

V602

# **Röntgenemission und -absorption**

Nico Guth  
nico.guth@tu-dortmund.de

Abgabe: 19.05.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Zielsetzung</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2 Theorie</b>   | <b>3</b>  |
| <b>3 Durchführung</b>  | <b>5</b>  |
| 3.1 Überprüfung der Bragg Bedingung . . . . .                                | 6         |
| 3.2 Untersuchung des Emissionsspektrums von Kuper . . . . .                  | 6         |
| 3.3 Untersuchung der Absorptionsspektren verschiedener Materialien . . . . . | 6         |
| <b>4 Auswertung</b>  | <b>7</b>  |
| 4.1 Überprüfung der Bragg Bedingung . . . . .                                | 7         |
| 4.2 Untersuchung des Emissionsspektrums von Kuper . . . . .                  | 8         |
| 4.3 Untersuchung der Absorptionsspektren verschiedener Materialien . . . . . | 9         |
| 4.4 Bestimmung der Rydbergenergie . . . . .                                  | 10        |
| <b>5 Diskussion</b>  | <b>11</b> |
| <b>Literatur</b>   | <b>13</b> |

## 1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird das Röntgenemissionsspektrum von Kupfer und das Röntgenabsorptionsspektrum von verschiedenen Elementen untersucht.

## 2 Theorie

Eine häufig verwendete Methode Röntgenstrahlung zu erzeugen ist die sogenannte Röntgenröhre. Hier werden von einer Glühkathode Elektronen ausgesendet, welche im elektrischen Feld auf eine Anode hin beschleunigt werden. Nun führen zwei Vorgänge zur Aussendung von Röntgenstrahlung.

Beim Ersten wird das Elektron durch das elektrische Feld der Elektronen im Anodenmaterial abgebremst. Hierbei verliert das Elektron Energie, welche in Form von Photonen ausgesendet wird. Dieser Vorgang führt zum kontinuierlichen Spektrum, welches auch Bremsberg genannt wird und auf Abbildung 1 dargestellt ist.

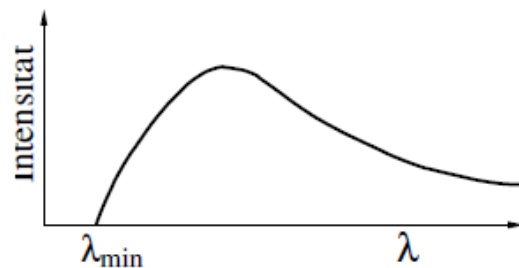


Abbildung 1: Skizze des Bremsbergs bei Röntgenstrahlung.[1]

Der zweite Vorgang ist der Stoßprozess vom eintreffenden Elektron mit einem Elektron im Anodenatom. Durch diesen Stoß wird ein Elektron aus einer der inneren Schalen aus dem Atom gelöst und hinterlässt eine Leerstelle. Ein Elektron aus einer äußeren Schale wird nun die innere Schale besetzen und sendet hierbei ebenfalls ein Photon aus. Dieses Photon hat gerade die Energie der Energiedifferenz der beiden Energieniveaus. Durch die diskreten Energiedifferenzen entsteht somit ein diskretes Spektrum, welches als charakteristisches Spektrum bezeichnet wird. Im charakteristischen Spektrum werden die einzelnen Linien mit Buchstaben wie  $K_\alpha, K_\beta, L_\alpha, \dots$  bezeichnet. Hier entspricht der Buchstabe der inneren Schale und das griechische Symbol der äußeren Schale.

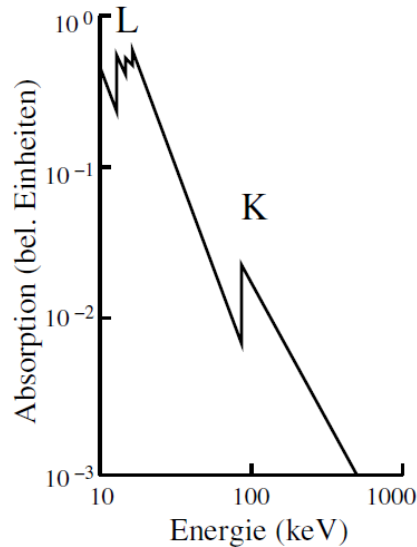
Die Bindungsenergie auf der n-ten Schale  $E_n$  hängt in einem Atom mit mehreren Elektronen unter Anderem von Abschirmeffekten des Kerns ab und kann mit

$$E_n = -\frac{R_\infty(Z - \sigma)^2}{n^2} \quad (1)$$

berechnet werden.  $R_\infty = 13,6 \text{ eV}$  ist die Rydbergenergie,  $Z$  die Ordnungszahl und  $\sigma$  die Abschirmkonstante.[1] Nach dem Moseley'schen Gesetz wird z.B die  $K_\alpha$  Linie näherungsweise bei

$$E_K = R_\infty (Z - \sigma)^2 \quad (2)$$

erwartet. Allerdings führen weitere quantenmechanische Effekte wie z.B. der Spin zu Variationen dieser Bindungsenergie. Dadurch sind die charakteristischen Linien noch detaillierter unterteilt und das Spektrum innerhalb einer Linie erscheint annähernd kontinuierlich.



