

Röntgenemission und -absorption

Lukas Bertsch
lukas.bertsch@tu-dortmund.de

Steffen Kober
steffen.kober@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.04.2022

Abgabe: 26.04.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Kontinuierliches Bremsspektrum	3
2.2	Charakteristische Röntgenstrahlung	3
2.3	Absorptionsspektren	4
2.4	Bestimmung der Abschirmkonstanten	5
2.5	Untersuchung der Spektren mithilfe der Braggreflexion	5
3	Durchführung	5
3.1	Vorbereitungsaufgaben	5
3.2	Versuchsaufbau	6
3.3	Versuchsdurchführung	6
4	Auswertung	7
4.1	Überprüfung der Braggbedingung	7
4.2	Emissionsspektrum einer Cu-Röntgenröhre	8
4.3	Absorptionsspektren verschiedener Stoffe	10
4.3.1	Bestimmung der Absorptionsenergie und der Abschirmkonstante .	10
4.4	Bestimmung der Rydbergkonstante	11
5	Diskussion	12
	Literatur	13
	Anhang	14

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll das Emissionsspektrum einer Kupfer-Anode untersucht und seine Charakteristika analysiert werden. Des Weiteren wird das Auflösungsvermögen des Messgeräts und die Absorptionsspektren verschiedener Stoffe betrachtet.

2 Theorie

Röntgenstrahlen können mithilfe einer Elektronenkanone erzeugt werden. Dabei treffen beschleunigte Elektronen auf das Anodenmaterial und geben (kinetische) Energie an dieses ab. Es wird zwischen zwei Arten der Energieabgabe unterschieden.

2.1 Kontinuierliches Bremsspektrum

Ein Elektron kann im Coulombfeld eines Atomkerns abgebremst werden, wodurch es Energie verliert. Diese Energie wird in Form eines Photons (Röntgenquants) emittiert. Da auf diese Weise ein beliebiger Teil der Energie des Elektrons abgegeben werden kann, entsteht ein kontinuierliches Spektrum, welches *Bremsspektrum* genannt wird. Bei vollständiger Abgabe der kinetischen Energie $E_{\text{kin}} = U_{\text{B}} \cdot e$ des Elektrons wird eine minimale Wellenlänge

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{hc}{e \cdot U_{\text{B}}} \quad (1)$$

erreicht. Dabei ist U_{B} die Beschleunigungsspannung der Apparatur und e die Elementarladung. Allgemein gilt der Zusammenhang

$$E_{\text{Photon}} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2)$$

zwischen Wellenlänge λ und der Energie eines Photons.

2.2 Charakteristische Röntgenstrahlung

Bei der zweiten Form der Energieabgabe wird ein Atom des Anodenmaterials ionisiert, sodass eine Leerstelle in einer inneren Schale des Atoms entsteht. Beim Zurückfallen eines Elektrons einer äußeren Schale wird dann wieder ein Photon emittiert. Das Elektron kann jedoch nur diskrete Energien abgeben, welche der Differenz zwischen den Energieniveaus der Elektronen der verschiedenen Schalen entspricht, wodurch die *charakteristische Röntgenstrahlung* entsteht. Die durch diesen Effekt verursachten Peaks im Röntgenspektrum eines Materials werden mit K_{α} , K_{β} , L_{α} usw. bezeichnet. Der Index des Bezeichners gibt an, von welcher Position das Elektron auf die K -, L -, M - ... Schale absinkt.

Die Frequenz des emittierten Photons lässt sich mittels der Energiedifferenz der Schalen m und n zu $h\nu = E_m - E_n$ bestimmen. Die Bindungsenergie eines Elektrons auf der n -ten Schale ergibt sich zu

$$E_n = -R_{\infty} z_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (3)$$

Die effektive Kernladungszahl $z_{\text{eff}} = z - \sigma$ beschreibt die Abschirmung der realen Kernladungszahl z durch andere Elektronen mit der Abschirmungskonstanten σ , welche für jedes Elektron des Atoms empirisch bestimmt werden kann. Die *Rydbergenergie* beträgt $R_{\infty} = 13,6 \text{ eV}$.

Aufgrund dessen, dass die Abschirmungskonstante für verschiedene Elektronen gleicher Schale abweichen kann, gibt es zu den Übergängen zwischen zwei Schalen mehrere mögliche Energiedifferenzen, weshalb sich die Peaks eines solchen Übergangs in eine Feinstruktur von mehreren eng beieinander liegenden Peaks aufspalten lässt, die in diesem Versuch jedoch nicht aufgelöst werden kann.

2.3 Absorptionsspektren

Treffen Röntgenstrahlen (Photonen) auf Materie, so können diese absorbiert werden. In diesem Versuch haben die Elektronen eine kinetische Energie von $E_{\text{kin}} = 35 \text{ keV}$, die sie maximal übertragen können. Bei Röntgenstrahlen mit einer Energie unter 1 MeV sind der Compton- und Photoeffekt die maßgeblichen Prozesse der Absorption. Bei zunehmender Energie nimmt der Absorptionskoeffizient (Maß für die Stärke der Absorption) ab. Übersteigt jedoch die Photonenenergie die Bindungsenergie eines Elektrons einer Schale, steigt der Absorptionskoeffizient sprunghaft. Es entsteht eine „Kante“, dessen Lage mit der Bindungsenergie des Elektrons übereinstimmt. Diese *Absorptionsenergien* werden nach der Schale, aus welcher das Elektron stammt bezeichnet. Auch hier gibt es eine Feinstruktur, die in Abbildung 1 zu sehen ist.

