



Universität
Münster

BACHELORARBEIT

Kalibrierung von Schrittmotoren und
Aufbau und Test eines
Fluoreszenzdetektors für das Laserkühlen
am SIS100

Yannik Vogelsang

Universität Münster
Fachbereich Physik
Institut für Kernphysik

Münster, Juli 2024

Yannik Vogelsang
Gescherweg 60
48161 Münster
E-Mail: y_voge01@uni-muenster.de
Matrikelnummer: 462115

Erstgutachter: Dr. Volker Hannen

Zweitgutachter: Prof. Dr. Anton Andronic

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit **Kalibration von Schrittmotoren und Aufbau und Test eines Fluoreszenzdetektors für das Laserkühlen am SIS100** selbstständig von mir und ohne fremde Hilfe verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind. Mir ist bekannt, dass es sich bei einem Plagiat um eine Täuschung handelt, die gemäß der Prüfungsordnung sanktioniert werden kann.

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in einer Datenbank einverstanden.

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit oder Teile daraus nicht anderweitig als Prüfungsarbeit eingereicht habe.

22.07.2024, J. Vogdsang

(Datum, Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretischer Hintergrund	3
2.1	Laserkühlen	3
2.2	Röntgenspektren	6
2.3	Beugungsgitter	7
2.4	Microchannel plate Detektor	9
2.4.1	Funktionsweise	9
2.4.2	Anode	9
3	Aufbau des Detektorsystems	11
3.1	Der Fluoreszenzdetektor	11
3.2	Spektrometer	13
3.3	Röntgenquelle	16
3.4	Schrittmotoren und Linearpotentiometer	17
3.5	Messelektronik	18
3.5.1	Potentiometer und Motoren	19
3.5.2	MCP und DLA	19
4	Messungen	21
4.1	Schrittmotoren und Potentiometer	21
4.1.1	Reproduzierbarkeit der Positionsansteuerung unter Last	21
4.1.2	Driftverhalten der Linearpotentiometer	25
4.1.3	Kalibrierfunktion	29
4.2	Test des Spektrometeraufbaus	33
4.2.1	MCP Messung	33
4.2.2	Eindimensionale Projektion	34
4.2.3	Kalibration nach Wellenlänge	36
5	Zusammenfassung und Ausblick	41
	Literaturverzeichnis	42
A	Anhang	44
A.1	Temperaturabhängigkeit	44
A.2	Fitparameter	45
A.3	Kalibrierungsfunktionen	47
A.4	MCP	54

Kapitel 1

Einleitung

In großen Sternen, Sternexplosionen oder Neutronensternen ist Materie extremen Bedingungen, zum Beispiel extrem hohen Temperaturen, Drücken oder Dichten, ausgesetzt. Mit dem internationalen Forschungszentrum FAIR am GSI entsteht eine der größten Forschungseinrichtungen Deutschlands zur Untersuchung dieser Bedingungen im Labor. Dafür sollen Ionen aller natürlich vorkommenden Elemente¹ im Ringbeschleuniger SIS100 auf über 99% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, um z.B. auf kleine Materialproben geschossen zu werden. Beim Aufprall entstehen für den Bruchteil einer Sekunde eine Vielzahl kurzlebiger Teilchen [1]. Die Ionen werden in einer Ionenquelle erzeugt und in mehreren Phasen auf die gewünsch-

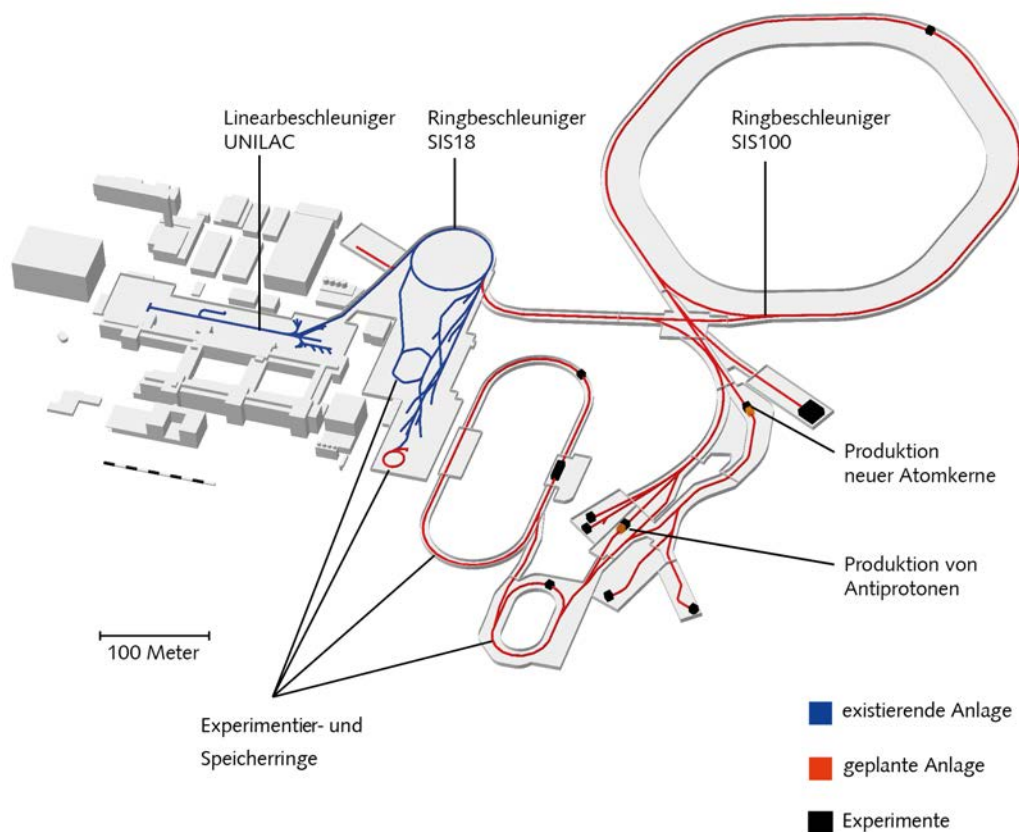


Abbildung 1.1: Die FAIR Anlage [1].

te Geschwindigkeit beschleunigt. Der so entstandene Ionenstrahl weist anfänglich eine breite Geschwindigkeitsverteilung auf. Die geplanten Experimente verlangen jedoch eine möglichst

¹Dies schließt alle Elemente von Wasserstoff bis Uran ein.

scharfe Geschwindigkeitsverteilung, die im SIS100 mithilfe der Laserkühlung hergestellt wird [2].

Für eine effektive Anwendung und Kontrolle des Laserkühlens ist die Detektion der entstehenden Fluoreszenzstrahlung notwendig. Zu diesem Zweck wurde an der Universität Münster ein Fluoreszenzdetektor entwickelt [3][4][5][6], der sowohl den reinen Nachweis der Fluoreszenzphotonen als auch die Spektroskopie derselben erlaubt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Positionsauslese der Schrittmotoren des Detektors kalibriert, sowie in Zusammenarbeit mit K. Ueberholz der vollständige Aufbau zusammengebaut und auf Funktionalität getestet.

Kapitel 2

Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel wird der theoretische Hintergrund, der für das Verständnis des Laserkühlens am SIS100 und dieser Arbeit notwendig ist, erläutert. Dabei wird sowohl auf das Laserkühlen und die dabei entstehende Röntgenstrahlung eingegangen, als auch die Bestandteile des Spektrometers behandelt.

2.1 Laserkühlen

Für die geplanten Experimente am FAIR ist eine scharfe Geschwindigkeitsverteilung der Ionen notwendig, die durch das Durchlaufen der zahlreichen Vorstufen der Beschleunigeranlage nicht gegeben ist. Die Ionen werden in einer Ionenquelle erzeugt und besitzen nicht alle dieselbe Geschwindigkeit, sondern folgen einer Geschwindigkeitsverteilung. Aufgrund dieser Verteilung verhalten sich die Ionen in den Vorbeschleunigern, wie dem UNILAC und dem SIS18, unterschiedlich. Folglich verbreitert sich die Geschwindigkeitsverteilung immer mehr. Das Schärfen dieser Geschwindigkeits- bzw. Impulsverteilung wird auch Kühlung genannt und ist in Abb. 2.1 illustriert.

Es existieren verschiedene Methoden zur Strahlkühlung, wie z.B. stochastisches, Elektronen- oder Laserkühlen. Im SIS100 werden die Teilchen auf so hohe relativistische Geschwindigkeiten beschleunigt (bis zu $\gamma \approx 13$), dass die erst genannten Methoden drastisch an Effektivität verlieren und nicht mehr anwendbar sind [7]. Die Laserkühlung bietet jedoch eine effektive Art der Strahlkühlung für den SIS100 und wird damit erstmals für schwere hochgeladene Ionen verwendet.

Bei der Laserkühlung werden die Ionen durch einen Laser gezielt angeregt, um den Ionen einen Impuls in Richtung der Laserphotonen zu geben. Absorbiert ein Ion ein Photon passender Wellenlänge wird es angeregt und absorbiert ebenfalls den Impuls des Photons. Der angeregte Zustand des Ions ist instabil und zerfällt sehr schnell wieder (ns-Bereich) und emittiert dabei ein Photon. Da diese Emission isotrop in alle Raumrichtungen gleich wahrscheinlich passiert, gibt es über hinreichend viele Kühlzyklen keine Impulsänderung bei der Abregung des Teilchens und es erhält einen Nettoimpuls in Richtung des Laserlichtes (siehe Abb. 2.2). Mit einer Überlagerung eines kollinearen und eines entgegengesetzten Lasers zur Strahlrichtung lassen sich Ionen somit auf die gewünschte Geschwindigkeitsverteilung bringen. Im Ruhesystem des Teilchens erfahren die Photonen durch den Dopplereffekt eine Rot- bzw. Blauverschiebung.¹ Die Laser sind so eingestellt, dass mithilfe dieses Effekts nur die Teilchen, die zu schnell sind, vom entgegengesetzten Laser gebremst werden und nur die Teilchen, die zu langsam sind, von dem kollinearen Laser beschleunigt werden (siehe Abb. 2.3).

¹Deshalb ist die Laserkühlung eine Form der Dopplerkühlung und wird oft synonym genutzt.

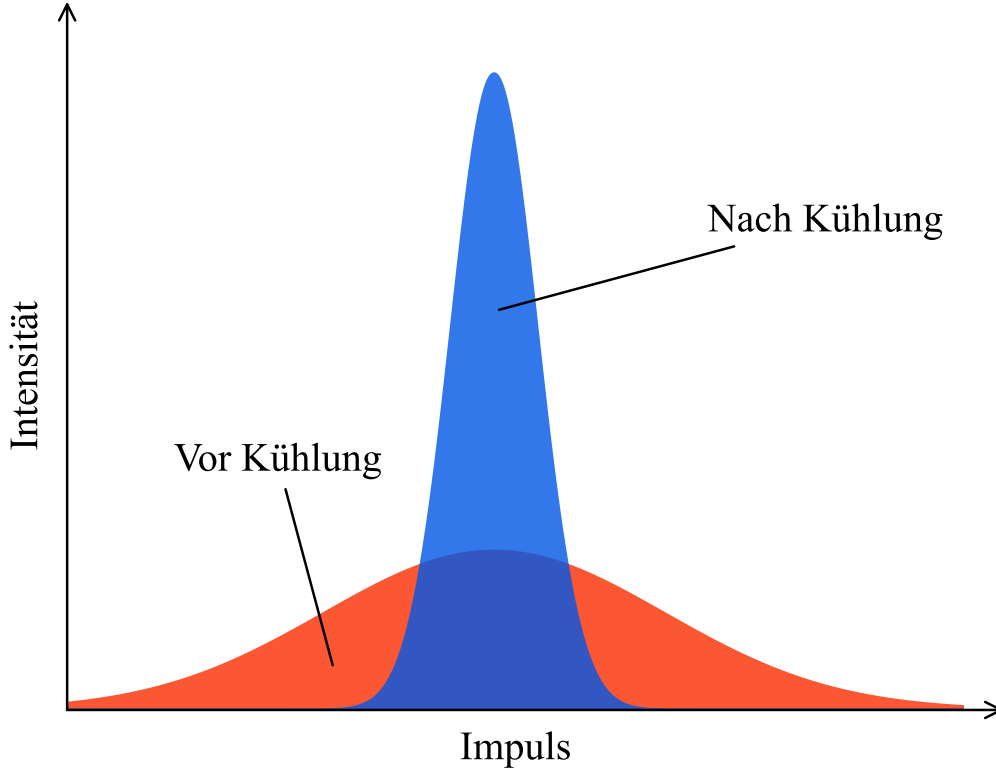


Abbildung 2.1: Skizzierte Impulsverteilung der Ionen vor und nach der Kühlung.

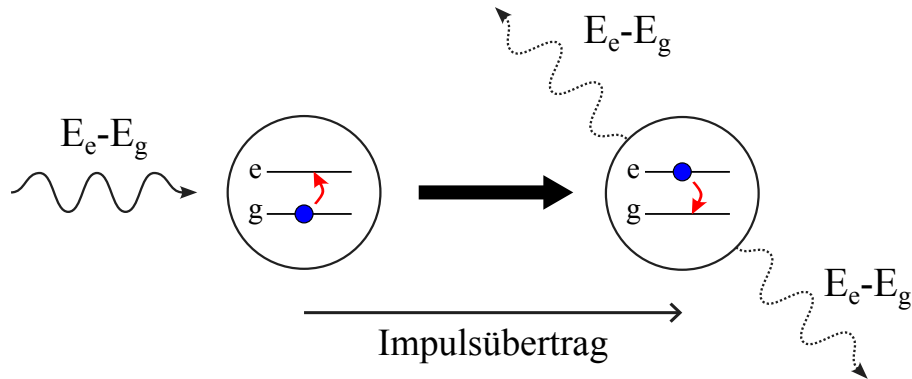


Abbildung 2.2: Skizzierter Prozess der Laserkühlung. Das Ion absorbiert die Energie und den Impuls eines Photons und wird angeregt. Beim Abregen emittiert das Ion ein Photon derselben Energie in eine beliebige Richtung und erhält somit statistisch einen Impuls in Richtung des einfallenden Laserlichts.

Die Wellenlängen, die die Laser dafür besitzen müssen, sind durch den relativistischen Doppellereffekt gegeben:

$$\lambda_{\text{ko-}}^{(\text{lab})} = \frac{\lambda^{(\text{ion})}}{\gamma(1 + \beta)} \quad (2.1a)$$

$$\lambda_{\text{gegen-}}^{(\text{lab})} = \frac{\lambda^{(\text{ion})}}{\gamma(1 - \beta)} \quad (2.1b)$$

mit der Wellenlänge des kollinearen bzw. entgegengesetzten Lasers im Ruhesystem des Labors $\lambda^{(\text{lab})}$, der Wellenlänge eines Übergangs im Ion $\lambda^{(\text{ion})}$, dem Lorentzfaktor γ und $\beta = v/c$ [8].

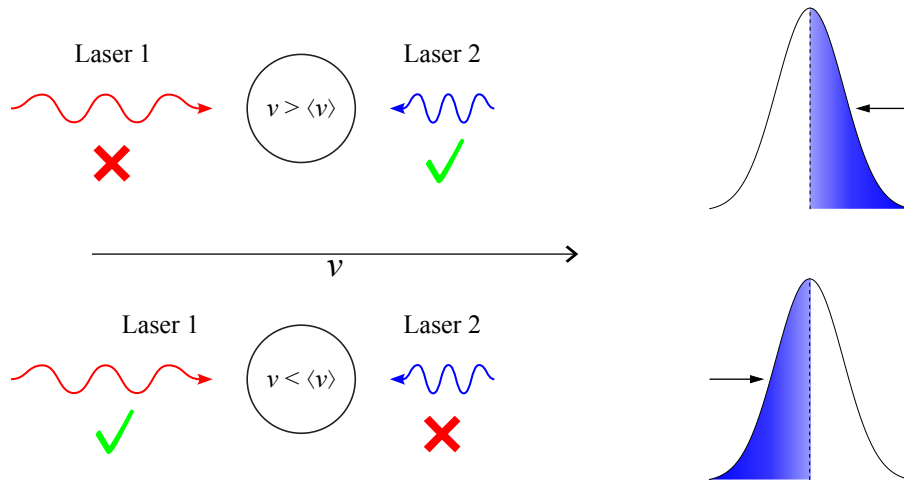


Abbildung 2.3: Darstellung der Rot- und Blauverschiebung des kollinearen (1) und des entgegengesetzten Lasers (2). Die Laser sind so eingestellt, dass nur Ionen schneller als die Durchschnittsgeschwindigkeit von Laser 2 und nur Ionen langsamer als diese von Laser 1 angeregt werden können.

Aus diesen Formeln lässt sich ablesen, dass der kollineare eine kleine und der entgegengesetzte Laser eine größere Wellenlänge benötigt, um die Ionen anregen zu können. Bei den hohen Geschwindigkeiten, die die Teilchen im SIS100 besitzen ($\gamma \approx 3 - 13$), ist diese Verschiebung für die Laser sehr groß, sodass der entgegengesetzte Laser eine Wellenlänge im Bereich von $\lambda_{\text{gegen}}^{(\text{lab})} \approx 60 - 260 \text{ nm}$ für beispielsweise einen $\lambda^{(\text{ion})} = 10 \text{ nm}$ Übergang benötigt. Der kollineare Laser benötigt für diesen Übergang eine Wellenlänge von $\lambda_{\text{ko}}^{(\text{lab})} \approx 0,5 - 1,5 \text{ nm}$, was auf dem derzeitigen Stand der Technik nicht möglich ist, weshalb eine Alternative für den kollinearen Laser benötigt wird.

Die Verwendung eines RF-buckets (engl. radio frequency bucket) ermöglicht eine Laserkühlung ohne kollinearen Laser. Dabei erzeugt die Radiofrequenz ein periodisches, longitudinales Coulomb-Potential bei einer gewählten Harmonischen h der Umdrehungsfrequenz, in dessen Tiefpunkten die Ionen gebündelt werden. Ionen mit Energie- oder Phasendifferenz zu den Ionen mit idealer Geschwindigkeit werden in sog. Synchrotronschwingung versetzt. Diese Schwingung der Ionen im sog. „bucket potential“ werden durch den gegenläufigen Laser gedämpft. Das Potential stellt also die Gegenkraft zur Laserkraft des entgegengesetzten Lasers dar [9]. Mit

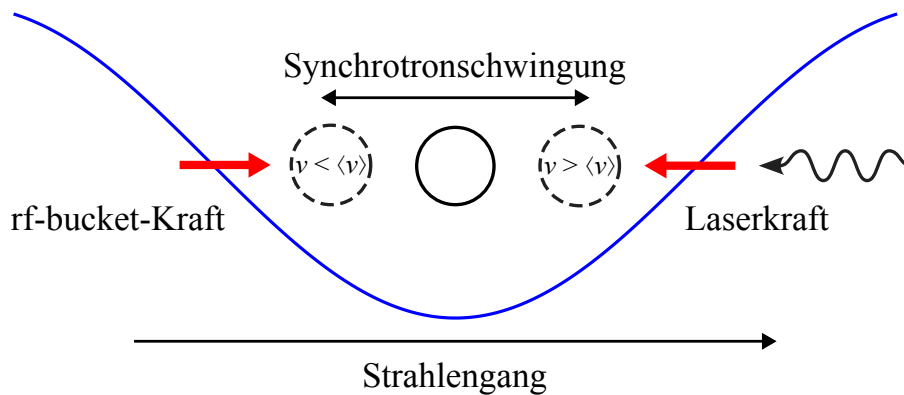


Abbildung 2.4: Funktionsweise des rf-buckets bei der Laserkühlung. Die Ionen werden in Synchrotronschwingung versetzt und die Potentialkraft ersetzt die kollineare Laserkraft.

der energieaufgelösten Detektion der emittierten Fluoreszenzstrahlung der Ionen lassen sich Aussagen über Geschwindigkeitsverteilung der Ionen und Effektivität der Laserkühlung treffen.

Diese Strahlung liegt im Bereich der extrem ultravioletten Strahlung (EUV) bis zur weichen Röntgenstrahlung.

2.2 Röntgenspektren

Röntgenstrahlung wird üblicherweise in Röntgenröhren erzeugt, wobei charakteristische Röntgenstrahlung und Bremsstrahlung entsteht. Charakteristische Röntgenstrahlung entsteht in dem Anodenmaterial beim Elektronenübergang von höheren in niedrigere Schalen und ist für jedes Element einzigartig. Die Bezeichnung für charakteristische Röntgenstrahlung ist in Abb. 2.5 schematisch dargestellt. Ein Übergang eines Elektrons aus einer höheren Schale in eine niedrigere wird dabei auch Linie genannt, da diese im Emissionsspektrum als diskrete Linien auftreten.

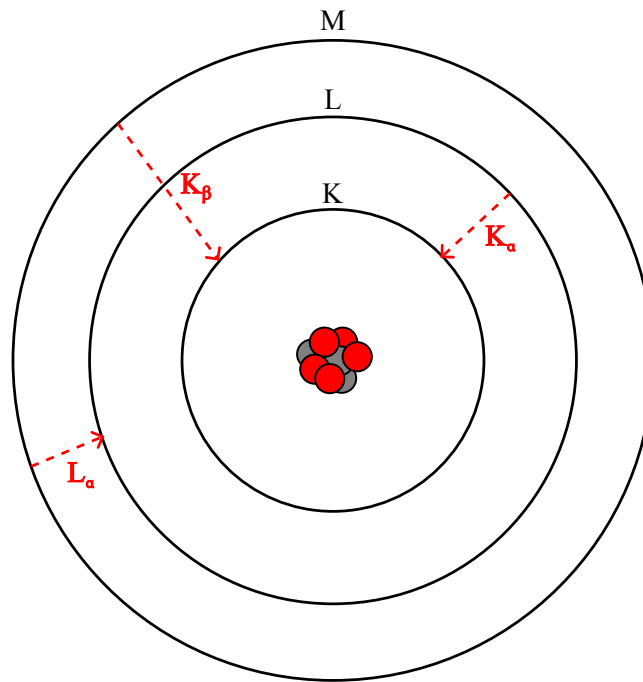


Abbildung 2.5: Skizziertes Schalenmodell eines Atoms und Nomenklatur nach der Siegbahn Notation.

Dabei werden die Schalen alphabetisch beginnend bei K benannt. Diese Linien werden nach der Schale benannt, auf die das Elektron übergeht². Alle Übergänge, in denen das Elektron auf die K -Schale fällt, werden K -Linien genannt, alle in der das Elektron auf L -Schale fällt, werden L -Linien genannt usw. Dabei wird unterschieden, wie viele Schalen das Elektron übergangen hat. Diese Anzahl wird ebenfalls alphabetisch mit griechischen Buchstaben als Index beginnend mit α angegeben. So ist z.B. der Übergang von der M - zur L -Schale die L_α -Linie und von der M - zur K -Schale die K_β -Linie [10].

Die Röntgenstrahlung wird in einer Vakuumröhre erzeugt, in der Elektronen mit einer Beschleunigungsspannung U_B auf eine Anode beschleunigt werden. Beim Auftreffen der Elektronen auf die Anode können die Atome angeregt werden und emittieren bei der Abregung Photonen, deren Energie den Linien des Anodenmaterials entspricht. Diese Linien haben nur diskrete Wellenlängen, die abhängig von Material und Übergang sind.

Die Elektronen werden auch durch die Comptonstreuung abgebremst und emittieren dadurch sogenannte Bremsstrahlung, die ein kontinuierliches Spektrum aufweist [11]. In Abb. 2.6 ist

²Die verwendete Notation wird auch Siegbahn Notation genannt.

ein exemplarischer Verlauf der Intensität der Wellenlängen der emittierten Photonen einer Röntgenquelle dargestellt. Man kann gut zwischen der kontinuierlichen Bremsstrahlung und den diskreten charakteristischen Linien unterscheiden. Um diese charakteristische Strahlung

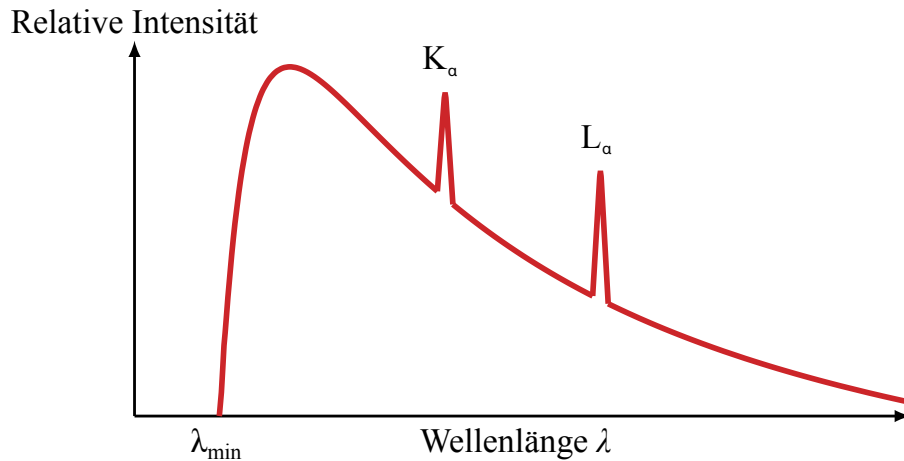


Abbildung 2.6: Qualitative Darstellung der charakteristischen und kontinuierlichen Röntgenstrahlung [12].

im Bereich der Röntgenstrahlung zu erzeugen, muss die Anode aus einem geeigneten Element bestehen, dessen Übergänge im Bereich von 30 - 3000 eV liegen. Die minimale Wellenlänge der Strahlung λ_{\min} ergibt sich aus der Spannung, mit der die Elektronen in der Röntgenquelle beschleunigt werden, da diese die maximale Energie bestimmt, die die Elektronen erhalten können:

$$\lambda_{\min} = \frac{c \cdot h}{e \cdot U_B}, \quad (2.2)$$

mit der Lichtgeschwindigkeit c , dem Planck'schem Wirkungsquantum h , der Elementarladung e und der Beschleunigungsspannung U_B .

2.3 Beugungsgitter

Bei einem Beugungsgitter handelt es sich um ein optisches Bauelement, das Licht dispersiv reflektiert bzw. transmittiert. Es lässt sich vereinfacht als eine Reihe von Schlitzen, die das Licht abhängig von der Wellenlänge brechen, darstellen.

Das Licht, das unter dem Winkel α zum Lot des Gitters auf dieses trifft und unter dem Winkel β zum Lot austritt, erfährt zwischen zwei benachbarten Schlitzen einen Gesamtgangunterschied s , der sich geometrisch aus der beiden Teilgangunterschieden s_1 und s_2 herleiten lässt (siehe Abb. 2.7):

$$s = s_1 \pm s_2 = d \sin \alpha \pm d \sin \beta. \quad (2.3)$$

Bei einem transmittiven Gitter werden diese Teilgangunterschiede subtrahiert. Ein reflektives Gitter besitzt Rillen anstelle der Schlitze und die beiden Gangunterschiede werden addiert. Üblicherweise wird der Abstand zwischen den Rillen durch die Rillendichte ersetzt, also der Anzahl der Rillen pro Millimeter $N = 1/d$. Für konstruktive Interferenz muss der Gangunterschied ein Vielfaches der Wellenlänge λ betragen, woraus dann folgende Formel resultiert:

$$mN\lambda = \sin \alpha + \sin \beta, \quad (2.4)$$

mit der Beugungsordnung m .

