

Röntgenabsorption

Lasse Sternemann
lasse.sternemann@udo.edu

Bearbeitet am 10.05.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	3
1.1	Röntgenstrahlung	3
1.1.1	Bremsspektrum	3
1.1.2	Charakteristische Strahlung	4
1.2	Absorptionsspektrum	5
1.3	Bragg-Reflexion	6
2	Durchführung	8
2.1	Röntgenstrahlung	8
2.2	Bragg-Bedingung	8
2.3	Röntgenspektrum	8
2.4	Absorptionsspektren	9
3	Auswertung	10
3.1	Überprüfung der Bragg-Bedingung	11
3.2	Emissionspektrum	12
3.3	Absorptionsspektren	15
4	Diskussion	17
5	Anhang	19
5.1	Wertetabelle - Bragg-Reflexion	19
5.2	Wertetabelle - Absorptionsspektren	21
5.3	Absorptionsspektren	23
6	Literaturverzeichnis	30

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Röntgenstrahlung

Das Röntgenspektrum besteht immer aus einem kontinuierlichem Bremsspektrum und einer Mehrzahl an charakteristischen Strahlungspeaks, die sich mit dem Bremsspektrum überlagern. Dieses Spektrum kann mit einer Röntgenröhre erzeugt werden. Sie besteht aus einer Glühkathode, aus der Elektronen über eine Heizspannung ausgelöst werden. Zwischen der Glühkathode und einer gegenüber befestigten Anode liegt eine Beschleunigungsspannung an, sodass das resultierende elektrische Feld die Elektronen auf die Anode zubeschleunigt. Die beim Auftreffen auf die Anode entstehenden Strahlungsarten lassen sich über zwei Entstehungsmechanismen erklären.

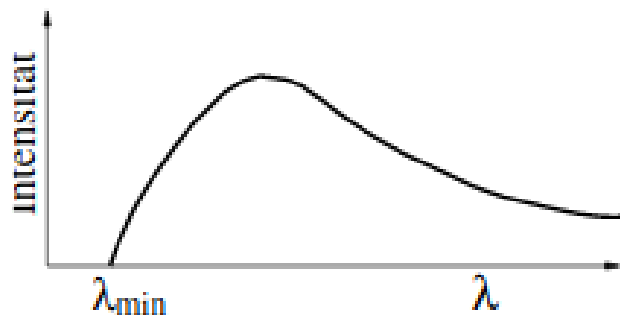


Abbildung 1: In der Abbildung ist ein Bremsspektrum schematisch skizziert. Die kleinste Wellenlänge λ entspricht der Energie der schnellsten Elektronen. [1]

1.1.1 Bremsspektrum

Das kontinuierliche Bremspektrum entsteht, wenn die beschleunigten Elektronen durch das Coulumb-Feld der Atome des Anodenmaterials abgebremst. Dies entspricht einer negativen Beschleunigung und die dabei verlorene kinetische Energie des Elektrons wird in Form von Strahlung abgegeben. Die dabei entstehende Energie mit der höchsten Energie, bzw. geringsten Wellenlänge, entspringt den Elektronen, die maximal beschleunigt wurden, also die gesamte Energie des E-Felds aufgenommen haben und beim Abbremsen ihre Energie komplett verlieren. Die zugehörige Energie lässt sich demnach über folgende Formel berechnen:

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} \quad \longrightarrow \quad \lambda_{\text{Grenz}} = \frac{hc}{U_{\text{Beschl}} \cdot e_0}$$

1.1.2 Charakteristische Strahlung

Die deutlich erkennbaren Peaks im Röntgenspektrum sind von dem Anodenmaterial der Röntgenröhre abhängig und werden daher als charakteristische Strahlung bezeichnet. Sie entstehen, wenn ein beschleunigtes Elektron ein Elektron eines Atoms des Anodenmaterials aus dessen Schale haut. Das ionisierte Atom wird nun in den Grundzustand zurückgesetzt, wenn ein Elektron aus einer höher energetischen Schale hinab an den freigewordenen Schalenplatz springt. Die aus der Potentialdifferenz überschüssige Energie, wird als Röntgenquant mit der Wellenlänge λ abgegeben und es entstehen scharfe Peaks:

$$\lambda_{\text{char}} = \frac{E_m - E_n}{hc} \quad (1)$$

Die aus der Potentialdifferenz frei werdende Energie hängt dabei von den Schalen ab aus der das Elektron herausgelöst und aus der das neue Elektron hinabsteigt. Die Schalenenergien werden in Formel 1 durch die Indizes n und m differenziert. Die verschiedenen charakteristischen Peaks ergeben sich daraus, dass der beschriebene Prozess zwischen allen Schalen (K, L, M) auftreten kann. So werden die Peaks bezüglich der Schale mit der freien Elektronstelle, der Großbuchstabe, und der Schale aus der das neue Elektron kommt, der griechische Indize, bezeichnet. Wenn ein Elektron aus der L -Schale, um eine Schale auf die K -Schale fällt, wird der zugehörige Peak als K_α bezeichnet. Bei einem Sprung um zwei Schalen lautet der Indize β und bei drei Schalen γ . Um aus Formel 1 die Energie eines Sprunges zu berechnen wird die potentielle Energie in den Schalen wie folgt berechnet:

$$E_n = -R_\infty \cdot z_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{1}{n^2} \quad \text{Rydbergenergie : } R_\infty = 13,6 \text{ eV} \quad (2)$$

Dabei wird berücksichtigt, dass die Schalenelektronen sich auch gegenseitig abstoßen und so teils vom Coulomb-Feld abgeschirmt werden. Die verringerte Wirkung des Coulomb-Feldes wird durch die effektive Kernladungszahl beschrieben, die sich aus der Differenz der grundsätzlichen Kernladungszahl und der Abschirmkonstante σ ergibt:

$$z_{\text{eff}} = Z - \sigma$$

Nun kann durch Einsetzen von 2 in Gleichung 1 die Energie einer Übergangslinie aus der Abschirmkonstante der einzelnen Elektronen, der Energieniveaus der beteiligten Schalen und der Kernladungszahl des Elements berechnet werden.

$$E_{\text{Endschale}_{m-n}} = R_\infty \cdot (Z - \sigma_n)^2 \cdot \frac{1}{n^2} - R_\infty \cdot (Z - \sigma_m)^2 \cdot \frac{1}{m^2} \quad (3)$$

Entgegen Gleichung 3 haben nicht alle zugehörigen Übergänge genau diese Energie. Dies liegt daran, dass nicht alle Elektronen einer Schale genau dieselbe potentielle Energie haben. Daher bestehen die charakteristischen Peaks bei genauerer Betrachtung aus mehreren kleinen, in einer Feinstruktur angeordneten Peaks, die jedoch meist zu einem zusammengefasst werden.

1.2 Absorptionsspektrum

Wenn die Röntgenstrahlung auf eine Schicht trifft, wird sie teilweise absorbiert. Dies geschieht durch das Auftreten des Photo-Effekts und der Compton-Streuung, wenn die Röntgenquanten auf das Absorbermaterial auftreffen. Wenn die Röntgenquanten sehr energiereich sind ($E > 1\text{MeV}$) sind diese beiden Effekte nicht mehr als dominant anzusehen, da ihre Wirkungsquerschnitte sinken und weitere Effekte beeinflussen die Absorption. Der für die Größe der Absorption verantwortliche Absorptionskoeffizient sinkt bei steigender Energie. Eine Ausnahme bilden die Energien, die der Bindungsenergie eines Elektrons der nächsthöheren Schale entsprechen. Denn wenn diese erreicht ist, können die Röntgenquanten Elektronen aus ihrer Schale auf freie Plätze in eben jener nächsthöheren Schale anheben. Dies geschieht natürlich bei mehreren Energien, da es auch mehrere Schalen gibt. Die für diese Anregungen notwendige Frequenz der Röntgenstrahlung berechnet sich wie folgt:

$$h \cdot \nu_{\text{abs}} = E_n - E_{\infty}$$

Diese Frequenzen liegen nun an den Absorptionskanten und können auch in die zugehörige Energie umgerechnet werden. Auch hier können z.B. bei der L-Kante aufgrund der Feinstruktur mehrere Kanten beobachtet werden. Die zu diesen Kanten gehörenden $E_{n,j}$ hängen neben dem Energieniveau n und der effektiven Kernladungszahl nun auch von dem Spin j der einzelnen Elektronen auf der Schale und der Sommerfeldschen Feinstrukturkonstante α ab. Diese Energie berechnet sich über Formel 4.

$$E_{n,j} = -R_{\infty} \cdot \left(z_{\text{eff}, 1}^2 \cdot \frac{1}{n^2} + \alpha^2 z_{\text{eff}, 2}^4 \cdot \frac{1}{n^3} \cdot \left(\frac{1}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4n} \right) \right), \quad z_{\text{eff}, n} = (Z - \sigma_n) \quad (4)$$