**Abbildung 2:** Skizze des Absorptionsspektrums bei Röntgenstrahlung.[1]

Betrachtet man nun die Absorption von Röntgenstrahlung, fallen beim Absorptionskoeffizienten sprunghafte Anstiege trotz des generellen Abstiegs auf. (siehe Abbildung 2) An diesen Stellen entspricht die Photonenenergie gerade der Bindungsenergie eines Elektrons und die Photonen können ab dieser Energie die Elektronen aus dem Atom lösen und somit wird das Photon absorbiert. Die entsprechenden Absorptionsenergien werden je nach Schale  $K$ -,  $L$ -, ... Kante genannt. Wenn die Energie  $E_K$  der  $K$ -Kante bekannt ist kann über die Sommerfeldsche Feinstrukturformel die Abschirmkonstante

$$\sigma_K = Z - \sqrt{\frac{E_K}{R_\infty} - \frac{\alpha^2 Z^4}{4}} \quad (3)$$

berechnet werden.  $\alpha = 7,297 \cdot 10^{-3}$  ist hier die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante.[2]

In diesem Versuch wird das Röntgenspektrum mithilfe der Bragg'schen Reflexion bestimmt. Hier wird die einfallende Strahlung an einem dreidimensionalen Gitter gebeugt und je

nach Ein-/Ausfallswinkel tritt näherungsweise nur bei einer spezifische Wellenlänge konstruktive Interferenz auf. Wobei die Maximal Intensität bei einem Ausfallswinkel gleich dem Einfallswinkel erwartet wird. Dies wird als Bragg Bedingung bezeichnet und der Versuch sollte so aufgebaut sein, dass diese Bedingung näherungsweise erfüllt ist. Somit kann die Wellenlänge  $\lambda$  zum Winkel  $\theta$  über

$$\lambda = \frac{2d}{n} \sin \theta \quad (4)$$

bestimmt werden, wobei  $n$  der Beugungsordnung entspricht. Als 3 dimensionales Gitter wird hier ein LiF-Kristall mit einer Gitterkonstante  $d = 2,014 \cdot 10^{-12} \text{ m}$  verwendet. Außerdem wird nur die erste Beugungsordnung ( $n = 1$ ) beachtet.

Aus der Wellenlänge der Strahlung lässt sich die Photonenenergie über

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (5)$$

bestimmen.  $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}$  ist das Plancksche Wirkungsquantum und  $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  ist die Lichtgeschwindigkeit.[2]

### 3 Durchführung

Die Durchführung des Versuchs ist in drei Teile aufgeteilt:

- Überprüfung der Bragg Bedingung
- Untersuchung des Emissionsspektrums von Kuper
- Untersuchung der Absorptionsspektren verschiedener Materialien

Allerdings wird für jeden Teil der gleiche Versuchsaapparat verwendet.(siehe Abbildung 3)

Hier handelt es sich um eine Röntgenröhre, die Strahlung erzeugt, einen LiF-Kristall, an dem die Strahlung gebeugt wird und ein Geiger-Müller Zählrohr welches die Intensität der gebeugten Strahlung misst. Die Röntgenstrahlung wird mithilfe einer 1 mm Blende (waagrecht zum Boden) gebündelt und die Winkel des Kristalls und des Geiger-Müller Zählers können variiert werden. Als Spannung an der Röntgenröhre wird  $U = 35 \text{ kV}$  und als Strom  $I = 1 \text{ mA}$  eingestellt.

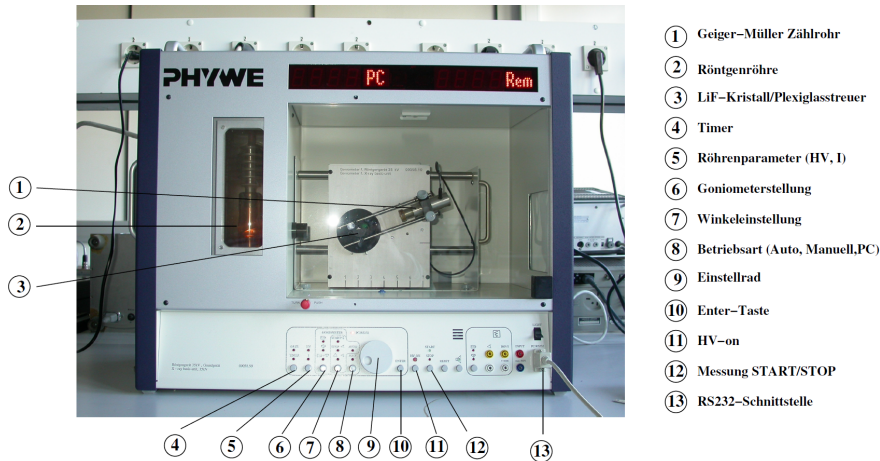


Abbildung 3: Versuchsaufbau der Röntgenröhre.

