktes [B.1.3](#)

In dieser Messung wurde der Strom gemessen, welcher von der Anode abfließt. Diese wurde dafür auf 40 V positivem Potential zum Erdpotential gehalten. Da der Strom über einen Widerstand gemessen wird, welcher eine Gegenspannung aufbaut, musste das Potential nachgeregelt werden. Um das Anodenpotential zu überprüfen wurde ein DMM direkt zwischen Anode und Erdpotential zu Spannungsmessung angeschlossen. Der Innenwiderstand des DMM beträgt 1 MΩ, und ist damit im Vergleich zum Messwiderstand von $R_{mess} = 100 \text{ k}\Omega$ nicht mehr vernachlässigbar. Die Werte sind entsprechend korrigiert. Die Kathode wurde auf 1 V negatives Potential zum Erdpotential gesetzt. Der Schaltplan ist im Anhang in [Abb.:A.3](#) zu finden.

In der Auftragung der Messergebnisse für den Arbeitspunkt (siehe [Abb. 4.7](#)) ist zu entnehmen, dass der erwartete Abfall des Emissionsstromes zwischen 10 bis 12 W Heizleistung / 800 bis 875 °C stattfindet. Der Betriebspunkt für den thermischen Betrieb liegt darüber, der für den hybriden Betrieb darunter.

4.2 Raumladung

Wenn die Elektronen die Kathode verlassen und zum Gitter oder zur Anode beschleunigt werden, schirmen sie das Potential des Gitters / der Anode gegenüber der Kathode ab. Elektronen die die Kathode später verlassen sehen ein geringeres Potential und werden weniger stark beschleunigt. Diese Effekt den, zu einem früheren Zeitpunkt ausgelöste, Elektronen auf Elektronen haben die zu einem späteren Zeitpunkt ausgelöst wurden nennt man Raumladungseffekt (*space charge*-Effekt). Der Raumladungseffekt ist Abhängig von der angelegten Beschleunigungsspannung [[3](#)][[16](#)]. Der an der Anode ankommende Strom folgt dann dem Raumladungsgesetz:

$$I_{Anode} = K \cdot U_{Kathode,Anode}^{3/2} \quad (4.1)$$

wobei K die Perveanz ist [17]. Die Perveanz ist eine konstante des Versuchsaufbaus die nur von seiner Geometrie abhängt.

Um die Raumladung zu messen wurde der Anodenstrom in Abhängigkeit der Anodenspannung gemessen. Der elektrische Aufbau entspricht dem gleichen wie für die Betriebspunktmessung (siehe Abb. A.3) nur dass der Messwiderstand für die Spannungsmessung ein $1\text{ M}\Omega$ Widerstand ist. Die Messwerte sind entsprechend dem Einfluss des Widerstandes korrigiert.

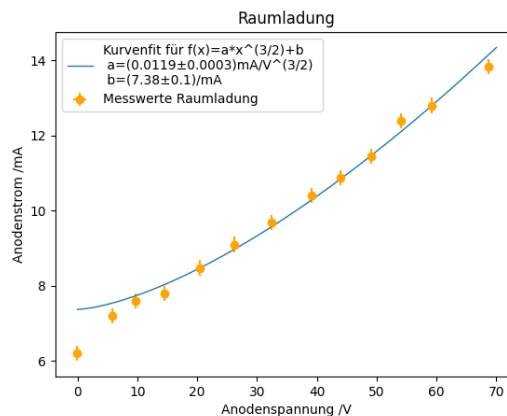


Abbildung 4.8: Raumladungseffekt

Aus Abbildung 4.8 lässt sich die Perveanz zu $K = (11,9 \pm 0,3) \mu\text{AV}^{-2/3}$ bestimmen. Für den Fit sind die ersten beiden Messwerte ausgenommen, diese folgen nicht dem erwarteten Verlauf was zu der Vermutung führt, dass es für kleine Beschleunigungsspannungen andere Effekte gibt, die das Verhalten des Anodenstromes dominieren. Für große Anodenspannungen folgt der Anodenstrom dem Raumladungsgesetz gut.

4.3 Photoeffekt

Da die erwarteten Ströme der Messung der Quanteneffizienz sehr gering sind (siehe Abs. 2.1), wird vorher gemessen, ob sich aus der Kathode überhaupt über den Photoeffekt Elektronen herauslösen lassen. Dafür wird ein *floating Anoden*-Versuch aufgebaut.[18]

In diesem Versuch sind Kathode und Anode nicht miteinander oder einem anderen Bezugspotential (z.B. Erdpotential) verbunden sondern „in der Luft hängend (floating)“. Werden nun Elektronen aus der Kathode ausgelöst (thermisch oder mit den Lasern), können diese zu der Anode wandern. Dadurch wird die Anode im Bezug zu Kathode negativer bzw. die Kathode im Bezug zur Anode positiver und es baut sich ein Feld zwischen den beiden auf. Dieses Feld beschleunigt die Elektronen zurück in Richtung Kathode. Wollen jetzt also weitere Elektronen von der Kathode zur Anode, müssen sie so viel Energie an der Kathode bekommen (thermisch oder durch die Laser), dass sie die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode überwinden können. Misst man nun die Spannung zwischen Kathode und Anode erhält man die Energie der Elektronen abzüglich der Austrittsarbeit aus der Kathode. Für Laser mit verschiedenen Energien erwartet man nun verschiedene Spannungen, da höhere Laserenergien höherenergetische Elektronen erzeugen die dann auch bei einem stärkeren Gegenfeld hin zur Anode

wandern können.

$$U_{\text{Kath,An}} \cdot q = E_{\text{Elektron}} - W_{\text{Austritt}} \quad (4.2)$$

$$E_{\text{Elektron}} = E_{\text{thermisch}} + E_{\text{Laser}} \quad (4.3)$$

wobei $q = e$ die (elementar) Ladung der Elektronen, $U_{\text{Kath,An}}$ die Spannung zwischen Kathode und Anode, W_{Austritt} die Austrittsarbeit aus der Kathode, $E_{\text{thermisch}}$ die Energie welche die Elektronen thermisch durch die Heizung der Kathode und E_{Laser} die Laserenergie ist.

Eine Abschätzung der thermischen Energie kann über die Temperatur der Kathode gemacht werden. Die thermische Energie der Elektronen folgt dabei der Maxwell-Boltzmann-Verteilung (siehe Abs. 2.3) und es lässt sich die Maximalenergie einzelner Elektronen berechnen. In Abb. 4.9 sind die verschiedenen Temperaturen für die hier verwendeten Heizleistungen aufgetragen. Daraus folgen die Maximalenergien in Tabelle 4.1. Als Maximalenergie wird hier die Energie bezeichnet die größer ist als die Energie die 99,9 % der Elektronen haben.

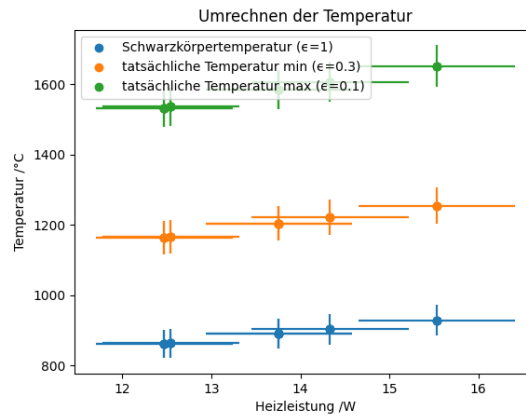


Abbildung 4.9: Vergleich der verschiedenen relevanten Temperaturen

Heizleistung / W	thermische Energie / eV	
	$\epsilon = 0.1$	$\epsilon = 0.3$
$14,3 \pm 0,9$	$1,32 \pm 0,04$	$1,05 \pm 0,04$
$15,5 \pm 0,9$	$1,35 \pm 0,04$	$1,07 \pm 0,04$
$12,5 \pm 0,8$	$1,27 \pm 0,04$	$1,01 \pm 0,03$
$12,5 \pm 0,8$	$1,26 \pm 0,04$	$1,01 \pm 0,03$
$13,8 \pm 0,8$	$1,30 \pm 0,04$	$1,03 \pm 0,03$

Tabelle 4.1: Thermische Energie der Elektronen bei verschiedenen Heizleistungen

Die Spannung zwischen Anode und Kathode wird mit Hilfe eines Kondensators gemessen. Dazu wird die eine Seite der Heizspannung der Kathode sowie die Anode an einen Kondensator angeschlossen. Die Kathode wird mit verschiedenen Heizleistungen betrieben und mit verschiedenen Lasern beschossen (Schaltplan siehe Abb. A.4). Da dieser Versuchsteil nur als *proof of concept* dafür gilt, dass aus der Kathode überhaupt Elektronen mittels Photoemission ausgelöst werden können, wurden nur der

532 nm $\hat{=}$ 2,3 eV Laser und der 405 nm $\hat{=}$ 3,1 eV Laser verwendet. Alle Ergebnisse sind im Anhang in Abschnitt B.2 einsehbar.

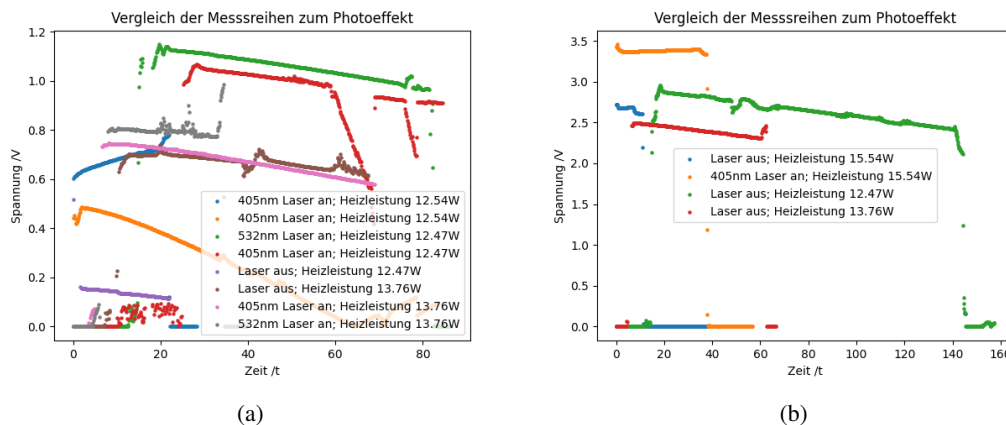


Abbildung 4.10: Vergleich der Messreihen des Photoeffekt

In Abb. 4.10 sind die Messwerte zum Vergleich zusammen aufgetragen. Im rechten Graphen fällt auf, dass die gemessenen Spannungen zu groß sind. Hier werden im thermischen Betrieb Spannungen von $> 2,5$ V gemessen. Entsprechend Tab. 4.1 sollten die Maximalwerte jedoch kleiner als 1,4 V sein. Die 1,4 V entsprechen der (maximalen) errechneten thermischen Energie der Elektronen, davon müsste dann noch die Austrittsarbeit aus der Kathode abgezogen werden. In diesen Messreihen muss also ein Fehler aufgetreten sein, der den Kondensator aufgeladen hat. Dies könnte ein Dunkelstrom sein, der beim ein- oder ausstrecken des Voltmeters an den Kondensator geflossen ist und diesen geladen hat.

Die Messwerte im linken Graphen passen zu den erwarteten Messwerten. Die gemessenen Energien sind von der Größenordnung im erwarteten Bereich. Sie sind kleiner als die thermische Energie bzw. die Laserenergien, was erwartet wurde, da die Austrittsarbeit von diesen Energien aufgebracht werden muss. Es ist auch zu erkennen, dass bei den Messreihen mit angeschalteten Lasern eine größere Energie gemessen wurde, als bei ausgeschalteten Lasern (siehe grüne und rote Messreihe). Jedoch ist der Abstand der Messwerte mit Laser kleiner als erwartet. Die Erwartung ist, dass im Fall eines eingeschalteten Lasers die Spannung mindestens um die Energiedifferenz zwischen Laser und thermischer Energie steigt. Für den 532 nm-Laser sollte die Spannungsdifferenz zwischen rein thermischen Betrieb und eingeschaltetem Laser ≈ 1 V, für den 405 nm Laser sollte sie ≈ 2 V betragen. Tatsächlich ist sie für beide Laser geringer als 0,5 V. Dies könnte zum einen wider auf Fehler in der Messung und geflossene Dunkelströme hindeuten, andererseits könnte es auch daran liegen, dass dem Kondensator nicht genügend Zeit gegeben wurde um sich aufzuladen. Da der Photostrom so klein ist, kann es sein, dass sich noch keine Spannung auf dem Kondensator proportional zur Laserenergie aufbauen konnte, weil noch nicht genug Elektronen durch die Laser aus der Kathode ausgelöst worden sind.

Die Messung des Photoeffekt war nicht erfolgreich. Die Messergebnisse entsprechen nicht den Erwartungen und es gibt zu viele Unsicherheiten um klar sagen zu können, dass hier Elektronen aus der Kathode mittels Photoeffekt ausgelöst worden sind. Eine verbesserte Elektronik bei der das Fließen von Dunkelströmen weiter minimiert wird, dem Kondensator mehr Zeit geben in der er sich aufladen kann und stärkere Laser die mehr Elektronen auslösen und die Spannung sich dadurch schneller aufbauen

lassen könnten die Messergebnisse verbessern.

Quanteneffizienzmessung

5.1 Gegenfeld

In diesem Versuchsteil soll der Kathodenstrom bei einem zwischen Kathode und Gitter anliegendem Gegenfeld gemessen werden. Durch das Gegenfeld soll der Dunkelstrom so weit verringert werden, dass der Kathodenstrom mit einem Präzisionsvoltmeter über einen $100\text{ M}\Omega$ -Widerstand gemessen werden kann (Schaltplan siehe Abb. A.5). Der Laser wird für die Messung über den triggerbaren Shutter mit einer Frequenz von $0,1\text{ Hz}$ gepulst. Alle Messergebnisse sind im Anhang (Abs. B.3) zu finden. Diese Messreihe konnte nur mit dem 405 nm -Laser durchgeführt werden, bei den anderen Lasern war die Änderung des Kathodenstroms nicht sichtbar. Des weiteren konnte die Beobachtung gemacht werden, dass eine kleine Justage des Lasers eine große Änderungen an der Stromdifferenz zwischen an und ausgeschaltetem Laser bewirkte. Dies lässt ein weiteres mal darauf schließen, dass die Kathode sehr inhomogen ist. Entsprechend sind hier ausgerechnete Quanteneffizienzen nicht als absolute Werte zu sehen, sondern eher als eine untere Abschätzung.

Während des Gegenfeldmessung konnte beobachtet werden, dass der Strom bei eingeschaltetem Laser kleiner (bzw. negativer) als bei ausgeschaltetem Laser ist. Dies lässt vermuten, dass der Laser hier keine Elektronen aus der Kathode auslöst, sondern aus dem Gitter. Bei sehr großen Gegenfeldern ist der Stromfluss negativ. Dann scheinen sich auch thermisch Elektronen vom Gitter lösen und hin zu Kathode beschleunigt werden können.

In Abbildung 5.1 sind Beispielhaft zwei Messreihen abgebildet. Bei der zweiten abgebildeten Messreihe lässt sich ein Drift des Stromflusses erkennen. Die Heizleistung wurde vor dieser Messreihe verändert, der Drift ist also darauf zurückzuführen, dass die Kathode noch nicht ganz im thermischen Gleichgewicht ist. Je näher sie an dieses herankommt, desto weniger driften die Messwerte. In der ersten abgebildeten Messung ist die Kathode schon eine ganze Zeit vorher auf der gleichen Heizleistung, weshalb kein Drift zu erkennen ist. Für zukünftige Messungen sollten die veränderbaren Parameter daher länger anliegen, bevor die Messung gestartet wird. Dadurch kann verhindert werden, dass ein Drift die Messreihe verfälscht.

Aus den Aufgetragenen Messreihen lässt sich nun der Differenzstrom zwischen an- und ausgeschaltetem Laser abschätzen. Dies wird hier einmal für den Beginn der Messreihe und einmal für das Ende der Messreihe gemacht. Die Werte sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Aus den Differenzströmen lässt sich nun eine untere Grenze der Quanteneffizienz berechnen (siehe Abs.: 2.1).

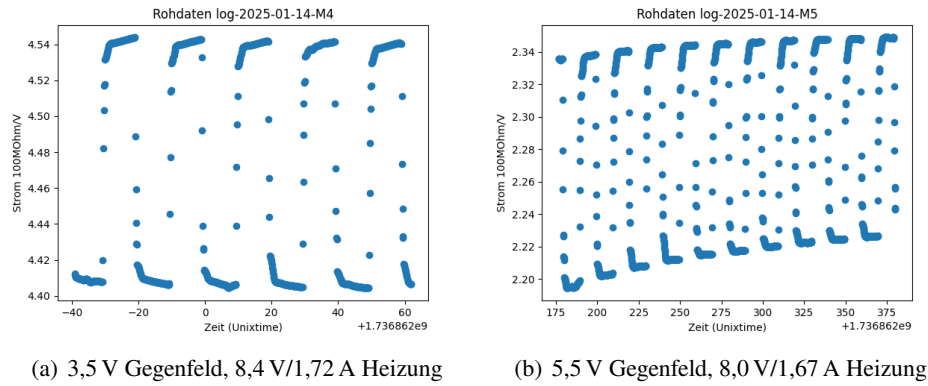


Abbildung 5.1: Gegenfeldmethode

Heizleistung /W	Gegenfeld /V	Kathodenstromdifferenz / 10^{-8} A	
		Messanfang	Messende
$14,60 \pm 0,86$	$5,5 \pm 0,1$	$0,14 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$
$14,60 \pm 0,86$	$9,5 \pm 0,1$	$0,45 \pm 0,07$	$0,45 \pm 0,07$
$14,60 \pm 0,86$	$3,5 \pm 0,1$	$0,13 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$
$13,52 \pm 0,82$	$5,5 \pm 0,1$	$0,14 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$
$13,03 \pm 0,80$	$5,5 \pm 0,1$	$0,13 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$
$12,32 \pm 0,77$	$5,5 \pm 0,1$	$0,13 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$
$14,60 \pm 0,86$	$5,5 \pm 0,1$	$0,12 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$

Tabelle 5.1: Differenz des Kathodenstrom; Messung über 100 M Ω

Heizleistung /W	Gegenfeld /V	Quanteneffizienz / 10^{-8}	
		Messanfang	Messende
$14,60 \pm 0,86$	$5,5 \pm 0,1$	$64,59 \pm 6,53$	$64,59 \pm 6,53$
$14,60 \pm 0,86$	$9,5 \pm 0,1$	$207,63 \pm 32,63$	$207,63 \pm 32,63$
$14,60 \pm 0,86$	$3,5 \pm 0,1$	$59,98 \pm 6,53$	$59,98 \pm 6,53$
$13,52 \pm 0,82$	$5,5 \pm 0,1$	$64,59 \pm 6,53$	$55,37 \pm 6,53$
$13,03 \pm 0,80$	$5,5 \pm 0,1$	$59,98 \pm 6,53$	$59,98 \pm 6,53$
$12,32 \pm 0,77$	$5,5 \pm 0,1$	$59,98 \pm 6,53$	$50,75 \pm 6,53$
$14,60 \pm 0,86$	$5,5 \pm 0,1$	$57,67 \pm 6,53$	$64,59 \pm 6,53$

Tabelle 5.2: Quanteneffizienz der Gegenfeldmethode

Die hier errechnete Quanteneffizienz ist deutlich geringer als die nach [10] erwartete Quanteneffizienz. Jedoch ist, wie oben beschrieben, die Richtung der Stromänderung bei einschalten des Lasers „falsch herum“ wonach dies die Quanteneffizienz ist, um aus dem Gitter Elektronen herauszulösen. In dem Fall würde eine deutlich kleinere Quanteneffizienz Sinn machen. In Abbildung 5.2 ist die Abhängigkeit Quanteneffizienz von der Heizleistung und von der Gegenspannung aufgetragen. Hierfür werden die hinteren (späteren) Messwerte der Messreihe verwendet, da sich die Kathode hier dem thermischen Gleichgewicht mehr angenähert hat als am Anfang der Messreihe und die Ergebnisse damit besser zu den eingestellten Parametern passen sollten.