Aus diesen Gleichungen entspringt die Sommerfeldsche Feinstrukturformel, die die Abschirmkonstante eines Elektrons aus der K-Schale wie folgt berechnet:

$$\sigma_k = Z - \sqrt{\frac{E_K}{R_{\infty}} - \frac{\alpha^2 Z^4}{4}} \quad (5)$$

Die restlichen Abschirmkonstanten einer Schale lassen sich bei Kenntnis der Absorptionskantenenergie $E_{\text{Endschale}_{m-n}}$ und von σ_1 , z.B. aus Gleichung 5 auch durch Umstellen von Gleichung 2 nach dem gewünschten σ bestimmen. So lassen sich $\sigma_{1,2,3}$ der K-Schale nach diesem Prinzip mit folgenden drei Formeln berechnen:

$$\sigma_1 = Z - \sqrt{\frac{E_{k, \text{abs}}}{R_\infty}} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = Z - \sqrt{4 \cdot (Z - \sigma_1)^2 - \frac{4 \cdot E_{k_\alpha}}{R_\infty}} \quad (7)$$

$$\sigma_3 = Z - \sqrt{9 \cdot (Z - \sigma_1)^2 - \frac{9 \cdot E_{k_\beta}}{R_\infty}} \quad (8)$$

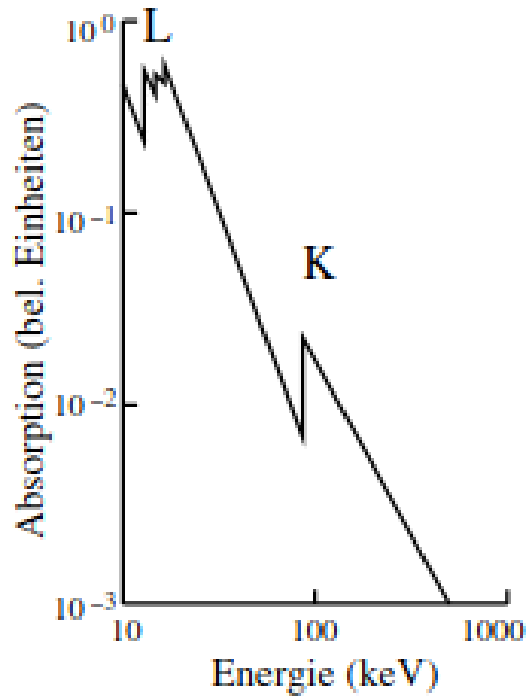


Abbildung 2: In der Abbildung ist ein Absorptionsspektrum dargestellt. Die Sprünge an den Absorptionskanten der L- und K-Schale sind deutlich zu erkennen.[1]

1.3 Bragg-Reflexion

Bei der Bragg-Reflexion fällt Strahlung auf ein Material mit einer Oberflächengitterstruktur. Wenn Strahlung einer gewissen Wellenlänge auf diese Gitterstruktur auftrifft, wird sie an einem Atom in der Gitterstruktur gebeugt und interferiert daraufhin mit sich selbst. Dabei kommt es beim Bragg-Winkel θ zu konstruktiver Interferenz. Der Bragg-Winkel hängt neben der Wellenlänge der einfallenden Strahlung auch von der Gitterkonstante des Materials d und der Anzahl der Schichten an denen das Licht gebeugt wird n ab. Er lässt

sich durch Umstellen von Formel 9 berechnen. Da der Bragg-Winkel von der Wellenlänge abhängt, kann bei gleichem Material die maximale Intensität bei verschiedenen Winkeln verschiedener Wellenlängen eines einfallenden Spektrums beobachtet werden.

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad \longrightarrow \quad \theta = \arcsin\left(\frac{n\lambda}{2d}\right) \quad (9)$$

Über die Energie eines Quants kann Formel 9 auch genutzt werden, um die Energie der Strahlung in Abhängigkeit vom Bragg-Winkel zu berechnen.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \longrightarrow \quad E = \frac{hcn}{2 \cdot d \cdot \sin(\theta)} \quad (10)$$

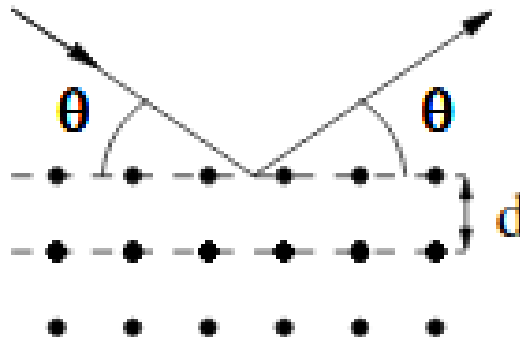


Abbildung 3: In der Abbildung ist die Bragg-Reflexion skizziert. Der Winkel θ ist der Bragg-Winkel und d die Gitterkonstante.[1]

2 Durchführung

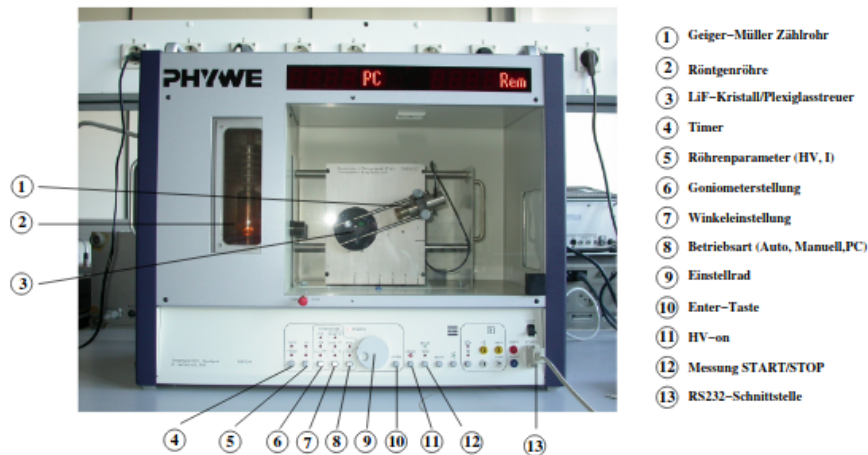


Abbildung 4: In der Abbildung ist der Gesamtaufbau des Versuches abgebildet. Die einzelnen Komponenten werden zudem benannt.[1]

2.1 Röntgenstrahlung

Um den Versuch durchführen zu können wird zunächst Röntgenstrahlung erzeugt. Dies geschieht wie in Abschnitt 1.1 beschrieben in einer Röntgenröhre, die die Elektronen bei einem Emissionsstrom von 1mA und einer Beschleunigungsspannung 35kV auf eine Kupferanode beschleunigt.

2.2 Bragg-Bedingung

Zunächst soll die Bragg-Bedingung, die eine Aussage über den Winkel des Intensitätsmaximum der reflektierten Strahlung trifft, überprüft werden. Dafür wird ein LiF-Kristall in einem Bragg-Winkel θ von 14° in den Röntgenstrahl gestellt. Das Intensitätsmaximum der reflektierten Röntgenstrahlung wird ebenfalls beim Bragg-Winkel relativ zum LiF-Kristall erwartet. Das Intensitätsmaximum wird demnach beim doppelten Winkel 2θ zum Strahl erwartet und daher ein Messbereich von 26° bis 30° gewählt. Ein Geiger-Müller-Zählrohr misst für diesen Bereich die Intensität der reflektierten Strahlung in $0,1^\circ$ -Schritten und über eine Integrationszeit von 5 Sekunden.

2.3 Röntgenspektrum

Um das Röntgenspektrum der Röntgenröhre mit Kupferanode zu analysieren, wird die Bragg-Bedingung verwendet. Das Geiger-Müller-Zählrohr misst dazu in einem Winkelbereich von 4° bis 26° , was dem doppelten Anstellwinkel des LiF-Kristalls zum Röntgenstrahl entspricht, in Schritten von $0,1^\circ$ und einer Integrationszeit von 5 Sekunden die Intensität

der vom LiF-Kristall reflektierten Röntgenstrahlung. Über die Bragg-Bedingung kann jedem Bragg-Winkel eine Wellenlänge zugeordnet werden, sodass nach Abschluss der Messung das Spektrum in Abhängigkeit vom Bragg-Winkel oder der Wellenlänge dargestellt werden kann.

2.4 Absorptionsspektren

Zur Messung von Absorptionsspektren muss zunächst ein Absorber zwischen LiF-Kristall und Geiger-Müller-Zählrohr platziert werden. Nun wird der Winkel des Geiger-Müller-Zählrohrs in $0,1^\circ$ -Schritten über einen für das Material geeigneten Bereich variiert und dabei das Absorptionsspektrum gemessen. Es werden für Zink, Gallium, Brom, Rubidium, Strontium und Zirkonium die zugehörigen Absorptionsspektren gemessen.

