

Sebastian Werner

## **Kalibration eines Röntgendetektors für PIXE und erste Messungen an plasmaexponierten Proben**

**IPP 2021-15  
Oktober 2021**



Abschlussarbeit im Bachelorstudiengang Physik

# Kalibration eines Röntgendetektors für PIXE und erste Messungen an plasmaexponierten Proben

Sebastian Werner

06.09.2021

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Erstgutachter (Themensteller): Prof. Dr. Stroth  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Barth  
Betreuer: Dr. Mayer  
Bachelorkolloquium: 12.10.2021

---

## Zusammenfassung

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde ein neu in Betrieb genommener Röntgendetektor am Tandembeschleuniger des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik bei verschiedenen Protonenenergien im Bereich von 1,5 MeV bis 3 MeV und verschiedenen Absorberdicken im Bereich von  $36 \mu\text{m}$  -  $360 \mu\text{m}$  für PIXE (Particle-Induced X-ray Emission) kalibriert. PIXE gehört, wie RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) und NRA (Nuclear Reaction Analysis) zu den Methoden der Ionenstrahlanalytik, mit denen im Anschluss eine breite elementare Analyse von plasmaexponierten Proben aus dem Fusionsexperiment ASDEX-Upgrade durchgeführt wurde. Bei den auf den Proben abgelagerten Elementen ist insbesondere die Kohlenstoffkonzentration von Bedeutung, da diese einen Hinweis auf eventuelle Löcher in der Fusionswand gibt. Die PIXE Kalibrierung auf Basis verschiedener Messreihen mit unterschiedlichen Eingangsparametern und der anschließende Vergleich der PIXE Messergebnisse an den plasmaexponierten Proben mit RBS und NRA lässt für die berechneten Kalibrierfaktoren auf eine Genauigkeit von 5 - 10 % schließen. Die qualitative und quantitative Auswertung der Elementkonzentrationen aus den plasmaexponierten Proben bietet die Datengrundlage für weiterführende Arbeiten.

## Abstract

As part of the bachelor's thesis, a newly commissioned X-ray detector at the tandem accelerator of the Max Planck Institute for Plasma Physics was calibrated for PIXE (Particle-Induced X-ray Emission) at various proton energies in the range from 1,5 MeV to 3 MeV and various absorber thicknesses in the range from  $36 \mu\text{m}$  -  $360 \mu\text{m}$ . PIXE, like RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) and NRA (Nuclear Reaction Analysis), is one of the ion beam analysis methods that was subsequently used to perform a comprehensive elemental analysis of the plasma exposed samples from the ASDEX upgrade fusion experiment. For the elements deposited on the samples, the carbon concentration is of particular importance as it gives an indication of small holes in the fusion wall. The PIXE calibration based on different series of measurements with different input parameters and the subsequent comparison of the PIXE measurement results on the plasma exposed samples with RBS and NRA indicates a good accuracy of the calibration factors in the range of 5 - 10 %. The qualitative and quantitative evaluation of the element concentrations from the plasma exposed samples provides the data basis for further papers.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	1
<b>2 Grundlagen</b>	3
2.1 PIXE	3
2.2 Notation	4
2.3 Experimenteller Aufbau	5
2.4 Rutherford-Rückstreu-Spektrometrie	7
2.5 Nukleare Reaktionsanalyse	8
<b>3 Vorbereitende Messungen</b>	11
3.1 Optimierung der Peaktime	11
3.2 Kalibrierung Energie-Kanal	12
<b>4 Durchführung</b>	13
4.1 Kalibrierung des Röntgendetektors	13
4.2 Plasmaexponierte Proben	13
<b>5 Auswertung</b>	15
5.1 Kalibrierung des Röntgendetektors	15
5.1.1 Genauigkeit der PIXE-Messung	17
5.2 Plasmaexponierte Proben	40
<b>6 Diskussion</b>	49
6.1 Kalibrierung des Röntgendetektors	49
6.2 Plasmaexponierte Proben	49
<b>7 Fehlerrechnung</b>	51
7.1 Kalibrierung des Röntgendetektors	51
7.2 Plasmaexponierte Proben	51
<b>A Messdaten und Dateinamen</b>	53
<b>B Folienradwinkel</b>	61
<b>C Genauigkeit der Strommessung</b>	63
<b>Literatur</b>	65



# Kapitel 1

## Einleitung

PIXE ist eine Methode der Ionenstrahlanalytik, welche auf der Emission von Röntgenstrahlung durch den Beschuss eines Elements mit leichten Ionen (z.B. Protonen) mit Energien typischerweise im MeV Bereich basiert. Die Methode zeichnet sich im Vergleich zu Elektronen-induzierter Röntgenstrahlung durch eine sehr hohe Empfindlichkeit aus und ermöglicht eine gleichzeitige Analyse mehrerer Elemente bei kurzer Messzeit. PIXE wird seit Jahrzehnten in vielen unterschiedlichen Anwendungsgebieten erfolgreich eingesetzt, u.a. Biologie, Medizin und Archäologie.

Als Entdecker der Röntgenstrahlung gilt Wilhelm Konrad Röntgen, der 1895 bei Versuchen mit einer Kathodenstrahlröhre eine neuartige Strahlung entdeckte, die er als X-Strahlen bezeichnete. Dafür erhielt er 1901 den allerersten Nobelpreis für Physik. [1] Im Jahr 1912 gelang es James Chadwick mit Hilfe eines radioaktiven  $\alpha$ -Strahlers Röntgenstrahlung zu erzeugen. Jedoch war die Intensität der emittierten Röntgenstrahlung so gering, dass sie nicht für Analysezwecke geeignet war. Dem britischen Physiker Henry Moseley gelang es 1913 Elektronenbeschuss-induzierte Röntgenstrahlung zur Analyse chemischer Elemente zu verwenden. Das Moseleysche Gesetz beschreibt eine Beziehung zwischen der Wellenlänge, der Röntgenstrahlung und der Ordnungszahl des emittierenden Elements [2]. Bis die elementare Analyse durch eine von schwereren Ionen induzierte Röntgenstrahlung möglich wurde benötigte es noch einige Fortschritte in der Technik. Durch die Einführung von Teilchenbeschleunigern anstelle von radioaktiven Quellen in den 1950er Jahren und die Verbesserung von Detektoren in den 1960er Jahren wurde der Grundstein für PIXE gelegt [3]. Der Name PIXE wurde 1970 an der Universität Lund in Schweden von Johansson et al. eingeführt, wo Experimente mit MeV Protonen und einem hochauflösenden Si(Li) Detektor durchgeführt wurden. Die erfolgreichen Versuche der Forscher führten zu einer raschen Weiterentwicklung der Methode [1].

Bereits in den 1980-er Jahren wurde der erste Röntgendetektor für PIXE am IPP installiert. Im Jahr 2021 wurde ein neuer Röntgendetektor mit einer Kühlung durch ein Peltier-Element (vorher flüssiger Stickstoff), einer besseren Energieauflösung und einem größeren Raumwinkel in Betrieb genommen. Die Kalibrierung des Detektors erlaubt bei zukünftigen Messungen die Elementkonzentrationen einfach aus den PIXE-Spektren zu berechnen.



# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 PIXE

Bei Anwendungen in der Elektronenmikroskopie oder bei PIXE unterteilt sich Röntgenstrahlung in charakteristische Röntgenstrahlung und Bremsstrahlung. PIXE (Particle-Induced X-ray Emission) ist eine Methode der Ionenstrahlanalytik. Dabei wird eine Probe mit einem hochenergetischen Ionenstrahl beschossen. Beim Durchgang der Ionen durch die Probe können durch Stöße der Ionen mit den Elektronenhüllen der Atome einzelne Elektronen aus inneren Schalen herausgeschlagen werden, wodurch dort Leerstellen entstehen. Dieser Zustand ist nicht stabil, sodass die Leerstelle aufgrund der niedrigeren Energie von Elektronen aus äußeren Schalen aufgefüllt wird. Die bei dem Energieübergang frei gewordene Energie wird in Form eines charakteristischen Röntgenquants emittiert [2, 3]. Der Vorgang der Emission charakteristischer Röntgenstrahlung ist in Abbildung 2.1 veranschaulicht.

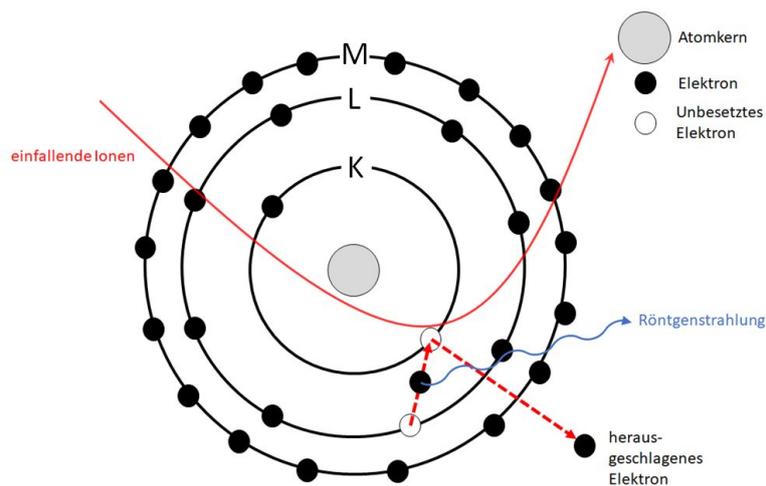


Abbildung 2.1: Entstehung von charakteristischer Röntgenstrahlung nach [4].

Bremsstrahlung tritt auf, wenn geladene Teilchen beschleunigt werden. Die Ursache für die Beschleunigung eines Teilchens ist üblicherweise die Bewegung in einem elektrischen Feld oder Magnetfeld. Der Bremsstrahlungsuntergrund ist bei PIXE deutlich geringer als für die elektroneninduzierte Röntgenstrahlung. Aufgrund der schwereren Masse der Ionen werden diese beim Durchgang einer Probe schwächer abgelenkt als Elektronen, wodurch weniger Bremsstrahlung entsteht. Dadurch lassen sich die Peaks der charakteristischen Röntgenstrahlung, die im Bereich der Bremsstrahlung liegen deutlich genauer auswerten.

Der Prozess kann auch ohne Strahlungsemission in Form des Auger-Effekts ablaufen. Beim Auger-Effekt wird zunächst, exakt wie bei der Entstehung charakteristischer Röntgenstrahlung, eine Leerstelle durch die Wechselwirkung einfallender Ionen mit den Hüllenelektronen aus inneren Schalen erzeugt, wodurch ein Photon emittiert wird. Die Energie des Photons kann allerdings auf ein Elektron einer äußeren Schale übertragen werden, wodurch dieses als sogenanntes Auger-Elektron das Atom verlassen kann. Dieser Effekt kann auch zur quantitativen und qualitativen Analyse der chemischen Zusammen-

setzung in der Auger Elektronen Spektroskopie (AES) verwendet werden. Diese Methode wird in der Arbeit jedoch nicht verwendet.

Die Wahrscheinlichkeit, ob bei der Wechselwirkung Röntgenstrahlung oder ein Augerelektron emittiert wird, gibt der fluorescence yield  $\omega$  an.  $\omega$  ist für schwere Elemente nahe 1, d.h. hier tritt nahezu ausschließlich Röntgenstrahlung auf und für leichte Elemente nahe 0, d.h. hier tritt nahezu ausschließlich der Auger-Effekt auf. [3] Deshalb wird PIXE als Analyseverfahren hauptsächlich für mittelschwer bis schwere Elemente mit einer Ordnungszahl  $Z > 12$  verwendet [1]. Ein zweiter Grund ist die Tatsache, dass leichte Elemente hauptsächlich niederenergetische Röntgenstrahlung aussenden. Diese wird von einer vor dem Detektor platzierten Absorptionsfolie mit der Aufgabe rückgestreute Teilchen zu absorbieren relativ stark abgeschwächt und erlaubt somit nur eine geringe Nachweiswahrscheinlichkeit.

## 2.2 Notation

In dieser Arbeit wird zur Benennung der Röntgenlinien die nach dem gleichnamigen schwedischen Nobelpreisträger Manne Siegbahn benannte Siegbahn-Notation verwendet. Die Notation beginnt mit einem Großbuchstaben, der die ionisierte Schale angibt, die beim Energieübergang wieder aufgefüllt wird (K,L,M,...). Im Index des Großbuchstabens befindet sich ein griechischer Buchstabe, der den Unterschied der Hauptquantenzahl  $\Delta n$  angibt ( $\alpha \hat{=} \Delta n = 1$ ). Eine Zahl im Index des griechischen Buchstabens macht eine Aussage über die Intensität der Linie. Für die Intensität der  $K_{\alpha_1}$ -Linie, welche dem Energieübergang  $1s_{1/2} - 2p_{3/2}$  in spektroskopischer Notation entspricht, gilt beispielsweise, dass die Intensität doppelt so groß ist, wie die der  $K_{\alpha_2}$  Linie [5]. Die Siegbahn-Notation macht jedoch keine Aussage über die Herkunft der Linien. Da man zudem einige Linien erst später fand, die ursprünglich in der Siegbahn-Notation nicht berücksichtigt wurden, führte man als Alternative die IUPAC-Notation ein [6].

In der IUPAC-Notation werden die durch die Spin-Bahn Kopplung aufgespaltenen Energieniveaus innerhalb einer Schale entsprechend der steigenden Energie aufsteigend durchnummeriert. Bei der Beschreibung eines Energieübergangs in der IUPAC-Notation werden nur die beiden beteiligten Energieniveaus angegeben. Dabei wird zuerst das nieder-energetische Niveau und dann das höher-energetische Niveau angegeben. Die  $K_{\alpha_1}$ -Linie beispielsweise wird in IUPAC mit  $KL_3$  abgekürzt. Graphik 2.2 veranschaulicht eine Vielzahl von Energieübergängen und die dazugehörigen Notationen. Dabei kann sowohl die IUPAC-Notation, als auch die Siegbahn-Notation und spektroskopische Notation aus der Abbildung abgelesen werden. Zu beachten ist, dass nur Übergänge erlaubt sind, welche die Auswahlregeln erfüllen:  $\Delta n \neq 0$ ,  $\Delta l = \pm 1$  und  $\Delta j = 0, \pm 1$ . Dabei ist  $l$  die Bahndrehimpuls-Quantenzahl,  $j = l + s$  die Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl und  $s$  die Spinquantenzahl [3].

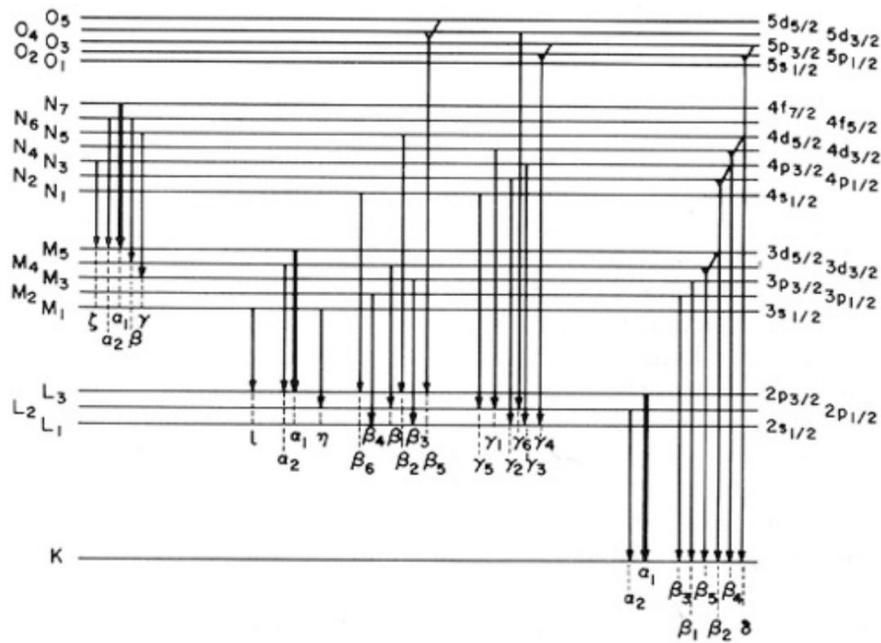


Abbildung 2.2: Energieschema zur Veranschaulichung der Notationen eines Energieübergangs im Bereich der Röntgenstrahlung. links: IUPAC-Notation der entsprechenden Energieniveaus. rechts: spektroskopische Notation der entsprechenden Energieniveaus. unter eingezeichneten Energieübergängen: Siegbahn-Notation. [3]

Allgemein ist anzumerken, dass bei leichteren und mittelschweren Elementen mit einer Ordnungszahl  $Z$  zwischen 20 und 50 vor allem die K-Linien wichtig für eine Auswertung sind. Bei schweren Elementen mit  $Z$  größer 50 besitzen die L-Linien die größte Bedeutung bei einer Analyse. Für sehr schwere Elemente gewinnen auch die M-Linien immer mehr an Bedeutung für Analysezwecke [1].

## 2.3 Experimenteller Aufbau

Der für die Messungen benötigte Ionenstrahl wird von einem Tandembeschleuniger erzeugt und liegt im Energiebereich einiger MeV. Der Aufbau des Beschleunigers und die Anordnung der Experimente ist in Abbildung 2.3 gezeigt.

Der Beschleuniger besitzt eine Cs-Sputterquelle zur Erzeugung von u.a. Protonen, D-, Li-, C-, O-, Si-, W-Ionen und eine RF-Ionenquelle zur Erzeugung von  $^3\text{He}$ - und  $^4\text{He}$ -Ionen. Negativ geladene Ionen treten aus der Quelle aus und werden über einen Ablenkmagneten gefiltert. Im Anschluss werden sie durch eine 3 MV Hochspannung zweifach beschleunigt. Die anfänglich negativ geladenen Ionen treffen in der Mitte der Beschleunigungsröhre auf ein Strippermaterial, welches Elektronen von den Ionen abstreift, sodass die nun positiven Ionen die Beschleunigungsspannung ein zweites Mal durchlaufen können. Über einen Magneten lässt sich der Ionenstrahl zu verschiedenen Messaufbauten hinsteuern [7]. Die Messungen in dieser Arbeit fanden am RKS (**R**ückstreutopf) statt. Dort befindet sich unter einem Winkel von  $135^\circ$  der Röntgendetektor und unter einem Winkel von  $165^\circ$  der Rutherford-Rückstreuungsdetektor (siehe Abbildung 2.4). Der Detektor, der für die NRA-Messung verwendet wird, befindet sich in einem Winkel von  $135^\circ$  aus der Bildebene von Graphik 2.4 herausschauend [8]. Bei dem Röntgendetektor handelt es sich um das Modell KETEK AXAS D (siehe Bedienungsanleitung [9]). Vor dem PIXE-Detektor befindet sich eine Absorberfolie aus Polyethylenterephthalat auch bekannt als Mylar (Summenformel:  $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ ). Unterschiedlich dicke Absorberfolien (mit Dicken im mehrere  $10\ \mu\text{m}$  bis mehrere  $100\ \mu\text{m}$  Bereich) lassen sich auswählen und mittels eines Folienrads über eine Schrittmotorsteuerung einstellen. Die Folie besteht aus zwei Teilen: Ein durch das Folienrad einstellbarer Teil bei dem eine Kombination aus Folien in einem  $45^\circ$  Winkel zur einfallenden Strahlung gekippt wurde und eine  $13\ \mu\text{m}$  dicke Kappenfolie direkt vor dem Detektor, die senkrecht zur einfallenden Strahlung steht. Die wichtigste Aufgabe der Folie ist es zu verhindern, dass rückgestreute Teilchen in den Detektor gelangen und diesen damit im Laufe der Zeit schädigen. Die einzelnen Foliendicken sind nur bis zu einer bestimmten Pro-

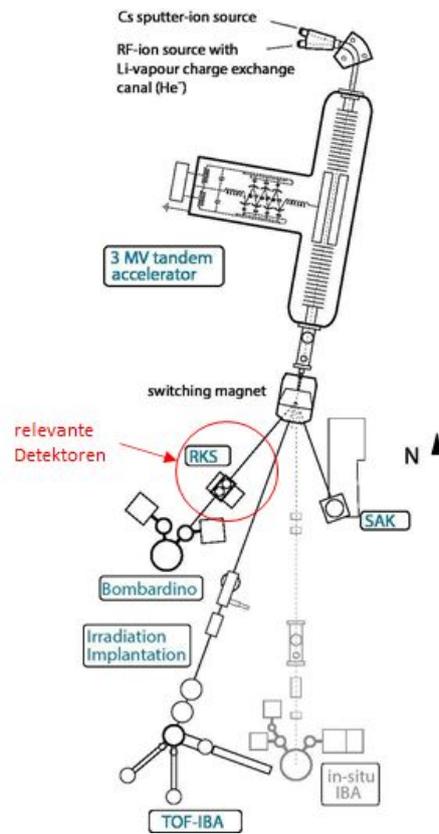


Abbildung 2.3: Aufbau des Tandembeschleunigers und Anordnung der Experimente. [7]

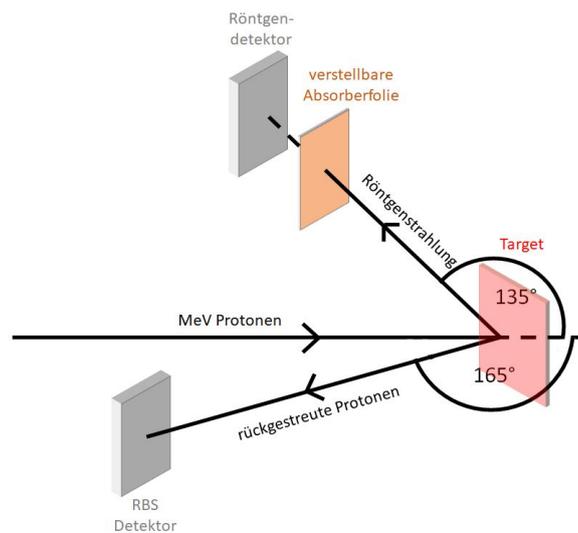


Abbildung 2.4: Anordnung des Röntgendetektors für PIXE unter  $135^\circ$  und des Detektors für RBS unter  $165^\circ$ . (Nicht eingezeichneter Detektor für NRA schaut aus der Bildebene unter einem Winkel von  $135^\circ$  heraus). nach [8]

tonenenergie geeignet, da sie dann nicht mehr in der Lage sind rückgestreute Teilchen zu absorbieren. In Tabelle 2.1 sind die verschiedenen Einstelldicken der ungekippten Folien, die totale Dicke und die maximale Protonenenergie für alle in der Arbeit verwendeten Einstellungen aufgeführt [10].

nomielle Foliendicke ( $\mu\text{m}$ )	totale Foliendicke ( $\mu\text{m}$ )	max. Protonenenergie (keV)
36	63,9	2390
50	83,7	2810
100	154,2	3120
180	267,7	4030
250	366,6	6640
360	522,1	8120

Tabelle 2.1: Umgekippte nominelle Foliendicke, totale Dicke  $45^\circ$  gekippter Folien, maximale Protonenenergie bis zu der die Folien rückgestreute Teilchen noch stoppen können nach [10].

Der Intensitätsverlust der Röntgenstrahlung beim Durchgang durch die Absorberfolie lässt sich mit dem Lambert-Beerschen Gesetz beschreiben:

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (2.1)$$

Dabei entspricht  $I_0$  der eingestrahnten Intensität,  $\alpha$  einem material- und wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten und  $d$  der Dicke der Absorberfolie. Der Absorptionskoeffizient lässt sich mit  $\alpha = 2n'' \frac{\omega}{c}$  aus dem Extinktionskoeffizienten  $n''$ , welcher dem Imaginärteil des Brechungsindex entspricht, der Kreisfrequenz  $\omega$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  bestimmen. Verantwortlich für die Absorption von Röntgenstrahlung sind die drei folgenden mikroskopischen Prozesse: Photoeffekt, Comptonstreuung und elastische Streuung (hauptsächlich in Form von Rayleigh Streuung). Für Absorbermaterialien mit einer hohen Ordnungszahl  $Z$  ist der Photoeffekt dominierend und der Absorptionskoeffizient steigt annähernd mit  $Z^5$  und  $\lambda^3$  an [11, 12].

## 2.4 Rutherford-Rückstreu-Spektrometrie

Rutherford-Rückstreu-Spektrometrie (engl. Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS)) ist eine Methode der Ionstrahlanalytik benannt nach Ernest Rutherford. Die Methode eignet sich zur Untersuchung von oberflächennahen dünnen Schichten mit Hilfe von hochenergetischen Ionenstrahlen (0,1 bis 4 MeV) bestehend aus leichten Ionen (z.B. Protonen oder Heliumionen). Die Energie der rückgestreuten Ionen wird mit Hilfe eines Detektors gemessen [3]. Über Impuls- und Energieerhaltung sowie Kenntnis des Detektorwinkels ist es möglich die Masse eines getroffenen Atoms zu bestimmen und somit auf das Element zu schließen. Der Detektorwinkel ist dabei optimalerweise nahe  $180^\circ$  zu wählen, um die beste Massenauflösung zu erzielen. Tiefeninformationen über die Schichten der Elemente erhält man durch die Wechselwirkung der Ionen mit der Materie. Die einfallenden Ionen werden im Target durch inelastische Stöße mit den Atomen in Form von Anregung oder Ionisation abgebremst. Der Energieverlust pro Weglängeneinheit  $l$  der Ionen kann mit der Bethe-Bloch Formel mathematisch beschrieben werden. Die Bethe-Bloch Formel ist beschränkt auf schwere geladene Teilchen, d.h. Teilchen mit einer Masse schwerer als das Elektron, deren Impuls zwischen  $10 \frac{MeV}{c}$  und  $100 \frac{GeV}{c}$  liegt. Die Ereignisse der elastischen Rutherfordstreuung erscheinen im Spektrum als Peaks. Die Breite eines solchen Peaks entspricht dem Energieunterschied eines Ions, das an der Oberfläche eines Targets rückgestreut wurde und einem Ion, das weit in das Target eingedrungen ist bevor es rückgestreut wurde. Damit lässt sich mit Hilfe der Bethe-Bloch Formel auf die Schichtdicken des Targets schließen [13]. Beachtet werden muss, dass das Ion einen Hin- und Rückweg im Target zurücklegt. Dies lässt sich gut mit Graphik 2.5 veranschaulichen. Graphik 2.5 a) zeigt den Ablauf eines Rückstreueignisses in einem Material  $A_m B_n$  der Dicke  $t$ . Es werden zwei Fälle gezeigt. Im ersten Fall wird ein einfallendes Teilchen der Energie  $E_0$  an der Oberfläche gestreut und besitzt danach die Energie  $K_A E_0$  bzw.  $K_B E_0$ . Im anderen Fall passiert das Teilchen das komplette Material und wird am Ende rückgestreut. Es verliert dabei beim ersten Materialdurchgang  $\Delta E_{in}$  an Energie und beim zweiten Durchgang  $\Delta E_{out}$  an Energie. Die Energie beim

Austritt ist mit  $E_1(A)$  bzw.  $E_1(B)$  benannt. Graphik 2.5 b) zeigt das daraus resultierende Rutherfordstreuungsspektrum. Die Breite der Peaks ist durch die Differenz von  $K_A E_0$  bzw.  $K_B E_0$  und  $E_1(A)$  bzw.  $E_1(B)$  gegeben [3].