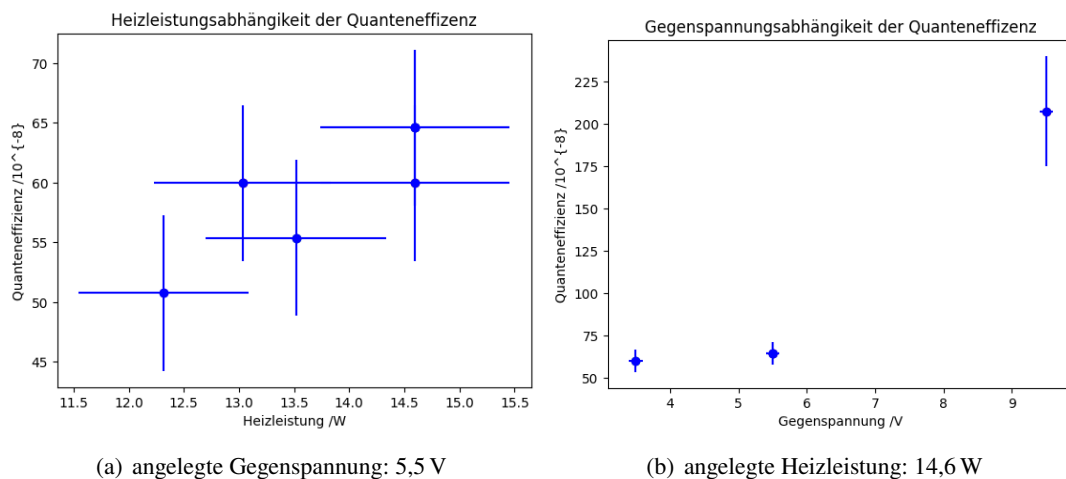


Abbildung 5.2: Einfluss von Heizleistung und Gegenspannung auf die Quanteneffizienz

Es lässt sich erkennen, dass die Quanteneffizienz sowohl mit ansteigender Heizleistung als auch mit ansteigender Gegenspannung ebenfalls ansteigt.

5.2 Quanteneffizienz-Messung

Für diese Messung konnte ein Präzisionsampermeter besorgt werden, welches die Messung erst ermöglicht. Das Ampermeter kann bei einem Gesamtstrom von wenigen μA den Stromfluss auf nA genau angeben. Diese Tatsache ermöglicht diese Messreihen. Der Aufbau gleicht dem der Gegenfeldmessung (siehe Abs.: 5.1, Schaltplan in Abb. A.5), nur dass der Messwiderstand und die angeschlossene Messtechnik durch das Ampermeter ersetzt wurden. Die zwischen Gitter und Kathode angelegte Spannung ist jetzt so gepolt, dass die Elektronen von der Kathode zum Gitter beschleunigt werden. Alle Messergebnisse sind im Anhang in Abs. B.4 zu finden. In Abbildung 5.3 ist beispielhaft die erste Messreihe abgebildet. Der Drift ist in dieser Messung noch deutlich ausgeprägter als in der Gegenfeldmessung. Um hier den Drift zu beseitigen müsste die Kathode für einen noch größeren Zeitraum vor der eigentlichen Messung mit den Messparametern betrieben werden.

In diesen Messreihen sind die größeren Stromwerte bei eingeschaltetem Laser erreicht. Die Kathode verhält sich also wie erwartet. Hier werden durch den Laser zusätzliche Elektronen aus der Kathode ausgelöst und zum Gitter beschleunigt. Es kann die Quanteneffizienz der Kathode untersucht werden. Die Auswertung erfolgt analog zur Auswertung für die Gegenspannung. Aus der Auftragung der

Messergebnisse wird der Differenzstrom zwischen an- und ausgeschaltetem Laser bestimmt und daraus dann die Quanteneffizienz.

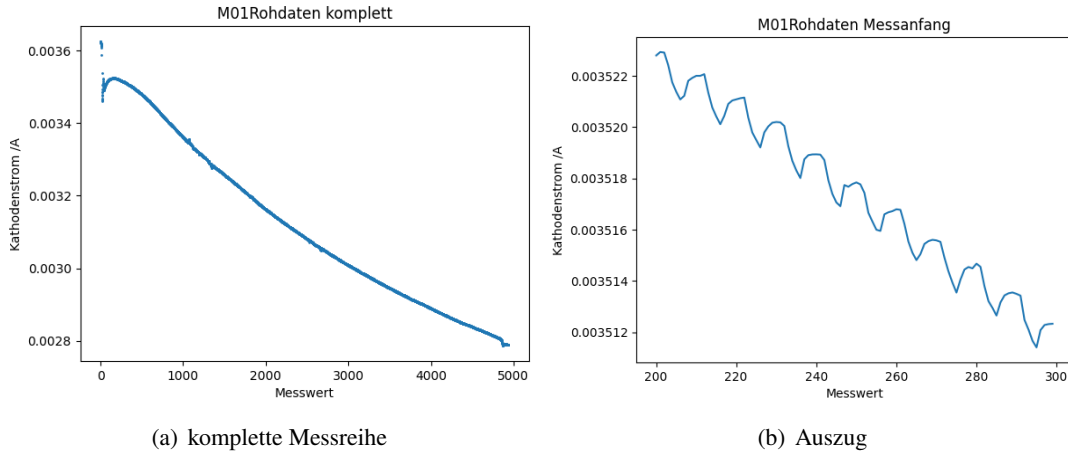


Abbildung 5.3: Quanteneffizienzmessung Messreihe M01; Heizung 7,6 V/1,61 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V

Heizleistung /W	Beschleunigungsspannung /V	Kathodenstromdifferenz /nA	
		Messanfang	Messende
12,40 ± 0,78	0,3 ± 0,1	15,00 ± 7,07	15,00 ± 7,07
11,94 ± 0,76	0,3 ± 0,1	8,00 ± 4,24	10,00 ± 4,24
12,01 ± 0,76	0,3 ± 0,1	15,00 ± 4,24	10,00 ± 4,24
10,96 ± 0,72	0,3 ± 0,1	1,70 ± 7,07	1,00 ± 7,07
10,96 ± 0,72	1,1 ± 0,1	1,00 ± 7,07	20,00 ± 7,07
12,17 ± 0,77	0,7 ± 0,1	15,00 ± 2,83	1,50 ± 2,83
12,17 ± 0,77	0,5 ± 0,1	5,00 ± 7,07	10,00 ± 7,07
12,72 ± 0,79	0,3 ± 0,1	5,00 ± 7,07	9,00 ± 7,07
12,72 ± 0,79	0,5 ± 0,1	14,00 ± 7,07	18,00 ± 7,07
12,72 ± 0,79	0,8 ± 0,1	34,00 ± 4,24	30,00 ± 4,24
13,52 ± 0,82	0,3 ± 0,1	10,00 ± 7,07	5,00 ± 7,07
13,52 ± 0,82	0,5 ± 0,1	20,00 ± 4,24	25,00 ± 4,24
14,51 ± 0,86	0,3 ± 0,1	25,00 ± 2,83	2,00 ± 2,83
14,51 ± 0,86	0,5 ± 0,1	45,00 ± 7,07	40,00 ± 7,07

Tabelle 5.3: Differenz des Kathodenstrom; direkte Strommessung; mit Beschleunigungsfeld

Die Quanteneffizienz der Kathode ist deutlich größer als die des Gitters. Sie ist zwar immer noch unter der aus [10] erwarteten Quanteneffizienz, jedoch schon in einer ähnlichen Größenordnung.

Beim betrachten von Abb. 5.4 fällt auf, dass die Quanteneffizienz eine Abhängigkeit von der anliegenden Beschleunigungsspannung hat. Je größer die Beschleunigungsspannung, desto größer die Quanteneffizienz, oder zumindest der Differenzstrom. Eine Abhängigkeit von der Heizleistung ist nicht erkennbar. Die Quanteneffizienzen haben einen großen Fehler, da die Aufnahme der Messwerte und der Messparameter auch große Fehler haben. Diese Messung gibt aber einen grobe Richtung vor, wo die

Heizleistung /W	Beschleunigungsspannung /V	Quanteneffizienz / 10^{-6}	
		Messanfang	Messende
$12,40 \pm 0,78$	$0,3 \pm 0,1$	$6,92 \pm 3,26$	$6,92 \pm 3,26$
$11,94 \pm 0,76$	$0,3 \pm 0,1$	$3,69 \pm 1,96$	$4,61 \pm 1,96$
$12,01 \pm 0,76$	$0,3 \pm 0,1$	$6,92 \pm 1,96$	$4,61 \pm 1,96$
$10,96 \pm 0,72$	$0,3 \pm 0,1$	$0,78 \pm 3,26$	$0,46 \pm 3,26$
$10,96 \pm 0,72$	$1,1 \pm 0,1$	$0,46 \pm 3,26$	$9,23 \pm 3,26$
$12,17 \pm 0,77$	$0,7 \pm 0,1$	$6,92 \pm 1,31$	$0,69 \pm 1,31$
$12,17 \pm 0,77$	$0,5 \pm 0,1$	$2,31 \pm 3,26$	$4,61 \pm 3,26$
$12,72 \pm 0,79$	$0,3 \pm 0,1$	$2,31 \pm 3,26$	$4,15 \pm 3,26$
$12,72 \pm 0,79$	$0,5 \pm 0,1$	$6,46 \pm 3,26$	$8,31 \pm 3,26$
$12,72 \pm 0,79$	$0,8 \pm 0,1$	$15,69 \pm 1,96$	$13,84 \pm 1,96$
$13,52 \pm 0,82$	$0,3 \pm 0,1$	$4,61 \pm 3,26$	$2,31 \pm 3,26$
$13,52 \pm 0,82$	$0,5 \pm 0,1$	$9,23 \pm 1,96$	$11,53 \pm 1,96$
$14,51 \pm 0,86$	$0,3 \pm 0,1$	$11,53 \pm 1,31$	$0,92 \pm 1,31$
$14,51 \pm 0,86$	$0,5 \pm 0,1$	$20,76 \pm 3,26$	$18,46 \pm 3,26$

Tabelle 5.4: Quanteneffizienz

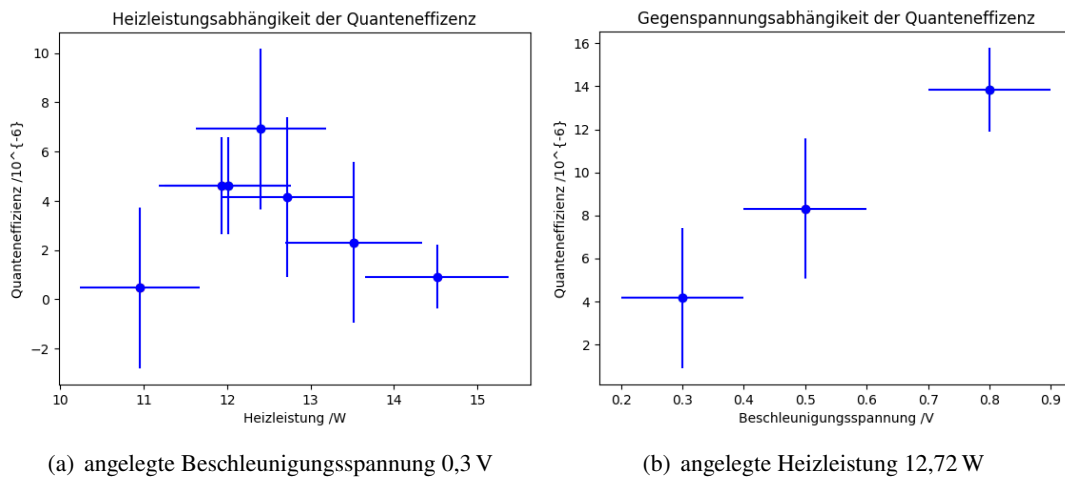


Abbildung 5.4: Abhängigkeit der Quanteneffizienz von der Heizleistung und der Beschleunigungsspannung

Quanteneffizienz liegt und wie sie sich verhält.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Quanteneffizienzmessung konnte nicht in der geplanten Ausführlichkeit durchgeführt werden. Dafür waren die verschiedenen Laser zu schwach und die präzisen Messgeräte nicht lang genug verfügbar. Jedoch konnte über den Verlauf dieser Arbeit der Teststand immer weiter verfeinert und die Handhabung und das Verhalten der Kathode untersucht werden, sodass weitere Messungen möglich sind. Die grundlegende Möglichkeit, dass die verwendete Kathode in einem hybriden *thermally assisted photo emission*-Modus betrieben werden kann, konnte gezeigt werden. Auch konnte eine untere Grenze der Quanteneffizienz im Bereich von $\approx 10^{-6}$ bestimmt werden.

Um diese weiteren Messungen zu verfeinern gibt es mehrere Punkte die man an dem Teststand verbessern kann.

Zu erst sollten die Messungen mit einer neuen Kathode wiederholt werden. Die verwendeten Kathoden waren bei thermischer Emission instabil und haben bei gleichen Bedingungen stark unterschiedlich viele Elektronen emittiert. Auch ist die Oberfläche der Kathode nicht mehr homogen, was bereits mit bloßem Auge sichtbar ist. Eine neue Kathode mit normalem Emissionsverhalten und homogener Oberfläche könnte die Messungen verbessern und deren Reproduzierbarkeit deutlich erhöhen.

Um eine präzisere Quanteneffizienzmessung auch mit anderen Wellenlängen zu ermöglichen, sollte der Teststand in einem Laserlabor mit deutlich stärkeren Lasern betrieben werden. Auch wenn die aktuell verwendete Messelektronik auch kleine Photoemissionsströme messen kann, können stärkere Laser dafür sorgen, dass man zum einen auch bei anderen Wellenlängen eine Messung durchführen kann und dass die benötigte Messelektronik vereinfacht werden kann. Der einzig aufgrund seiner Leistung verwendbare 405 nm-Laser hatte zudem ein unförmiges, stark divergierendes Strahlbild. Dieses wurde mit einer Linse fokussiert, da die Auswahl an optischen Elementen jedoch begrenzt war, konnte der Strahl nicht perfekt auf die Kathode ausgerichtet werden. Ein Laser mit besserem Strahlbild, welcher durch eine verbesserte Optik die gesamte Kathode ausleuchtet sollte die Messergebnisse zusätzlich verbessern.

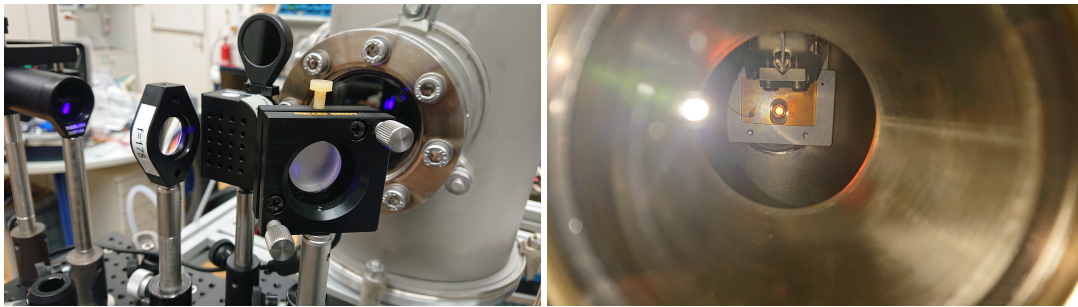
Für den verwendeten Temperatursensor gibt es einen Justagelaser der als Aufsatz auf diesem befestigt werden kann. Dies würde die Justage des Sensors vereinfachen und präzisieren, wodurch genauere und reproduzierbarer Temperaturmessungen möglich wären.

Auch der elektrische Aufbau kann weiter verfeinert werden. Im aktuellen ist die gesamte Messtechnik und Versorgungselektronik für Kathode und Anode über einen Trenntrafo mit Strom versorgt. Dadurch haben alle Messgeräte die Kathode und die Anode das gleiche Massepotenzial und es sollten hier keine Erdströme fließen. Die Stromversorgung für die Vakuumpumpen und die Laser sind dort jedoch auf Grund von Leistungsbeschränkungen des Trenntrafos nicht angeschlossen. Mit einem stärkeren oder

zweiten Trenntrafo könnte man auch diese auf das Erdpotential der Messtechnik bringen und somit Dunkelströme weiter minimieren.

