

V602 Röntgenemission und Absorption

Connor Magnus Böckmann

email: connormagnus.boeckmann@tu-dortmund.de

Tim Theissel

email: tim.theissel@tu-dortmund.de

1. Juli 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	3
1.1	Emission von Roentgenstrahlung	3
1.1.1	Bremsspektrum	3
1.1.2	Charakteristische Strahlung	3
1.2	Absorption	3
2	Aufbau	4
3	Durchfuehrung	5
3.1	Ueberpruefung der Bragg-Bedingung	5
3.2	Analyse des Emissionsspektrums	5
3.3	Analyse der Absorptionsspektren	5
4	Auswertung	5
4.1	Bragg-Bedingung	5
4.2	Emissionsspektrum der Kupfer-Röntgenröhre	6
4.3	Analyse der Absorptionsspektren	8
4.3.1	Brom	9
4.3.2	Gallium	9
4.3.3	Rubidium	12
4.3.4	Strontium	12
4.3.5	Zink	15
4.3.6	Zirkonium	15
4.4	Rydbergenergie	17
5	Diskussion	20
5.1	Bragg-Bedingung	20
5.2	Emissionspektrum der Kupfer Röntgenröhre	20
5.3	Abschirmkonstanten	20
5.4	Rydbergenergie	21
6	Messwerte	23
	Literatur	28

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Emission von Roentgenstrahlung

Zur Erzeugung von Roentgenstrahlung wird in einer evakuierten Roehre per gluehelektrischem Effekt aus einem Gluehdraht Elektronen emittiert und durch ein E-Feld zur Anode hin beschleunigt. Beim Eintreten der Elektronen in das Anodenmaterial wird Roentgenstrahlung frei in Form des kontinuierlichen Bremsspektrums und der charakteristischen Strahlung des Anodenmaterials.

1.1.1 Bremsspektrum

Das Bremsspektrum resultiert aus der Abbremsung des Elektrons beim Eintritt in das Anodenmaterial. Die Energie der ausgesendeten Roentgenquants entspricht exakt dem Energieverlust des Elektrons durch die Abbremsung. Dabei entsteht ein kontinuierliches Spektrum, da das Elektron sowohl einen Teil seiner Energie, als auch die gesamte kinetische Energie abgeben kann. Naturlicherweise entsteht der Roentgenquant mit der groessten Energie, also der geringsten Wellenlaenge $\lambda_{min} = \frac{hc}{e_0 U}$, bei vollstaendiger Abbremsung des Elektrons. Dabei wird die gesamte kinetische Energie $E_{kin} = e_0 U$ in Strahlungsenergie $E = h\nu$ umgewandelt.

1.1.2 Charakteristische Strahlung

Durch das Auftreffen der Elektronen kann das Anodenmaterial auch ionisiert werden. Dabei werden die Schalenelektronen angeregt und auf eine hoehere Schale gehoben, so dass in einer niedrigeren Schale eine Leerstelle entsteht. Beim Zurueckfallen auf eine niedrigere Schale wird ein Roentgenquant frei, welcher exakt der Energiedifferenz zwischen dem oberen und unteren Niveau entspricht, also $h\nu = E_m - E_n$. Dementsprechend besteht das charakteristische Spektrum aus scharfen Linien. Dieses Linienspektrum ist charakteristisch fuer das Anodenmaterial. Bezeichnet werden diese Linien als $K_\alpha, K_\beta, L_\alpha, \dots$, wobei der Buchstabe die Schale bezeichnet, auf der der Uebergang endet und der griechische Buchstabe anzeigt, woher das Elektron stammt. Ausserdem ist zu beachten, dass die Huellenelektronen in einem Mehrelektronenatom die Kernladung abschirmen. Dieser Umstand reduziert die Coulomb-Anziehung beträchtlich, was die Bindungsenergie E_n auf der n-ten Schale zu $E_n = -R_\infty z_{eff}^2 \cdot \frac{1}{n^2}$ ergibt. Dabei wird die effektive Kernladung $z_{eff} = z - \sigma$ beruecksichtigt mit der Abschirmkonstante σ und der Rydbergenergie $R_\infty = 13.6eV$. Die Abschirmkonstante ist fuer jedes Elektron verschieden.

1.2 Absorption

Die Absorption von Roentgenstrahlung unter 1 MeV wird dominiert vom Comptoneffekt und dem Photoeffekt. Die Absorption nimmt mit hoeherer Energie ab, steigt jedoch sprunghaft an, wenn die Energie der Roentgenquanten grade groesser als die Bindungsenergie einer naechsten Schale ist. Die Lage dieser Absorptionskanten $h\nu_{abs} = E_n - E_\infty$ entspricht nahezu genau der Bindungsenergien der Elektronen. Diese Kanten werden

ebenso als K-, L-, M-,...Absorptionskante bezeichnet. Diese Kanten werden aufgrund der Feinstruktur noch in kleinere Teile unterteilt, etwa die L-Kanten (L_I, L_{II}, L_{III}). Dabei muss zur Berechnung der Bindungsenergie $E_{n,j}$ die Sommerfeldsche Feinstrukturformel benutzt werden. Sie ergibt sich zu

$$E_{n,j} = -R_{\infty}(z_{eff,1}^2 \cdot \frac{1}{n^2} + \alpha^2 z_{eff,2}^4 \cdot \frac{1}{n^3}(\frac{1}{j + \frac{1}{2}} - \frac{3}{4n})).$$

Dabei ist R_{∞} die Rydbergenergie, α die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante, z_{eff} die effektive Kernladungszahl, j der Gesamtdrehimpuls und n die Hauptquantenzahl. Die Abschirmkonstante σ_K ergibt sich fuer die K-Schale ($n=1$) zu $\sigma_K = Z - \sqrt{\frac{E_K}{R_{\infty}} - \frac{\alpha^2 Z^4}{4}}$. Durch die Unmoeglichkeit der Aufloesung der L_I - und L_{II} -Kante in diesem Versuch vereinfacht sich die Berechnung der Abschirmkonstante fuer σ_L zu $\sigma_L = Z - \left(\frac{4}{\alpha} \sqrt{\frac{\Delta E_L}{R_{\infty}}} - \frac{5\Delta E_L}{R_{\infty}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{19\alpha^2 \cdot \Delta E_L}{32R_{\infty}} \right)^{\frac{1}{2}}$. Die Energie E der resultierenden Roentgenquanten kann ueber die Braggsche Reflexion untersucht werden. Dazu faellt der Roentgenquant auf ein dreidimensionales Gitter (z.B. ein LiF-Kristall). An jeder Gitterebene wird der Quant gebeugt. Sie interferieren miteinander, wobei sie konstruktiv interferieren beim Glanzwinkel θ . Die Braggsche Bedingung lautet $2d\sin\theta = n\lambda$ mit der Gitterkonstante d , der Wellenlaenge λ und der Beugungsordnung n .