Der Austrittswinkel β ist also nach der Gleichung

$$\beta = \arcsin(mN\lambda - \sin \alpha) \quad (2.5)$$

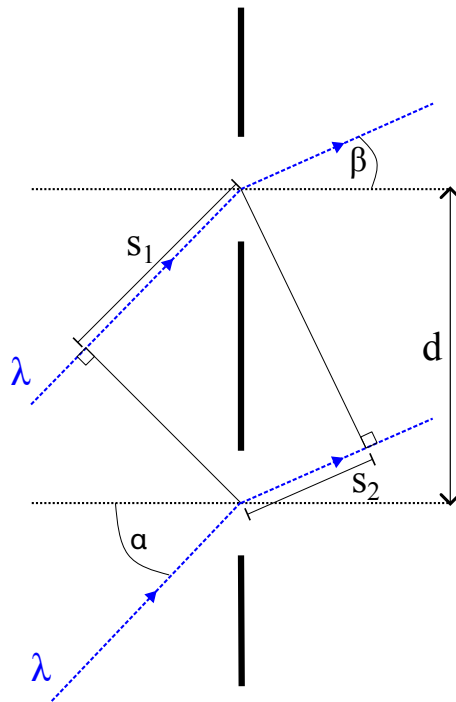


Abbildung 2.7: Skizzierte Funktionsweise eines transmittiven Beugungsgitters.

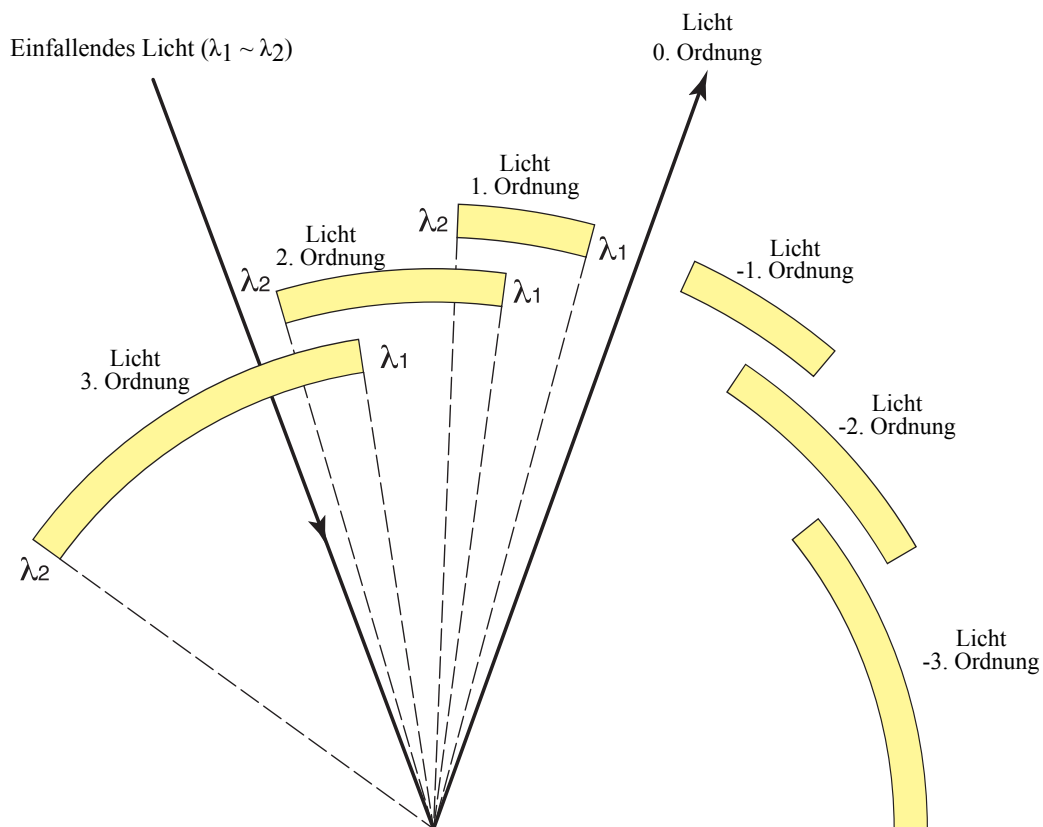


Abbildung 2.8: Darstellung der Beugungsordnungen und Überlagerung. Zu beachten ist die nullte Beugungsordnung, die das Licht nicht diffraktiv reflektiert [13].

abhängig von der Wellenlänge und dem Eintrittswinkel des Lichts [13].

Aus dieser Gleichung geht hervor, dass es einen nicht dispersiven, reflektierten Strahl der nullten Ordnung gibt. Außerdem überlagern sich verschiedene Ordnungen verschiedener Wellenlängen. So hat Licht der Wellenlänge λ der ersten Ordnung ($m=1$) denselben Austrittswinkel wie Licht

der Wellenlänge $\lambda/2$ der zweiten Ordnung ($m=2$). Diese Überlagerung ist eine intrinsische Eigenschaft des Gitters und ist in Abb. 2.8 schematisch dargestellt. Wie zu erkennen ist, können sich bei einfallendem Licht der Wellenlängen λ_1 bis λ_2 die verschiedenen Ordnungen der Reflexion überlagern.

2.4 Microchannel plate Detektor

2.4.1 Funktionsweise

Ein Microchannel plate Detektor oder MCP Detektor besteht aus kleinen, parallel angeordneten, angewinkelten Kapillaren, die als Photomultiplier dienen. An der Ober- und Unterseite des MCPs ist eine Spannung angelegt, wodurch die Kapillaren selbst als kontinuierliche Dynodenstruktur angesehen werden können. Der innere Widerstand des Materials stellt dabei eine kontinuierliche Spannungsteilerkette dar, wie in Abb. 2.9 skizziert ist.

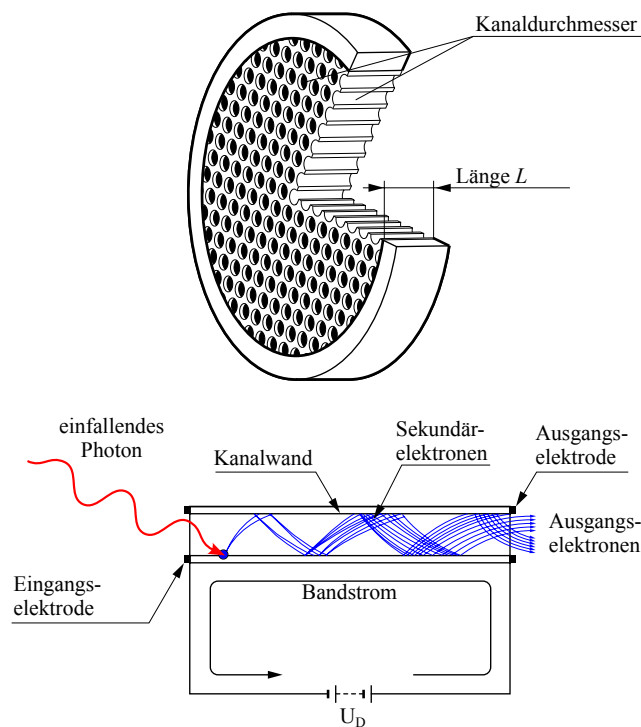


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines MCPs und der Funktionsweise der Kanäle als Photomultiplier [14].

Das Material besteht üblicherweise aus einem Bleiglas, das speziell behandelt wurde, um die Erzeugung von Sekundärelektronen zu maximieren. Zur Verbesserung der Effektivität werden in der Regel zwei MCPs, die vertikal gespiegelt sind, aufeinander gestapelt. Diese sog. Chevron Konfiguration erhöht die Aufprallfläche für Photonen und reduziert die Wahrscheinlichkeit für ein Photon die Anode direkt zu treffen. Ein MCP kann also ein einkommendes Photon in eine Elektronenlawine verwandeln [14].

2.4.2 Anode

Für die Detektion der Elektronenlawine wird im einfachsten Fall eine plane Metallanode verwendet. Ist eine orts aufgelöste Detektion der Photonen gewünscht, kann eine sog. Delay Line Anode (DLA) verwendet werden. Diese besteht aus zwei übereinander liegenden orthogonalen Leiterbahnen, die zusammen ein Gitter formen, sodass die ankommende Elektronenlawine als

Ladungssignal an beiden Enden der Leiterbahnen gemessen werden kann. Durch die bekannte Länge der Gitterdrähte und die gemessene Zeitdifferenz der Signale lässt sich die Position der Detektion bestimmen [15]. Dabei dient jedes Gitter der Auflösung der Raumrichtung, zu der es orthogonal ausgerichtet ist. Die Positionsbestimmung erfolgt dann nach den Formeln

$$x = f_x \cdot (t_{x2} - t_{x1}) - b_x = f_x \cdot \Delta t_x - b_x; \quad (2.6a)$$

$$y = f_y \cdot (t_{y2} - t_{y1}) - b_y = f_y \cdot \Delta t_y - b_y, \quad (2.6b)$$

mit den Kalibrationsfaktoren f_x, f_y und den spezifischen Offsets b_x, b_y .

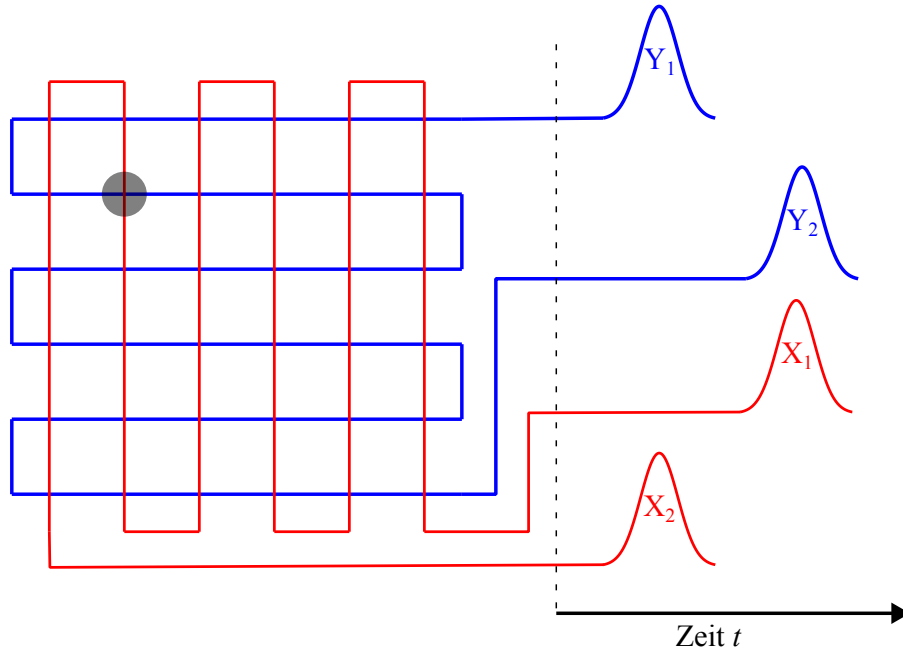


Abbildung 2.10: Funktionsweise einer Delay Line Anode. Die Position der Detektion lässt sich aus den Zeiten des Signals an den Enden der Gitter bestimmen.

Kapitel 3

Aufbau des Detektorsystems

Dieses Kapitel behandelt den Versuchsaufbau und die dafür genutzten Komponenten und Bauteile. Dies beinhaltet die Vakuumkammer, das darin enthaltene Spektrometer als Kernstück des Detektors, sowie die Röntgenquelle und Messelektronik. Die Entwicklung des Detektorkonzepts, sowie erste Tests einzelner Komponenten wurden im Rahmen mehrerer Master- und Bachelorarbeiten [3][4][5] sowie der Doktorarbeit von K. Ueberholz durchgeführt [6].

3.1 Der Fluoreszenzdetektor

Der Fluoreszenzdetektor soll die beim Laserkühlen entstehende Röntgenstrahlung energieaufgelöst messen können.

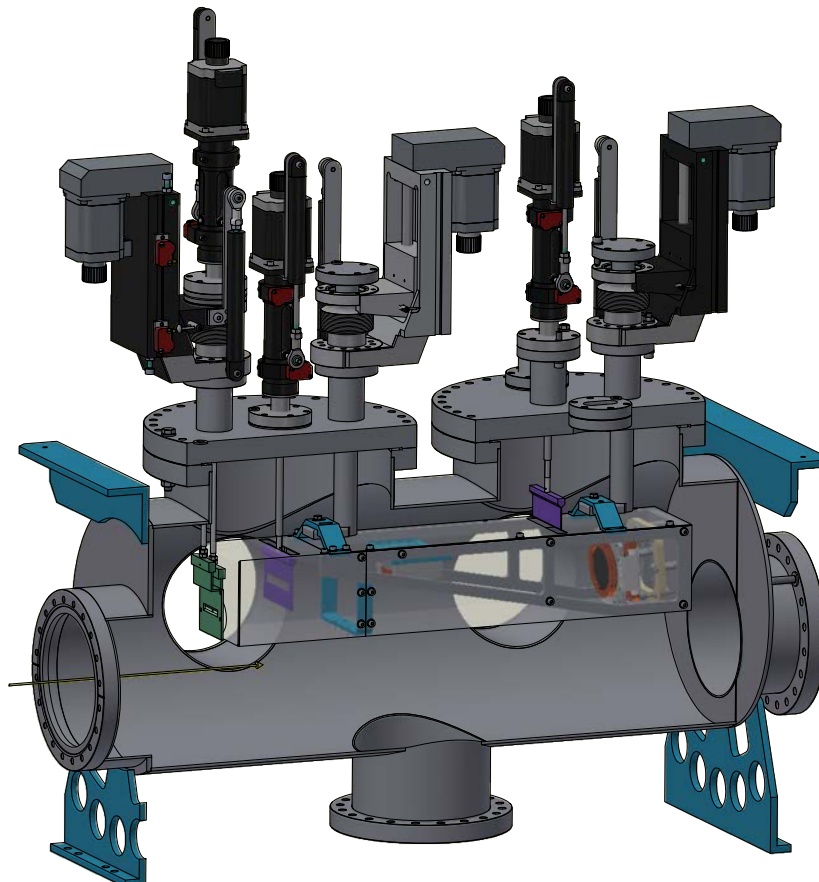


Abbildung 3.1: CAD-Zeichnung der Vakuumkammer. Der Strahlengang der Ionen ist eingezeichnet. Technische Zeichnung von Christian Huhmann.

Dafür wird ein entsprechendes Spektrometer entworfen und gebaut, dessen Komponenten mit Schrittmotoren höhenverstellbar sein sollen. Abb. 3.1 zeigt ein CAD-Modell der Vakuumkammer mit den Motoren und dem Spektrometer und dessen Komponenten.

Für den Test des Spektrometers an der Universität Münster wird eine Röntgenquelle genutzt, um die Fluoreszenzstrahlung zu ersetzen, dessen Aufbau in Abb. 3.7 zu sehen ist. Der Aufbau des Detektorsystems im Teststand ist in Abb. 3.2 gezeigt. Dabei sind alle Schrittmotoren und dazugehörigen Potentiometer (siehe Kapitel 3.4) angebracht. Weiterhin ist ein Rohrstück zur Verlängerung eingebaut, um den korrekten Winkel der Röntgenstrahlen auf das Spektrometer zu gewährleisten. Um die Untergrundstrahlung zu reduzieren, ist das Spektrometer von einem Hintergrundschild umgeben, das in Abb. 3.3 zu sehen ist. In der FAIR-Anlage wird das Spektrometer bei bis zu 10^{-12} mbar betrieben [16], jedoch erreicht der Aufbau an der Universität Münster aktuell nur einen Druck von 10^{-7} mbar, da aktuell noch mit Viton Dichtungen gearbeitet wird. Um das Vakuum in der Kammer zu erzeugen wird eine Kombination aus zwei Pumpen

Schrittmotoren und Potentiometer

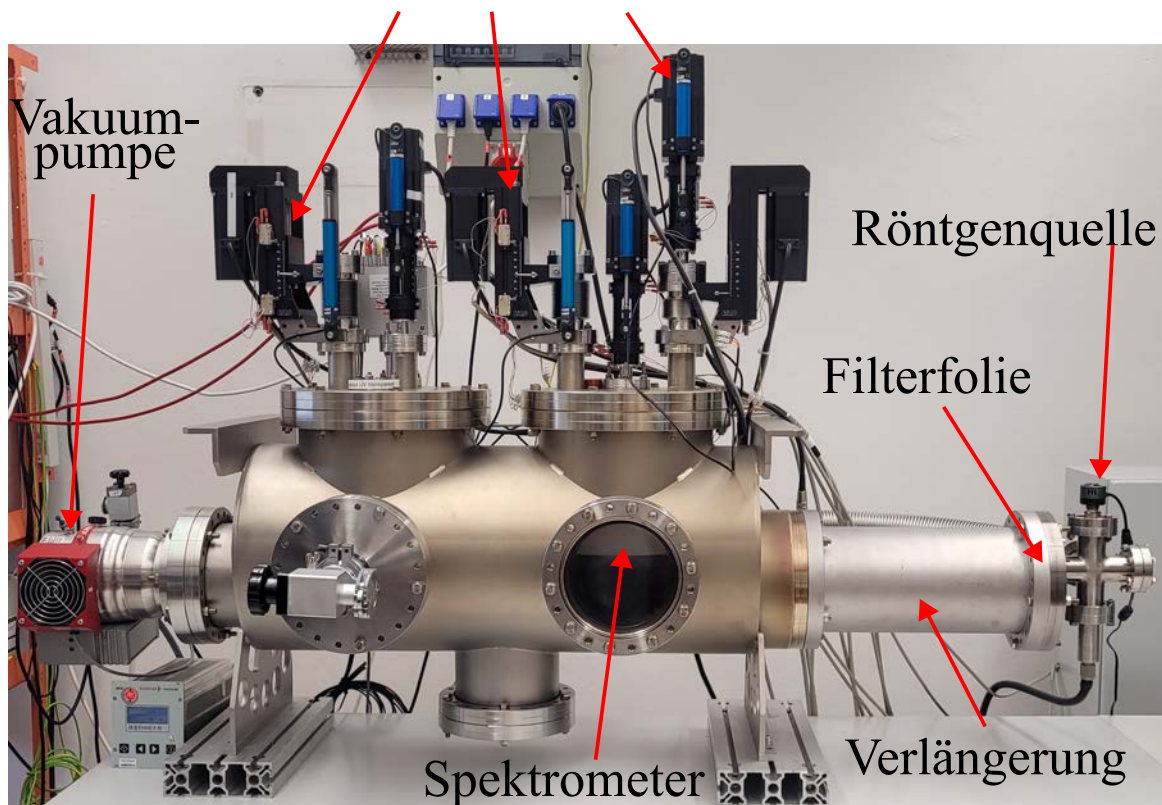


Abbildung 3.2: Die Vakuumkammer und die relevanten Bauelemente.

genutzt. Als Vorpumpe wird eine *Pfeiffer MVP 040-2* genutzt, die von Atmosphärendruck auf einige Millibar abpumpen kann und als Turbopumpe wird eine *Pfeiffer TC 400* eingesetzt, die ein Ultrahochvakuum von bis zu 10^{-9} mbar erreichen kann. Die Vorpumpe ist über eine Drossel an die Kammer angeschlossen, mit der die Abpumpgeschwindigkeit gesteuert werden kann, damit die eingebaute, dünne Aluminiumfolie zur Abschirmung von UV Untergrundstrahlung aus der Röntgenquelle nicht reißt (siehe Kapitel 3.3). Zur Messung des Drucks wird eine *IONIVAC ITR 90* Druckmessröhre von *Leybold* verwendet.

Alle Komponenten des Spektrometers selbst sind über Lineardurchführungen an Schrittmotoren und dazugehörigen Linearpotentiometern angebracht. Insgesamt sind sechs Motoren und Potentiometer verbaut, die mit einer von N. Nefigmann entwickelten Software angesteuert und

ausgelesen werden können [5].

3.2 Spektrometer

Das Spektrometer besteht aus mehreren Komponenten, wie die CAD Zeichnung in Abb. 3.3 zeigt.

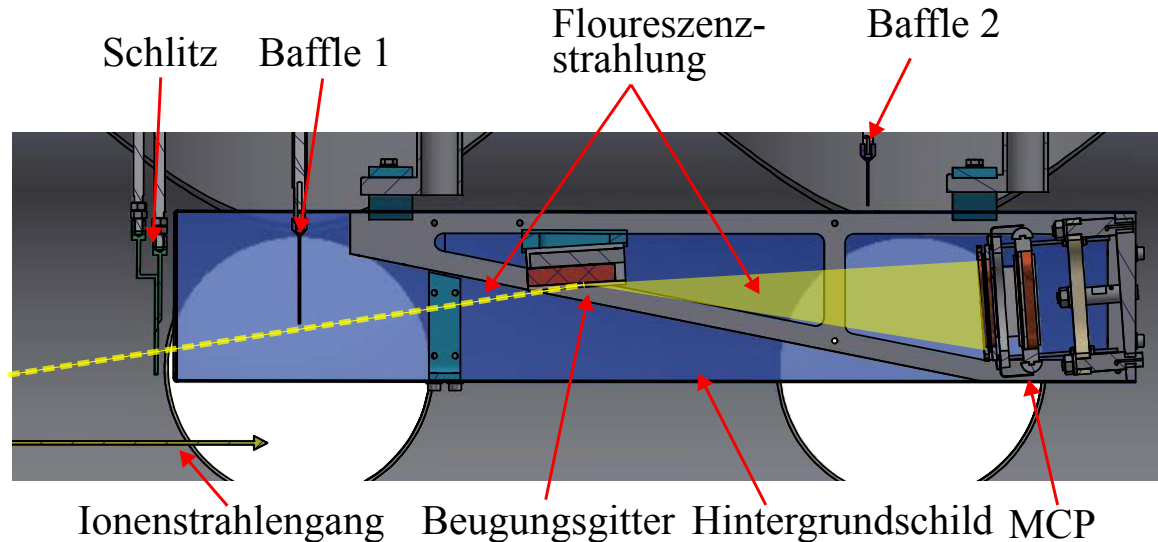


Abbildung 3.3: CAD Zeichnung des Spektrometers mit Beschriftung der Komponenten. Technische Zeichnung von Christian Huhmann.

Das Beugungsgitter ist dabei zentraler Teil dieses Aufbaus und ermöglicht die energieauflösende Aufspaltung der Röntgenstrahlung. Da die Röntgenstrahlung diffus auf das Spektrometer trifft, ist ein Schlitz mit variabler Öffnungsbreite notwendig, um zu gewährleisten, dass ein gezielter Röntgenstrahl im passenden Winkel auf das Beugungsgitter trifft. Dieser Schlitz lässt sich außerdem in der Position variieren, was Messungen in verschiedenen Höhen des Spektrometers ermöglicht. Die Motoren der Schlitzbreite und -position sind so gesteuert, dass die Position der Schlitzmitte - die auch als Schlitzposition definiert wird - sich beim Öffnen und Schließen nicht ändert. Eine erste Blende (auch Baffle 1 genannt) schirmt Strahlen ab, die nicht unter dem richtigen Winkel auf das Gitter fallen und verhindert somit vor allem die direkte Einstrahlung auf den MCP. Ein zweites Baffle dient zur Abschirmung aller direkten Reflexion am Gitter (nullte Ordnung), da diese nicht energieaufgelöst ist und die anderen Ordnungen überstrahlt.

Betriebsmodi

Es ist wichtig, dass das Spektrometer verschiedene Positionen einnehmen kann, da der Detektor am SIS100 in der Lage sein muss, verschiedene Messungen durchzuführen und dafür folgende Betriebsmodi besitzen soll:

- **Fluoreszenzdetektion:** Das Spektrometer wird auf 30 mm an den Ionenstrahl herangefahren. Der Schlitz und die Baffle werden hochgefahren, sodass die Photonen der Fluoreszenzstrahlung direkt auf den MCP treffen und so mit großer Akzeptanz gezählt werden können.

- **Spektroskopie:** Das Spektrometer wird auf 30 mm an den Ionenstrahl herangefahren. Der Schlitz und die Baffle werden in die korrekten Positionen gefahren, um direkte Strahlung und Reflexion nullter Ordnung auf den MCP abzuschirmen. Im Spektroskopiemodus wird die Fluoreszenzstrahlung mit geringer Akzeptanz energieaufgelöst detektiert.
- **Leerlauf:** Das Spektrometer und alle Komponenten werden aus dem Durchmesser des Strahlrohrs (150 mm) herausgefahren.

Beugungsgitter

Als Beugungsgitter wird ein *L2400-1-7* laminares Replikagitter Beugungsgitter von *Shimadzu* verwendet. Dies stellt mit dem Anwendungsbereich von 1 nm bis 7 nm Wellenlänge und der Goldbeschichtung ein geeignetes, vorläufiges Gitter für diesen Aufbau dar. In der FAIR Anlage soll ein Mastergitter mit denselben Spezifikationen verwendet werden, das im Gegensatz zu dem hier verwendeten Gitter für den Vakuumbetrieb ausheizbar ist. Die Spezifikationen und optimalen Installationsparameter des Gitters sind von der Webseite des Herstellers entnommen, in Tabelle 3.1 aufgeführt und in Abb. 3.4 ist die Geometrie der Spektroskopie unter streifendem Einfall dargestellt. Der kleine Einfallswinkel ist notwendig, da die Reflektivität von Gold für Röntgenstrahlen mit zunehmendem Winkel stark abnimmt (siehe Abb. 3.5).

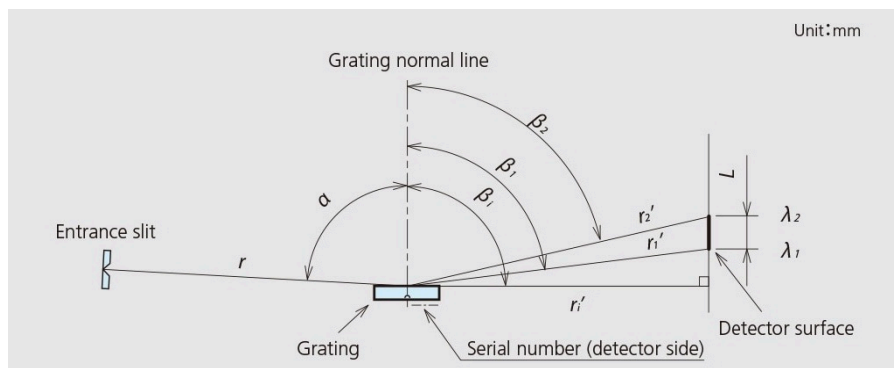


Abbildung 3.4: Installationsdiagramm des Gitters [17].