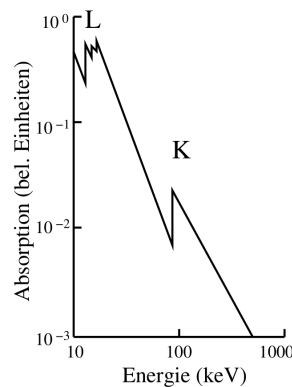


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Absorption von Röntgenstrahlen. [3]

2.4 Bestimmung der Abschirmkonstanten

Für Kupfer lassen sich die Abschirmkonstanten σ_1 , σ_2 und σ_3 aus den Emissionsenergien der K_α - und K_β -Linie bestimmen. Eine Abschätzung ergibt die Zusammenhänge

$$E_{K, \text{abs}} = R_\infty (z - \sigma_1)^2 \quad (4)$$

$$E_{K, \alpha} = R_\infty \frac{1}{n^2} (z - \sigma_1)^2 - R_\infty \frac{1}{m^2} (z - \sigma_2)^2 \quad (5)$$

$$E_{K, \beta} = R_\infty \frac{1}{n^2} (z - \sigma_1)^2 - R_\infty \frac{1}{l^2} (z - \sigma_3)^2, \quad (6)$$

aus denen sich mit $n = 1$, $m = 2$ und $l = 3$ und dem Wert der Absorptionsenergie $E_{K, \text{abs}}$ die Abschirmkonstanten bestimmen lassen.

Auch bei der Betrachtung des Absorptionsspektrums eines Stoffes lassen sich Abschirmkonstanten bestimmen. Für Elektronen der K -Schale lässt sich aus der Lage der K -Kante des Absorptionsspektrums die Abschirmkonstante $\sigma_{K, \text{abs}}$ zu

$$\sigma_K = z - \sqrt{\frac{E_K}{R_\infty} - \frac{\alpha^2 z^4}{4}} \quad (7)$$

bestimmen, wobei α die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante ist.

2.5 Untersuchung der Spektren mithilfe der Braggreflexion

Mithilfe der Braggreflexion lässt sich die Energie und somit auch die Wellenlänge λ der untersuchten Röntgenstrahlung bestimmen. Das einfallende Röntgenlicht wird dabei an unterschiedlichen Ebenen eines Kristalls reflektiert, was zu Gangunterschieden führt. Durch einfache geometrische Überlegungen lässt sich die Braggbedingung

$$2d \cdot \sin \theta = n \lambda \quad , n \in \mathbb{N} \quad (8)$$

feststellen, die den Fall der konstruktiven Interferenz einer Wellenlänge λ unter einem Einstrahlungswinkel θ beschreibt. Die Gitterkonstante ist im Falle des verwendeten LiF-Kristalls $d = 201,4 \text{ pm}$.

3 Durchführung

In diesem Versuch werden Emissions- und Absorptionsspektren verschiedener Stoffe untersucht. Zum Vergleich der Güte der Messergebnisse müssen zunächst Literaturwerte recherchiert und berechnet werden.

3.1 Vorbereitungsaufgaben

Da das Emissionsspektrum von Kupfer untersucht werden soll, werden zunächst die hierfür nötigen Theoriewerte bestimmt. Bei Kupfer liegt die K_α -Linie bei 8 keV [4]. Daraus kann

der zugehörige Bragg-Winkel $\Theta_K = 22,66^\circ$ ermittelt werden. Die Cu- K_β -Linie liegt bei 8,95 keV mit einem Bragg-Winkel von $\Theta_K = 20,14^\circ$.

Für die fünf untersuchten Absorbermaterialien sind ebenfalls einige Literaturwerte von Relevanz, welche in Tabelle 1 dargestellt sind.

Tabelle 1: Literaturwerte für die Untersuchung der Absorptionsspektren. Z ist die Ordnungszahl des jeweiligen Elements, E_K die Absorptionsenergie und σ_K die Abschirmkonstante. [4]

	Z	$E_K^{\text{Lit}} / \text{keV}$	$\Theta_K^{\text{Lit}} / ^\circ$	σ_K
Zink	30	9,65	18,60	3,56
Gallium	31	10,37	17,29	3,61
Germanium	32	11,10	16,20	3,68
Brom	35	13,47	13,23	3,85
Rubidium	37	15,20	11,70	3,94
Strontium	38	16,10	11,04	4,00
Zirkonium	40	17,99	9,86	4,10

3.2 Versuchsaufbau

Für diesen Versuch wird eine Kupfer-Röntgenröhre, ein LiF-Kristal, ein Geiger-Müller-Zählrohr und fünf Absorberproben verschiedener Elemente benötigt. Die Kupfer-Röntgenröhre, der LiF-Kristal und das Geiger-Müller-Zählrohr sind in einer geschlossenen Vorrichtung installiert, die über einen Computer gesteuert werden kann. Diese ist in Abbildung 2 zu sehen.

3.3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn werden die Messapparatur und der Computer eingeschaltet. Auf dem Computer wird das Programm *measure* gestartet. Folgend wird in der oberen Leiste unter dem Menüpunkt *Messgerät* das *Röntgengerät* ausgewählt. Nun erscheint ein Einstellungsmenü. Im ersten Teil des Versuches wird die Braggbedingung überprüft. Dazu muss die Neigung des LiF-Kristalls zu 14° eingestellt werden. Im selben Menü wird für das Geiger-Müller-Zählrohr (im Folgenden *GMZ* genannt) eine Winkelspanne von 26° bis 30° eingestellt. Der Winkelzuwachs wird auf $0,1^\circ$ festgelegt. Die Integrationszeit sollte $\Delta t = 5 \text{ s}$ betragen. Nach Start der Messung werden Messwerte zu den angegebenen Winkeln genommen. Diese können in ein Textdokument gespeichert werden.