2 Aufbau

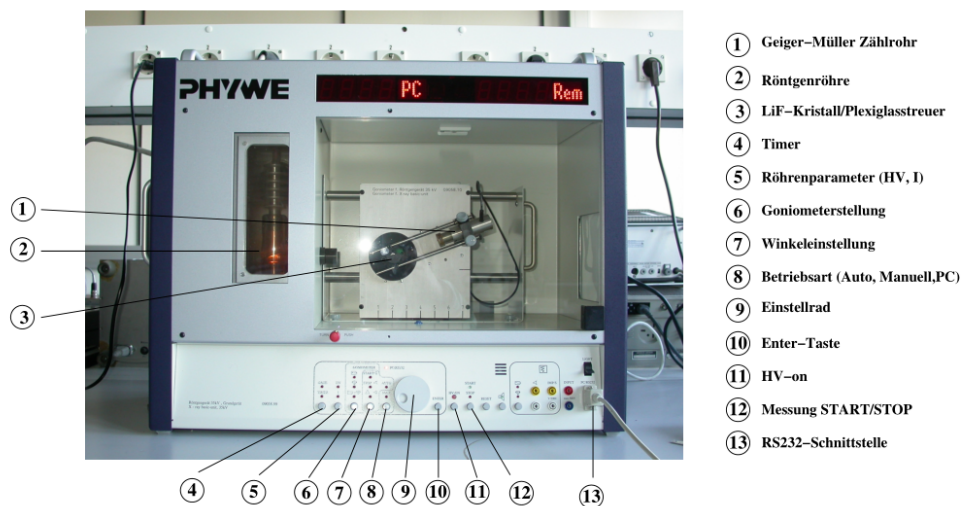


Abbildung 1: Der beschriftete Aufbau des Versuchs
Aus: [4]

Im Wesentlichen besteht der Versuch aus einer Kupferroentgenroehre, einem LiF-Kristall und einem Geiger-Mueller-Zaehlrohr. Bedient werden kann das Geraet mit einem Computer oder manuell. In diesem Fall ist die Auslesung der Daten in Gaenze mit dem Rechner zu empfehlen. Dazu wird im Programm "measure" das Roentgengerat angewaehlt. Die Messart muss Auf Spektren gestellt werden. Am Geraet selber soll die Beschleunigungsspannung $U_B = 35kV$ sein mit einem Emissionsstrom von $I = 1mA$. Der Drehmodus, der abgetastete Kristallwinkel sowie die Integrationszeit koennen im Programm ausgewaehlt werden.

3 Durchfuehrung

3.1 Ueberpruefung der Bragg-Bedingung

Die Bragg-Bedingung wurde ueberprueft, indem der Kristall auf einen Winkel von $\theta = 14^\circ$ eingestellt wurde und mit dem Geiger-Mueller-Zaehlrohr in Schritten von $\Delta\theta_{GM} = 0.1^\circ$ in einem Winkelbereich von 26° bis 30° abgefahren wurde. Die Integrationszeit betraegt $t = 5s$.

3.2 Analyse des Emissionsspektrums

Die Messung des Emissionsspektrums erfolgt mit einer Integrationszeit von $\Delta t = 10s$ und einer Schrittweite von $\Delta\theta = 0.1^\circ$. Daher kann auch kein Detailspektrum der K_α - bzw. K_β -Linie aufgezeichnet werden. Aufgezeichnet werden die Daten mit einer Computer zur spaeteren Benutzung. Daraus wird schliesslich auch die Halbwertsbreite, das Aufloesungsvermoegen $A = \frac{E_K}{\Delta E_{FWHM}}$ und die Abschirmkonstanten berechnet.

3.3 Analyse der Absorptionsspektren

Zur Bestimmung der Absorptionsspektren werden zwischen den LiF-Kristall und das Geiger-Mueller-Zaehlrohr verschiedene Absorber eingesetzt und mit einer Integrationszeit von $t = 20s$ das Spektrum aufgenommen. Daraus wird die Absorptionsenergie E_K anhand der Lage der Absorptionskante bestimmt. Ausserdem werden das Intensitaetsmaximum I_K^{max} und das Intensitaetsminimum I_K^{min} der K-Kante abgelesen. An der Mitte der Kante wird schliesslich der Winkel θ abgelesen und daraus mit Hilfe der Braggschen Bedingung die Absorptionsenergiem $E_{K,abs}$ berechnet. Aus diesen berechneten Absorptionsenergien lassen sich dann die Abschirmkonstanten bestimmen. Schliesslich soll mit Hilfe der Gleichung $E_K = Rh(z - \sigma)^2$ die Rydbergfrequenz R und die Rydbergenergie $R_\infty = h \cdot R$ berechnet werden.

4 Auswertung

4.1 Bragg-Bedingung

Als erstes wird die Bragg-Bedingung ueberprueft. Dazu wird der Kristall auf einen Winkel von $\theta = 14^\circ$ eingestellt. Anschliessend werden mit dem Geiger-Mueller-Zaehlrohr fuer ver-

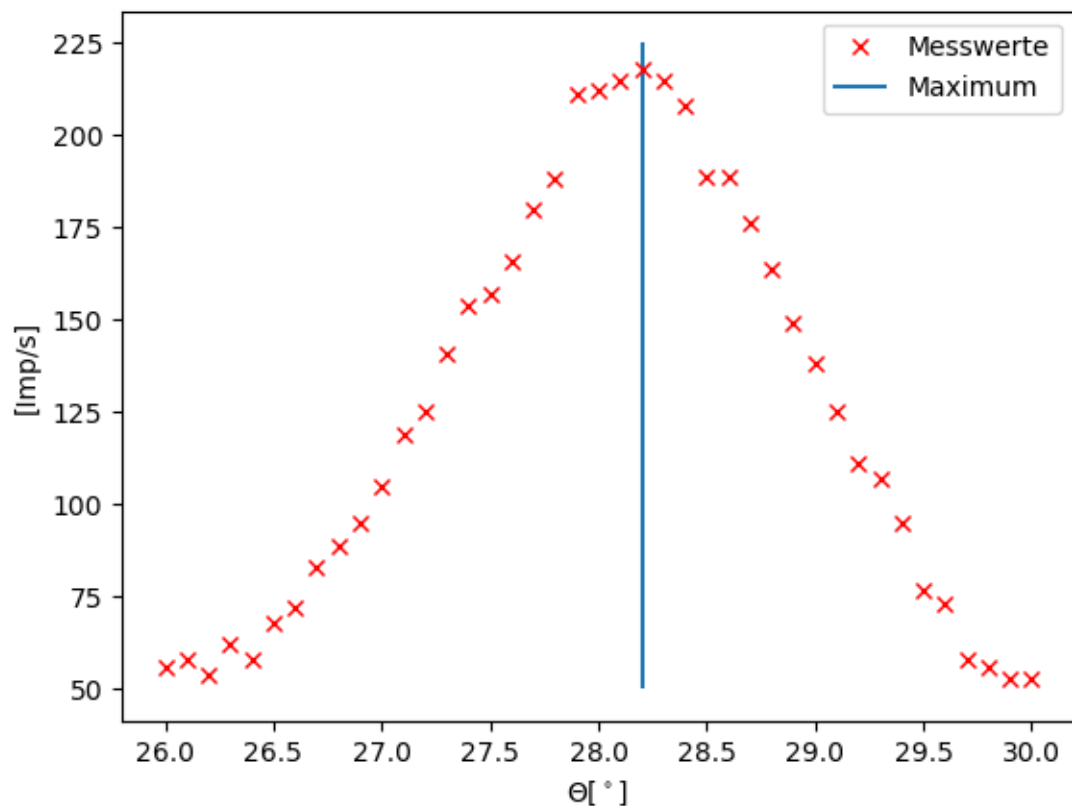


Abbildung 2: Graphische Darstellung der gemessenen Impulse N bei verschiedenen Winkeln θ .