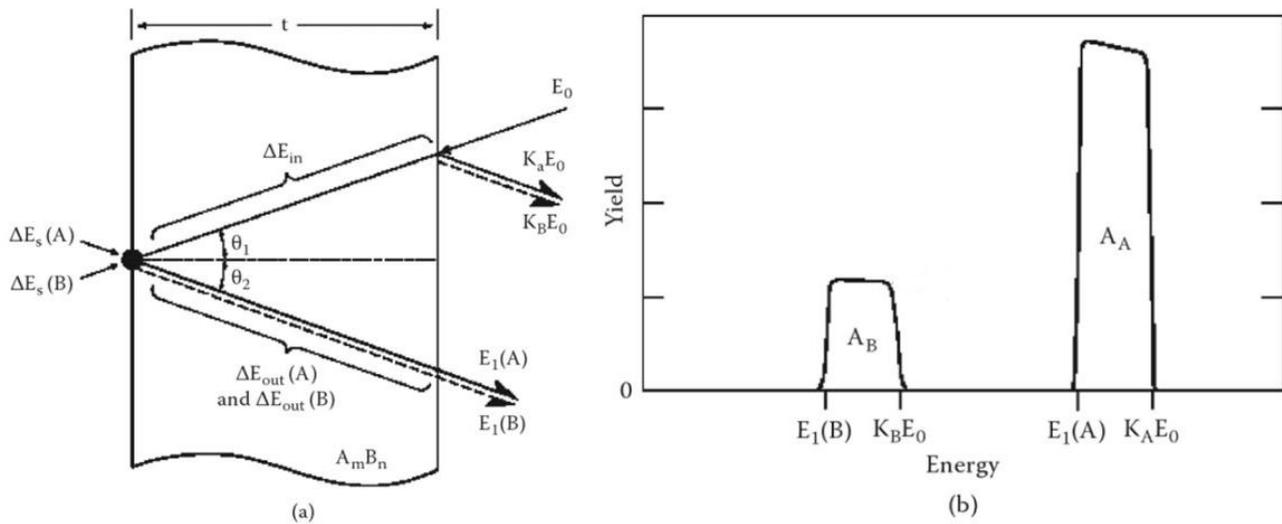


Abbildung 2.5: (a) schematische Repräsentation des Energieverlusts eines einfallenden Teilchens durch einen dünnen Film der Form  $A_m B_n$  und Dicke  $t$ . (b) resultierendes Spektrum benannt mit Energien, die Peakbreite bestimmen. [3]

Ein Problem dieser Methode ist der sogenannte channeling. Dieser Effekt tritt bei Einkristallen auf. Wenn die Ionen unter einem Winkel nahe der Kristallachse einfallen, ist der Zusammenstoß mit Atomen des Gitters sehr unwahrscheinlich, sodass die Ionen tief ins Material eindringen [3]. Dadurch wird die Rückstreurrate vor allem an der höher-energetischen Kante eines Peaks aus dem RBS-Spektrum verringert. Dieser Effekt kann die Konzentrationsbestimmung einiger Elemente bei Proben, die auf einer dickeren Schicht eines Einkristalls aufgeschichtet sind erheblich erschweren.

## 2.5 Nukleare Reaktionsanalyse

Die Nukleare Reaktionsanalyse (engl. Nuclear Reaction Analysis (NRA)) ist eine weitere Methode der Ionenstrahlanalytik. Treffen beschleunigte Ionen auf ein Target kann eine Kernreaktion statt finden, z.B.  ${}^3\text{He} + \text{D} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p}$ . Um in den Bereich der starken Kernkraft zu kommen, muss das einfallende Ion den repulsiven Coulombwall überwinden. Anstatt Rutherford-Streuung tritt dann nukleare Streuung auf. In der Realität können einfallende Teilchen aufgrund des quantenmechanischen Tunneffekts den Coulombwall überwinden und in den Bereich der starken Kernkraft gelangen, obwohl ihre Energie ohne den Tunneffekt dafür nicht ausreicht. Bei den meisten Kernreaktionen sind zwei Teilchen  $a, b$  und zwei Kerne  $X, Y$  beteiligt. Die Notation lautet dann wie folgt:  $a + X \rightarrow b + Y$  oder als abkürzende Notation:  $X(a,b)Y$ . Im Folgenden wird angenommen, dass  $a$  und  $b$  leichte Teilchen sind. Überwindet ein einfallendes Teilchen den Coulombwall und gelangt in den Bereich der starken Kernkraft, treten abhängig von der Energie des einfallenden Teilchens vorrangig zwei wesentliche Kernreaktionen auf. Bei recht niedrigen Energien kann das einfallende Teilchen von dem Atomkern des Targets eingefangen werden und es bildet sich ein gemischter Kern. Man nimmt an, dass in diesem gemischten Kern die Anregungsenergie auf alle Nukleonen gleichermaßen verteilt wird, aber kein Nukleon genug Energie besitzt, um den gemischten Kern direkt zu verlassen. Dieser stark angeregte Kern kann nach kurzer Zeit zufällig in verschiedene Teilchen oder ein  $\gamma$  Quant zerfallen. Für höher-energetische einfallende Teilchen besteht eine gesteigerte Wahrscheinlichkeit, dass die Energie des einfallenden Teilchens auf einzelne oder kleine Gruppen von Nukleonen übertragen wird. Diese werden direkt aus dem Kern herausgeschleudert. Es sind nur Kernreaktionen möglich die Erhaltungssätze u.a. Nukleonenzahlerhaltung, Ladungserhaltung, Energieerhaltung, Impulserhaltung erfüllen. Über Energie- und Impulserhaltung lässt sich die Energie

des aus der Kernreaktion resultierenden Teilchens berechnen, welches dem Teilchen  $b$  beim oben diskutierten Zweikörperproblem entspricht. Zu beachten ist, dass bei der Energieerhaltung die gesamte Energie betrachtet werden muss, also die Ruheenergien und kinetische Energien der Reaktionsteilnehmer. Zusätzlich muss der  $Q$ -Wert  $Q = m_{Anfang} \cdot c^2 - m_{Ende} \cdot c^2$ , welcher durch den Massendefekt gegeben ist, berücksichtigt werden. Im Energiespektrum erscheinen die aus der Kernreaktion emittierten Teilchen  $b$  als einzelne Peaks, die jeweils einer Kernreaktion zugeordnet werden können. Darüber lässt sich auf das Element  $X$  mit dem die Kernreaktion abgelaufen ist schließen. Die Anzahl mit der ein bestimmtes Reaktionsprodukt detektiert wird entspricht dem Peakintegral. Die Konzentration lässt sich über den Wirkungsquerschnitt oder Kalibrierfaktoren aus dem Peakintegral berechnen. [3] Mit der NRA-Methode können meistens nur ein oder wenige Elemente analysiert werden, sodass eine Kombination dieser Methode mit anderen Verfahren sinnvoll ist um eine Probe vollständig charakterisieren zu können.



# Kapitel 3

## Vorbereitende Messungen

### 3.1 Optimierung der Peaktime

Die Peaktime ist ein interner Parameter der Elektronik, welcher einen Einfluss auf die Energieauflösung und die maximale Zählrate hat. Bei der Auswahl der Peaktime wurde vor allem auf eine gute Energieauflösung geachtet. Als Maß für die Auflösung dient die Halbwertsbreite (FWHM).

In dem Programm ProSpect, welches für die Erfassung und Darstellung der Daten aus den PIXE-Messungen verwendet wird, gibt es 24 verschiedene Einstellmöglichkeiten für die Peaktime [9]. Zur Bestimmung der optimalen Halbwertsbreite wurde die Kalibrierprobe von Cr bei sechs verschiedenen Peaktimes im Bereich von  $0,2 \mu\text{s}$  -  $8 \mu\text{s}$  gemessen und die  $K_\alpha$  und  $K_\beta$  Peaks ausgewertet. Diese Peaks werden bewusst verwendet, da der Abstand zwischen  $K_{\alpha_1}$  und  $K_{\alpha_2}$  bzw.  $K_{\beta_1}$  und  $K_{\beta_2}$  Peak mit weniger als  $0,01 \text{ keV}$  sehr gering ist. So kann man einen Gesamtpeak  $K_\alpha$  bzw.  $K_\beta$  definieren, der in sehr guter Näherung einem gaußförmigen Einzelpeak entspricht. Graphik 3.1 zeigt die Halbwertsbreiten in keV der beiden Peaks für die einzelnen Peaktimes in  $\mu\text{s}$ .

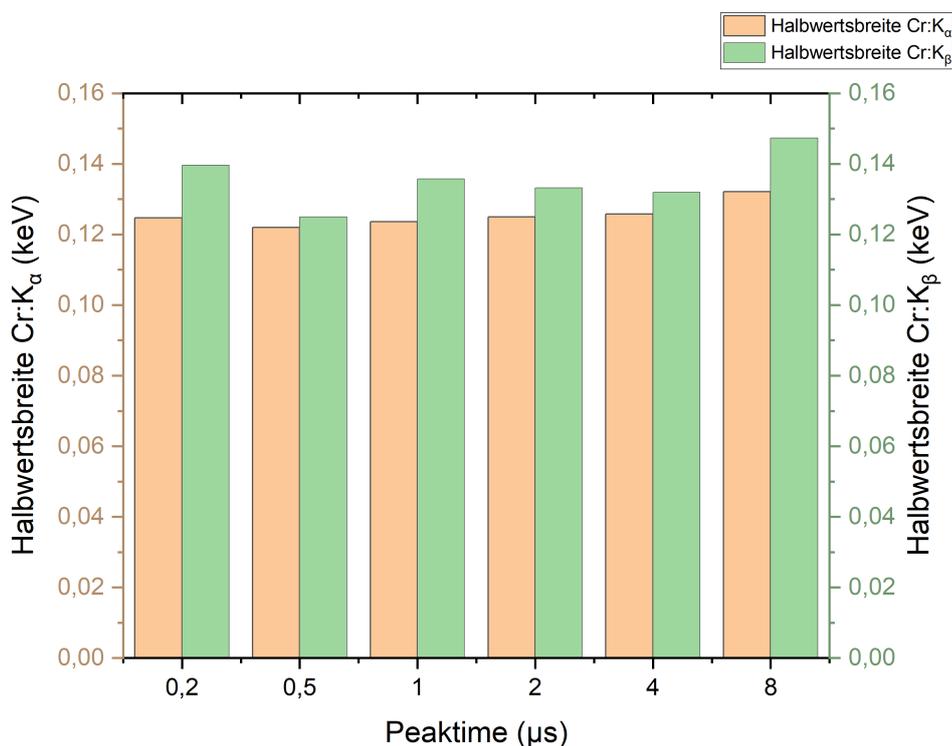


Abbildung 3.1: Halbwertsbreiten in keV für die  $K_\alpha$ - und  $K_\beta$ -Linie von Cr für 6 verschiedene Peaktimes in  $\mu\text{s}$ .

Die Auflösung für die Peaktimes zwischen  $0,5 \mu\text{s}$  -  $4 \mu\text{s}$  sind sehr gut und liegen nahe an der vom Hersteller angegebenen Halbwertsbreite von  $0,0126 \text{ keV}$  bei einer Chip-Temperatur von  $-35 \text{ }^\circ\text{C}$  für den  $K_\alpha$  Peak von Mn [9]. Die Halbwertsbreite der  $K_\beta$ -Linie liegt stets über der Halbwertsbreite der  $K_\alpha$ -Linie, obwohl  $K_{\beta_1}$  und  $K_{\beta_2}$  energetisch noch dichter aneinander liegen, als  $K_{\alpha_1}$  und  $K_{\alpha_2}$ . Dieser

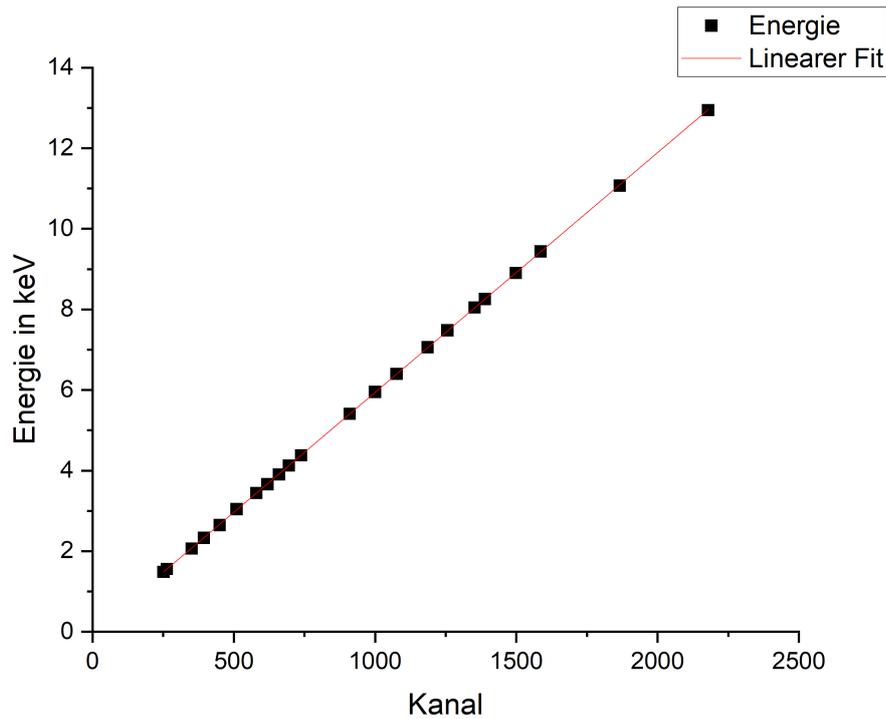


Abbildung 3.2: Linearer Fit von Energie in keV gegen Kanal.

unerwartete Unterschied ist vernachlässigbar gering und bedeutet kein Problem für die Messungen. Für alle folgenden PIXE-Messungen wurde als Peaktime  $4 \mu s$  eingestellt.

### 3.2 Kalibrierung Energie-Kanal

Für die Kalibrierung der PIXE-Spektren von der Kanal-Skala in eine Energie-Skala wurde mithilfe von leicht identifizierbaren Peaks ein linearer Fit (siehe Abb. 3.2) zwischen Energie und Kanal durchgeführt. Die Kalibrierung wurde im Programm ProSpect mit einem Gain von 5,0 durchgeführt. Die durch den Fit errechnete Umrechnungsfunktion lautet:

$$Energie[eV] = 5,952 \pm 0,005[eV] \cdot Kanal - 11 \pm 5[eV] \quad (3.1)$$

# Kapitel 4

## Durchführung

### 4.1 Kalibrierung des Röntgendetektors

Der Röntgendetektor wurde für einfallende Protonen mit den Energien 1,5 MeV, 2,0 MeV, 2,5 MeV und 3,0 MeV kalibriert. Für jede der Protonen Energien wurden eigene Kalibrierfaktoren für jeweils mehrere Absorberfoliendicken bestimmt (Tabelle 4.1). Dazu wurden Protonen mit einer Ladung von insgesamt  $2 \mu\text{C}$  auf die Targets geschossen.

Protonenenergien	nominelle Foliendicke
1,5 MeV	36 $\mu\text{m}$ - 360 $\mu\text{m}$
2,0 MeV	50 $\mu\text{m}$ - 360 $\mu\text{m}$
2,5 MeV	100 $\mu\text{m}$ - 360 $\mu\text{m}$
3,0 MeV	100 $\mu\text{m}$ - 360 $\mu\text{m}$

Tabelle 4.1: Bereich der nominellen Foliendicken bei PIXE-Messungen für verschiedene Energien.

In der Tabelle 4.1 wird die Foliendicke ohne Berücksichtigung der Schrägstellung angegeben (siehe Kapitel 2.3). Die dünnen Folien wurden für höhere Protonenenergien nicht mehr verwendet, da diese dann nicht mehr verhindern, dass rückgestreute Teilchen in den Detektor gelangen.

Die Kalibrierfaktoren wurden für insgesamt 18 Proben bestimmt. Die Kalibrierproben wurden als dünne Schichten mit einer Dicke von ca. 10 - 100 nm auf einem Si-Wafer aufgebracht. Die Proben bestehen aus ein- oder zweielementigen Schichten. Bei den zweielementigen Proben stellt Au immer die oberste Schicht. Für Au und Pt gibt es jeweils zwei unterschiedliche einelementige Proben, die mit einer 1 bzw. 2 gekennzeichnet sind. Alle Proben (Tabelle 4.2) wurden auf drei verschiedene Targethalter verteilt (Abbildung 4.1 links).

Targethalter 1	Targethalter 2	Targethalter 3
Mo	Fe	Au 2
W	Ni	Ag/Au
Au 1	Cr	Pt 2
Ag	Cu	Sn/Au
Pt 1	Cu/Au	Fe/Au
Sn		Ni/Au
		Cr/Au

Tabelle 4.2: Elementsymbole aller Kalibrierproben auf Targethaltern.

Bei den Messungen wurden die RBS- und PIXE-Messmethode gleichzeitig durchgeführt. Gemäß Tabelle 4.1 ergeben sich aus den Kombinationen von Absorberfoliendicke und Protonenenergie für jedes Element 19 Messungen.

### 4.2 Plasmaexponierte Proben

Es wurden insgesamt 20 Si-Wafer zu unterschiedlichen Zeiträumen an den Wänden des Fusionsreaktors ASDEX Upgrade installiert. Die Analyse der plasmaexponierten Proben brachte Aufschluss,

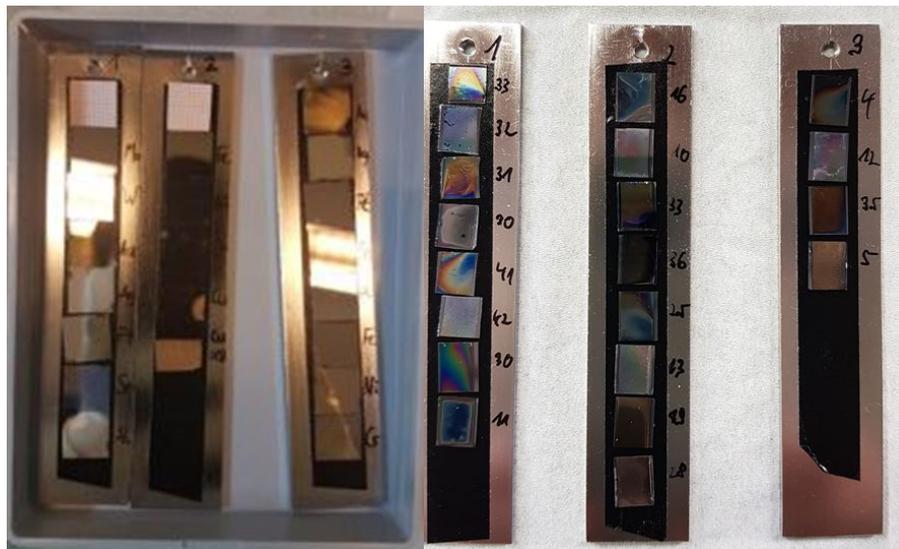


Abbildung 4.1: Targethalter mit Kalibriertargets (links) und plasmaexponierten Proben (rechts).

welche Elemente sich nach einer gewissen Zeit durch Ablagerungen an verschiedenen Stellen aufgeschichtet haben. Dabei interessiert vorrangig die Veränderung der Kohlenstoffkonzentration, die auf mögliche Schäden an der Reaktorwand hinweist. Es werden jedoch alle anderen Elemente, die auf den Proben mit den Messmethoden RBS, NRA und PIXE gefunden wurden, angegeben und miteinander verglichen. Die einzelnen Proben wurden auf drei Targethaltern montiert (Abbildung 4.1 rechts). Die Messungen erfolgten jeweils an zwei unterschiedlichen Stellen, da die Proben schon optisch eine große Inhomogenität aufwiesen. Somit wurden insgesamt 40 Messungen durchgeführt. Für die RBS- und PIXE-Messungen wurde eine Protonenenergie von 1,5 MeV bei einer 36  $\mu\text{m}$  dicken Absorberfolie und einer Peaktime von 4  $\mu\text{s}$  gewählt. Die Ladung aller auf das Target einfallenden Protonen betrug insgesamt 10  $\mu\text{C}$ . Bei der NRA-Messung wurden die Proben mit 2,5 MeV  $^3\text{He}$  beschossen bis eine Ladung von insgesamt 5  $\mu\text{C}$  erreicht wurde.

# Kapitel 5

## Auswertung

### 5.1 Kalibrierung des Röntgendetektors

Die PIXE-Kalibrierfaktoren  $K$  sind durch folgende Gleichung 5.1 definiert.

$$K = \frac{N_{PIXE}}{\text{Gesamtladung} \cdot c_{RBS}} \quad (5.1)$$

$N_{PIXE}$  entspricht dem Integral eines Röntgenpeaks aus dem PIXE-Spektrum. Die Gesamtladung [ $\mu\text{C}$ ] entspricht der Ladung aller insgesamt einfallenden Protonen.  $c_{RBS}$  [ $\frac{10^{15} \text{atome}}{\text{cm}^2}$ ] entspricht der Konzentration eines Elements in der Probe, welche sich aus dem RBS-Spektrum bestimmen lässt.

Zur Bestimmung von  $N_{PIXE}$  aus den PIXE-Spektren wurde in einem festen Kanalbereich für jeden relevanten Peak die Anzahl der Ereignisse in einem Channel aufsummiert. Der Messuntergrund wurde in den Energiebereichen der Peaks aufsummiert und von dem jeweiligen Peakintegral abgezogen. Der Untergrund kommt durch Bremsstrahlung, sowie Materialien die in der Messanlage verbaut sind (u.a. Cu (Cu-Zylinder umgibt die Probe), Al (Al-Halterung der Detektorkappe), Cr und Fe [9]) und den Si-Wafer zustande. Als Beispiel zeigt Abbildung 5.1 das Spektrum von Fe für die 36  $\mu\text{m}$  dicke Folie bei einer Protonenenergie von 1,5 MeV und benennt die relevanten Peaks.

Um die große Menge an Daten zu bewältigen wurde ein Python-Skript geschrieben, welches die Integrale für die relevanten Peaks eines Elements aus den Messdaten vom Dateityp mca in eine csv Datei transformiert.

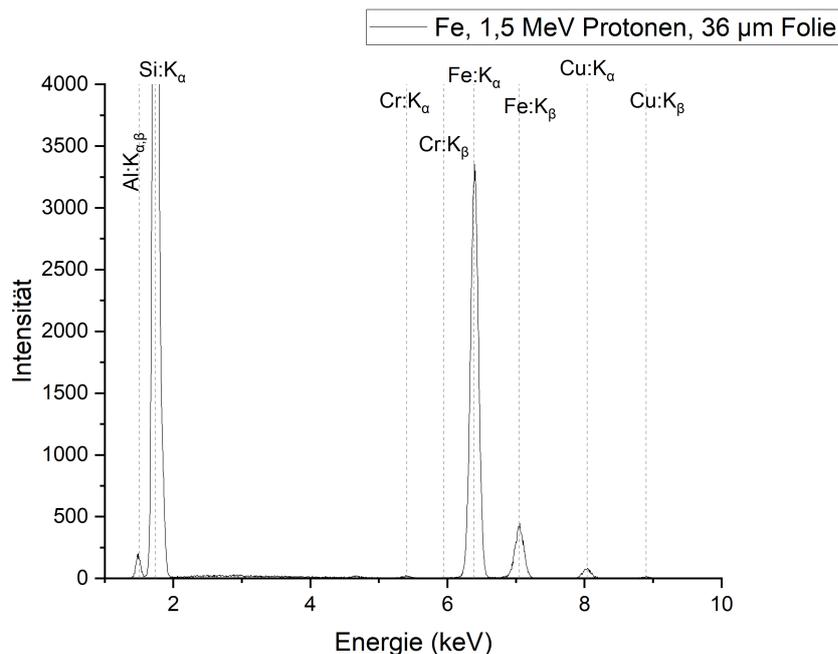


Abbildung 5.1: PIXE-Spektrum der Fe-Kalibrierprobe mit 1,5 MeV Protonen und 36  $\mu\text{m}$  dicke Folie.

IUPAC	Siegbahn	
KL <sub>3</sub>	K <sub>α<sub>1</sub></sub>	} K <sub>α</sub>
KL <sub>2</sub>	K <sub>α<sub>2</sub></sub>	
KM <sub>3</sub>	K <sub>β<sub>1</sub></sub>	} K <sub>β</sub>
KM <sub>2</sub>	K <sub>β<sub>3</sub></sub>	
L <sub>3</sub> M <sub>5</sub>	L <sub>α<sub>1</sub></sub>	} L <sub>α</sub>
L <sub>3</sub> M <sub>4</sub>	L <sub>α<sub>2</sub></sub>	
L <sub>2</sub> M <sub>4</sub>	L <sub>β<sub>1</sub></sub>	} L <sub>β</sub>
L <sub>3</sub> N <sub>5</sub>	L <sub>β<sub>2</sub></sub>	
L <sub>1</sub> M <sub>3</sub>	L <sub>β<sub>3</sub></sub>	
L <sub>1</sub> M <sub>2</sub>	L <sub>β<sub>4</sub></sub>	
L <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	L <sub>γ<sub>1</sub></sub>	
L <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	L <sub>γ<sub>3</sub></sub>	
L <sub>3</sub> M <sub>1</sub>	L <sub>l</sub>	
M <sub>5</sub> N <sub>7</sub>	M <sub>α<sub>1</sub></sub>	} M <sub>α</sub>
M <sub>5</sub> N <sub>6</sub>	M <sub>α<sub>2</sub></sub>	
M <sub>4</sub> N <sub>6</sub>	M <sub>β</sub>	

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung IUPAC-Notation vs. Siegbahn-Notation für alle analysierten Röntgenlinien, sowie Mittelwertangabe nicht trennbarer Röntgenlinien nach [16].