3 Auswertung

Für weitere Rechnungen werden zunächst Elementareigenschaften aus der Literatur gesucht [2] und berechnet. Die σ_k werden dabei aus E_k^{Lit} , der Rydbergenergie R_∞ , der Ordnungszahl Z und der Sommerfeldschen Feinstrukturkonstante α [3] über Formel 5 berechnet, die Winkel θ_k^{Lit} aus E_k^{Lit} [3] und der Gitterkonstante d , nach Umstellen von Gleichung 10 nach θ bei $n=1$. Die Naturkonstante werden über die Scipy-Funktion `constants` bezogen, die die Werte vom National Institute of Standards and Technology bezieht [3].

$$\theta_k^{\text{Lit}} = \arcsin \left(\frac{hc}{2 \cdot 201,4 \cdot 10^{-12} \text{m} \cdot E_k^{\text{Lit}}} \right)$$

So lässt sich unter Recherche von E_k^{Lit} und Z die folgende Tabelle komplett ausfüllen.

Tabelle 1: In der Tabelle sind Literaturwerte [2] von Eigenschaften der im Experiment verwendeten Elemente dargestellt. Sie werden teils auseinander errechnet.

Material	Ordnungszahl Z	E_k^{Lit} [eV]	θ_k^{Lit} [°]	σ_k
Cu	29	8980	20,05	3,31
Zn	30	9650	18,60	3,57
Ga	31	10370	17,27	3,62
Br	35	13470	13,21	3,85
Rb	37	15200	11,68	3,95
Sr	38	16100	11,02	4,01
Zr	40	17990	9,85	4,11

3.1 Überprüfung der Bragg-Bedingung

Um die Bragg-Bedingung zu überprüfen wird der LiF-Kristall in einem Winkel θ von 14° in den Röntgenstrahl gestellt. Aus Skizze 3 geht hervor, dass das Intensitätsmaximum der reflektierten Strahlung bei einem Winkel von 2θ , also 28° , zum Strahl zu finden sein sollte.

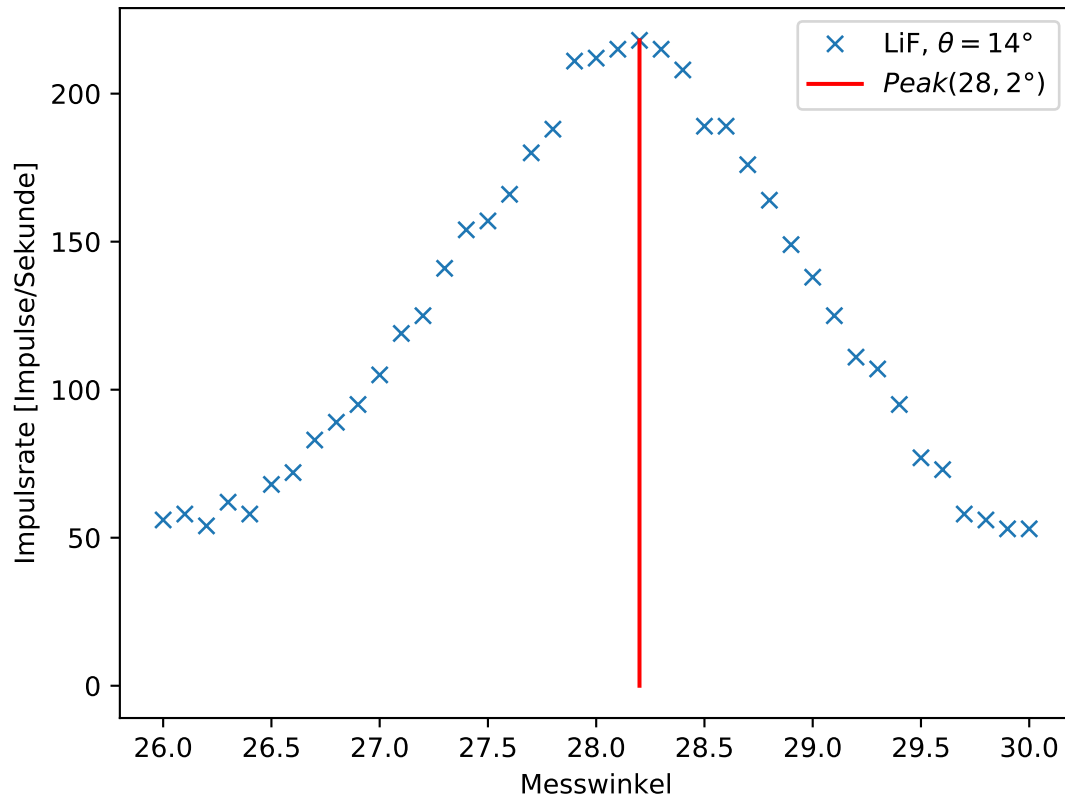


Abbildung 5: In dem Graphen ist die Impulsrate der am LiF-Kristall reflektierten Röntgenstrahlung in Imp/s gegen den Messwinkel des Geiger-Müller-Zählrohrs relativ zum Röntgenstrahl aufgetragen. Das Intensitätsmaximum liegt bei $28,2^\circ$.

Die Auswertung der in Grafik 5 dargestellten Messwerte über die Scipy-Funktion `findPeaks` liefert das Intensitätsmaximum bei einem Winkel von $(28,2 \pm 0,1)^\circ$.

3.2 Emissionsspektrum

Zunächst werden die gesamten Messdaten der Messung zur Intensität in Abhängigkeit vom Bragg-Winkel in einer Grafik aufgetragen.

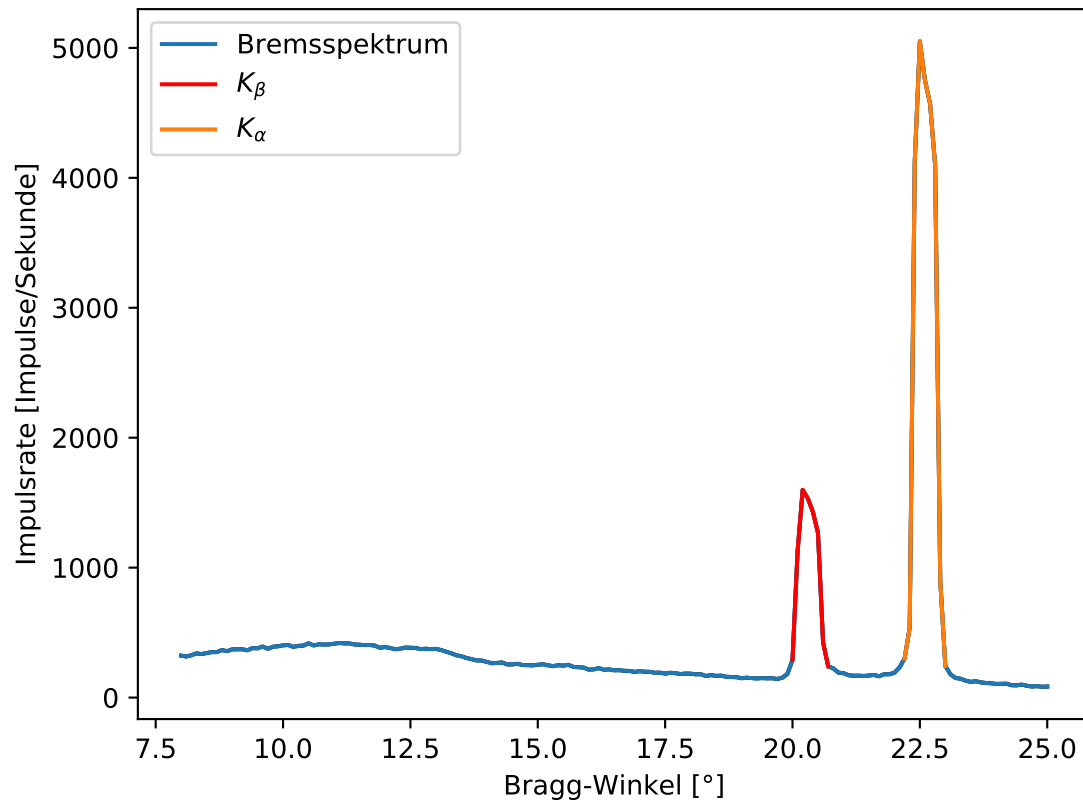


Abbildung 6: In dem Graphen ist der gesamte Bereich des aufgenommenen Röntgenspektrums der Kupferröntgenröhre, in Form der Impulsrate in Imp/s in Abhängigkeit vom Bragg-Winkel aufgetragen. Neben dem kontinuierlichen Bremspektrum sind auch die K_α - und K_β -Peaks deutlich zu erkennen.