schiedene Winkel jeweils 5s die eingehenden Impulse gemessen. Dies geschieht in einem Winkelbereich von $\theta = 26^\circ - \theta = 30^\circ$. Die aufgenommenen Messwerte sind in Tabelle 2. Diese werden dann graphisch dargestellt und die Lage des Bragg-Peaks wurde ermittelt und markiert.

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist liegt das gemessene Bragg-Peak bei $\theta = 28.2^\circ$. Mit dem Reflexionsgesetz ergibt sich der theoretische Sollwinkel von $\theta = 28^\circ$.

4.2 Emissionsspektrum der Kupfer-Röntgenröhre

Die Messwerte für das Emissionsspektrum der Kupfer-Röntgenröhre sind in Tabelle 3. Diese wurden anschließend graphisch dargestellt in Abbildung 3. Darin sind auch schon die K_α - und die K_β -Linie, sowie deren Halbwertsbreiten eingetragen. Die Winkel der K-Linien betragen

$$\theta_{\alpha} = (22.5 \pm 0.2)^{\circ}$$

$$\theta_{\beta} = (20.2 \pm 0.2)^{\circ}.$$

Aus diesen Winkeln können mithilfe der Bragg-schen Bedingung Wellenlängen berechnet werden, die wiederum mit $E = \frac{hc}{\lambda_e}$ in Energien in Elektronenvolt umgerechnet werden können. Die entstehenden Energien sind

$$E_{\alpha} = (8.04 \pm 0.07) \times 10^3 \text{ eV}$$

$$E_{\beta} = (8.91 \pm 0.08) \times 10^3 \text{ eV}.$$

Ebenso sind in dem Diagramm die beiden Halbwertsbreiten zu sehen. Die Halbwertsbreite des K_{α} Peaks wird durch die Winkel

$$\theta_{\alpha, \text{ links}} = (22.4 \pm 0.2)^{\circ}$$

$$\theta_{\alpha, \text{ rechts}} = (22.9 \pm 0.2)^{\circ}$$

begrenzt. Für das K_{β} -Peak sind die begrenzenden Winkel

$$\theta_{\beta, \text{ links}} = (20.2 \pm 0.2)^{\circ}$$

$$\theta_{\beta, \text{ rechts}} = (20.6 \pm 0.2)^{\circ}$$

Mit den Halbwertsbreiten können nun analog Energien bestimmt werden. Die dabei entstehenden Energien sind

$$\Delta E_{\text{FWHM}, \alpha} = (1.7 \pm 0.9) \times 10^2 \text{ eV}$$

$$\Delta E_{\text{FWHM}, \beta} = (1.7 \pm 1.2) \times 10^2 \text{ eV}.$$

Daraus lässt sich nun das Auflösungsvermögen $A = \frac{E_K}{\Delta E_{\text{FWHM}}}$ berechnen zu

$$A_{K_{\alpha}} = 48 \pm 27$$

$$A_{K_{\beta}} = 50 \pm 40.$$

Mit der Absorptionsenergie E_{abs} [1] und den zuvor bestimmten Energien können nun die Absorptionskoeffizienten bestimmt werden. Die Absorptionskoeffizienten lauten

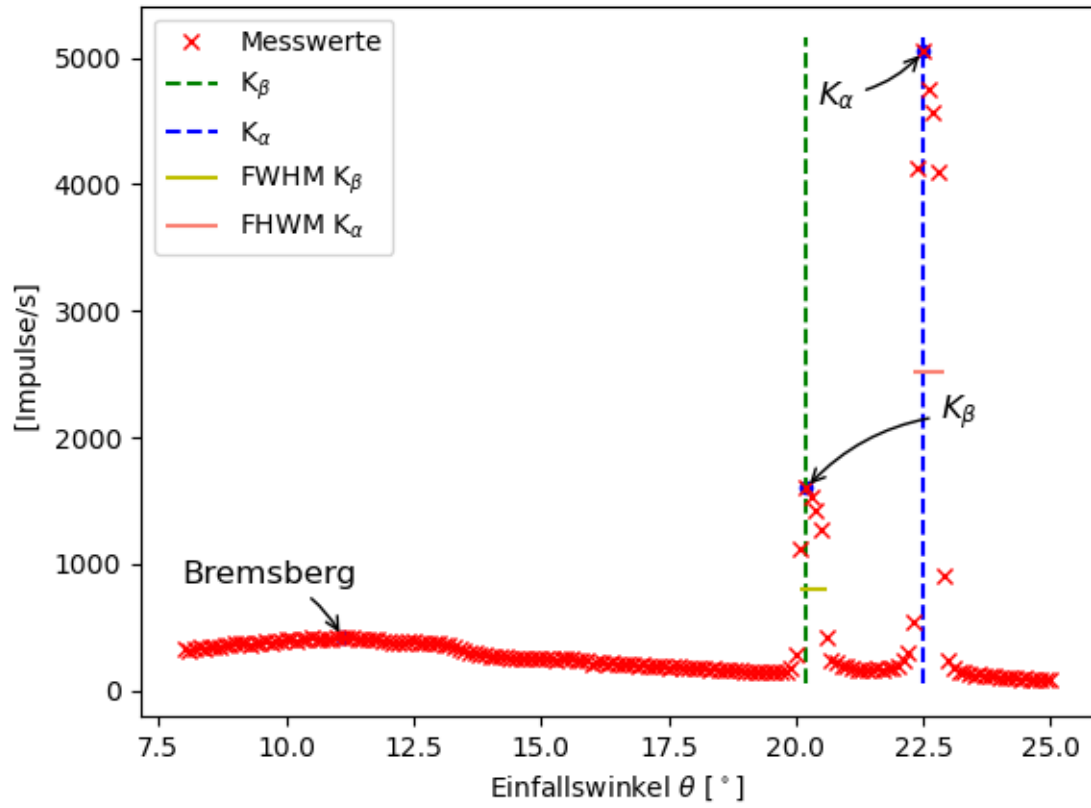


Abbildung 3: Emissionsspektrum der Kupfer-Röntgenröhre.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= z - \sqrt{\frac{E_{\text{abs}}}{R_\infty}} = 3.30 \\ \sigma_2 &= z - 2 \cdot \sqrt{\frac{E_{\text{abs}} - E_\alpha}{R_\infty}} = 12.4 \pm 0.6 \\ \sigma_3 &= z - 3 \cdot \sqrt{\frac{E_{\text{abs}} - E_\beta}{R_\infty}} = 22 \pm 4\end{aligned}$$

4.3 Analyse der Absorptionsspektren

Im folgenden wird für verschiedene Materialien die Absorptionsenergie bestimmt. Dafür wird zunächst die Intensität der Mitte der Kante $I_K = I_K^{\text{min}} + \frac{I_K^{\text{max}} - I_K^{\text{min}}}{2}$ bestimmt.