### 3.1 Überprüfung der Bragg Bedingung

Um die Bragg Bedingung zu überprüfen wird für den Kristall ein fester Winkel von  $\theta = 14^\circ$  eingestellt und der Geiger-Müller Zähler läuft von  $\alpha = 26^\circ$  bis  $30^\circ$  in  $0,1^\circ$  Schritten. Gemessen wird bei einer Integrationszeit von 5 Sekunden.

### 3.2 Untersuchung des Emissionsspektrums von Kuper

Um das Emissionsspektrums der Kupfer-Röntgenröhre aufnehmen zu können, muss zuerst der Winkel des Geiger-Müller Zählers an den Winkel des Kristall im Verhältnis 2:1 gekoppelt werden. Dann wird das Spektrum für den Winkelbereich  $\theta = 4^\circ$  bis  $26^\circ$  in  $0,2^\circ$  Schritten mit einer Integrationszeit von ebenfalls 5 Sekunden gemessen.

### 3.3 Untersuchung der Absorptionsspektren verschiedener Materialien

Um die Absorption untersuchen zu können, muss eine Absorberplatte in den Strahlengang vom LiF-Kristall zum Geiger-Müller Zähler montiert werden. Nun wird ein geeigneter Messbereich in  $0,1^\circ$  Schritten und einer Integrationszeit von erneut 5 Sekunden durchlaufen. Diese Messung wird für die Absorberelemente Zink, Gallium, Brom, Rubidium, Strontium und Zirkonium durchgeführt.

## 4 Auswertung

Auch die Auswertung ist, ähnlich wie die Durchführung, in 4 Teile aufgeteilt:

- Überprüfung der Bragg Bedingung
- Untersuchung des Emissionsspektrums von Kuper
- Untersuchung der Absorptionsspektren verschiedener Materialien
- Bestimmung der Rydbergenergie

### 4.1 Überprüfung der Bragg Bedingung

Die Messergebnisse aus Teil 1 der Durchführung sind in Tabelle 3 aufgelistet und in Abbildung 4 dargestellt. Die Maximale Intensität ergibt sich bei einem Winkel  $\theta = (28,2 \pm 0,1)^\circ$ , wobei der Sollwinkel  $28^\circ$  beträgt.

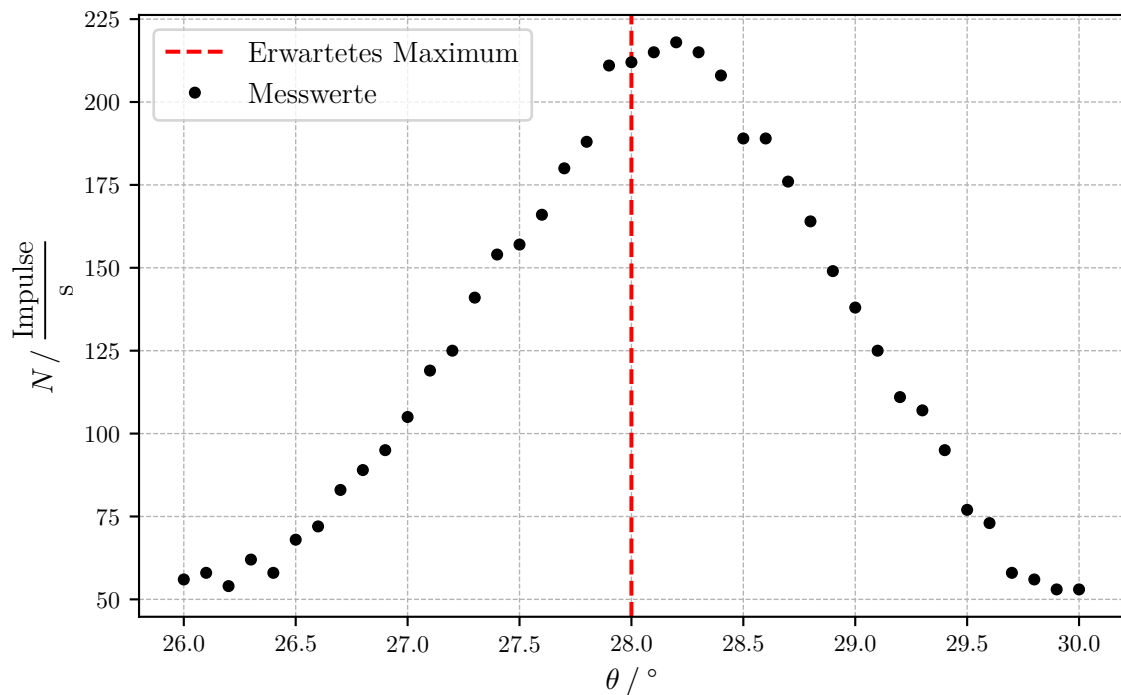


Abbildung 4: Plot der Messergebnisse aus Abschnitt 3.1

## 4.2 Untersuchung des Emissionsspektrums von Kuper

Die Messergebnisse aus Teil 2 der Durchführung sind in Tabelle 4 aufgelistet und in Abbildung 5 dargestellt. Hier lassen sich die  $K$ -Linien bei