Aus diesem Spektrum ist weder die maximale noch die minimale Energie des Spektrums zu bestimmen. Die maximale Energie liegt nach folgender Formel,

$$\theta_{\min} = \arcsin \left(\frac{hc}{2 \cdot d \cdot U_{\text{Beschl}} e} \right) \approx 5,05^\circ$$

bei einem Winkel der nicht im aufgenommenen Spektrum liegt. Die minimale Energie liegt bei dem maximalen Winkel. Da das Bremspektrum kontinuierlich gegen Null läuft, liegt auch dieser Winkel nicht im aufgenommenen Bereich. Zur genaueren Betrachtung

der charakteristischen Strahlung wird zudem ein Detailspektrum der K_α - und K_β -Peaks angefertigt. In diesem Detailspektrum wird der durch die Bremsstrahlung erzeugte Untergrund über folgende Geradengleichung abgezogen.

$$y = -35,10 \cdot x + 795,04$$

So ergibt sich folgende Grafik, die nur noch die Peaks enthält.

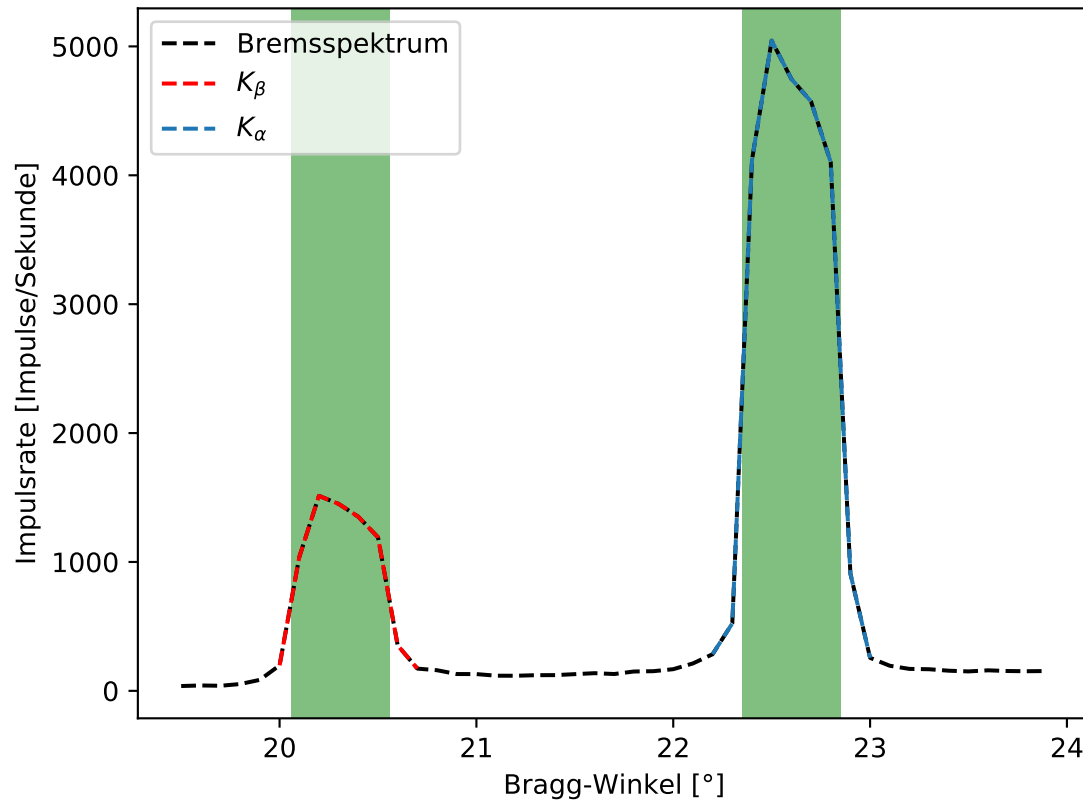


Abbildung 7: In dem Graphen sind nun nur noch die charakteristischen Peaks des Röntgenspektrums der Kupferröntgenröhre, in Form der Impulsrate in Imp/s in Abhängigkeit vom Bragg-Winkel aufgetragen, da der Untergrund des Bremspektrums abgezogen wurde. Die Halbwertsbreite des K_β - Peaks (links) und des K_α - Peaks (rechts) sind durch die Grünen Boxen gekennzeichnet.

Die Halbwertsbreiten der Peaks des angepassten Spektrums wird über einen Spline berechnet und ist in Grafik als grüne Box eingezeichnet. Über Formel 10 mit $n=1$ in die Energie umgerechnet, ergeben sie sich als

$$\Delta E_\beta = 210 \text{ eV} \quad \text{und} \quad \Delta E_\alpha = 170 \text{ eV}$$

Aus diesen Energien und den Energien der charakteristischen Peaks, die aus den Winkeln

$$\theta_\beta = 20,1 \pm 0,1 \quad \theta_\alpha = 22,4 \pm 0,1$$

über Formel 10, bei $n=1$, und deren Fehler über folgende Formel berechnet wird:

$$\Delta E = \frac{hcn}{2d} \cdot \frac{2 \cdot \cos(\theta)}{\cos(2\theta) - 1} \cdot \Delta\theta$$

$$E_\beta = 8910 \pm 40 \text{ eV} \quad \text{und} \quad E_\alpha = 8043 \pm 34 \text{ eV} \quad (11)$$

werden die Auflösungen der Peaks berechnet, die bei dem verwendeten Material eine genügende Genauigkeit aufweisen, sodass kein statistischer Fehler betrachtet werden muss.

$$\begin{aligned} \text{Auflösung} &= \frac{E_{\text{Peak}}}{\Delta E_{\text{Peak}}} \quad \longrightarrow \quad \text{Auflösung}_\beta = 42,55 \pm 0,20, \quad \text{Auflösung}_\alpha = 47,85 \pm 0,20 \\ \Delta \text{Auflösung} &= \frac{E_{\text{Peak}}}{\Delta E_{\text{Peak}}} \cdot \text{Fehler}(E_{\text{Peak}}) \end{aligned}$$

Zuletzt werden aus den Formeln 8 die Abschirmkonstanten σ_1, σ_2 und σ_3 des Kupferatoms bestimmt, dazu werden die bestimmten Energien der Peaks 11 und das $E_{k, \text{abs}}$ aus der Eigenschaftentabelle der Elemente verwendet. Da σ_1 über Literaturwerte berechnet wird, bleibt es fehlerfrei. Die Fehler zu σ_2 und σ_3 ergeben sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_2 &= \frac{2}{R_\infty \cdot \sqrt{4 \cdot (Z - \sigma_1)^2 - \frac{4E_K}{R_\infty}}} \cdot \Delta E_K \\ \Delta\sigma_3 &= \frac{9}{2 \cdot R_\infty \cdot \sqrt{9 \cdot (Z - \sigma_1)^2 - \frac{9E_K}{R_\infty}}} \cdot \Delta E_K \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 3,31 \\ \sigma_2 &= 12,41 \pm 0,30 \\ \sigma_3 &= 22,40 \pm 2,1 \end{aligned}$$

3.3 Absorptionsspektren

Die gemessenen Absorptionsspektren der Absorbermaterialien Zink 9, Gallium 10, Brom 11, Rubidium 12, Strontium 13 und Zirkonium 14 werden dargestellt, indem die Impulsrate der absorbierten Strahlung gegen den zugehörigen Bragg-Winkel aufgetragen wird. Aus diesen Absorptionsspektren, die die K-Kante enthalten, werden die zur K-Kante gehörigen Energien bestimmt. Um zunächst die Mitte der gemessenen Kante zu bestimmen, wird der Intensitätswert der Mitte zwischen dem Maximum und Minimum der Kante berechnet, indem eine Gerade zwischen den Punkten gelegt wird und die Intensität in der Mitte dieser berechnet wird.

$$I_K = I_K^{\min} + \frac{I_K^{\min} + I_K^{\max}}{2} \quad (12)$$

Daraufhin wird der dieser Intensität zugehörige Wert aus dem Datensatz der Intensitäten und zugehörigen Winkel berechnet. Aus diesem Winkel wird die, der Kante zugehörige, Energie über Formel 10 und der Fehler wieder über 12 berechnet. Aus diesen Energien wiederum werden die den K-Schalen zugehörigen Abschirmkonstanten σ_k über Formel 5 berechnet. Der zugehörige Fehler berechnet sich über folgende Gleichung.

$$\Delta\sigma_k = \frac{1}{2 \cdot R_\infty \cdot \sqrt{\frac{E_K}{R_\infty} - \frac{\alpha^2 \cdot Z^4}{4}}}$$

Die Datensätze der Absorber Zinn, Gallium, Brom, Rubidium, Strontium und Zirkonium ergeben folgende Werte.

Tabelle 2: In der Tabelle sind die abgelesenen Maxima und Minima der Intensität vor I_K^{\min} und nach I_K^{\max} der Kante sowie die daraus bestimmte mittlere Intensität der Kante dargestellt. Der dieser Intensität zugehörige Winkel θ , sowie die daraus berechnete Energie E_K und Abschirmkonstante σ_k sind ebenfalls für alle Materialien eingetragen.