Für die PIXE-Spektren von Ag und Sn liegen die L-Linien sehr dicht aneinander. Für Proben mit einem dieser beiden Elemente wurde daher jeweils ein Gesamtpeak der mehrere Peaks enthält gebildet und die einzelnen Peakintergale mit einem Gaußfit bestimmt.

Falls zwei Röntgenlinien energetisch so nahe beieinander liegen, dass sie nicht mehr trennbar sind wurde ein Mittelwert für die Röntgenlinie definiert. Zum Beispiel beträgt der Abstand der  $K_{\alpha_1}$ - und  $K_{\alpha_2}$ -Linie von Fe 0,013 keV, sodass der Mittelwert  $K_{\alpha}$  für die beiden Linien verwendet wird.

Zur Bestimmung der Konzentration  $c_{RBS}$  wurde das Programm SIMNRA [14] verwendet. Nach Parametrisierung von Wirkungsquerschnitt (1,5 MeV Protonen Rutherford-Wirkungsquerschnitt für Si, ab 2 MeV Protonen non-Rutherford Wirkungsquerschnitt für Si [15]) und 'Teilchen · Raumwinkel' (ca.  $1,38 \cdot 10^{10}$  sr) simuliert das Programm ein Spektrum. Durch Angleichen der Peakintegrale eines Elements des simulierten an das gemessene Spektrum lässt sich die in der Probe enthaltene Elementkonzentration bestimmen. Da die Konzentration eines Probenelements für alle Messungen unverändert bleibt, lässt sich für jedes Element ein Mittelwert über 19 Werte für die aus den RBS-Spektren ermittelte Konzentration bilden. Diese Mittelwerte entsprechen dem jeweiligen  $c_{RBS}$ .

Die Kalibrierfaktoren K zusammen mit ihren fortgepflanzten Fehlern können für die jeweiligen Elemente in Abhängigkeit von Foliendicke und Protonenenergie in den Tabellen 5.2 - 5.23 eingesehen werden. Die Diskussion der Fehler von K erfolgt in Kapitel 7.1. Die einzelnen Röntgenpeaks sind in Siegbahn-Notation angegeben. In Tabelle 5.1 ist für alle analysierten Röntgenlinien die dazugehörige IUPAC Notation aufgelistet.

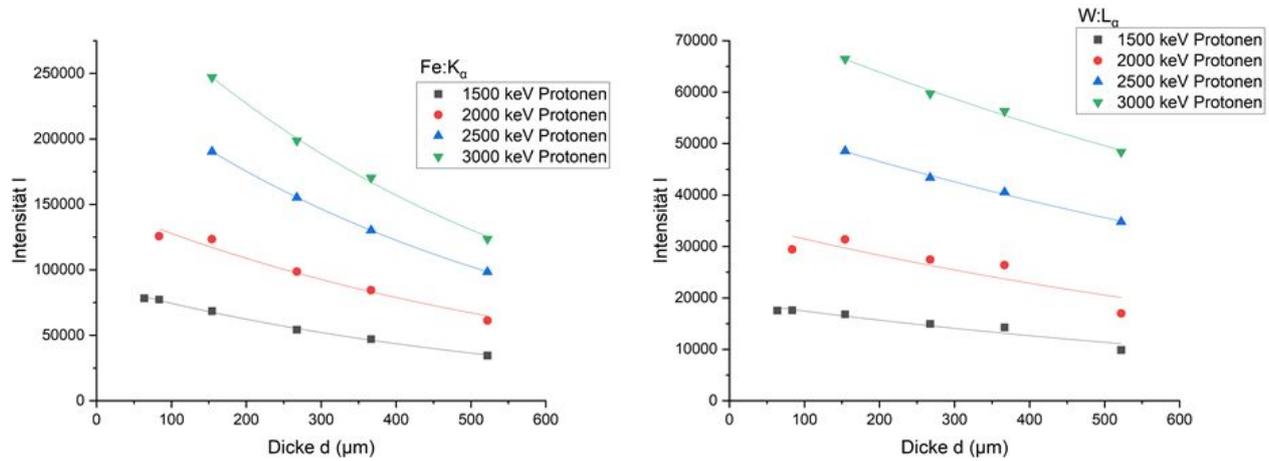


Abbildung 5.2: Fit des exponentiellen Abfalls der Intensität nach dem Lambert-Beerschen Gesetz für Fe: $K_{\alpha}$ -Linie und W: $L_{\alpha}$ -Linie.

Einige dichtliegende Röntgenpeaks aus den Ag und Sn PIXE-Spektren lassen sich aufgrund einer zu niedrigen Intensität nicht mehr gaußfitten. Deshalb sind diese Kalibrierfaktoren in den Tabellen 5.2-5.23 mit *nf* (nicht fitbar) angegeben. Eine 0 im Kalibrierfaktor bedeutet, dass kein charakteristischer Röntgenpeak im PIXE-Spektrum beobachtet wurde, da die Folie die komplette Röntgenstrahlung dieser Wellenlänge absorbiert hat.

### 5.1.1 Genauigkeit der PIXE-Messung

Die Güte der PIXE-Messungen kann mit dem exponentiellen Abfall der Intensität, der durch das Lambert-Beersche Gesetz (Gleichung 2.1) beschrieben wird überprüft werden. Dadurch lässt sich die Genauigkeit des Peakintegrals  $N_{PIXE}$  oder ein Fehler des Messaufbaus, wie eine nicht perfekt eingestellte Absorberfolie oder ein leicht verdrehter Targethalter feststellen. Die Gesetzmäßigkeit wurde für die  $K_{\alpha}$ -Linie von Fe und die  $L_{\alpha}$ -Linie von W für alle vier Protonenenergien überprüft. In Graphik 5.2 wurde für die eben aufgezählten Linien die Intensität  $I$  gegen die Absorberfoliendicke  $d$  mit dem Lambert-Beerschen Gesetz als Theoriekurve gefittet. Dabei werden die Anfangsintensität  $I_0$  und der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  durch das Analyseprogramm Origin 2021 bestimmt. Für die Werte der Folliendicke müssen die totalen Dicken verwendet werden, die in Tabelle 2.1 eingesehen werden können.

Das Bestimmtheitsmaß, bezeichnet mit  $R^2$ , ist ein Parameter um die Anpassungsgüte einer Regression zu beurteilen.  $R^2$  ist als das Verhältnis der erklärten Varianz und der Gesamtvarianz definiert und bemisst den Anteil der Varianz von  $I$ , der sich durch den gefitteten Zusammenhang von  $d$  und  $I$  erklären lässt.  $R^2$  kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je näher der Wert an 1 liegt, desto vollständiger ist die Erklärung des Zusammenhangs von  $I$  und  $d$  durch die gefittete Funktion [17]. Tabelle 5.24 zeigt die Werte von  $R^2$  für die einzelnen Fits aus Abbildung 5.2. Die Werte liegen alle nahe, in den meisten Fällen sogar sehr nahe beim Wert 1. Daraus lässt sich schließen, dass die Messungen von  $N_{PIXE}$  über eine gute Genauigkeit verfügen.

Tabelle 5.2: Kalibrierfaktoren K von Ag Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{cm^2}{\mu C \cdot 10^{15} atome} \right] \cdot$

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu m$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{cm^2}{\mu C \cdot 10^{15} atome} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{cm^2}{\mu C \cdot 10^{15} atome} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{cm^2}{\mu C \cdot 10^{15} atome} \right]$
Ag	1500	36	$L_{\alpha}$	$(1,09 \pm 0,06)E+02$	$L_{\beta_1}$	$(6,9 \pm 0,4)E+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,09 \pm 0,11)E+02$
Ag	1500	50	$L_{\alpha}$	$(7,4 \pm 0,4)E+01$	$L_{\beta_1}$	$(5,8 \pm 0,3)E+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,49 \pm 0,08)E+02$
Ag	1500	100	$L_{\alpha}$	$(2,33 \pm 0,12)E+01$	$L_{\beta_1}$	$(1,59 \pm 0,08)E+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(4,95 \pm 0,25)E+01$
Ag	1500	180	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(9,1 \pm 0,5)E+00$
Ag	1500	250	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,15 \pm 0,12)E+00$
Ag	1500	360	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,92 \pm 0,21)E-01$
Ag	2000	50	$L_{\alpha}$	$(6,6 \pm 0,3)E+01$	$L_{\beta_1}$	$(6,2 \pm 0,3)E+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,09 \pm 0,11)E+02$
Ag	2000	100	$L_{\alpha}$	$(3,34 \pm 0,17)E+01$	$L_{\beta_1}$	$(2,51 \pm 0,12)E+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(6,8 \pm 0,3)E+01$
Ag	2000	180	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,14 \pm 0,06)E+01$
Ag	2000	250	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,02 \pm 0,11)E+00$
Ag	2000	360	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	0
Ag	2500	100	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(9,3 \pm 0,5)E+01$
Ag	2500	180	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,53 \pm 0,08)E+01$
Ag	2500	250	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(4,48 \pm 0,24)E+00$
Ag	2500	360	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,01 \pm 0,07)E+00$
Ag	3000	100	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,09 \pm 0,06)E+02$
Ag	3000	180	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,95 \pm 0,11)E+01$
Ag	3000	250	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(4,58 \pm 0,25)E+00$
Ag	3000	360	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,94 \pm 0,28)E-01$

Tabelle 5.3: Kalibrierfaktoren K von Ag/Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Ag/Au	1500	36	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,0 \pm 0,10)\text{E}+02$	Ag : $L_{\alpha}$	$(1,00 \pm 0,05)\text{E}+02$	Ag : $L_{\beta_1}$	$(6,5 \pm 0,3)\text{E}+01$
Ag/Au	1500	50	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,40 \pm 0,07)\text{E}+02$	Ag : $L_{\alpha}$	$(6,8 \pm 0,4)\text{E}+01$	Ag : $L_{\beta_1}$	$(5,50 \pm 0,28)\text{E}+01$
Ag/Au	1500	100	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(4,6 \pm 0,23)\text{E}+01$	Ag : $L_{\alpha}$	$(2,11 \pm 0,10)\text{E}+01$	Ag : $L_{\beta_1}$	$(1,49 \pm 0,08)\text{E}+01$
Ag/Au	1500	180	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(8,5 \pm 0,4)\text{E}+00$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	1500	250	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,08 \pm 0,12)\text{E}+00$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	$(1,00 \pm 0,05)\text{E}+02$
Ag/Au	1500	360	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,10 \pm 0,22)\text{E}-01$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	2000	50	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(2,13 \pm 0,10)\text{E}+02$	Ag : $L_{\alpha}$	$(6,4 \pm 0,3)\text{E}+01$	Ag : $L_{\beta_1}$	$(3,55 \pm 0,18)\text{E}+01$
Ag/Au	2000	100	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+01$	Ag : $L_{\alpha}$	$(3,04 \pm 0,15)\text{E}+01$	Ag : $L_{\beta_1}$	$(2,25 \pm 0,11)\text{E}+01$
Ag/Au	2000	180	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,03 \pm 0,05)\text{E}+01$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	2000	250	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,94 \pm 0,11)\text{E}+00$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	2000	360	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	0	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	2500	100	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(9,8 \pm 0,5)\text{E}+01$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	2500	180	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,70 \pm 0,09)\text{E}+01$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	2500	250	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(4,85 \pm 0,26)\text{E}+00$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	2500	360	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(8,2 \pm 0,6)\text{E}-01$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	3000	100	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,00 \pm 0,05)\text{E}+02$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	3000	180	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(1,83 \pm 0,10)\text{E}+01$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	3000	250	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	$(4,17 \pm 0,23)\text{E}+00$	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf
Ag/Au	3000	360	Ag : $L_{\alpha, \beta, \gamma_1}$	0	Ag : $L_{\alpha}$	nf	Ag : $L_{\beta_1}$	nf

Tabelle 5.4: Kalibrierfaktoren K von Ag/Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Ag/Au	1500	36	Au : $L_{\alpha}$	$(1,29 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$6,5 \pm 0,3)\text{E}+01$
Ag/Au	1500	50	Au : $L_{\alpha}$	$(1,28 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(2,42 \pm 0,13)\text{E}+01$
Ag/Au	1500	100	Au : $L_{\alpha}$	$(1,20 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(1,23 \pm 0,12)\text{E}+00$
Ag/Au	1500	180	Au : $L_{\alpha}$	$(1,09 \pm 0,06)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(2,4 \pm 0,5)\text{E}-01$
Ag/Au	1500	250	Au : $L_{\alpha}$	$(1,15 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(2,6 \pm 0,5)\text{E}-01$
Ag/Au	1500	360	Au : $L_{\alpha}$	$(9,6 \pm 0,6)\text{E}+00$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(6,8 \pm 2,6)\text{E}-02$
Ag/Au	2000	50	Au : $L_{\alpha}$	$(2,21 \pm 0,12)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(4,06 \pm 0,21)\text{E}+01$
Ag/Au	2000	100	Au : $L_{\alpha}$	$(2,43 \pm 0,13)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(5,5 \pm 0,8)\text{E}-01$
Ag/Au	2000	180	Au : $L_{\alpha}$	$(2,19 \pm 0,12)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	0
Ag/Au	2000	250	Au : $L_{\alpha}$	$(2,17 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	0
Ag/Au	2000	360	Au : $L_{\alpha}$	$(1,97 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	0
Ag/Au	2500	100	Au : $L_{\alpha}$	$(3,96 \pm 0,21)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(3,43 \pm 0,25)\text{E}+00$
Ag/Au	2500	180	Au : $L_{\alpha}$	$(3,67 \pm 0,19)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(3,54 \pm 0,25)\text{E}+00$
Ag/Au	2500	250	Au : $L_{\alpha}$	$(3,54 \pm 0,18)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$3,03 \pm 0,23)\text{E}+00$
Ag/Au	2500	360	Au : $L_{\alpha}$	$(3,14 \pm 0,16)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(2,13 \pm 0,17)\text{E}+00$
Ag/Au	3000	100	Au : $L_{\alpha}$	$(5,52 \pm 0,28)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	$(3,48 \pm 0,25)\text{E}+00$
Ag/Au	3000	180	Au : $L_{\alpha}$	$(5,22 \pm 0,27)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	0
Ag/Au	3000	250	Au : $L_{\alpha}$	$(4,75 \pm 0,24)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	0
Ag/Au	3000	360	Au : $L_{\alpha}$	$(4,01 \pm 0,21)\text{E}+01$	Au : $M_{\alpha,\beta}$	0

Tabelle 5.5: Kalibrierfaktoren K von Cr Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right] \cdot$ 

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Cr	1500	36	$K_{\alpha}$	$(7,6 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,09 \pm 0,06)\text{E}+01$
Cr	1500	50	$K_{\alpha}$	$(7,3 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,06 \pm 0,05)\text{E}+01$
Cr	1500	100	$K_{\alpha}$	$(6,0 \pm 0,3)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(9,1 \pm 0,5)\text{E}+00$
Cr	1500	180	$K_{\alpha}$	$(4,16 \pm 0,21)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(6,8 \pm 0,4)\text{E}+00$
Cr	1500	250	$K_{\alpha}$	$(3,24 \pm 0,16)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(5,9 \pm 0,3)\text{E}+00$
Cr	1500	360	$K_{\alpha}$	$(1,96 \pm 0,11)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,90 \pm 0,21)\text{E}+00$
Cr	2000	50	$K_{\alpha}$	$(1,13 \pm 0,06)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,64 \pm 0,08)\text{E}+01$
Cr	2000	100	$K_{\alpha}$	$(1,02 \pm 0,05)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,52 \pm 0,08)\text{E}+01$
Cr	2000	180	$K_{\alpha}$	$(7,1 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,18 \pm 0,06)\text{E}+01$
Cr	2000	250	$K_{\alpha}$	$(5,48 \pm 0,27)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(9,5 \pm 0,5)\text{E}+00$
Cr	2000	360	$K_{\alpha}$	$(3,21 \pm 0,16)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(6,5 \pm 0,3)\text{E}+00$
Cr	2500	100	$K_{\alpha}$	$(1,51 \pm 0,08)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(2,33 \pm 0,11)\text{E}+01$
Cr	2500	180	$K_{\alpha}$	$(1,09 \pm 0,06)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,81 \pm 0,09)\text{E}+01$
Cr	2500	250	$K_{\alpha}$	$(8,2 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,47 \pm 0,07)\text{E}+01$
Cr	2500	360	$K_{\alpha}$	$(5,06 \pm 0,25)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,03 \pm 0,06)\text{E}+01$
Cr	3000	100	$K_{\alpha}$	$(1,89 \pm 0,11)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(2,87 \pm 0,14)\text{E}+01$
Cr	3000	180	$K_{\alpha}$	$(1,35 \pm 0,07)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(2,24 \pm 0,11)\text{E}+01$
Cr	3000	250	$K_{\alpha}$	$(1,03 \pm 0,05)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,85 \pm 0,09)\text{E}+01$
Cr	3000	360	$K_{\alpha}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,23 \pm 0,06)\text{E}+01$

Tabelle 5.6: Kalibrierfaktoren K von Cr/Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Foliendicke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Cr/Au	1500	36	Cr: $K_\alpha$	$(7,3 \pm 0,4)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(1,05 \pm 0,05)\text{E}+01$
Cr/Au	1500	50	Cr: $K_\alpha$	$(7,1 \pm 0,4)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(1,03 \pm 0,05)\text{E}+01$
Cr/Au	1500	100	Cr: $K_\alpha$	$(5,83 \pm 0,29)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(8,8 \pm 0,4)\text{E}+00$
Cr/Au	1500	180	Cr: $K_\alpha$	$(4,04 \pm 0,21)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(6,8 \pm 0,3)\text{E}+00$
Cr/Au	1500	250	Cr: $K_\alpha$	$(3,15 \pm 0,15)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(5,46 \pm 0,28)\text{E}+00$
Cr/Au	1500	360	Cr: $K_\alpha$	$(1,89 \pm 0,11)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(3,84 \pm 0,19)\text{E}+00$
Cr/Au	2000	50	Cr: $K_\alpha$	$(1,10 \pm 0,06)\text{E}+02$	Cr: $K_\beta$	$(1,60 \pm 0,08)\text{E}+01$
Cr/Au	2000	100	Cr: $K_\alpha$	$(9,8 \pm 0,5)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(1,487 \pm 0,08)\text{E}+01$
Cr/Au	2000	180	Cr: $K_\alpha$	$(6,8 \pm 0,3)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(1,11 \pm 0,06)\text{E}+01$
Cr/Au	2000	250	Cr: $K_\alpha$	$(5,24 \pm 0,26)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(9,3 \pm 0,5)\text{E}+00$
Cr/Au	2000	360	Cr: $K_\alpha$	$(3,08 \pm 0,15)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$6,2 \pm 0,3)\text{E}+01$
Cr/Au	2500	100	Cr: $K_\alpha$	$(1,46 \pm 0,07)\text{E}+02$	Cr: $K_\beta$	$(2,27 \pm 0,11)\text{E}+01$
Cr/Au	2500	180	Cr: $K_\alpha$	$(1,06 \pm 0,05)\text{E}+02$	Cr: $K_\beta$	$(1,78 \pm 0,09)\text{E}+01$
Cr/Au	2500	250	Cr: $K_\alpha$	$(7,9 \pm 0,4)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(1,43 \pm 0,07)\text{E}+01$
Cr/Au	2500	360	Cr: $K_\alpha$	$(4,81 \pm 0,24)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(9,8 \pm 0,5)\text{E}+00$
Cr/Au	3000	100	Cr: $K_\alpha$	$(1,80 \pm 0,09)\text{E}+02$	Cr: $K_\beta$	$(2,73 \pm 0,13)\text{E}+01$
Cr/Au	3000	180	Cr: $K_\alpha$	$(1,31 \pm 0,07)\text{E}+02$	Cr: $K_\beta$	$(2,14 \pm 0,10)\text{E}+01$
Cr/Au	3000	250	Cr: $K_\alpha$	$(9,7 \pm 0,5)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(1,74 \pm 0,09)\text{E}+01$
Cr/Au	3000	360	Cr: $K_\alpha$	$(5,57 \pm 0,28)\text{E}+01$	Cr: $K_\beta$	$(1,10 \pm 0,06)\text{E}+01$

Tabelle 5.7: Kalibrierfaktoren K von Cr/Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Foliendicke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Cr/Au	1500	36	Au: $L_\alpha$	$(1,28 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+01$
Cr/Au	1500	50	Au: $L_\alpha$	$(1,29 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,21 \pm 0,12)\text{E}+01$
Cr/Au	1500	100	Au: $L_\alpha$	$(1,28 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,12 \pm 0,11)\text{E}+00$
Cr/Au	1500	180	Au: $L_\alpha$	$(1,09 \pm 0,06)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,3 \pm 0,5)\text{E}-01$
Cr/Au	1500	250	Au: $L_\alpha$	$(1,14 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,9 \pm 0,4)\text{E}-01$
Cr/Au	1500	360	Au: $L_\alpha$	$(9,5 \pm 0,6)\text{E}+00$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,4 \pm 0,4)\text{E}-01$
Cr/Au	2000	50	Au: $L_\alpha$	$(2,16 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,96 \pm 0,15)\text{E}+01$
Cr/Au	2000	100	Au: $L_\alpha$	$(2,35 \pm 0,12)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Cr/Au	2000	180	Au: $L_\alpha$	$(2,13 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Cr/Au	2000	250	Au: $L_\alpha$	$(2,16 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Cr/Au	2000	360	Au: $L_\alpha$	$(1,86 \pm 0,10)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Cr/Au	2500	100	Au: $L_\alpha$	$(3,8 \pm 0,20)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(6,9 \pm 0,9)\text{E}-01$
Cr/Au	2500	180	Au: $L_\alpha$	$(3,6 \pm 0,19)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,14 \pm 0,17)\text{E}+00$
Cr/Au	2500	250	Au: $L_\alpha$	$(3,37 \pm 0,17)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,04 \pm 0,17)\text{E}+00$
Cr/Au	2500	360	Au: $L_\alpha$	$(3,08 \pm 0,16)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,33 \pm 0,13)\text{E}+00$
Cr/Au	3000	100	Au: $L_\alpha$	$(5,2 \pm 0,27)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(3,18 \pm 0,23)\text{E}+00$
Cr/Au	3000	180	Au: $L_\alpha$	$(5,04 \pm 0,26)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(6,6 \pm 0,9)\text{E}-01$
Cr/Au	3000	250	Au: $L_\alpha$	$(4,78 \pm 0,24)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Cr/Au	3000	360	Au: $L_\alpha$	$(3,96 \pm 0,20)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0

Tabelle 5.8: Kalibrierfaktoren K von Cu Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right] \cdot$

Element	Energie [keV]	Folien­dicke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Cu	1500	36	$K_{\alpha}$	$(2,45 \pm 0,12)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,54 \pm 0,18)\text{E}+00$
Cu	1500	50	$K_{\alpha}$	$(2,45 \pm 0,12)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,55 \pm 0,18)\text{E}+00$
Cu	1500	100	$K_{\alpha}$	$(2,34 \pm 0,11)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,47 \pm 0,18)\text{E}+00$
Cu	1500	180	$K_{\alpha}$	$(2,02 \pm 0,10)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,20 \pm 0,16)\text{E}+00$
Cu	1500	250	$K_{\alpha}$	$(1,95 \pm 0,10)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(2,91 \pm 0,15)\text{E}+00$
Cu	1500	360	$K_{\alpha}$	$(1,65 \pm 0,08)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(2,62 \pm 0,13)\text{E}+00$
Cu	2000	50	$K_{\alpha}$	$(4,26 \pm 0,21)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+00$
Cu	2000	100	$K_{\alpha}$	$(2,38 \pm 0,12)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,34 \pm 0,17)\text{E}+00$
Cu	2000	180	$K_{\alpha}$	$(1,60 \pm 0,08)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(2,26 \pm 0,11)\text{E}+00$
Cu	2000	250	$K_{\alpha}$	$(1,44 \pm 0,07)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(2,22 \pm 0,11)\text{E}+00$
Cu	2000	360	$K_{\alpha}$	$(1,07 \pm 0,05)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(2,01 \pm 0,10)\text{E}+00$
Cu	2500	100	$K_{\alpha}$	$(9,5 \pm 0,5)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,40 \pm 0,07)\text{E}+01$
Cu	2500	180	$K_{\alpha}$	$(8,7 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,31 \pm 0,07)\text{E}+01$
Cu	2500	250	$K_{\alpha}$	$(8,3 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,27 \pm 0,06)\text{E}+01$
Cu	2500	360	$K_{\alpha}$	$(6,9 \pm 0,3)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,09 \pm 0,06)\text{E}+01$
Cu	3000	100	$K_{\alpha}$	$(1,10 \pm 0,06)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,60 \pm 0,08)\text{E}+01$
Cu	3000	180	$K_{\alpha}$	$(8,4 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,23 \pm 0,06)\text{E}+01$
Cu	3000	250	$K_{\alpha}$	$(8,1 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,26 \pm 0,06)\text{E}+01$
Cu	3000	360	$K_{\alpha}$	$(6,1 \pm 0,3)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(9,4 \pm 0,5)\text{E}+00$