Anschließend wird zwischen den beiden Punkten, die dieser Mitte am nächsten sind eine Gerade gezogen. Damit kann dann der Winkel bestimmt werden bei dem die gesuchte Intensität erreicht ist. Mit der Geradengleichung $I = a \cdot \theta + b$ ergibt sich der gesuchte Winkel zu $\theta_K = \frac{I_K - b}{a}$.

Dann wird dieser Winkel mit der zuvor beschriebenen Vorgehensweise in die Energie umgerechnet um dann abschließend die Abschirmkonstante

$$\sigma_K = z - \sqrt{\frac{E_K}{R_\infty} - \frac{\alpha^2 \cdot Z^4}{4}}$$

zu bestimmen.

4.3.1 Brom

Für das Absorptionsspektrum von Brom sind die Messdaten in Tabelle 4. Der dazugehörige plot ist Abbildung 4.

Das Maximum, das Minimum und die daraus resultierende Mitte der Kante ergeben sich hier zu

$$\begin{aligned} I_{\min} &= 9 \text{ Imp/s} \\ I_{\max} &= 27 \text{ Imp/s} \\ I_K &= 18 \text{ Imp/s.} \end{aligned}$$

Mit den Parametern der durch die beiden Punkte gelegten Gerade

$$\begin{aligned} a &= 40 \text{ Imp/s}^\circ \\ b &= -511 \text{ Imp/s} \end{aligned}$$

ergibt sich $\theta = 13.225^\circ$. Damit lassen sich nun die gesuchten Werte für die Absorptionsenergie und die Abschirmkonstante berechnen zu

$$\begin{aligned} E_{\text{br}} &= 13\,454.48 \text{ eV} \\ \sigma_{\text{br}} &= 3.866. \end{aligned}$$

4.3.2 Gallium

Die Messwerte der Messreihe mit dem Gallium- Absorber sind in Tabelle 5 und Abbildung 5.

Diesmal sind die benötigten Intensitäten

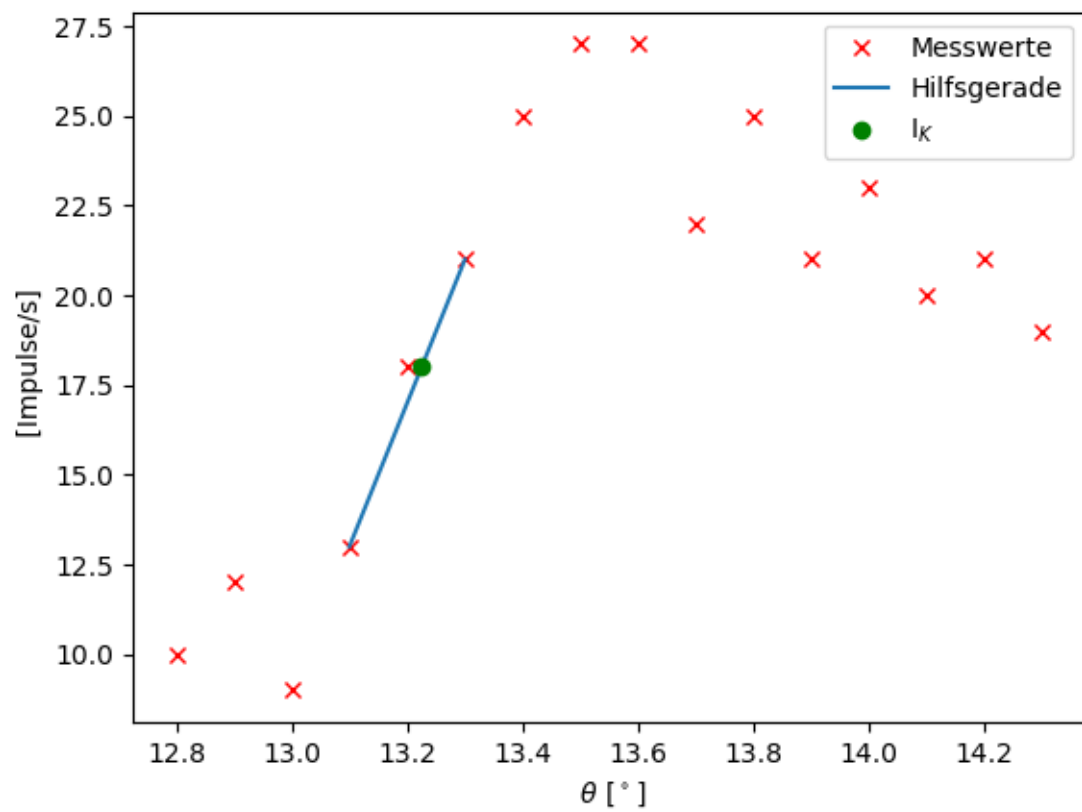


Abbildung 4: Absorptionsspektrum des Brom Absorbers.