Material	I_K^{\min} [Imp/s]	I_K^{\max} [Imp/s]	I_K [Imp/s]	θ [°]	E_K [eV]	σ_k
Zn	54	102	78	$18,7 \pm 0,1$	9600 ± 50	$3,64 \pm 0,07$
Ga	66	122	94	$17,3 \pm 0,1$	10350 ± 60	$3,64 \pm 0,08$
Br	9	27	18	$13,2 \pm 0,1$	13480 ± 100	$3,84 \pm 0,12$
Rb	12	64	38	$11,8 \pm 0,1$	15050 ± 130	$4,12 \pm 0,14$
Sr	40	196	118	$11,1 \pm 0,1$	15990 ± 140	$4,13 \pm 0,15$
Zr	112	301	206,5	$10 \pm 0,1$	17730 ± 180	$4,38 \pm 0,18$

Zuletzt wird die Rydbergenergie R_∞ mit Hilfe des Moseley'schen Gesetz bestimmt. Diese besagt, dass die Wurzel der K-Kantenenergie der Elemente gegen die effektive Kernladungszahl des Elements eine Gerade ergeben, deren Steigung die Wurzel der Rydbergenergie ergibt. Dazu werden eben diese Werte per Matplotlib in Grafik 8 aufgetragen

und mit der Funktion Curvefit eine lineare Regression angefertigt, die folgende Parameter hat:

$$y = mx + b$$

$$m = (1518,91 \pm 2,03) \cdot 10^{-12} \sqrt{\text{J}} \quad b = (-831,75 \pm 63,60) \cdot 10^{-12} \sqrt{\text{J}}$$

Aus der Steigung m wird dann die Rydbergenergie R_∞ bestimmt:

$$R_\infty = m^2 = (14,40 \pm 0,04) \text{ eV} \quad \text{mit} \quad \Delta R_\infty = 2m \cdot \Delta m$$

Daraus kann wie folgt die Rydbergkonstante und der zugehörige Fehler berechnet werden.

$$R = \frac{R_\infty}{hc} = (1,164 \pm 0,0031) \cdot 10^7 \frac{1}{\text{m}} \quad \text{mit} \quad \Delta R = \frac{1}{hc} \cdot \Delta R_\infty$$

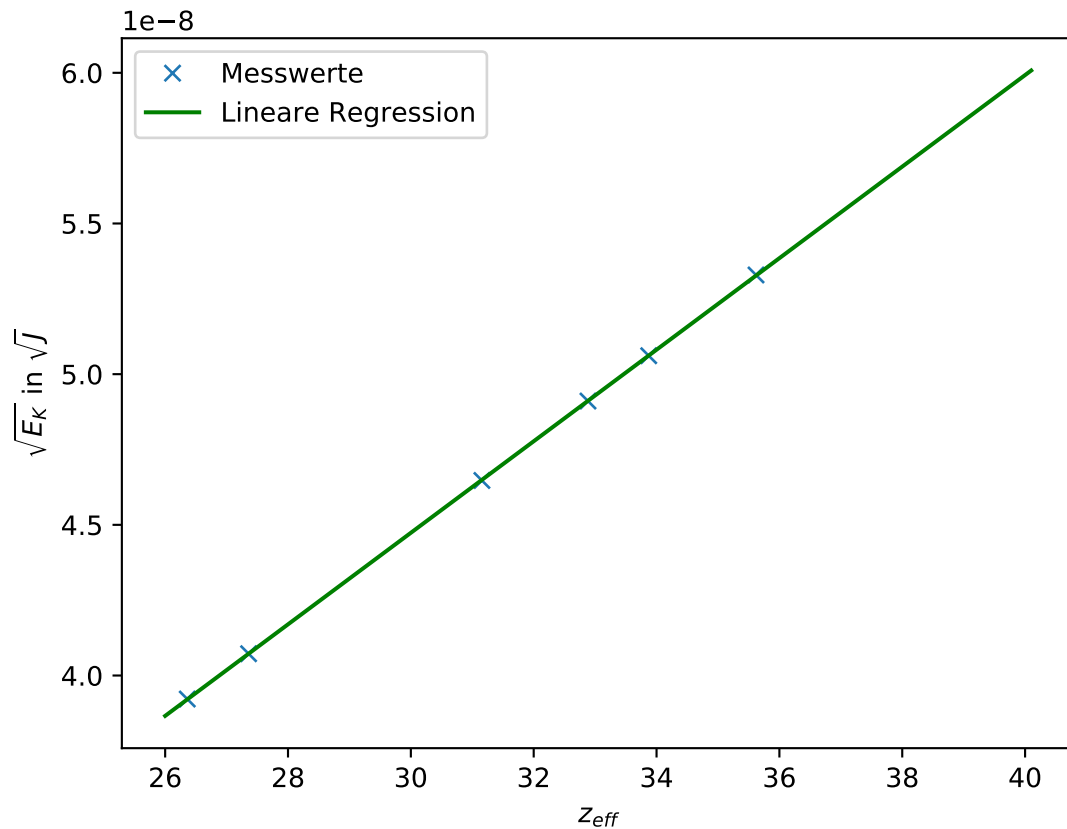


Abbildung 8: In dem Graphen sind die Wurzeln der K-Kantenenergien gegen die effektiven Kernladungszahlen der Elemente ($Z - \sigma$) aufgetragen.

4 Diskussion

Die zunächst durchgeführte Überprüfung der Bragg-Bedingung hat einen Winkel ergeben, der um $0,2^\circ$ vom Literaturwert abweicht. Die kleine Abweichung lässt sich womöglich durch Unebenheiten in der Oberfläche des Streuers zu erklären. Dennoch ist der Wert aussagekräftig genug, um die Theorie zur Lage des Intensitätsmaximum bei der Bragg-Reflexion zu bestätigen. Wenn dieses Intensitätsmaximum um einen Winkel verschoben ist, ändert sich auch das später gemessene Cu-Spektrum. Das Spektrum verschiebt sich einfach um einen Winkel, wenn das Geiger-Müller-Zählrohr korrekt geeicht ist und der Fehler in der Orientierung des Streuers liegt. Wenn jedoch die Orientierung des Streuers korrekt ist und das Geiger-Müller-Zählrohr nicht beim doppelten Bragg-Winkel, sondern etwas davon abgewichen misst, misst er nicht das Intensitätsmaximum, sondern immer etwas weniger, sodass die Intensität über das ganze Spektrum verringert gemessen wird. Das gemessene Spektrum gibt deutlich ein Röntgenspektrum mit der kontinuierlichen Bremsstrahlung

und den charakteristischen Peaks wieder. Die Literaturenergien der Peaks des charakteristischen Spektrums liegen beide im 1σ -Bereich der Messwerte. Dementsprechend decken sich diese Messwerte mit der Theorie. Auch die Literaturwerte der Abschirmkonstanten σ_1, σ_2 und σ_3 liegen im 1σ -Bereich der Messwerte, sodass die Messwerte ein gutes Bild der Theorie abbilden. Daraufhin wurden die Absorptionskantenenergien der Materialien Zink, Gallium, Brom, Rubidium, Strontium und Zirkonium bestimmt. Während die Energien von Zink, Gallium, Brom und Strontium innerhalb der 1σ -Umgebung liegen und somit sehr gut mit den Experimentalwerten übereinstimmen, liegen die Literaturenergien von Rubidium und Zirkonium leicht außerhalb des 1σ -Bereichs. Die Abweichung ist jedoch gering und auch diese Werte können über die Literaturenergien bestätigt werden. Da die Abschirmkonstanten der einzelnen Materialien aus den zuvor bestimmten Absorptionskantenenergien berechnet werden, deckt sich das beobachtete Fehlerbild mit dem der Energien. Die Literaturwerte von Zink, Gallium, Brom und Strontium liegen wieder im 1σ -Bereich der Messwerte und die Literaturwerte von Rubidium und Zirkonium wieder knapp außerhalb. Die Abschirmkonstante von Zirkonium liegt am weitesten vom Literaturwert entfernt und ist nur schwer durch diesen zu bestätigen. Die anderen Abschirmkonstanten decken sich alle gute mit den zugehörigen Literaturwerten. Der 1σ -Bereich des zuletzt bestimmten Wert der Rydbergenergie R_∞ enthält nicht den Literaturwert. Dennoch ist die Messung als erfolgreich zu beschreiben, da der Experimentalwert um 5,8 % vom Literaturwert abweicht und so eine genügende Genauigkeit besitzt. Der vorhandene Fehler könnte auf Unregelmäßigkeiten in der Dicke der eingesetzten Absorberplatten für die einzelnen Materialien zurückzuführen sein. Dies ist der Fall, wenn die Platten zum Beispiel nicht alle dieselbe homogene Dicke haben oder nicht im selben Winkel zum Röntgenstrahl stehen.

Tabelle 3: In der Tabelle werden die Messwerte mit den Literaturwerten verglichen.