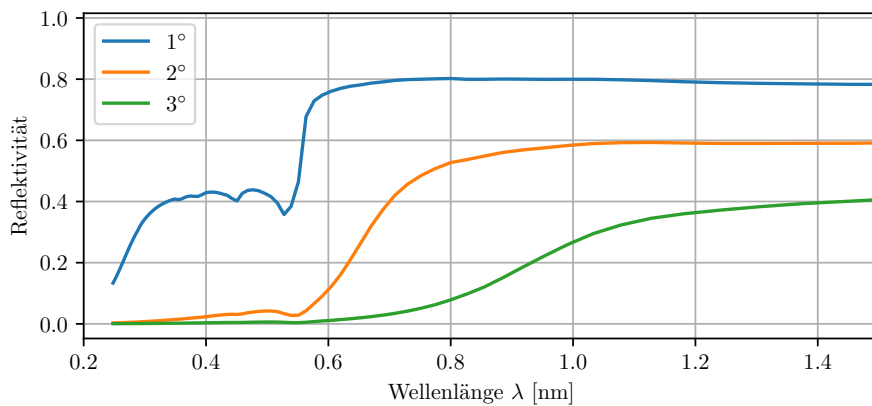


Abbildung 3.5: Reflektivität eines Goldspiegels für verschiedene Einfallswinkel und Wellenlängen. Für höhere Winkel ist ein Abfall der Reflektivität zu kurzen Wellenlängen zu erkennen [18].

Code Number		Rillendichte N (1/mm)	Wellenlänge Range		Bildgröße L (mm)	Dimensionen BxHxT (mm)	Beschichtungs- material
Neu	Alt		$\lambda_1 - \lambda_2$ (nm)				
L2400-1-7	30-003	2400	1-7		26,8	50x30x10	Au
Installationsparameter							
r (mm)	α (°)	r'_1 (mm)	β_1 (°)	r'_2 (mm)	β_2 (°)	r_i (mm)	β_i (°)
236,7	88,60	235,8	85,79	239,5	79,39	235,0	90,53

Tabelle 3.1: Gitterspezifikationen und Installationsparameter [17].

MCP

Zur Detektion der Photonen wird ein *DLD40* Detektor von *RoentDek* genutzt, der in Abb. 3.6 zu sehen ist. Dieser besteht aus zwei MCPs in der Chevron-Konfiguration und einer DLA, mit der das Signal in zwei Dimensionen orts aufgelöst erfasst werden kann.

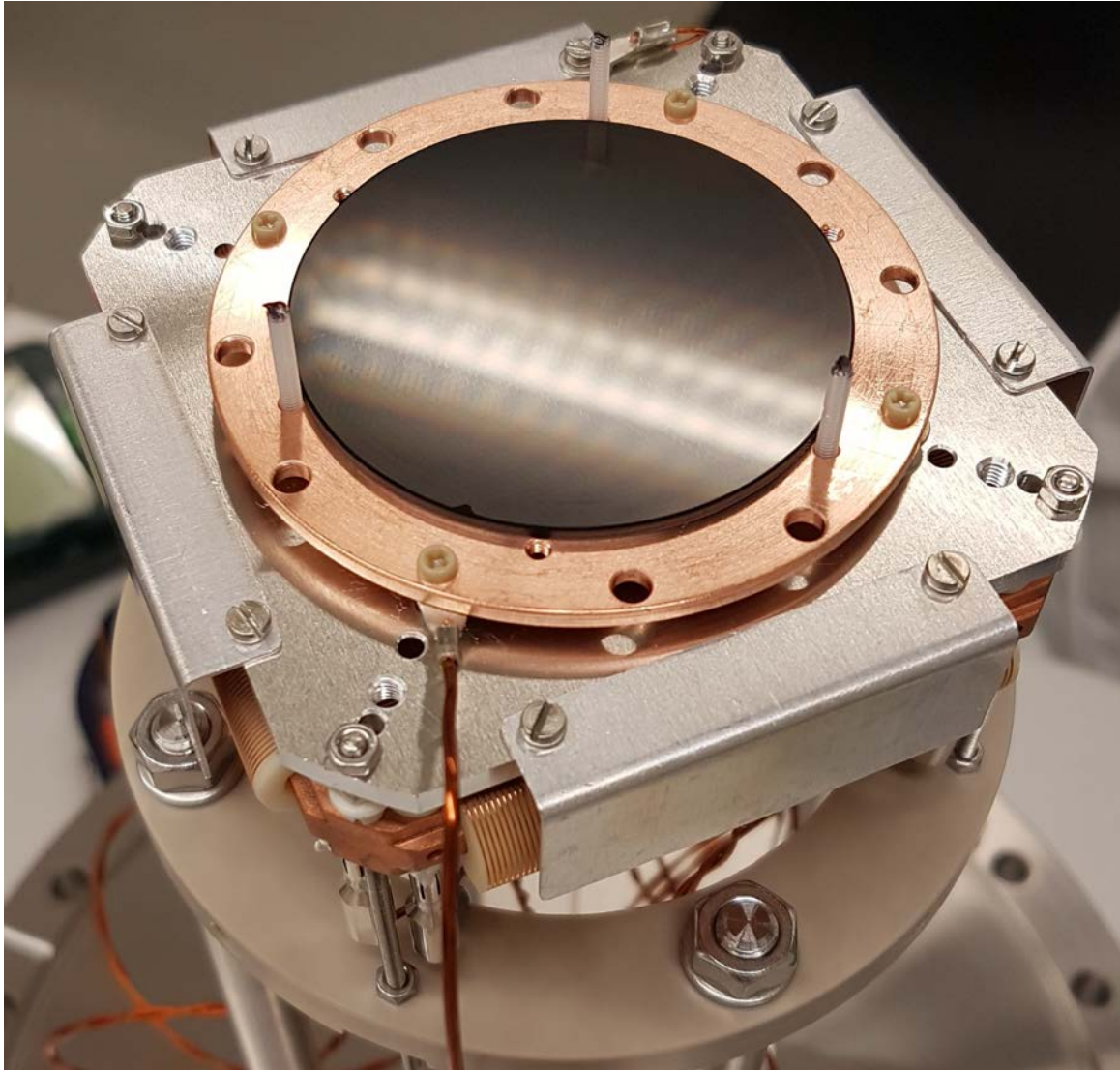


Abbildung 3.6: Der genutzte *DLD40* MCP Detektor von *RoentDek* in der Halterung des Spektrometers.

Der MCP wird mit einer Hochspannung von 2400 V betrieben. Dabei hat die Vorderseite (front) ein Potential von -2400 V, die Rückseite (back) des MCPs ein Potential von -267 V und die

Anode liegt auf +255 V [15]. Der MCP und die DLA sind über einen Durchführungsflansch an die Elektronik angeschlossen, die zur Weiterverarbeitung der Signale dient (siehe Kapitel 3.5).

3.3 Röntgenquelle

Als Röntgenquelle wird das Modell 642-1 von *McPherson* mit auswechselbarer Anode genutzt. Für die ersten Kalibrationstests wird eine Magnesium (Mg)- und eine Aluminium (Al)-Anode verwendet, die in einer Halterung angebracht sind, die möglicherweise aus Kupfer besteht. Ein Bild der Röntgenquelle ist in Abb. 3.7 zu sehen.

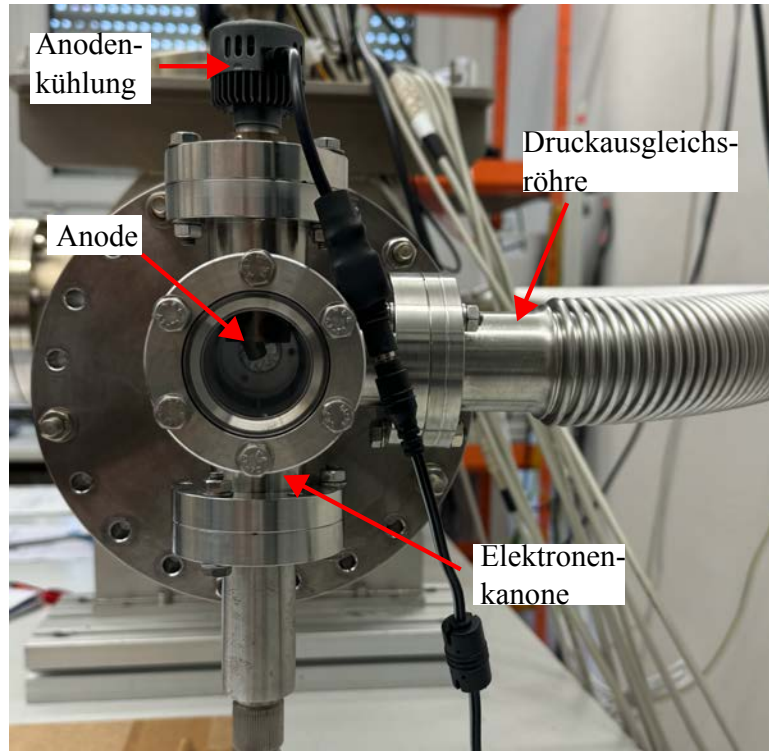


Abbildung 3.7: Der Aufbau der 642-1 Röntgenquelle von *McPherson*.

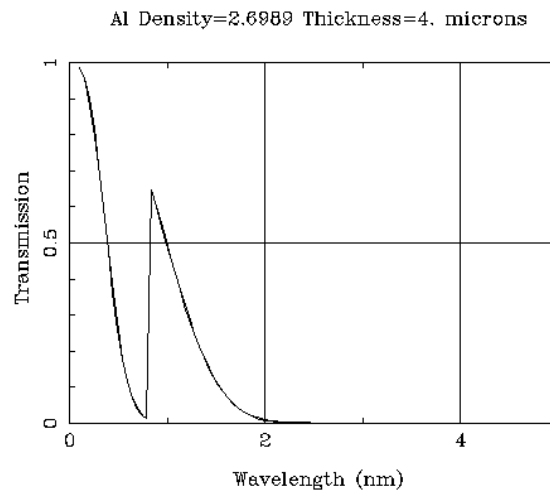


Abbildung 3.8: Die Transmissionskurve der 4 μm dicken Filterfolie aus Aluminium [19].

Die Röntgenquelle wird mit einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 2,5 \text{ kV}$ betrieben und kann mit einer Stromstärke von 0 bis 1000 μA in 25 μA Schritten betrieben werden. Um

Untergrundphotonen im UV-Bereich zu absorbieren, ist zwischen der Röntgenquelle und der Vakuumkammer eine Filterfolie aus Aluminium mit einer Dicke von $4\text{ }\mu\text{m}$ angebracht. Das Transmissionsverhalten dieser Folie ist in Abb. 3.8 dargestellt und zeigt, dass diese Folie Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda \gtrsim 2\text{ nm}$ (quasi) vollständig absorbiert. Da diese Folie die Röntgenquelle vom Rest der Vakuumkammer abschneidet, ist ein Druckausgleich über ein Wellrohr mit der Vakuumkammer nötig. Um die Folie nicht zu beschädigen, muss der gewünschte Druck hinreichend langsam erreicht werden, damit ein gleichmäßiger Druckabfall gewährleistet ist.

3.4 Schrittmotoren und Linearpotentiometer

Die Schrittmotoren dienen dazu, die Komponenten des Spektrometers in die gewünschte Position zu bringen. Dafür werden sechs *PK569AWM 5-Phasen Schrittmotoren* von *Orientalmotor* verwendet, die an Lineardurchführungen der Firma *VAB* () angebracht sind. Dabei sind die Motoren für den Hintergrundschild und der Schlitzposition an Lineardurchführungen des Typs *LD 40-75 S2* angebracht und die Motoren der Blenden sowie der Motor der Schlitzbreite an Lineardurchführungen des Typs *MLS 40-50 S2* angebracht.

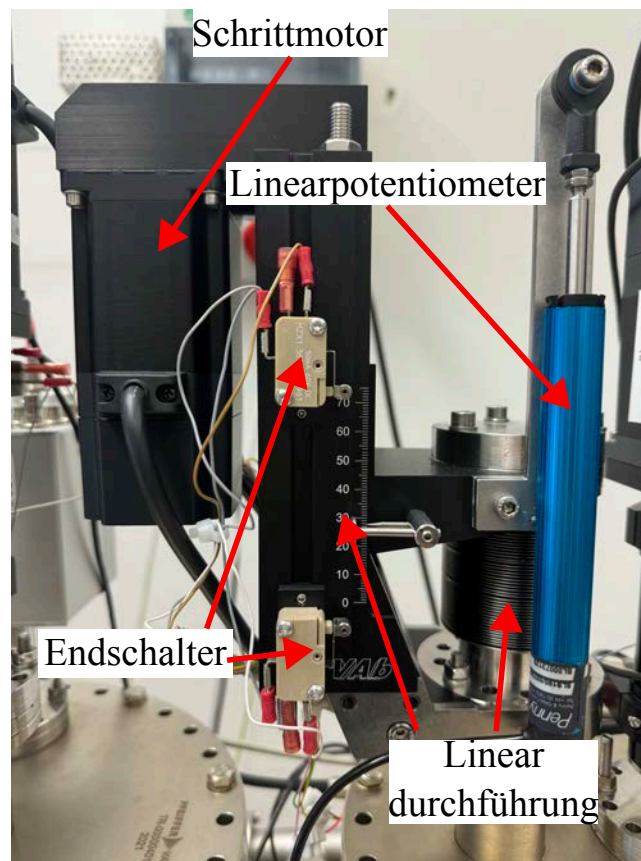


Abbildung 3.9: Schrittmotor und Linearpotentiometer Background shield 1 (BS1) mit Beschriftung.

Der Aufbau ist exemplarisch an einem Motor des Hintergrundschildes in Abb. 3.9 dargestellt. Da die Schrittmotoren keine absolute Positionsbestimmung haben, sondern nur eine gelaufene Schrittzahl, wird die absolute Position durch zwei Systeme ermittelt. Zum einen wird eine *Homeposition* definiert, bei der der Motor an den oberen Endschalter fährt und nach Betätigung eine gewisse Anzahl an Schritten wieder zurück fährt. Damit wird die Homeposition als 0 mm-Position definiert und ist reproduzierbar anfahrbar [5]. Zum anderen ist ein Linearpotentiometer an jedem Motor angebracht, dessen Auslenkung über den gemessenen Spannungsabfall

und der Referenzspannung auszulesen ist. Diese Potentiometer dienen als redundantes System, da die Motoren potentiell Schritte überspringen können. Des Weiteren besitzen die Schrittmotoren eine elektronische Bremse, die immer greift und für eine Fahrt gelöst wird (Modus 0) oder durchgehend gelöst ist (Modus 1). Die Bremse ist so gebaut, dass ein Strom fließen muss, um sie zu lösen.

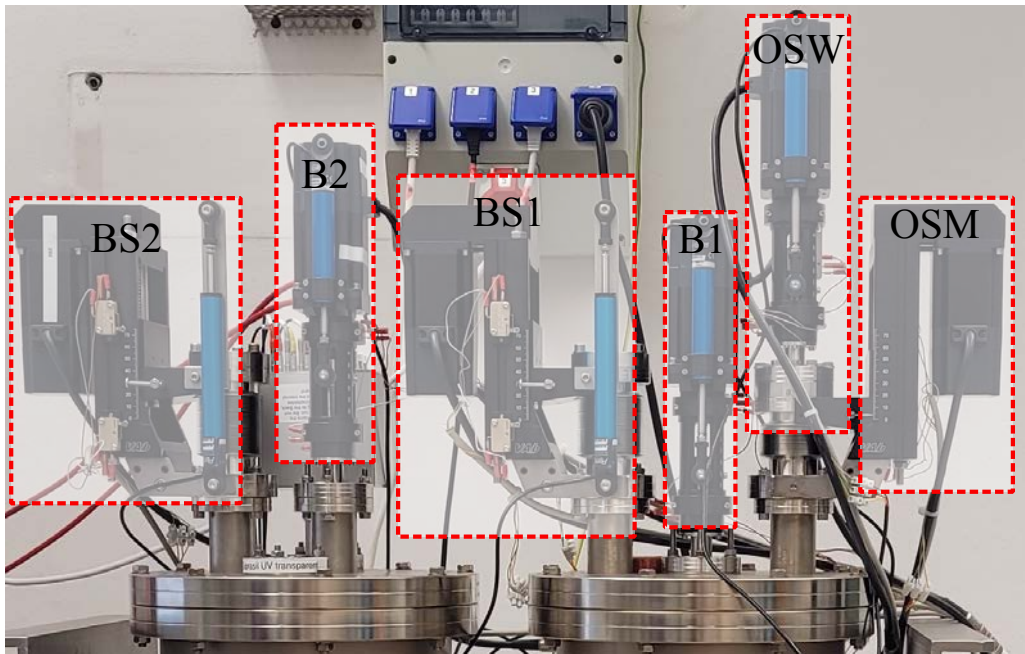


Abbildung 3.10: Bezeichnung und Abkürzungen der einzelnen Motoren und Potentiometer

Für diese Arbeit werden die Motoren und zugehörigen Potentiometer gemäß Abb. 3.10 benannt:

- **BS1** : Background shield 1 (in Abbildung rechts)
- **BS2** : Background shield 2 (in Abbildung links)
- **OSW** : Optical Slit Width (zur Einstellung der Schlitzbreite)
- **OSM** : Optical Slit Movement (zur Einstellung der Schlitzposition)
- **B1** : Baffle 1
- **B2** : Baffle 2

Außerdem wird für die Ausführung der Return-to-Home Funktion die Abkürzung „**RtH**“ verwendet. Eine Position bei n mm wird **n -mm-Position** genannt. Dabei wird von der Home-Position aus gemessen, die dementsprechend als 0-mm-Position definiert ist.

3.5 Messelektronik

Im Folgenden wird die genutzte Messelektronik kurz erklärt. Es wird auf die Datenauslese und Ansteuerung der Potentiometer und Motoren sowie auf die Datenakquise des MCPs und der DLA eingegangen. Zudem wird die Datenverarbeitung der DLA erklärt.

3.5.1 Potentiometer und Motoren

Für die Ansteuerung und Auslese der Schrittmotoren und Potentiometer wird ein Schaltschrank verwendet, der die Controller der Schrittmotoren und deren Netzteile enthält, sowie einen *Raspberry Pi* Computer, der für die Steuerung des Aufbaus, die Auslese der Sensoren und Betätigung der Bremse zuständig ist. Zur Bedienung wird die von N. Nefigmann entwickelte Software genutzt [5]. Ein Screenshot ist in Abb. 3.11 zu sehen. In diesem Programm lassen

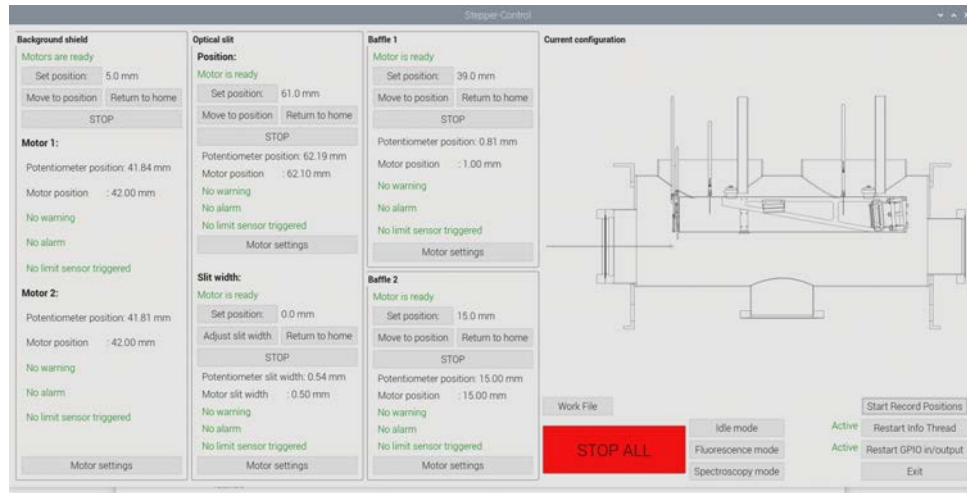


Abbildung 3.11: Screenshot der von N. Nefigmann entwickelten Software zur Bedienung und Auslese der Schrittmotoren und Potentiometer [5].

sich die Motoren auf eine gewünschte Position fahren und dabei die Potentiometer- und Motorposition auslesen. Das Programm verfügt ebenfalls über eine sog. Workfile Funktion, bei der die Motoren eine Reihe an Positionen abfahren und diese eine vorgegebene Zeit halten. Damit lassen sich Messungen zur Kalibration der Potentiometer und des Spektrometers durchführen. Eine detaillierte Erklärung ist in [5] zu finden.

3.5.2 MCP und DLA

An den Detektor ist ein Signalkoppler angeschlossen, der sowohl Hochspannung für den MCP liefert, als auch die Weiterverarbeitung der Signale des Detektors ermöglicht, die aus einem Signal des MCPs und vier Signalen der DLA (t_{x1} , t_{x2} , t_{y1} , t_{y2}) besteht. Ein Schaubild der Messelektronik des MCPs und der DLA ist in Abb. 3.12 dargestellt.

Alle Signale werden verstärkt und dann jeweils in einen Contant Fraction Discriminator (CFD) gegeben. Dieser wandelt die analogen Signale des MCP und der DLA in NIM logische Signale um, die mit dem Time-to-Digital Converter (TDC) kompatibel sind. Der TDC konvertiert die Zeitinformationen zwischen einem Start- und einem Stoppsignal in digitale Signale, die per Computer ausgewertet werden können. Dafür wird das MCP Signal als Startsignal und die Signale der DLA als Stoppsignale für die respective Zeit genutzt. Dieser zeitliche Unterschied erfordert eine Verzögerung der DLA Signale. Die TDC Signale lassen sich am Computer mithilfe der FPPGUI Software - entwickelt von Volker Hannen und Fred Zwarts - grafisch darstellen und in verschiedenen Formaten speichern. Die elektronischen Bauteile sind in Abb. 3.13 abgebildet und beschriftet.

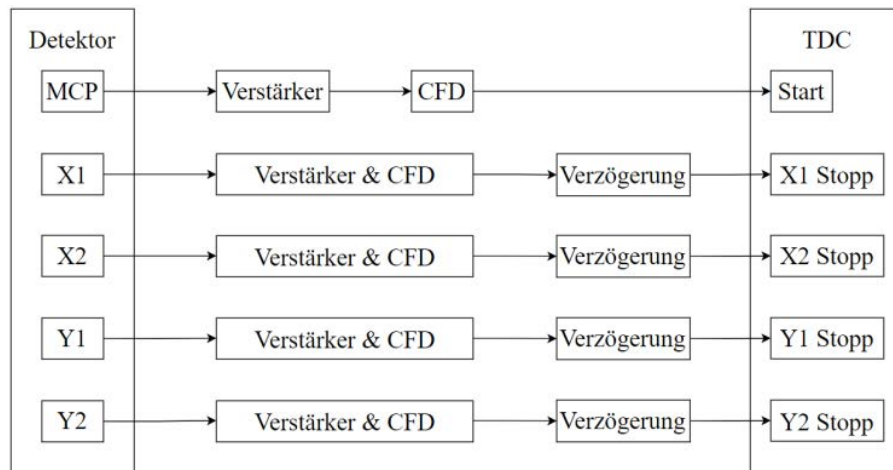


Abbildung 3.12: Schaubild der Messelektronik des MCPs und der DLA [4].

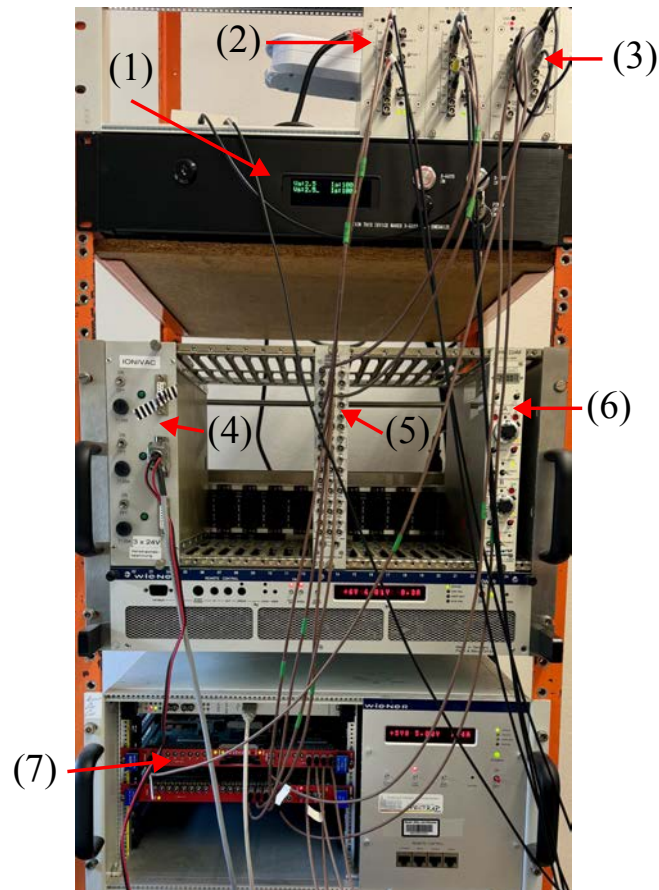


Abbildung 3.13: Elektronik: (1) Stromversorgung Röntgenquelle, (2) RoentDek ATR19-2b Verstärker und CFD, (3) RoentDek CFD1x, (4) Stromversorgung Druckmessröhre, (5) GSI GG8000 Octal Gate generator, (6) Hochspannungsmodul iseg NHQ 224M, (7) CAEN V775N TDC.

Kapitel 4

Messungen

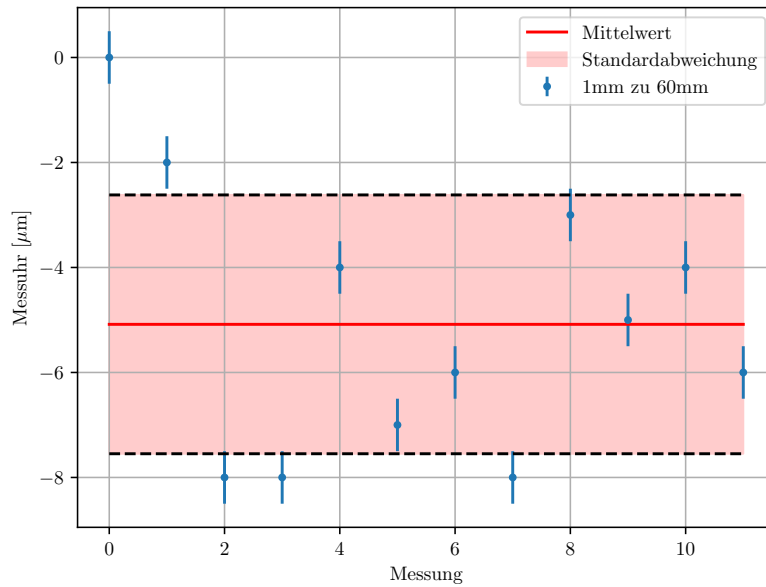
Diese Kapitel behandelt die durchgeführten Messungen zur Kalibration der Schrittmotoren, sowie zum Testen des Fluoreszenzdetektors. Die Schrittmotoren werden dabei auf Reproduzierbarkeit getestet und ein auftretendes Driftverhalten untersucht. Des Weiteren werden für die Potentiometer Kalibrierfunktionen erstellt, die die Positionsbestimmung mithilfe der Potentiometer präziser werden lässt. Der zweite Teil befasst sich mit Messungen zur der Funktionalität des finalen Aufbaus des Fluoreszenzdetektor. Insbesondere wird getestet, ob sich mit dem Spektrometer Röntgenstrahlung zuverlässig energieaufgelöst detektieren lässt.