Es wird das globale Maximum der Messwerte ermittelt und mit dem Theoriewert, welcher aus der Braggbedingung berechnet werden kann, abgeglichen. Bei Abweichungen von 1° oder mehr sollten systematische Fehler ausgeschlossen und gegebenenfalls das Gerät neu kalibriert werden.

Anschließend wird das Emissionsspektrum der Kupferanode untersucht. Dazu wird zuerst in *measure* der *2:1 Koppelmodus* aktiviert. Für die erste Messung wird der Winkelbereich

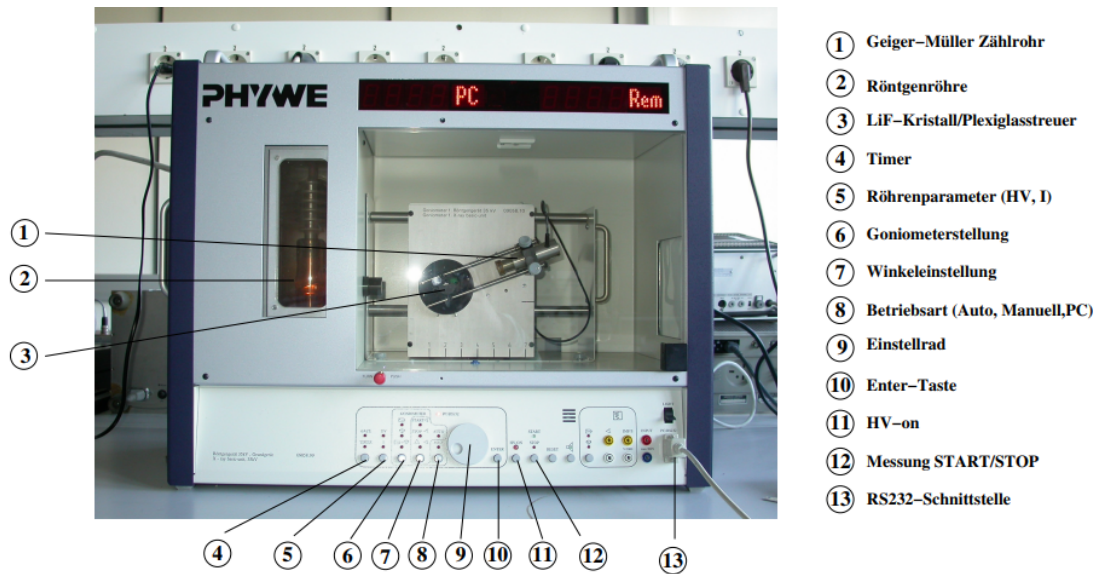


Abbildung 2: Aufbau der Kupfer-Röntgenröhre, des LiF-Kristals und des Geiger-Müller-Zählrohrs in einer Vorrichtung. [3]

von 4° bis 26° eingestellt. Der Winkelzuwachs wird auf $0,2^\circ$ gestellt und die Integrationszeit bleibt unverändert. Es wird erneut die Intensität gemessen. Nach Vollendung der Messung lässt sich eine Grafik erstellen, welcher die K_α - und K_β -Linien entnommen werden können. Anhand dieser Grafik wird nun ein möglichst kleiner Winkelbereich um die beiden Peaks gewählt. Mit diesem Winkelbereich und einem Winkelzuwachs von $0,1^\circ$ wird erneut die Intensität gemessen, sodass ein Detailspektrum dargestellt werden kann. Zuletzt werden die Absorptionsspektren verschiedener Stoffe untersucht. Dazu wird zuerst ein Zinkabsorber vor dem GMZ befestigt. Im Programm *measure* wird ein Winkelzuwachs von $0,1^\circ$ und eine Integrationszeit von $\Delta t = 20\text{ s}$ eingestellt. Da mit dieser Integrationszeit eine Messung über einen großen Winkelbereich sehr lange dauert, wird ein hinreichend großer, jedoch möglichst kleiner Winkelbereich gewählt. Dieser wird anhand Tabelle 1 in einem Intervall um den erwarteten Wert gewählt. Dieser Prozess wird für insgesamt fünf verschiedene Absorber wiederholt.

4 Auswertung

4.1 Überprüfung der Braggbedingung

Die erste Messreihe dient zur Überprüfung der Genauigkeit des Messgerätes über die Braggbedingung. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, liegt der experimentell bestimmte Glanzwinkel bei $\theta_{\text{Glanz, exp}} = 13,65^\circ$. Die Braggbedingung sagt einen Glanzwinkel von $\theta_{\text{Glanz, theo}} = 14^\circ$ voraus. Die relative Abweichung eines Messwertes x zu einem

Literaturwert x^* lässt sich zu

$$\Delta_{\text{rel}}(x) = \frac{|x - x^*|}{x^*} \quad (9)$$

bestimmen. Es ergibt sich eine relative Abweichung von $\Delta\theta_{\text{Glanz}} = 2.5\%$.