Messgröße	Messwert	Literaturwert	Messgröße	Messwert	Literaturwert
E_{K_α} [eV]	8043 ± 34	8038	$\sigma_{K, Zn}$	$3,64 \pm 0,07$	3,57
E_{K_β} [eV]	8910 ± 40	8905	$\sigma_{K, Ga}$	$3,64 \pm 0,08$	3,62
σ_{K1}	$3,31 \pm 0$	3,31	$\sigma_{K, Br}$	$3,84 \pm 0,12$	3,85
σ_{K2}	$12,41 \pm 0,30$	12,36	$\sigma_{K, Rb}$	$4,12 \pm 0,14$	3,95
σ_{K3}	$22,40 \pm 2,10$	21,96	$\sigma_{K, Sr}$	$4,13 \pm 0,15$	4,01
$E_{K, Zn}$ [eV]	9600 ± 50	9650	$\sigma_{K, Zr}$	$4,38 \pm 0,18$	4,11
$E_{K, Ga}$ [eV]	10350 ± 60	10370	R_∞ [eV]	$14,40 \pm 0,04$	13,61
$E_{K, Br}$ [eV]	13480 ± 100	13470	$R \cdot 10^{-7}$ [1/m]	$1,1614 \pm 0,0031$	1,0974
$E_{K, Rb}$ [eV]	15050 ± 130	15200			
$E_{K, Sr}$ [eV]	15990 ± 140	16100			
$E_{K, Zr}$ [eV]	17730 ± 180	17990			

5 Anhang

5.1 Wertetabelle - Bragg-Reflexion

Tabelle 4: In der Tabelle sind die Wertepaare der Intensität und des Reflexionswinkels bei Bragg-Reflexion an einem LiF-Kristall eingetragen.

θ [°]	I [Imp/s]
26,0± 0,1	56,0
26,1± 0,1	58,0
26,2± 0,1	54,0
26,3± 0,1	62,0
26,4± 0,1	58,0
26,5± 0,1	68,0
26,6± 0,1	72,0
26,7± 0,1	83,0
26,8± 0,1	89,0
26,9± 0,1	95,0
27,0± 0,1	105,0
27,1± 0,1	119,0
27,2± 0,1	125,0
27,3± 0,1	141,0
27,4± 0,1	154,0
27,5± 0,1	157,0
27,6± 0,1	166,0
27,7± 0,1	180,0
27,8± 0,1	188,0
27,9± 0,1	211,0
28,0± 0,1	212,0
28,1± 0,1	215,0
28,2± 0,1	218,0
28,3± 0,1	215,0
28,4± 0,1	208,0
28,5± 0,1	189,0
28,6± 0,1	189,0
28,7± 0,1	176,0
28,8± 0,1	164,0
28,9± 0,1	149,0
29,0± 0,1	138,0
29,1± 0,1	125,0
29,2± 0,1	111,0
29,3± 0,1	107,0
29,4± 0,1	95,0
29,5± 0,1	77,0
29,6± 0,1	73,0
29,7± 0,1	58,0
29,8± 0,1	56,0
29,9± 0,1	53,0
30,0± 0,1	53,0

5.2 Wertetabelle - Absorptionsspektren

In den Tabellen sind die zu den einzelnen Materialien gehörigen Wertepaare zur Messung der Absorptionskanten eingetragen.

Tabelle 5: In der Tabelle sind die Wertepaare der Materialien Zink, Gallium und Brom eingetragen.

$\theta_{\text{Zn}} [^\circ]$	$I_{\text{Zn}} [\text{Imp/s}]$	$\theta_{\text{Ga}} [^\circ]$	$I_{\text{Ga}} [\text{Imp/s}]$	$\theta_{\text{Br}} [^\circ]$	$I_{\text{Br}} [\text{Imp/s}]$
18,0 \pm 0,1	58,0	17,0 \pm 0,1	66,0	12,8 \pm 0,1	10,0
18,1 \pm 0,1	54,0	17,1 \pm 0,1	66,0	12,9 \pm 0,1	12,0
18,2 \pm 0,1	55,0	17,2 \pm 0,1	78,0	13,0 \pm 0,1	9,0
18,3 \pm 0,1	54,0	17,3 \pm 0,1	88,0	13,1 \pm 0,1	13,0
18,4 \pm 0,1	54,0	17,4 \pm 0,1	102,0	13,2 \pm 0,1	18,0
18,5 \pm 0,1	55,0	17,5 \pm 0,1	116,0	13,3 \pm 0,1	21,0
18,6 \pm 0,1	65,0	17,6 \pm 0,1	121,0	13,4 \pm 0,1	25,0
18,7 \pm 0,1	84,0	17,7 \pm 0,1	121,0	13,5 \pm 0,1	27,0
18,8 \pm 0,1	91,0	17,8 \pm 0,1	122,0	13,6 \pm 0,1	27,0
18,9 \pm 0,1	100,0	17,9 \pm 0,1	122,0	13,7 \pm 0,1	22,0
19,0 \pm 0,1	102,0	18,0 \pm 0,1	119,0	13,8 \pm 0,1	25,0
19,1 \pm 0,1	100,0	18,1 \pm 0,1	114,0	13,9 \pm 0,1	21,0
19,2 \pm 0,1	98,0	18,2 \pm 0,1	110,0	14,0 \pm 0,1	23,0
19,3 \pm 0,1	100,0	18,3 \pm 0,1	108,0	14,1 \pm 0,1	20,0
19,4 \pm 0,1	95,0	18,4 \pm 0,1	104,0	14,2 \pm 0,1	21,0
19,5 \pm 0,1	98,0	18,5 \pm 0,1	110,0	14,3 \pm 0,1	19,0
		18,6 \pm 0,1	110,0		
		18,7 \pm 0,1	109,0		
		18,8 \pm 0,1	99,0		
		18,9 \pm 0,1	100,0		
		19,0 \pm 0,1	98,0		

Tabelle 6: In der Tabelle sind die Wertepaare der Materialien Rubidium, Strontium und Zirkonium eingetragen.

$\theta_{\text{Rb}} [^\circ]$	$I_{\text{Rb}} [\text{Imp/s}]$	$\theta_{\text{Sr}} [^\circ]$	$I_{\text{Sr}} [\text{Imp/s}]$	$\theta_{\text{Zr}} [^\circ]$	$I_{\text{Zr}} [\text{Imp/s}]$
$11,2 \pm 0,1$	11,0	$10,5 \pm 0,1$	43,0	$9,5 \pm 0,1$	112,0
$11,3 \pm 0,1$	10,0	$10,6 \pm 0,1$	41,0	$9,6 \pm 0,1$	120,0
$11,4 \pm 0,1$	10,0	$10,7 \pm 0,1$	40,0	$9,7 \pm 0,1$	126,0
$11,5 \pm 0,1$	12,0	$10,8 \pm 0,1$	44,0	$9,8 \pm 0,1$	147,0
$11,6 \pm 0,1$	17,0	$10,9 \pm 0,1$	50,0	$9,9 \pm 0,1$	180,0
$11,7 \pm 0,1$	32,0	$11,0 \pm 0,1$	89,0	$10,0 \pm 0,1$	225,0
$11,8 \pm 0,1$	39,0	$11,1 \pm 0,1$	120,0	$10,1 \pm 0,1$	266,0
$11,9 \pm 0,1$	47,0	$11,2 \pm 0,1$	152,0	$10,2 \pm 0,1$	282,0
$12,0 \pm 0,1$	57,0	$11,3 \pm 0,1$	181,0	$10,3 \pm 0,1$	290,0
$12,1 \pm 0,1$	64,0	$11,4 \pm 0,1$	193,0	$10,4 \pm 0,1$	301,0
$12,2 \pm 0,1$	61,0	$11,5 \pm 0,1$	181,0	$10,5 \pm 0,1$	295,0
$12,3 \pm 0,1$	57,0	$11,6 \pm 0,1$	196,0	$10,6 \pm 0,1$	283,0
$12,4 \pm 0,1$	54,0	$11,7 \pm 0,1$	181,0	$10,7 \pm 0,1$	296,0
$12,5 \pm 0,1$	54,0	$11,8 \pm 0,1$	173,0	$10,8 \pm 0,1$	283,0
		$11,9 \pm 0,1$	166,0	$10,9 \pm 0,1$	286,0
		$12,0 \pm 0,1$	159,0	$11,0 \pm 0,1$	286,0

5.3 Absorptionsspektren

In den Grafiken sind die Absorptionsspektren der einzelnen Absorbermaterialien dargestellt, wobei die Winkel indirekt die Energie der absorbierten Strahlung und die Impulsrate die Intensität der absorbierten Strahlung wiedergibt. Der plötzliche Anstieg in den Graphen markiert dabei die K-Kante.