Tabelle 5.9: Kalibrierfaktoren K von **Cu/Au** Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
<b>Cu/Au</b>	1500	36	Cu: $K_\alpha$	(2,45 ± 0,12)E+01	Cu: $K_\beta$	(3,47 ± 0,18)E+00
<b>Cu/Au</b>	1500	50	Cu: $K_\alpha$	(2,47 ± 0,12)E+01	Cu: $K_\beta$	(3,56 ± 0,18)E+00
<b>Cu/Au</b>	1500	100	Cu: $K_\alpha$	(2,34 ± 0,11)E+01	Cu: $K_\beta$	(3,37 ± 0,17)E+00
<b>Cu/Au</b>	1500	180	Cu: $K_\alpha$	(2,04 ± 0,10)E+01	Cu: $K_\beta$	(3,08 ± 0,16)E+00
<b>Cu/Au</b>	1500	250	Cu: $K_\alpha$	(1,95 ± 0,10)E+01	Cu: $K_\beta$	(3,07 ± 0,16)E+00
<b>Cu/Au</b>	1500	360	Cu: $K_\alpha$	(1,63 ± 0,08)E+01	Cu: $K_\beta$	(2,59 ± 0,13)E+00
<b>Cu/Au</b>	2000	50	Cu: $K_\alpha$	(4,28 ± 0,21)E+01	Cu: $K_\beta$	(6,1 ± 0,3)E+00
<b>Cu/Au</b>	2000	100	Cu: $K_\alpha$	(2,33 ± 0,11)E+01	Cu: $K_\beta$	(3,12 ± 0,16)E+00
<b>Cu/Au</b>	2000	180	Cu: $K_\alpha$	(1,56 ± 0,08)E+01	Cu: $K_\beta$	(2,22 ± 0,11)E+00
<b>Cu/Au</b>	2000	250	Cu: $K_\alpha$	(1,38 ± 0,07)E+01	Cu: $K_\beta$	(2,11 ± 0,11)E+00
<b>Cu/Au</b>	2000	360	Cu: $K_\alpha$	(1,01 ± 0,05)E+01	Cu: $K_\beta$	(1,77 ± 0,10)E+00
<b>Cu/Au</b>	2500	100	Cu: $K_\alpha$	(9,5 ± 0,4)E+01	Cu: $K_\beta$	(1,40 ± 0,07)E+01
<b>Cu/Au</b>	2500	180	Cu: $K_\alpha$	(8,8 ± 0,4)E+01	Cu: $K_\beta$	(1,32 ± 0,07)E+01
<b>Cu/Au</b>	2500	250	Cu: $K_\alpha$	(8,3 ± 0,4)E+01	Cu: $K_\beta$	(1,27 ± 0,06)E+01
<b>Cu/Au</b>	2500	360	Cu: $K_\alpha$	6,9 ± 0,3)E+01	Cu: $K_\beta$	0,0110 ± 0,06)E+01
<b>Cu/Au</b>	3000	100	Cu: $K_\alpha$	(1,09 ± 0,05)E+02	Cu: $K_\beta$	(1,60 ± 0,08)E+01
<b>Cu/Au</b>	3000	180	Cu: $K_\alpha$	(8,5 ± 0,4)E+01	Cu: $K_\beta$	(1,26 ± 0,06)E+01
<b>Cu/Au</b>	3000	250	Cu: $K_\alpha$	(8,0 ± 0,4)E+01	Cu: $K_\beta$	(1,23 ± 0,06)E+01
<b>Cu/Au</b>	3000	360	Cu: $K_\alpha$	(5,84 ± 0,29)E+01	Cu: $K_\beta$	(9,1 ± 0,5)E+00

Tabelle 5.10: Kalibrierfaktoren K von  $Cu/Au$  Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{cm^2}{\mu C \cdot 10^{15} atome} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu m$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{cm^2}{\mu C \cdot 10^{15} atome} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{cm^2}{\mu C \cdot 10^{15} atome} \right]$
$Cu/Au$	1500	36	Au: $L_{\alpha}$	$(1,21 \pm 0,07)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(6,06 \pm 0,31)E+01$
$Cu/Au$	1500	50	Au: $L_{\alpha}$	$(1,25 \pm 0,07)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,21 \pm 0,12)E+01$
$Cu/Au$	1500	100	Au: $L_{\alpha}$	$(1,26 \pm 0,07)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(9,3 \pm 1,0)E-01$
$Cu/Au$	1500	180	Au: $L_{\alpha}$	$(1,11 \pm 0,06)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
$Cu/Au$	1500	250	Au: $L_{\alpha}$	$(1,06 \pm 0,06)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,1 \pm 0,3)E-01$
$Cu/Au$	1500	360	Au: $L_{\alpha}$	$(9,9 \pm 0,6)E+00$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(8,8 \pm 2,8)E-02$
$Cu/Au$	2000	50	Au: $L_{\alpha}$	$(2,20 \pm 0,11)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,77 \pm 0,14)E+01$
$Cu/Au$	2000	100	Au: $L_{\alpha}$	$(2,40 \pm 0,12)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
$Cu/Au$	2000	180	Au: $L_{\alpha}$	$(2,18 \pm 0,11)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
$Cu/Au$	2000	250	Au: $L_{\alpha}$	$(2,13 \pm 0,11)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
$Cu/Au$	2000	360	Au: $L_{\alpha}$	$(1,86 \pm 0,10)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
$Cu/Au$	2500	100	Au: $L_{\alpha}$	$(3,82 \pm 0,20)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,00 \pm 0,10)E+00$
$Cu/Au$	2500	180	Au: $L_{\alpha}$	$(3,58 \pm 0,18)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,70 \pm 0,14)E+00$
$Cu/Au$	2500	250	Au: $L_{\alpha}$	$(3,31 \pm 0,17)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,82 \pm 0,15)E+00$
$Cu/Au$	2500	360	Au: $L_{\alpha}$	$(3,14 \pm 0,16)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,21 \pm 0,12)E+01$
$Cu/Au$	3000	100	Au: $L_{\alpha}$	$(5,35 \pm 0,27)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,55 \pm 0,19)E+00$
$Cu/Au$	3000	180	Au: $L_{\alpha}$	$(4,95 \pm 0,25)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
$Cu/Au$	3000	250	Au: $L_{\alpha}$	$(4,85 \pm 0,25)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
$Cu/Au$	3000	360	Au: $L_{\alpha}$	$(4,28 \pm 0,22)E+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0

Tabelle 5.11: Kalibrierfaktoren K von Fe Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Fe	1500	36	$K_{\alpha}$	$(4,90 \pm 0,24)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(7,0 \pm 0,4)\text{E}+00$
Fe	1500	50	$K_{\alpha}$	$(4,84 \pm 0,24)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(7,0 \pm 0,4)\text{E}+00$
Fe	1500	100	$K_{\alpha}$	$(4,28 \pm 0,21)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(6,4 \pm 0,3)\text{E}+00$
Fe	1500	180	$K_{\alpha}$	$(3,39 \pm 0,17)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(5,21 \pm 0,26)\text{E}+00$
Fe	1500	250	$K_{\alpha}$	$(2,95 \pm 0,14)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(4,88 \pm 0,25)\text{E}+00$
Fe	1500	360	$K_{\alpha}$	$(2,16 \pm 0,10)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,75 \pm 0,19)\text{E}+00$
Fe	2000	50	$K_{\alpha}$	$(7,9 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,13 \pm 0,06)\text{E}+01$
Fe	2000	100	$K_{\alpha}$	$(7,7 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,14 \pm 0,06)\text{E}+01$
Fe	2000	180	$K_{\alpha}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(9,7 \pm 0,5)\text{E}+01$
Fe	2000	250	$K_{\alpha}$	$(5,29 \pm 0,26)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(8,6 \pm 0,4)\text{E}+00$
Fe	2000	360	$K_{\alpha}$	$(3,83 \pm 0,19)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(6,7 \pm 0,3)\text{E}+00$
Fe	2500	100	$K_{\alpha}$	$(1,19 \pm 0,06)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,77 \pm 0,09)\text{E}+01$
Fe	2500	180	$K_{\alpha}$	$(9,7 \pm 0,5)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,51 \pm 0,08)\text{E}+01$
Fe	2500	250	$K_{\alpha}$	$(8,1 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,32 \pm 0,07)\text{E}+01$
Fe	2500	360	$K_{\alpha}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,07 \pm 0,05)\text{E}+01$
Fe	3000	100	$K_{\alpha}$	$1,55 \pm 0,08\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(2,27 \pm 0,11)\text{E}+01$
Fe	3000	180	$K_{\alpha}$	$(1,24 \pm 0,06)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,97 \pm 0,10)\text{E}+01$
Fe	3000	250	$K_{\alpha}$	$(1,07 \pm 0,05)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,71 \pm 0,09)\text{E}+01$
Fe	3000	360	$K_{\alpha}$	$(7,7 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,35 \pm 0,07)\text{E}+01$

Tabelle 5.12: Kalibrierfaktoren K von Fe/Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Fe/Au	1500	36	Fe:K $_{\alpha}$	(4,88 $\pm$ 0,24)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(6,9 $\pm$ 0,4)E+00
Fe/Au	1500	50	Fe:K $_{\alpha}$	(4,82 $\pm$ 0,24)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(7,0 $\pm$ 0,4)E+00
Fe/Au	1500	100	Fe:K $_{\alpha}$	(4,29 $\pm$ 0,21)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(6,4 $\pm$ 0,3)E+00
Fe/Au	1500	180	Fe:K $_{\alpha}$	(3,42 $\pm$ 0,17)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(5,37 $\pm$ 0,27)E+00
Fe/Au	1500	250	Fe:K $_{\alpha}$	(2,96 $\pm$ 0,14)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(4,82 $\pm$ 0,24)E+00
Fe/Au	1500	360	Fe:K $_{\alpha}$	(2,18 $\pm$ 0,11)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(3,94 $\pm$ 0,20)E+00
Fe/Au	2000	50	Fe:K $_{\alpha}$	(7,9 $\pm$ 0,4)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(1,15 $\pm$ 0,06)E+01
Fe/Au	2000	100	Fe:K $_{\alpha}$	(7,7 $\pm$ 0,4)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(1,12 $\pm$ 0,06)E+01
Fe/Au	2000	180	Fe:K $_{\alpha}$	(6,1 $\pm$ 0,3)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(9,6 $\pm$ 0,5)E+00
Fe/Au	2000	250	Fe:K $_{\alpha}$	(5,25 $\pm$ 0,26)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(8,6 $\pm$ 0,4)E+00
Fe/Au	2000	360	Fe:K $_{\alpha}$	(3,81 $\pm$ 0,19)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(6,7 $\pm$ 0,3)E+00
Fe/Au	2500	100	Fe:K $_{\alpha}$	(1,19 $\pm$ 0,06)E+02	Fe:K $_{\beta}$	(1,81 $\pm$ 0,09)E+01
Fe/Au	2500	180	Fe:K $_{\alpha}$	(9,7 $\pm$ 0,5)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(1,55 $\pm$ 0,08)E+01
Fe/Au	2500	250	Fe:K $_{\alpha}$	(8,2 $\pm$ 0,4)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(1,35 $\pm$ 0,07)E+01
Fe/Au	2500	360	Fe:K $_{\alpha}$	(6,0 $\pm$ 0,3)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(1,07 $\pm$ 0,05)E+01
Fe/Au	3000	100	Fe:K $_{\alpha}$	(1,51 $\pm$ 0,08)E+02	Fe:K $_{\beta}$	(2,28 $\pm$ 0,11)E+01
Fe/Au	3000	180	Fe:K $_{\alpha}$	(1,24 $\pm$ 0,06)E+02	Fe:K $_{\beta}$	(1,96 $\pm$ 0,10)E+01
Fe/Au	3000	250	Fe:K $_{\alpha}$	(1,04 $\pm$ 0,05)E+02	Fe:K $_{\beta}$	(1,70 $\pm$ 0,09)E+01
Fe/Au	3000	360	Fe:K $_{\alpha}$	(7,2 $\pm$ 0,4)E+01	Fe:K $_{\beta}$	(1,28 $\pm$ 0,07)E+01

Tabelle 5.13: Kalibrierfaktoren K von Fe/Au Kalibrierverprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Foliendicke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Fe/Au	1500	36	Au: $L_{\alpha}$	$(1,19 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+01$
Fe/Au	1500	50	Au: $L_{\alpha}$	$(1,27 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,29 \pm 0,12)\text{E}+01$
Fe/Au	1500	100	Au: $L_{\alpha}$	$(1,22 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,19 \pm 0,12)\text{E}+00$
Fe/Au	1500	180	Au: $L_{\alpha}$	$(1,07 \pm 0,06)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,0 \pm 0,3)\text{E}-01$
Fe/Au	1500	250	Au: $L_{\alpha}$	$(1,15 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,2 \pm 0,5)\text{E}-01$
Fe/Au	1500	360	Au: $L_{\alpha}$	$(1,04 \pm 0,06)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(4,8 \pm 2,1)\text{E}-02$
Fe/Au	2000	50	Au: $L_{\alpha}$	$(2,15 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,92 \pm 0,15)\text{E}+01$
Fe/Au	2000	100	Au: $L_{\alpha}$	$(2,33 \pm 0,12)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Fe/Au	2000	180	Au: $L_{\alpha}$	$(2,10 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Fe/Au	2000	250	Au: $L_{\alpha}$	$(2,20 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Fe/Au	2000	360	Au: $L_{\alpha}$	$(1,86 \pm 0,10)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Fe/Au	2500	100	Au: $L_{\alpha}$	$(3,75 \pm 0,19)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(7,5 \pm 0,9)\text{E}-01$
Fe/Au	2500	180	Au: $L_{\alpha}$	$(3,51 \pm 0,18)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,13 \pm 0,17)\text{E}+00$
Fe/Au	2500	250	Au: $L_{\alpha}$	$(3,32 \pm 0,17)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,11 \pm 0,17)\text{E}+00$
Fe/Au	2500	360	Au: $L_{\alpha}$	$(3,10 \pm 0,16)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,49 \pm 0,14)\text{E}+00$
Fe/Au	3000	100	Au: $L_{\alpha}$	$(5,19 \pm 0,27)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,57 \pm 0,20)\text{E}+00$
Fe/Au	3000	180	Au: $L_{\alpha}$	$(5,02 \pm 0,26)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(8,6 \pm 2,9)\text{E}-02$
Fe/Au	3000	250	Au: $L_{\alpha}$	$(4,67 \pm 0,24)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Fe/Au	3000	360	Au: $L_{\alpha}$	$(3,99 \pm 0,21)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0

Tabelle 5.14: Kalibrierfaktoren K von Mo Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Mo	1500	36	$L_{\gamma_3}$	$(2,69 \pm 0,14)\text{E}+00$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(9,0 \pm 0,5)\text{E}+01$
Mo	1500	50	$L_{\gamma_3}$	$(1,67 \pm 0,10)\text{E}+00$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(4,09 \pm 0,20)\text{E}+01$
Mo	1500	100	$L_{\gamma_3}$	$(4,4 \pm 0,3)\text{E}-01$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(3,55 \pm 0,19)\text{E}+00$
Mo	1500	180	$L_{\gamma_3}$	0	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(1,06 \pm 0,13)\text{E}-01$
Mo	1500	250	$L_{\gamma_3}$	$(1,0 \pm 0,4)\text{E}-02$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	0
Mo	1500	360	$L_{\gamma_3}$	$(7 \pm 3)\text{E}-03$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(7 \pm 3)\text{E}-03$
Mo	2000	50	$L_{\gamma_3}$	$(4,48 \pm 0,23)\text{E}+00$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(5,31 \pm 0,26)\text{E}+01$
Mo	2000	100	$L_{\gamma_3}$	0	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(3,10 \pm 0,21)\text{E}+00$
Mo	2000	180	$L_{\gamma_3}$	0	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	0
Mo	2000	250	$L_{\gamma_3}$	0	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	0
Mo	2000	360	$L_{\gamma_3}$	0	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	0
Mo	2500	100	$L_{\gamma_3}$	0	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(4,47 \pm 0,23)\text{E}+00$
Mo	2500	180	$L_{\gamma_3}$	0	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(5,9 \pm 0,4)\text{E}-01$
Mo	2500	250	$L_{\gamma_3}$	$(1,74 \pm 0,17)\text{E}-01$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(6,8 \pm 0,5)\text{E}-01$
Mo	2500	360	$L_{\gamma_3}$	$(1,92 \pm 0,18)\text{E}-01$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(5,7 \pm 0,4)\text{E}-01$
Mo	3000	100	$L_{\gamma_3}$	$(6,7 \pm 0,5)\text{E}-01$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(6,5 \pm 0,3)\text{E}+00$
Mo	3000	180	$L_{\gamma_3}$	$(9,5 \pm 1,2)\text{E}-02$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	$(1,50 \pm 0,16)\text{E}-01$
Mo	3000	250	$L_{\gamma_3}$	$(2,1 \pm 0,5)\text{E}-02$	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	0
Mo	3000	360	$L_{\gamma_3}$	0	$L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	0

Tabelle 5.15: Kalibrierfaktoren K von Ni Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folien­dicke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Ni	1500	36	$K_{\alpha}$	$(3,16 \pm 0,15)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(4,98 \pm 0,25)\text{E}+00$
Ni	1500	50	$K_{\alpha}$	$(3,18 \pm 0,16)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(4,86 \pm 0,25)\text{E}+00$
Ni	1500	100	$K_{\alpha}$	$(2,96 \pm 0,14)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(4,69 \pm 0,24)\text{E}+00$
Ni	1500	180	$K_{\alpha}$	$(2,50 \pm 0,12)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(4,21 \pm 0,21)\text{E}+00$
Ni	1500	250	$K_{\alpha}$	$(2,31 \pm 0,11)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,91 \pm 0,20)\text{E}+00$
Ni	1500	360	$K_{\alpha}$	$(1,88 \pm 0,10)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(3,36 \pm 0,17)\text{E}+00$
Ni	2000	50	$K_{\alpha}$	$(5,39 \pm 0,27)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(8,4 \pm 0,4)\text{E}+00$
Ni	2000	100	$K_{\alpha}$	$(5,59 \pm 0,28)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(8,6 \pm 0,4)\text{E}+00$
Ni	2000	180	$K_{\alpha}$	$(4,84 \pm 0,24)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(7,5 \pm 0,4)\text{E}+00$
Ni	2000	250	$K_{\alpha}$	$(4,45 \pm 0,22)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(7,4 \pm 0,4)\text{E}+00$
Ni	2000	360	$K_{\alpha}$	$(3,60 \pm 0,18)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+00$
Ni	2500	100	$K_{\alpha}$	$(8,9 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,41 \pm 0,07)\text{E}+01$
Ni	2500	180	$K_{\alpha}$	$(7,7 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,27 \pm 0,06)\text{E}+01$
Ni	2500	250	$K_{\alpha}$	$(6,9 \pm 0,3)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,18 \pm 0,06)\text{E}+01$
Ni	2500	360	$K_{\alpha}$	$(5,75 \pm 0,28)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,02 \pm 0,05)\text{E}+01$
Ni	3000	100	$K_{\alpha}$	$(1,19 \pm 0,06)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,88 \pm 0,09)\text{E}+01$
Ni	3000	180	$K_{\alpha}$	$(1,03 \pm 0,05)\text{E}+02$	$K_{\beta}$	$(1,67 \pm 0,08)\text{E}+01$
Ni	3000	250	$K_{\alpha}$	$(9,4 \pm 0,5)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,56 \pm 0,08)\text{E}+01$
Ni	3000	360	$K_{\alpha}$	$(7,7 \pm 0,4)\text{E}+01$	$K_{\beta}$	$(1,32 \pm 0,07)\text{E}+01$

Tabelle 5.16: Kalibrierfaktoren K von Ni/Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Ni/Au	1500	36	Ni:K $_{\alpha}$	$(3,16 \pm 0,15)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(5,38 \pm 0,27)\text{E}+00$
Ni/Au	1500	50	Ni:K $_{\alpha}$	$(3,14 \pm 0,15)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(5,29 \pm 0,27)\text{E}+00$
Ni/Au	1500	100	Ni:K $_{\alpha}$	$(2,93 \pm 0,14)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(4,83 \pm 0,24)\text{E}+00$
Ni/Au	1500	180	Ni:K $_{\alpha}$	$(2,50 \pm 0,12)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(4,45 \pm 0,22)\text{E}+00$
Ni/Au	1500	250	Ni:K $_{\alpha}$	$(2,31 \pm 0,11)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(4,15 \pm 0,21)\text{E}+00$
Ni/Au	1500	360	Ni:K $_{\alpha}$	$(1,90 \pm 0,10)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(3,60 \pm 0,18)\text{E}+00$
Ni/Au	2000	50	Ni:K $_{\alpha}$	$(5,38 \pm 0,27)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(9,2 \pm 0,5)\text{E}+00$
Ni/Au	2000	100	Ni:K $_{\alpha}$	$(5,57 \pm 0,27)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(9,3 \pm 0,5)\text{E}+00$
Ni/Au	2000	180	Ni:K $_{\alpha}$	$(4,76 \pm 0,23)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(8,1 \pm 0,4)\text{E}+00$
Ni/Au	2000	250	Ni:K $_{\alpha}$	$(4,40 \pm 0,22)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(7,9 \pm 0,4)\text{E}+00$
Ni/Au	2000	360	Ni:K $_{\alpha}$	$(3,53 \pm 0,17)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(6,7 \pm 0,3)\text{E}+00$
Ni/Au	2500	100	Ni:K $_{\alpha}$	$(8,8 \pm 0,4)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(1,50 \pm 0,08)\text{E}+01$
Ni/Au	2500	180	Ni:K $_{\alpha}$	$(7,7 \pm 0,4)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(1,39 \pm 0,07)\text{E}+01$
Ni/Au	2500	250	Ni:K $_{\alpha}$	$(6,8 \pm 0,3)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(1,24 \pm 0,06)\text{E}+01$
Ni/Au	2500	360	Ni:K $_{\alpha}$	$(5,63 \pm 0,28)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(1,06 \pm 0,05)\text{E}+01$
Ni/Au	3000	100	Ni:K $_{\alpha}$	$(1,16 \pm 0,06)\text{E}+02$	Ni:K $_{\beta}$	$(1,97 \pm 0,10)\text{E}+01$
Ni/Au	3000	180	Ni:K $_{\alpha}$	$(1,03 \pm 0,05)\text{E}+02$	Ni:K $_{\beta}$	$(1,80 \pm 0,09)\text{E}+01$
Ni/Au	3000	250	Ni:K $_{\alpha}$	$(9,2 \pm 0,5)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(1,69 \pm 0,09)\text{E}+01$
Ni/Au	3000	360	Ni:K $_{\alpha}$	$(7,1 \pm 0,4)\text{E}+01$	Ni:K $_{\beta}$	$(1,33 \pm 0,07)\text{E}+01$

Tabelle 5.17: Kalibrierfaktoren K von Ni/Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Foliendicke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Ni/Au	1500	36	Au: $L_{\alpha}$	$(1,28 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(6,2 \pm 0,3)\text{E}+01$
Ni/Au	1500	50	Au: $L_{\alpha}$	$(1,20 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,23 \pm 0,12)\text{E}+01$
Ni/Au	1500	100	Au: $L_{\alpha}$	$(1,22 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(9,4 \pm 1,0)\text{E}-01$
Ni/Au	1500	180	Au: $L_{\alpha}$	$(1,14 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(8,2 \pm 2,7)\text{E}-02$
Ni/Au	1500	250	Au: $L_{\alpha}$	$(1,13 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,5 \pm 0,4)\text{E}-01$
Ni/Au	1500	360	Au: $L_{\alpha}$	$(1,01 \pm 0,06)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,8 \pm 0,4)\text{E}-01$
Ni/Au	2000	50	Au: $L_{\alpha}$	$(2,19 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,91 \pm 0,15)\text{E}+01$
Ni/Au	2000	100	Au: $L_{\alpha}$	$(2,37 \pm 0,12)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Ni/Au	2000	180	Au: $L_{\alpha}$	$(2,19 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Ni/Au	2000	250	Au: $L_{\alpha}$	$(2,14 \pm 0,11)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Ni/Au	2000	360	Au: $L_{\alpha}$	$(1,85 \pm 0,10)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Ni/Au	2500	100	Au: $L_{\alpha}$	$(3,77 \pm 0,19)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(8,9 \pm 1,0)\text{E}-01$
Ni/Au	2500	180	Au: $L_{\alpha}$	$(3,46 \pm 0,18)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,52 \pm 0,14)\text{E}+00$
Ni/Au	2500	250	Au: $L_{\alpha}$	$(3,37 \pm 0,17)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,02 \pm 0,16)\text{E}+00$
Ni/Au	2500	360	Au: $L_{\alpha}$	$(3,12 \pm 0,16)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,26 \pm 0,12)\text{E}+00$
Ni/Au	3000	100	Au: $L_{\alpha}$	$(5,35 \pm 0,27)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,85 \pm 0,21)\text{E}+00$
Ni/Au	3000	180	Au: $L_{\alpha}$	$(5,05 \pm 0,26)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Ni/Au	3000	250	Au: $L_{\alpha}$	$(4,84 \pm 0,25)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Ni/Au	3000	360	Au: $L_{\alpha}$	$(4,05 \pm 0,21)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0

Tabelle 5.18: Kalibrierfaktoren K von Sn Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Sn	1500	36	$L_{\alpha}$	$(1,11 \pm 0,06)\text{E}+02$	$L_{\beta_1}$	$(6,7 \pm 0,3)\text{E}+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(2,21 \pm 0,11)\text{E}+02$
Sn	1500	50	$L_{\alpha}$	$(9,1 \pm 0,5)\text{E}+01$	$L_{\beta_1}$	$(6,25 \pm 0,31)\text{E}+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(1,80 \pm 0,09)\text{E}+02$
Sn	1500	100	$L_{\alpha}$	$(4,08 \pm 0,20)\text{E}+01$	$L_{\beta_1}$	$(3,34 \pm 0,17)\text{E}+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(8,8 \pm 0,4)\text{E}+01$
Sn	1500	180	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(2,84 \pm 0,14)\text{E}+01$
Sn	1500	250	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(1,15 \pm 0,06)\text{E}+01$
Sn	1500	360	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(2,19 \pm 0,13)\text{E}+00$
Sn	2000	50	$L_{\alpha}$	$(1,25 \pm 0,06)\text{E}+02$	$L_{\beta_1}$	$(9,3 \pm 0,5)\text{E}+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(2,64 \pm 0,13)\text{E}+02$
Sn	2000	100	$L_{\alpha}$	$(6,19 \pm 0,3)\text{E}+01$	$L_{\beta_1}$	$(5,36 \pm 0,27)\text{E}+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(1,20 \pm 0,06)\text{E}+02$
Sn	2000	180	$L_{\alpha}$	$(1,63 \pm 0,08)\text{E}+01$	$L_{\beta_1}$	$(1,78 \pm 0,09)\text{E}+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(3,81 \pm 0,19)\text{E}+01$
Sn	2000	250	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(1,46 \pm 0,08)\text{E}+01$
Sn	2000	360	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(2,64 \pm 0,13)\text{E}+02$
Sn	2500	100	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(1,85 \pm 0,09)\text{E}+02$
Sn	2500	180	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(6,0 \pm 0,3)\text{E}+01$
Sn	2500	250	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$0,0245 \pm 0,0012$
Sn	2500	360	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(2,13 \pm 0,13)\text{E}+00$
Sn	3000	100	$L_{\alpha}$	$(9,4 \pm 0,5)\text{E}+01$	$L_{\beta_1}$	$(9,2 \pm 0,5)\text{E}+01$	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(2,10 \pm 0,10)\text{E}+02$
Sn	3000	180	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(7,1 \pm 0,4)\text{E}+01$
Sn	3000	250	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(2,74 \pm 0,14)\text{E}+01$
Sn	3000	360	$L_{\alpha}$	nf	$L_{\beta_1}$	nf	$L_{\alpha, \beta, \gamma}$	$(5,6 \pm 0,3)\text{E}+00$