Appendix

Versuchsaufbau



(a) Optischer Aufbau

(b) Blick in Vakuumkammer auf geheizte Kathode

Abbildung A.1: Optischer Aufbau

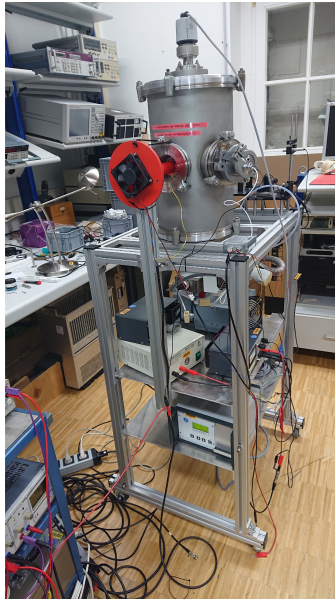


Abbildung A.2: Vakuumkammer

A.1 Schaltpläne

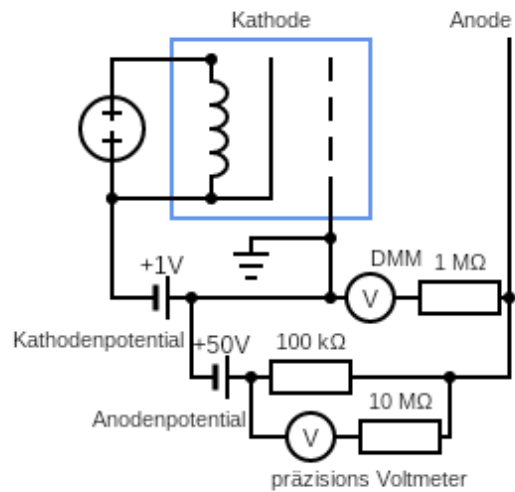


Abbildung A.3: Schaltplan für Arbeitspunktmessung

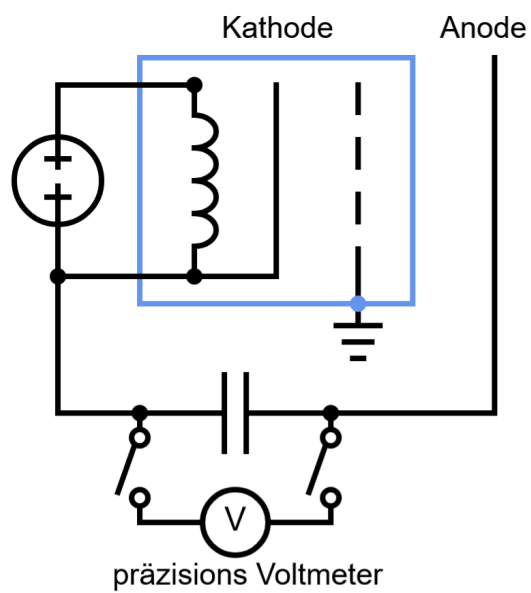


Abbildung A.4: Schaltplan für Floating Anode

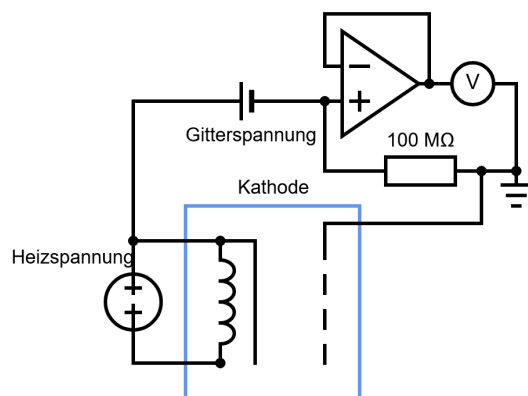


Abbildung A.5: Schaltplan für Gegenfeldmessung

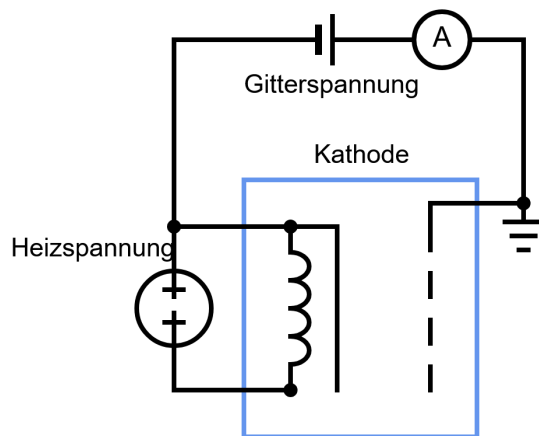


Abbildung A.6: Schaltplan für Quanteneffizienzmessung

A.2 Zeichnungen der Halterungen

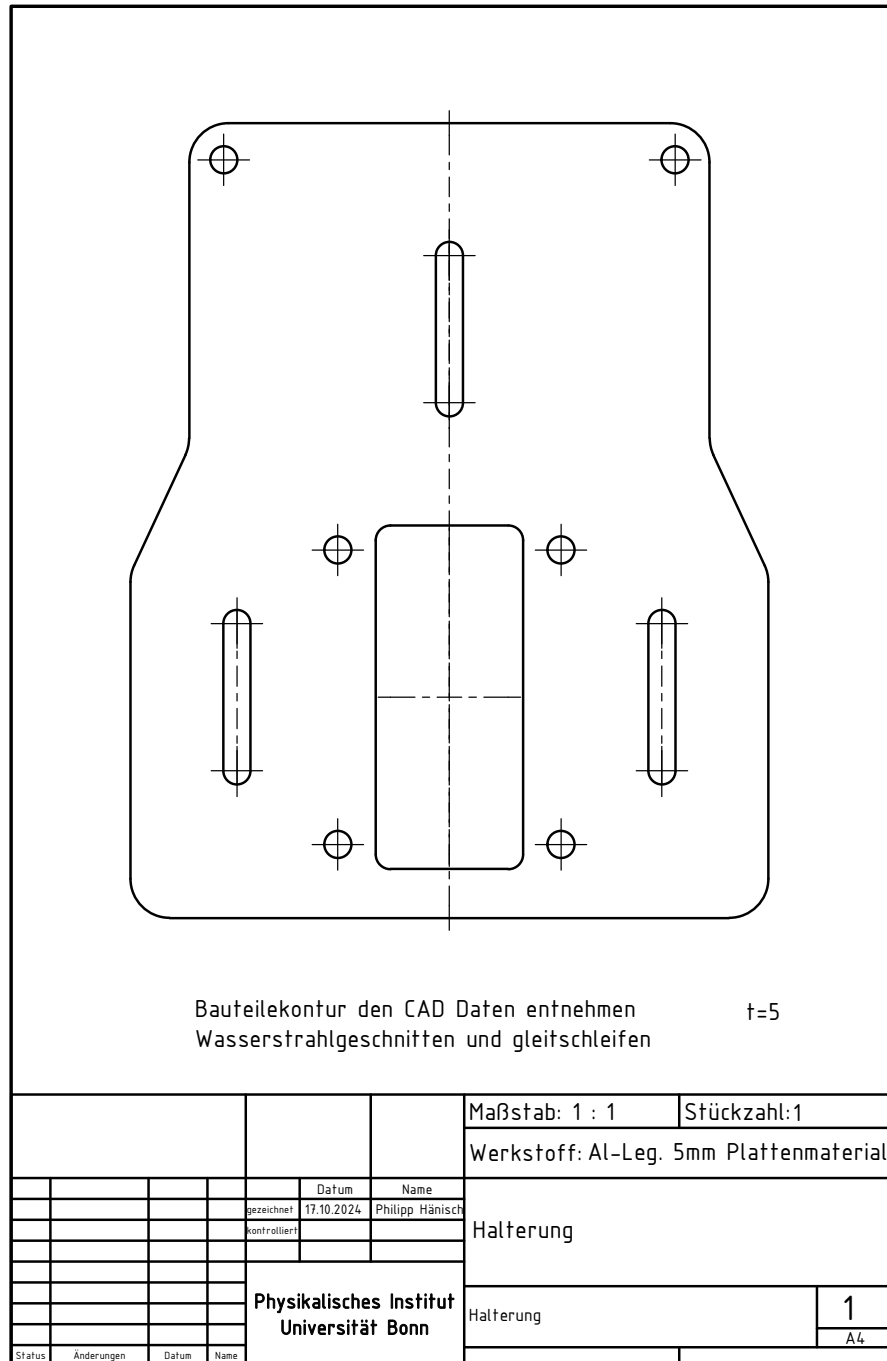


Abbildung A.7: Hauptplatte der Halterung

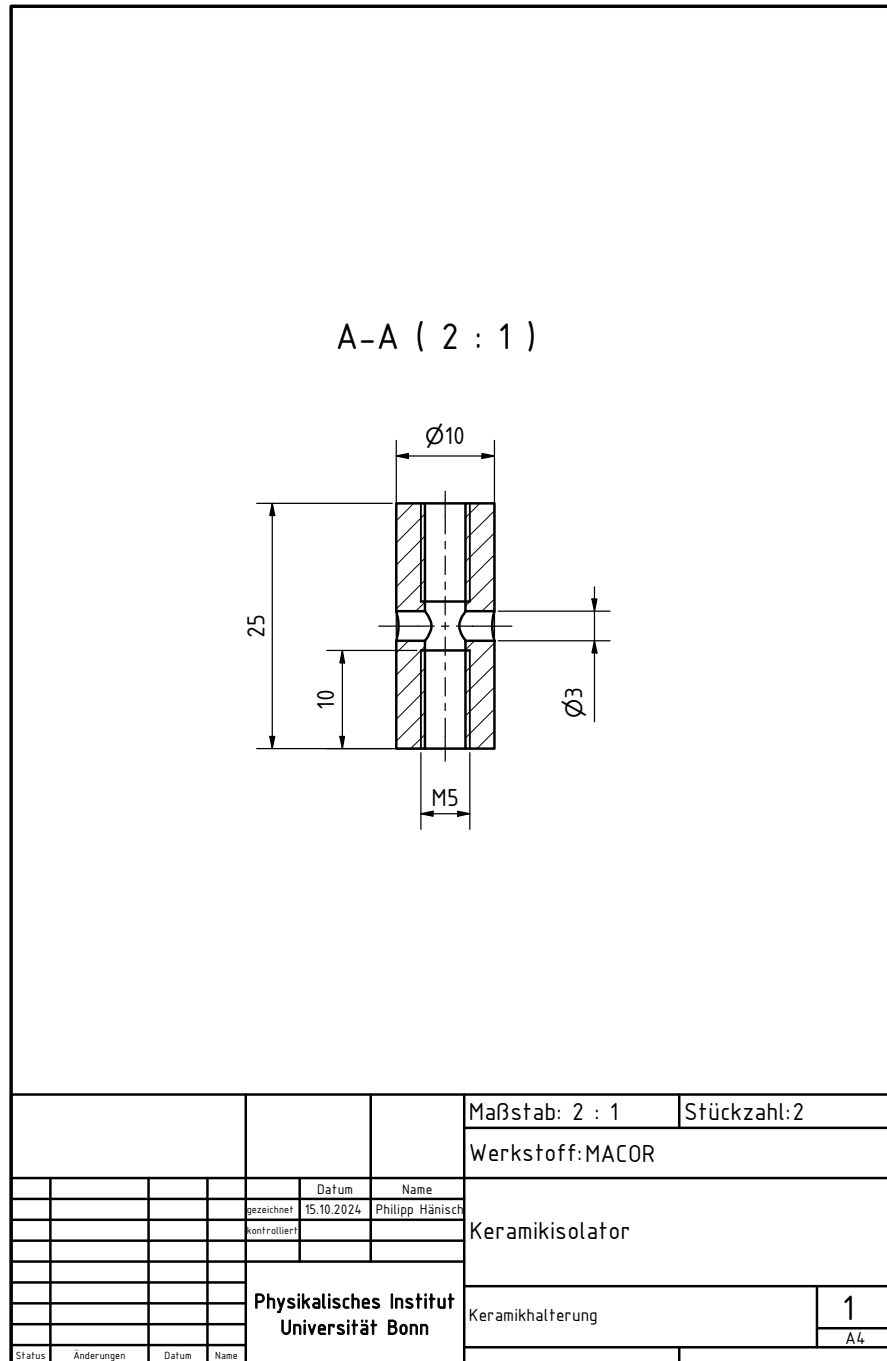
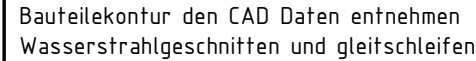


Abbildung A.8: Keramik Isolatoren



39



Abbildung A.10: Halterung Infrarotsensor Platte

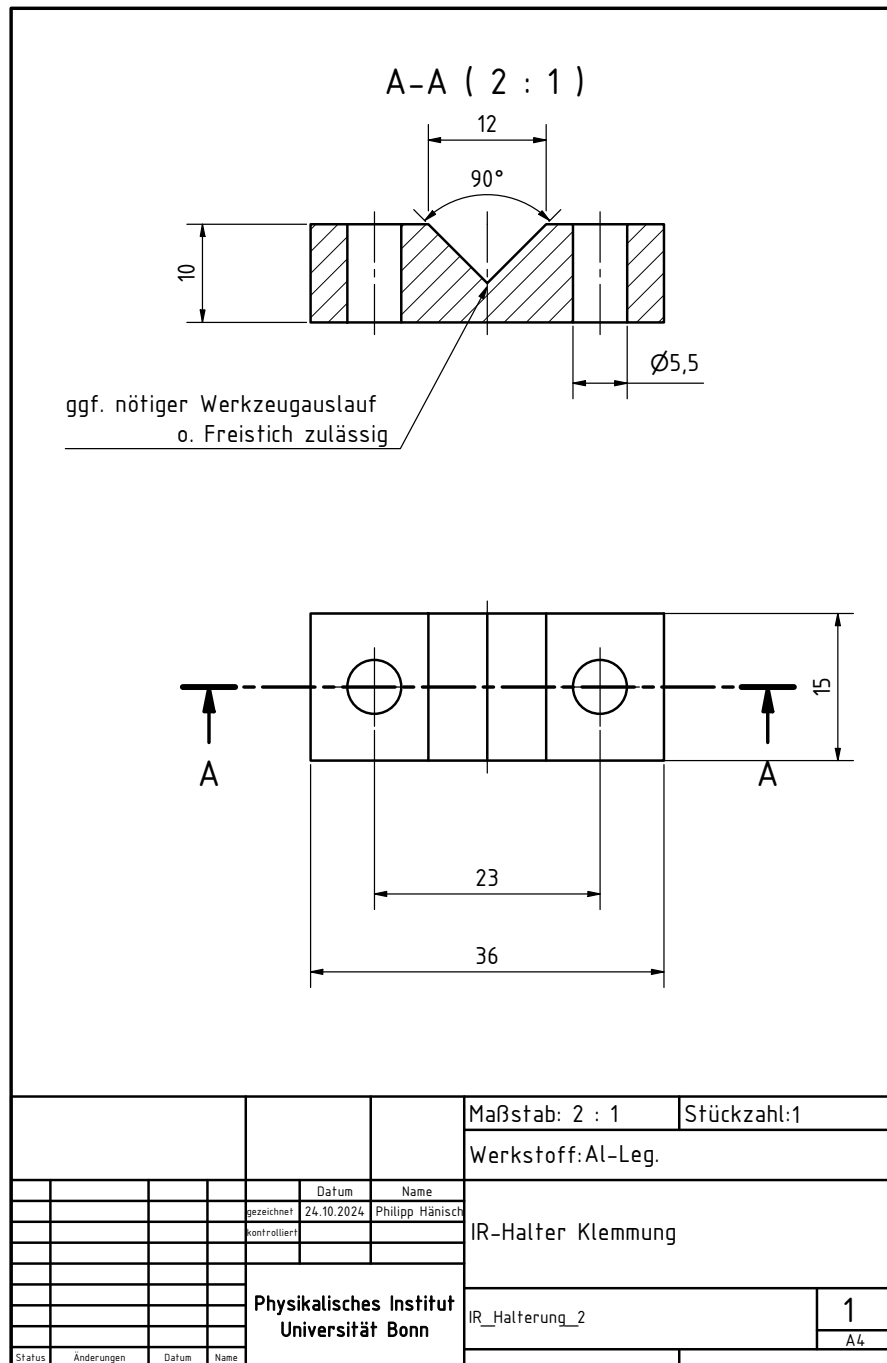


Abbildung A.11: Halterung Infrarotsensor Klemme



Messergebnisse

Im Anhang sind alle Messwerte mit allen gemessenen Stellen angegeben. In der Auswertung werden die Messwerte auf signifikante Stellen gerundet. Für die DMM ist der Fehler der Messwerte bei bis zu zwei Stellen hinter dem Komma ± 1 auf die letzte Stelle, bei drei Stellen hinter dem Komma ± 0.005 . Der Messfehler der Vakuummessung beträgt ± 1 auf die vorletzte Stelle, dies liegt an der Anzeigegenauigkeit der Vakuummessröhre. Für das Oszilloskop ist der Fehler bei Messungen im $\mu\text{A}/\mu\text{V}$ -Bereich bei $\pm 20 \mu\text{A}$ im mA/mV -Bereich bei $\pm 0,2 \text{ mA}$, darüber ± 1 auf die letzte angegebene Stelle.