4.1 Schrittmotoren und Potentiometer

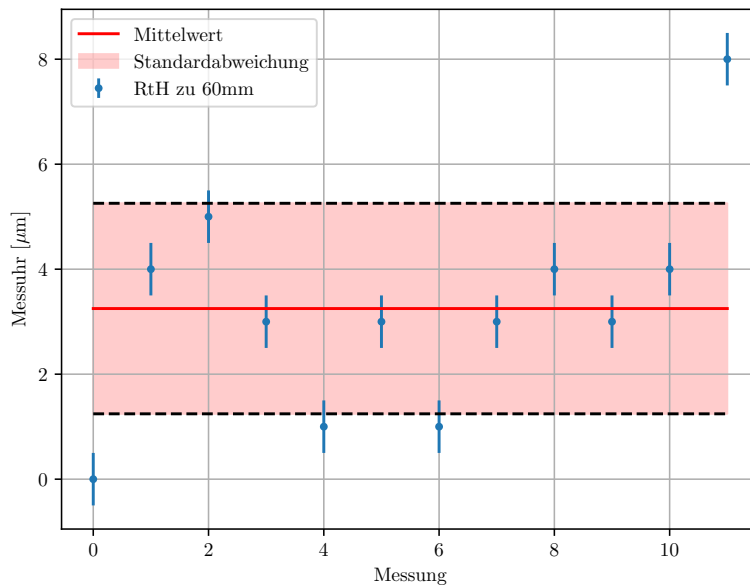
In der Bachelorarbeit von N. Nefigmann wurde bereits gezeigt, dass die Motoren verschiedene Positionen ohne Last reproduzierbar anfahren können [5]. Da der Hintergrundschild mit dem Rahmen für Detektor und Gitter das schwerste Bauteil darstellt, wird diese Reproduzierbarkeit mit angehängtem Hintergrundschild geprüft. Es wird ebenfalls getestet, ob die Schrittmotoren mit dieser Last die Positionen halten können. Die Potentiometer zeigen beim Anfahren einer Position ein Einlaufverhalten, sowie Abweichungen von der Linearität der Auslese. Daher wird eine Korrekturfunktion erstellt, mit der die Positionen der Schrittmotoren genauer über die Potentiometer bestimmt werden können.

4.1.1 Reproduzierbarkeit der Positionsansteuerung unter Last

Um die Reproduzierbarkeit der Positionsansteuerung unter Last zu testen, werden am selben Testaufbau wie in der Bachelorarbeit von N. Nefigmann die beiden Motoren BS1 und BS2 installiert und der Hintergrundschild angehängt. Dieser wird dann mehrfach hintereinander von der höchsten Position des Leerlaufmodus (1 mm) auf die Position im Spektroskopiernodus (60 mm) gefahren. Es wird dabei eine Messuhr mit einer Ablesegenauigkeit von $1\text{ }\mu\text{m}$ und damit mit einer Unsicherheit von $\pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ so positioniert, dass der Hintergrundschild auf der 60-mm-Position die Uhr leicht auslenkt. Sollte der Hintergrundschild bei jeder Anfahrt auf die 60-mm-Position die Uhr gleich auslenken, so ist die Positionsansteuerung reproduzierbar. Die absolute Auslenkung der Messuhr ist dabei für die Reproduzierbarkeit nicht relevant, weshalb die Auslenkung relativ zum ersten Wert gemessen wird. Diese Messung wird außerdem so wiederholt, dass der Hintergrundschild nicht auf die 1-mm-Position fährt, sondern die RtH Funktion ausführt, um deren Reproduzierbarkeit zu prüfen. Die Bremse ist für alle Messungen im Modus 0, löst sich also für die Fahrt der Motoren und greift bei den Zielpositionen. Die Messungen der 60-mm-Position sowie der Mittelwert und die Standardabweichung der Auslenkungen sind in Abb. 4.1 aufgetragen. Zwischen der 1-mm-Messung und der RtH-Messung musste die Messuhr neu positioniert werden.



(a) 1mm -> 60mm



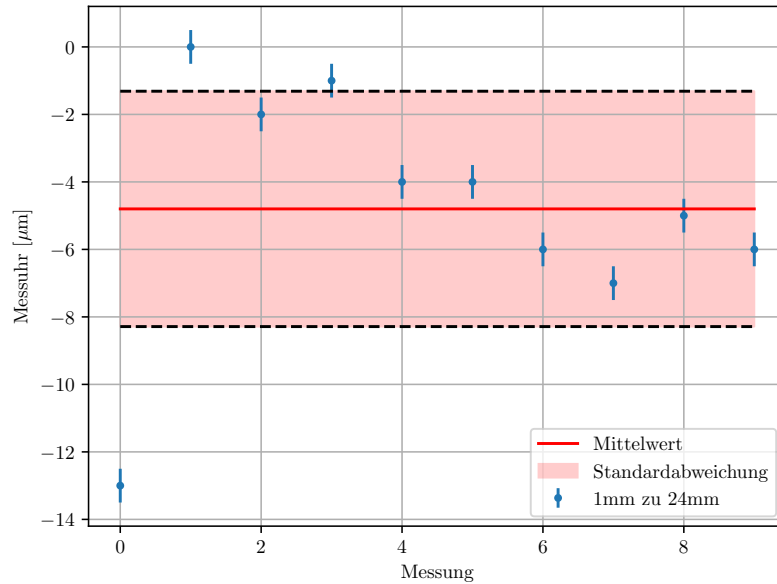
(b) RtH -> 60mm

Abbildung 4.1: Messung zur Reproduzierbarkeit der Positionsansteuerung unter Last. Es wird von der 1-mm-Position (a) und mit der RtH-Funktion (b) auf die 60-mm-Position gefahren und die Auslenkung einer Messuhr gemessen. Die Auslenkung ist relativ zum ersten Wert in beiden Messungen separat genullt. Es ergibt sich ein Mittelwert von $-5,1 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $2,5 \mu\text{m}$ für die 1-mm-Messung und ein Mittelwert von $-3,25 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $2 \mu\text{m}$ für die RtH-Messung.

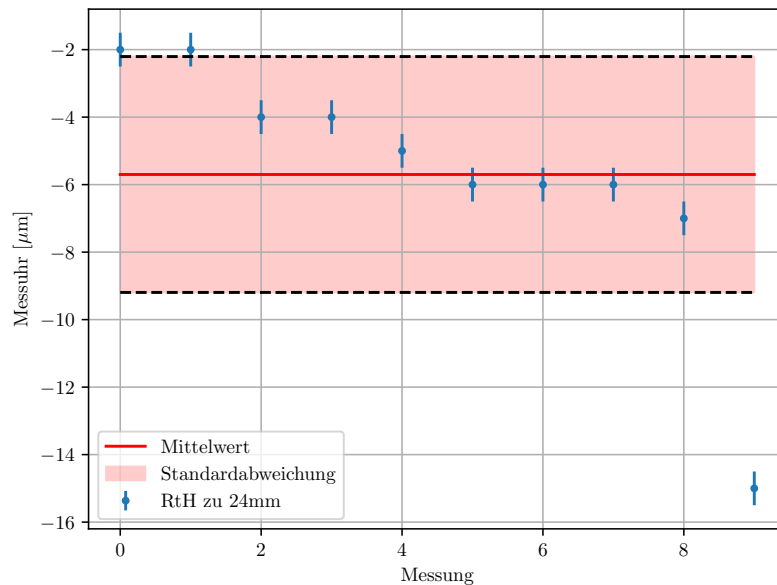
Wird von der 1-mm-Position auf die 60-mm-Position gefahren, so ergibt sich ein Mittelwert der Auslenkung von $-5,1 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $2,5 \mu\text{m}$. Bei der RtH-Messung zur 60-mm-Position ist relativ zum ersten Messpunkt eine Abweichung nach oben zu erkennen. Der Mittelwert der Auslenkung beträgt $3,25 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $2,0 \mu\text{m}$.

Es ist kein klarer Trend der Messwerte zu erkennen.

Damit ist die Anfahrt auf die 60-mm-Position mit der RtH Funktion genauer als von der 1-mm-Position aus. In beiden Fällen ist die Reproduzierbarkeit der Positionsanfahrt deutlich genauer als die geforderten $\pm 10 \mu\text{m}$.



(a) 1mm -> 24mm



(b) RtH -> 24mm

Abbildung 4.2: Messung zur Reproduzierbarkeit der Positionsansteuerung unter Last auf die 24-mm-Position von der 1-mm-Position aus (a) und mit der RtH-Funktion (b). Die Auslenkung der Messuhr ist relativ zum zweiten Wert in (a) gemessen. Für beide Messungen ergibt sich eine Standardabweichung von $3,5 \mu\text{m}$. Bei beiden Messungen ist ein Abwärtstrend sichtbar.

Da der Hintergrundschild nicht nur die 60-mm-Position reproduzierbar anfahren soll, werden diese Messungen für eine beliebige Position (24 mm) wiederholt und sind in Abb. 4.2 dargestellt.

Bei dieser Messung wird die Uhr zwischen der 1-mm- und der RtH-Messung nicht neu positioniert. Der erste Wert der 1-mm-Messung stellt mit einer Abweichung von $(8,2 \pm 0,5) \mu\text{m}$ zum zweiten Wert den größten Ausreißer dar. Aus diesem Grund wird nicht dieser Wert, sondern der zweite Wert als Nullpunkt der Auslenkung genommen. Es ergibt sich ein Mittelwert von $-4,8 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $3,5 \mu\text{m}$.

Bei der RtH-Messung liegt mit dem letzten Wert ebenfalls ein Ausreißer mit einer Auslenkung von $(15 \pm 0,5) \mu\text{m}$ vor. Der Mittelwert der Auslenkung beträgt $-5,7 \mu\text{m}$ und besitzt eine Standardabweichung von $3,5 \mu\text{m}$.

In beiden Messungen ist ein ähnlicher Abwärtstrend wie in der Bachelorarbeit von N. Nefigmann zu erkennen. Es wird vermutet, „dass der ausrichtbare Hebelarm der Messuhr durch die aufeinanderfolgenden Messungen leicht nach unten verstellt wurde“[5]. In beiden Fällen ist die Reproduzierbarkeit deutlich genauer als die geforderten $\pm 10 \mu\text{m}$.

Die Standardabweichung ist damit bei allen Messungen größer als die in der Bachelorarbeit von N. Nefigmann ermittelten Standardabweichung von $1,07 \mu\text{m}$, liegt aber immer innerhalb der gewünschten $\pm 10 \mu\text{m}$. Diese größere Abweichung ist durch die angehängte Last des Hintergrundschildes zu erklären.

4.1.2 Driftverhalten der Linearpotentiometer

Da die Potentiometer in der Arbeit von Niklas Nefigmann ein gewisses Driftverhalten zeigten, wird dies hier nochmal für die Hintergrundschildpotentiometer mit angehängter Last untersucht. Dabei wird zwischen einem Kurzzeit- ($\sim 1.800\text{s}$) und einem Langzeitverhalten ($\sim 4\text{ d}$) unterschieden.

Kurzzeitverhalten

Das Kurzzeitverhalten oder Einlaufverhalten wird untersucht, indem der Hintergrundschild in der Vakuumkammer von der 0-mm-Position auf die 10-mm-Position gefahren wird und dort 1.800 s gehalten wird. Dabei ist die Bremse im Modus 0.

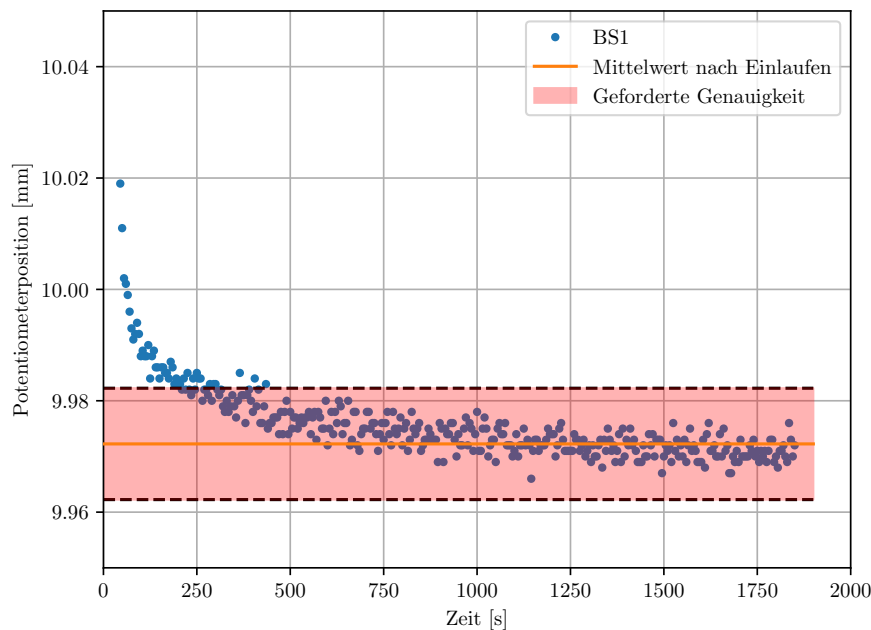


Abbildung 4.3: Das Einlaufverhalten des BS1 Potentiometers. Der Motor ist von der 0-mm-Position auf die 10-mm-Position gefahren und hat diese für 1.800 s gehalten. Die Bremse ist im Modus 0. Nach $\sim 750\text{ s}$ ist das Driftverhalten fast vollständig verschwunden. Die Werte ab 750 s haben einen Mittelwert von $\mu = (9,972 \pm 0,002)\text{ mm}$. Um diesen Mittelwert ist ein Intervall der geforderten $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ Genauigkeit gelegt. Nach $\sim 500\text{ s}$ liegen alle Werte innerhalb dieses Intervalls. Es ist ein Drift vom ersten Wert, der bei 10,019 mm liegt, bis zum Ausklingen des Potentiometers von $47\text{ }\mu\text{m}$ erkennbar.

In Abb. 4.3 ist die Potentiometerposition gegen die Zeit aufgetragen.¹ Es ist ein eindeutiges Einlaufverhalten festzustellen. Beim BS1 Potentiometer ist nach etwa 750 s kein Driftverhalten mehr zu erkennen und der Mittelwert beträgt $\mu = (9,972 \pm 0,002)\text{ mm}$. Nach 500 s Einlaufzeit stabilisiert sich die Potentiometerauslese innerhalb eines $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ Intervalls. Der erste Wert zeigt die größte Abweichung mit einer Position von 10,19 μm . Damit lässt sich die Position mithilfe des BS1 Potentiometers auf $47\text{ }\mu\text{m}$ genau bestimmen. Es wird damit für alle Potentiometer eine Positionsgenauigkeit von $50\text{ }\mu\text{m}$ angenommen.

Dieses Einlaufverhalten kann entweder ein Effekt der Motoren sein und der Hintergrundschild sinkt der Zeit ab oder nur ein Effekt der Potentiometer und der Hinterschild bleibt stationär. Um

¹Es wird die Kalibration aus der Bachelorarbeit von N. Nefigmann zur Positionsbestimmung aus der Potentiometerspannung genutzt, was das Driftverhalten aber nicht erklärt

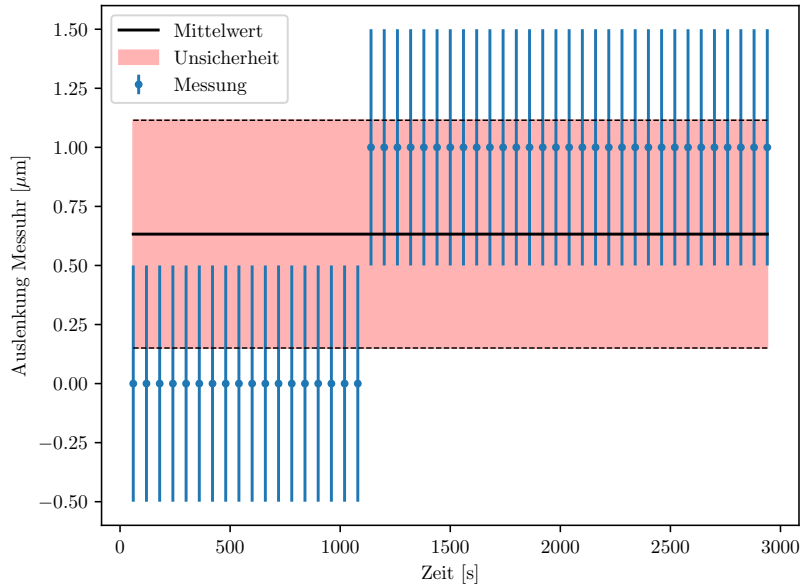


Abbildung 4.4: Die Auslenkung der Messuhr über ein 2940 s Intervall. Die Auslenkung ist auf den ersten Wert normiert. Die Bremse ist eingeschaltet und die Uhr besitzt eine Ablesegenauigkeit von $1 \mu\text{m}$. Nach 1.080 s wird eine Auslenkung von $(1 \pm 0,5) \mu\text{m}$ gemessen. Es ergibt sich ein Mittelwert von $\mu = (0,6 \pm 0,5) \mu\text{m}$.

dies zu überprüfen wird der Hintergrundschild von der 0-mm-Position auf die 60-mm-Position gefahren und die Auslenkung einer Messuhr mit einer Ablesegenauigkeit von $1 \mu\text{m}$ gemessen. Die Bremse ist dabei in Modus 0. Diese Messung ist in Abb. 4.4 zu sehen. Die Auslenkung ist auf den ersten Wert normiert. Der Mittelwert der Werte liegt bei $\mu = (0,6 \pm 0,5) \mu\text{m}$. Die maximale Auslenkung der Uhr um $1 \mu\text{m}$ zeigt, dass das tatsächliche Absinken des Hintergrundschildes im Vergleich zur Genauigkeit der Potentiometer vernachlässigbar ist. Das Einlaufverhalten ist also vollständig auf die Potentiometer zurückzuführen.

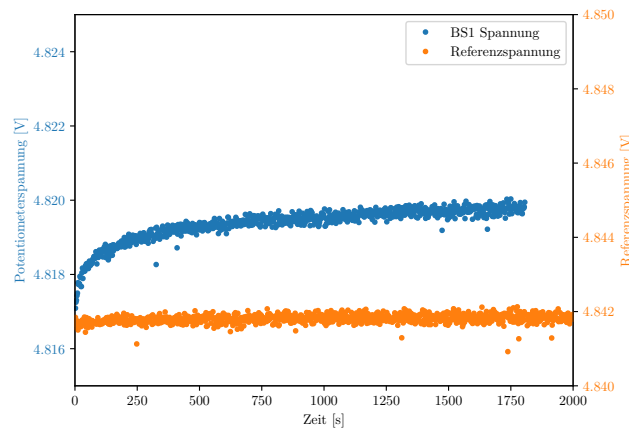


Abbildung 4.5: Die Potentiometer- und die Referenzspannung gegen die Zeit aufgetragen. Die Bremse ist in Modus 0. Der Motor ist nach 1.800s verfahren. Die Skala der Referenzspannung ist um $0,025 \text{ V}$ relativ zur Skala der Potentiometerspannung nach unten versetzt. Die Potentiometerspannung zeigt einen Drift, während die Referenzspannung bis auf $0,0001 \text{ V}$ konstant bleibt.

Ein Vergleich der Referenz- und Potentiometerspannung ist in Abb. 4.5 dargestellt und zeigt, dass die Referenzspannung einen über die Zeit des Einlaufverhaltens einen Mittelwert von $\bar{U}_{\text{ref}} = (4,8418 \pm 0,0001) \text{ V}$ besitzt und auf 0,002% konstant bleibt, wohingegen die Potentiometerspannung driftet. Dieser Drift könnte die Folge einer Temperaturabhängigkeit der Potentiometerspannung sein. Die Potentiometer der *MLS 40-50 S2* Lineardurchführungen befinden sich direkt vor den Schrittmotoren, die je nach Betriebsbedingung Wärme abgeben. Deshalb wird eine Messung mit Temperatursensor durchgeführt. Diese Messung ist für das OSM Potentiometer in Abb. 4.6 dargestellt. Es wird über etwa 66 s alle 0,01 s ein Messwert gemessen.

Diese Messwerte sind alle 0,6 s gemittelt und die Standardabweichung liefert die Unsicherheit. Der Motor ist vorher nicht gefahren und bleibt über die Messung stationär und die Bremse ist in Modus 0. Das Potentiometer wurde vor der Messung leicht erwärmt.

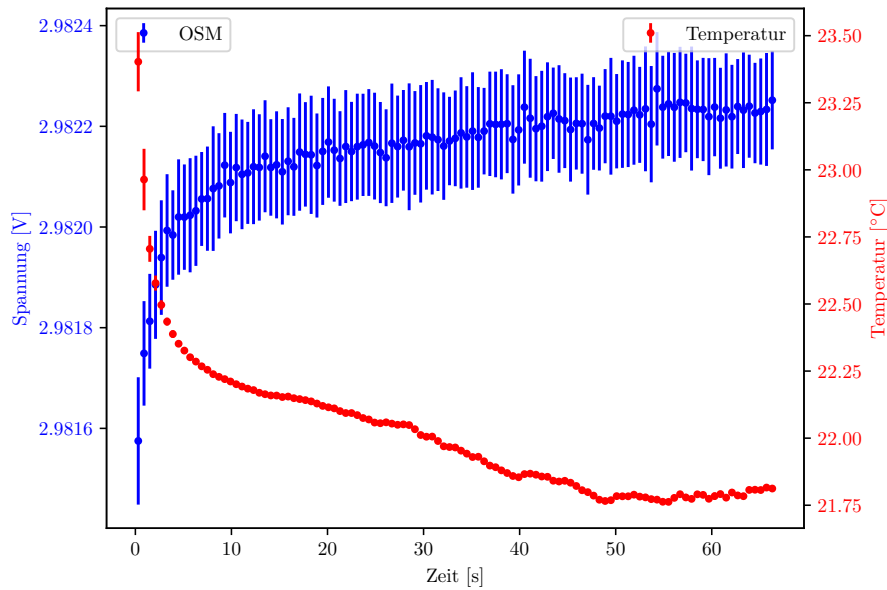


Abbildung 4.6: Die OSM Potentiometerspannung und die gemessene Temperatur gegen die Zeit. Die Bremse ist deaktiviert und das Potentiometer wurde vor der Messung leicht erwärmt. Alle 0,01 s wurde ein Wert aufgenommen, die alle 0,6 s gemittelt sind. Die resultierende Standardabweichung liefert die Unsicherheit. Es ist eine Antikorrelation zwischen der Temperatur und der Spannung zu erkennen, was auf eine Temperaturabhängigkeit der Potentiometer hindeutet.

Hier wird das der Verlauf des OSM Potentiometer dargestellt, da dieses die eindeutigste Temperaturabhängigkeit zeigt. Das BS1 Potentiometer zeigt diesen Effekt ebenfalls, aber mit Schwankungen der Spannung und einer geringeren Abhängigkeit um einen Faktor 10 (siehe Anhang A.1). Das OSM Potentiometer zeigt klar eine Antikorrelation der Temperatur und Spannung. Zu beachten ist, dass die Messung mit etwas mehr als 60 s Dauer deutlich kürzer als die Messungen aus Abb. 4.3 ist und trotzdem dieses Verhalten zeigt. Das schließt eine zufällige Antikorrelation der Temperatur und Spannung aus.

Um die Temperaturabhängigkeit zu bestimmen wird ein linearer Zusammenhang der Temperatur und der Spannung der Gleichung

$$U(T) = m \cdot T + U_0 \quad (4.1)$$

mit dem Temperaturkoeffizienten m und der Spannung bei 0°C U_0 angenommen. In Abb. 4.7 ist die Spannung gegen die Temperatur aufgetragen.

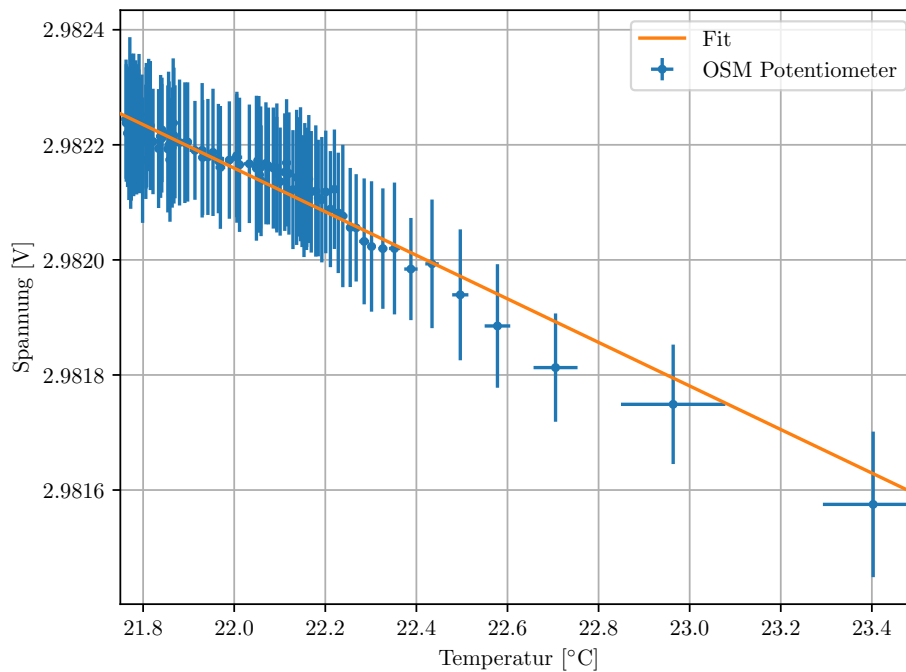


Abbildung 4.7: Die OSM Potentiometerspannung gegen die Temperatur. Die Unsicherheiten ergeben sich aus der zeitlichen Mittelung der Daten. Es ist eine klare Temperaturabhängigkeit der Spannung zu erkennen und es ist ein linearer Fit an die Daten gelegt.

An die Daten ist ein Fit der Gleichung (4.1) angelegt².

Die Fitparameter für das OSM Potentiometer sind $m = (-3,79 \pm 0,10) \cdot 10^{-4} \text{ V/K}$ und $b = (2,9905 \pm 0,0002) \text{ V}$. Da das BS1 ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit aufweist, die jedoch um den Faktor 10 kleiner ist, ist davon auszugehen, dass jedes der Potentiometer eine andere Temperaturabhängigkeit aufweist, die von Potentiometer zu Potentiometer stark schwanken kann.