Tabelle 5.19: Kalibrierfaktoren K von Sn/Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Sn/Au	1500	36	Sn: $L_{\alpha}$	(1,03 ± 0,05)E+02	Sn: $L_{\beta_1}$	(6,3 ± 0,3)E+01	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(2,06 ± 0,10)E+02
Sn/Au	1500	50	Sn: $L_{\alpha}$	(8,4 ± 0,4)E+01	Sn: $L_{\beta_1}$	(5,80 ± 0,29)E+01	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(1,67 ± 0,09)E+02
Sn/Au	1500	100	Sn: $L_{\alpha}$	(3,75 ± 0,19)E+01	Sn: $L_{\beta_1}$	(3,06 ± 0,15)E+01	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(8,2 ± 0,4)E+01
Sn/Au	1500	180	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(2,62 ± 0,13)E+01
Sn/Au	1500	250	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(1,06 ± 0,06)E+01
Sn/Au	1500	360	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(2,18 ± 0,13)E+00
Sn/Au	2000	50	Sn: $L_{\alpha}$	(1,12 ± 0,06)E+02	Sn: $L_{\beta_1}$	(8,3 ± 0,4)E+01	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(2,38 ± 0,12)E+02
Sn/Au	2000	100	Sn: $L_{\alpha}$	(5,71 ± 0,29)E+01	Sn: $L_{\beta_1}$	(4,65 ± 0,23)E+01	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(1,12 ± 0,06)E+02
Sn/Au	2000	180	Sn: $L_{\alpha}$	(1,48 ± 0,08)E+01	Sn: $L_{\beta_1}$	(1,53 ± 0,08)E+01	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(3,44 ± 0,17)E+01
Sn/Au	2000	250	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(1,34 ± 0,07)E+01
Sn/Au	2000	360	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(2,62 ± 0,15)E+00
Sn/Au	2500	100	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(1,73 ± 0,09)E+02
Sn/Au	2500	180	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(5,64 ± 0,28)E+01
Sn/Au	2500	250	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(2,30 ± 0,11)E+01
Sn/Au	2500	360	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(4,78 ± 0,26)E+00
Sn/Au	3000	100	Sn: $L_{\alpha}$	(8,8 ± 0,5)E+01	Sn: $L_{\beta_1}$	(8,2 ± 0,4)E+01	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(1,96 ± 0,10)E+02
Sn/Au	3000	180	Sn: $L_{\alpha}$	(2,49 ± 0,12)E+01	Sn: $L_{\beta_1}$	(2,49 ± 0,12)E+01	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(6,7 ± 0,3)E+01
Sn/Au	3000	250	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(2,39 ± 0,12)E+01
Sn/Au	3000	360	Sn: $L_{\alpha}$	nf	Sn: $L_{\beta_1}$	nf	Sn: $L_{\alpha,\beta,\gamma_1}$	(4,00 ± 0,22)E+00

Tabelle 5.20: Kalibrierfaktoren K von Sn/Au Kalibriertprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Sn/Au	1500	36	Au: $L_\alpha$	$(1,21 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(6,3 \pm 0,3)\text{E}+01$
Sn/Au	1500	50	Au: $L_\alpha$	$(1,30 \pm 0,08)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,28 \pm 0,12)\text{E}+01$
Sn/Au	1500	100	Au: $L_\alpha$	$(1,29 \pm 0,08)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,25 \pm 0,12)\text{E}+00$
Sn/Au	1500	180	Au: $L_\alpha$	$(1,11 \pm 0,07)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,4 \pm 0,5)\text{E}-01$
Sn/Au	1500	250	Au: $L_\alpha$	$(1,05 \pm 0,06)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(3,2 \pm 0,6)\text{E}-01$
Sn/Au	1500	360	Au: $L_\alpha$	$(1,04 \pm 0,06)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(5,1 \pm 2,2)\text{E}-02$
Sn/Au	2000	50	Au: $L_\alpha$	$(2,19 \pm 0,12)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,93 \pm 0,15)\text{E}+01$
Sn/Au	2000	100	Au: $L_\alpha$	$(2,39 \pm 0,13)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(5,4 \pm 0,8)\text{E}-01$
Sn/Au	2000	180	Au: $L_\alpha$	$(2,22 \pm 0,12)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Sn/Au	2000	250	Au: $L_\alpha$	$(2,22 \pm 0,12)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Sn/Au	2000	360	Au: $L_\alpha$	$(1,95 \pm 0,10)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0
Sn/Au	2500	100	Au: $L_\alpha$	$(3,84 \pm 0,20)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,14 \pm 0,18)\text{E}+00$
Sn/Au	2500	180	Au: $L_\alpha$	$(3,76 \pm 0,20)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,41 \pm 0,19)\text{E}+00$
Sn/Au	2500	250	Au: $L_\alpha$	$(3,54 \pm 0,19)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(2,27 \pm 0,19)\text{E}+00$
Sn/Au	2500	360	Au: $L_\alpha$	$(3,01 \pm 0,16)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(1,65 \pm 0,15)\text{E}+00$
Sn/Au	3000	100	Au: $L_\alpha$	$(5,45 \pm 0,28)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(4,14 \pm 0,29)\text{E}+00$
Sn/Au	3000	180	Au: $L_\alpha$	$(5,31 \pm 0,28)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(7,1 \pm 2,7)\text{E}-02$
Sn/Au	3000	250	Au: $L_\alpha$	$(4,88 \pm 0,25)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	$(4,8 \pm 0,7)\text{E}-01$
Sn/Au	3000	360	Au: $L_\alpha$	$(4,06 \pm 0,21)\text{E}+01$	Au: $M_{\alpha,\beta}$	0

Tabelle 5.21: Kalibrierfaktoren K von W Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
W	1500	36	$L_{\alpha}$	$(2,03 \pm 0,10)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(8,1 \pm 0,4)\text{E}+00$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(4,53 \pm 0,23)\text{E}+00$
W	1500	50	$L_{\alpha}$	$(2,04 \pm 0,10)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(8,1 \pm 0,4)\text{E}+00$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(4,58 \pm 0,24)\text{E}+00$
W	1500	100	$L_{\alpha}$	$(1,95 \pm 0,10)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(8,0 \pm 0,4)\text{E}+00$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(4,37 \pm 0,23)\text{E}+00$
W	1500	180	$L_{\alpha}$	$(1,74 \pm 0,09)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(7,1 \pm 0,4)\text{E}+00$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(4,34 \pm 0,22)\text{E}+00$
W	1500	250	$L_{\alpha}$	$(1,65 \pm 0,08)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(7,2 \pm 0,4)\text{E}+00$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(4,20 \pm 0,22)\text{E}+00$
W	1500	360	$L_{\alpha}$	$(1,15 \pm 0,06)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(5,14 \pm 0,26)\text{E}+00$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(3,04 \pm 0,16)\text{E}+00$
W	2000	50	$L_{\alpha}$	$(3,42 \pm 0,17)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(1,5 \pm 0,08)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(7,6 \pm 0,4)\text{E}+00$
W	2000	100	$L_{\alpha}$	$(3,64 \pm 0,18)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(1,65 \pm 0,08)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(8,7 \pm 0,4)\text{E}+00$
W	2000	180	$L_{\alpha}$	$(3,18 \pm 0,16)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(1,47 \pm 0,07)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(7,7 \pm 0,4)\text{E}+00$
W	2000	250	$L_{\alpha}$	$(3,06 \pm 0,15)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(1,4 \pm 0,07)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(7,4 \pm 0,4)\text{E}+00$
W	2000	360	$L_{\alpha}$	$(1,97 \pm 0,10)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(9,4 \pm 0,5)\text{E}+00$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(5,26 \pm 0,27)\text{E}+00$
W	2500	100	$L_{\alpha}$	$(5,64 \pm 0,28)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(2,58 \pm 0,13)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(1,38 \pm 0,07)\text{E}+01$
W	2500	180	$L_{\alpha}$	$(5,03 \pm 0,25)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(2,37 \pm 0,11)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(1,22 \pm 0,06)\text{E}+01$
W	2500	250	$L_{\alpha}$	$(4,7 \pm 0,23)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(2,3 \pm 0,11)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(1,22 \pm 0,06)\text{E}+01$
W	2500	360	$L_{\alpha}$	$(4,04 \pm 0,20)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(2,12 \pm 0,10)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(1,04 \pm 0,05)\text{E}+01$
W	3000	100	$L_{\alpha}$	$(7,7 \pm 0,4)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(3,76 \pm 0,18)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(1,84 \pm 0,09)\text{E}+01$
W	3000	180	$L_{\alpha}$	$(6,9 \pm 0,3)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(3,57 \pm 0,17)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(1,68 \pm 0,09)\text{E}+01$
W	3000	250	$L_{\alpha}$	$(6,5 \pm 0,3)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(3,37 \pm 0,16)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(1,61 \pm 0,08)\text{E}+01$
W	3000	360	$L_{\alpha}$	$(5,61 \pm 0,28)\text{E}+01$	$L_{\beta_{1,4}}$	$(3,02 \pm 0,15)\text{E}+01$	$L_{\beta_{2,3}}$	$(1,48 \pm 0,08)\text{E}+01$

Tabelle 5.22: Kalibrierfaktoren K von Au Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Au	1500	36	$L_{\alpha}$	$(1,22 \pm 0,06)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(5,90 \pm 0,10)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(6,0 \pm 0,3)\text{E}+01$
Au	1500	50	$L_{\alpha}$	$(1,27 \pm 0,07)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(6,09 \pm 0,10)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(2,15 \pm 0,10)\text{E}+01$
Au	1500	100	$L_{\alpha}$	$(1,23 \pm 0,06)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(6,03 \pm 0,10)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(8,7 \pm 0,6)\text{E}-01$
Au	1500	180	$L_{\alpha}$	$(1,10 \pm 0,06)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(5,69 \pm 0,10)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(1,8 \pm 0,6)\text{E}-02$
Au	1500	250	$L_{\alpha}$	$(1,11 \pm 0,06)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(5,64 \pm 0,10)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(4,9 \pm 1,0)\text{E}-02$
Au	1500	360	$L_{\alpha}$	$(9,0 \pm 0,5)\text{E}+00$	$L_{\beta}$	$(4,82 \pm 0,10)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(2,9 \pm 0,8)\text{E}-02$
Au	2000	50	$L_{\alpha}$	$(2,20 \pm 0,11)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,107 \pm 0,014)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(2,59 \pm 0,13)\text{E}+01$
Au	2000	100	$L_{\alpha}$	$(2,38 \pm 0,12)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,224 \pm 0,015)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(8,5 \pm 0,6)\text{E}-01$
Au	2000	180	$L_{\alpha}$	$(2,19 \pm 0,11)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,140 \pm 0,015)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	0
Au	2000	250	$L_{\alpha}$	$(2,11 \pm 0,10)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,139 \pm 0,015)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	0
Au	2000	360	$L_{\alpha}$	$(1,70 \pm 0,09)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(9,74 \pm 0,13)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	0
Au	2500	100	$L_{\alpha}$	$(3,79 \pm 0,19)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,025 \pm 0,020)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(1,41 \pm 0,09)\text{E}+00$
Au	2500	180	$L_{\alpha}$	$(3,50 \pm 0,17)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,901 \pm 0,020)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(4,9 \pm 0,4)\text{E}-01$
Au	2500	250	$L_{\alpha}$	$(3,38 \pm 0,17)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,84 \pm 0,019)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(5,8 \pm 0,4)\text{E}-01$
Au	2500	360	$L_{\alpha}$	$(3,04 \pm 0,15)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,728 \pm 0,019)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(4,5 \pm 0,4)\text{E}-01$
Au	3000	100	$L_{\alpha}$	$(5,31 \pm 0,26)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,914 \pm 0,025)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(1,92 \pm 0,11)\text{E}+00$
Au	3000	180	$L_{\alpha}$	$(4,97 \pm 0,25)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,786 \pm 0,024)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(2,42 \pm 0,24)\text{E}-01$
Au	3000	250	$L_{\alpha}$	$(4,70 \pm 0,23)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,702 \pm 0,024)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(3,8 \pm 0,3)\text{E}-01$
Au	3000	360	$L_{\alpha}$	$(3,91 \pm 0,19)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,279 \pm 0,022)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(1,81 \pm 0,19)\text{E}-01$

Tabelle 5.23: Kalibrierfaktoren K von Pt Kalibrierprobe in  $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$ .

Element	Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$	Röntgenlinie	K $\left[ \frac{\text{cm}^2}{\mu\text{C} \cdot 10^{15} \text{atome}} \right]$
Pt	1500	36	$L_{\alpha}$	$(1,37 \pm 0,07)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(7,0 \pm 0,4)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(4,53 \pm 0,22)\text{E}+01$
Pt	1500	50	$L_{\alpha}$	$(1,41 \pm 0,07)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(7,0 \pm 0,4)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(1,45 \pm 0,07)\text{E}+01$
Pt	1500	100	$L_{\alpha}$	$(1,35 \pm 0,07)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(7,0 \pm 0,4)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(4,0 \pm 0,3)\text{E}-01$
Pt	1500	180	$L_{\alpha}$	$(1,24 \pm 0,06)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(6,5 \pm 0,3)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(6 \pm 3)\text{E}-03$
Pt	1500	250	$L_{\alpha}$	$(1,22 \pm 0,06)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(6,4 \pm 0,3)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(7 \pm 3)\text{E}-03$
Pt	1500	360	$L_{\alpha}$	$(1,04 \pm 0,05)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(5,8 \pm 0,3)\text{E}+00$	$M_{\alpha,\beta}$	$(2,5 \pm 2,0)\text{E}-03$
Pt	2000	50	$L_{\alpha}$	$(2,44 \pm 0,12)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,26 \pm 0,07)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(1,76 \pm 0,09)\text{E}+01$
Pt	2000	100	$L_{\alpha}$	$(2,58 \pm 0,13)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,42 \pm 0,07)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(2,98 \pm 0,26)\text{E}-01$
Pt	2000	180	$L_{\alpha}$	$(2,39 \pm 0,12)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,33 \pm 0,07)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	0
Pt	2000	250	$L_{\alpha}$	$(2,32 \pm 0,11)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,31 \pm 0,07)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	0
Pt	2000	360	$L_{\alpha}$	$(1,85 \pm 0,09)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,08 \pm 0,06)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	0
Pt	2500	100	$L_{\alpha}$	$(4,17 \pm 0,21)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,33 \pm 0,11)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(6,2 \pm 0,4)\text{E}-01$
Pt	2500	180	$L_{\alpha}$	$(3,89 \pm 0,19)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,21 \pm 0,11)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(2,63 \pm 0,24)\text{E}-01$
Pt	2500	250	$L_{\alpha}$	$(3,64 \pm 0,18)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,14 \pm 0,10)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(3,04 \pm 0,27)\text{E}-01$
Pt	2500	360	$L_{\alpha}$	$(3,29 \pm 0,16)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(1,98 \pm 0,10)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(2,03 \pm 0,21)\text{E}-01$
Pt	3000	100	$L_{\alpha}$	$(5,78 \pm 0,29)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(3,34 \pm 0,16)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	$(8,2 \pm 0,6)\text{E}-01$
Pt	3000	180	$L_{\alpha}$	$(5,41 \pm 0,27)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(3,17 \pm 0,16)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	0
Pt	3000	250	$L_{\alpha}$	$(5,10 \pm 0,25)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(3,08 \pm 0,15)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	0
Pt	3000	360	$L_{\alpha}$	$(4,37 \pm 0,22)\text{E}+01$	$L_{\beta}$	$(2,74 \pm 0,13)\text{E}+01$	$M_{\alpha,\beta}$	0

Röntgenlinie	Energie	$R^2$
Fe: $K_\alpha$	1500 keV	1,00
Fe: $K_\alpha$	2000 keV	0,97
Fe: $K_\alpha$	2500 keV	1,00
Fe: $K_\alpha$	3000 keV	1,00
W: $L_\alpha$	1500 keV	0,92
W: $L_\alpha$	2000 keV	0,78
W: $L_\alpha$	2500 keV	1,00
W: $L_\alpha$	3000 keV	0,99

Tabelle 5.24:  $R^2$  Wert für verschiedene Röntgenlinien und Energien zur Beurteilung der Anpassungsgüte des Lambert-Beerschen Gesetzes.

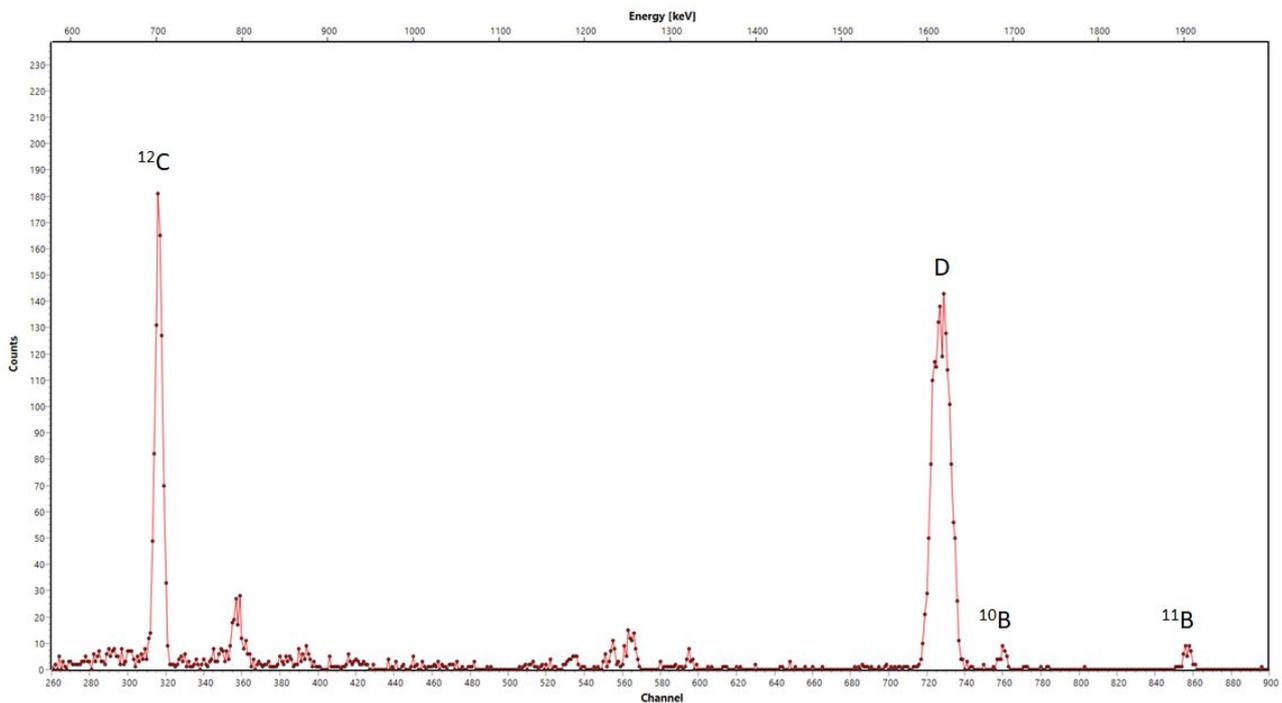


Abbildung 5.3: Typisches NRA-Spektrum einer der plasmaexponierten Proben.

## 5.2 Plasmaexponierte Proben

Im NRA-Spektrum lassen sich die nach einer Kernreaktion gemessenen Protonen für die einzelnen Ereignisse als gaußförmige Peaks erkennen. Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft das typische Spektrum einer der gemessenen plasmaexponierten Proben und benennt die Elemente der analysierten Peaks. Um aus den NRA-Spektren die Konzentration  $c_{NRA}$  der einzelnen Elemente zu erhalten, wurde das Peakintegral bestimmt und mit Hilfe von bekannten NRA-Kalibrierfaktoren  $K_{NRA}$  in eine Konzentration umgerechnet. Tabelle 5.25 zeigt die aus den NRA-Spektren gefundenen Elemente, deren Kalibrierfaktoren und die dazugehörigen Kernreaktionen in der Kurzschreibweise aus Kapitel 2.5.

Für die B Messungen wird das Verhältnis  $\frac{^{10}B}{^{11}B}$  mit dem natürlichen Isotopenverhältnis von  $\frac{19,9}{80,1} \approx 0,248$  verglichen.

Die Auswertung der RBS-Spektren erfolgt analog zur Beschreibung aus Kapitel 5.1. Für die 1,5 MeV Protonen lässt sich der Rutherford-Wirkungsquerschnitt und ein 'Teilchen · Raumwinkel' von (ca.  $6,24 \cdot 10^{10}$  sr) verwenden. Aus den Spektren werden die Konzentrationen  $c_{RBS}$  für die Materialien B, C und W bestimmt. Ein RBS-Spektrum einer plasmaexponierten Probe mit Zuordnung der Peaks zu den Elementen befindet sich in Abbildung 5.4. Bei manchen Spektren führen channeling-Effekte in der dicken Si-Schicht des Wafers zu signifikanten Abweichungen zwischen gemessenem und simuliertem

Element	Kalibrierfaktor $K_{NRA}$	Kernreaktion
D	8,941 Counts $\hat{=} \frac{10^{15} - \text{Atome}}{\text{cm}^2}$	$D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$
$^{10}\text{B}$	0,658 Counts $\hat{=} \frac{10^{15} - \text{Atome}}{\text{cm}^2}$	$^{10}\text{B}(^3\text{He}, p)^{12}\text{C}$
$^{11}\text{B}$	0,112 Counts $\hat{=} \frac{10^{15} - \text{Atome}}{\text{cm}^2}$	$^{11}\text{B}(^3\text{He}, p)^{13}\text{C}$
$^{12}\text{C}$	1,747 Counts $\hat{=} \frac{10^{15} - \text{Atome}}{\text{cm}^2}$	$^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$

Tabelle 5.25: Zuordnung von Kalibrierfaktoren und entsprechenden Kernreaktionen zu den analysierten Elementen aus den NRA-Spektren.

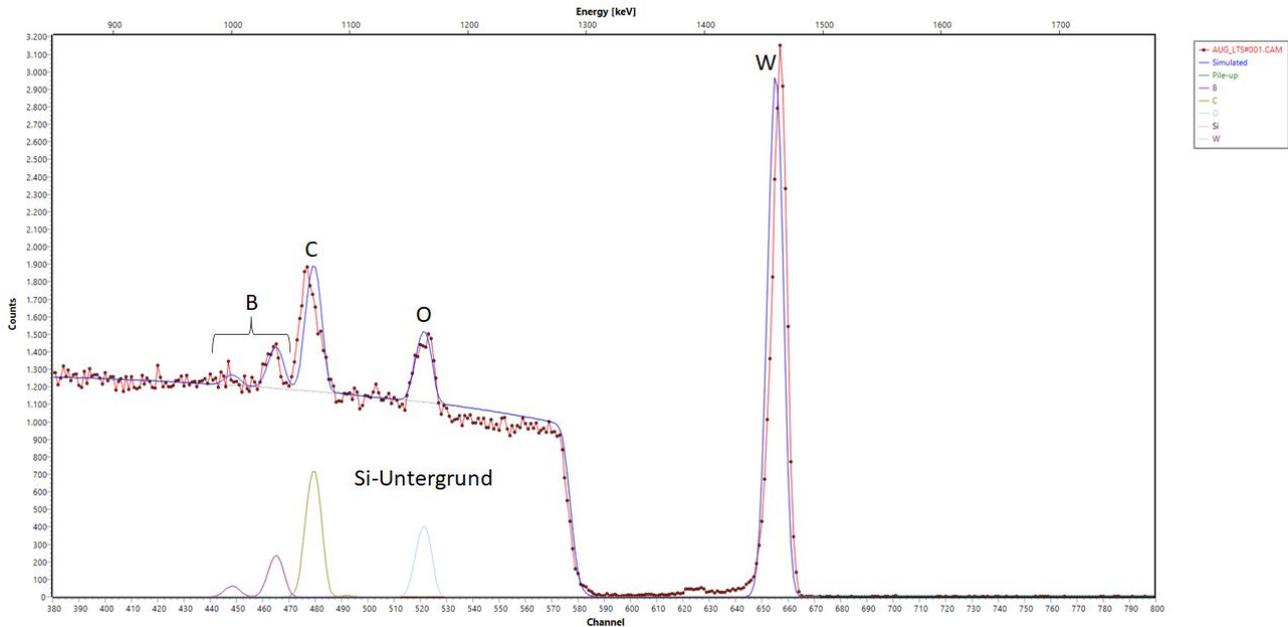


Abbildung 5.4: Typisches beschriftetes RBS-Spektrum plasmaexponierter Probe.

ten Spektrum besonders nahe der Si-Kante. Um die Konzentration von den auf dem Si-Untergrund liegenden Peaks von B und C korrekt zu ermitteln, wurden die Parameter 'Teilchen · Raumwinkel' und 'Rauheit der Oberfläche' entsprechend angepasst. Der RBS-Peak des Elements O liegt nahe an der Si-Kante und wurde aufgrund starker channeling-Effekte nicht analysiert.

Zur Bestimmung der Konzentrationen  $c_{PIXE}$  aus den PIXE-Spektren benötigt man die in Kapitel 5.1 berechneten Kalibrierfaktoren und die Peakintegrale der Elemente aus den plasmaexponierten Proben. In Abbildung 5.5 sind die zur Auswertung des PIXE-Spektrums herangezogenen Peaks beschriftet. Aus den Spektren lässt sich die Konzentration von Fe, Cu und W als Mittelwert mehrerer Röntgenlinien ermitteln. Bei Cr entspricht die  $K_{\beta}$ -Linie keinem Einzelpeak, sodass nur die  $K_{\alpha}$ -Linie zur Bestimmung der Konzentration herangezogen werden konnte.