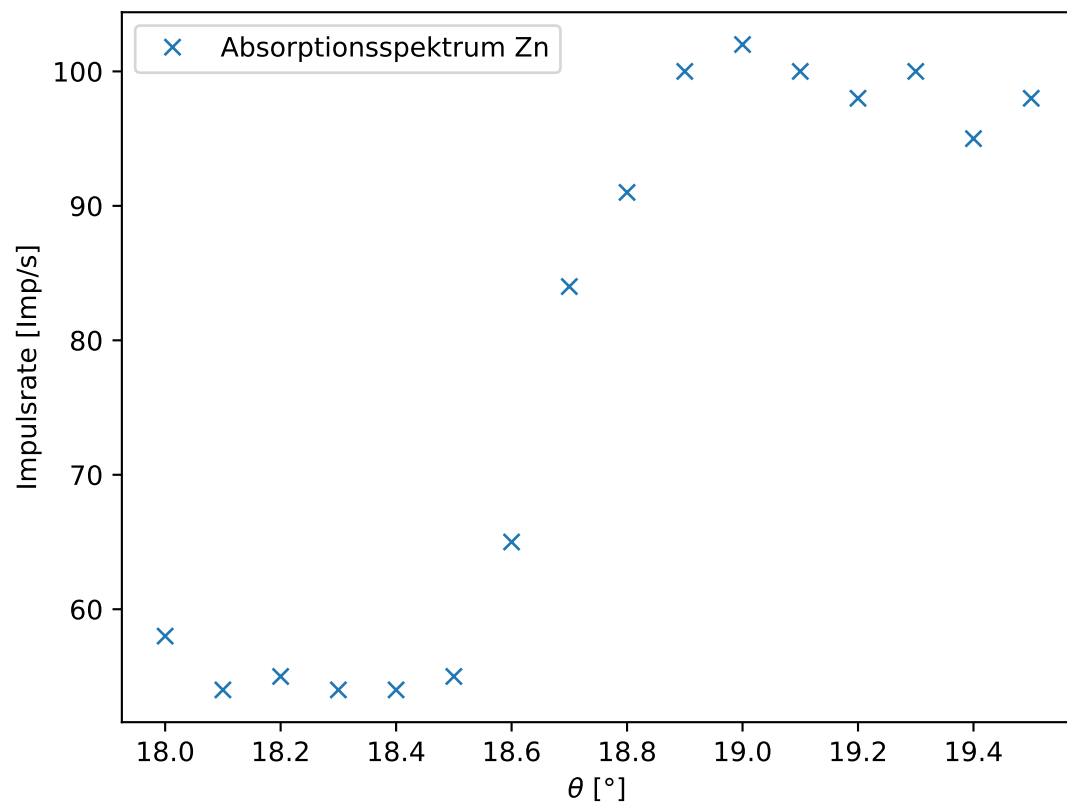


Abbildung 9: In der Abbildung ist das Absorptionsspektrum des Zink-Absorbers aufgetragen.

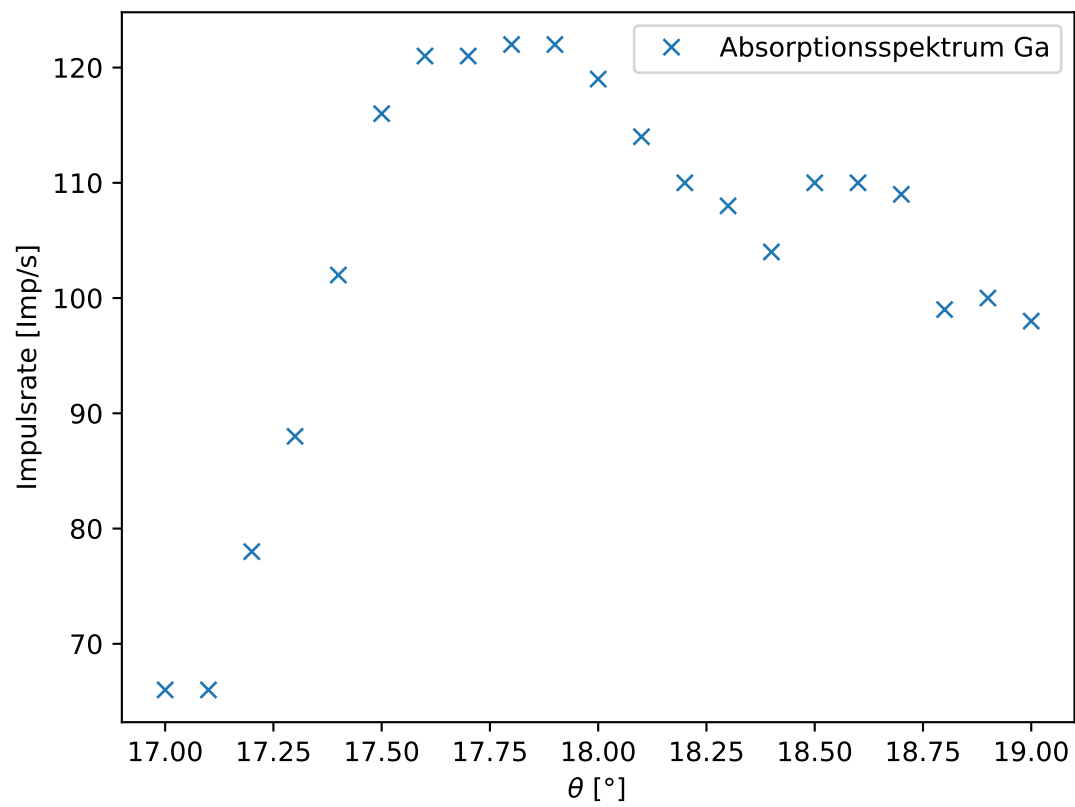


Abbildung 10: In der Abbildung ist das Absorptionsspektrum des Gallium-Absorbers aufgetragen.

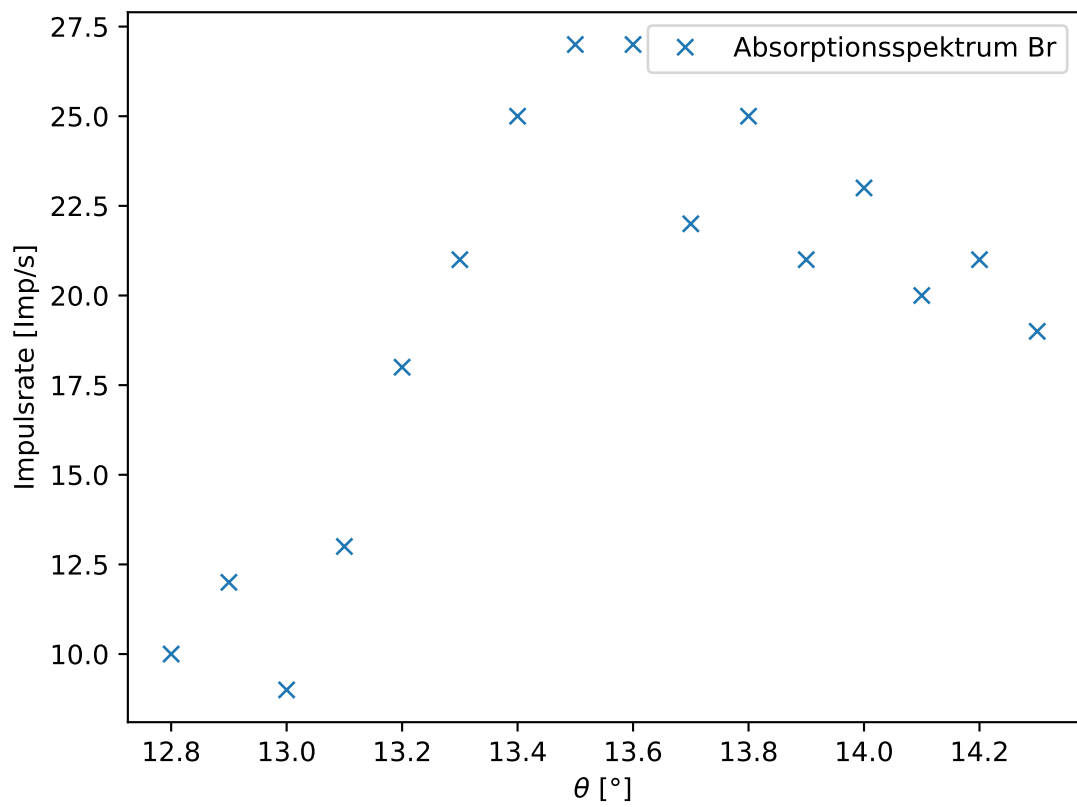


Abbildung 11: In der Abbildung ist das Absorptionsspektrum des Brom-Absorbers aufgetragen.