$$\theta(K_\alpha) = 22,5^\circ$$

$$\theta(K_\beta) = 20,2^\circ$$

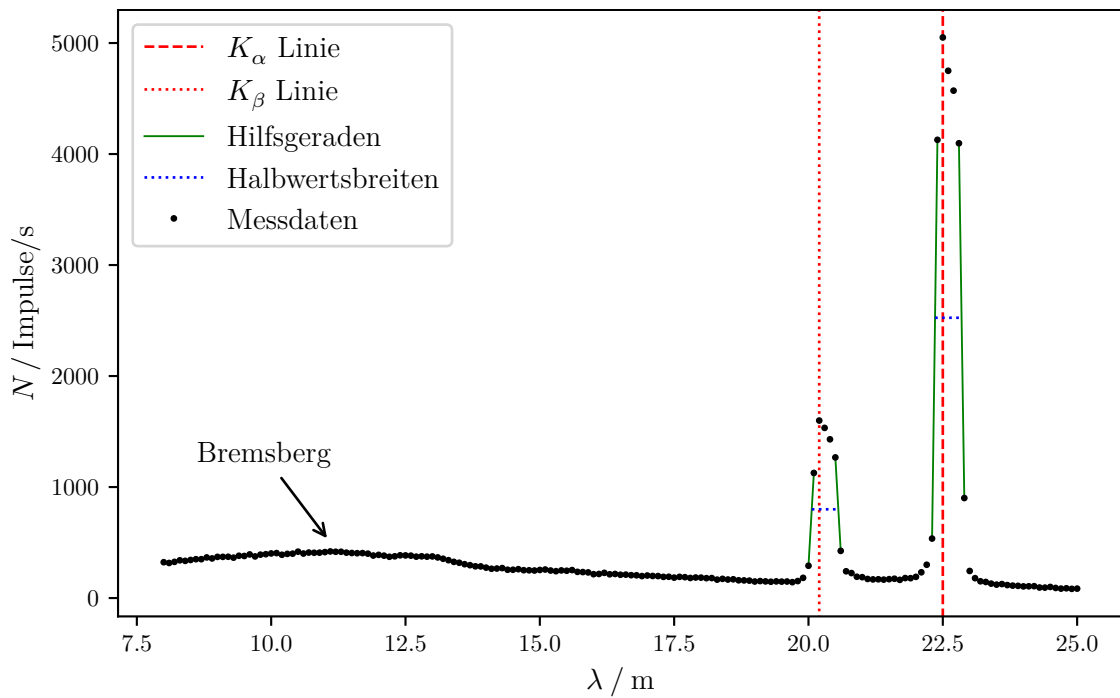
ablesen und ergeben über Gleichung 4 und 5 die Bindungsenergien und entsprechende Literaturwerte

$$E(K_\alpha) = 8044 \text{ eV}$$

$$E_{\text{Lit}}(K_\alpha) = 8048 \text{ eV}$$

$$E(K_\beta) = 8915 \text{ eV}$$

$$E_{\text{Lit}}(K_\beta) = 8905 \text{ eV} \cdot [3]$$



**Abbildung 5:** Plot der Messergebnisse aus Abschnitt 3.2

Nun soll das Auflösungsvermögen  $A(K) = E(K)/H(K)$  der Röntgenstrahlung bestimmt werden, wobei  $H(K)$  die Halbwärtsbreite der  $K$ -Linie ist. Diese Halbwärtsbreite wird aufgrund der beschränkten Anzahl an Messpunkten um die  $K$ -Linien folgendermaßen bestimmt. Zuerst werden die Messwerte gesucht, dessen Intensitätswerte am nächsten an  $N(K)/2$  liegen. Zwischen diesen Punkten wird jeweils eine Gerade gelegt. Für diese Geraden wird der passende  $\theta$  Wert für  $N(K)/2$  bestimmt und wie zuvor über Gleichung 4 und Gleichung 5 in eine Energie umgerechnet. Die Differenzen dieser Energien ergeben



somit die Halbwärtsbreiten

$$\begin{aligned} H(K_\alpha) &= 165,8 \text{ eV} \\ H(K_\beta) &= 207,0 \text{ eV} . \end{aligned}$$

Damit ergeben sich die Auflösungsvermögen

$$\begin{aligned} A(K_\alpha) &= 48,5 \\ A(K_\beta) &= 43,1 . \end{aligned}$$

Außerdem werden aus den Energien  $E(K)$  die Abschirmkonstanten  $\sigma_1$  der Absorptionsenergie von Kupfer,  $\sigma_2$  der  $K_\alpha$ -Linie und  $\sigma_3$  der  $K_\beta$ -Linie bestimmt. Da die Absorptionsenergie von Kupfer hier nicht gemessen wurde, wird diese aus entsprechender Literatur zu  $E_{\text{abs}} = 8979 \text{ eV}$  gewählt.[4] Abschätzungen der Abschirmkonstanten lassen sich über

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

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

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

ermitteln.[1, Gleichungen (8), (9), (10)] Die Ordnungszahl von Kupfer ist  $Z = 29$ . Damit ergeben sich die Abschirmkonstanten zu