Langzeitverhalten

Um das Langzeitverhalten der Potentiometer zu testen wird der Hintergrundschild am Testaufbau in die 9-mm-Position gefahren und die Auslenkung einer Messuhr mit $5 \mu\text{m}$ Ablesegenauigkeit gemessen, während die Potentiometerspannung der aufgezeichnet wird. Die Bremse ist dabei deaktiviert. Nach einer Messdauer von drei Tagen und 22 Stunden ist die Auslenkung der Messuhr nur von $(1.410 \pm 5) \mu\text{m}$ auf $(1.425 \pm 5) \mu\text{m}$ gestiegen. Der zeitliche Verlauf der Potentiometerposition von BS1 und BS2 ist in Abb. 4.8 aufgetragen. Die Abweichung ist auf den ersten Wert normiert. Zur besseren Darstellung sind immer 7.200 Werte gemittelt und die Standardabweichung bildet die Unsicherheit. Beide Potentiometer driften zu kleineren Werten ab. Dabei zeigt das BS1 Potentiometer einen um $15 \mu\text{m}$ stärkeren Drift. Auffällig ist eine zeitliche Oszillation beider Potentiometer, die verglichen mit der Zeitskala, auf den natürlichen Tag-Nacht-Zyklus und damit einhergehende Temperaturschwankung hinweist.

²Es handelt sich um einen ODR Fit

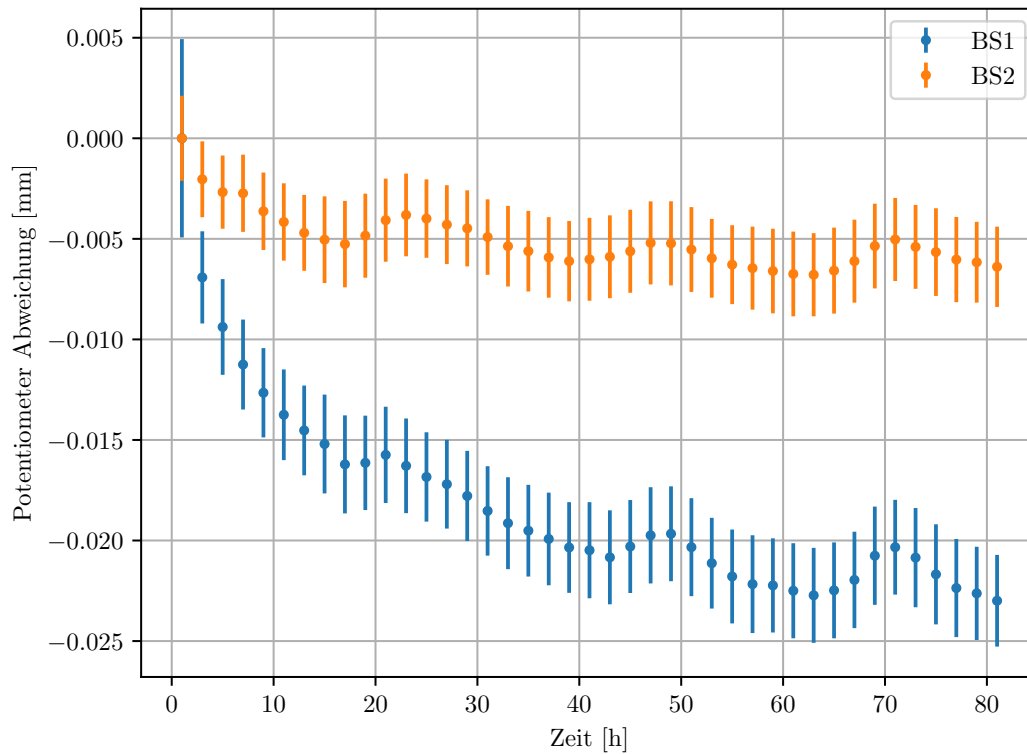


Abbildung 4.8: Langzeitmessung der BS1 und BS2 Potentiometerposition. Alle 2 s ist ein Wert aufgenommen worden, die dann alle 7.200 s gemittelt werden. Die Unsicherheit ergibt sich aus der Standardabweichung. Beide Potentiometer driften nach unten ab, wobei nach 81 h das BS1 Potentiometer mit $(-26 \pm 2) \mu\text{m}$ einen stärkeren Drift aufweist als das BS2 Potentiometer mit $(-6 \pm 2) \mu\text{m}$. Es ist eine Oszillation zu erkennen, die auf den Tag-Nach-Zyklus und die damit einhergehende Temperaturschwankung zurückzuführen ist.

4.1.3 Kalibrierfunktion

Die Messungen aus Abschnitt 4.1.1 haben, zusammen mit den Ergebnissen der Bachelorarbeit von N. Nefgmann [5], gezeigt, dass sich die Schrittmotoren mit einer hohen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit (wenige μm) über die für den Betrieb relevante Wegstrecke von $60 \mu\text{m}$ bewegen lassen.

Damit lässt sich eine Kalibration der Potentiometerposition anhand der Motorposition durchführen. Um den ganzen Fahrbereich der Motoren abzudecken, fahren die Motoren mithilfe der Workfile-Funktion in 1-mm-Schritten von der höchsten Position in die niedrigste und halten dabei jede Position für 10 s. Die Bremse ist im Modus 0. Sobald die Bremse schließt werden die Werte aufgenommen. Für die Kalibration wird die Motorposition gegen den Quotienten der Potentiometer- zur Referenzspannung aufgetragen und mit einer linearen Funktion der Gleichung

$$f(x) = mx + b \quad (4.2)$$

mit der Steigung m und dem y-Achsenabschnitt b gefittet³. Die entstehenden Residuen werden interpoliert, um als Korrekturfunktion genutzt werden zu können⁴.

³Der Fit wird mit der *optimize* Funktion des *SciPy* Pakets für *Python* durchgeführt.

⁴Die genutzte *PChip* Interpolation ist Teil des *SciPy.interpolate* Paktes und erhält die Monotonie und überschwingt nicht bei nicht glatten Daten [20]

Außerhalb des aufgenommenen Wertebereichs wird die Interpolation auf einen konstanten Wert der Residuen an den jeweiligen Rändern gesetzt, da das Verhalten der Potentiometer außerhalb unbekannt ist. Die Summe des Fits und der Interpolation liefern dann eine Funktionsvorschrift, mit der aus dem Quotienten $U_{\text{poti}}/U_{\text{ref}}$ eine kalibrierte Potentiometerposition bestimmt werden kann.

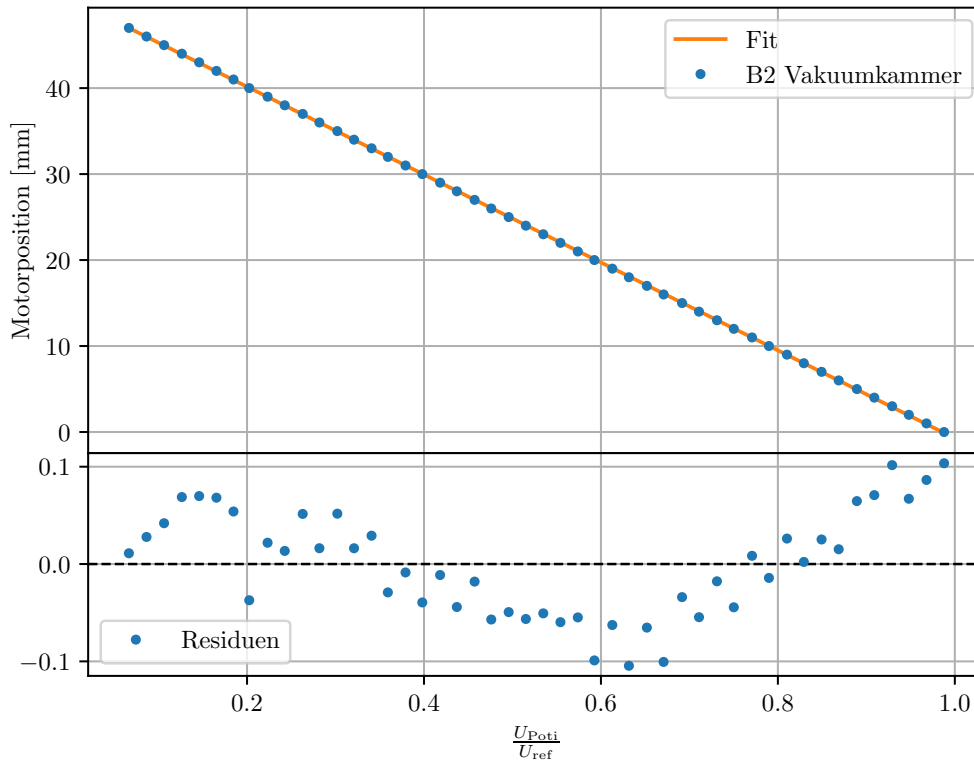


Abbildung 4.9: Die Kalibration des B2 Potentiometers. Es ist die Motorposition gegen den Quotienten der Potentiometer- zur Referenzspannung aufgetragen und ein linearer Fit an die Daten gelegt. Die Residuen sind ebenfalls dargestellt.

In Abb. 4.9 ist die Durchführung der Kalibrationsmessung für das B2 Potentiometer dargestellt und die Residuen, die in diesem Fall von $-100\ \mu\text{m}$ bis $+100\ \mu\text{m}$ streuen, aufgetragen. Somit ist dieser Bereich größer als die Genauigkeit der Potentiometer. In Abb. 4.10 sind die Residuen und eine Interpolation dargestellt, die eine deutliche Oszillation aufweisen. So eine Oszillation könnte ein charakteristisches Verhalten des Potentiometers darstellen.

Um die Kalibration zu überprüfen, fahren die Motoren denselben Bereich in denselben Schritten nochmal ab. Die so gewonnen Messwerte werden mit Hilfe der oben gewonnen Kalibration korrigiert. Die resultierenden Residuen der zweiten Messung werden anschließend mit den Residuen aus Abb. 4.9 verglichen. Dieser Vergleich ist für das B2 Potentiometer in Abb. 4.11 aufgetragen. Die Residuen der zweiten Messung streuen über einen Bereich von $-20\ \mu\text{m}$ bis $+10\ \mu\text{m}$ und haben einen Mittelwert von $(-3 \pm 4)\ \mu\text{m}$. Damit ist die Streuung der Residuen um einen Faktor 6 geringer und innerhalb der Genauigkeit des Potentiometers. Außerdem ist keine Oszillation mehr zu erkennen, was darauf schließen lässt, dass die Oszillation in Abb. 4.10 tatsächlich eine Charakteristik des Potentiometers darstellt.

Diese Kalibration wird für alle Potentiometer durchgeführt und die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 eingetragen.

Die Kalibrationsfunktion reduzieren die Streuung der Residuen je nach Potentiometer um einen Faktor 3-6. Das OSW Potentiometer weist die geringste Streuung vor der Kalibration auf.

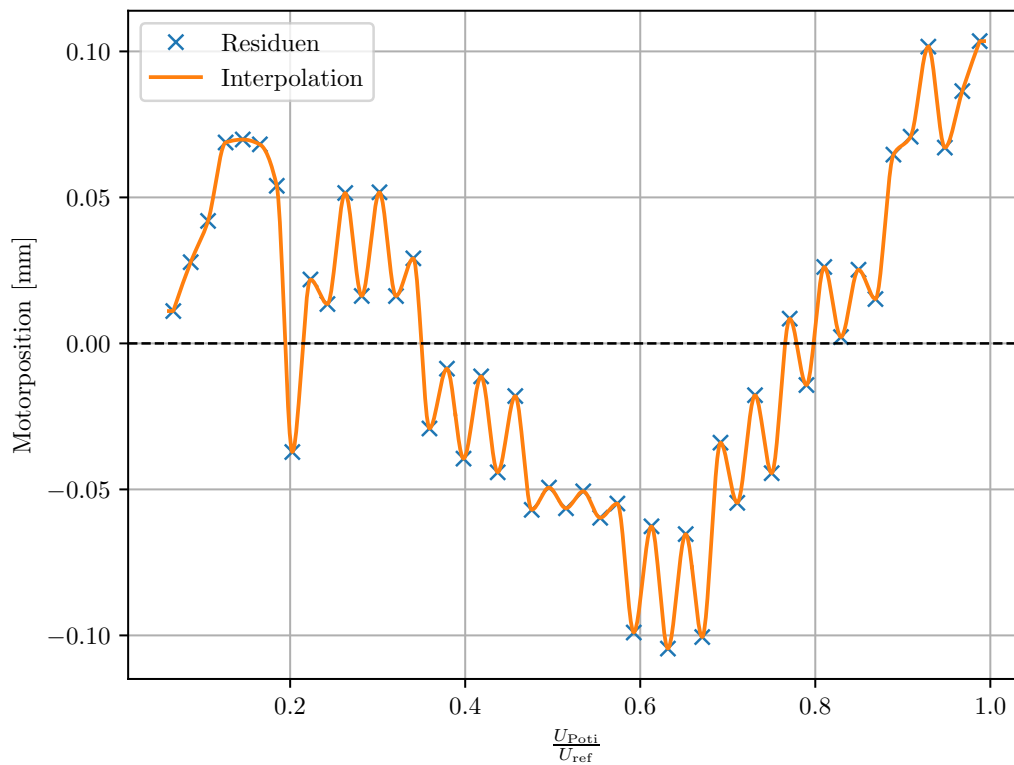


Abbildung 4.10: Die Residuen des linearen Fits mit einer Interpolation dargestellt. Die Residuen weisen eine Oszillation auf und streuen über einen Bereich von $-0,1$ mm bis $+0,1$ mm, der damit größer als die Genauigkeit der Potentiometer ist. Die Summe des Fits und der Interpolation liefern eine Kalibrierfunktion.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Kalibration. Die Korrektur reduziert die Streuung der Residuen je nach Potentiometer um einen Faktor 3 bis 6.

Potentiometer	Residuen [μm]	Streuung vorher [μm]		Streuung nachher [μm]		Faktor
		Bereich	Absolut	Bereich	Absolut	
BS1	(-2 ± 6)	$[-80,60]$	140	$[-30,10]$	40	3
BS2	(-1 ± 11)	$[-100,200]$	300	$[-40,20]$	60	5
OSM	(-2 ± 4)	$[-60,30]$	90	$[-15,5]$	20	4
OSW	(-7 ± 4)	$[-25,15]$	40	$[-16,-2]$	14	3
B1	(1 ± 15)	$[-150,150]$	300	$[-20,40]$	60	5
B2	(-3 ± 4)	$[-100,100]$	200	$[-20,10]$	30	6

Das lässt sich dadurch erklären, dass der Schlitz nur von $-2,5$ mm bis $+2$ mm mit $0,1$ -mm-Schritten bewegt wird, da der Schlitz keinen größeren Operationsbereich besitzt. Da die Residuen alle innerhalb der Genauigkeit der Potentiometer liegen, ist eine genauere Kalibration nur mit einer konstanten Temperaturregelung der Potentiometer möglich. Die Fitparameter sind in Anhang A.2 und die Graphen der restlichen Potentiometer in Anhang A.3 zu finden.

Mit dieser Kalibration lassen sich die Potentiometer innerhalb ihrer Genauigkeit verlässlich als redundante Positionsbestimmung einsetzen. Dies kann genutzt werden, um größere Positionsdiskrepanzen zwischen Potentiometer und berechneter Motorposition zu erkennen und so mögliche, schwerwiegende Fehler beim Verfahren, die zu Kollisionen führen könnten, zu verhindern. Außerdem bieten die Potentiometer direkt nach dem Einschalten der Messelektronik eine

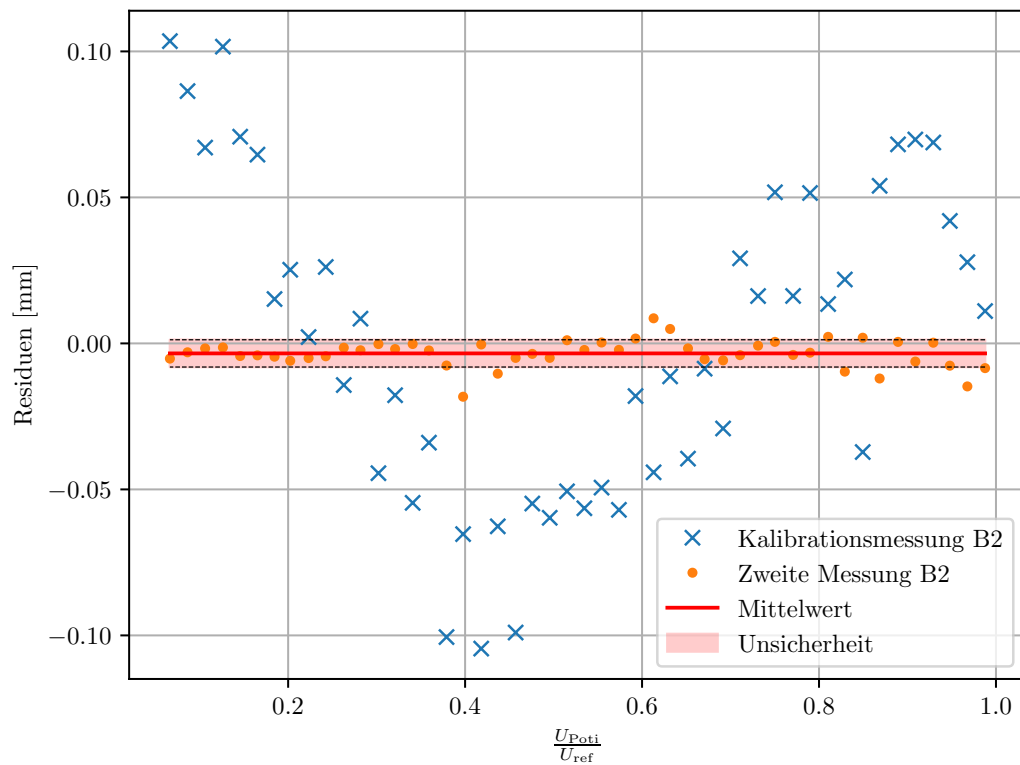


Abbildung 4.11: Die Residuen der Kalibration und der Testmessung des BS2. Die Residuen der Testmessung ergeben sich aus der Differenz der Motorposition und der kalibrierten Potentiometerposition. Durch die Kalibration streuen die Residuen um einen Faktor 6 geringer über einen Bereich von $-20\ \mu\text{m}$ bis $+10\ \mu\text{m}$ und haben einen Mittelwert von $(-3 \pm 4)\ \mu\text{m}$.

absolute Positionsbestimmung und müssen nicht - anders als bei den Motoren - erst in eine Home-Position gefahren werden. Dadurch wird das Risiko von Kollisionen bei Inbetriebnahme reduziert.

4.2 Test des Spektrometeraufbaus

Um die Funktionalität des Spektrometers zu untersuchen, wird das Spektrum einer Röntgenquelle mit bekannter Anode untersucht. Für eine Wellenlängenkalibration werden die charakteristischen Peaks der Quelle mit den entsprechenden Positionen auf dem MCP verglichen. Dafür wird ein möglichst großer Teil der zweidimensionalen Messung des MCPs entlang der y-Achse (die Achse über die das Licht der Wellenlänge nach gebrochen wird) ausgeschnitten und ein eindimensionales Histogramm der Messung erstellt. Die Kalibration für die DLA wurde bereits in der Bachelorarbeit von Robert Braun[4] durchgeführt und wird in dieser Arbeit übernommen, mit der die Gleichungen (2.6a) und (2.6b) wie folgt lauten:

$$x = 0,751 \frac{\text{mm}}{\text{ns}} \cdot \Delta t_x - 0,15 \text{ mm}$$

$$y = 0,723 \frac{\text{mm}}{\text{ns}} \cdot \Delta t_y - 0,077 \text{ mm}$$

4.2.1 MCP Messung

Die erste Messung wird mit einer Magnesium Anode im Spektroskopiemodus durchgeführt. Abb. 4.12 zeigt die positions aufgelöste Messung. Wie zu erkennen ist, befindet sich bei etwa $x \approx 21 \text{ mm}$ und $y \approx 3,5 \text{ mm}$ eine auffällig hohe Anzahl an Signalen und macht damit die Farbdarstellung des Histogramms unbrauchbar. Da es keine andere physikalische Erklärung für diese hohe Zählrate, außer Staub zwischen den Platten o.Ä. gibt, werden die Daten auf das x-Intervall $-20 \text{ mm} \leq x \leq 20 \text{ mm}$ beschnitten. In Abb. 4.13 ist die Messung ohne den fehlerhaften Bereich dargestellt.

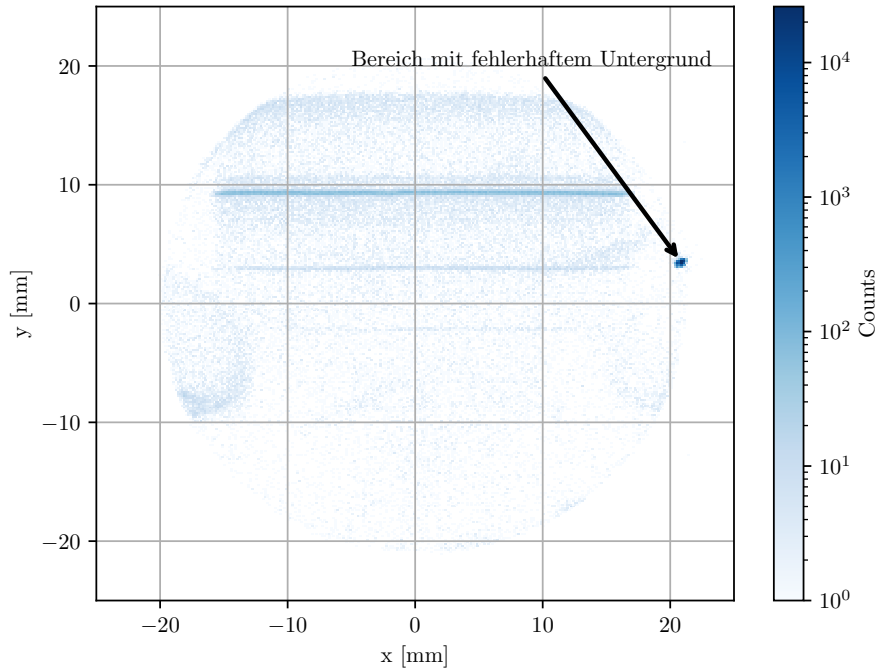


Abbildung 4.12: Die erste Messung mit dem MCP in der Vakuumkammer mit einer Mg-Anode als zweidimensionales Histogramm. Die Zeitsignale der DLA sind mit der Kalibration von Robert Braun in die Position umgerechnet. Markant ist ein Bereich mit fehlerhaftem Untergrund bei $x \approx 21 \text{ mm}$ und $y \approx 3,5 \text{ mm}$.

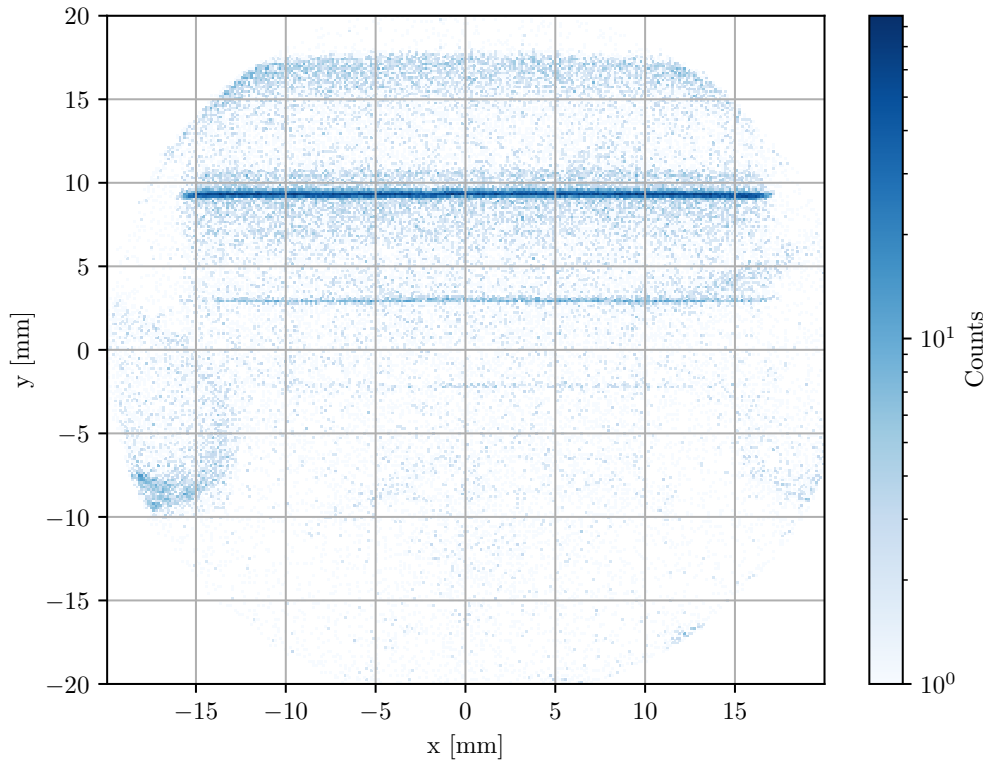


Abbildung 4.13: 2D Histogramm der bereinigten Messung. Neben der deutlich sichtbaren Mg-K Linie sind Bereiche mit erhöhtem Untergrund aufgrund von Reflexionen sichtbar.

Nun lassen sich mehrere horizontale Linien feststellen, die den charakteristischen Linien der Anode entsprechen. Man kann erkennen, dass das Histogramm eine ovale Form aufweist, die horizontal versetzt ist (man beachte den abgeschnittenen rechten Rand). Da der MCP die Form eines Kreises mit Radius $r = 20$ mm besitzt, ist die bisherige Kalibration, die mit Hilfe eines vorläufigen Testaufbaus erstellt wurde[4], nicht mehr akkurat. Es muss also eine neue Kalibration der Ortsauflösung des MCPs vorgenommen werden. Für die vorliegende Arbeit reicht es aus dem Zusammenhang zwischen projizierter y-Koordinate und Wellenlänge der beobachteten Linien zu bestimmen.

An den Rändern des Detektors sind Bereiche erhöhten Untergrunds zu erkennen, die wahrscheinlich ungewollte Reflexionen der vergoldeten Schrauben im Spektrometer darstellen. Deshalb werden die Daten entlang der y-Achse und einem x-Intervall von $-10 \text{ mm} \leq x \leq 10 \text{ mm}$ ausgewertet.

4.2.2 Eindimensionale Projektion

Die eindimensionale Projektion der Messung ist in Abb. 4.14 aufgetragen und die Peaks sind den charakteristischen Linien von Magnesium mithilfe der Intensität und Position relativ zueinander als Indikator zugeordnet.

Zur Positionsbestimmung der Peaks wird ein Gaußfit der Form

$$f(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} + d \quad (4.4)$$

mit der Amplitude A , dem Mittelwert μ , der Standardabweichung σ und einem Offset d angelegt. In Abb. 4.15 ist dies exemplarisch für den Peak erster Ordnung der Mg-K Linie dargestellt.