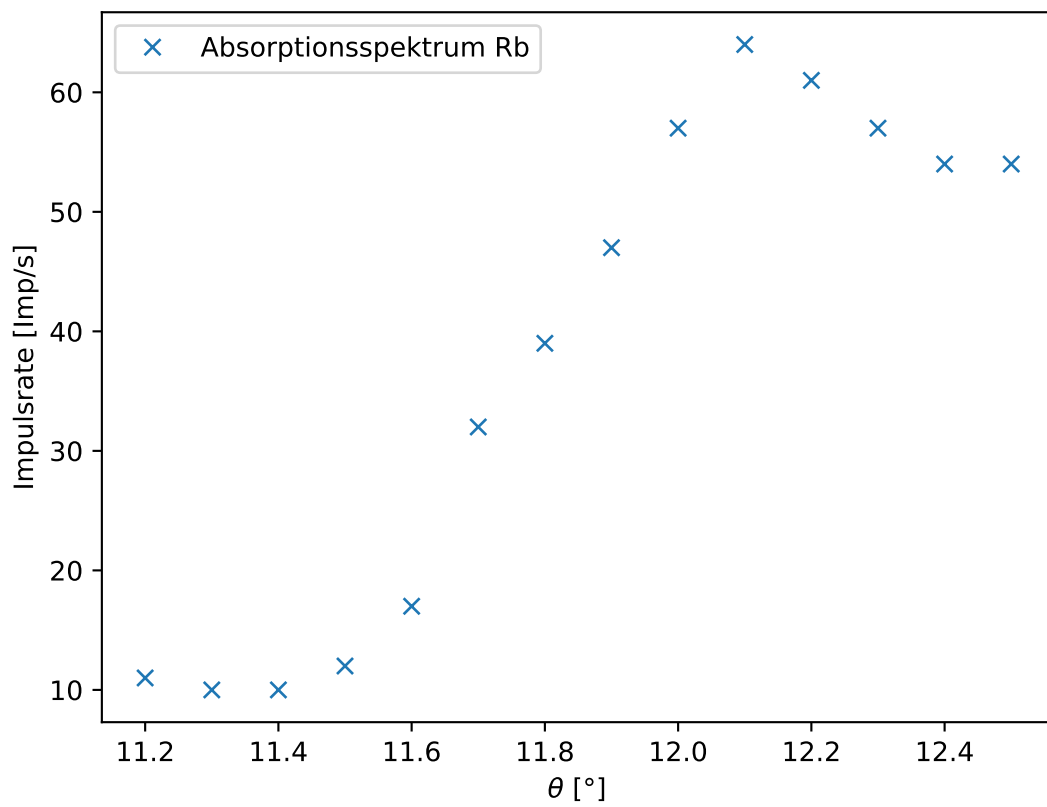


Abbildung 12: In der Abbildung ist das Absorptionsspektrum des Rubidium-Absorbers aufgetragen.

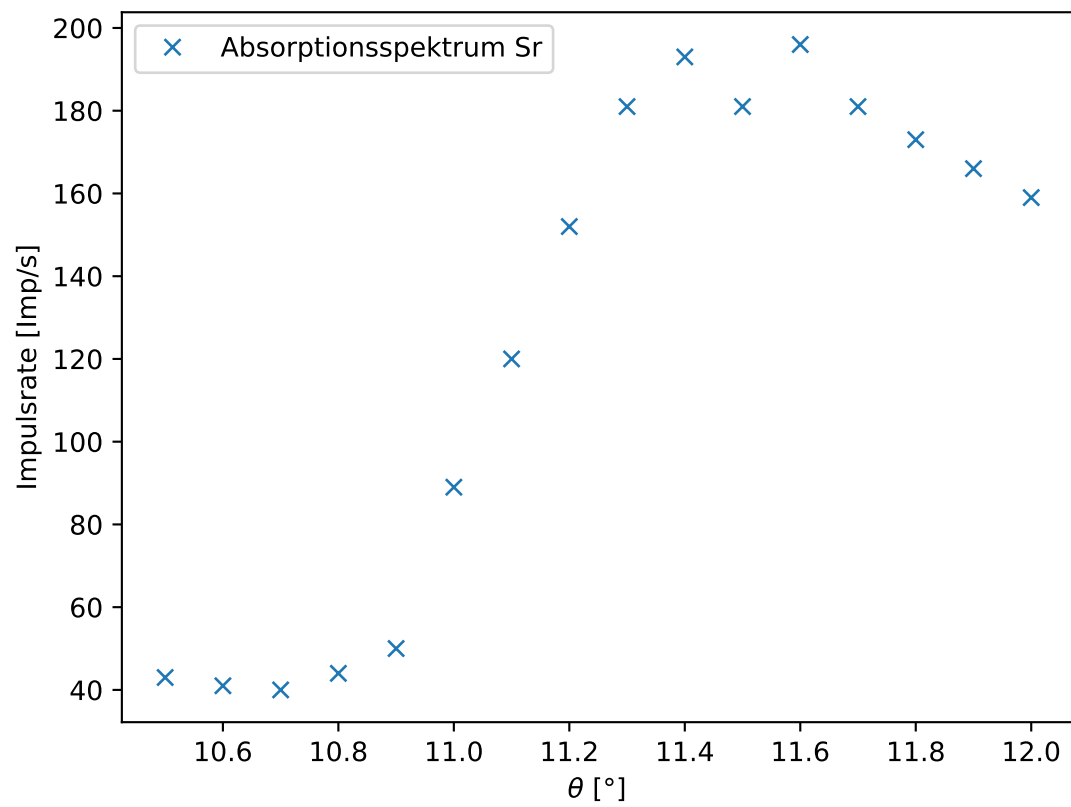


Abbildung 13: In der Abbildung ist das Absorptionsspektrum des Strontium-Absorbers aufgetragen.

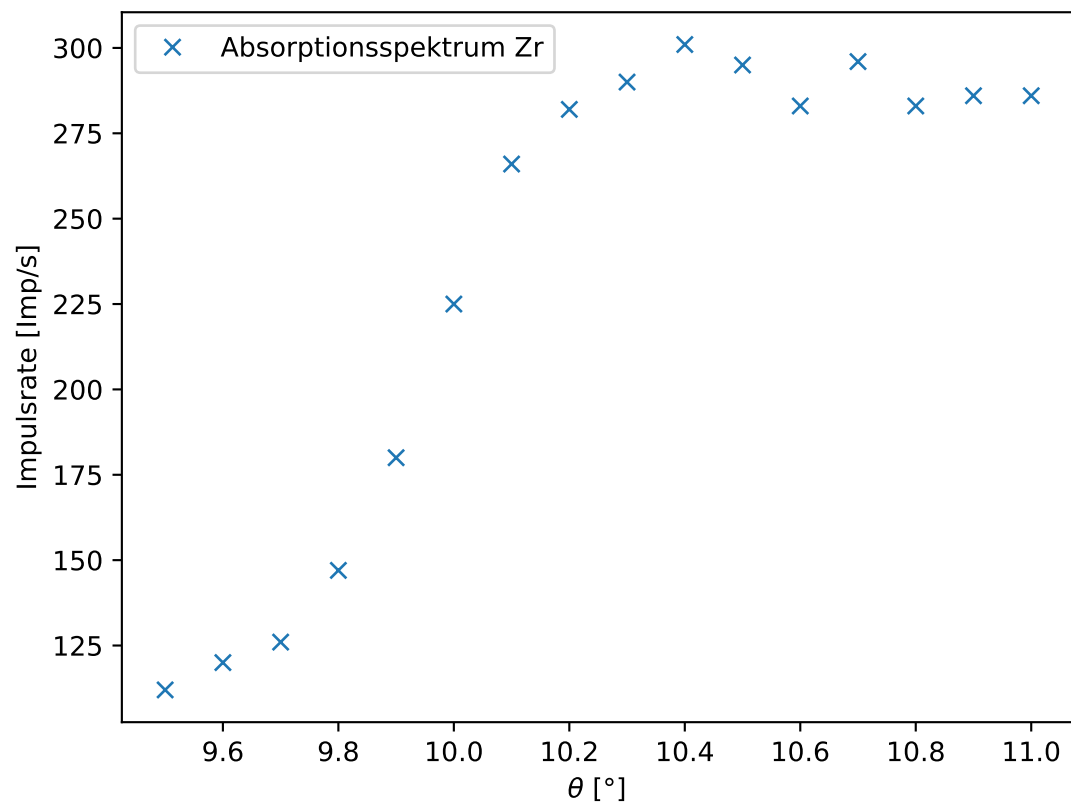


Abbildung 14: In der Abbildung ist das Absorptionsspektrum des Zirkonium-Absorbers aufgetragen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] *Versuchsanleitung V602 - Röntgenemission und -absorption*. TU Dortmund, 2020
- [2] National Institute of Standards and Technology: *Fundamental Physical Constants*
17.Mai.2020 <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?r>
- [3] *Wellenlängen und Anregungsenergien von K- und L- Absorptionskanten* 18.Mai.2020
<https://wissen.science-and-fun.de/tabellen-fur-spektroskopiker/wellenlaengen-und-anregun>