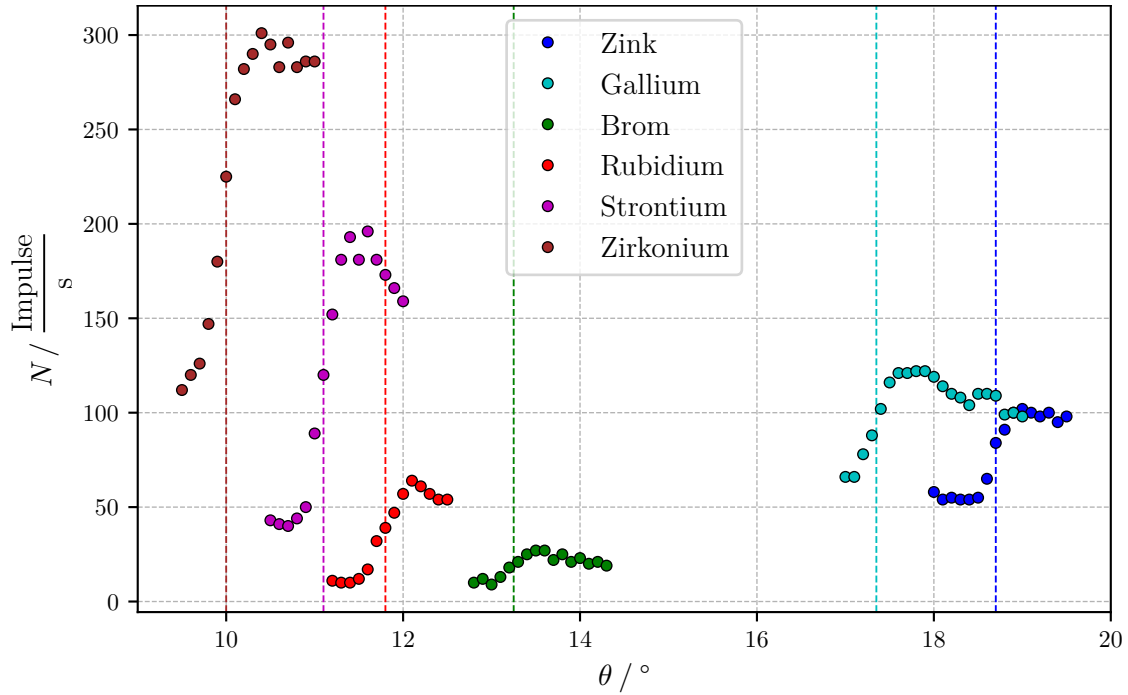
$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 3,3 \\ \sigma_2 &= 12,4 \\ \sigma_3 &= 22,5 . \end{aligned}$$

### 4.3 Untersuchung der Absorptionsspektren verschiedener Materialien

Die Messergebnisse aus Teil 3 der Durchführung sind in den Tabellen 5-10 aufgelistet und in Abbildung 6 dargestellt.

Aus den Messdaten kann nun jeweils die Absorptionsenergie bestimmt werden. Dazu wird die  $K$ -Kante näherungsweise auf die Mitte der Kante festgelegt. Also wird der nächstbeste  $\theta$  Wert zu  $N = N_{\text{min}} + \frac{1}{2}(N_{\text{max}} - N_{\text{min}})$  bestimmt bzw. die Mitte zweier Messwerte falls die gesuchte Intensität ungefähr in der Mitte dieser Messpunkte liegt. Die so gefundenen  $K$ -Kanten sowie deren Energieäquivalent aus Gleichung 4 und 5 sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Nun können aus den Absorptionsenergien über Gleichung 3 die Abschirmkonstanten der Absorbermaterialien bestimmt werden.



**Abbildung 6:** Plot der Messergebnisse aus Abschnitt 3.3, mit Markierungen der bestimmten  $K$ -Kanten

Um die bestimmten Werte vergleichen zu können, werden über Absorptionsenergien aus externer Literatur und die gleichen drei Gleichungen wie zuvor die Abschirmkonstanten und die Bragg-Winkel berechnet. Auch diese Werte sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1:** Ergebnisse und Literaturwerte der Absorptionsenergie, des Bragg-Winkels und der Abschirmkonstante.[4]

| Element | $Z$ | $E / \text{keV}$ | $E_{\text{Lit}} / \text{keV}$ | $\theta / ^\circ$ | $\theta_{\text{Lit}} / ^\circ$ | $\sigma$ | $\sigma_{\text{Lit}}$ |
|---------|-----|------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|----------|-----------------------|
| Zn      | 30  | 9,60             | 9,65                          | 18,70             | 18,60                          | 3,63     | 3,57                  |
| Ga      | 31  | 10,32            | 10,37                         | 17,35             | 17,30                          | 3,67     | 3,61                  |
| Br      | 35  | 13,43            | 13,47                         | 13,25             | 13,20                          | 3,89     | 3,85                  |
| Rb      | 37  | 15,05            | 15,20                         | 11,80             | 11,70                          | 4,11     | 3,94                  |
| Sr      | 38  | 15,99            | 16,10                         | 11,10             | 11,00                          | 4,12     | 4,00                  |
| Zr      | 40  | 17,73            | 18,00                         | 10,00             | 9,80                           | 4,37     | 4,09                  |