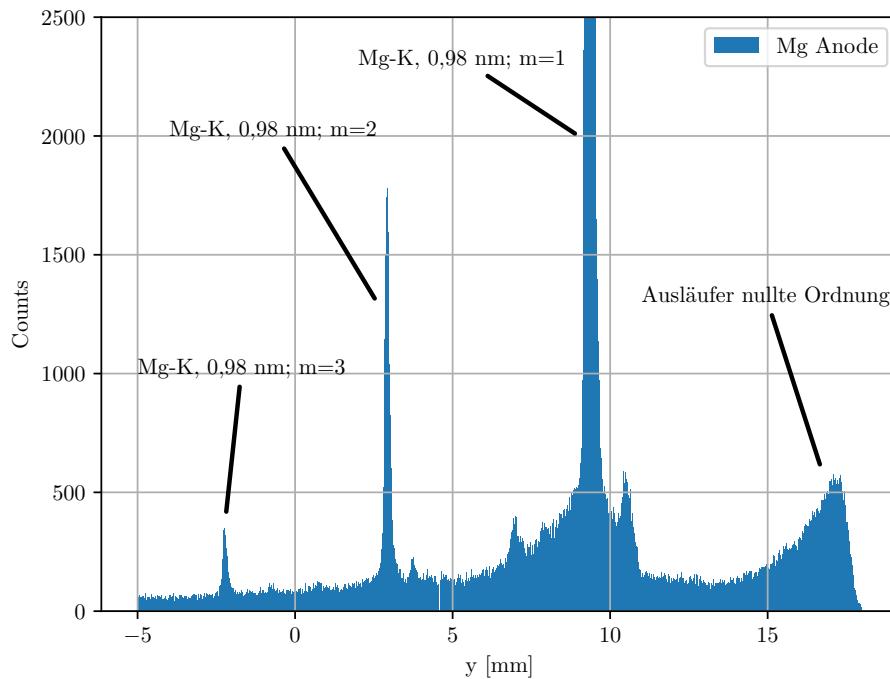


Abbildung 4.14: Das eindimensionale Histogramm der ersten Messung entlang der y -Achse. Es wurden vier relevante Peaks identifiziert. Der Peak bei $y \approx 17\text{mm}$ wird dabei als Ausläufer der abgeschnittenen, nullten Ordnung eingeordnet. Die restlichen drei Peaks sind den verschiedenen Ordnungen der Mg-K Linie anhand der Lage und Intensität zugeordnet.

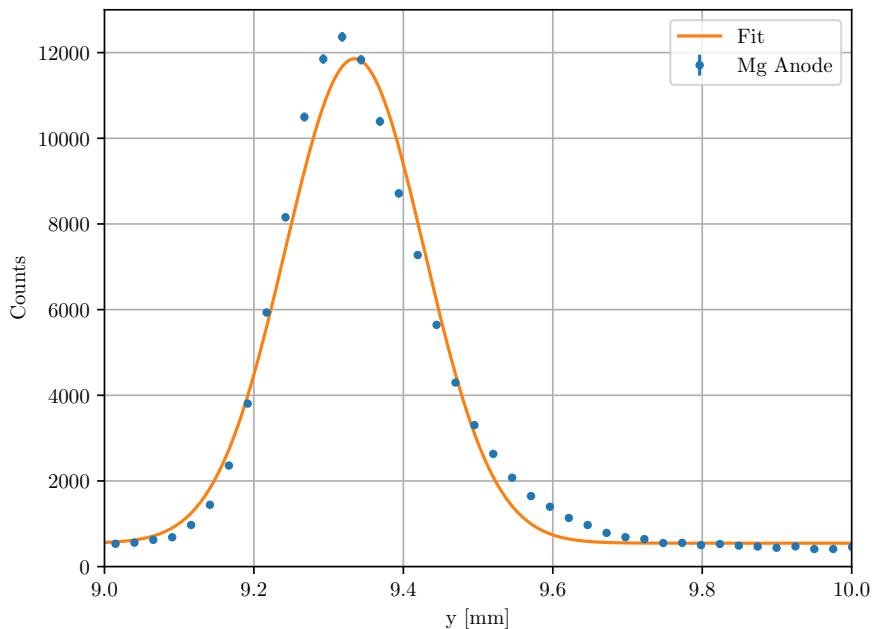


Abbildung 4.15: Der Fit einer Gaußfunktion an den Mg-K Peak erster Ordnung. Die Unsicherheit der Counts ergibt sich statistisch aus der Quadratwurzel derselben und verschwindet hinter den Messpunkten. Es ergibt sich ein Mittelwert von $\mu = (9,3350 \pm 0,0003) \text{ mm}$. Der Fit passt nicht besonders gut und ist sichtlich nach rechts verschoben.

Es ergibt sich ein Mittelwert von $\mu = (9,3350 \pm 0,0003)$ mm. Der Fit weicht sichtlich von den Werten ab, was die Folge des nicht beachtete Untergrund sein könnte. Eine mit korrigiertem Untergrund kann einen besseren Fit liefern.

Aufgrund der Filterfolie sind hauptsächlich Peaks der Mg-K Linie erkennbar, da z.B. die auftretende O-K Linie mit einer Wellenlänge von $\lambda = 2,36$ nm größtenteils von der Filterfolie absorbiert wird. Die Peaks der Mg-K Linie sind bis zur dritten Ordnung identifizierbar. Durch einen höheren Anodenstrom der Quelle und eine längere Messdauer, können Peaks höherer Ordnungen sichtbar gemacht werden. Folglich stehen für die Wellenlängenkalibration nur drei Datenpunkte zur Verfügung, was die Genauigkeit des Fits mindern kann. Eine Messung mit einer dünneren Aluminium Filterfolie sowie mit anderem Anodenmaterial könnte eine genauere Kalibration liefern. Diese wird im Rahmen der Doktorarbeit von K. Ueberholz durchgeführt[6]. Zu beachten ist der Peak ganz rechts, der keiner charakteristischen Linie entspricht, sondern der Ausläufer der direkten Reflexion (nullte Ordnung) ist. Dies lässt sich in Abb. 4.16 überprüfen, in der eine Messung, bei der die nullte Ordnung nicht abgeschnitten ist, über die erste Messung gelegt ist. Es lässt sich erkennen, dass sich der Ausläufer der nullten Ordnung bis $y \gtrsim 12$ mm noch klar erstreckt, was die vorausgegangene Annahme bestätigt. Die erste Messung wurde bei einer vierfachen Stromstärke der Quelle über eine vierfache Zeit durchgeführt und dementsprechend um das 16-fache skaliert.

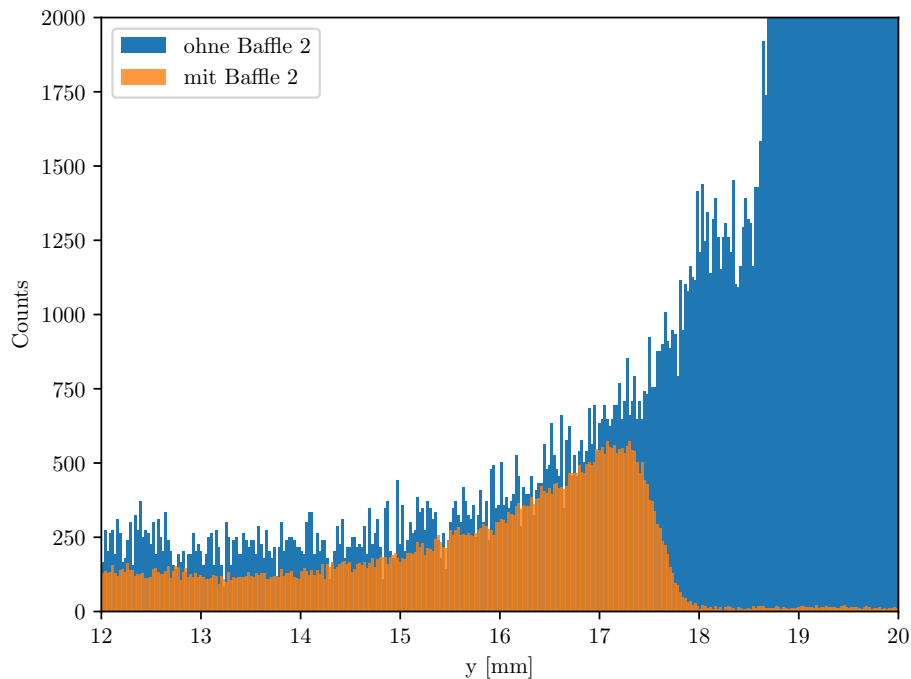


Abbildung 4.16: Diagramm zur Überprüfung, dass der Peak bei $y \approx 17$ mm zur nullten Ordnung gehört. Es wird eine Messung ohne Baffle 2 über die vorherige gelegt. Die Überschneidung zeigt, dass die Zuordnung korrekt ist. Die erste Messung wird mit einer höheren Intensität der Röntgenquelle über einen längeren Zeitraum durchgeführt und die zweite Messung dementsprechend hochskaliert. Dadurch wird das Rauschen der Messwerte verstärkt.

4.2.3 Kalibration nach Wellenlänge

Die Kalibration erfolgt, indem die bekannten Wellenlängen der Peaks den Positionen auf dem MCP zugeordnet werden.

Die Fitparameter sind in Anhang A.2 und die Fits der restlichen Peaks in Anhang A.4 zu finden. Die bestimmten Positionen μ der Peaks und die entsprechenden Wellenlängen λ sind in Tabelle 4.2 zu finden. Die Unsicherheit der Positionen wird durch die Fits gegeben. Mithilfe

Tabelle 4.2: Positionen der Peaks der Mg-K Linie auf dem MCP und die zugehörige Wellenlänge

Peak	Mittelwert μ [mm]	Wellenlänge λ [nm]
Mg-K; m=1	$(9,3350 \pm 0,0003)$	0,989
Mg-K; m=2	$(2,9260 \pm 0,0009)$	1,978
Mg-K; m=3	$(-2,220 \pm 0,003)$	2.967

dieser Zuordnung der Wellenlänge zu den Peakpositionen, lässt sich der MCP auf eine Energieauflösung bzw. Wellenlängenauflösung kalibrieren. Diese Kalibration folgt aus Gleichung (2.4),

$$\lambda = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{N}, \quad (4.5)$$

mit $m=1$, da Peaks höherer Ordnungen als Peaks höherer Wellenlänge erster Ordnung angesehen werden. Außerdem folgt aus Abb. 3.4 der geometrische Zusammenhang

$$\beta = \arctan\left(\frac{x}{r_i'}\right) - \frac{\pi}{2}. \quad (4.6)$$

Mit den Installationsparametern aus Tabelle 3.1 folgt die Kalibrierfunktion der Gleichung

$$\lambda[\text{nm}] = \frac{\sin(88,6^\circ) + \sin\left(\arctan\left(\frac{(x[\text{mm}] + C) \cdot K}{235\text{mm}}\right) - 90^\circ\right)}{0,0024 \frac{1}{\text{nm}}}, \quad (4.7)$$

mit den Fitparametern C und K . Diese Kalibration ist in Abb. 4.17 dargestellt. Die Fitparameter sind dabei $C = (-26,65 \pm 0,17)$ mm und $K = (0,999 \pm 0,007)$.

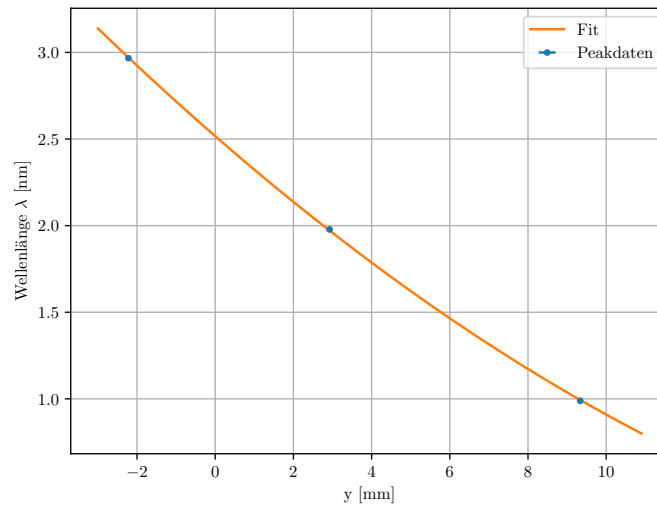


Abbildung 4.17: Die y-Positionen der Peaks und die zugeordneten Wellenlängen der Mg-K Linie. Durch die Datenpunkte wird ein Fit der Gleichung (4.7) gelegt, dessen Parameter eine Kalibration nach der Wellenlänge ermöglichen. Die Unsicherheiten der Positionen ergeben sich aus dem Positionsaufhebungsvermögen des MCPs.

Mit dieser Kalibration lässt sich das aufgenommene Spektrum wellenlängenaufgelöst darstellen (siehe Abb. 4.18). Einer der nicht identifizierten Peaks aus Abb. 4.14 liegt bei $\lambda = 1,3 \text{ nm}$, was der Cu-L Linie entspricht (1,33 nm). Wahrscheinlich ist die Halterung der Anoden aus Kupfer, sodass sich dieser Peak hier zeigt.

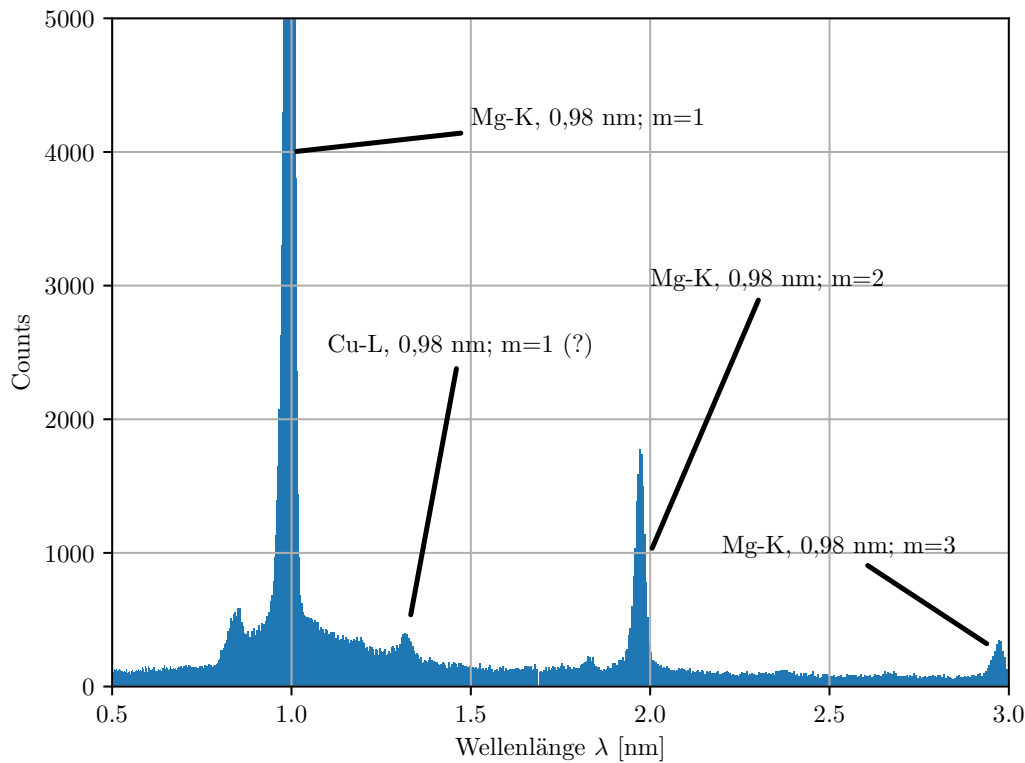


Abbildung 4.18: Messung mit der Magnesium Anode nach der Wellenlänge kalibriert. Die Peaks der Mg-K Linie sind beschriftet, sowie ein vermutlicher Peak der Cu-L Linie erster Ordnung anhand der Wellenlänge. Kupfer könnte sich in der Halterung der Anode befinden.

Die Anwendung dieser Kalibration auf eine Messung mit anderer Anode lässt Schlüsse über die Genauigkeit der Parameter zu und ist in Abb. 4.19, mit einer Anwendung auf eine Messung mit einer Aluminium Anode, dargestellt. Für die Peakbestimmung wird analog zur Magnesium Anode verfahren. Es sind die charakteristischen Al-K Linien der ersten drei Ordnungen und die Cu-L Linien erster und zweiter Ordnung zu erkennen, was die Annahme, dass diese von der Halterung stammen, stützt. Exemplarisch wird in Abb. 4.20 der Gaußfit zur Positionsbestimmung an der Al-K Linie erster Ordnung gezeigt. Es ist eine Abweichung des Fits zur anderen Seite als in Abb. 4.15 zu sehen. Die Fits der restlichen Peaks sind in Anhang A.4 und die dazugehörigen Fitparameter in Anhang A.2 zu finden. In Tabelle 4.3 werden die theoretischen Wellenlängen der Linien mit denen der Messung verglichen.

Die Al-K Linien erster und dritter Ordnung weichen um ein Sigma, beide Cu-L Linien jeweils um zwei Sigma und die Al-K Linie zweiter Ordnung um drei Sigma vom Literaturwert ab. Die Kalibration ist also noch nicht optimal, was daran liegen könnte, dass die Behandlung des Untergrunds verbessert werden muss, indem der Bremsstrahlungsbeitrag abgezogen wird und experimenteller Untergrund von Reflexionen berücksichtigt wird. Die tragen zu einer Verzerrung der Gaußfits der Linien bei. Auch kann es sein, dass die Winkel aus den Installationsparametern nicht korrekt sind und leicht abweichen. Man könnte die Kalibrierfunktion (4.7) um zwei Parameter für die beiden Winkel erweitern.

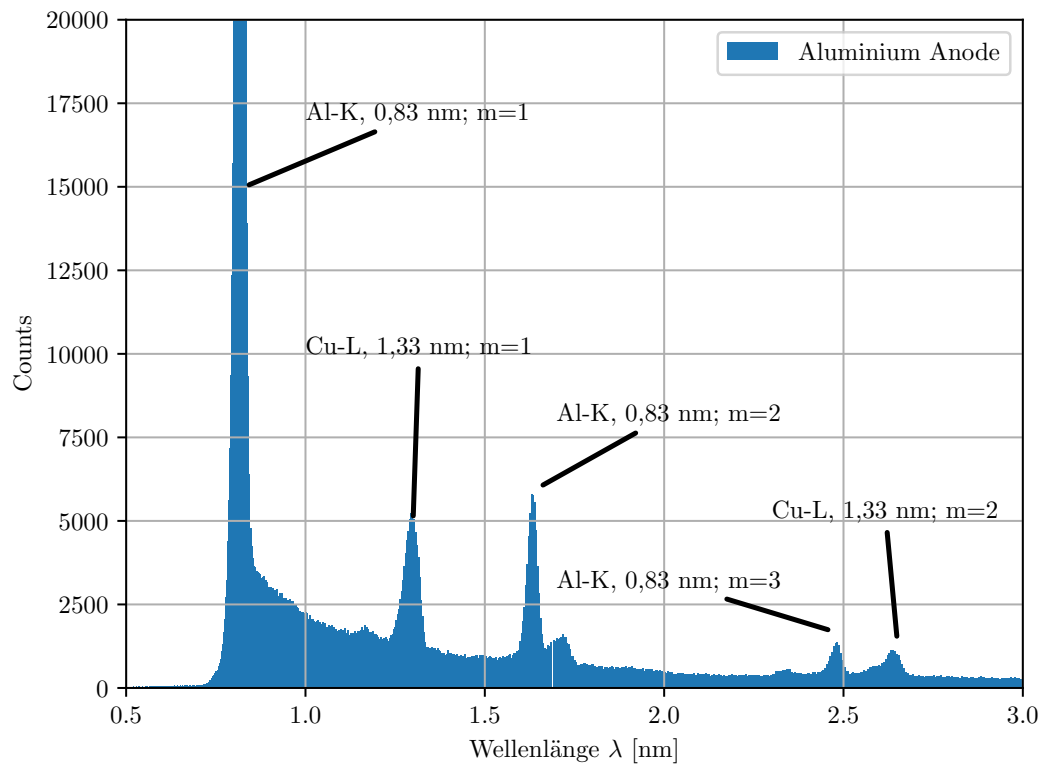


Abbildung 4.19: Messung mit der Aluminium Anode nach der Wellenlänge kalibriert. Es sind insgesamt fünf Peaks von zwei verschiedenen Linien identifiziert und beschriftet.

Tabelle 4.3: Die identifizierten Peaks der Aluminium Messung mithilfe der Magnesiumkalibration. Die Literaturwerte und die gemessenen Werte der zugehörigen Wellenlänge sind eingetragen.

Peak	Theoretische Wellenlänge [nm]	gem. Wellenlänge [nm]
Al-K; m=1	0,83	$(0,818 \pm 0,013)$
Cu-L; m=1	1,33	$(1,294 \pm 0,019)$
Al-K; m=2	1,66	$(1,632 \pm 0,013)$
Al-K; m=3	2,49	$(2,478 \pm 0,014)$
Cu-L; m=2	2,66	$(2,636 \pm 0,022)$

Außerdem kann eine längere Kalibrationsmessung mit höherem Anodenstrom vorgenommen werden, um Linien höherer Ordnung sichtbar zu machen. Damit würden mehr Punkte für den Kalibrationsfit zur Verfügung stehen und die Fitqualität verbessern.

Nichtsdestotrotz ist gezeigt, dass das Spektrometer erfolgreich Röntgenstrahlen energieaufgelöst detektieren kann und kalibriert werden kann. Optimierungsarbeit des Spektrometers, wie optimale Positionen der Komponenten und Kalibration des MCPs mit dünnerer Aluminiumfolie werden in der Doktorarbeit von K. Ueberholz vorgenommen[6].

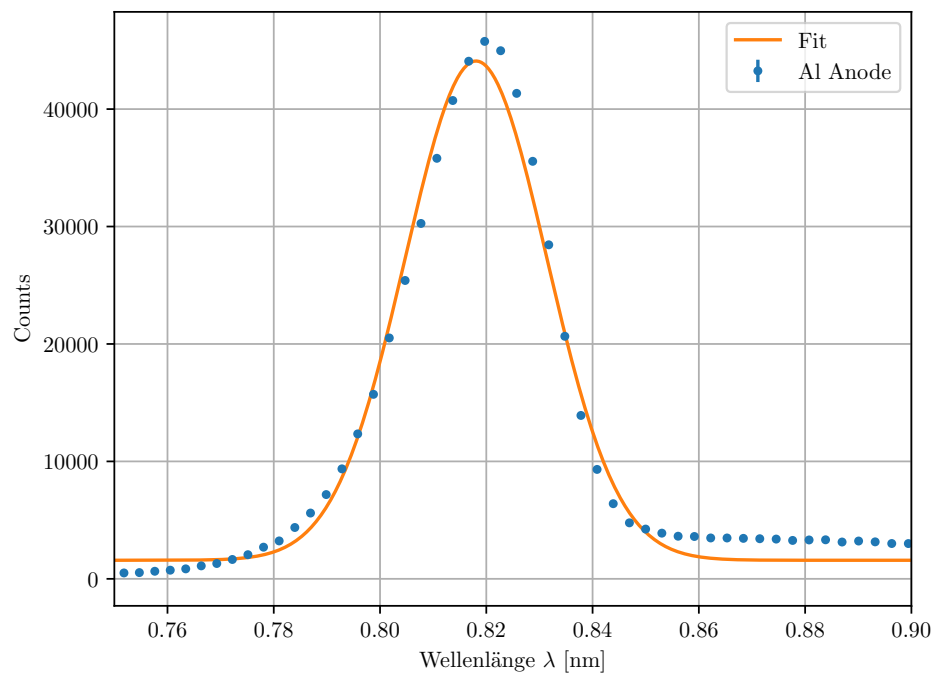


Abbildung 4.20: Der Gaußfit zur Wellenlängenbestimmung der Al-K Linie erster Ordnung. Die Unsicherheit der Counts ergibt sich statistisch aus der Quadratwurzel und verschwindet hinter den Messpunkten. Es ergibt sich ein Mittelwert von $\lambda = (0,818 \pm 0,013)$ nm und liegt damit innerhalb eines Sigma am Literaturwert. Der Fit weicht sichtlich von den Werten ab.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

An der zukünftigen Forschungsanlage FAIR in Darmstadt wird aktuell das Synchrotron SIS100 aufgebaut. Mit diesem Beschleuniger können verschiedene Ionensorten auf bis zu $\geq 99\%$ Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Um dabei eine scharfe Geschwindigkeitsverteilung der Ionen zu gewährleisten, kommt die Technik des Laserkühlens zum Einsatz. Hierbei ist für Diagnosezwecke und für spektroskopische Experimente ein energieaufgelöster Nachweis der beim Kühlen emittierten Fluoreszenzstrahlung erforderlich. Ein geeigneter Fluoreszenzdetektor wird an der Universität Münster entwickelt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der neue Detektor in Zusammenarbeit mit K. Ueberholz zusammengebaut und auf Funktionalität getestet. Außerdem wurden die für den Fluoreszenzdetektor genutzten Schrittmotoren und Linearpotentiometer kalibriert.

Die Messungen der Schrittmotoren liefern eine Reproduzierbarkeit unter Last von $\pm 3,5 \mu\text{m}$, die damit deutlich genauer als die geforderten $\pm 10 \mu\text{m}$ ist. Die Untersuchung des auftretenden Einlaufverhaltens der Linearpotentiometer ergab, dass sich die Potentiometerauslese nach 500 s innerhalb eines $\pm 10 \mu\text{m}$ Intervalls stabilisiert. Schließlich ist mithilfe einer Korrekturfunktion eine Kalibration der Positionsauslese der Potentiometer durchgeführt worden, die die Genauigkeit der Absolutpositionsauslese je nach Potentiometer um einen Faktor 3 bis 6 erhöht. Es wurde maßgeblich am Aufbau des gesamten Detektorsystems mitgearbeitet, sowohl beim Zusammenbau des Spektrometers als auch der Installation aller Komponenten an und in der Vakuumkammer.

Der vollständig aufgebaute Detektor wurde anschließend auf Funktionalität geprüft. Dabei wurde die energieaufgelöste Detektion von Röntgenstrahlung mit dem Spektrometer untersucht und eine erste Energiekalibration durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass der Detektor Röntgenstrahlung zuverlässig energieaufgelöst detektieren kann.

Aktuell wird im Rahmen der Doktorarbeit von K. Ueberholz eine Optimierung des Detektors bzgl. der Auflösung vorgenommen und es werden Messungen zur Untergrundreduktion durchgeführt. Nach Abschluss dieser Tests wird der Detektor für den Transport zu FAIR vorbereitet.