B.1 Aktivierungszyklen

B.1.1 Ausdampfen und Vakuumqualität

Druck / 10^{-7} mbar	Heizspannung /V	Heizstrom/A
2,01	0,5	0,52
2,09	0,8	0,6
2,01	1	0,7
2,17	2	1,02
2,17	2	0,84
2,35	3	1,08
2,35	3	0,95
2,35	3,8	1,07
2,44	3,8	1,02
2,54	4,9	1,19
2,54	4,9	1,16
2,63	6	1,33
2,63	6	1,31

Tabelle B.1: erster Aktivierungszyklus erster Teil mit Vakuumüberwachung

Druck / 10^{-7} mbar	Heizspannung /V	Heizstrom/A
2,74	7	1,46
2,85	7	1,43
2,85	8	1,58
2,26	9	1,68
2,26	10	1,78
2,35	11	1,87

Tabelle B.2: erster Aktivierungszyklus zweiter Teil mit Vakuumüberwachung

$U_{Gitter,rms}$ /V	$U_{Gitter,max}$ /V	$I_{Gitter,max}$ /mA	$V_{Besch,eff}$ /V
-	0,2	1,4	0,08
0,115	0,36	1,6	0,268
0,311	0,8	2,3	0,784
0,425	1,21	2,7	1,08
0,606	1,6	3,3	1,6
0,766	2	3,9	2,1
1,118	2,9	5,1	3,08
1,399	3,6	6,1	3,88
1,738	4,44	7,2	5,16
2,07	5,2	8,3	6,35
2,313	5,8	9,1	7,37
2,763	6,84	10,4	9,31

Tabelle B.3: erster Aktivierungszyklus dritter Teil: Anlegen einer 50 Hz - Beschleunigungsspannung zwischen Gitter und Kathode, konstante Kathodenheizung mit 8,4 V/1,6 A, Gitterstrom gemessen über Spannung über 470Ω

B.1.2 Verschiedene Messwiderstände

$U_{Gitter,rms}/V$	$U_{Gitter,max}/V$	$I_{Gitter,max}/mA$	$U_{Besch,eff}/V$
0	0,6	2,2	0,05
0,37	1,3	3,8	0,91
0,586	1,9	5,2	1,45
0,878	2,6	6,4	2,21
1,224	3,5	8,4	2,97
1,488	4,2	9,8	3,68
1,973	5,5	11,8	4,73
2,184	6	13,4	5,41
2,59	7,1	15,6	6,41
3,314	8,9	19,6	8,04
3,717	9,9	21,6	9,08

Tabelle B.4: Gitterstrom in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung über $470\ \Omega$ gemessen; $U_{Besch,eff}$ ist angelegte Beschleunigungsspannung; Heizung: 8,4 V/1,6 A

$U_{Gitter,rms}/V$	$U_{Gitter,max}/V$	$I_{Gitter,max}/mA$	$U_{Besch,eff}/V$
1,994	5,4	51,8	9,03
1,923	5,3	50	8,65
0,183	0,9	7	0,89
0,277	1	8	1,12
0,339	1,3	10,8	1,57
0,402	1,4	12,4	1,99
0,61	1,9	17,2	2,97
0,73	2,3	20	3,59
0,948	2,8	26,8	4,97
1,405	3,9	36,8	7,16
1,613	4,4	41	7,87
1,749	4,8	45	8,32

Tabelle B.5: Gitterstrom in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung über $100\ \Omega$ gemessen; $U_{Besch,eff}$ ist angelegte Beschleunigungsspannung; Heizung: 8,4 V/1,6 A

$U_{Gitter,rms}/V$	$U_{Gitter,max}/V$	$I_{Gitter,max}/mA$	$U_{Besch,eff}/V$
0,211	0,9	4,6	0,65
0,311	1,3	6	1,03
0,491	1,7	7,8	1,55
0,633	2	9,8	2,04
0,876	2,6	12,4	2,77
1,054	3,1	14,4	3,3
1,191	3,4	16	3,88
1,424	4	18,8	4,67
1,647	4,6	21,4	5,48
1,908	5,2	24	6,4
2,315	6,3	28,4	7,71
2,555	6,9	31	8,57
2,639	7,1	32,4	9,07

Tabelle B.6: Gitterstrom in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung über $220\ \Omega$ gemessen; $U_{Besch,eff}$ ist angelegte Beschleunigungsspannung; Heizung: 8,4 V/1,6 A

$U_{Gitter,rms}/V$	$U_{Gitter,max}/V$	$I_{Gitter,max}/mA$	$U_{Besch,eff}/V$
1,514	4,2	19,4	5,15
2,81	7,4	34	10,3
5,52	14,8	67,6	15,4

Tabelle B.7: Gitterstrom in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung über $220\ \Omega$ gemessen; $U_{Besch,eff}$ ist angelegte Beschleunigungsspannung; Heizung: 8,4 V/1,6 A

$U_{Gitter,rms}/V$	$U_{Gitter,max}/V$	$I_{Gitter,max}/mA$	$U_{Besch,eff}/V$
2,135	5,8	14,2	5,1
4,435	11,6	26,4	10,8
5,28	13,8	31,2	13,1
5,176	13,5	30,4	13,2
6,178	23,6	50,4	20,2
9,95	25,2	55,6	22,4

Tabelle B.8: Gitterstrom in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung über $470\ \Omega$ gemessen; $U_{Besch,eff}$ ist angelegte Beschleunigungsspannung; Heizung: 8,4 V/1,6 A

$U_{Gitter,rms}/V$	$U_{Gitter,max}/V$	$I_{Gitter,max}/mA$	$U_{Besch,eff}/V$
1,131	3,6	4,4	2,15
3,256	9	8	6,51
4,134	11,2	9,8	8,36
5,025	13,6	11,2	10,2
5,617	15,8	12,8	12
5,957	19,4	15	15
10,24	26,6	20	20,8
12,78	32,8	24	25,7
14,43	37,4	27,6	28,8

Tabelle B.9: Gitterstrom in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung über $1,5\text{ k}\Omega$ gemessen; $U_{Besch,eff}$ ist angelegte Beschleunigungsspannung; Heizung: $8,4\text{ V}/1,6\text{ A}$

$U_{Gitter,rms}/V$	$U_{Gitter,max}/V$	$I_{Gitter,max}/mA$	$U_{Besch,eff}/V$
0,48	2	15	2,44
0,933	3	26,4	5,33
1,999	3,6	32,4	9,4
2,666	7,2	68	15,4
2,766	7,6	70	17,6
4,09	11,2	110	11,9

Tabelle B.10: Gitterstrom in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung über $100\text{ }\Omega$ gemessen; $U_{Besch,eff}$ ist angelegte Beschleunigungsspannung; Heizung: $8,4\text{ V}/1,6\text{ A}$

Netzgerät		DMM		
U_{Heiz}/V	I_{Heiz}/A	U_{Heiz}/V	$U_{Gitter,max}/V$	$I_{Gitter,max}/mA$
8,4	1,6	8,7	10,4	100
8,4	1,6	8,7	4,8	44
8,2	1,58	7,48	4	37
8	1,56	8,3	3,2	31
7,8	1,54	8,11	2,4	23
7,6	1,52	7,89	1,7	16
7,4	1,49	7,7	1,4	11
7,2	1,47	7,48	1	8
7	1,45	7,29	0,9	6
6,8	1,42	7,03	0,9	6
6,6	1,4	6,9	0,8	5
6,4	1,37	6,64	0,8	5
6,2	1,35	6,47	0,8	5

Tabelle B.11: Heizspannung runterrampen bei $12,5\text{ V}$ Beschleunigungsspannung

Anhang B Messergebnisse

U_1 /V	U_2 /V	I_1 /mA	U_3 /V	U_4 /V	U_5 /V	U_6 /V	I_2 /A	T_1 /°C	T_2 /°C	P / 10^{-7} mbar
9,14	9,18	-	0,85	-	0,4	2	0,75	429	-	9
9,14	9,2	2,2	0,82	-	0,4	2,5	0,83	525	-	7,43
9,14	9,19	1,8	0,82	-	0,4	3	0,92	605	-	6,6
9,17	9,22	1,6	0,83	-	0,4	4	1,05	724	-	5,9
9,17	9,22	1,6	0,83	-	0,4	4	1,05	-	631	5,9
9,14	9,19	1,4	0,84	-	0,36	5,5	1,25	-	750	5,9
9,14	9,2	1,2	0,84	-	0,4	6	1,32	-	786	5,5
9,15	9,2	1,2	0,88	-	0,36	6,5	1,37	-	814	5,3
9,17	9,22	1	-	2,6	0,4	7	1,44	-	845	5
9,17	9,22	1	-	2,64	0,4	7,5	1,5	-	874	5
9,16	9,22	0,8	-	2,65	0,32	8	1,55	-	899	5,1
9,15	9,21	1	-	2,67	0,32	8,5	1,61	-	925	5,1
8,94	9	1,2	17,72	12,72	0,4	9,9	1,76	-	990	5,2

Tabelle B.12: Aktivierungszyklus mit Temperaturüberwachung I: $U_1 = U_{Besch,osz,eff}$; $U_2 = U_{Besch,eff,DMM}$; $I_1 = I_{Gitter}$; $U_3 = V_{Gitter,DMM,DC}$; $U_4 = U_{Gitter,DMM,AC}$; $U_5 = U_{Gitter,Oszi}$; $U_6 = U_{Heiz,Netz}$; $I_2 = I_{Heiz,Netz}$; T_1 : Temperatur mit Emissionsgrad $\epsilon = 0.4$; T_2 : Temperatur mit Emissionsgrad $\epsilon = 1$; P = Druck

Zeit /min	Heizung				Temperatur /°C	Vakuum- druck / 10^{-7} mbar	Gitterstrom	
	DMM		Netzgerät				I_{Gitter} /mA	$U_{Gitter,100\Omega}$ /mV
0	0	0	0	0	-	0,935	3,4	0,4
2	3,2	0,95	3	0,94	500	1,22	3,9	0,4
4	3,2	0,9	3	0,9	522	1,22	4	0,4
6	3,2	0,9	3	0,9	525	1,22	4,1	0,4
7	4,7	1,16	4,5	1,16	629	1,32	4,1	0,4
9	4,7	1,1	4,5	1,1	664	1,37	4,1	0,4
10	4,7	1,1	4,5	1,1	665	1,37	4,1	0,4
11	6,28	1,34	6	1,32	735	1,48	4,1	0,4
12	6,28	1,29	6	1,3	774	1,48	4,1	0,4
14	6,28	1,29	6	1,29	777	1,574	4	0,4
16	6,28	1,29	6	1,3	777	1,6	4	0,4
17	7,8	1,46	7,5	1,47	862	1,73	3,9	0,38
19	9,39	1,62	9	1,64	941	1,73	3,7	0,36
21	10,92	1,77	10,5	1,8	1 001	1,87	3,6	0,32
23	13,5	2,41	13,1	2,5	1 162	3,1	3,6	0,1
27	13,5	2,45	13,1	2,55	1 163	2,44	3,6	0,1
35	14,2	2,3	13,8	2,36	1 158	4,51	3,2	0,1

Tabelle B.13: Aktivierungszyklus mit Temperaturüberwachung II

$U_{Gitter,eff,DMM}$ /V	$U_{Gitter,max,oszi}$ /V	$I_{Gitter,max,oszi}$ /A	$U_{Besch,eff,oszi}$ /V	Vakuumdruck /10 ⁻⁷ mbar
0,012	0,4	3,3	1,61	3,58
0,037	1,2	3,5	4,41	3,19
0,057	1,64	4	6,15	3,32
0,059	1,72	4,1	6,18	5,26
0,067	1,96	4,2	7,09	5,46
0,071	2,1	4,2	8,23	5,9
0,04	2,24	3,5	9,95	7,43
0,064	1,76	3,8	17	6,88

Tabelle B.14: Gitterstrom in Abhängigkeit der Gitterspannung bei fester Heizung 10 V/2 A/1 060 °C

B.1.3 Betriebspunkt

Heizung				Anodenstrom über 100 kΩ /V	Gitterstrom		Temperatur °C	Anodenspannung V
Netzgerät /V	/A	DMM /V	/A		mA	mA		
8,4	1,78	8,7	1,74	63,9	-	-	940	40
8,2	1,76	8,5	1,72	63,6	0,336	0,519	932	40,2
8	1,73	8,3	1,69	61,9	-2,02	-1,8	919	40
7,8	1,7	8	1,67	60,3	-4,19	-4,04	907	40
7,6	1,67	7,9	1,64	58,7	-6,08	-5,77	897	40
7,4	1,65	7,7	1,62	56,3	-6,59	-6,36	887	40
7,2	1,62	7,5	1,59	38,4	-7,12	-6,94	875	41
7	1,6	7,3	1,57	22,2	-7,08	-6,9	864	40
6,8	1,57	7,1	1,51	9,9	-7,31	-7,13	851	40
6,6	1,54	6,9	1,52	4,53	-7,65	-7,38	838	39,9
6,4	1,51	6,6	1,48	2,43	-7,7	-7,54	822	40
6,2	1,48	6,4	1,46	1,41	-7,7	-7,5	811	39,9
6	1,45	6,2	1,43	0,943	-7,92	-7,68	797	39,9
5,8	1,43	6	1,4	0,698	-7,7	-7,5	784	40
5,5	1,38	5,7	1,36	0,52	-7,64	-7,43	763	40,1
5,3	1,35	5,5	1,33	0,457	-7,51	-7,31	746	39,9
5	1,3	5,2	1,29	0,421	-7,74	-7,46	721	40
4,7	1,3	4,9	1,24	0,407	-7,92	-7,67	698	40
4,4	1,2	4,6	1,2	0,401	-7,55	-7,45	672	40
4	1,15	4,2	1,14	0,398	-7,7	-7,57	638	40
3,5	1,08	3,7	1,07	0,397	-6,68	-6,47	590	40
3	1	3,2	1	0,396	-6,27	-6,14	535	40
2	0,81	2,1	0,81	0,396	-6,12	-5,96	401	40

Tabelle B.15: Messung zur Bestimmung des Betriebspunktes der Kathode

B.1.4 Raumladung

Anodenspannung /V	Anodenstrom /mA
0,008	3,1
6,1	3,6
10,2	3,8
15,2	3,9
21,2	4,24
27,2	4,55
33,6	4,84
40,62	5,2
45,5	5,44
50,8	5,72
56	6,2
61,4	6,4
71,1	6,92

Tabelle B.16: Messreihe Raumladung

B.1.5 2. Kathode

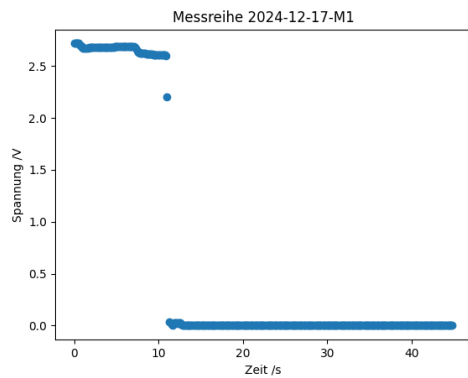
Zeit		Netzgerät		Gitterstrom			U_{Besch}	Druck	Temperatur
/min	/s	U_{Heiz} /V	I_{Heiz} /A	I_{max} /mA	I_{min} /mA	$U_{100\Omega}$ /V	/V	/10 ⁻⁷ mbar	/°C
0	0	0	0	0,6	-	0,03	0,087	0,9	-
1	40	1,5	1,18	0,6	-	0,03	0,087	1,6	-
2	50	1,5	0,81	0,6	-	0,03	0,087	1 100	-
3	40	1,5	0,74	0,6	-	0,03	0,087	5,9	-
4	50	1,5	0,71	0,6	-	0,03	0,087	3,7	-
5	30	2	0,87	0,6	-	0,03	0,087	4	-
6	30	2	0,8	0,6	-	0,03	0,087	4,5	-
7	10	2,5	0,96	0,6	-	0,03	0,087	4	400
8	20	2,5	0,88	0,6	-	0,03	0,087	5	424
9	20	2,5	0,86	0,6	-	0,03	0,087	6,1	432
11	30	2,5	0,85	0,6	-	0,03	0,087	3,3	437
12	20	3,1	0,99	0,6	-	0,03	0,087	2	460
13	0	3,1	0,96	0,6	-	0,03	0,087	3,1	477
14	40	3,1	0,96	0,6	-	0,03	0,087	3,3	498
15	20	4	1,16	0,6	-	0,03	0,087	3,3	525
16	30	4	1,1	0,6	-	0,03	0,087	9	568
18	0	4	1,09	0,6	-	0,03	0,087	6,37	571
18	40	4,5	1,22	0,3	-	0,03	-	6,1	603
20	0	4,5	1,17	0,3	-	0,03	-	1 300	610
22	20	4,5	1,17	-	-	0,03	-	2 600	511
24	0	4,5	1,17	-	-	0,03	-	3 500	511
26	50	5,3	1,31	-	-	0,03	-	5,2	537
28	10	5,3	1,26	-	-	0,03	-	5,2	553
29	10	5,3	1,26	-	-	0,03	-	8	654
31	0	5,3	1,26	0,5	-	0,01	-	1,3	654
35	50	5,3	1,26	2,2	0,3	0,01	-	3,8	654
37	0	6	1,4	2,3	0,4	0,01	-	2,85	678
39	30	6	1,35	2,4	0,4	0,01	-	4,18	961
42	0	6	1,36	2,4	0,6	0,01	-	4,69	690
44	0	6	1,36	2,4	0,6	0,01	-	2,54	690
44	50	7	1,54	2,4	0,4	0,01	-	1,6	718

Tabelle B.17: Aktivierungsmessung 2. Kathode

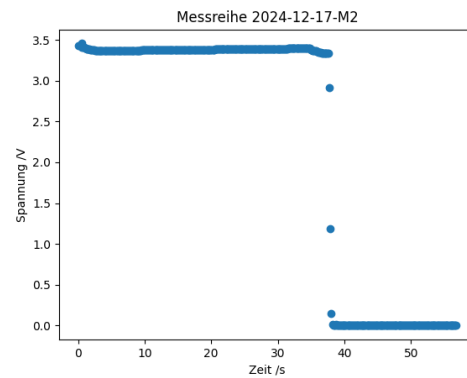
Zeit		Netzgerät		Gitterstrom			U_{Besch}	Druck	Temperatur
/min	/s	U_{Heiz} /V	I_{Heiz} /A	I_{max} /mA	I_{min} /mA	$U_{100\Omega}$ /V	/V	/10 ⁻⁷ mbar	/°C
0	0	0	0	0,6	-	0,03	0,087	0,9	-
1	40	1,5	1,18	0,6	-	0,03	0,087	1,6	-
2	50	1,5	0,81	0,6	-	0,03	0,087	1 100	-
3	40	1,5	0,74	0,6	-	0,03	0,087	5,9	-
4	50	1,5	0,71	0,6	-	0,03	0,087	3,7	-
5	30	2	0,87	0,6	-	0,03	0,087	4	-
6	30	2	0,8	0,6	-	0,03	0,087	4,5	-
7	10	2,5	0,96	0,6	-	0,03	0,087	4	400
8	20	2,5	0,88	0,6	-	0,03	0,087	5	424
9	20	2,5	0,86	0,6	-	0,03	0,087	6,1	432
11	30	2,5	0,85	0,6	-	0,03	0,087	3,3	437
12	20	3,1	0,99	0,6	-	0,03	0,087	2	460
13	0	3,1	0,96	0,6	-	0,03	0,087	3,1	477
14	40	3,1	0,96	0,6	-	0,03	0,087	3,3	498
15	20	4	1,16	0,6	-	0,03	0,087	3,3	525
16	30	4	1,1	0,6	-	0,03	0,087	9	568
18	0	4	1,09	0,6	-	0,03	0,087	6,37	571
18	40	4,5	1,22	0,3	-	0,03	-	6,1	603
20	0	4,5	1,17	0,3	-	0,03	-	1 300	610
22	20	4,5	1,17	-	-	0,03	-	2 600	511
24	0	4,5	1,17	-	-	0,03	-	3 500	511
26	50	5,3	1,31	-	-	0,03	-	5,2	537
28	10	5,3	1,26	-	-	0,03	-	5,2	553
29	10	5,3	1,26	-	-	0,03	-	8	654
31	0	5,3	1,26	0,5	-	0,01	-	1,3	654
35	50	5,3	1,26	2,2	0,3	0,01	-	3,8	654
37	0	6	1,4	2,3	0,4	0,01	-	2,85	678
39	30	6	1,35	2,4	0,4	0,01	-	4,18	961
42	0	6	1,36	2,4	0,6	0,01	-	4,69	690
44	0	6	1,36	2,4	0,6	0,01	-	2,54	690
44	50	7	1,54	2,4	0,4	0,01	-	1,6	718