#### 4.4 Bestimmung der Rydbergenergie

Nun lässt sich aus den im vorherigen Abschnitt berechneten Absorptionsenergien sowie Abschirmkonstanten die Rydbergenergie über Gleichung 2 ermitteln. Dazu wird ein Plot

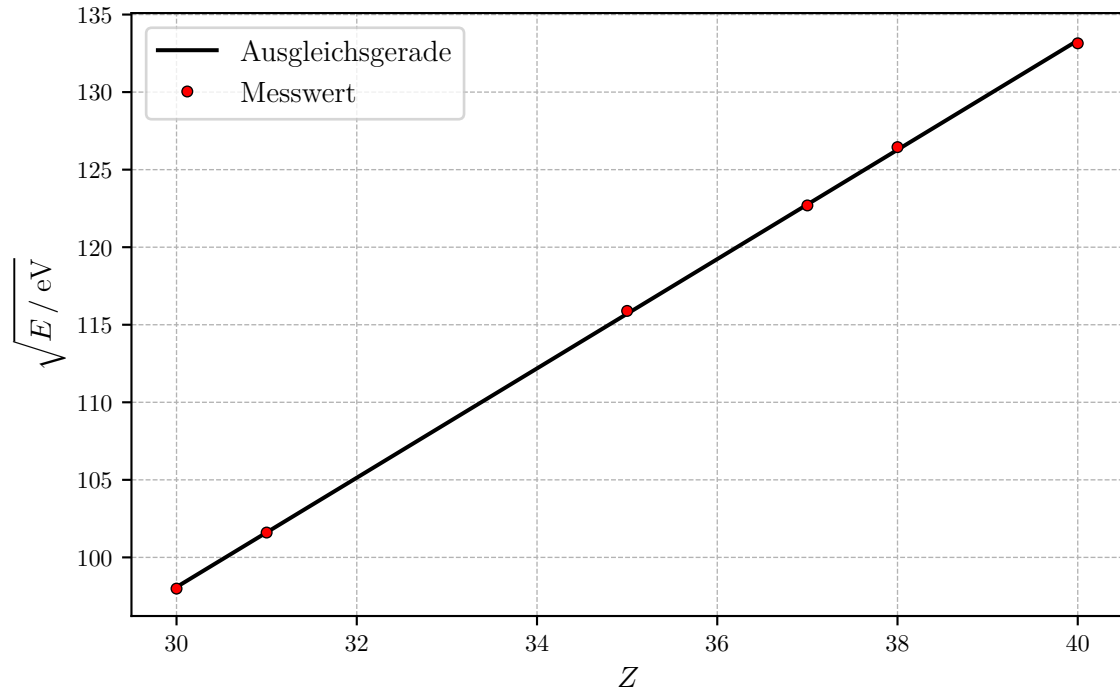
aus den Werten der Tabelle 1 angefertigt und eine passende Ausgleichsgerade mit

$$\sqrt{E} = aZ + b$$

über die Python Funktion `curve_fit` aus der Bibliothek Scipy bestimmt. Somit ergeben sich die Parameter

$$a = (3,52 \pm 0,02) \sqrt{\text{eV}}$$

$$b = (-7,6 \pm 0,7) \sqrt{\text{eV}}.$$



**Abbildung 7:** Plot der Ergebnisse aus Tabelle 1 mit passender Ausgleichsgerade.

Die Rydbergenergie wird über  $R_\infty = a^2$  zu

$$R_\infty = (12,4 \pm 0,1) \text{ eV}$$

bestimmt.

Ein Literaturwert der Rydbergenergie lautet  $R_\infty = 13,6 \text{ eV}$ . [1]

## 5 Diskussion

Um eine Aussage über die Genauigkeit aller hier ermittelten Größen treffen zu können, muss zunächst die Genauigkeit der Bragg Bedingung betrachtet werden. Hier ergab die

Messung zu Anfang des Versuchs eine Abweichung vom Sollwinkel von

$$\Delta\theta = 0,7\%.$$

Diese Abweichung scheint zwar ausreichend gering, allerdings sind durch diese Ungenauigkeit alle weiteren ermittelten Werte auch ungenau.

Der Plot des Röntgenemissionsspektrums von Kupfer zeigt ein erwartetes Bild. Die ermittelten  $K_\alpha$  und  $K_\beta$  Energien bestätigen dies und zeigen eine Abweichung

$$\Delta E(K_\alpha) = 0,05\%$$

$$\Delta E(K_\beta) = 0,11\%$$

von den angegebenen Literaturwerten. Eine minimale bzw. maximale Wellenlänge des Bremsberges konnte nicht ermittelt werden, da hierfür zu wenig Messwerte aufgenommen wurden und der Apparat nicht gut von äußerer Strahlung abgeschirmt wurde.