Die bei den drei Analysemethoden auftretenden Fehler werden in Kapitel 7.2 diskutiert. Für die meisten untersuchten Elemente bietet nur eine der Methoden ausreichende Empfindlichkeit. Die Elemente C, B und W können hingegen mit zwei verschiedenen Methoden untersucht werden. Dabei wurden die ermittelten Konzentrationen verglichen, um eine Aussage über die Messgenauigkeit zu tätigen. Zusätzlich lässt sich jeweils ein mit dem Fehler gewichteter Mittelwert  $\bar{c}_{(Element, Methode1+Methode2)}$  für die Konzentrationen bilden. Dieser gewichtete Mittelwert und der Fehler des gewichteten Mittelwerts werden in Kapitel 7.2 diskutiert. Falls der Wert aus einer Messmethode 0 beträgt wurde der arithmetische Mittelwert verwendet, da die Bildung des gewichteten Mittelwerts nicht möglich ist. Um die Konzentrationen der beiden  $^{10}\text{B}$  und  $^{11}\text{B}$  Isotope aus der NRA-Messung mit der B-Konzentration aus RBS zu vergleichen muss  $B_{NRA} = ^{10}\text{B} + ^{11}\text{B}$  berechnet werden. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben wurden auf jeder plasmaexponierten Probe zwei Messungen durchgeführt. Für die aus den beiden Messungen ermittelten Konzentrationen wurde ein Mittelwert  $\bar{c}_{(Element, 1+2)}$  für jede plasmaexponierte

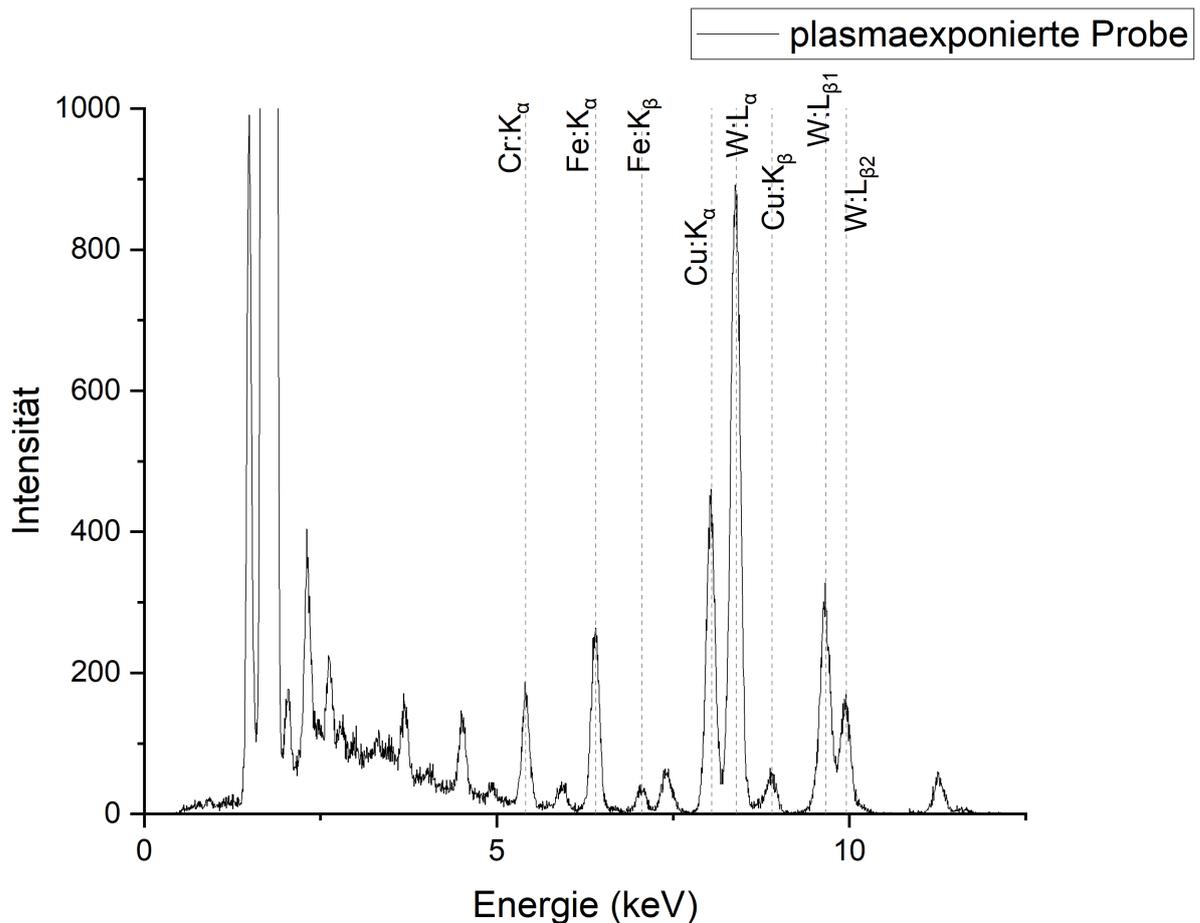


Abbildung 5.5: Typisches beschriftetes PIXE-Spektrum einer der plasmaexponierten Proben.

Probe gebildet. Dabei ist zu beachten, dass die Inhomogenität der Proben bereits optisch sichtbar war, sodass die Definition eines Mittelwerts nur zum besseren Vergleich verschiedener Proben dient. Es wurde deshalb kein fortgeplanter Fehler angegeben.

Die Tabellen 5.26 - 5.29 zeigen die Einzelkonzentrationen der jeweiligen Methoden, gemittelte Konzentrationen und das Isotopenverhältnis von B mit ihren Fehlern an. Die Proben stammen aus dem Projekt AUG und werden mit 'Jahr der Probeninstallation, Probennummer<sub>i</sub>' benannt, wobei  $i = 1, 2$  angibt, ob es sich um die Messung der Probe an der oberen Position 1 oder der unteren Position 2 handelt.

Um eine erste Tendenz der Konzentrationsänderung von C und D in den Jahren 2014 - 2020 zu erkennen wurde in Graphik 5.6 für jedes Installationsjahr die mittlere Konzentration aller gemessenen Proben eines Jahres aufgetragen. Die Werte der mittleren Konzentration von C befinden sich zwischen 173 und  $273,5 \frac{10^{15} \text{atome}}{\text{cm}^2}$  und lassen keinen Trend für eine Konzentrationsänderung über die Zeit erkennen. Die Werte der mittleren Konzentrationen von D in den verschiedenen Jahren liegen nahe zusammen im Bereich von 168,9 -  $230,3 \frac{10^{15} \text{atome}}{\text{cm}^2}$  und steigen insgesamt leicht mit zunehmendem Installationsjahr an. Auffallend ist, dass die Veränderung der mittleren Konzentration von D über den Zeitraum nicht der Veränderung der mittleren Konzentration von C entspricht. Häufig ist die D Konzentrationsänderung nämlich proportional zur C Konzentrationsänderung. Die Aussagekraft der in Abbildung 5.6 gezeigten Konzentrationsänderung von C und D ist jedoch nur gering, da entscheidende Informationen, wie die Position der plasmaexponierten Proben oder der Zeitpunkt der genauen Probenentnahme unbekannt sind. Somit ist eine weiterführende intensivere Analyse auf der Grundlage der Daten aus den Tabellen 5.26 - 5.29 von Nöten.

Tabelle 5.26: Durch NRA bzw. RBS ermittelte und gemittelte Konzentration (beide Methoden und zwei Probenpositionen) von B in  $\frac{10^{15} \text{atome}}{\text{cm}^2}$ , sowie natürliches Isotopenverhältnis.

	$C(^{10}\text{B}, \text{NRA})$	$C(^{11}\text{B}, \text{NRA})$	$C(\text{B}, \text{NRA})$	$\frac{(^{10}\text{B})}{(^{11}\text{B})}$	$C(\text{B}, \text{RBS})$	$\bar{C}(\text{B}, \text{NRA} + \text{RBS})$	$\bar{C}(\text{B}, 1+2)$
2014,33 <sub>1</sub>	67 ± 12	310 ± 60	380 ± 70	0,21 ± 0,04	500 ± 25	490 ± 30	485
2014,33 <sub>2</sub>	47 ± 10	250 ± 50	300 ± 60	0,19 ± 0,04	5000 ± 35	480 ± 60	
2014,32 <sub>1</sub>	280 ± 30	1260 ± 160	1530 ± 190	0,219 ± 0,027	2000 ± 100	1940 ± 150	2120
2014,32 <sub>2</sub>	300 ± 40	1180 ± 160	1480 ± 80	0,25 ± 0,03	2500 ± 120	2300 ± 410	
2014,31 <sub>1</sub>	15 ± 5	80 ± 28	96 ± 28	0,19 ± 0,06	0	48 ± 48	54
2014,31 <sub>2</sub>	15 ± 5	110 ± 30	120 ± 30	0,14 ± 0,05	0	60 ± 60	
2014,30 <sub>1</sub>	79 ± 13	350 ± 70	430 ± 70	0,23 ± 0,04	355 ± 17	357 ± 17	493,5
2014,30 <sub>2</sub>	100 ± 15	330 ± 60	430 ± 70	0,30 ± 0,05	650 ± 30	630 ± 70	
2016,41 <sub>1</sub>	17 ± 5	89 ± 29	110 ± 30	0,19 ± 0,06	0	55 ± 55	117,5
2016,41 <sub>2</sub>	9 ± 4	63 ± 24	72 ± 24	0,15 ± 0,06	185 ± 9	180 ± 30	
2016,42 <sub>1</sub>	161 ± 22	700 ± 110	860 ± 120	0,23 ± 0,03	1060 ± 50	1040 ± 60	1170
2016,42 <sub>2</sub>	199 ± 26	720 ± 110	920 ± 120	0,28 ± 0,04	1360 ± 70	1300 ± 150	
2016,30 <sub>1</sub>	120 ± 18	490 ± 80	610 ± 90	0,24 ± 0,04	790 ± 40	770 ± 50	412,5
2016,30 <sub>2</sub>	24 ± 7	100 ± 30	120 ± 30	0,25 ± 0,07	55,0 ± 2,7	55 ± 4	
2016,11 <sub>1</sub>	58 ± 11	210 ± 50	260 ± 50	0,28 ± 0,05	610 ± 30	550 ± 130	550
2016,11 <sub>2</sub>	68 ± 12	230 ± 50	300 ± 60	0,29 ± 0,05	590 ± 30	550 ± 100	
2017,16 <sub>1</sub>	4,6 ± 2,6	18 ± 12	22 ± 13	0,26 ± 0,14	22,0 ± 1,1	22,0 ± 1,1	66,5
2017,16 <sub>2</sub>	41 ± 9	140 ± 40	180 ± 40	0,29 ± 0,06	110 ± 6	111 ± 7	
2017,10 <sub>1</sub>	178 ± 24	650 ± 100	830 ± 110	0,27 ± 0,04	940 ± 50	932 ± 45	871
2017,10 <sub>2</sub>	122 ± 18	480 ± 80	600 ± 90	0,25 ± 0,04	830 ± 40	810 ± 67	
2017,33 <sub>1</sub>	11 ± 4	40 ± 18	46 ± 18	0,30 ± 0,11	1,50 ± 0,08	1,50 ± 0,14	36,75
2017,33 <sub>2</sub>	12 ± 4	70 ± 26	84 ± 26	0,17 ± 0,06	72 ± 4	72 ± 4	
2017,36 <sub>1</sub>	0	18 ± 12	18 ± 12	0	60 ± 3	58 ± 8	94
2017,36 <sub>2</sub>	3,0 ± 2,1	27 ± 15	30 ± 15	0,11 ± 0,08	140 ± 7	130 ± 40	
2019,25 <sub>1</sub>	35 ± 8	290 ± 60	320 ± 60	0,122 ± 0,028	255 ± 13	257 ± 12	155
2019,25 <sub>2</sub>	8 ± 3	100 ± 30	110 ± 30	0,08 ± 0,04	0	55 ± 55	
2019,13 <sub>1</sub>	190 ± 25	1180 ± 160	1370 ± 170	0,161 ± 0,021	790 ± 40	810 ± 90	865
2019,13 <sub>2</sub>	146 ± 20	820 ± 120	970 ± 130	0,178 ± 0,025	920 ± 50	920 ± 40	
2019,19 <sub>1</sub>	219 ± 28	1040 ± 140	1260 ± 160	0,209 ± 0,027	1360 ± 70	1350 ± 70	975
2019,19 <sub>2</sub>	141 ± 20	510 ± 80	650 ± 90	0,28 ± 0,04	600 ± 30	600 ± 30	
2019,28 <sub>1</sub>	74 ± 12	450 ± 80	520 ± 80	0,167 ± 0,029	600 ± 30	600 ± 30	515
2019,28 <sub>2</sub>	65 ± 11	500 ± 80	570 ± 90	0,131 ± 0,023	430 ± 21	430 ± 20	
2020,4 <sub>1</sub>	62 ± 11	440 ± 80	500 ± 80	0,142 ± 0,026	420 ± 20	420 ± 20	355
2020,4 <sub>2</sub>	38 ± 8	140 ± 40	180 ± 40	0,27 ± 0,06	300 ± 15	290 ± 30	
2020,12 <sub>1</sub>	178 ± 24	990 ± 140	1170 ± 150	0,179 ± 0,024	1270 ± 60	1260 ± 60	1260
2020,12 <sub>2</sub>	204 ± 26	960 ± 130	1160 ± 150	0,213 ± 0,028	1270 ± 60	1260 ± 60	
2020,35 <sub>1</sub>	135 ± 19	710 ± 110	850 ± 120	0,189 ± 0,027	870 ± 40	870 ± 40	875
2020,35 <sub>2</sub>	191 ± 25	750 ± 110	940 ± 130	0,26 ± 0,03	880 ± 40	880 ± 40	
2020,5 <sub>1</sub>	58 ± 11	270 ± 60	330 ± 60	0,22 ± 0,04	400 ± 20	395 ± 19	289,5
2020,5 <sub>2</sub>	49 ± 10	370 ± 70	410 ± 70	0,133 ± 0,026	182 ± 9	184 ± 21	

Tabelle 5.27: Durch NRA ermittelte D Konzentration und Mittlung über zwei Probenpositionen, sowie durch NRA bzw. RBS ermittelte und gemittelte C Konzentration (beide Methoden und zwei Probenpositionen) in  $\frac{10^{15} \text{atome}}{\text{cm}^2}$ .

	$c_{(D,NRA)}$	$\bar{c}_{(D,1+2)}$	$c_{(C,NRA)}$	$c_{(C,RBS)}$	$\bar{c}_{(C,NRA+RBS)}$	$\bar{c}_{(C,1+2)}$
2014,33 <sub>1</sub>	184 ± 18	162,5	510 ± 50	500 ± 25	504 ± 22	452
2014,33 <sub>2</sub>	141 ± 14		400 ± 40	400 ± 20	400 ± 18	
2014,32 <sub>1</sub>	420 ± 40	445	650 ± 70	400 ± 20	510 ± 110	515
2014,32 <sub>2</sub>	470 ± 50		680 ± 70	400 ± 20	520 ± 120	
2014,31 <sub>1</sub>	40 ± 5	40	49 ± 7	50,0 ± 2,5	50,0 ± 2,3	48
2014,31 <sub>2</sub>	40 ± 4		42 ± 6	50,0 ± 2,5	46 ± 4	
2014,30 <sub>1</sub>	27 ± 3	31	111 ± 13	50,0 ± 2,5	64 ± 16	79
2014,30 <sub>2</sub>	35 ± 4		98 ± 12	90 ± 5	94 ± 4	
2016,41 <sub>1</sub>	360 ± 40	320,5	139 ± 16	110 ± 5	125 ± 14	132,5
2016,41 <sub>2</sub>	281 ± 28		131 ± 15	158 ± 8	140 ± 16	
2016,42 <sub>1</sub>	300 ± 30	305	540 ± 60	392 ± 19	470 ± 70	481,5
2016,42 <sub>2</sub>	310 ± 30		500 ± 50	480 ± 24	493 ± 21	
2016,30 <sub>1</sub>	102 ± 10	85,5	180 ± 20	121 ± 6	146 ± 26	91
2016,30 <sub>2</sub>	69 ± 7		69 ± 9	29,0 ± 1,4	36 ± 9	
2016,11 <sub>1</sub>	27 ± 3	35,5	69 ± 9	92 ± 5	77 ± 13	80
2016,11 <sub>2</sub>	44 ± 5		81 ± 10	86 ± 4	83 ± 4	
2017,16 <sub>1</sub>	330 ± 30	309,5	141 ± 16	130 ± 7	136 ± 6	154
2017,16 <sub>2</sub>	289 ± 29		193 ± 22	150 ± 7	172 ± 22	
2017,10 <sub>1</sub>	232 ± 23	203	540 ± 60	473 ± 23	520 ± 40	460
2017,10 <sub>2</sub>	174 ± 17		450 ± 50	348 ± 17	400 ± 60	
2017,33 <sub>1</sub>	56 ± 6	54	35 ± 6	20,0 ± 1,0	23 ± 4	30,5
2017,33 <sub>2</sub>	52 ± 5		61 ± 8	31,5 ± 1,5	38 ± 8	
2017,36 <sub>1</sub>	126 ± 13	109	75 ± 10	90 ± 5	80 ± 9	106,5
2017,36 <sub>2</sub>	92 ± 10		145 ± 17	120 ± 6	133 ± 13	
2019,25 <sub>1</sub>	400 ± 40	400	180 ± 20	117 ± 6	143 ± 27	109,5
2019,25 <sub>2</sub>	400 ± 40		93 ± 11	65 ± 3	76 ± 11	
2019,13 <sub>1</sub>	300 ± 30	253,5	490 ± 50	236 ± 11	320 ± 90	325
2019,13 <sub>2</sub>	207 ± 21		390 ± 40	269 ± 13	330 ± 60	
2019,19 <sub>1</sub>	155 ± 16	182,5	236 ± 26	0	118 ± 118	96,5
2019,19 <sub>2</sub>	210 ± 21		150 ± 17	0	75 ± 75	
2019,28 <sub>1</sub>	19,9 ± 2,4	15,95	266 ± 29	112 ± 6	150 ± 40	161
2019,28 <sub>2</sub>	12,0 ± 1,6		161 ± 18	199 ± 10	172 ± 24	
2020,4 <sub>1</sub>	480 ± 50	430	254 ± 28	215 ± 10	237 ± 21	211
2020,4 <sub>2</sub>	380 ± 40		180 ± 20	193 ± 10	185 ± 9	
2020,12 <sub>1</sub>	340 ± 30	330	600 ± 60	410 ± 20	500 ± 90	510
2020,12 <sub>2</sub>	320 ± 30		570 ± 60	447 ± 22	520 ± 70	
2020,35 <sub>1</sub>	140 ± 14	153	218 ± 24	126 ± 6	160 ± 40	140
2020,35 <sub>2</sub>	166 ± 17		245 ± 27	91 ± 5	120 ± 40	
2020,5 <sub>1</sub>	8,4 ± 1,2	8,25	132 ± 15	110 ± 5	121 ± 11	94
2020,5 <sub>2</sub>	8,1 ± 1,2		122 ± 14	52 ± 2,6	67 ± 17	

Tabelle 5.28: Durch RBS bzw. PIXE ermittelte und gemittelte Konzentration (beide Methoden und zwei Probenpositionen) von W in  $\frac{10^{15} \text{atome}}{\text{cm}^2}$ .

	$C_{(W,RBS)}$	$C_{(W,PIXE)}$	$\bar{C}_{(W,RBS+PIXE)}$	$\bar{C}_{(W,1+2)}$
2014,33 <sub>1</sub>	108 ± 5	117 ± 6	112 ± 4	102
2014,33 <sub>2</sub>	92 ± 5	91 ± 5	92 ± 3	
2014,32 <sub>1</sub>	93 ± 5	124 ± 7	103 ± 14	133,5
2014,32 <sub>2</sub>	165 ± 8	162 ± 9	164 ± 6	
2014,31 <sub>1</sub>	120 ± 6	116 ± 6	118 ± 4	136
2014,31 <sub>2</sub>	164 ± 8	145 ± 8	154 ± 9	
2014,30 <sub>1</sub>	464 ± 23	474 ± 24	469 ± 16	470,5
2014,30 <sub>2</sub>	480 ± 24	464 ± 24	472 ± 17	
2016,41 <sub>1</sub>	73 ± 4	89 ± 5	79 ± 8	73,2
2016,41 <sub>2</sub>	69 ± 3	66 ± 4	67,4 ± 2,4	
2016,42 <sub>1</sub>	102 ± 5	99 ± 5	100 ± 4	113,5
2016,42 <sub>2</sub>	133 ± 7	121 ± 6	127 ± 6	
2016,30 <sub>1</sub>	194 ± 10	183 ± 10	189 ± 7	183
2016,30 <sub>2</sub>	177 ± 9	177 ± 9	177 ± 6	
2016,11 <sub>1</sub>	463 ± 23	585 ± 30	510 ± 60	468
2016,11 <sub>2</sub>	420 ± 21	433 ± 22	426 ± 15	
2017,16 <sub>1</sub>	50,0 ± 2,5	49,8 ± 2,6	49,9 ± 1,8	62,95
2017,16 <sub>2</sub>	80 ± 4	72 ± 4	76 ± 4	
2017,10 <sub>1</sub>	81 ± 4	73 ± 4	77 ± 4	67
2017,10 <sub>2</sub>	61 ± 3	52,9 ± 2,8	57 ± 4	
2017,33 <sub>1</sub>	103 ± 5	99 ± 5	101 ± 4	116
2017,33 <sub>2</sub>	135 ± 7	127 ± 7	131 ± 5	
2017,36 <sub>1</sub>	12,4 ± 0,6	11,0 ± 0,7	11,8 ± 0,7	9,85
2017,36 <sub>2</sub>	8,0 ± 0,4	1,8 ± 0,5	7,9 ± 0,3	
2019,25 <sub>1</sub>	62 ± 3	66 ± 4	63,6 ± 2,3	51
2019,25 <sub>2</sub>	37,5 ± 1,8	40 ± 2	38,4 ± 1,4	
2019,13 <sub>1</sub>	91 ± 5	79 ± 4	84 ± 6	82,5
2019,13 <sub>2</sub>	94 ± 5	73 ± 4	81 ± 10	
2019,19 <sub>1</sub>	170 ± 9	158 ± 8	164 ± 6	161,5
2019,19 <sub>2</sub>	154 ± 8	165 ± 9	159 ± 6	
2019,28 <sub>1</sub>	689 ± 34	737 ± 40	711 ± 25	590,5
2019,28 <sub>2</sub>	443 ± 22	507 ± 26	470 ± 30	
2020,4 <sub>1</sub>	60 ± 3	67 ± 4	63 ± 4	50,9
2020,4 <sub>2</sub>	39,4 ± 1,9	38,1 ± 2,0	38,8 ± 1,4	
2020,12 <sub>1</sub>	43 ± 2	37,7 ± 2,0	40,2 ± 2,6	41,55
2020,12 <sub>2</sub>	43 ± 2	42,1 ± 2,2	42,9 ± 1,5	
2020,35 <sub>1</sub>	73 ± 4	80 ± 4	76 ± 3	85
2020,35 <sub>2</sub>	90 ± 4	98 ± 5	94 ± 4	
2020,5 <sub>1</sub>	394 ± 19	424 ± 21	407 ± 15	381,5
2020,5 <sub>2</sub>	337 ± 16	382 ± 19	356 ± 22	

Tabelle 5.29: Durch PIXE ermittelte Cr, Fe und Cu Konzentration und Mittlung über zwei Probenpositionen in  $\frac{10^{15} \text{atome}}{\text{cm}^2}$ .

	$C_{(Cr,PIXE)}$	$\bar{c}_{(Cr,1+2)}$	$C_{(Fe,PIXE)}$	$\bar{c}_{(Fe,1+2)}$	$C_{(Cu,PIXE)}$	$\bar{c}_{(Cu,1+2)}$
2014,33 <sub>1</sub>	$2,9 \pm 0,15$	}2,27	$10,9 \pm 0,6$	}9,3	0	}0
2014,33 <sub>2</sub>	$1,64 \pm 0,1$		$7,7 \pm 0,5$			
2014,32 <sub>1</sub>	$2,35 \pm 0,13$	}2,455	$11,9 \pm 0,7$	}12,9	0	}0
2014,32 <sub>2</sub>	$2,56 \pm 0,14$		$13,9 \pm 0,8$			
2014,31 <sub>1</sub>	$3,97 \pm 0,21$	}4,24	$15,8 \pm 0,9$	}17,2	0	}0
2014,31 <sub>2</sub>	$4,51 \pm 0,24$		$18,6 \pm 1,$			
2014,30 <sub>1</sub>	$2,61 \pm 0,14$	}2,61	$10,6 \pm 0,6$	}11,25	0	}0
2014,30 <sub>2</sub>	$2,61 \pm 0,14$		$11,9 \pm 0,7$			
2016,41 <sub>1</sub>	$1,42 \pm 0,08$	}1,205	$8,2 \pm 0,5$	}6,55	0	}0
2016,41 <sub>2</sub>	$0,99 \pm 0,06$		$4,9 \pm 0,3$			
2016,42 <sub>1</sub>	$1,95 \pm 0,11$	}2,395	$10,7 \pm 0,6$	}11,2	0	}0,405
2016,42 <sub>2</sub>	$2,84 \pm 0,15$		$11,7 \pm 0,7$			
2016,30 <sub>1</sub>	$13, \pm 0,7$	}11	$43,7 \pm 2,3$	}37,7	$3,2 \pm 0,3$	}1,6
2016,30 <sub>2</sub>	$9, \pm 0,5$		$31,7 \pm 1,7$			
2016,11 <sub>1</sub>	$4,56 \pm 0,24$	}4,955	$15,6 \pm 0,9$	}15,55	$1,03 \pm 0,08$	}0,515
2016,11 <sub>2</sub>	$5,35 \pm 0,28$		$15,5 \pm 0,9$			
2017,16 <sub>1</sub>	$2,29 \pm 0,12$	}2,955	$8 \pm 0,5$	}10,35	0	}0
2017,16 <sub>2</sub>	$3,62 \pm 0,19$		$12,7 \pm 0,7$			
2017,10 <sub>1</sub>	$2,75 \pm 0,15$	}2,705	$13,2 \pm 0,7$	}12,7	0	}0
2017,10 <sub>2</sub>	$2,66 \pm 0,14$		$12,2 \pm 0,7$			
2017,33 <sub>1</sub>	$2,92 \pm 0,16$	}2,875	$18,4 \pm 1,$	}18,45	0	}0
2017,33 <sub>2</sub>	$2,83 \pm 0,15$		$18,5 \pm 1,$			
2017,36 <sub>1</sub>	$0,53 \pm 0,04$	}0,615	$3,71 \pm 0,26$	}3,805	0	}0
2017,36 <sub>2</sub>	$0,7 \pm 0,05$		$3,9 \pm 0,26$			
2019,25 <sub>1</sub>	$1,46 \pm 0,09$	}1,545	$14,9 \pm 0,8$	}13,55	0	}0
2019,25 <sub>2</sub>	$1,63 \pm 0,09$		$12,2 \pm 0,7$			
2019,13 <sub>1</sub>	$1,98 \pm 0,11$	}1,9	$24, \pm 1,3$	}22,7	0	}0
2019,13 <sub>2</sub>	$1,82 \pm 0,1$		$21,4 \pm 1,1$			
2019,19 <sub>1</sub>	$10, \pm 0,5$	}8,3	$93 \pm 5$	}77,5	0	}0
2019,19 <sub>2</sub>	$6,6 \pm 0,3$		$62 \pm 3$			
2019,28 <sub>1</sub>	$6,7 \pm 0,4$	}5,775	$176 \pm 9$	}168	$2,07 \pm 0,13$	}6,335
2019,28 <sub>2</sub>	$4,85 \pm 0,25$		$160 \pm 8$			
2020,4 <sub>1</sub>	$5,23 \pm 0,27$	}7,715	$34,3 \pm 1,8$	}38,25	$2,33 \pm 0,21$	}1,575
2020,4 <sub>2</sub>	$10,2 \pm 0,5$		$42,2 \pm 2,2$			
2020,12 <sub>1</sub>	$1,54 \pm 0,09$	}1,755	$14,5 \pm 0,8$	}15,25	$0,88 \pm 0,09$	}1,115
2020,12 <sub>2</sub>	$1,97 \pm 0,11$		$16, \pm 0,9$			
2020,35 <sub>1</sub>	$7,1 \pm 0,4$	}7,15	$54,6 \pm 2,8$	}58,3	$3,21 \pm 0,29$	}3,305
2020,35 <sub>2</sub>	$7,2 \pm 0,4$		$62 \pm 3$			
2020,5 <sub>1</sub>	$2,75 \pm 0,15$	}2,65	$155 \pm 8$	}139	$6,4 \pm 0,5$	}7,1
2020,5 <sub>2</sub>	$2,55 \pm 0,14$		$123 \pm 6$			

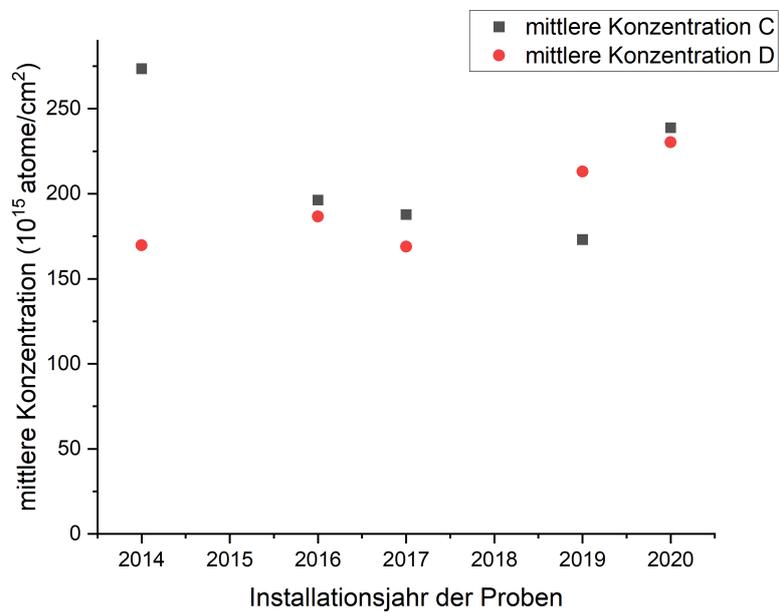


Abbildung 5.6: C- und D-Konzentration der plasmaexponierten Proben für verschiedene Installationsjahre der Proben.