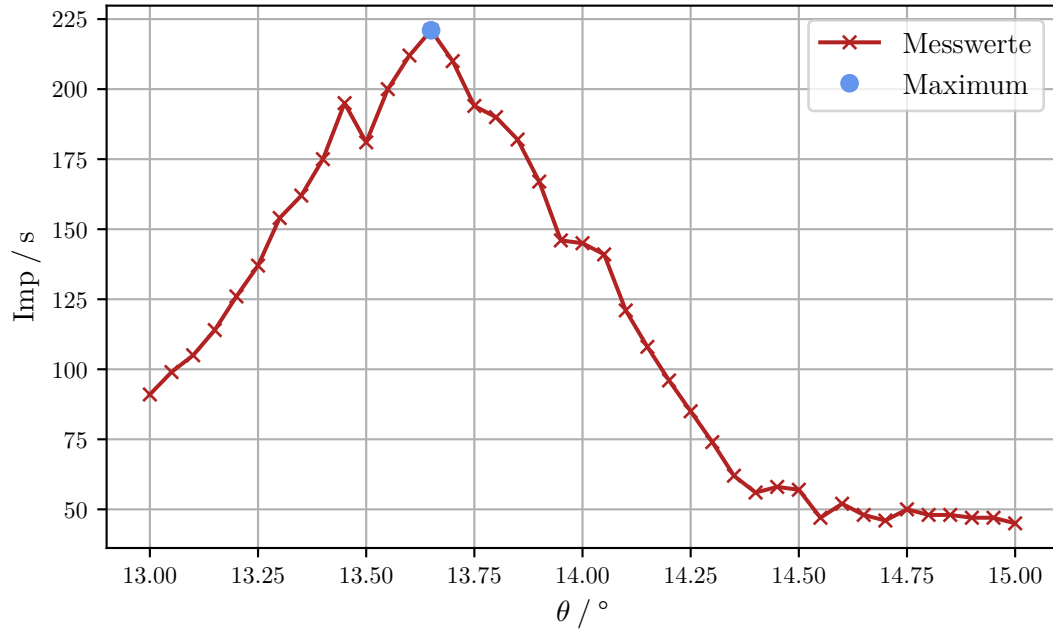


Abbildung 3: Messwerte zur Überprüfung der Braggbedingung. Diese und alle weiteren Grafiken wurden mit *matplotlib* [1] erstellt.

4.2 Emissionsspektrum einer Cu-Röntgenröhre

Zunächst wurde eine umfangreiche Messreihe zum Emissionsspektrum der Cu-Röntgenröhre aufgenommen. Diese ist in Abbildung 4 dargestellt. In dieser Abbildung sind sowohl der Bremsberg, als auch die K_α - und K_β -Linie zu sehen. Es wurde erwartet, dass dieser Messreihe ein Grenzwinkel entnommen werden kann. Dieser ist jedoch nicht eindeutig bestimmbar. Der Theoriewert für den Grenzwinkel der Kupferanode liegt bei $\theta_{\text{Grenz}} = 5,05^\circ$. Dazu lässt sich die minimale Wellenlänge $\lambda_{\text{min}} = 35,45 \text{ pm}$ zuordnen.

Zur besseren Analyse der charakteristischen Strahlung wird eine detailliertere Messung über die beiden K -Linien aufgenommen. Diese Messdaten werden in Abbildung 5 dargestellt. Zu den K -Linien kann nun die Halbwertsbreite der beiden Peaks bestimmt werden. Dazu wird mithilfe einer konstanten Geraden, welche den Wert $y = \frac{N_{\text{max}}}{2}$ hat, grafisch ausgewertet, an welchen Stellen sich der jeweilige Peak und die jeweilige Gerade schneiden. Dies ist ebenfalls in Abbildung 5 dargestellt. Es ergeben sich für jeden Peak 2 Winkel θ . Es kann zu jedem Winkel, durch die Braggbedingung (8), eine Wellenlänge zugeordnet werden und zu jeder Wellenlänge somit auch eine Energie. Daher kann nun

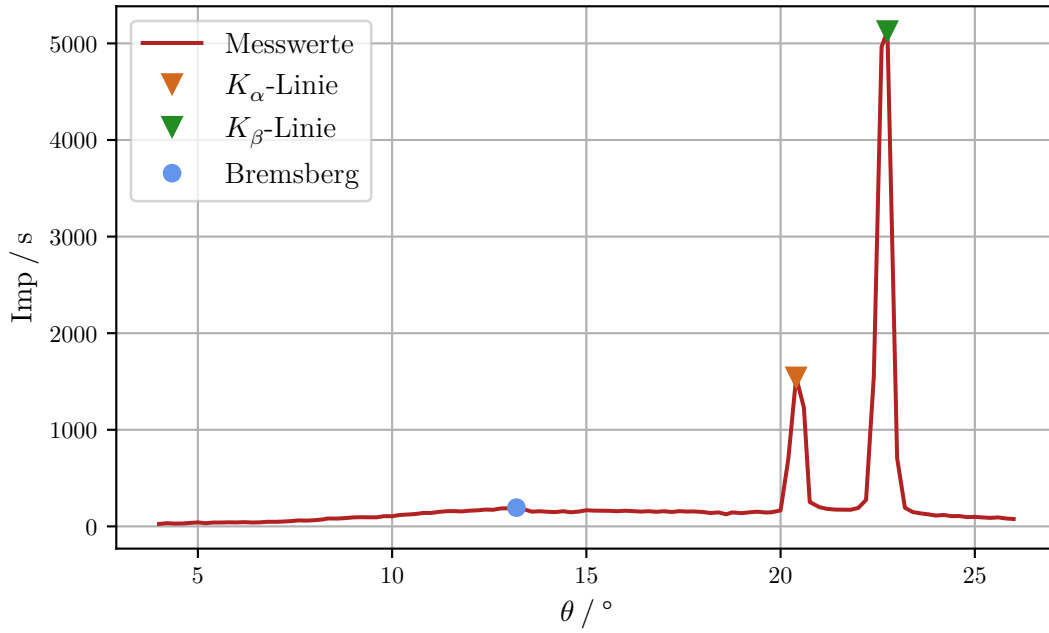


Abbildung 4: Messwerte zum Emissionsspektrum eine Cu-Röntgenröhre.