Tabelle B.18: Aktivierungsmessung 2. Kathode

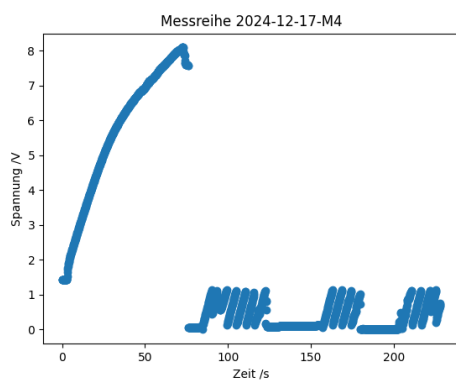
B.2 Floating Anode



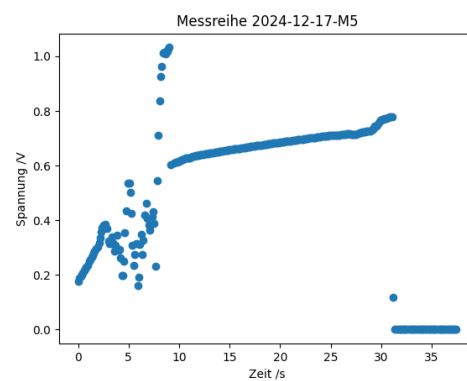
(a) Laser aus; Heizung 8,6 V/1,79 A



(b) 405 nm Laser an; Heizung 8,6 V/1,79 A

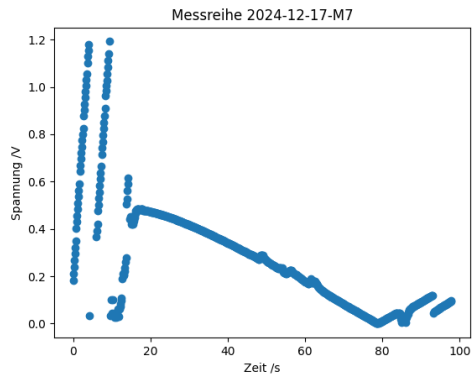


(c) 405 nm Laser an; Heizung 7,5 V/1,65 A

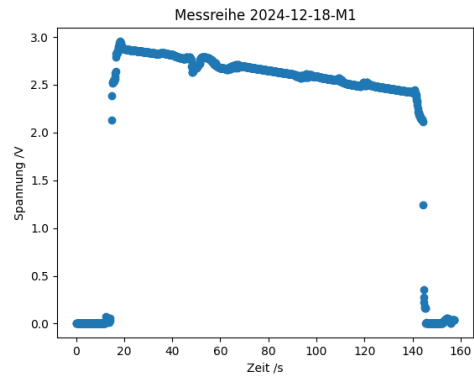


(d) 405 nm Laser an; Heizung 7,5 V/1,65 A

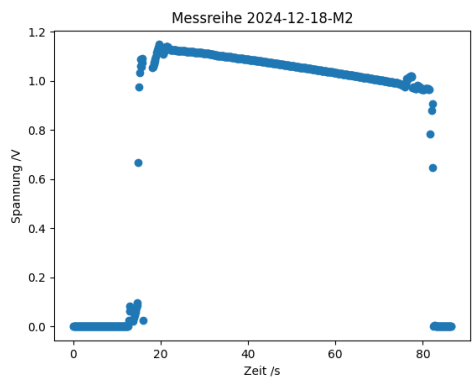
Abbildung B.1: Messreihen zum Nachweis des Photoeffekts (1)



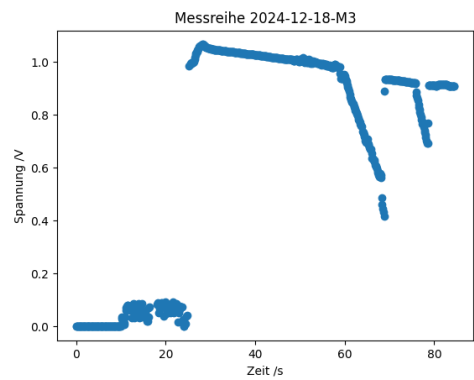
(a) 405 nm Laser an; Heizung 7,5 V/1,65 A



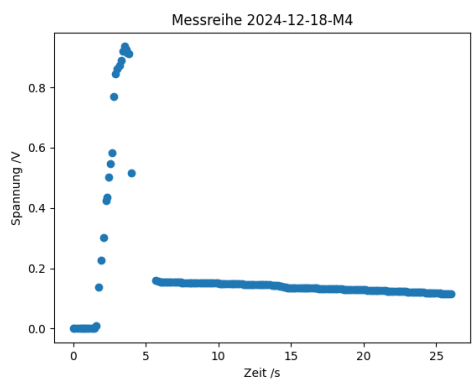
(b) Laser aus; Heizung 7,5 V/1,64 A



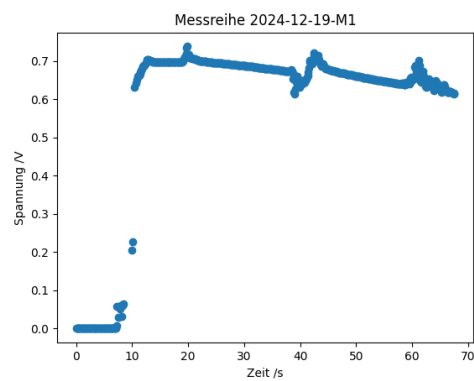
(c) 532 nm Laser an; Heizung 7,5 V/1,64 A



(d) 405 nm Laser an; Heizung 7,5 V/1,64 A

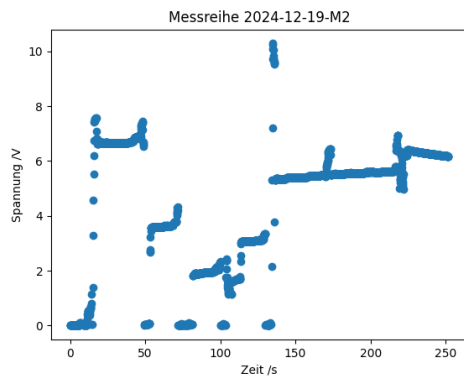


(e) Laser aus; Heizung 7,5 V/1,64 A

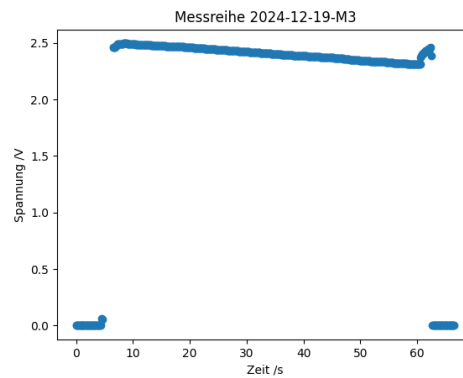


(f) Laser aus; Heizung 8 V/1,7 A

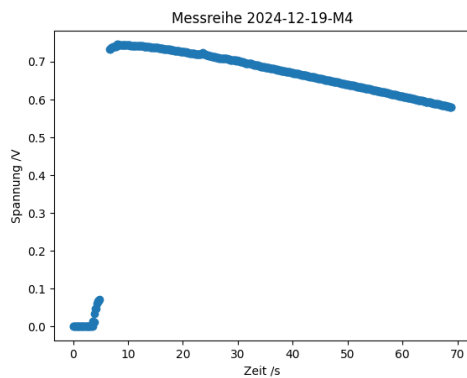
Abbildung B.2: Messreihen zum Nachweis des Photoeffekts (2)



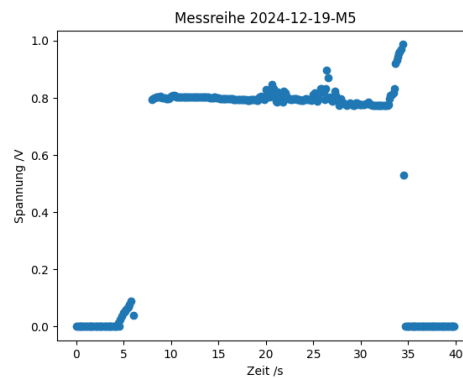
(a) Laser aus; Heizung 8 V/1,7 A



(b) Laser aus; Heizung 8 V/1,7 A



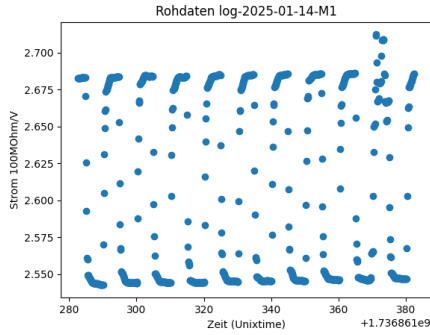
(c) 405 nm Laser an; Heizung 8 V/1,7 A



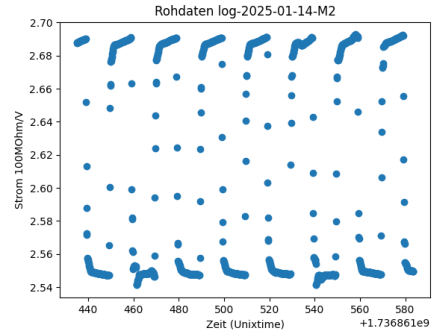
(d) 532 nm Laser an; Heizung 8 V/1,7 A

Abbildung B.3: Messreihen zum Nachweis des Photoeffekts (3)

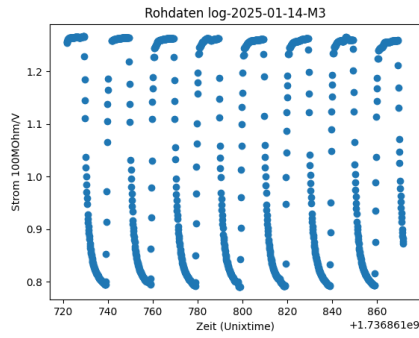
B.3 Gegenfeldmethode



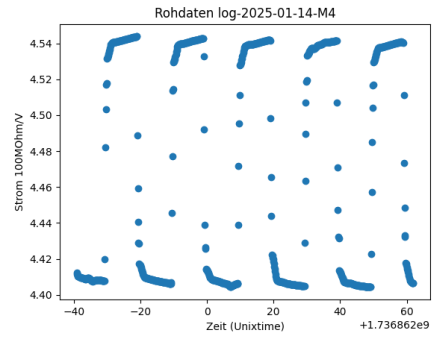
(a) Testlauf



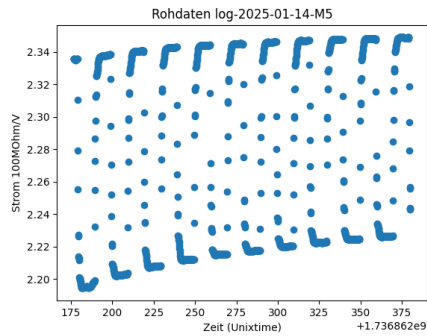
(b) 5,5 V Gegenfeld, 8,4 V/1,72 A Heizung



(c) 9,5 V Gegenfeld, 8,4 V/1,72 A Heizung

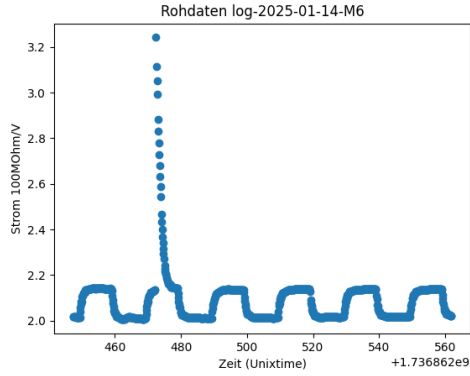


(d) 3,5 V Gegenfeld, 8,4 V/1,72 A Heizung

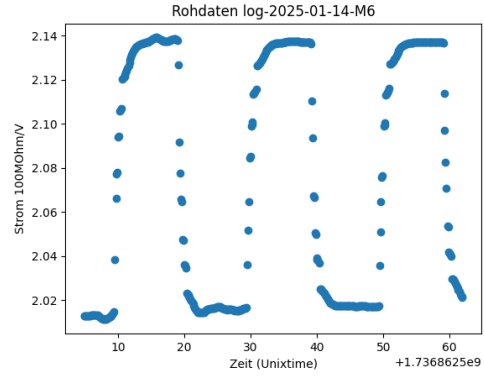


(e) 5,5 V Gegenfeld, 8,0 V/1,67 A Heizung

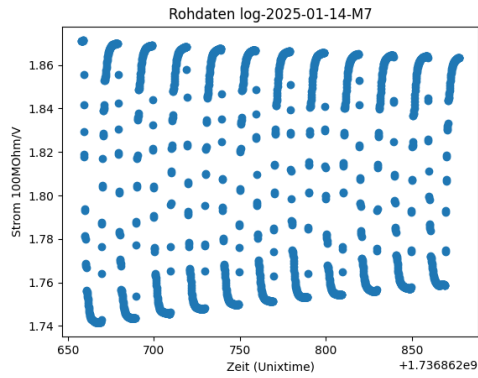
Abbildung B.4: Gegenfeldmethode; Spannungsmessung über Widerstand (1)



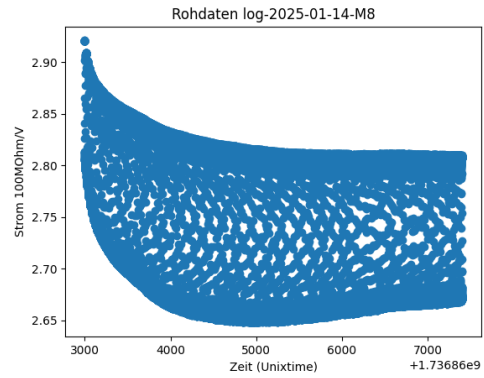
(a) 5,5 V Gegenfeld, 7,8 V/1,65 A Heizung



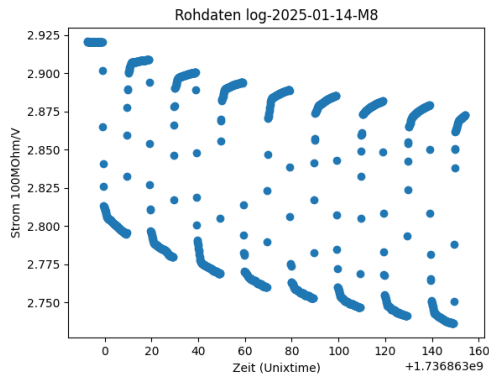
(b) 5,5 V Gegenfeld, 7,8 V/1,65 A Heizung (Ausschnitt)



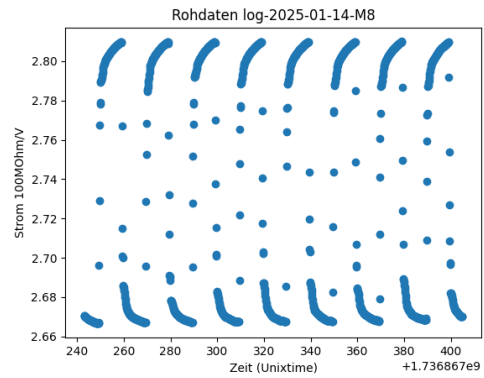
(c) 5,5 V Gegenfeld, 7,5 V/1,62 A Heizung



(d) 5,5 V Gegenfeld, 8,4 V/1,72 A Heizung



(e) 5,5 V Gegenfeld, 8,4 V/1,72 A Heizung; Messanfang



(f) 5,5 V Gegenfeld, 8,4 V/1,72 A Heizung; Messende

Abbildung B.5: Gegenfeldmethode; Spannungsmessung über Widerstand (2)