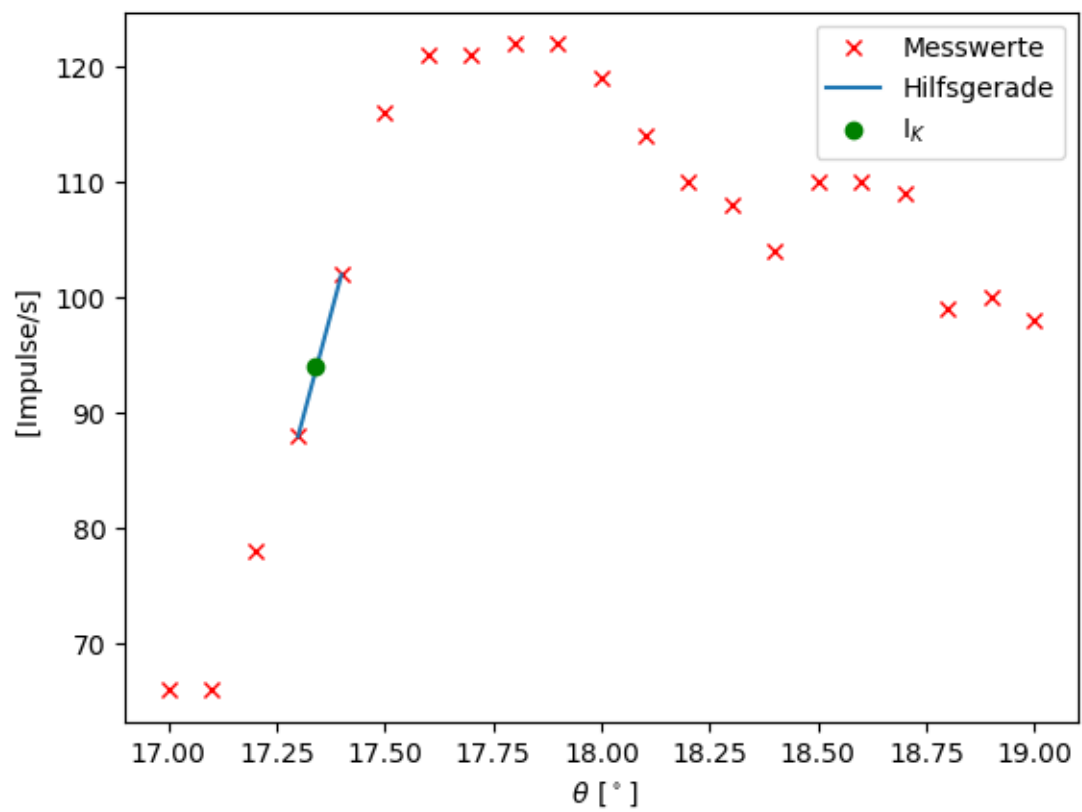


Abbildung 5: Absorptionsspektrum des Gallium Absorbers.

$$\begin{aligned}
I_{\min} &= 66 \text{ Imp/s} \\
I_{\max} &= 122 \text{ Imp/s} \\
I_K &= 94 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

Die bestimmten Parameter sind

$$\begin{aligned}
a &= 140 \text{ Imp/s}^\circ \\
b &= -2334 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

Daraus lassen sich nun $\theta = 17.34^\circ$, $E_{\text{Ga}} = 10325.97 \text{ eV}$ und $\sigma_{\text{Ga}} = 3.669$

4.3.3 Rubidium

Das Diagramm für den Rubidium-Absorber ist in Abbildung 6. Die Messwerte dazu befinden sich in Tabelle 6. Die Intensitäten haben bei diesem Absorber die Werte

$$\begin{aligned}
I_{\min} &= 10 \text{ Imp/s} \\
I_{\max} &= 64 \text{ Imp/s} \\
I_K &= 37 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

Mit den Parametern

$$\begin{aligned}
a &= 70 \text{ Imp/s}^\circ \\
b &= -787 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

lassen sich die gesuchten Werte

$$\begin{aligned}
\theta &= 11.77^\circ \\
E_{\text{rb}} &= 15\,087.94 \text{ eV} \\
\sigma_{\text{rb}} &= 4.069.
\end{aligned}$$

bestimmen.

4.3.4 Strontium

Die Messwerte der Messreihe mit dem Strontium- Absorber sind in Tabelle 7 und Abbildung 7.

Diesmal sind die benötigten Intensitäten

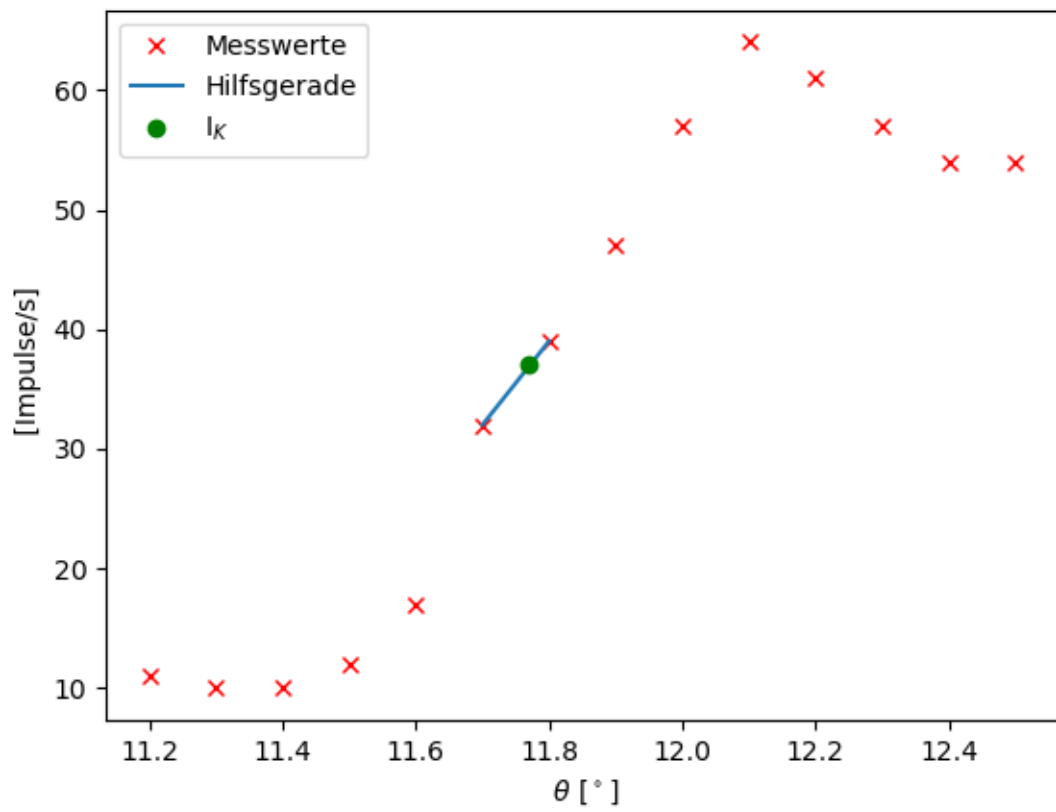


Abbildung 6: Absorptionsspektrum des Rubidium Absorbers.