# Kapitel 6

## Diskussion

### 6.1 Kalibrierung des Röntgendetektors

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Genauigkeit der in Kapitel 5.1 errechneten Kalibrierfaktoren zu bestimmen. Die Genauigkeit der PIXE-Messung bzw. der daraus ermittelten Peakintegrale  $N_{PIXE}$  lässt sich unter Berücksichtigung des in Abschnitt 5.1.1 gezeigten exponentiellen Abfalls der Intensität (Lambert-Beersche Gesetz) überprüfen. Die hervorragenden Werte für das Bestimmtheitsmaß deuten auf eine gute Messgenauigkeit von  $N_{PIXE}$ . Dieses gute Ergebnis muss jedoch relativiert werden, da sich die Güte der Anpassung durch die vom Analyseprogramm frei gewählten Variablen  $\alpha$  und  $I_0$  beeinflussen lässt. Für die 36  $\mu m$  und 50  $\mu m$  Folie fiel auf, dass das Peakintegral bei manchen Elementen gleich oder niedriger als das Peakintegral für die nächst dickere Folie war. Dieses Problem lässt sich auch in Abbildung 5.2 zwischen der Intensität der 36  $\mu m$  und 50  $\mu m$  Folie (nominelle Foliendicken) für die Fe: $K_\alpha$ - und W: $L_\alpha$ -Linien bei 1,5 MeV Protonen bzw. 50  $\mu m$  und 100  $\mu m$  Folie für die Fe: $K_\alpha$ - und W: $L_\alpha$ -Linien bei 2 MeV Protonen erkennen. Die 36  $\mu m$ , 50  $\mu m$  und 100  $\mu m$  Folien waren dabei optimal eingestellt. Dafür wurde im Vorfeld für verschiedene Folienradwinkel die maximale Intensität bestimmt. Für zukünftige Messungen sollten die in der Arbeit verwendeten Folienradwinkel (vgl. Abbildung B.1) benutzt werden.

Die aus der RBS-Messung bestimmte Konzentration  $c_{RBS}$  kann aufgrund der Mittlung über 19 Werte als genau angenommen werden. Um eine fehlerhafte Strommessung auszuschließen, die das RBS-Spektrum beeinflusst wurde in Abbildung C.1 anhand der Pt1-Kalibrierprobe überprüft, ob der Abfall des RBS-Peakintegrals mit der Energie proportional zu  $\frac{1}{E^2}$  ist. Das Bestimmtheitsmaß der Regression von 1,00 bestätigt die Genauigkeit der  $c_{RBS}$  Werte.

Die Güte der PIXE-Kalibrierfaktoren lässt sich auch im Vergleich mit anderen Methoden beurteilen. Für die plasmaexponierten Proben konnte nur die W-Konzentration mit zwei Methoden (PIXE und RBS) bestimmt werden und für einen Vergleich der Methoden herangezogen werden. Die gemittelte prozentuale Abweichung der bestimmten W-Konzentration aus RBS zu der mit PIXE bestimmten W-Konzentration liegt bei 8,6 % und die Werte liegen in 65 % der Fälle in ihren Fehlertoleranzen. Das ist deutlich besser als der Vergleich zwischen den bereits etablierten Methoden NRA und RBS. W ist für eine vergleichende Wertung besonders geeignet, da es nicht auf dem Si-Untergrund im RBS-Spektrum liegt und somit mit einer guten Genauigkeit aus dem RBS-Spektrum bestimmt werden kann.

Die Kalibrierfaktoren deuten auf eine gute Genauigkeit bei Verwendung der gleichen Folienradwinkel hin.

### 6.2 Plasmaexponierte Proben

Um Aussagen über die Genauigkeit der ermittelten Konzentrationen der plasmaexponierten Proben zu tätigen, lässt sich neben dem in Abschnitt 6.1 bereits diskutierten Vergleich der W-Konzentration mit PIXE und RBS die B- und C-Konzentration zwischen den Methoden NRA und RBS vergleichen. Die gemittelte prozentuale Abweichung der C-Konzentration aus NRA zu der mit RBS bestimmten C-Konzentration liegt bei 47 % und 27,5 % der Wertepaare liegen innerhalb ihrer Fehlertoleranzen. Die bei manchen Proben auftretenden großen Abweichungen zwischen den ermittelten C-Konzentrationen der einzelnen Methoden lassen sich einerseits durch die erschwerte Konzentrationsbestimmung von

C aus dem RBS-Spektrum aufgrund des Si-Untergunds und teilweise im Si auftretende channeling-Effekte erklären. Andererseits kann im NRA-Spektrum speziell beim C-Peak der Untergrund zu einem ungenaueren Ergebnis führen.

Für die B Konzentration lässt sich die Genauigkeit der NRA-Messung anhand des natürlichen Isotopenverhältnisses  $\frac{^{10}\text{B}}{^{11}\text{B}} = \frac{19,9}{80,1}$  abschätzen. Im Mittel liegt die prozentuale Abweichung des aus den Messwerten errechneten Isotopenverhältnisses zum Theoriewert bei 22 % und ist für die meisten Werte mit einer guten Genauigkeit erfüllt. Die mittlere prozentuale Abweichung der B-Konzentration aus RBS zu der mit NRA bestimmten B-Konzentration beträgt 54 % und 35 % der Wertepaare liegen innerhalb ihrer Fehlertoleranzen. Diese teilweise großen Unterschiede sind vermutlich vor allem auf die erschwerte RBS-Bestimmung zurückzuführen.

Insgesamt liegen die verglichenen Werte alle in der selben Größenordnung und bieten aufgrund der Mittlung über zwei Methoden ausreichend Genauigkeit, um Trends in der Änderung der Konzentration über einen Zeitraum erkennen zu können. Das gilt auch für die nur mit einer Methode gemessenen Konzentrationen von D, Fe, Cu und Cr, da sich die einzelnen Peaks der Elemente gut aus den Spektren auswerten ließen. Für Fe und Cu wurde sogar über zwei charakteristische Röntgenpeaks gemittelt.

Ein klarer Trend für eine Änderung der C- oder D-Konzentration bei verschiedenen Installationsjahren konnte aus 5.6 nicht festgestellt werden. Eine weiterführende Analyse auf Basis der in dieser Arbeit präsentierten Daten mit genaueren Kenntnissen über die plasmaexponierten Proben ist von Nöten um eine fundierte Aussage darüber zu treffen.

# Kapitel 7

## Fehlerrechnung

### 7.1 Kalibrierung des Röntgendetektors

Der Kalibrierfaktor  $K$  lässt sich mit Gleichung 5.1 berechnen. Zur Bestimmung des Fehlers von  $K$  benötigt man den Fehler des Peakintegrals  $N_{PIXE}$  und den Fehler der Konzentration  $c_{RBS}$ . Für  $N_{PIXE}$  betrachtet man nur einen statistischen Fehler der aufgrund der Zählstatistik  $\Delta N_{PIXE} = \sqrt{N_{PIXE}}$  beträgt. Der statistische Fehler für den Mittelwert von  $c_{RBS}$  lässt sich aus der Statistik durch die mehrfache Messung (19 mal) der Konzentration über  $\Delta c_{RBS} = \frac{\sigma}{\sqrt{19}}$  berechnen.  $\sigma$  ist dabei die Standardabweichung. Als systematischen Fehler setzt man einen Fehler von 5 % an, der sich aus dem Fehler des Raumwinkels und der Strommessung ergibt. Damit lassen sich die Fehler von  $K$  berechnen. Für den statistischen Fehler ergibt sich folgende Formel:

$$\Delta K_{stat} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_{PIXE,stat}}{\text{Gesamtladung} \cdot c_{RBS}}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta c_{RBS,stat} \cdot N_{PIXE}}{\text{Gesamtladung} \cdot c_{RBS}^2}\right)^2} \quad (7.1)$$

Für den systematischen Fehler erhält man folgende Gleichung:

$$\Delta K_{syst} = \left| -\frac{\Delta c_{RBS,syst} \cdot N_{PIXE}}{\text{Gesamtladung} \cdot c_{RBS}^2} \right| \quad (7.2)$$

Für den Gesamtfehler gilt dann:

$$\Delta K = \sqrt{\Delta K_{stat}^2 + \Delta K_{syst}^2} \quad (7.3)$$

Für Pt und Au wurde der Wert für  $K$  über zwei Werte gemittelt, sodass sich für den fehlerfortgepflanzten Gesamtfehler folgendes ergibt:

$$\Delta K = \sqrt{\left(\frac{\Delta K_{1,stat}}{2}\right)^2 + \left(\frac{K_{2,stat}}{2}\right)^2 + \left(\left|\frac{K_{1,syst}}{2}\right| + \left|\frac{K_{2,syst}}{2}\right|\right)^2} \quad (7.4)$$

### 7.2 Plasmaexponierte Proben

Der Fehler der Konzentration der PIXE-Messungen resultiert aus dem statistischen und systematischen Fehler des Kalibrierfaktors  $K$ , welche in den Tabellen 5.2 - 5.23 zu finden sind, sowie einem statistischen Fehler des Peakintegral  $\Delta N_{PIXE} = \sqrt{N_{PIXE}}$ . Der statistische Fehler von  $K$  berechnet sich über die Fehlerfortpflanzung wie folgt:

$$\Delta c_{PIXE,stat} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_{PIXE,stat}}{\text{Gesamtladung} \cdot K}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta K_{stat} \cdot N_{PIXE}}{\text{Gesamtladung} \cdot K^2}\right)^2} \quad (7.5)$$

Für den systematischen Fehler gilt:

$$\Delta c_{PIXE,syst} = \left| -\frac{\Delta K_{syst} \cdot N_{PIXE}}{\text{Gesamtladung} \cdot K^2} \right| \quad (7.6)$$

Der Gesamtfehler berechnet sich analog zu Gleichung 7.3. Die Fortpflanzung des Fehlers der über mehrere Röntgenlinien gemittelten Konzentration ist von der selben Form wie Gleichung 7.4.

Für die NRA-Messung ergibt sich der statistische Fehler von  $N_{NRA}$  wieder aus der Zählstatistik mit  $\Delta N_{NRA} = \sqrt{N_{NRA}}$ . Der systematischen Fehler wurde als 10 % der Konzentration gewählt, welcher aus dem Fehler des Raumwinkel und der Strommessung resultiert. Um den Fehler der Konzentration aus den Peakintegralen des NRA-Spektrums zu erhalten muss lediglich der Kalibrierfaktor  $K_{NRA}$  berücksichtigt werden. Es ergibt sich somit für den statistischen Fehler:

$$\Delta c_{NRA,stat} = \Delta N_{NRA,stat} \cdot K_{NRA} \quad (7.7)$$

bzw. für den systematischen Fehler:

$$\Delta c_{NRA,syst} = \Delta N_{NRA,syst} \cdot K_{NRA} \quad (7.8)$$

Auch das Isotopenverhältnis von B besitzt einen Fehler. Der statistische Fehler ergibt sich aus folgender Fortpflanzung:

$$\Delta \left( \frac{{}^{10}B_{NRA}}{{}^{11}B_{NRA}} \right)_{stat} = \sqrt{\left( \frac{\Delta {}^{10}B_{NRA,stat}}{{}^{11}B_{NRA}} \right)^2 + \left( -\frac{\Delta {}^{11}B_{NRA,stat} \cdot {}^{10}B_{NRA}}{{}^{11}B_{NRA}^2} \right)^2} \quad (7.9)$$

Für den systematischen Fehler gilt:

$$\Delta \left( \frac{{}^{10}B_{NRA}}{{}^{11}B_{NRA}} \right)_{syst} = \left| \frac{\Delta {}^{10}B_{NRA,syst}}{{}^{11}B_{NRA}} \right| + \left| -\frac{\Delta {}^{11}B_{NRA,stat} \cdot {}^{10}B_{NRA}}{{}^{11}B_{NRA}^2} \right| \quad (7.10)$$

Für die RBS Messung wurde ein systematischer Fehler von 5 % der Konzentration angesetzt, der durch den Fehler des Raumwinkels und der Strommessung entsteht.

Beim Vergleich der Konzentrationen eines Elements mit zwei unterschiedlichen Messmethoden wurde ein Mittelwert der den Fehler gewichtet verwendet. Allgemein berechnet man den gewichteten Mittelwert  $\bar{x}$  mit zugehörigem Fehler aus n Werten  $x_i$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (7.11)$$

Dabei sind  $w_i$  die Wichtungsfaktoren:

$$w_i = 1/\Delta x_i^2 \quad (7.12)$$

Es lässt sich eine "innere Unsicherheit"  $\Delta \bar{x}_{int}$  von  $\bar{x}$  bestimmen:

$$\Delta \bar{x}_{int} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (7.13)$$

Des weiteren definiert man eine "äußere Unsicherheit"  $\Delta \bar{x}_{ext}$ :

$$\Delta \bar{x}_{ext} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \cdot (x_i - \bar{x})^2)}{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n w_i}} \quad (7.14)$$

Als endgültigen Fehler für den gewichteten Mittelwert verwendet man das Maximum von  $\Delta \bar{x}_{int}$  und  $\Delta \bar{x}_{ext}$ . Setzt man als Größe  $x_i$  die Konzentrationen einer Messmethode ein erhält man die in den Tabellen 5.26 - 5.29 aufgelisteten Endergebnisse für die gewichteten Mittelwerte der Konzentrationen und deren Fehler. Falls der Konzentrationswert aus einer Messmethode 0 beträgt und sich somit kein Fehler für den 0-Wert angeben lässt, verwendet man anstatt dem gewichteten Mittelwert den arithmetischen Mittelwert. Als Fehler verwendet man den statistischen Fehler des Mittelwerts, der bei zwei Werten in diesem Fall dem Mittelwert entspricht. [18]

# Anhang A

## Messdaten und Dateinamen

Zum Nachvollziehen der berechneten Kalibrierfaktoren führen die Tabellen A.1 - A.6 die Dateinamen und Daten der Messtage für die Kalibriermessungen und die Messungen der plasmamaxponierten Proben auf. Die Daten der RBS- und PIXE- Kalibriermessungen sind gleich benannt und durch verschiedene Ordner getrennt. Die Daten der Messungen der plasmaexponierten Proben wurden für jede Methode an einem unterschiedlichen Tag durchgeführt und in einzelnen Tabellen aufgeführt.

Tabelle A.1: Messdatum und Dateinamen der Kalibrierproben Mo, W, Au 1, Ag, Pt 1 und Sn.

Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Messdatum	Element	Dateiname	Element	Dateiname	Element	Dateiname
1500	36	14.06	Mo	PIXE_1500_36_neu#001	W	PIXE_1500_36_neu#002	Au 1	PIXE_1500_36_neu#003
1500	50	14.06	Mo	PIXE_1500_50_neu#014	W	PIXE_1500_50_neu#015	Au 1	PIXE_1500_50_neu#016
1500	100	14.06	Mo	PIXE_1500_100_neu#001	W	PIXE_1500_100_neu#002	Au 1	PIXE_1500_100_neu#003
1500	180	30.06	Mo	PIXE_1500_180_neu#001	W	PIXE_1500_180_neu#002	Au 1	PIXE_1500_180_neu#003
1500	250	30.06	Mo	PIXE_1500_250_neu#014	W	PIXE_1500_250_neu#015	Au 1	PIXE_1500_250_neu#016
1500	360	30.06	Mo	PIXE_1500_360_neu#001	W	PIXE_1500_360_neu#002	Au 1	PIXE_1500_360_neu#003
2000	50	01.07	Mo	PIXE_2000_50_neu#001	W	PIXE_2000_50_neu#002	Au 1	PIXE_2000_50_neu#003
2000	100	02.05	Mo	PIXE_2000_100#014	W	PIXE_2000_100#015	Au 1	PIXE_2000_100#016
2000	180	02.05	Mo	PIXE_2000_180#001	W	PIXE_2000_180#002	Au 1	PIXE_2000_180#003
2000	250	02.05	Mo	PIXE_2000_250#014	W	PIXE_2000_250#015	Au 1	PIXE_2000_250#016
2000	360	02.05	Mo	PIXE_2000_360#001	W	PIXE_2000_360#002	Au 1	PIXE_2000_360#003
2500	100	01.07	Mo	PIXE_2500_100_neu#001	W	PIXE_2500_100_neu#002	Au 1	PIXE_2500_100_neu#003
2500	180	01.07	Mo	PIXE_2500_180_neu#014	W	PIXE_2500_180_neu#015	Au 1	PIXE_2500_180_neu#016
2500	250	01.07	Mo	PIXE_2500_250_neu#001	W	PIXE_2500_250_neu#002	Au 1	PIXE_2500_250_neu#003
2500	360	01.07	Mo	PIXE_2500_360_neu#014	W	PIXE_2500_360_neu#015	Au 1	PIXE_2500_360_neu#016
3000	100	14.06	Mo	PIXE_3000_100_neu#001	W	PIXE_3000_100_neu#002	Au 1	PIXE_3000_100_neu#003
3000	180	14.06	Mo	PIXE_3000_180_neu#014	W	PIXE_3000_180_neu#015	Au 1	PIXE_3000_180_neu#016
3000	250	14.06	Mo	PIXE_3000_250_neu#001	W	PIXE_3000_250_neu#002	Au 1	PIXE_3000_250_neu#003
3000	360	14.06	Mo	PIXE_3000_360_neu#014	W	PIXE_3000_360_neu#015	Au 1	PIXE_3000_360_neu#016
1500	36	14.06	Ag	PIXE_1500_36_neu#004	Pt 1	PIXE_1500_36_neu#005	Sn	PIXE_1500_36_neu#006
1500	50	14.06	Ag	PIXE_1500_50_neu#017	Pt 1	PIXE_1500_50_neu#018	Sn	PIXE_1500_50_neu#019
1500	100	14.06	Ag	PIXE_1500_100_neu#004	Pt 1	PIXE_1500_100_neu#005	Sn	PIXE_1500_100_neu#006
1500	180	30.06	Ag	PIXE_1500_180_neu#004	Pt 1	PIXE_1500_180_neu#005	Sn	PIXE_1500_180_neu#006
1500	250	30.06	Ag	PIXE_1500_250_neu#017	Pt 1	PIXE_1500_250_neu#018	Sn	PIXE_1500_250_neu#019
1500	360	30.06	Ag	PIXE_1500_360_neu#004	Pt 1	PIXE_1500_360_neu#005	Sn	PIXE_1500_360_neu#006
2000	50	01.07	Ag	PIXE_2000_50_neu#004	Pt 1	PIXE_2000_50_neu#005	Sn	PIXE_2000_50_neu#006
2000	100	02.05	Ag	PIXE_2000_100#017	Pt 1	PIXE_2000_100#018	Sn	PIXE_2000_100#019
2000	180	02.05	Ag	PIXE_2000_180#004	Pt 1	PIXE_2000_180#005	Sn	PIXE_2000_180#006
2000	250	02.05	Ag	PIXE_2000_250#017	Pt 1	PIXE_2000_250#018	Sn	PIXE_2000_250#019
2000	360	02.05	Ag	PIXE_2000_360#004	Pt 1	PIXE_2000_360#005	Sn	PIXE_2000_360#006
2500	100	01.07	Ag	PIXE_2500_100_neu#004	Pt 1	PIXE_2500_100_neu#005	Sn	PIXE_2500_100_neu#006
2500	180	01.07	Ag	PIXE_2500_180_neu#017	Pt 1	PIXE_2500_180_neu#018	Sn	PIXE_2500_180_neu#019
2500	250	01.07	Ag	PIXE_2500_250_neu#004	Pt 1	PIXE_2500_250_neu#005	Sn	PIXE_2500_250_neu#006
2500	360	01.07	Ag	PIXE_2500_360_neu#017	Pt 1	PIXE_2500_360_neu#018	Sn	PIXE_2500_360_neu#019
3000	100	14.06	Ag	PIXE_3000_100_neu#004	Pt 1	PIXE_3000_100_neu#005	Sn	PIXE_3000_100_neu#006
3000	180	14.06	Ag	PIXE_3000_180_neu#017	Pt 1	PIXE_3000_180_neu#018	Sn	PIXE_3000_180_neu#019
3000	250	14.06	Ag	PIXE_3000_250_neu#004	Pt 1	PIXE_3000_250_neu#005	Sn	PIXE_3000_250_neu#006
3000	360	14.06	Ag	PIXE_3000_360_neu#017	Pt 1	PIXE_3000_360_neu#018	Sn	PIXE_3000_360_neu#019

Tabelle A.2: Messdatum und Dateinamen der Kalibrierproben Fe, Ni, Cr, Cu, Cu/Au und Au2.

Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Messdatum	Element	Dateiname	Element	Dateiname	Element	Dateiname
1500	36	14.06	Fe	PIXE_1500_36_neu#008	Ni	PIXE_1500_36_neu#009	Cr	PIXE_1500_36_neu#010
1500	50	14.06	Fe	PIXE_1500_50_neu#009	Ni	PIXE_1500_50_neu#010	Cr	PIXE_1500_50_neu#011
1500	100	14.06	Fe	PIXE_1500_100_neu#008	Ni	PIXE_1500_100_neu#009	Cr	PIXE_1500_100_neu#010
1500	180	30.06	Fe	PIXE_1500_180_neu#008	Ni	PIXE_1500_180_neu#009	Cr	PIXE_1500_180_neu#010
1500	250	30.06	Fe	PIXE_1500_250_neu#009	Ni	PIXE_1500_250_neu#010	Cr	PIXE_1500_250_neu#011
1500	360	30.06	Fe	PIXE_1500_360_neu#008	Ni	PIXE_1500_360_neu#009	Cr	PIXE_1500_360_neu#010
2000	50	01.07	Fe	PIXE_2000_50_neu#008	Ni	PIXE_2000_50_neu#009	Cr	PIXE_2000_50_neu#010
2000	100	02.05	Fe	PIXE_2000_100#009	Ni	PIXE_2000_100#010	Cr	PIXE_2000_100#011
2000	180	02.05	Fe	PIXE_2000_180#008	Ni	PIXE_2000_180#009	Cr	PIXE_2000_180#010
2000	250	02.05	Fe	PIXE_2000_250#009	Ni	PIXE_2000_250#010	Cr	PIXE_2000_250#011
2000	360	02.05	Fe	PIXE_2000_360#008	Ni	PIXE_2000_360#009	Cr	PIXE_2000_360#010
2500	100	01.07	Fe	PIXE_2500_100_neu#008	Ni	PIXE_2500_100_neu#009	Cr	PIXE_2500_100_neu#010
2500	180	01.07	Fe	PIXE_2500_180_neu#009	Ni	PIXE_2500_180_neu#010	Cr	PIXE_2500_180_neu#011
2500	250	01.07	Fe	PIXE_2500_250_neu#008	Ni	PIXE_2500_250_neu#009	Cr	PIXE_2500_250_neu#010
2500	360	01.07	Fe	PIXE_2500_360_neu#009	Ni	PIXE_2500_360_neu#010	Cr	PIXE_2500_360_neu#011
3000	100	14.06	Fe	PIXE_3000_100_neu#008	Ni	PIXE_3000_100_neu#009	Cr	PIXE_3000_100_neu#010
3000	180	14.06	Fe	PIXE_3000_180_neu#009	Ni	PIXE_3000_180_neu#010	Cr	PIXE_3000_180_neu#011
3000	250	14.06	Fe	PIXE_3000_250_neu#008	Ni	PIXE_3000_250_neu#009	Cr	PIXE_3000_250_neu#010
3000	360	14.06	Fe	PIXE_3000_360_neu#009	Ni	PIXE_3000_360_neu#010	Cr	PIXE_3000_360_neu#011
1500	36	14.06	Cu	PIXE_1500_36_neu#011	Cu/Au	PIXE_1500_36_neu#012	Au 2	PIXE_1500_36_neu#013
1500	50	14.06	Cu	PIXE_1500_50_neu#012	Cu/Au	PIXE_1500_50_neu#013	Au 2	PIXE_1500_50_neu#001
1500	100	14.06	Cu	PIXE_1500_100_neu#011	Cu/Au	PIXE_1500_100_neu#012	Au 2	PIXE_1500_100_neu#013
1500	180	30.06	Cu	PIXE_1500_180_neu#011	Cu/Au	PIXE_1500_180_neu#012	Au 2	PIXE_1500_180_neu#013
1500	250	30.06	Cu	PIXE_1500_250_neu#012	Cu/Au	PIXE_1500_250_neu#013	Au 2	PIXE_1500_250_neu#001
1500	360	30.06	Cu	PIXE_1500_360_neu#011	Cu/Au	PIXE_1500_360_neu#012	Au 2	PIXE_1500_360_neu#013
2000	50	01.07	Cu	PIXE_2000_50_neu#011	Cu/Au	PIXE_2000_50_neu#012	Au 2	PIXE_2000_50_neu#013
2000	100	02.05	Cu	PIXE_2000_100#012	Cu/Au	PIXE_2000_100#013	Au 2	PIXE_2000_100#001
2000	180	02.05	Cu	PIXE_2000_180#011	Cu/Au	PIXE_2000_180#012	Au 2	PIXE_2000_180#013
2000	250	02.05	Cu	PIXE_2000_250#012	Cu/Au	PIXE_2000_250#013	Au 2	PIXE_2000_250#001
2000	360	02.05	Cu	PIXE_2000_360#011	Cu/Au	PIXE_2000_360#012	Au 2	PIXE_2000_360#013
2500	100	01.07	Cu	PIXE_2500_100_neu#011	Cu/Au	PIXE_2500_100_neu#012	Au 2	PIXE_2500_100_neu#013
2500	180	01.07	Cu	PIXE_2500_180_neu#012	Cu/Au	PIXE_2500_180_neu#013	Au 2	PIXE_2500_180_neu#001
2500	250	01.07	Cu	PIXE_2500_250_neu#011	Cu/Au	PIXE_2500_250_neu#012	Au 2	PIXE_2500_250_neu#013
2500	360	01.07	Cu	PIXE_2500_360_neu#012	Cu/Au	PIXE_2500_360_neu#013	Au 2	PIXE_2500_360_neu#001
3000	100	14.06	Cu	PIXE_3000_100_neu#011	Cu/Au	PIXE_3000_100_neu#012	Au 2	PIXE_3000_100_neu#013
3000	180	14.06	Cu	PIXE_3000_180_neu#012	Cu/Au	PIXE_3000_180_neu#013	Au 2	PIXE_3000_180_neu#001
3000	250	14.06	Cu	PIXE_3000_250_neu#011	Cu/Au	PIXE_3000_250_neu#012	Au 2	PIXE_3000_250_neu#013
3000	360	14.06	Cu	PIXE_3000_360_neu#012	Cu/Au	PIXE_3000_360_neu#013	Au 2	PIXE_3000_360_neu#001

Tabelle A.3: Messdatum und Dateinamen der Kalibrierproben Ag/Au, Pt 2, Sn/Au, Fe/Au, Ni/Au und Cr/Au.

Energie [keV]	Folienstärke [ $\mu\text{m}$ ]	Messdatum	Element	Dateiname	Element	Dateiname	Element	Dateiname
1500	36	14.06	Ag/Au	PIXE_1500_36_neu#014	Pt 2	PIXE_1500_36_neu#015	Sn/Au	PIXE_1500_36_neu#016
1500	50	14.06	Ag/Au	PIXE_1500_50_neu#002	Pt 2	PIXE_1500_50_neu#003	Sn/Au	PIXE_1500_50_neu#004
1500	100	14.06	Ag/Au	PIXE_1500_100_neu#014	Pt 2	PIXE_1500_100_neu#015	Sn/Au	PIXE_1500_100_neu#016
1500	180	30.06	Ag/Au	PIXE_1500_180_neu#014	Pt 2	PIXE_1500_180_neu#015	Sn/Au	PIXE_1500_180_neu#016
1500	250	30.06	Ag/Au	PIXE_1500_250_neu#002	Pt 2	PIXE_1500_250_neu#003	Sn/Au	PIXE_1500_250_neu#004
1500	360	30.06	Ag/Au	PIXE_1500_360_neu#014	Pt 2	PIXE_1500_360_neu#015	Sn/Au	PIXE_1500_360_neu#016
2000	50	01.07	Ag/Au	PIXE_2000_50_neu#014	Pt 2	PIXE_2000_50_neu#015	Sn/Au	PIXE_2000_50_neu#016
2000	100	02.05	Ag/Au	PIXE_2000_100#002	Pt 2	PIXE_2000_100#003	Sn/Au	PIXE_2000_100#004
2000	180	02.05	Ag/Au	PIXE_2000_180#014	Pt 2	PIXE_2000_180#015	Sn/Au	PIXE_2000_180#016
2000	250	02.05	Ag/Au	PIXE_2000_250#002	Pt 2	PIXE_2000_250#003	Sn/Au	PIXE_2000_250#004
2000	360	02.05	Ag/Au	PIXE_2000_360#014	Pt 2	PIXE_2000_360#015	Sn/Au	PIXE_2000_360#016
2500	100	01.07	Ag/Au	PIXE_2500_100_neu#014	Pt 2	PIXE_2500_100_neu#015	Sn/Au	PIXE_2500_100_neu#016
2500	180	01.07	Ag/Au	PIXE_2500_180_neu#002	Pt 2	PIXE_2500_180_neu#003	Sn/Au	PIXE_2500_180_neu#004
2500	250	01.07	Ag/Au	PIXE_2500_250_neu#014	Pt 2	PIXE_2500_250_neu#015	Sn/Au	PIXE_2500_250_neu#016
2500	360	01.07	Ag/Au	PIXE_2500_360_neu#002	Pt 2	PIXE_2500_360_neu#003	Sn/Au	PIXE_2500_360_neu#004
3000	100	14.06	Ag/Au	PIXE_3000_100_neu#014	Pt 2	PIXE_3000_100_neu#015	Sn/Au	PIXE_3000_100_neu#016
3000	180	14.06	Ag/Au	PIXE_3000_180_neu#002	Pt 2	PIXE_3000_180_neu#003	Sn/Au	PIXE_3000_180_neu#004
3000	250	14.06	Ag/Au	PIXE_3000_250_neu#014	Pt 2	PIXE_3000_250_neu#015	Sn/Au	PIXE_3000_250_neu#016
3000	360	14.06	Ag/Au	PIXE_3000_360_neu#002	Pt 2	PIXE_3000_360_neu#003	Sn/Au	PIXE_3000_360_neu#004
1500	36	14.06	Fe/Au	PIXE_1500_36_neu#018	Ni/Au	PIXE_1500_36_neu#019	Cr/Au	PIXE_1500_36_neu#020
1500	50	14.06	Fe/Au	PIXE_1500_50_neu#006	Ni/Au	PIXE_1500_50_neu#007	Cr/Au	PIXE_1500_50_neu#008
1500	100	14.06	Fe/Au	PIXE_1500_100_neu#018	Ni/Au	PIXE_1500_100_neu#019	Cr/Au	PIXE_1500_100_neu#020
1500	180	30.06	Fe/Au	PIXE_1500_180_neu#018	Ni/Au	PIXE_1500_180_neu#019	Cr/Au	PIXE_1500_180_neu#020
1500	250	30.06	Fe/Au	PIXE_1500_250_neu#006	Ni/Au	PIXE_1500_250_neu#007	Cr/Au	PIXE_1500_250_neu#008
1500	360	30.06	Fe/Au	PIXE_1500_360_neu#018	Ni/Au	PIXE_1500_360_neu#019	Cr/Au	PIXE_1500_360_neu#020
2000	50	01.07	Fe/Au	PIXE_2000_50_neu#018	Ni/Au	PIXE_2000_50_neu#019	Cr/Au	PIXE_2000_50_neu#020
2000	100	02.05	Fe/Au	PIXE_2000_100#006	Ni/Au	PIXE_2000_100#007	Cr/Au	PIXE_2000_100#008
2000	180	02.05	Fe/Au	PIXE_2000_180#018	Ni/Au	PIXE_2000_180#019	Cr/Au	PIXE_2000_180#020
2000	250	02.05	Fe/Au	PIXE_2000_250#006	Ni/Au	PIXE_2000_250#007	Cr/Au	PIXE_2000_250#008
2000	360	02.05	Fe/Au	PIXE_2000_360#018	Ni/Au	PIXE_2000_360#019	Cr/Au	PIXE_2000_360#020
2500	100	01.07	Fe/Au	PIXE_2500_100_neu#018	Ni/Au	PIXE_2500_100_neu#019	Cr/Au	PIXE_2500_100_neu#020
2500	180	01.07	Fe/Au	PIXE_2500_180_neu#006	Ni/Au	PIXE_2500_180_neu#007	Cr/Au	PIXE_2500_180_neu#008
2500	250	01.07	Fe/Au	PIXE_2500_250_neu#018	Ni/Au	PIXE_2500_250_neu#019	Cr/Au	PIXE_2500_250_neu#020
2500	360	01.07	Fe/Au	PIXE_2500_360_neu#006	Ni/Au	PIXE_2500_360_neu#007	Cr/Au	PIXE_2500_360_neu#008
3000	100	14.06	Fe/Au	PIXE_3000_100_neu#018	Ni/Au	PIXE_3000_100_neu#019	Cr/Au	PIXE_3000_100_neu#020
3000	180	14.06	Fe/Au	PIXE_3000_180_neu#006	Ni/Au	PIXE_3000_180_neu#007	Cr/Au	PIXE_3000_180_neu#008
3000	250	14.06	Fe/Au	PIXE_3000_250_neu#018	Ni/Au	PIXE_3000_250_neu#019	Cr/Au	PIXE_3000_250_neu#020
3000	360	14.06	Fe/Au	PIXE_3000_360_neu#006	Ni/Au	PIXE_3000_360_neu#007	Cr/Au	PIXE_3000_360_neu#008

Tabelle A.4: Messdatum und Dateinamen der mit RBS untersuchten plasmaexponierten Proben.

Messdatum	plasmaexponierte Probe	Dateiname RBS
23.02	2014,33 <sub>1</sub>	AUG_LTS#001
23.02	2014,33 <sub>2</sub>	AUG_LTS#002
23.02	2014,32 <sub>1</sub>	AUG_LTS#003
23.02	2014,32 <sub>2</sub>	AUG_LTS#004
23.02	2014,31 <sub>1</sub>	AUG_LTS#005
23.02	2014,31 <sub>2</sub>	AUG_LTS#006
23.02	2014,30 <sub>1</sub>	AUG_LTS#007
23.02	2014,30 <sub>2</sub>	AUG_LTS#008
23.02	2016,41 <sub>1</sub>	AUG_LTS#009
23.02	2016,41 <sub>2</sub>	AUG_LTS#010
23.02	2016,42 <sub>1</sub>	AUG_LTS#011
23.02	2016,42 <sub>2</sub>	AUG_LTS#012
23.02	2016,30 <sub>1</sub>	AUG_LTS#013
23.02	2016,30 <sub>2</sub>	AUG_LTS#014
23.02	2016,11 <sub>1</sub>	AUG_LTS#015
23.02	2016,11 <sub>2</sub>	AUG_LTS#016
23.02	2017,16 <sub>1</sub>	AUG_LTS#017
23.02	2017,16 <sub>2</sub>	AUG_LTS#018
23.02	2017,10 <sub>1</sub>	AUG_LTS#019
23.02	2017,10 <sub>2</sub>	AUG_LTS#020
23.02	2017,33 <sub>1</sub>	AUG_LTS#021
23.02	2017,33 <sub>2</sub>	AUG_LTS#022
23.02	2017,36 <sub>1</sub>	AUG_LTS#023
23.02	2017,36 <sub>2</sub>	AUG_LTS#024
23.02	2019,25 <sub>1</sub>	AUG_LTS#025
23.02	2019,25 <sub>2</sub>	AUG_LTS#026
23.02	2019,13 <sub>1</sub>	AUG_LTS#027
23.02	2019,13 <sub>2</sub>	AUG_LTS#028
23.02	2019,19 <sub>1</sub>	AUG_LTS#029
23.02	2019,19 <sub>2</sub>	AUG_LTS#030
23.02	2019,28 <sub>1</sub>	AUG_LTS#031
23.02	2019,28 <sub>2</sub>	AUG_LTS#032
23.02	2020,4 <sub>1</sub>	AUG_LTS#033
23.02	2020,4 <sub>2</sub>	AUG_LTS#034
23.02	2020,12 <sub>1</sub>	AUG_LTS#035
23.02	2020,12 <sub>2</sub>	AUG_LTS#036
23.02	2020,35 <sub>1</sub>	AUG_LTS#037
23.02	2020,35 <sub>2</sub>	AUG_LTS#038
23.02	2020,5 <sub>1</sub>	AUG_LTS#039
23.02	2020,5 <sub>2</sub>	AUG_LTS#040

Tabelle A.5: Messdatum und Dateinamen der mit NRA untersuchten plasmaexponierten Proben.

Messdatum	plasmaexponierte Probe	Dateiname NRA
24.02	2014,33 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#001
24.02	2014,33 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#002
24.02	2014,32 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#003
24.02	2014,32 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#004
24.02	2014,31 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#005
24.02	2014,31 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#006
24.02	2014,30 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#007
24.02	2014,30 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#008
24.02	2016,41 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#009
24.02	2016,41 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#010
24.02	2016,42 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#011
24.02	2016,42 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#012
24.02	2016,30 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#013
24.02	2016,30 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#014
24.02	2016,11 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#015
24.02	2016,11 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#016
24.02	2017,16 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#017
24.02	2017,16 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#018
24.02	2017,10 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#019
24.02	2017,10 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#020
24.02	2017,33 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#021
24.02	2017,33 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#022
24.02	2017,36 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#023
24.02	2017,36 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#024
24.02	2019,25 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#025
24.02	2019,25 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#026
24.02	2019,13 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#027
24.02	2019,13 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#028
24.02	2019,19 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#029
24.02	2019,19 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#030
24.02	2019,28 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#031
24.02	2019,28 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#032
24.02	2020,4 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#033
24.02	2020,4 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#034
24.02	2020,12 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#035
24.02	2020,12 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#036
24.02	2020,35 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#037
24.02	2020,35 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#038
24.02	2020,5 <sub>1</sub>	AUG_LTS_2500#039
24.02	2020,5 <sub>2</sub>	AUG_LTS_2500#040

Tabelle A.6: Messdatum und Dateinamen der mit PIXE untersuchten plasmaexponierten Proben.

Messdatum	plasmaexponierte Probe	Dateiname PIXE
30.06	2014,33 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#001
30.06	2014,33 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#002
30.06	2014,32 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#003
30.06	2014,32 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#004
30.06	2014,31 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#005
30.06	2014,31 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#006
30.06	2014,30 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#007
30.06	2014,30 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#008
30.06	2016,41 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#009
30.06	2016,41 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#010
30.06	2016,42 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#011
30.06	2016,42 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#012
30.06	2016,30 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#013
30.06	2016,30 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#014
30.06	2016,11 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#015
30.06	2016,11 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#016
30.06	2017,16 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#017
30.06	2017,16 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#018
30.06	2017,10 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#019
30.06	2017,10 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#020
30.06	2017,33 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#021
30.06	2017,33 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#022
30.06	2017,36 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#023
30.06	2017,36 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#024
30.06	2019,25 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#025
30.06	2019,25 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#026
30.06	2019,13 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#027
30.06	2019,13 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#028
30.06	2019,19 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#029
30.06	2019,19 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#030
30.06	2019,28 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#031
30.06	2019,28 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#032
30.06	2020,4 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#033
30.06	2020,4 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#034
30.06	2020,12 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#035
30.06	2020,12 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#036
30.06	2020,35 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#037
30.06	2020,35 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#038
30.06	2020,5 <sub>1</sub>	AUG_LTS_neu#039
30.06	2020,5 <sub>2</sub>	AUG_LTS_neu#040



# Anhang B

## Folienradwinkel

In Abbildung B.1 werden die in dieser Arbeit zur Einstellung der Foliendicke verwendeten Winkel des Folienrads dargestellt.

Lower limit:  $286^\circ = \text{Close}$

Upper limit:  $128^\circ$

Forbidden:  $286^\circ - 346^\circ$

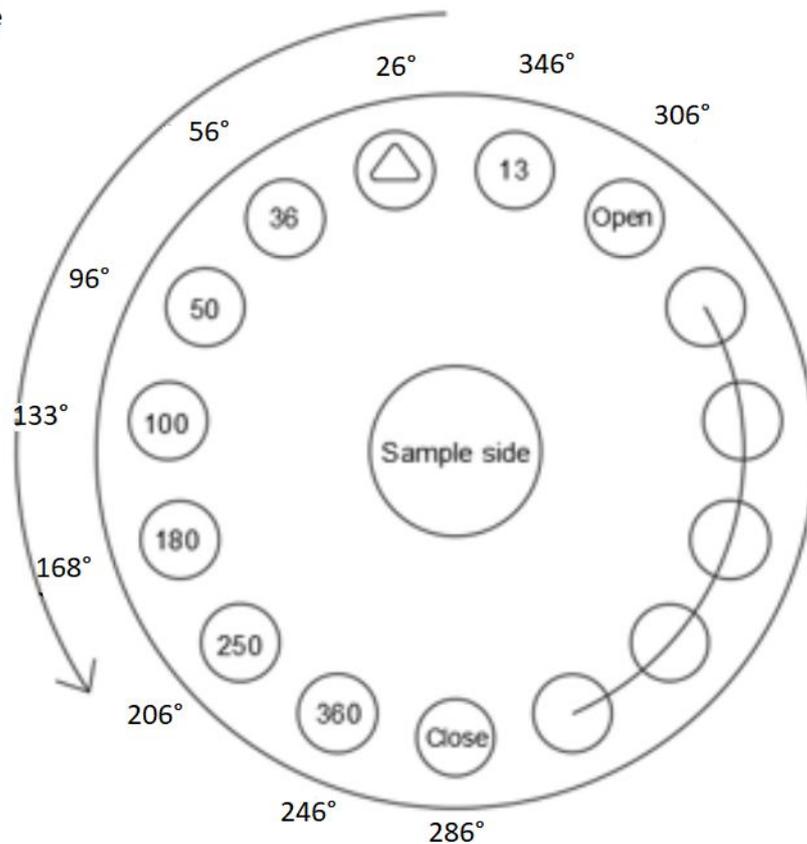


Abbildung B.1: Nominelle Foliendicken am Folienradwinkel nach [19].



# Anhang C

## Genauigkeit der Strommessung

Um einen Fehler bei der Strommessung auszuschließen, wurde in Abbildung C.1 anhand der Pt1-Kalibrierprobe überprüft, ob der Abfall des RBS-Peakintegrals mit der Energie proportional zu  $\frac{1}{E^2}$  ist.

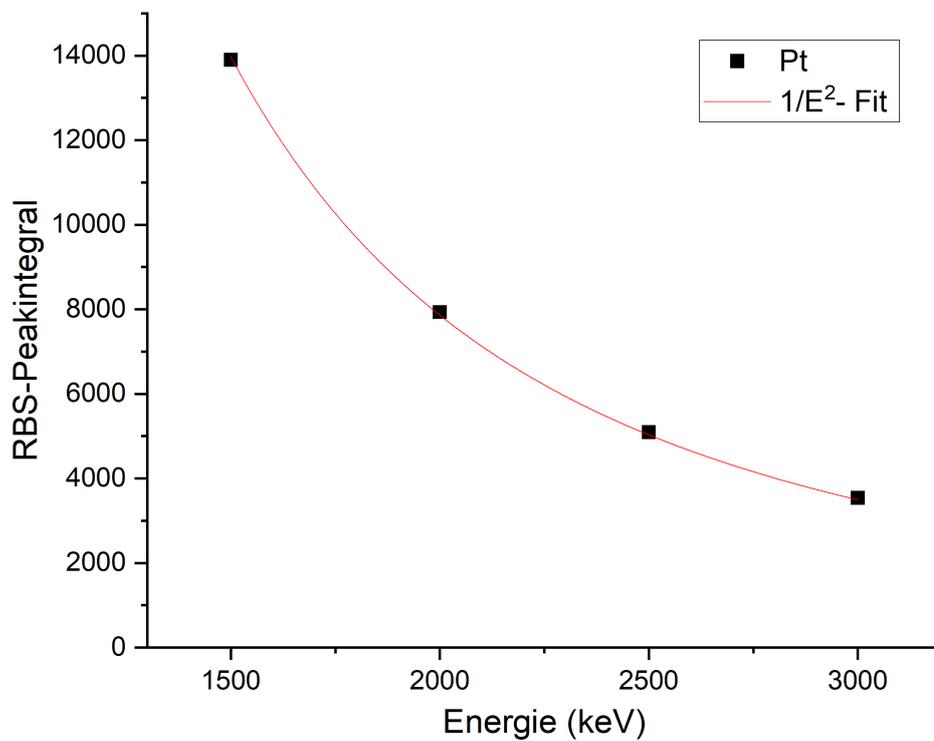


Abbildung C.1:  $\frac{1}{E^2}$  Abfall des RBS-Peakintegrals für Pt1-Kalibrierprobe.



# Literatur

- [1] Kabir, Hasnat. 09.2007. *Particle Induced X-ray Emission (PIXE) Setup and Quantitative Elemental Analysis*. URL: <https://www.kochi-tech.ac.jp/english/admission/img/076d702ebcf587c7a1ada680c86c8956.pdf>. S. I, 2-4.
- [2] Tipler, Paul A., Mosca, Gene. 2009. *Physik:Für Wissenschaftler und Ingenieure* (6. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, S. 1400-1402.
- [3] Nastasi, Michael, Mayer, James W., Wang Yongqiang. 01.2015. *Ion Beam Analysis: Fundamentals and Applications*. Boca Raton: Taylor and Francis Group, S. 57, 59-63, 113-119 141-144, 171-173 .
- [4] Szeifert, Karl-Heinz. 13.12.2018. *Röntgenspektrum: Charakteristische Röntgenstrahlung*. URL: <https://www.mta-r.de/blog/charakteristische-roentgenstrahlung/>.
- [5] Ermrich, Martin, Opper, Detlef. 2011. *X-RAY POWDER DIFFRACTION*. URL: [https://imf.ucmerced.edu/sites/imf.ucmerced.edu/files/page/documents/x-ray\\_powder\\_diffraction.pdf](https://imf.ucmerced.edu/sites/imf.ucmerced.edu/files/page/documents/x-ray_powder_diffraction.pdf). S. 17.
- [6] Jenkins, R., Manne, R., Robin, R., Senemaud, C.. 1991. *Part VIII. Nomenclature system for X-ray spectroscopy*. URL: <http://old.iupac.org/reports/V/spectro/partVIII.pdf>. S. 1.
- [7] Tandem-Beschleuniger:Ionenstrahl-Analyselabor mit 3-Megavolt-Tandembeschleuniger. o.D.. URL: <https://www.ipp.mpg.de/4217643/beschleuniger>.
- [8] Pww rks. o.D.. URL: [https://wiki.mpcdf.mpg.de/MFWiki/index.php/Pww\\_rks](https://wiki.mpcdf.mpg.de/MFWiki/index.php/Pww_rks). letzte Änderung: 19.03.2019.
- [9] [Bedienungsanleitung]. 19.06.2020. URL: [https://wiki.mpcdf.mpg.de/MFWiki/images/6/66/KETEK-AXAS-A-D-with-VICO-DP-Manual-Rev1.5\\_June\\_2020.pdf](https://wiki.mpcdf.mpg.de/MFWiki/images/6/66/KETEK-AXAS-A-D-with-VICO-DP-Manual-Rev1.5_June_2020.pdf). S. 6,11.
- [10] Foils for PIXE Wheel. o.D.. URL: [https://wiki.mpcdf.mpg.de/MFWiki/images/c/c0/PIXE\\_Foils.pdf](https://wiki.mpcdf.mpg.de/MFWiki/images/c/c0/PIXE_Foils.pdf). S. 1.
- [11] Demtroeder, Wolfgang. 2007. *Laserspektroskopie Grundlagen und Techniken* (4. Auflage). Berlin, Heidelberg, New York. Springer. S. 26.
- [12] Röntgenstrahlung (XST). 13.08.2021. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/XST.pdf>. S. 3,4.
- [13] Oberauer, Lothar. 11.2020. [KTA-Skript]. URL:[https://www.moodle.tum.de/pluginfile.php/2591732/mod\\_resource/content/1/2020-KTA-03-ww.pdf](https://www.moodle.tum.de/pluginfile.php/2591732/mod_resource/content/1/2020-KTA-03-ww.pdf). S. 3,8.
- [14] M. Mayer. SIMNRA: Simulation of RBS, ERD and NRA spectra. URL: <https://www2.ipp.mpg.de/mam/>.
- [15] Tesmer, Joseph R., Nastasi, Michael, Eds. 1995. *HANDBOOK OF MODERN ION BEAM MATERIALS ANALYSIS*. Pittsburgh, Pennsylvania. Materials Research Society. S. 491.
- [16] [Energien der Roentgenlinien]. 4.10.2016. URL: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2171854/mod\\_resource/content/1/X-ray%20absorption%20edges%2C%20characteristic%20X-ray%20lines.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2171854/mod_resource/content/1/X-ray%20absorption%20edges%2C%20characteristic%20X-ray%20lines.pdf).

- [17] Güte der Regression. o.D..URL: [https://wikis.hu-berlin.de/mmstat/G%C3%BCte\\_der\\_Regression](https://wikis.hu-berlin.de/mmstat/G%C3%BCte_der_Regression).  
letzte Änderung: 24.09.2018.
- [18] [Folienrad]. o.D.. URL: [https://wiki.mpcdf.mpg.de/MFWiki/images/a/ae/PIXE\\_Foils\\_Layout.pdf](https://wiki.mpcdf.mpg.de/MFWiki/images/a/ae/PIXE_Foils_Layout.pdf).
- [19] [Fehlerskript]. o.D.. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/org/ABW.pdf>. letzte  
Aktualisierung: 08.03.2021.