eine Energiedifferenz zwischen den beiden Winkeln eines Peaks errechnet werden. Dies ist in Tabelle 2 dargestellt. Des Weiteren kann nun ein genauere Energiewert E für die beiden K -Linien festgestellt werden. Aus der gemessenen Energie an den Peaks und der Energiedifferenz der Halbwertsbreite kann das Auflösungsvermögen für die beiden K -Linien bestimmt werden. Das Auflösungsvermögen kann über den Zusammenhang

$$A = \frac{E}{\Delta E}$$

berechnet werden. Dieses wird ebenfalls in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: In dieser Tabelle werden die Energie E , die Energiedifferenz ΔE und das Auflösungsvermögen A der K -Linien dargestellt.

K-Linie	E / eV	$\Delta E / \text{eV}$	A
α	7,98	0,16	49,94
β	8,83	0,19	47,68

Unter Verwendung dieser Messwerte können die Abschirmkonstanten für Kupfer bestimmt werden. Diese werden mit den Gleichungen (4), (5) und (6) berechnet. Es wird $E_{K,\text{abs}} = 8,988 \text{ keV}$ [4] verwendet. Mit den Energien aus Tabelle 2 ergeben sich die Abschirmkonstanten $\sigma_{2,\text{exp}} = 11.75$ und $\sigma_{3,\text{exp}} = 18.79$. Die zugehörigen Theoriewerte lauten $\sigma_{1,\text{theo}} = 3.29$, $\sigma_{2,\text{theo}} = 11.95$ und $\sigma_{3,\text{theo}} = 23.99$.

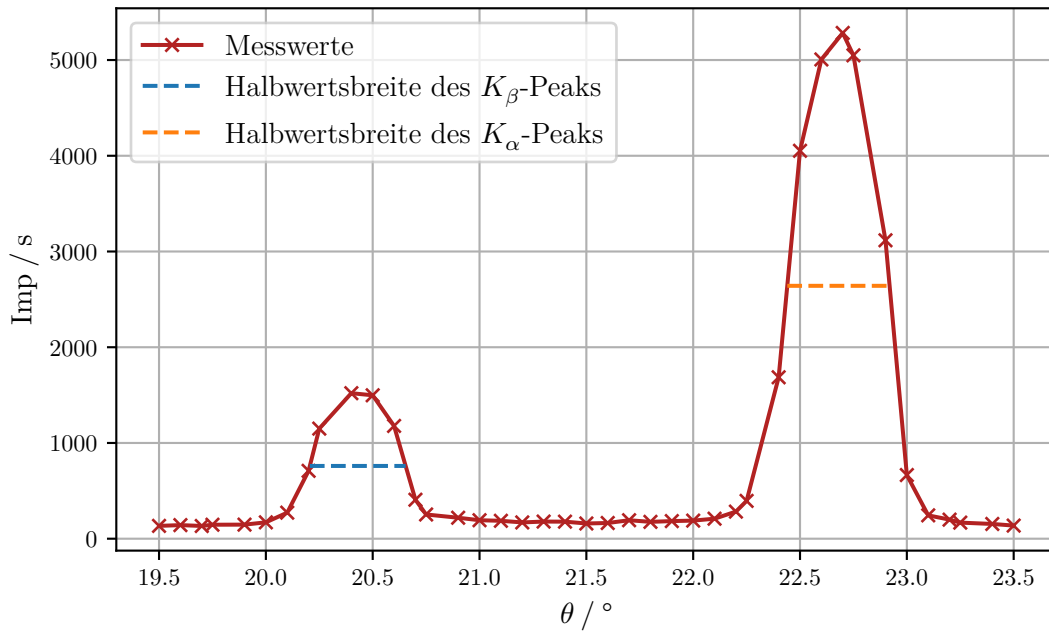


Abbildung 5: Detailspektrum der Kupferanode um die K -Linien.

4.3 Absorptionsspektren verschiedener Stoffe

Im letzten Teil dieses Versuchs werden die Absorptionsspektren verschiedener Stoffe betrachtet. Anhand der K -Kanten der Spektren lassen sich die Absorptionsenergien der jeweiligen Stoffe grafisch ermitteln. Diese können wiederum genutzt werden um die Abschirmkonstanten σ_K nach Gleichung 7 abzuschätzen.

4.3.1 Bestimmung der Absorptionsenergie und der Abschirmkonstante

Zur Bestimmung der Absorptionsenergie E_{abs} der K -Kante wird ein Mittelwert aus den absoluten Maxima und Minima der Messwerte gebildet. Alternativ könnten auch alle Messwerte außerhalb der Kantenstruktur gemittelt werden, jedoch führt dies aufgrund der statistischen Fluktuation der Messwerte nicht unbedingt zu einem besseren Ergebnis. Durch Einzeichnen des Mittelwertes in die Grafik kann ein Schnittpunkt einer horizontalen Linie mit der Messwertkurve bestimmt werden. Da häufig kein Messwert in unmittelbarer Nähe des Mittelwertes zu finden ist, wird ein linearer Zusammenhang für die K -Kante zwischen den benachbarten Messwerten approximiert. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 6 zu sehen.