Betrachtet man nun die Ergebnisse der Absorptionsuntersuchung stellt man ähnlich geringe Abweichungen fest. Diese Abweichungen sind in ?? aufgelistet. Auch die Plots

**Tabelle 2:** Abweichungen der in Abschnitt 4.3 berechneten Werte zum Literaturwert

| Element | $\Delta E / \%$ | $\Delta\theta / \%$ | $\Delta\sigma / \%$ |
|---------|-----------------|---------------------|---------------------|
| Zn      | 0,50            | 0,54                | 1,77                |
| Ga      | 0,45            | 0,29                | 1,75                |
| Br      | 0,29            | 0,38                | 1,14                |
| Rb      | 0,96            | 0,85                | 4,25                |
| Sr      | 0,68            | 0,91                | 2,96                |
| Zr      | 1,51            | 2,04                | 6,87                |

der Absorptionskurven in Abbildung 6 zeigen das erwartete Bild.

Als letztes wurde die Rydbergenergie aus den Ergebnissen ermittelt und diese zeigt eine Abweichung

$$\Delta R_\infty = 8,8\%$$

vom Vergleichswert. Diese Abweichung ist somit die GröÙte der hier ermittelten Wert, was allerdings nicht verwunderlich ist, da alle Abweichungen der vorherigen Messungen hier einen Beitrag leisten.

Alle Abweichungen scheinen angemessen, da viele systematische Fehlerquellen nicht beachtet wurden. Z.B. wurde der Messapparat nicht sonderlich gut von äußerer Strahlung abgeschirmt und die Bragg Bedingung hätte noch besser erfüllt gewesen sein können. Außerdem wurden die einzelnen Messwert nur mit einer Integrationszeit von 5 Sekunden und in Schritten von  $0,1^\circ$  gemessen ohne dabei die Totzeit des Geiger-Müller Zählers zu beachten. Zudem kommen die in der Theorie gemachten Näherungen hinzu.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 602 Röntgenemission und -absorption*. 2020.
- [2] NIST Standard Reference Database. *CODATA Internationally recommended 2018 values of the Fundamental Physical Constants*. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/> (besucht am 04.05.2020).
- [3] NIST Standard Reference Database. *X-Ray Transition Energies Database*. URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-transition-energies-database> (besucht am 02.05.2020).
- [4] Ethan A. Merritt. *X-ray Absorption Edges*. URL: [http://skuld.bmsc.washington.edu/scatter/AS\\_periodic.html](http://skuld.bmsc.washington.edu/scatter/AS_periodic.html) (besucht am 14.05.2020).

## Anhang

**Tabelle 3:** Messergebnisse der Untersuchung des Bragg'schen Gesetzes

| $\theta / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ |
|-------------------|------------------------------------|
| 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 4:** Messergebnisse des Emissionsspektrums von Kupfer