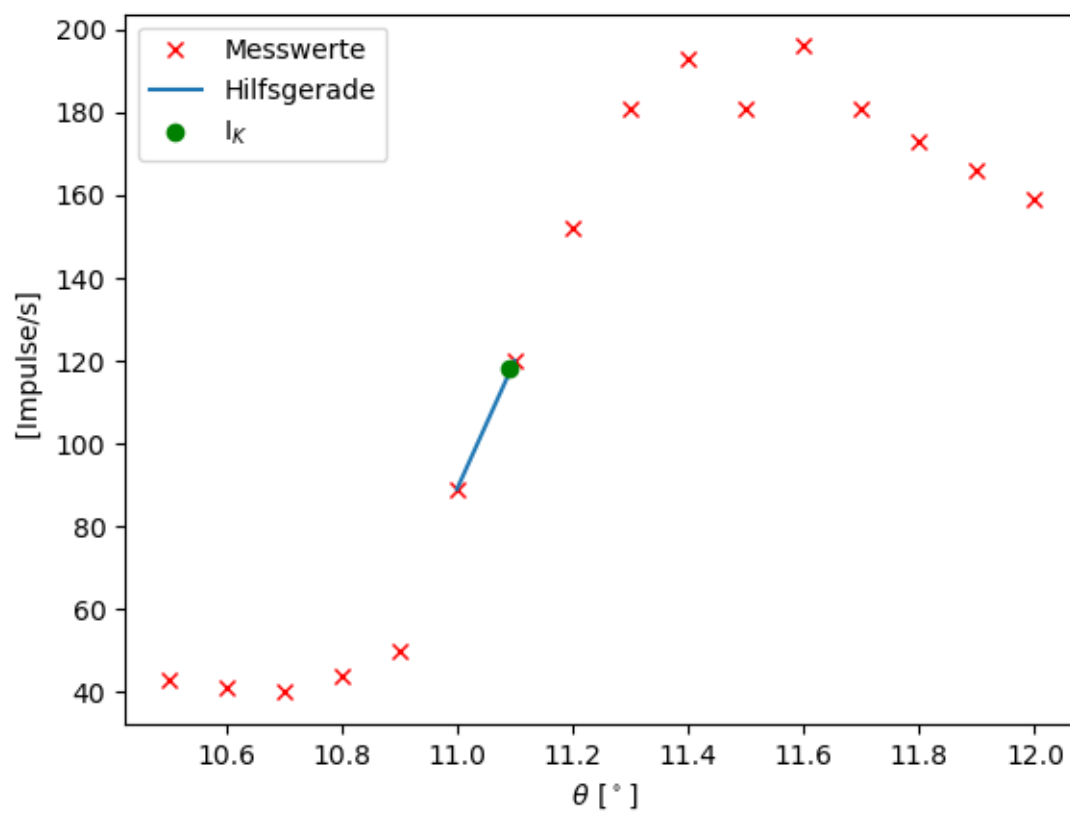


Abbildung 7: Absorptionsspektrum des Gallium Absorbers.

$$\begin{aligned}
I_{\min} &= 40 \text{ Imp/s} \\
I_{\max} &= 196 \text{ Imp/s} \\
I_K &= 118 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

Die bestimmten Parameter sind

$$\begin{aligned}
a &= 310 \text{ Imp/s}^\circ \\
b &= -3321 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

Daraus lassen sich nun $\theta = 11.09^\circ$, $E_{\text{Ga}} = 15997.27 \text{ eV}$ und $\sigma_{\text{Ga}} = 4.11$

4.3.5 Zink

Das Diagramm für den Zink-Absorber ist in Abbildung 8. Die Messwerte dazu befinden sich in Tabelle 8. Die Intensitäten haben bei diesem Absorber die Werte

$$\begin{aligned}
I_{\min} &= 54 \text{ Imp/s} \\
I_{\max} &= 102 \text{ Imp/s} \\
I_K &= 78 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

Mit den Parametern

$$\begin{aligned}
a &= 190 \text{ Imp/s}^\circ \\
b &= -3469 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

lassen sich die gesuchten Werte

$$\begin{aligned}
\theta &= 18.67^\circ \\
E_{\text{zn}} &= 9616.20 \text{ eV} \\
\sigma_{\text{zn}} &= 3.613
\end{aligned}$$

berechnen.

4.3.6 Zirkonium

Für das Absorptionsspektrum von Zirkonium sind die Messdaten in Tabelle ???. Der dazugehörige plot ist Abbildung 9.

Das Maximum, das Minimum und die daraus resultierende Mitte der Kante ergeben sich hier zu

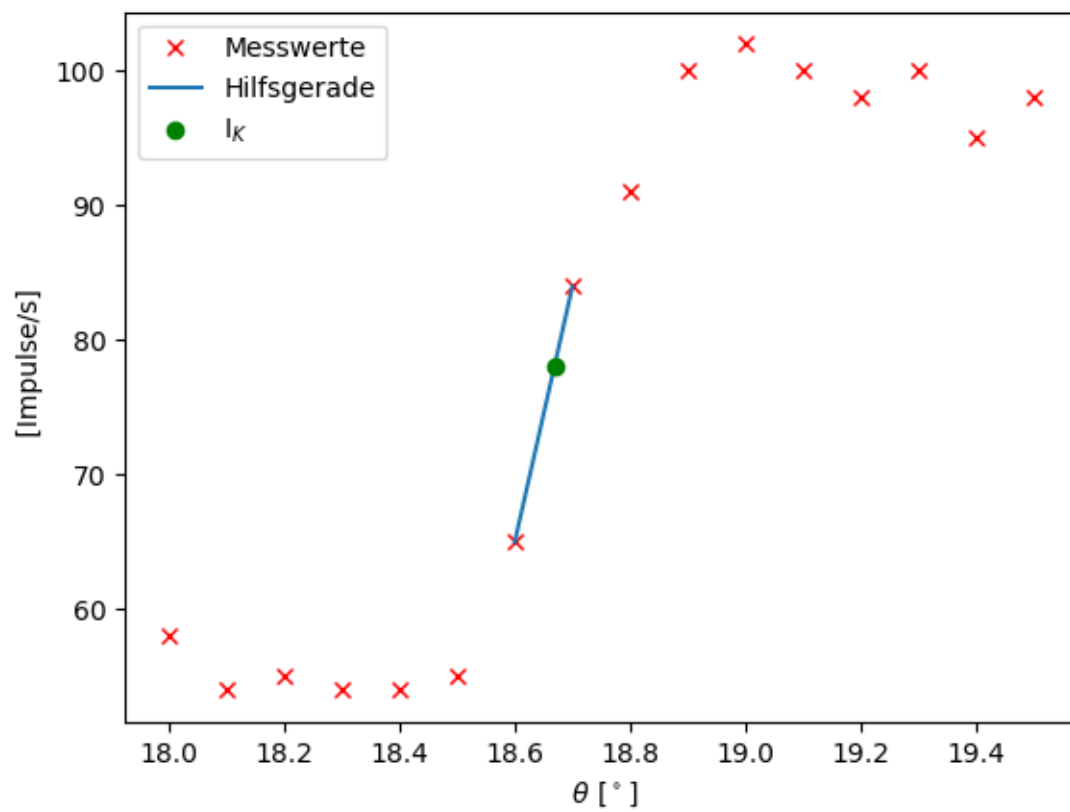


Abbildung 8: Absorptionsspektrum des Zink Absorbers.

$$\begin{aligned}
I_{\min} &= 40 \text{ Imp/s} \\
I_{\max} &= 196 \text{ Imp/s} \\
I_K &= 118 \text{ Imp/s}.
\end{aligned}$$

Mit den Parametern der durch die beiden Punkte gelegten Gerade

$$\begin{aligned}
a &= 450 \text{ Imp/s}^\circ \\
b &= -4275 \text{ Imp/s}
\end{aligned}$$

ergibt sich $\theta = 9.96^\circ$. Damit lassen sich nun die gesuchten Werte für die Absorptionsenergie und die Abschirmkonstante berechnen zu

$$\begin{aligned}
E_{\text{Zr}} &= 17\,798.26 \text{ eV} \\
\sigma_{\text{Zr}} &= 4.298.
\end{aligned}$$

4.4 Rydbergenergie

Für die Bestimmung der Rydbergenergie wurde das Diagramm in Abbildung 10 erstellt. In der Abbildung wurde die Ordnungszahl gegen die Wurzel der Absorptionsenergie des jeweiligen Elements aufgetragen. Außerdem wurde eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. Die in der Abbildung zu sehende Ausgleichsgerade hat die Parameter

$$\begin{aligned}
a &= 0.283 \pm 0.001 \frac{1}{\sqrt{\text{eV}}} \\
b &= 2.277 \pm 0.121.
\end{aligned}$$