Literaturverzeichnis

- [1] GSI & FAIR Webseite. Die Beschleunigeranlage. https://www.gsi.de/forschungbeschleuniger/fair/die_maschine. Zugegriffen am 21.05.2024.
- [2] L. Eidam, O. Boine-Frankenheim, and D. Winters. Cooling rates and intensity limitations for laser-cooled ions at relativistic energies. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 887:102–113, 2018.
- [3] Lucas Garrido Gómez. Test setup for a fluorescence detector to be used in the laser cooling system at the new SIS100 accelerator at GSI. Master’s thesis, Universität Münster, 2021.
- [4] Robert Braun. Charakterisierung eines positionsauflösenden MCP-Detektors zur Verwendung als Fluoreszenzdetektor am SIS100 bei FAIR. Bachelorarbeit, Universität Münster, 2021.
- [5] Niklas Nefigmann. Entwicklung einer Schrittmotoransteuerung für den Fluoreszenzdetektor am SIS100. Bachelorarbeit, Universität Münster, 2022.
- [6] K. Ueberholz. *Präzisions-HV Messung für Experimente der Stoßspektroskopie und Entwicklung eines Fluoreszenzdetektors für das Laserkühlen am SIS100*. Doktorarbeit, Universität Münster, In Vorbereitung.
- [7] Helmut Poth. Electron cooling: Theory, experiment, application. *Physics Reports*, 196(3):135–297, 1990.
- [8] Danyal Winters et al. Laser cooling of relativistic heavy-ion beams for FAIR. *Physica Scripta*, 2015(T166):014048, November 2015.
- [9] J. S. Hangst, J. S. Nielsen, O. Poulsen, P. Shi, and J. P. Schiffer. Laser Cooling of a Bunched Beam in a Synchrotron Storage Ring. *Phys. Rev. Lett.*, 74:4432–4435, Mai 1995.
- [10] M. Siegbahn. Relations between the K and L series of the High-Frequency Spectra. *Nature*, 96(2416):676–676, 1916.
- [11] S. J. B. Reed. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press, 2005.
- [12] J. Singh. Characteristic and Continuous x-rays. <https://www.concepts-of-physics.com/modern/characteristic-and-continuous-x-rays.php>. Zugriff am 24.05.2024.
- [13] Shimadzu. SHIMADZU DIFFRACTION GRATINGS. <https://www.shimadzu.com/opt/guide/diffraction/02.html>. Zugriff am 24.05.2024.
- [14] Hamamatsu Photonics K.K. *MCP Assembly Guide*, September 2006.
- [15] RoentDek Handels GmbH. *MCP Delay Line Detector Manual*, 2024. Version 11.0.2402.1.

- [16] FAIR Webseite. Komplexer Leistungstest bei Tieftemperatur: Testaufbau eines SIS100-Abschnitts liefert erfolgreiche Ergebnisse. <https://fair-center.de/newshub/fair-news/detail>. Zugegriffen am 12.07.2024.
- [17] Shimadzu. Laminar-type Replica Diffraction Gratings for VUV/Soft X-ray Region. <https://www.shimadzu.com/opt/products/dif/o-k25cur0000006zd0.html>. Zugriff am 05.07.2024.
- [18] B L Henke, E M Gullikson, and J C Davis. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50\text{--}30000$ eV, $Z=1\text{--}92$. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 54:181–342, 1993.
- [19] Lawrence Berkeley National Laboratory. Filter Transmission. https://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html. Zugriff am 05.07.2024.
- [20] SciPy. `scipy.interpolate.PchipInterpolator`. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.PchipInterpolator.html>. Zugriff am 19.07.2024.
- [21] McPherson. Soft X-ray Light Source. <https://mcphersoninc.com/pdf/642-SXR-source.pdf>. Zugegriffen am 12.07.2024.

Anhang A

Anhang

A.1 Temperaturabhängigkeit

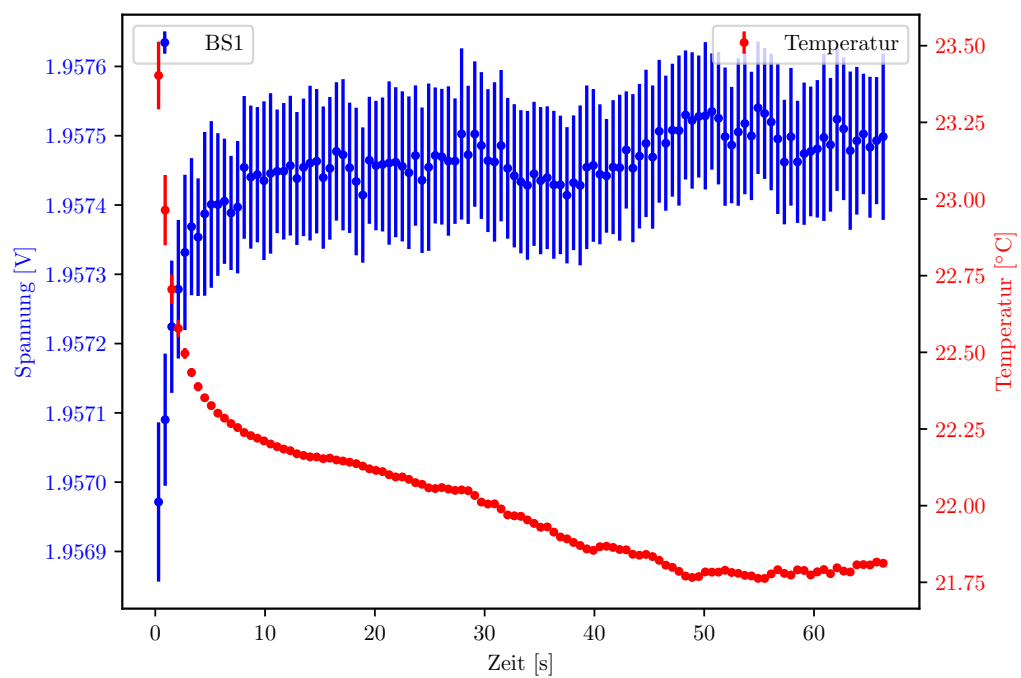


Abbildung A.1: Messung der Temperatur und der BS1 Potentiometerposition gegen die Zeit. Es ist eine Antikorrelation zu erkennen.

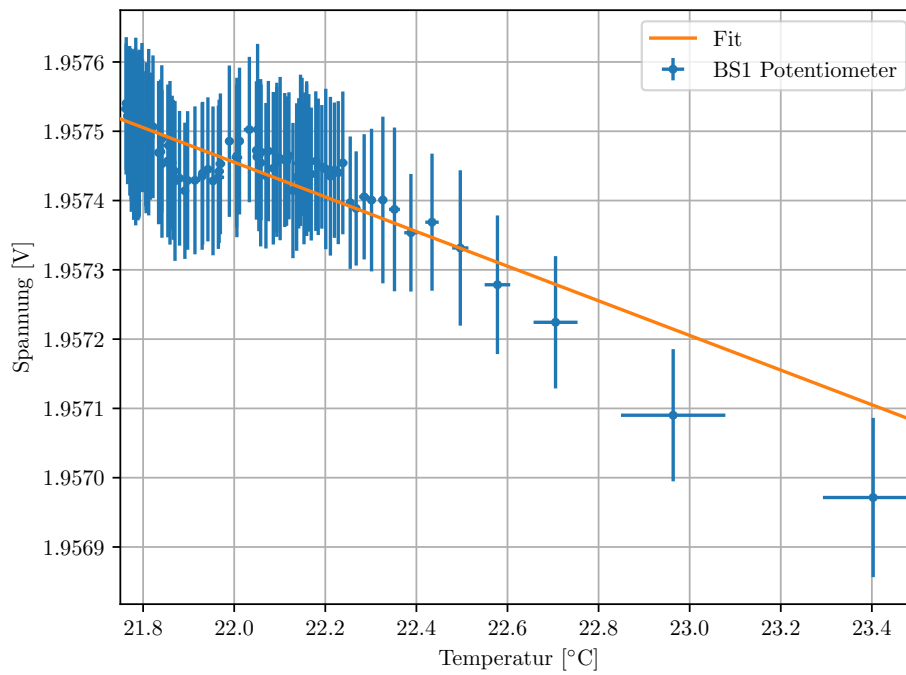


Abbildung A.2: BS1 Potentiometerspannung gegen die Temperatur. Es ist ein linearer Fit angelegt.

A.2 Fitparameter

Tabelle A.1: Fitparameter der linearen Fits der Temperaturabhängigkeitsmessung der Potentiometer.

Potentiometer	$m [10^{-5} \frac{V}{K}]$	$T_0 [V]$
BS1	$(-2,50 \pm 0,13)$	$(1,9630 \pm 0,0003)$
OSM	(37 ± 1)	$(2,9905 \pm 0,0002)$

Tabelle A.2: Fitparameter der linearen Fits für die Kalibrierungsfunktionen.

Potentiometer	$m [mm]$	$b [mm]$
BS1	$(-76,22 \pm 0,02)$	$(70,359 \pm 0,009)$
BS2	$(-76,03 \pm 0,03)$	$(70,17 \pm 0,02)$
OSM	$(-75,95 \pm 0,01)$	$(68,048 \pm 0,005)$
OSW	$(-50,80 \pm 0,10)$	$(4,95 \pm 0,01)$
B1	$(-51,16 \pm 0,04)$	$(50,83 \pm 0,03)$
B2	$(-51,11 \pm 0,03)$	$(50,39 \pm 0,02)$

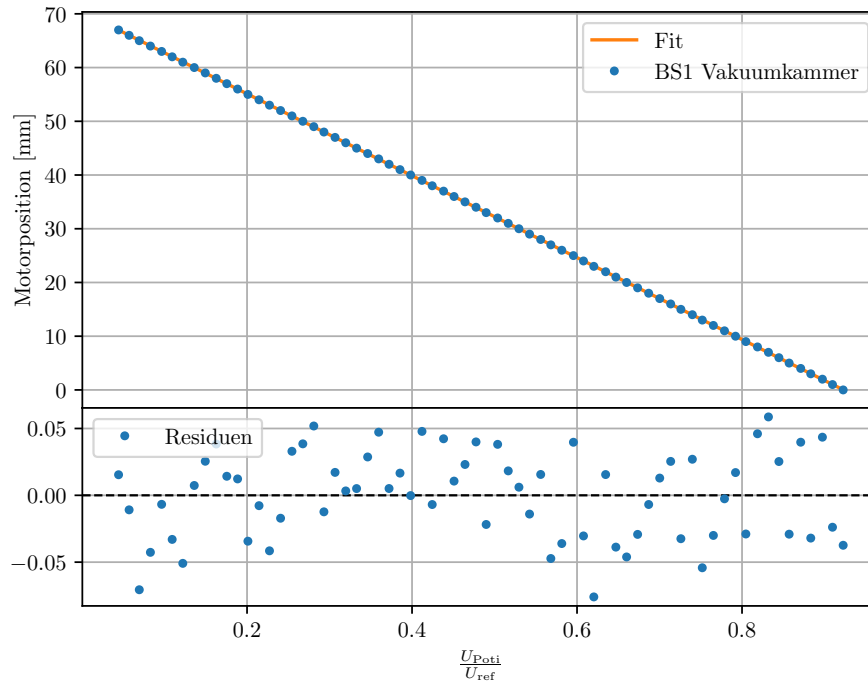
Tabelle A.3: Fitparameter der Gaußfunktionen für die Kalibrierung des MCPs mit der Magnesium Anode.

Peak	A	μ [mm]	σ [10^{-2} mm]	d
Mg-K; m=1	(11.280 ± 50)	$(9,3350 \pm 0,0003)$	$(4,73 \pm 0,02)$	(473 ± 3)
Mg-K; m=2	(1.550 ± 20)	$(2,9260 \pm 0,0009)$	$(4,00 \pm 0,04)$	(146 ± 2)
Mg-K; m=3	(255 ± 9)	$(-2,220 \pm 0,003)$	$(3,8 \pm 0,1)$	(72 ± 1)

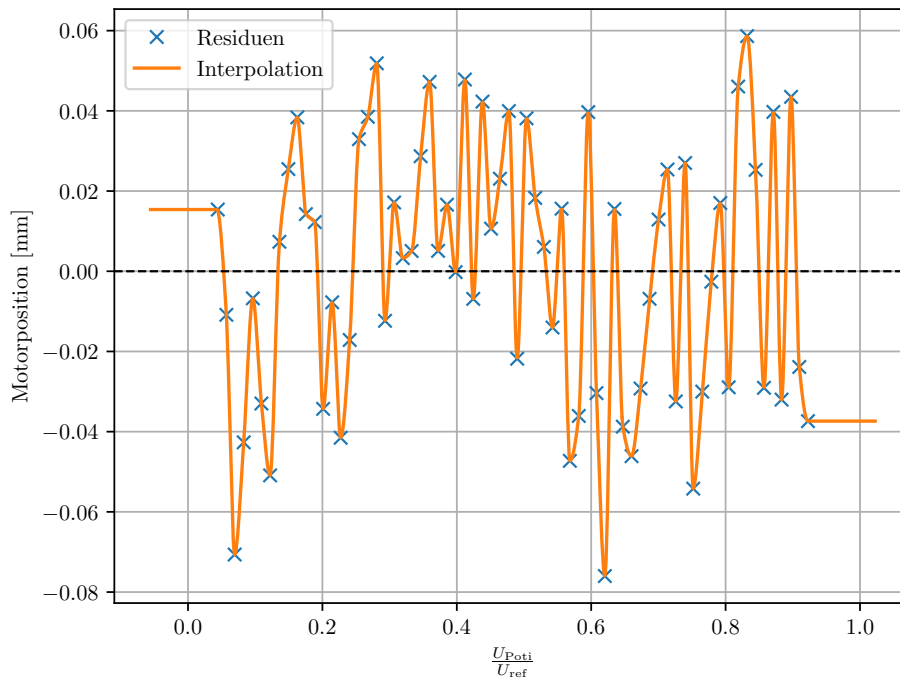
Tabelle A.4: Fitparameter der Gaußfunktionen für die Messung des kalibrierten MCPs mit der Aluminium Anode.

Peak	A	μ [nm]	σ [10^{-2} nm]	d
Al-K; m=1	(42.510 ± 80)	$(0,81807 \pm 0,00002)$	$(1,330 \pm 0,002)$	(1.580 ± 10)
Cu-L; m=1	(3.920 ± 30)	$(1,2941 \pm 0,0001)$	$(-1,88 \pm 0,01)$	(1.380 ± 10)
Al-K; m=2	(4.670 ± 40)	$(1,6323 \pm 0,0001)$	$(1,31 \pm 0,02)$	(1.160 ± 20)
Al-K; m=3	(910 ± 20)	$(2,4785 \pm 0,0003)$	$(1,45 \pm 0,03)$	(439 ± 6)
Cu-L; m=2	(780 ± 20)	$(2,6362 \pm 0,0004)$	$(2,17 \pm 0,07)$	(340 ± 20)

A.3 Kalibrierungsfunktionen

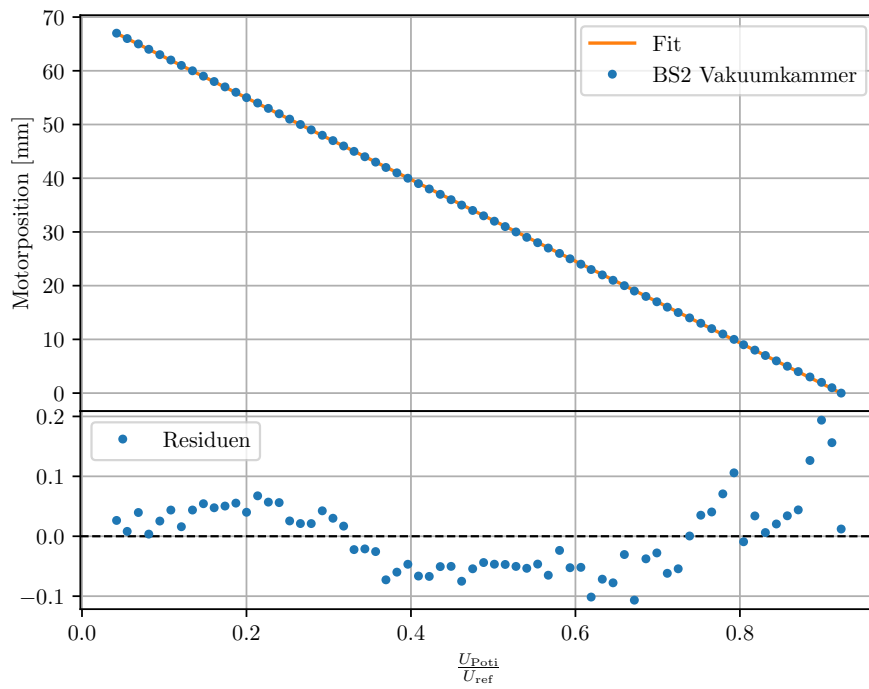


(a) Linearer Fit und Residuen

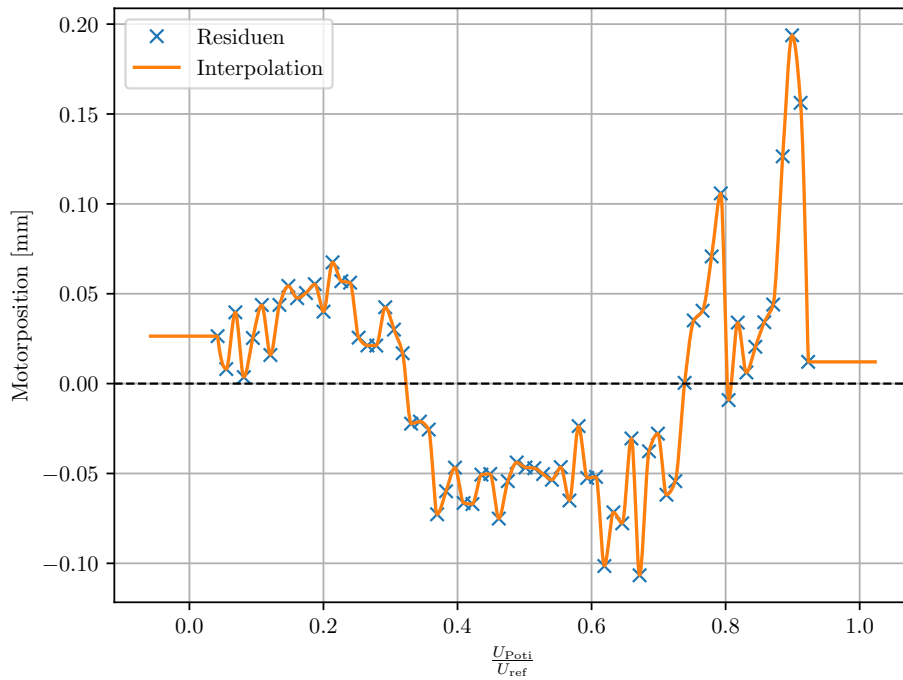


(b) Residuen und Interpolation

Abbildung A.3: Die Kalibrierung des BS1 Potentiometers.

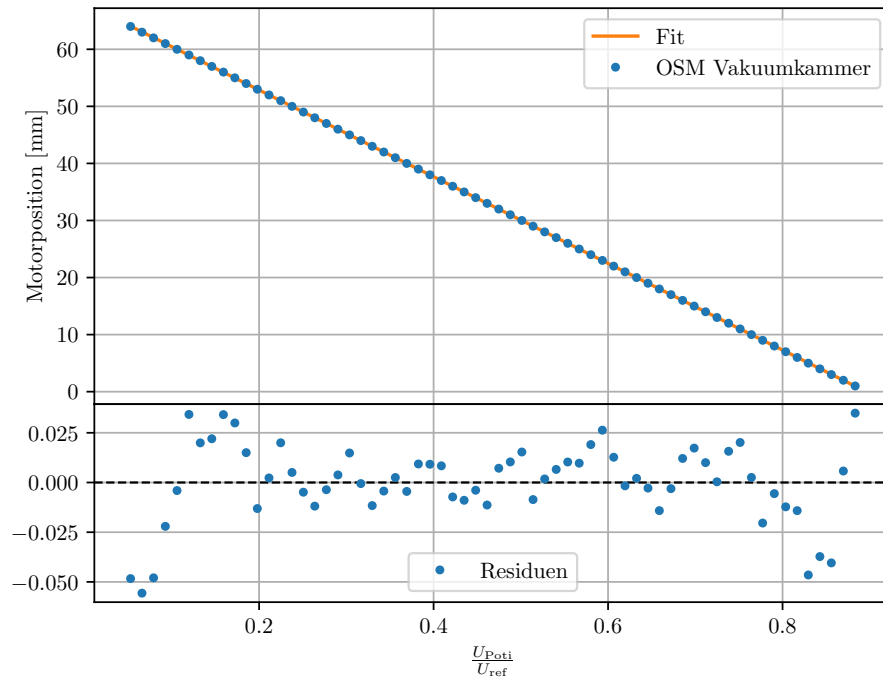


(a) Linearer Fit und Residuen

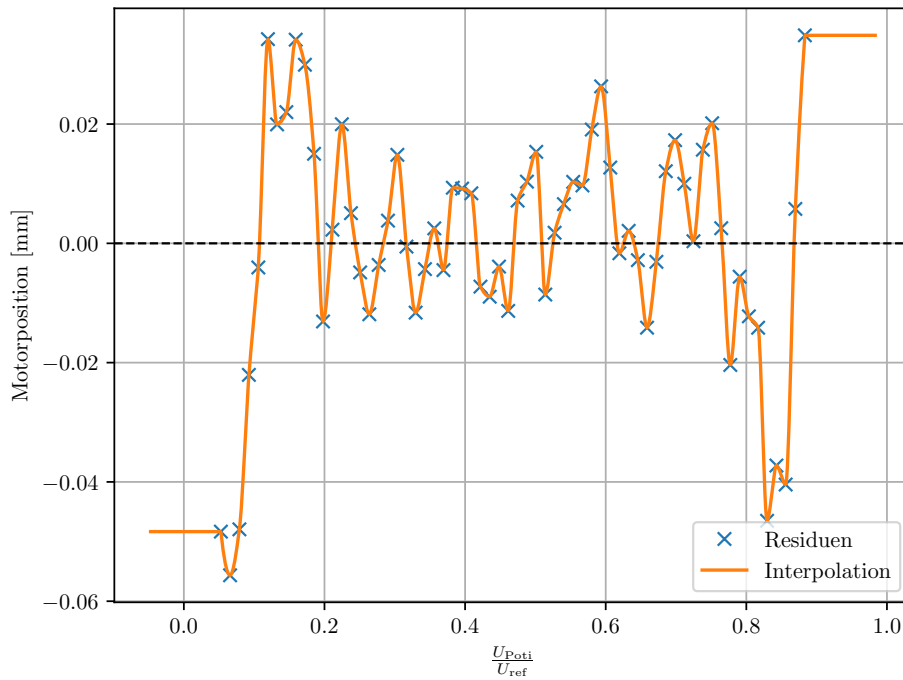


(b) Residuen und Interpolation

Abbildung A.4: Die Kalibrierung des BS2 Potentiometers.

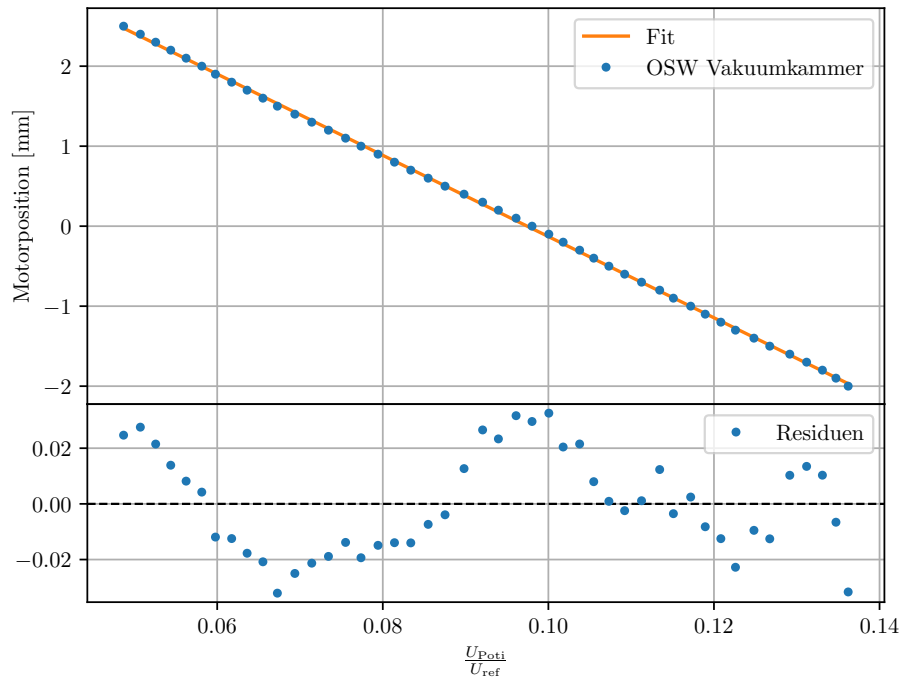


(a) Linearer Fit und Residuen

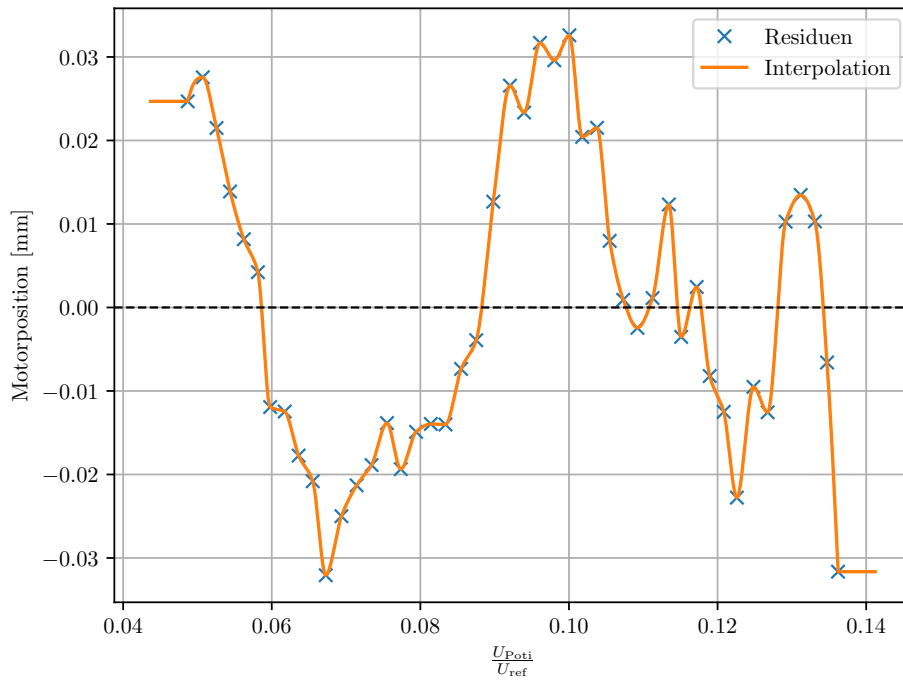


(b) Residuen und Interpolation

Abbildung A.5: Die Kalibrierung des OSM Potentiometers.