B.4 Quanteneffizienzmessung

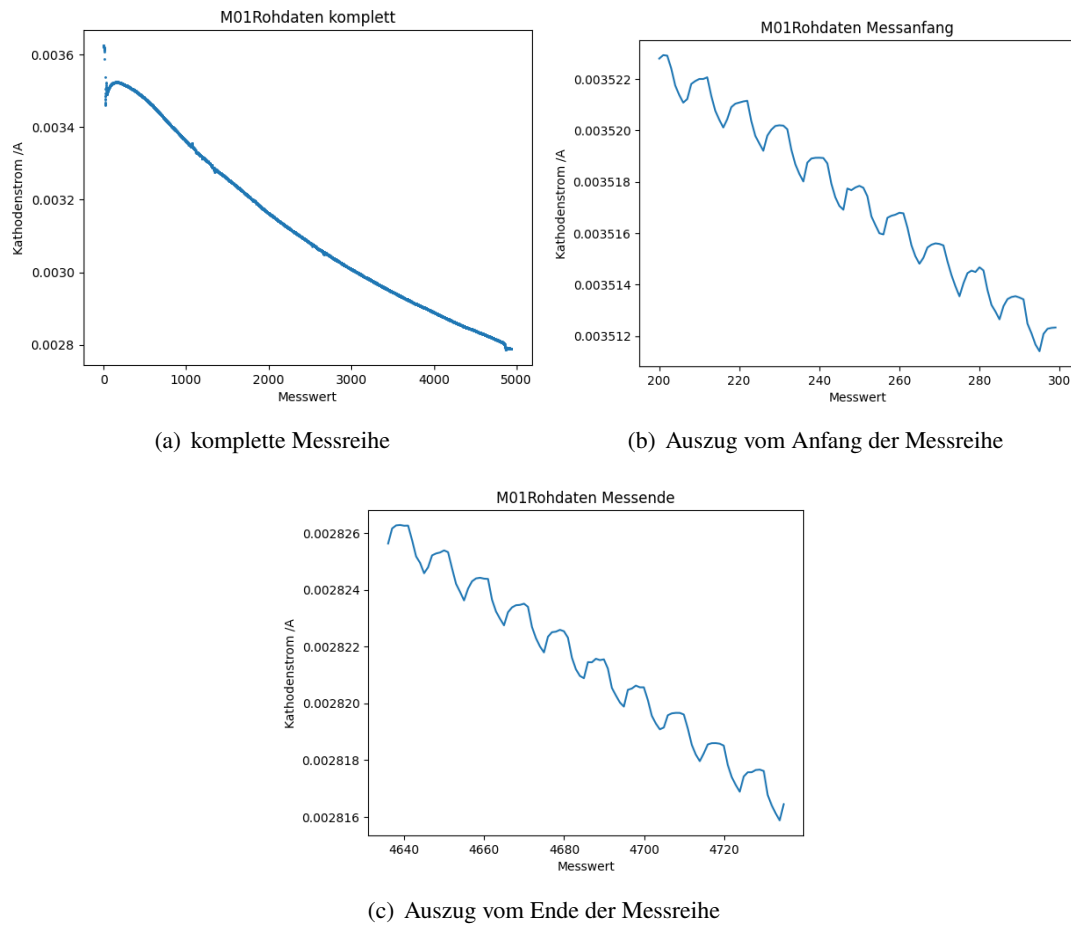


Abbildung B.6: Quanteneffizienzmessung Messreihe M01; Heizung 7,6 V/1,61 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V

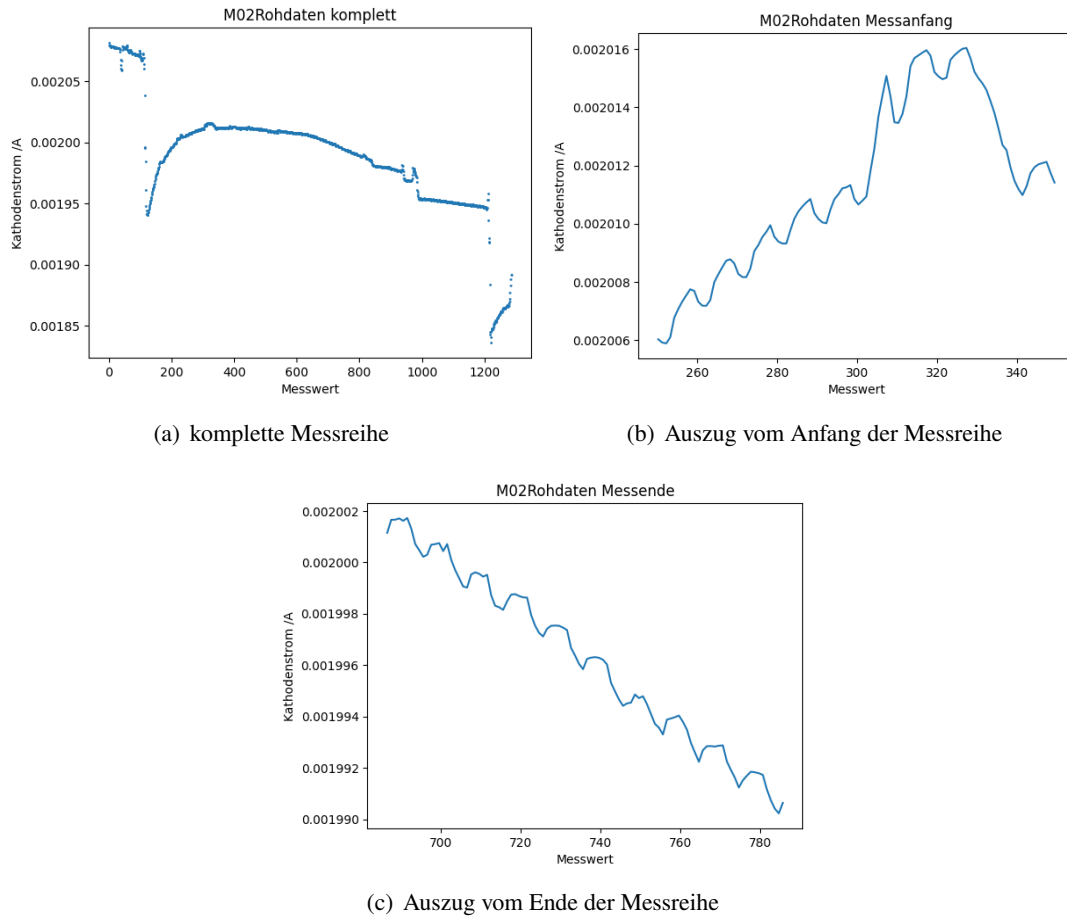


Abbildung B.7: Quanteneffizienzmessung Messreihe M02; Heizung 7,4 V/1,59 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V

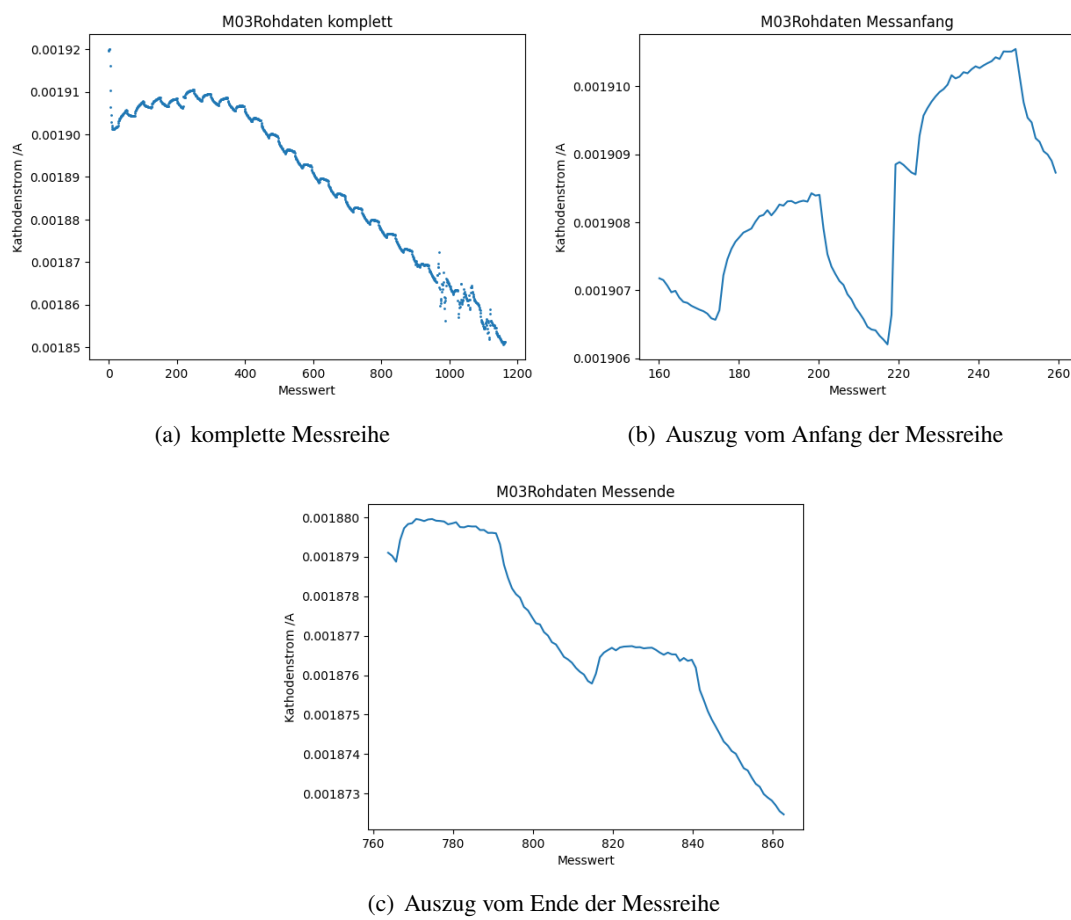


Abbildung B.8: Quanteneffizienzmessung Messreihe M03; Heizung 7,4 V/1,6 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V

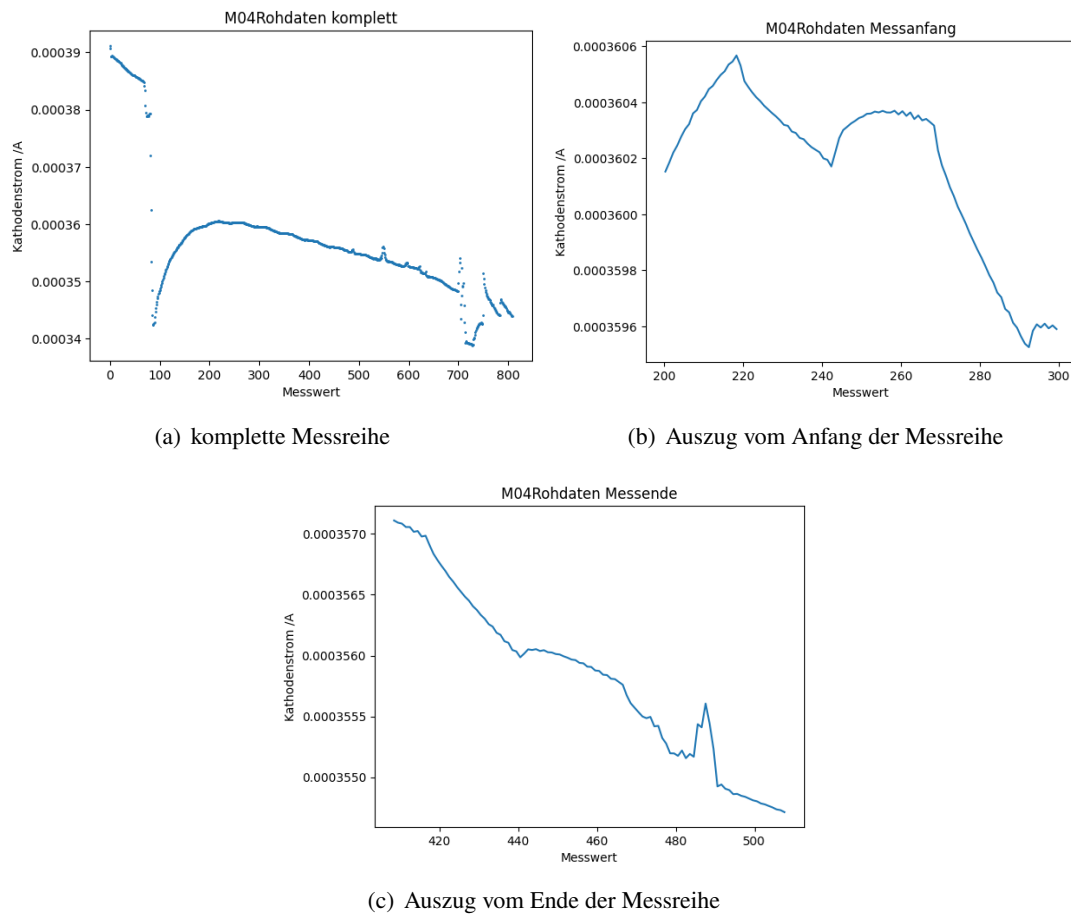


Abbildung B.9: Quanteneffizienzmessung Messreihe M04; Heizung 7,0 V/1,54 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V

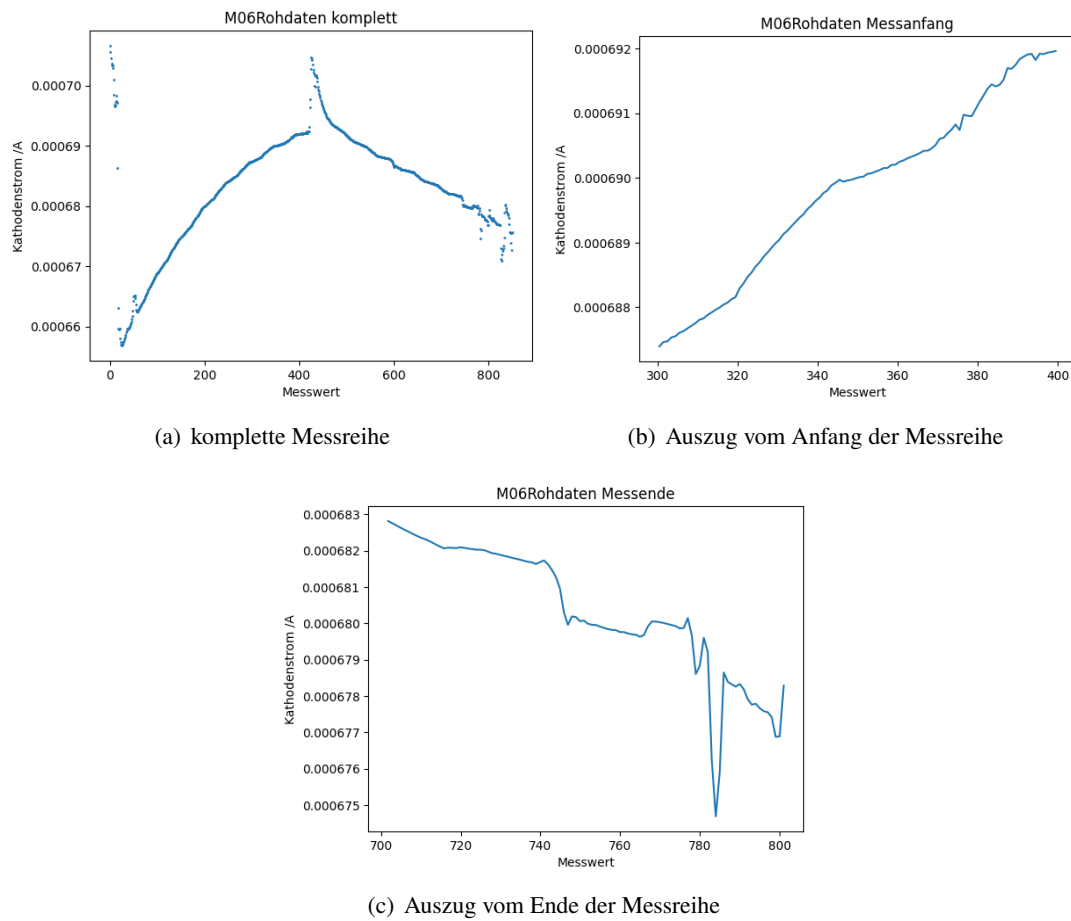


Abbildung B.10: Quanteneffizienzmessung Messreihe M06; Heizung 7,0 V/1,6 A, Beschleunigungsspannung 1,1 V

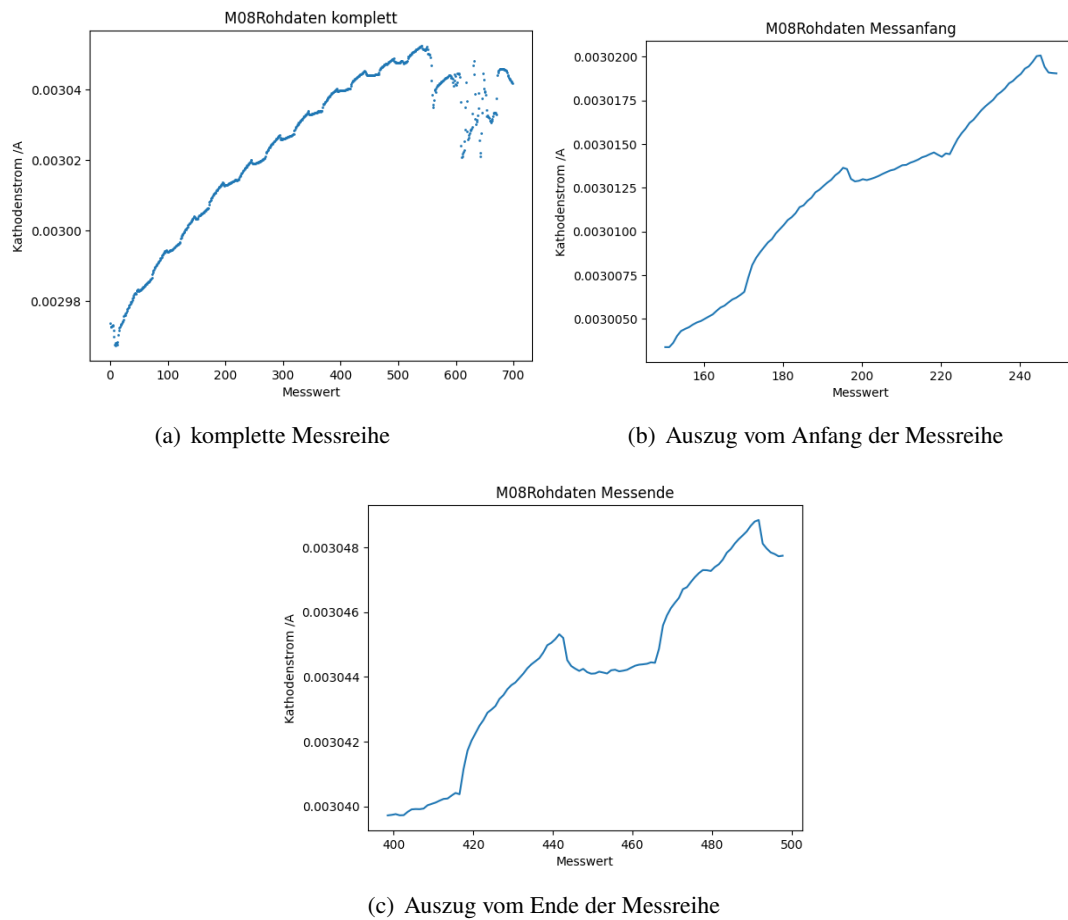


Abbildung B.11: Quanteneffizienzmessung Messreihe M08; Heizung 7,5 V/1,6 A, Beschleunigungsspannung 0,7 V