| $\theta / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ | $\alpha / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ | $\alpha / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ | $\alpha / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ |
|-------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| 8,0               | 323,0                              | 12,3              | 376,0                              | 16,6              | 211,0                              | 20,9              | 192,0                              |
| 8,1               | 316,0                              | 12,4              | 385,0                              | 16,7              | 206,0                              | 21,0              | 188,0                              |
| 8,2               | 326,0                              | 12,5              | 384,0                              | 16,8              | 205,0                              | 21,1              | 172,0                              |
| 8,3               | 340,0                              | 12,6              | 382,0                              | 16,9              | 198,0                              | 21,2              | 168,0                              |
| 8,4               | 335,0                              | 12,7              | 373,0                              | 17,0              | 203,0                              | 21,3              | 169,0                              |
| 8,5               | 343,0                              | 12,8              | 376,0                              | 17,1              | 199,0                              | 21,4              | 166,0                              |
| 8,6               | 350,0                              | 12,9              | 373,0                              | 17,2              | 198,0                              | 21,5              | 170,0                              |
| 8,7               | 350,0                              | 13,0              | 375,0                              | 17,3              | 191,0                              | 21,6              | 174,0                              |
| 8,8               | 366,0                              | 13,1              | 366,0                              | 17,4              | 192,0                              | 21,7              | 164,0                              |
| 8,9               | 357,0                              | 13,2              | 354,0                              | 17,5              | 184,0                              | 21,8              | 180,0                              |
| 9,0               | 371,0                              | 13,3              | 341,0                              | 17,6              | 191,0                              | 21,9              | 179,0                              |
| 9,1               | 371,0                              | 13,4              | 326,0                              | 17,7              | 188,0                              | 22,0              | 191,0                              |
| 9,2               | 372,0                              | 13,5              | 318,0                              | 17,8              | 181,0                              | 22,1              | 232,0                              |
| 9,3               | 364,0                              | 13,6              | 305,0                              | 17,9              | 185,0                              | 22,2              | 300,0                              |
| 9,4               | 381,0                              | 13,7              | 296,0                              | 18,0              | 184,0                              | 22,3              | 536,0                              |
| 9,5               | 379,0                              | 13,8              | 286,0                              | 18,1              | 179,0                              | 22,4              | 4128,0                             |
| 9,6               | 393,0                              | 13,9              | 285,0                              | 18,2              | 180,0                              | 22,5              | 5050,0                             |
| 9,7               | 375,0                              | 14,0              | 274,0                              | 18,3              | 166,0                              | 22,6              | 4750,0                             |
| 9,8               | 391,0                              | 14,1              | 264,0                              | 18,4              | 173,0                              | 22,7              | 4571,0                             |
| 9,9               | 395,0                              | 14,2              | 266,0                              | 18,5              | 167,0                              | 22,8              | 4097,0                             |
| 10,0              | 402,0                              | 14,3              | 270,0                              | 18,6              | 169,0                              | 22,9              | 901,0                              |
| 10,1              | 405,0                              | 14,4              | 255,0                              | 18,7              | 160,0                              | 23,0              | 244,0                              |
| 10,2              | 390,0                              | 14,5              | 255,0                              | 18,8              | 159,0                              | 23,1              | 179,0                              |
| 10,3              | 398,0                              | 14,6              | 260,0                              | 18,9              | 157,0                              | 23,2              | 151,0                              |
| 10,4              | 400,0                              | 14,7              | 251,0                              | 19,0              | 149,0                              | 23,3              | 145,0                              |
| 10,5              | 418,0                              | 14,8              | 250,0                              | 19,1              | 153,0                              | 23,4              | 130,0                              |
| 10,6              | 401,0                              | 14,9              | 248,0                              | 19,2              | 150,0                              | 23,5              | 121,0                              |
| 10,7              | 410,0                              | 15,0              | 253,0                              | 19,3              | 147,0                              | 23,6              | 126,0                              |
| 10,8              | 408,0                              | 15,1              | 257,0                              | 19,4              | 150,0                              | 23,7              | 117,0                              |
| 10,9              | 409,0                              | 15,2              | 248,0                              | 19,5              | 148,0                              | 23,8              | 112,0                              |
| 11,0              | 414,0                              | 15,3              | 242,0                              | 19,6              | 149,0                              | 23,9              | 110,0                              |
| 11,1              | 420,0                              | 15,4              | 249,0                              | 19,7              | 143,0                              | 24,0              | 105,0                              |
| 11,2              | 417,0                              | 15,5              | 246,0                              | 19,8              | 153,0                              | 24,1              | 106,0                              |
| 11,3              | 417,0                              | 15,6              | 252,0                              | 19,9              | 182,0                              | 24,2              | 107,0                              |
| 11,4              | 409,0                              | 15,7              | 236,0                              | 20,0              | 291,0                              | 24,3              | 95,0                               |
| 11,5              | 406,0                              | 15,8              | 234,0                              | 20,1              | 1127,0                             | 24,4              | 94,0                               |
| 11,6              | 404,0                              | 15,9              | 231,0                              | 20,2              | 1599,0                             | 24,5              | 100,0                              |
| 11,7              | 405,0                              | 16,0              | 215,0                              | 20,3              | 1533,0                             | 24,6              | 91,0                               |
| 11,8              | 400,0                              | 16,1              | 217,0                              | 20,4              | 1430,0                             | 24,7              | 85,0                               |
| 11,9              | 383,0                              | 16,2              | 227,0                              | 20,5              | 1267,0                             | 24,8              | 88,0                               |
| 12,0              | 389,0                              | 16,3              | 214,0                              | 20,6              | 425,0                              | 24,9              | 83,0                               |
| 12,1              | 382,0                              | 16,4              | 217,0                              | 20,7              | 241,0                              | 25,0              | 85,0                               |
| 12,2              | 372,0                              | 16,5              | 210,0                              | 20,8              | 225,0                              |                   |                                    |

**Tabelle 5:** Messergebnisse des Absorptionsspektrums von Zink

| $\theta / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ |
|-------------------|------------------------------------|
| 8,0               | 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                               |



**Tabelle 6:** Messergebnisse des Absorptionsspektrums von Gallium

| $\theta / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ |
|-------------------|------------------------------------|
| 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 7:** Messergebnisse des Absorptionsspektrums von Brom

| $\theta / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ |
|-------------------|------------------------------------|
| 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 8:** Messergebnisse des Absorptionsspektrums von Rubidium

| $\theta / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ |
|-------------------|------------------------------------|
| 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 9:** Messergebnisse des Absorptionsspektrums von Strontium

| $\theta / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ |
|-------------------|------------------------------------|
| 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 10:** Messergebnisse des Absorptionsspektrums von Zirkonium

| $\theta / ^\circ$ | $N / \frac{\text{Imps}}{\text{s}}$ |
|-------------------|------------------------------------|
| 9,5               | 112,0                              |
| 9,6               | 120,0                              |
| 9,7               | 126,0                              |
| 9,8               | 147,0                              |
| 9,9               | 180,0                              |
| 10,0              | 225,0                              |
| 10,1              | 266,0                              |
| 10,2              | 282,0                              |
| 10,3              | 290,0                              |
| 10,4              | 301,0                              |
| 10,5              | 295,0                              |
| 10,6              | 283,0                              |
| 10,7              | 296,0                              |
| 10,8              | 283,0                              |
| 10,9              | 286,0                              |
| 11,0              | 286,0                              |