Die Rydberenergie lässt sich mit dem Mosleyschen-Gesetz

$$R_\infty \cdot h = \frac{1}{a^2}$$

berechnen. Diese Rechnung liefert

$$R_\infty = (12.5 \pm 0.9) \text{ eV}.$$

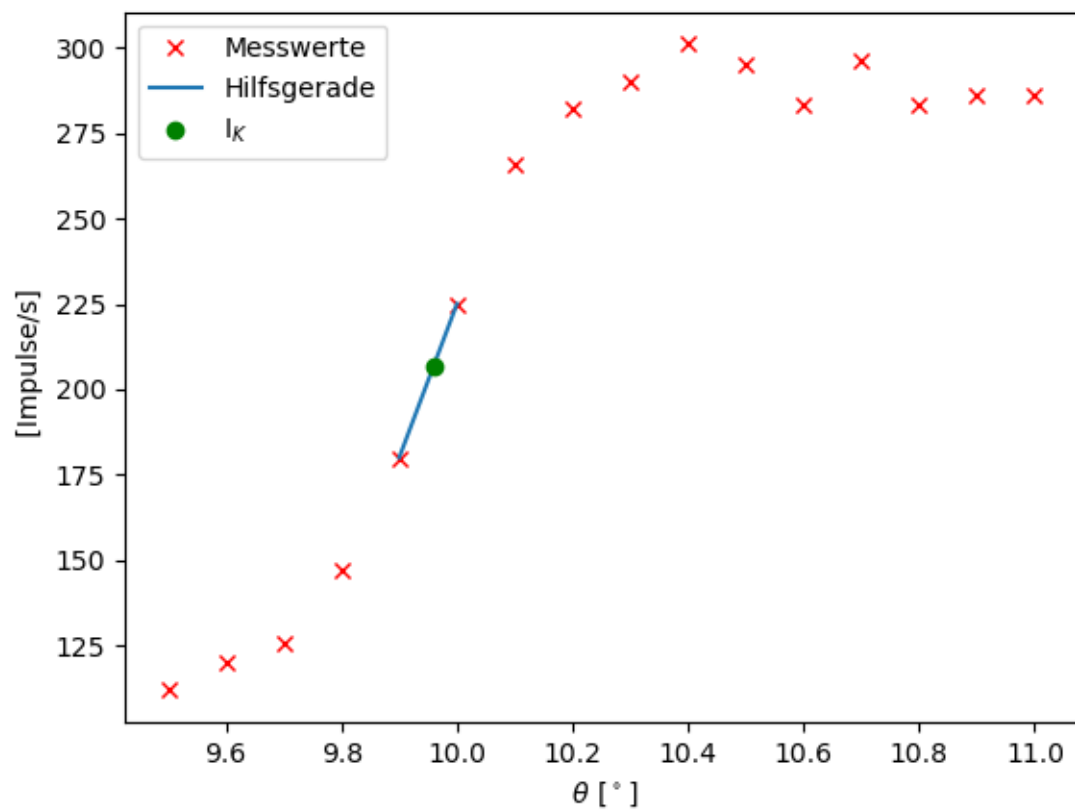


Abbildung 9: Absorptionsspektrum des Zirkonium Absorbers.

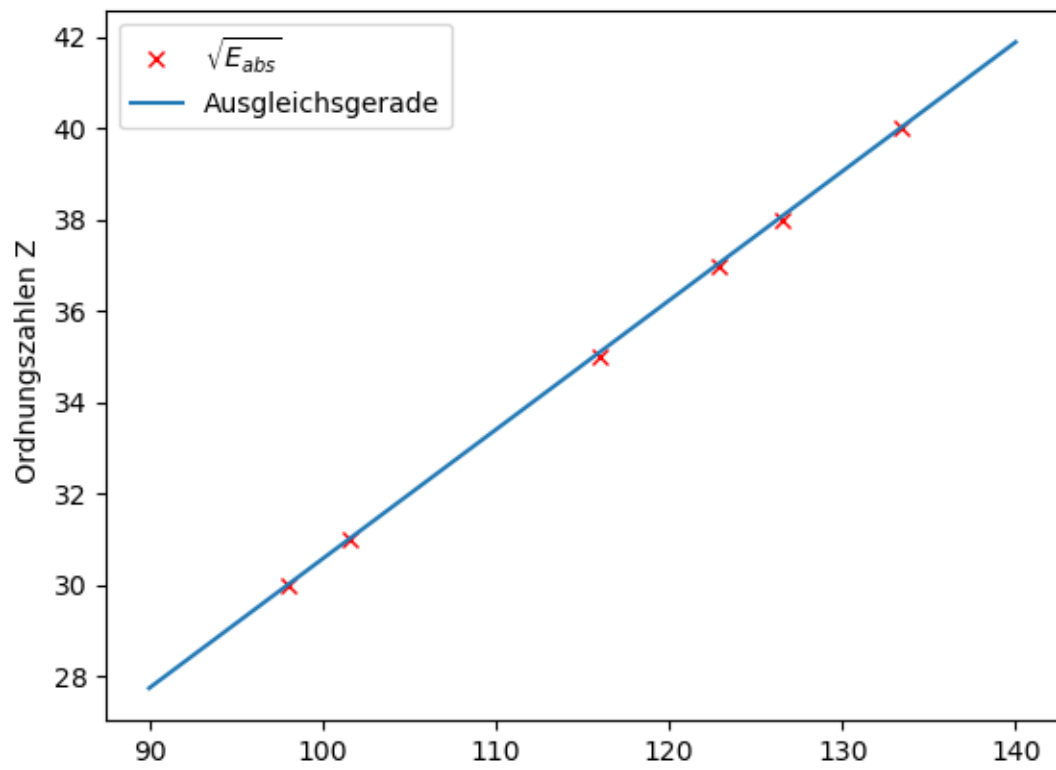


Abbildung 10: Plot zur Bestimmung der Rydberenergie.

5 Diskussion

5.1 Bragg-Bedingung

In diesem Experiment sollte die Bragg-Bedingung überprüft werden. Der gemessene Wert für den Winkel, bei dem das Bragg-Peak liegt ist $\theta = 28.2^\circ$. Der theoretische Sollwinkel liegt bei 28° . Das ergibt eine prozentuale Abweichung von

$$\Delta\% = \frac{|28 - 28.2|}{28} = 0.7\%.$$

Diese sehr geringe Abweichung lässt sich als erfolgreiche Überprüfung der Bragg-Bedingung interpretieren. Eine große Abweichung hätte zu Folge gehabt, dass es einen systematischen Fehler gibt der sich durch alle Messungen dieses Experiments durchzieht.