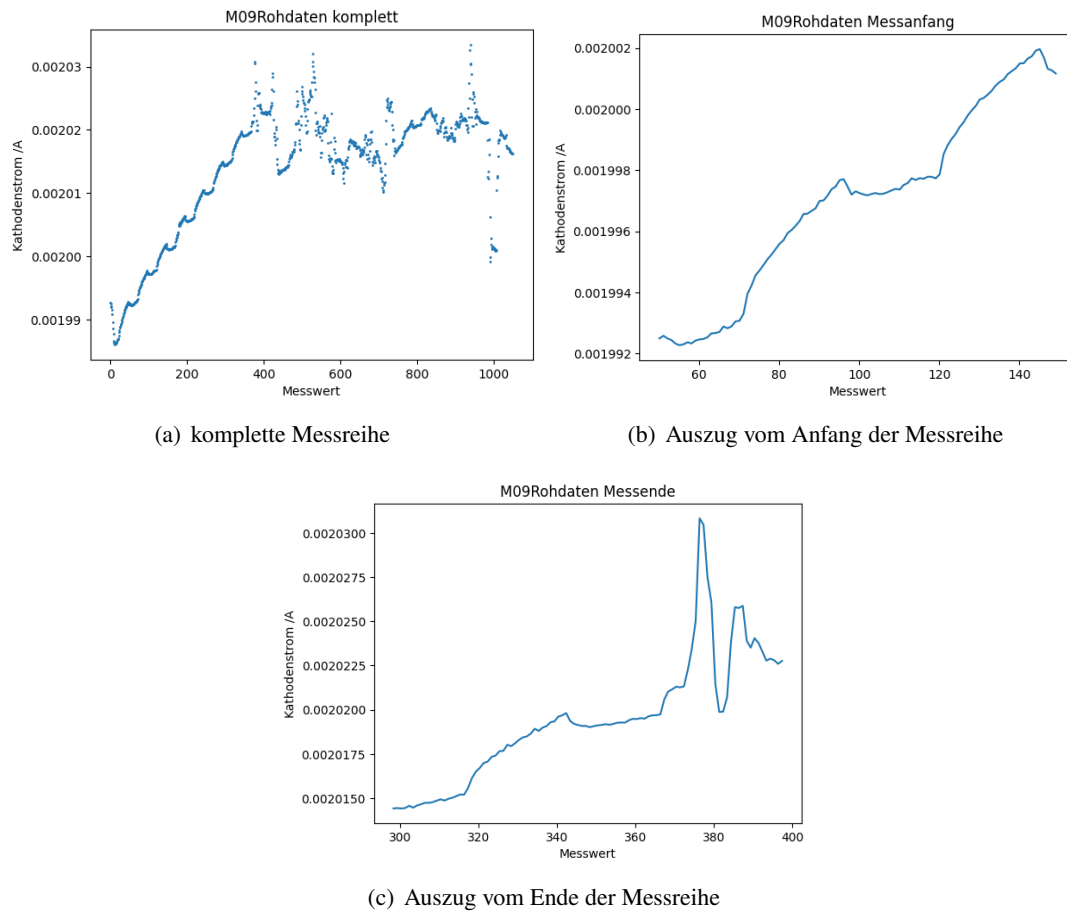


Abbildung B.12: Quanteneffizienzmessung Messreihe M09; Heizung 7,5 V/1,6 A, Beschleunigungsspannung 0,5 V

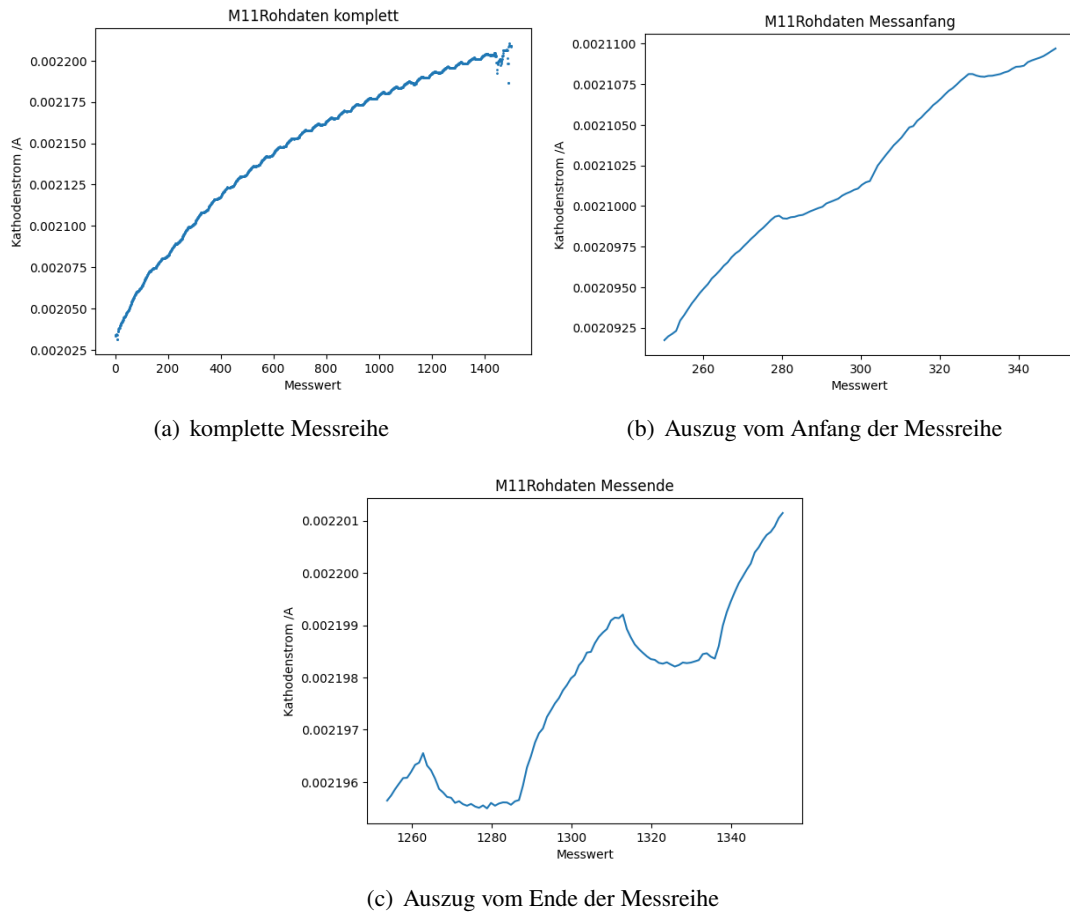


Abbildung B.13: Quanteneffizienzmessung Messreihe M11; Heizung 7,7 V/1,63 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V

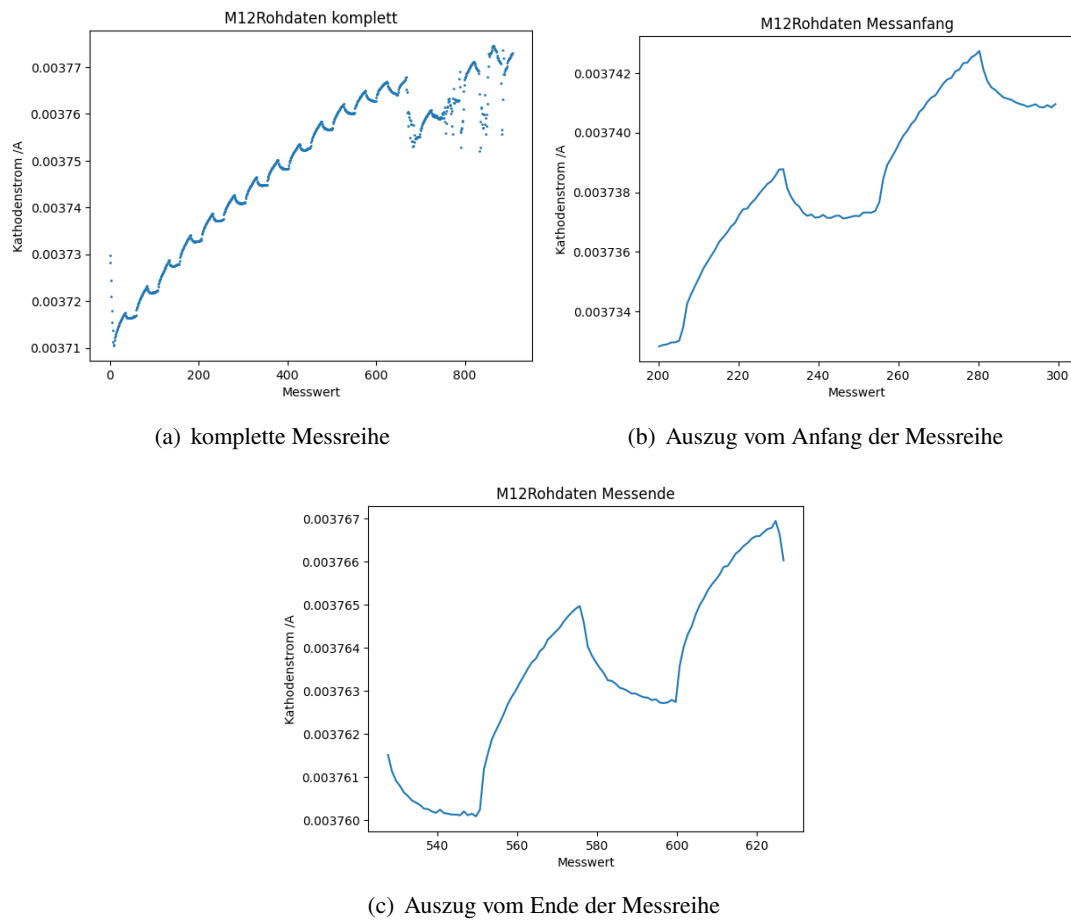


Abbildung B.14: Quanteneffizienzmessung Messreihe M12; Heizung 7,7 V/1,63 A, Beschleunigungsspannung 0,5 V

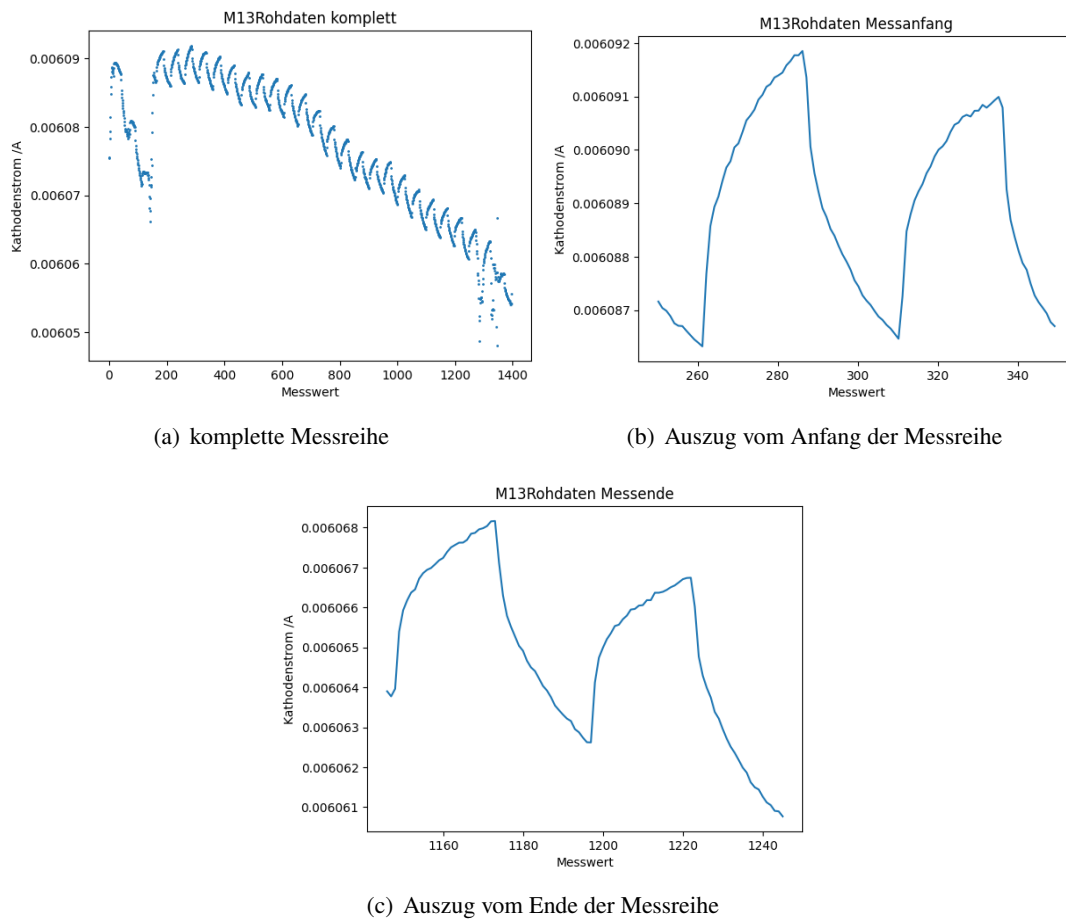


Abbildung B.15: Quanteneffizienzmessung Messreihe M13; Heizung 7,7 V/1,63 A, Beschleunigungsspannung 0,8 V

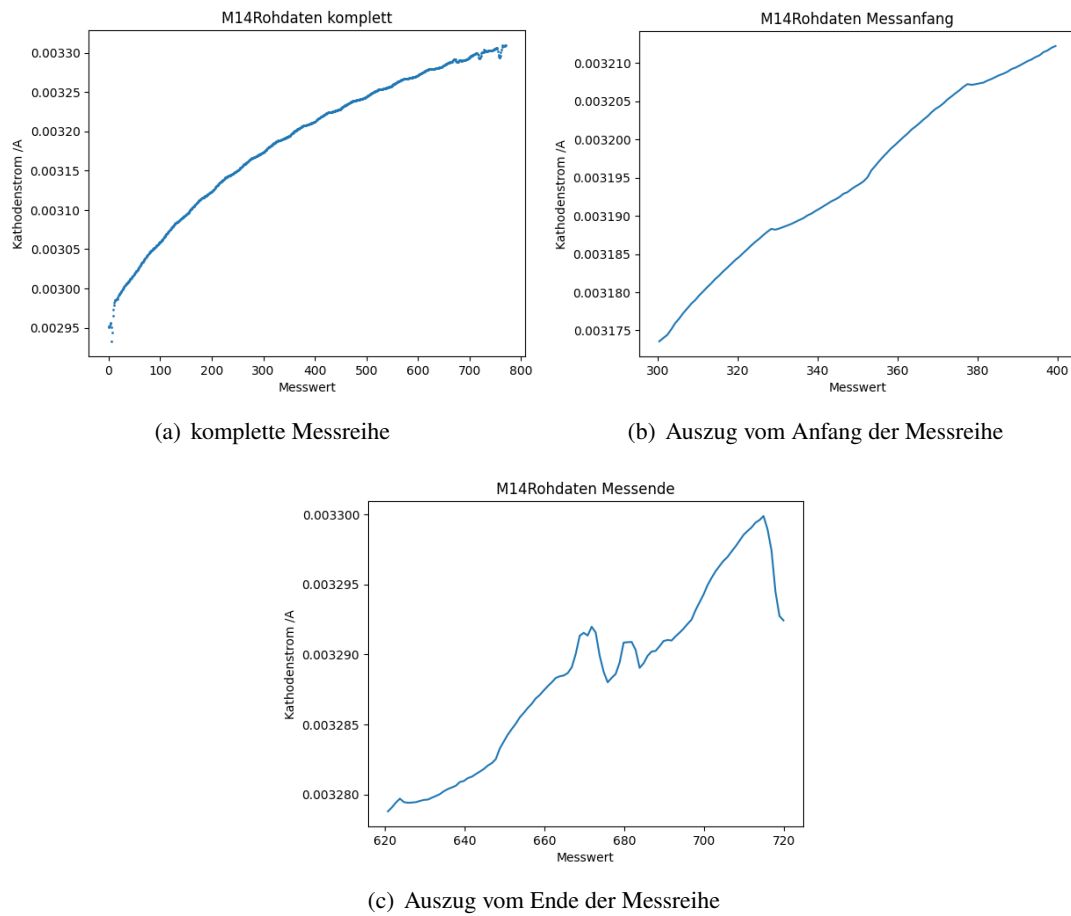


Abbildung B.16: Quanteneffizienzmessung Messreihe M14; Heizung 8,0 V/1,67 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V

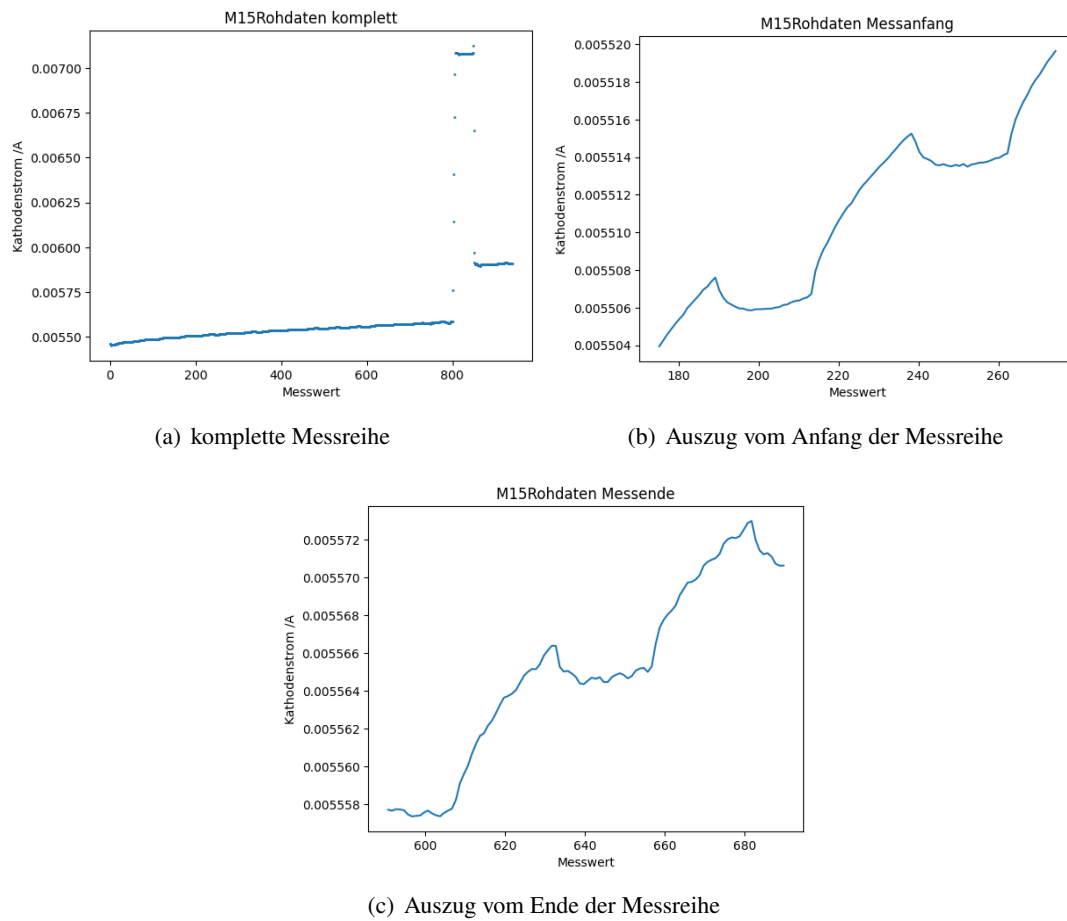


Abbildung B.17: Quanteneffizienzmessung Messreihe M15; Heizung 8,0 V/1,67 A, Beschleunigungsspannung 0,5 V