Für Zink ergibt sich nach Feststellen eines Winkels $\theta_K = 18,76^\circ$ eine Absorptionsenergie von $E_{\text{abs}} = 9,57 \text{ keV}$. Diese folgt durch Anwenden der Braggbedingung (Gleichung 8) und Umrechnen der Wellenlänge in eine Energie mittels Gleichung 2. Die Abschirmkonstante σ_K kann anschließend über Gleichung 7 bestimmt werden. Für Zink ergibt sich $\sigma_K = 3.68$

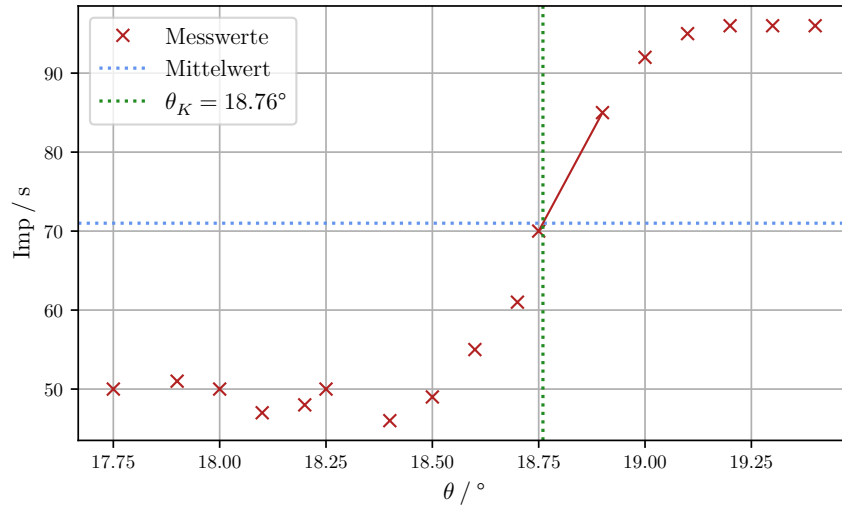


Abbildung 6: Absorptionsspektrum von Zink-30.

Analog wird das Verfahren für vier weitere Stoffe durchgeführt, die jeweiligen Grafiken können den Abbildungen 8 bis 11 im Anhang entnommen werden. Die Ergebnisse der Auswertung dieser Grafiken sind in Tabelle 3 den Theoriewerten gegenüber gestellt. Die relativen Abweichungen berechnen sich gemäß Gleichung 9.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Messergebnisse und Literaturwerte [4] zur Bestimmung der Absorptionsenergien und Abschirmkonstanten.

	$\theta_K^{\text{Lit}} / ^\circ$	$E_{\text{abs}}^{\text{Lit}} / \text{keV}$	σ_K^{Lit}	$E_{\text{abs}} / \text{keV}$	σ_K	$\Delta_{\text{rel}}(E_{\text{abs}}) / \%$	$\Delta_{\text{rel}}(\sigma_K) / \%$
Zn-30	18,60	9,65	3,56	9,57	3,68	0,82	3,25
Ga-31	10,37	10,37	3,61	10,22	3,81	1,43	5,52
Br-35	13,23	13,47	3,85	13,19	4,19	2,11	8,71
Zr-40	9,86	17,99	4,00	15,63	4,51	2,93	12,87
Sr-38	11,04	16,10	4,10	17,28	4,83	3,94	17,92

4.4 Bestimmung der Rydbergkonstante

Nach Gleichung 3 ist die Bindungsenergie E_n proportional zum Quadrat der effektiven Kernladungszahl z_{eff} . Mit $n = 1$ ist der Proportionalitätsfaktor die Rydbergenergie $R_\infty = 13,606 \text{ eV}$. Aus den zuvor bestimmten Messergebnissen der Absorptionsenergien und Abschirmkonstanten lässt sich ein experimenteller Wert der Konstante ermitteln. Dazu wird die Wurzel der Absorptionsenergie E_{abs} gegen die effektive Kernladungszahl aufgetragen. Durch eine lineare Regression können die Parameter der Geraden $f(x) = ax + b$ bestimmt werden. Durch das Quadrat der Steigung a ist ein experimenteller Wert der Rydbergenergie gegeben.

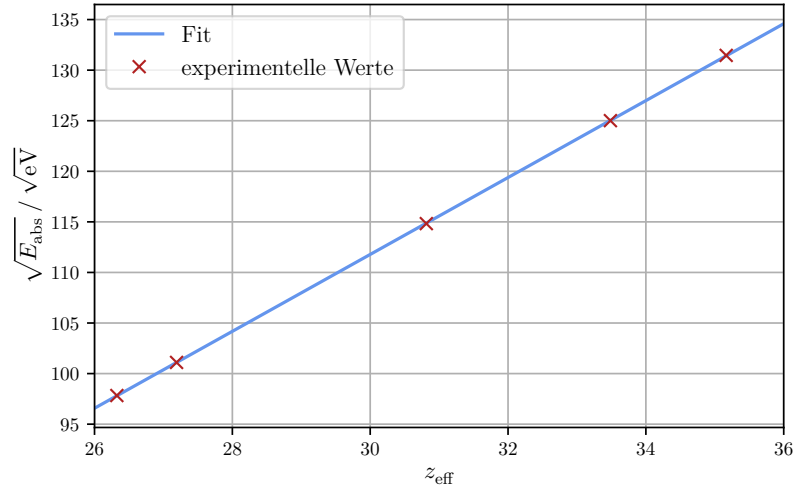


Abbildung 7: Bestimmung der Rydbergenergie mittels linearer Regression durch *Scipy* [2].