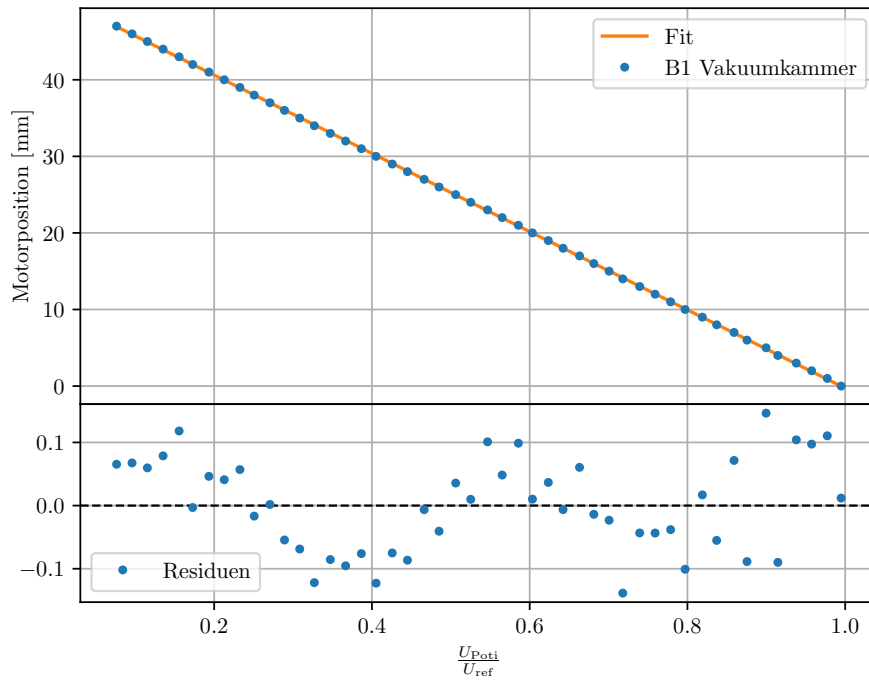


(a) Linearer Fit und Residuen

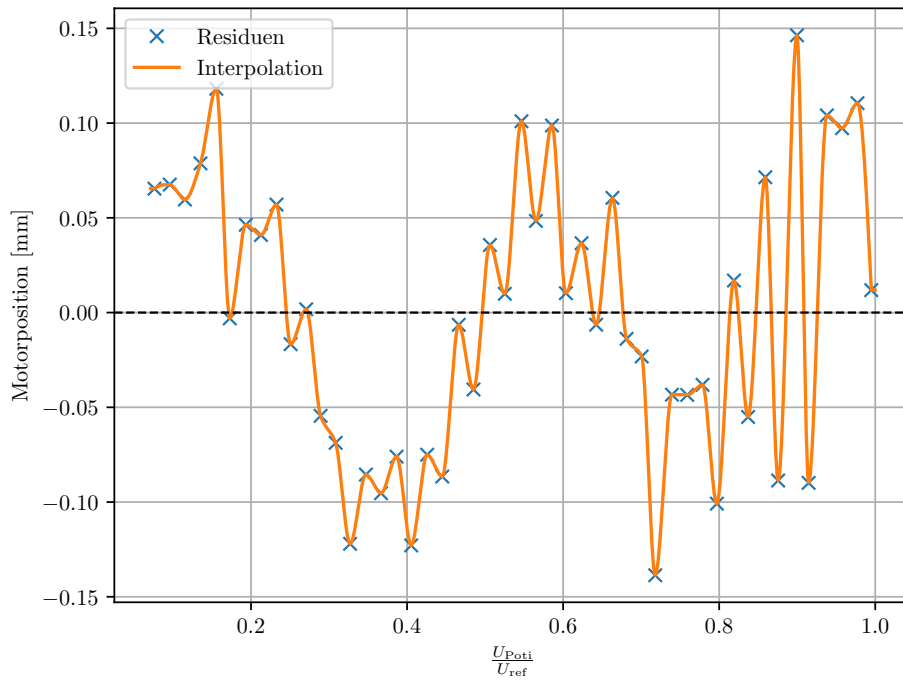


(b) Residuen und Interpolation

Abbildung A.6: Die Kalibrierung des OSW Potentiometers. Zu beachten ist der kleinere Bereich als bei den restlichen Potentiometern, aufgrund des Operationsintervalls des OSW Potentiometers.



(a) Linearer Fit und Residuen



(b) Residuen und Interpolation

Abbildung A.7: Die Kalibrierung des B1 Potentiometers.

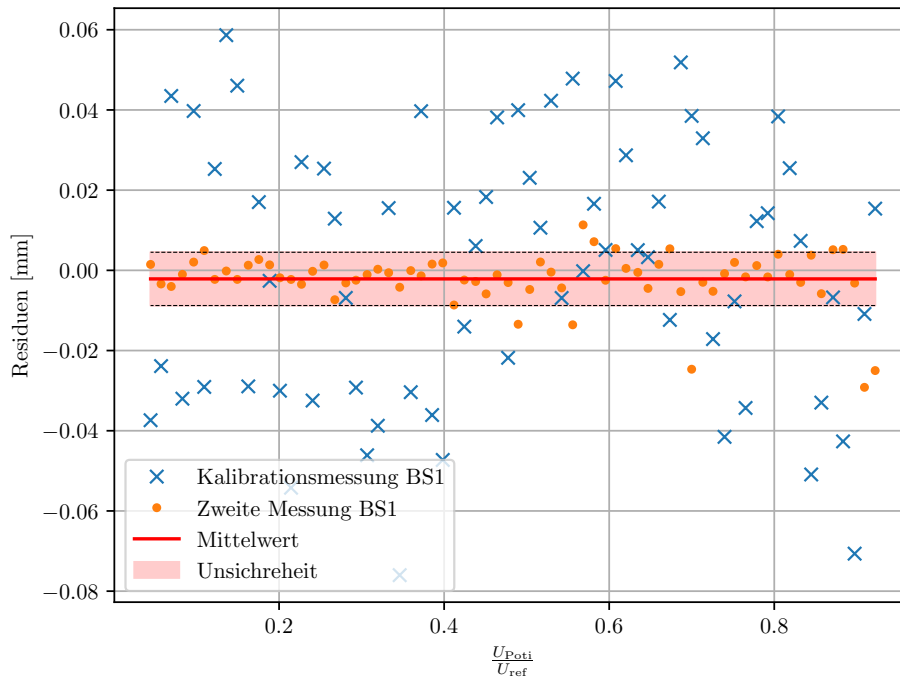


Abbildung A.8: Die Residuen der Kalibrierungs- und der Testmessung des BS1 Potentiometers.

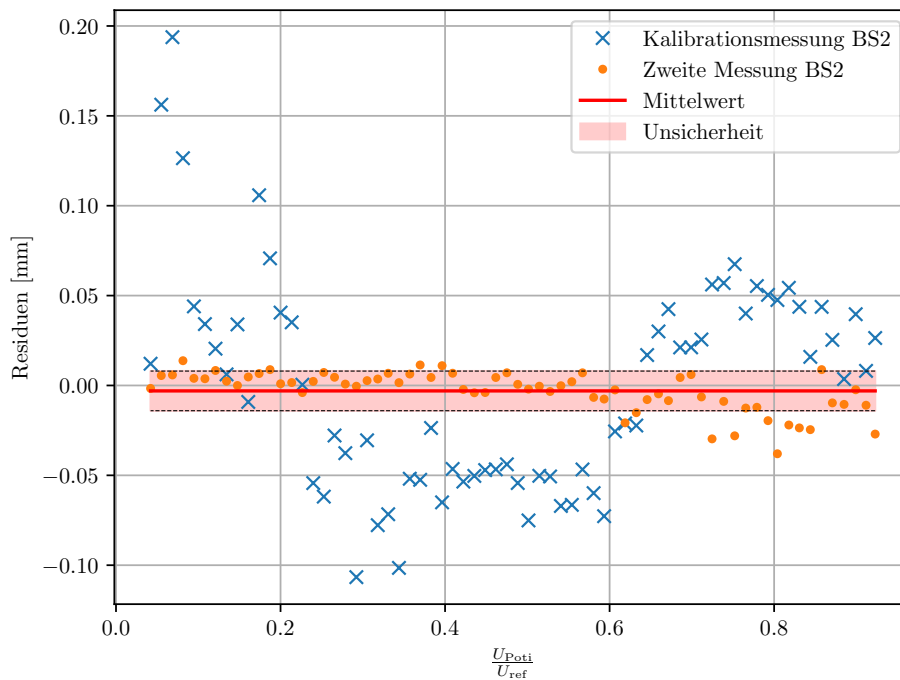


Abbildung A.9: Die Residuen der Kalibrierungs- und der Testmessung des BS2 Potentiometers.

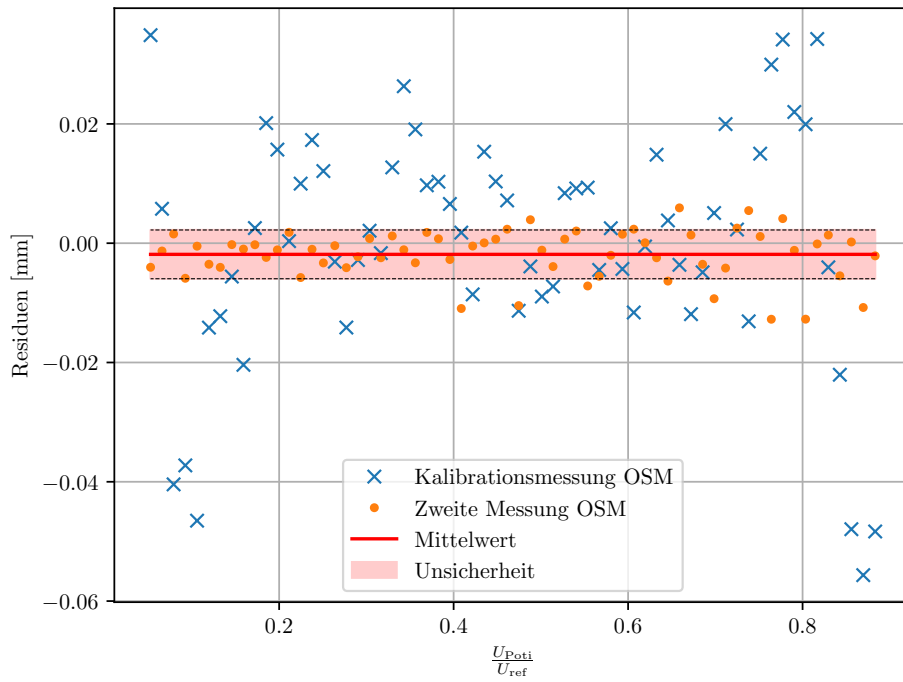


Abbildung A.10: Die Residuen der Kalibrierungs- und der Testmessung des OSM Potentiometers.

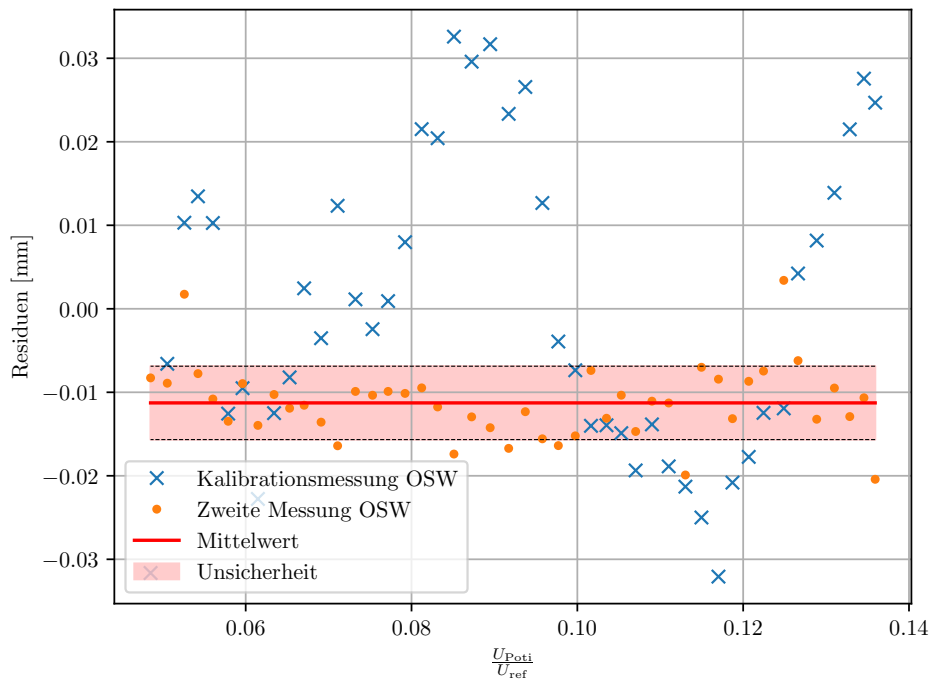


Abbildung A.11: Die Residuen der Kalibrierungs- und der Testmessung des OSW Potentiometers.

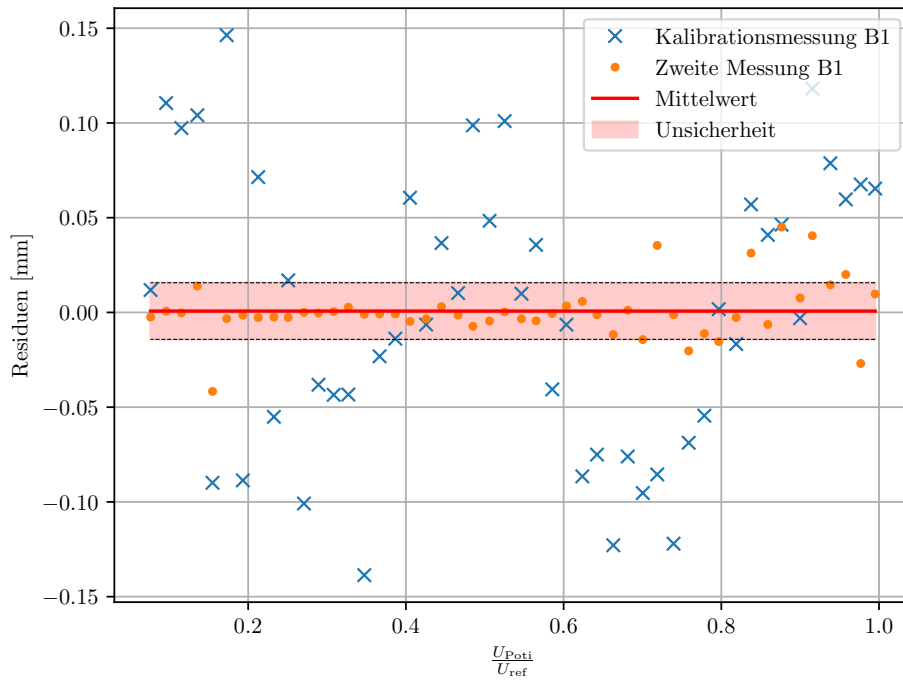


Abbildung A.12: Die Residuen der Kalibrierungs- und der Testmessung des B1 Potentiometers.

A.4 MCP

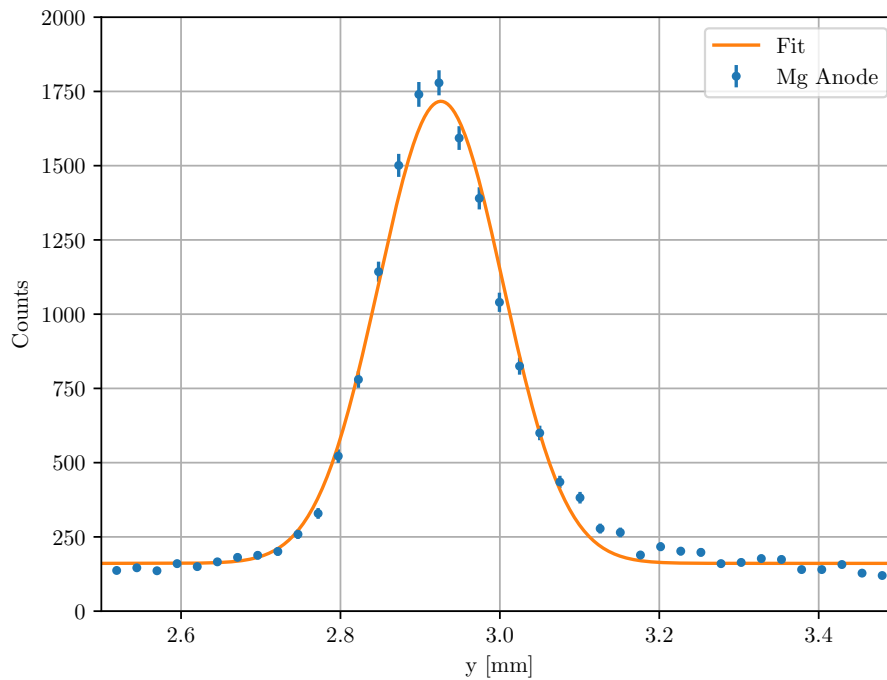


Abbildung A.13: Gaußfit der Mg-K Linie zweiter Ordnung.

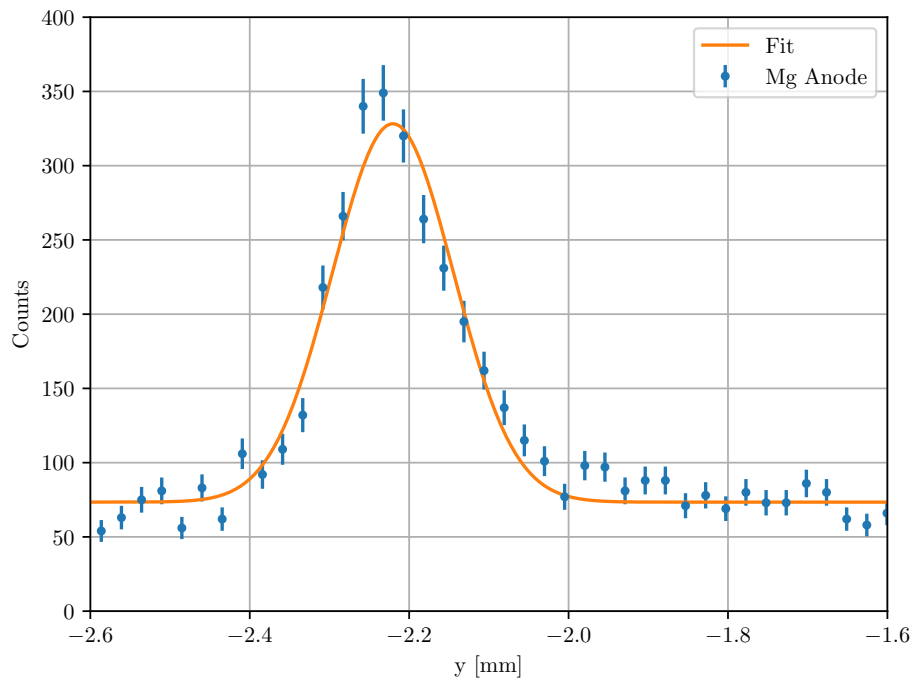


Abbildung A.14: Gaußfit der Mg-K Linie dritter Ordnung.

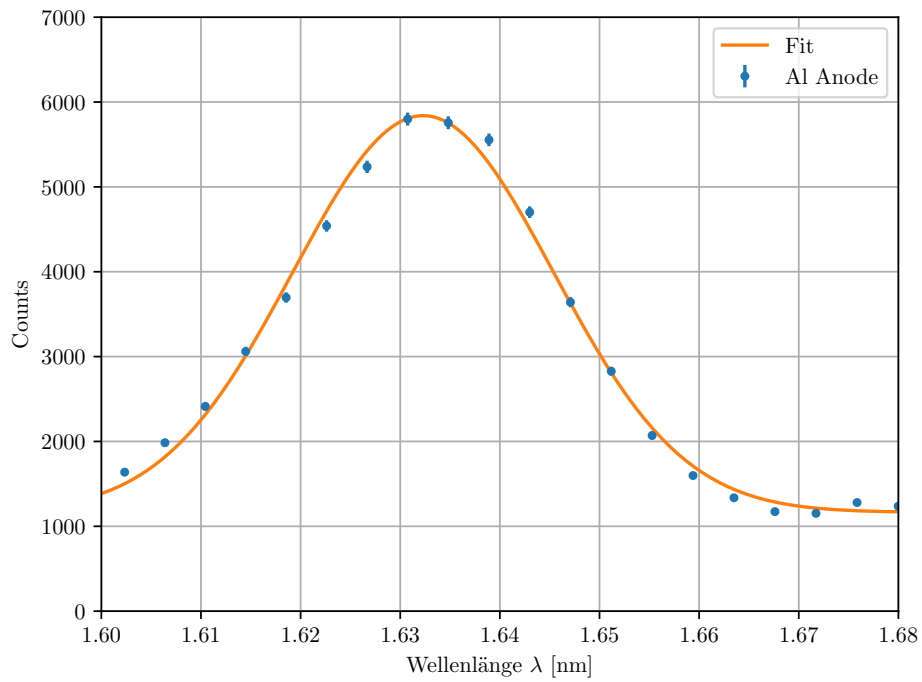


Abbildung A.15: Gaußfit der Al-K Linie zweiter Ordnung.

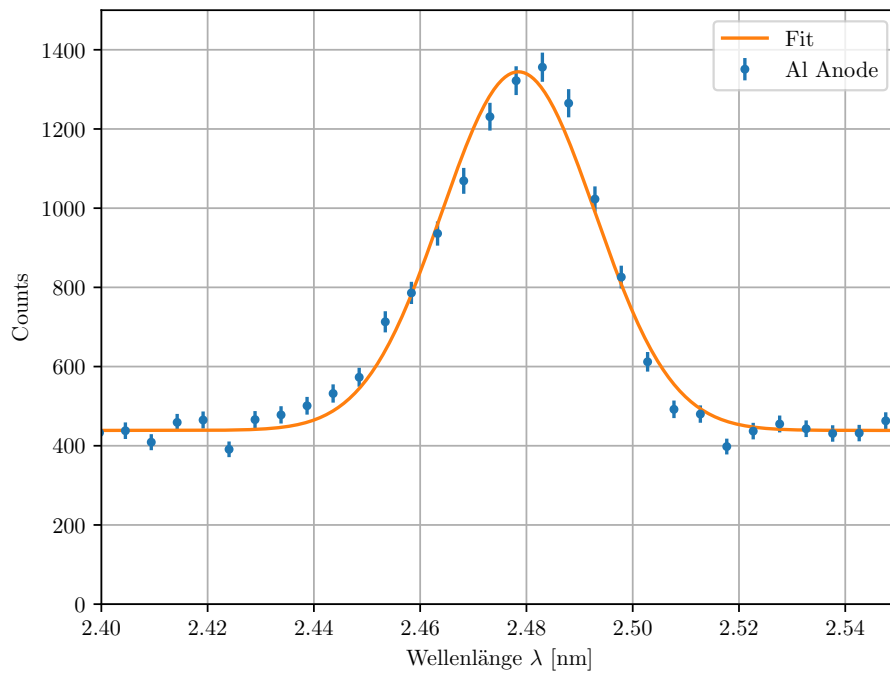


Abbildung A.16: Gaußfit der Al-K Linie dritter Ordnung.

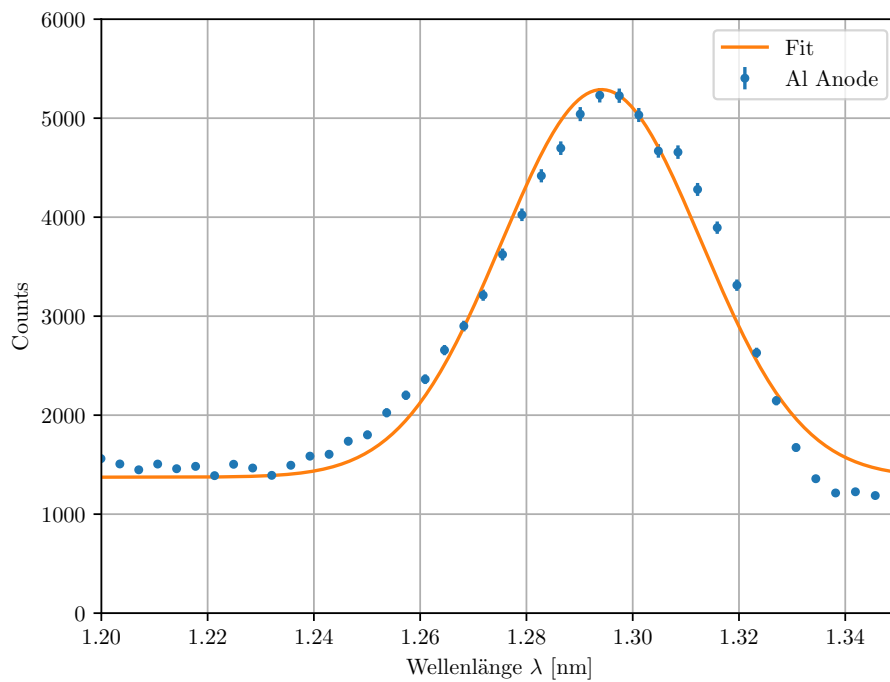


Abbildung A.17: Gaußfit der Cu-L Linie erster Ordnung.

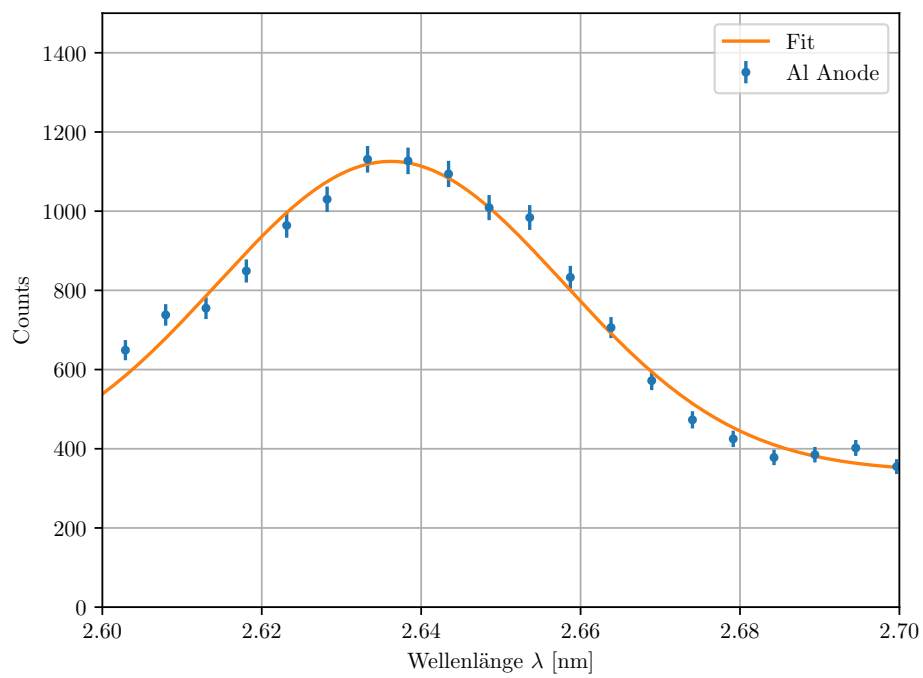


Abbildung A.18: Gaußfit der Cu-L Linie zweiter Ordnung.