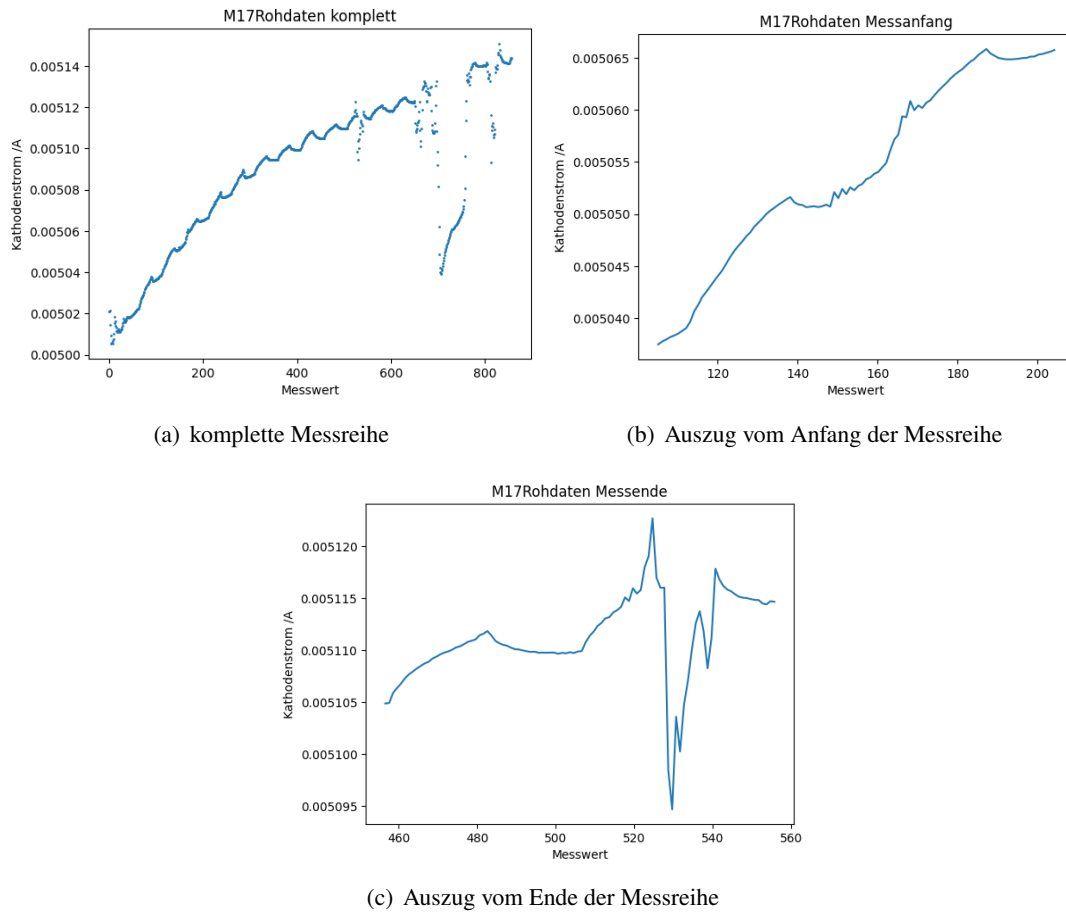


Abbildung B.18: Quanteneffizienzmessung Messreihe M17; Heizung 8,4 V/1,71 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V

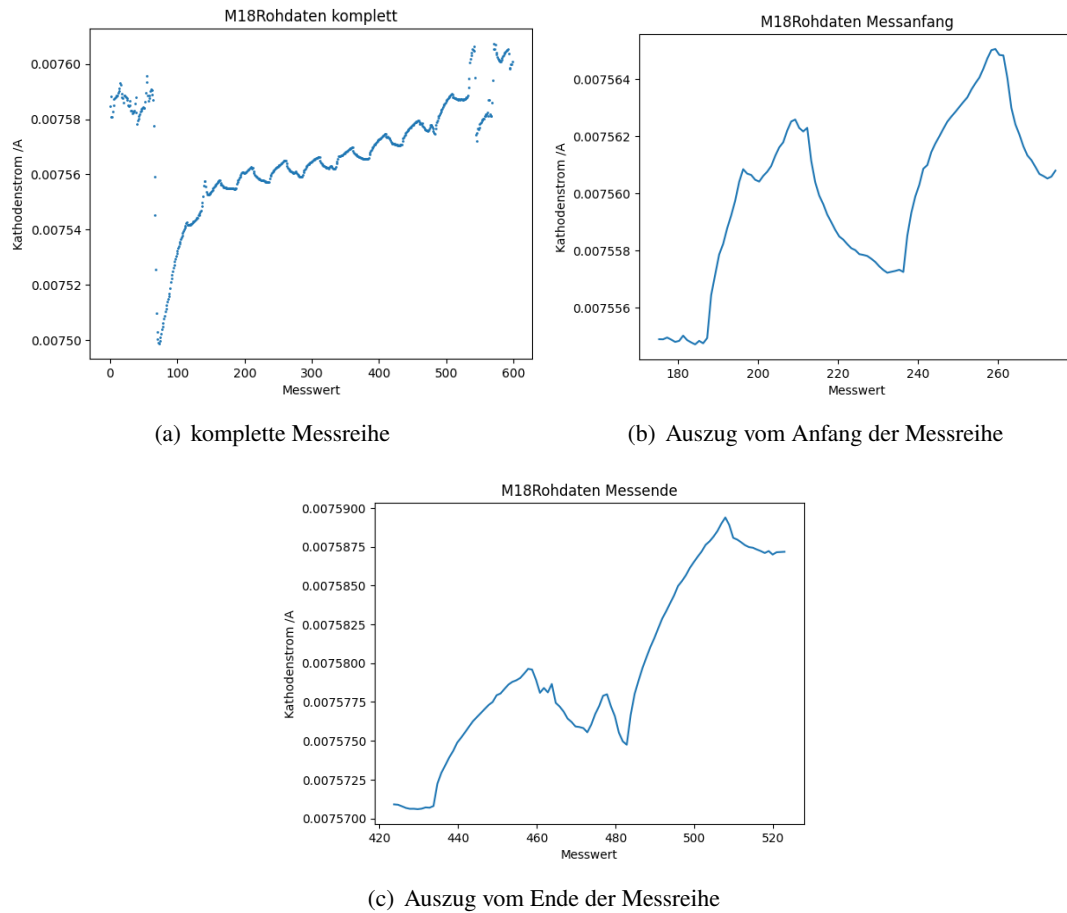


Abbildung B.19: Quanteneffizienzmessung Messreihe M18; Heizung 8,4 V/1,71 A, Beschleunigungsspannung 0,5 V

Literatur

- [1] F. Frommberger, *ELSA Website*,
URL: <https://www-elsa.physik.uni-bonn.de/Beschleuniger/> (siehe S. 1).
- [2] ELSA-Gruppe, *PI-Website, Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*,
URL: <https://www.pi.uni-bonn.de/elsa/de> (siehe S. 1).
- [3] K. Wille, *The Physics of Particle Accelerators, An Intodruction*, Oxford University Press, 2000,
ISBN: 0-19-850550-7 (siehe S. 2, 18).
- [4] S. Kronenberg, *Design of a New Electron Gun for LINAC2 at ELSA*,
Magisterarb.: Universität Bonn, 2023, URL: https://www-elsa.physik.uni-bonn.de/Publikationen/texte/kronenberg_master.pdf (siehe S. 2).
- [5] CPI Eimac, *Y-644B Elektron Gun ACTIVATION SCHEDULE* (siehe S. 2, 12, 13).
- [6] CPI Eimac, *Electron Tube Y646B, technische Zeichnung* (siehe S. 2).
- [7] CPI Eimac, *Electron Guns Data Sheet* (siehe S. 2).
- [8] D. Meschede, *Optik, Licht und Laser*, Vieweg+Teubner, 2008, ISBN: 978-3-8351-0143-2
(siehe S. 4).
- [9] Wikipedia, *Quantenausbeute*,
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Quantenausbeute> (besucht am 21. 01. 2025)
(siehe S. 4).
- [10] S. Gireman et al., *Operating a Tungsten Dispenser Cathode in Photo-Emission Mode*,
Particle Accelerator Conference (2009), MO6RFP088,
URL: <https://accelconf.web.cern.ch/PAC2009/papers/M06RFP088.pdf?n=PAC2009/papers/M06RFP088.pdf> (besucht am 22. 01. 2025) (siehe S. 4, 25, 26).
- [11] W. Demtröder, *Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik*, Springer Spektrum, 2017,
ISBN: 978-3-622-55789-1 (siehe S. 5).
- [12] Optris GmbH & Co. KG, *Bedienungsanleitung optris CT*, optris CT-MA-D2024-09-A
(siehe S. 6, 10).
- [13] Wikipedia, *Grauer Körper*,
URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Grauer_K%C3%B6rper (besucht am 22. 01. 2025)
(siehe S. 6).
- [14] W. Demtröder, *Experimentalphysik 1, Mechanik und Wärmelehre*, Springer Spektrum, 2018,
ISBN: 978-3-622-54846-2 (siehe S. 6).

- [15] S. Kronenberg, persönliche Kommunikation, 2022 (siehe S. 6).
- [16] Wikipedia, *Raumladung*,
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Raumladung> (besucht am 29. 01. 2025)
(siehe S. 18).
- [17] Wikipedia, *Raumladungsgesetz*,
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Raumladungsgesetz> (besucht am 29. 01. 2025)
(siehe S. 19).
- [18] LEIFIphysik, Joachim Herz Stiftung,
Quantenobjekt Photon, Erklärungsprobleme des Photoeffekts,
URL: <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/grundwissen/erklaerungsprobleme-des-photoeffekts> (siehe S. 19).
- [19] Wikipedia, *Stefan-Boltzmann-Gesetz*,
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz> (besucht am 17. 01. 2025).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Elektronenbeschleuniger ELSA [2]	1
1.2	Schematischer Aufbau thermische Kathode	2
3.1	Zusammengesetzter Aufbau der Sensor und Kathodenhalterung: 1. Hauptbefestigungsplatte in Vakuumkammer, 2.Keramikisolator zur Anode, 3.Anodenhalterung, 4.Halterung für Infrarotsensor, 5. Klemme für Infrarotsensor	8
3.2	Anode	8
3.3	Optischer Aufbau	9
3.4	Schaltplan: Strommessung durch Spannungsmessung über Widerstand	11
4.1	Verhalten der Kathode bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen	13
4.2	Korrektur von Heizleistung, -spannung, -strom	14
4.3	Temperatur in Abhängigkeit der Heizleistung	14
4.4	Einfluss verschiedener Widerstände auf die Messung	15
4.5	Auftragung aus den Messreihen der Aktivierungszyklen: Beschleunigungsspannung gegen Gitterstrom	16
4.6	Vergleich der Gitterströme der Kathoden	17
4.7	Messung des Arbeitspunktes	18
4.8	Raumladungseffekt	19
4.9	Vergleich der verschiedenen relevanten Temperaturen	20
4.10	Vergleich der Messreihen des Photoeffekt	21
5.1	Gegenfeldmethode	24
5.2	Einfluss von Heizleistung und Gegenspannung auf die Quanteneffizienz	25
5.3	Quanteneffizienzmessung Messreihe M01; Heizung 7,6 V/1,61 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V	26
5.4	Abhängigkeit der Quanteneffizienz von der Heizleistung und der Beschleunigungsspannung	27
A.1	Optischer Aufbau	32
A.2	Vakuumkammer	33
A.3	Schaltplan für Arbeitspunktmessung	34
A.4	Schaltplan für Floating Anode	34
A.5	Schaltplan für Gegenfeldmessung	35
A.6	Schaltplan für Quanteneffizienzmessung	35
A.7	Hauptplatte der Halterung	37

A.8	Keramik Isolatoren	38
A.9	Platte zur Befestigung der Anode	39
A.10	Halterung Infrarotsensor Platte	40
A.11	Halterung Infrarotsensor Klemme	41
A.12	Anode	42
B.1	Messreihen zum Nachweis des Photoeffekts (1)	54
B.2	Messreihen zum Nachweis des Photoeffekts (2)	55
B.3	Messreihen zum Nachweis des Photoeffekts (3)	56
B.4	Gegenfeldmethode; Spannungsmessung über Widerstand (1)	57
B.5	Gegenfeldmethode; Spannungsmessung über Widerstand (2)	58
B.6	Quanteneffizienzmessung Messreihe M01; Heizung 7,6 V/1,61 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V	59
B.7	Quanteneffizienzmessung Messreihe M02; Heizung 7,4 V/1,59 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V	60
B.8	Quanteneffizienzmessung Messreihe M03; Heizung 7,4 V/1,6 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V	61
B.9	Quanteneffizienzmessung Messreihe M04; Heizung 7,0 V/1,54 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V	62
B.10	Quanteneffizienzmessung Messreihe M06; Heizung 7,0 V/1,6 A, Beschleunigungsspannung 1,1 V	63
B.11	Quanteneffizienzmessung Messreihe M08; Heizung 7,5 V/1,6 A, Beschleunigungsspannung 0,7 V	64
B.12	Quanteneffizienzmessung Messreihe M09; Heizung 7,5 V/1,6 A, Beschleunigungsspannung 0,5 V	65
B.13	Quanteneffizienzmessung Messreihe M11; Heizung 7,7 V/1,63 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V	66
B.14	Quanteneffizienzmessung Messreihe M12; Heizung 7,7 V/1,63 A, Beschleunigungsspannung 0,5 V	67
B.15	Quanteneffizienzmessung Messreihe M13; Heizung 7,7 V/1,63 A, Beschleunigungsspannung 0,8 V	68
B.16	Quanteneffizienzmessung Messreihe M14; Heizung 8,0 V/1,67 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V	69
B.17	Quanteneffizienzmessung Messreihe M15; Heizung 8,0 V/1,67 A, Beschleunigungsspannung 0,5 V	70
B.18	Quanteneffizienzmessung Messreihe M17; Heizung 8,4 V/1,71 A, Beschleunigungsspannung 0,3 V	71
B.19	Quanteneffizienzmessung Messreihe M18; Heizung 8,4 V/1,71 A, Beschleunigungsspannung 0,5 V	72

Tabellenverzeichnis

3.1	Messung der Laserleistung	9
4.1	Thermische Energie der Elektronen	20
5.1	Differenz des Kathodenstrom; Messung über $100\text{ M}\Omega$	24
5.2	Quanteneffizienz der Gegenfeldmethode	24
5.3	Differenz des Kathodenstrom; direkte Strommessung; mit Beschleunigungsfeld	26
5.4	Quanteneffizienz	27
B.1	erster Aktivierungszyklus erster Teil mit Vakuumüberwachung	43
B.2	erster Aktivierungszyklus zweiter Teil mit Vakuumüberwachung	44
B.3	erster Aktivierungszyklus dritter Teil	44
B.4	Messung über $470\ \Omega$	45
B.5	Messung über $100\ \Omega$	45
B.6	Messung über $220\ \Omega$	46
B.7	Messung über $220\ \Omega$	46
B.8	Messung über $470\ \Omega$	46
B.9	Messung über $1,5\text{ k}\Omega$	47
B.10	Messung über $100\ \Omega$	47
B.11	Heizspannung rampen	47
B.12	Aktivierungszyklus mit Temperaturüberwachung I	48
B.13	Aktivierungszyklus mit Temperaturüberwachung II	48
B.14	Gitterstrom abhängig von Gitterspannung	49
B.15	Messung zur Bestimmung des Betriebspunktes der Kathode	50
B.16	Messreihe Raumladung	51
B.17	2.Kathode (1)	52
B.18	2.Kathode (1)	53

Danksagungen

Als erstes möchte ich mich bei Prof. Desch bedanken, dass ich diese Bachelorarbeit unter seiner Aufsicht schreiben konnte. Mein Dank gilt außerdem der gesamten ELSA Arbeitsgruppe die mich so herzlich bei sich aufgenommen haben. Darunter meine Büronachbarn Leonardo Thome, Daniel Fry und Max Ammann.

Ein besonderer Dank geht an Philipp Hänisch für den Crashkurs im CAD-Programm Inventor und den Tipps und Tricks wie ein am Computer konstruiertes Bauteil praktisch hält und gefertigt werden kann.

Weiter danke ich Dennis Dick und Thomas Perlitius für die Lehrstunde in Löten und die Versorgung mit elektrischen Bauteilen.

Ich bedanke mich bei Michael Switka und Dennis Proft die immer eine offene Tür hatten und mit Ideen und Tipps und Tricks dazu beigetragen haben, dass diese Arbeit entstehen konnte. Bei Michael Switka bedanke ich mich außerdem für das Korrekturlesen dieser Arbeit und bei Dennis Proft dafür, dass er das Koreferat für diese Arbeit übernommen hat.

Last but not least gilt mein größter Dank Samuel Kronenberg. Für die Unterstützung während dem Arbeiten an und Schreiben von dieser Arbeit und dafür, dass er mir im Zuge seiner Doktorarbeit diese Projekt überhaupt erst ermöglicht hat.