Die Parameter der linearen Regression ergeben sich zu

$$a = 3,80 \sqrt{\text{eV}} \quad b = -2,26 \sqrt{\text{eV}}.$$

In der Theorie sollte $b = 0$ gelten. Durch quadrieren von a folgt die Rydbergenergie

$$R_{\infty} = 14,45 \text{ eV}$$

Dies stellt eine relative Abweichung gemäß Gleichung 9 von $\Delta(R_{\infty}) = 6,2 \%$ dar.

5 Diskussion

Der in Unterabschnitt 4.1 experimentell bestimmte Glanzwinkel $\theta_{\text{Glanz}} = 13,65^\circ$ weicht um $\Delta\theta_{\text{Glanz}} = 2,5 \%$ von dem Theoriewert $\theta_{\text{Glanz, theo}} = 14^\circ$ ab. Diese Abweichung ist im Rahmen der Messgenauigkeit akzeptabel, wirkt sich jedoch auf die Güte der weiteren Messwerte aus. Ursachen für diese Abweichung könnten in der Kalibrierung des Messgerätes und in Ungenauigkeiten der Winkeleinstellung des Stellmotors liegen.

Bei der Untersuchung des Emissionsspektrums der Kupferanode wurden experimentelle Werte der K -Linien bestimmt. Diese weisen Abweichungen von $\Delta K_{\alpha} = 0,3 \%$ und $\Delta K_{\beta} = 1,34 \%$ auf, was ebenfalls auf die Kalibrierung des Gerätes zurückzuführen sein könnte. In Anbetracht der zuvor bestimmten Messunsicherheit von $2,5 \%$ bestätigen diese Messwerte die Theorie. Wie in Unterabschnitt 4.2 beschrieben konnte kein Grenzwinkel experimentell aufgenommen werden, obgleich der Bereich des Literaturwertes abgemessen wurde. Eine Ursache dafür könnte ein Hintergrundrauschen des Geiger-Müller-Zählrohres sein, welches keine Differenziation des Beginns der Röntgenphänomene zum Grundrauschen erlaubt.

Anschließend wurde das Auflösungsvermögen der Messapparatur bestimmt. Der Wert lässt sich nicht mit einem Literaturwert vergleichen. Allerdings kann angenommen werden, dass der Wert aussagekräftig ist, da die nötigen Werte zur Berechnung des Auflösungsvermögens keinen großen Abweichungen unterliegen.

Im letzten Teil des Messabschnittes zum Emissionsspektrum wurden die Abschirmkonstanten für Kupfer aus den Emissionsenergien bestimmt. Zu σ_1 kann kein experimenteller Wert bestimmt werden, da sich mit der vorhandenen Apparatur $E_{K,abs}$ nicht messen lässt. Die Abschirmkonstante σ_2 wurde mit einer Abweichung von 1.71% und σ_3 mit einer Abweichung von 21.66% bestimmt.

Im letzten Messabschnitt wurden die Absorptionsenergien und die Abschirmkonstanten für fünf verschiedene Stoffe berechnet. Dabei liegen die Abweichungen der Absorptionsenergien lediglich zwischen 0.82% und 3.94%. Eine zusätzliche Fehlerquelle könnte in der Installation der verschiedenen Absorberstoffe in der Messapparatur liegen, da geringfügige Verstellungen der Winkel der einzelnen Geräte nicht auszuschließen sind. Die Abweichungen der Abschirmkonstanten zu den Literaturwerten liegen zwischen 3.25% und 17.92%. Eine Ursache hierfür könnte die Verstärkung der Messunsicherheiten durch Approximationen und Fehlerfortpflanzung in der Berechnung der Abschirmkonstanten aus den Absorptionsenergien sein.

Zuletzt wurde mithilfe des Moseley-Gesetzes die Rydbergenergie bestimmt. Diese weicht um 6.26% von dem Literaturwert ab, was ebenfalls auf selbige Gründe zurückzuführen ist.

Es ergibt sich, dass die Qualität der Messwerte zur Verifikation der Theorieerwartungen ausreicht, jedoch nicht für präzise Messungen geeignet ist.

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [2] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [3] *V602 - Röntgenemission und -absorption*. TU Dortmund. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1977250/mod_resource/content/4/V602.pdf (besucht am 20.04.2022).
- [4] *X-Ray Transition Energies Data Base*. NIST. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/XrayTrans/search.pl?element=Cu&lower=&upper=&units=eV> (besucht am 24.04.2022).