5.2 Emissionspektrum der Kupfer Röntgenröhre

Die im Experiment bestimmten Werte für die Energien der K-Linien sind

$$E_\alpha = (8.04 \pm 0.07) \times 10^3 \text{ eV}$$
$$E_\beta = (8.91 \pm 0.08) \times 10^3 \text{ eV}.$$

Die Theoriewerte dazu sind:

$$E_\alpha = 8109 \text{ eV}$$
$$E_\beta = 8.914 \text{ eV}.$$

Die prozentualen Abweichungen sind:

$$\Delta E_\alpha = 0.85\%$$
$$\Delta E_\beta = 0.04\%$$

Die Abweichungen sind sehr gering.

5.3 Abschirmkonstanten

In Tabelle 1 sind alle Abschirmkonstanten mit den dazugehörigen Theoriewerten und der prozentualen Abweichung von diesen angegeben. Die Abweichungen fallen auch hier insgesamt wieder sehr gering aus. Die vorhandenen Abweichungen könnten dadurch entstehen, dass kein kontinuierliches Spektrum an Winkeln gemessen werden kann. Durch eine Erhöhung der Auflösung könnten vorhandene Abweichungen weiter minimiert werden.

Tabelle 1: Abweichung der Abschirmkonstanten

Material	σ_{Exp}	σ_{Theo}	Abweichung [%]
Brom	3.866	3.84	0.7
Gallium	3.670	3.62	1.38
Rubidium	4.069	3.95	3.01
Strontium	4.110	3.99	3.00
Zink	3.613	3.56	1.49
Zirkonium	4.298	4.39	2.10

5.4 Rydbergenergie

Die experimentell bestimmte Rydberenergie hat einen Wert von $R_{\infty} = (12.5 \pm 0.9) \text{ eV}$. Diese weicht um 8.09% von dem Theoriewert von $R_{\infty} = 13.6 \text{ eV}$ ab. Die Abweichung fällt hier etwas höher aus, als die Abweichung bei den vorherigen Werten. Dies ist nicht verwunderlich, da diese Rydbergenergie aus diesen Werten bestimmt wurde und die Fehler der anderen Werte sich auf diesen neuen Wert übertragen und vervielfachen.

6 Messwerte

Tabelle 2: Messwerte zur Überprüfung der Bragg-Bedingung

$\theta[^\circ]$	N [Imp/s]
26.0	56.0
26.1	58.0
26.2	54.0
26.3	62.0
26.4	58.0
26.5	68.0
26.6	72.0
26.7	83.0
26.8	89.0
26.9	95.0
27.0	105.0
27.1	119.0
27.2	125.0
27.3	141.0
27.4	154.0
27.5	157.0
27.6	166.0
27.7	180.0
27.8	188.0
27.9	211.0
28.0	212.0
28.1	215.0
28.2	218.0
28.3	215.0
28.4	208.0
28.5	189.0
28.6	189.0
28.7	176.0
28.8	164.0
28.9	149.0
29.0	138.0
29.1	125.0
29.2	111.0
29.3	107.0
29.4	95.0
29.5	77.0
29.6	73.0
29.7	58.0
29.8	56.0
29.9	53.0
30.0	53.0

Tabelle 3: Messwerte für das Emissionsspektrum der Kupfer-Röntgenröhre

$\theta[^\circ]$	N [Imp/s]
8.0	323.0
8.1	316.0
8.2	326.0
8.3	340.0
8.4	335.0
8.5	343.0
8.6	350.0
8.7	350.0
8.8	366.0
8.9	357.0
9.0	371.0
9.1	371.0
9.2	372.0
9.3	364.0
9.4	381.0
9.5	379.0
9.6	393.0
9.7	375.0
9.8	391.0
9.9	395.0
10.0	402.0
10.1	405.0
10.2	390.0
10.3	398.0
10.4	400.0
10.5	418.0
10.6	401.0
10.7	410.0
10.8	408.0
10.9	409.0
11.0	414.0
11.1	420.0
11.2	417.0
11.3	417.0
11.4	409.0
11.5	406.0
11.6	404.0
11.7	405.0
11.8	400.0
11.9	383.0
12.0	389.0
12.1	382.0
12.2	372.0
12.3	376.0
12.4	385.0
12.5	384.0
12.6	382.0
12.7	373.0
12.8	376.0
12.9	373.0
13.0	375.0
13.1	366.0

Tabelle 4: Messwerte für das Absorptionsspektrum des Brom Absorbers

$\theta[^\circ]$	N [Imp/s]
12.8	10.0
12.9	12.0
13.0	9.0
13.1	13.0
13.2	18.0
13.3	21.0
13.4	25.0
13.5	27.0
13.6	27.0
13.7	22.0
13.8	25.0
13.9	21.0
14.0	23.0
14.1	20.0
14.2	21.0
14.3	19.0

Tabelle 5: Messwerte für das Absorptionsspektrum des Gallium Absorbers

$\theta[^\circ]$	N [Imp/s]
17.0	66.0
17.1	66.0
17.2	78.0
17.3	88.0
17.4	102.0
17.5	116.0
17.6	121.0
17.7	121.0
17.8	122.0
17.9	122.0
18.0	119.0
18.1	114.0
18.2	110.0
18.3	108.0
18.4	104.0
18.5	110.0
18.6	110.0
18.7	109.0
18.8	99.0
18.9	100.0
19.0	98.0

Tabelle 6: Messwerte für das Absorptionsspektrum des Rubidium Absorbers

$\theta[^\circ]$	N [Imp/s]
11.2	11.0
11.3	10.0
11.4	10.0
11.5	12.0
11.6	17.0
11.7	32.0
11.8	39.0
11.9	47.0
12.0	57.0
12.1	64.0
12.2	61.0
12.3	57.0
12.4	54.0
12.5	54.0

Tabelle 7: Messwerte für das Absorptionsspektrum des Strontium Absorbers

$\theta[^\circ]$	N [Imp/s]
10.5	43.0
10.6	41.0
10.7	40.0
10.8	44.0
10.9	50.0
11.0	89.0
11.1	120.0
11.2	152.0
11.3	181.0
11.4	193.0
11.5	181.0
11.6	196.0
11.7	181.0
11.8	173.0
11.9	166.0
12.0	159.0

Tabelle 8: Messwerte für das Absorptionsspektrum des Zink Absorbers

$\theta[^\circ]$	N [Imp/s]
18.0	58.0
18.1	54.0
18.2	55.0
18.3	54.0
18.4	54.0
18.5	55.0
18.6	65.0
18.7	84.0
18.8	91.0
18.9	100.0
19.0	102.0
19.1	100.0
19.2	98.0
19.3	100.0
19.4	95.0
19.5	98.0

Literatur

- [1] *Absorptionsenergie*. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/XrayTrans/search.pl?element=Cu&trans=All&lower=&upper=&units=eV>.
- [2] *Daten und Hinweise V602 Röntgenemission und -absorption*. TU Dortmund, Physik Fakultät.
- [3] *Rydbergenergie*. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Rydberg-Konstante.html>.
- [4] *Versuchsanleitung V602 Röntgenemission und -absorption*. TU Dortmund, Physik Fakultät.