Anhang

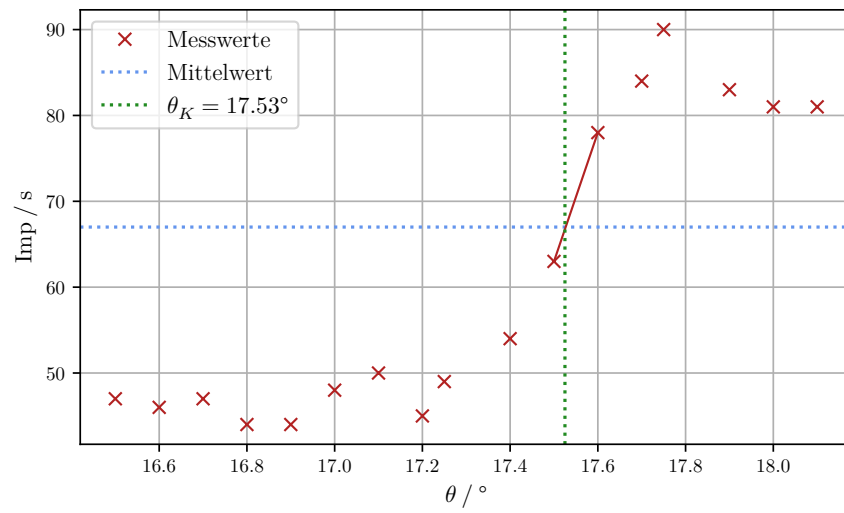


Abbildung 8: Absorptionsspektrum von Gallium-31.

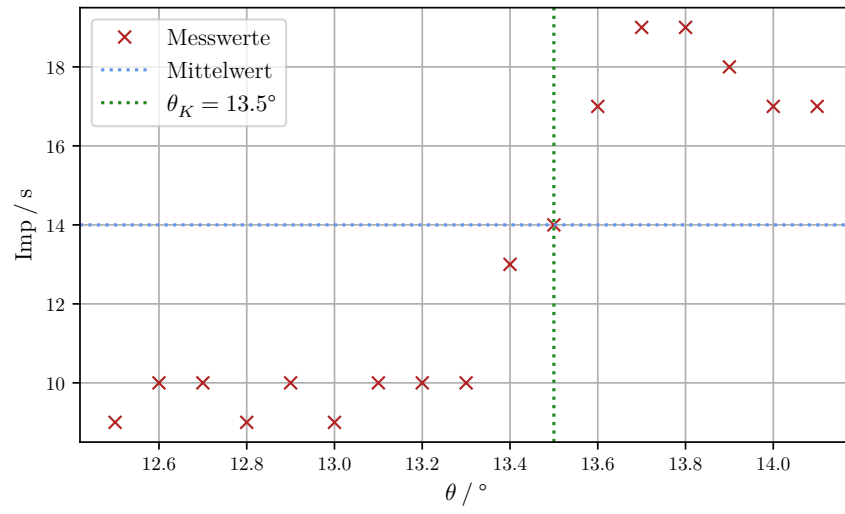


Abbildung 9: Absorptionsspektrum von Brom-35.

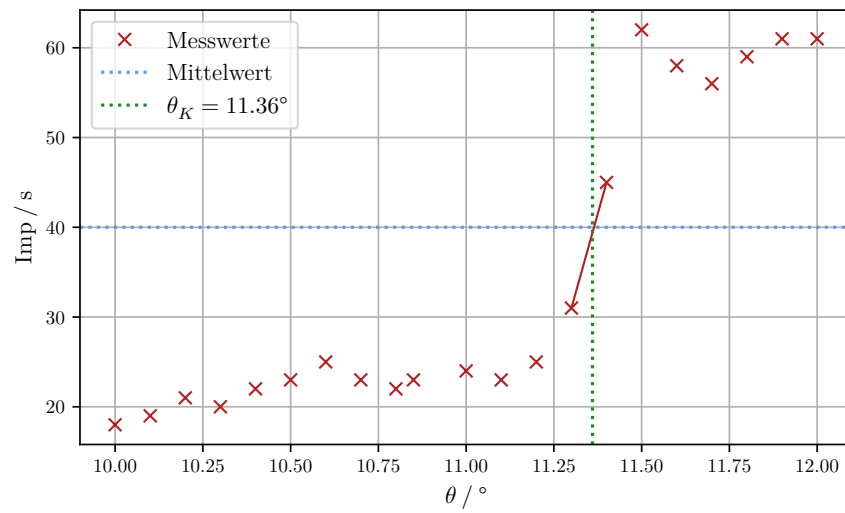


Abbildung 10: Absorptionsspektrum von Strontium-38.

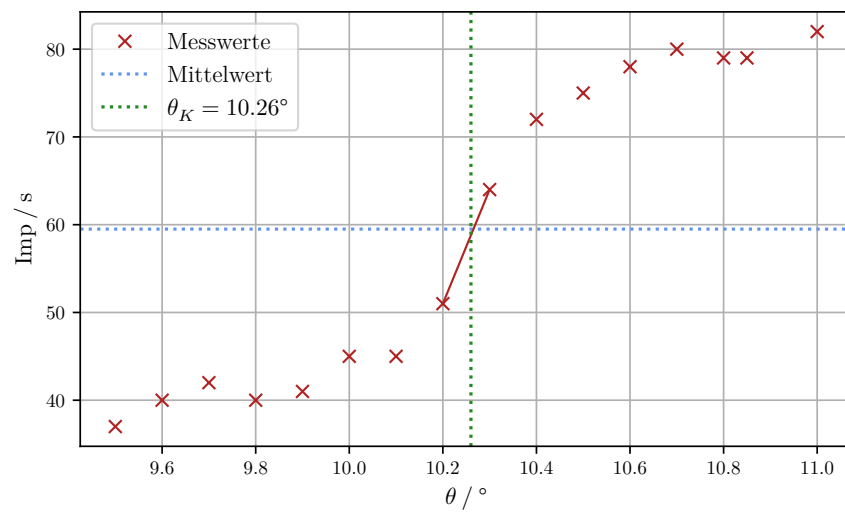


Abbildung 11: Absorptionsspektrum von Zirkonium-40.