

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

# **FORTGESCHRITTENEN PRAKTIKUM TECHNISCHE PHYSIK 1 & 2 PHY.M40 & PHY.M50**

Übungstitel: Comptoneffekt und Röntgenfluoreszenz

Betreuer: Krenn, Joachim, Ao.Univ.-Prof. Mag. Dr.

Name: Maximilian Pfandner / Daniel Unterhuber

Kennzahl: 678 Matrikelnummer: 12003925 / 12007444

Datum: 22.10.2022 WS 2022/23 SS

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>2 Voraussetzungen und Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Röntgenstrahlung . . . . .	2
2.2 Comptoneffekt . . . . .	2
2.3 Röntgenfluoreszenz . . . . .	3
<b>3 Beschreibung der Versuchsanordnung</b>	<b>3</b>
3.1 Comptoneffekt . . . . .	4
3.1.1 Kalibrierung für die Messungen . . . . .	4
3.1.2 Aufnahme der Compton-Spektren bei verschiedenen Winkeleinstellungen . . . .	4
3.2 Röntgenfluoreszenz . . . . .	4
3.3 Untersuchung einer unbekannten Probe: Bestimmung der Zusammensetzung eines Meteoriten . . . . .	4
<b>4 Material- und Geräteliste</b>	<b>5</b>
<b>5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse</b>	<b>5</b>
5.1 Comptoneffekt . . . . .	5
5.2 Röntgenfluoreszenz . . . . .	7
5.3 Meteorit . . . . .	8
<b>6 Auswertung</b>	<b>9</b>
6.1 Comptoneffekt . . . . .	9
6.2 Röntgenfluoreszenz . . . . .	10
6.3 Meteorit . . . . .	10
<b>7 Diskussion und Zusammenfassung</b>	<b>11</b>
7.1 Comptoneffekt . . . . .	11
7.2 Röntgenfluoreszenz . . . . .	11
7.3 Meteorit . . . . .	11

# Experimente der Atom- und Quantenphysik mit Röntgenstrahlen

---

## 1 Aufgabenstellung

1. Bestimmung der Elektronenmasse mit Hilfe des Comptoneffekts durch ein Röntgengerät der Fa. Leybold Didaktik und die Veranschaulichung des Teilchencharakters von Photonen.
2. Demonstration des Zusammenhangs zwischen Röntgenfluoreszenzpatterns verschiedener Stoffe respektive Elemente und deren Zusammensetzung, sowie der Abhängigkeit von der Energie der emittierten Röntgenstrahlen beziehungsweise der Abschirmkonstante von der Ordnungszahl des betrachteten Elements.
3. Bestimmung der Zusammensetzung eines Eisenmeteoriten mittels Röntgenfluoreszenzanalyse.

## 2 Voraussetzungen und Grundlagen

### 2.1 Röntgenstrahlung

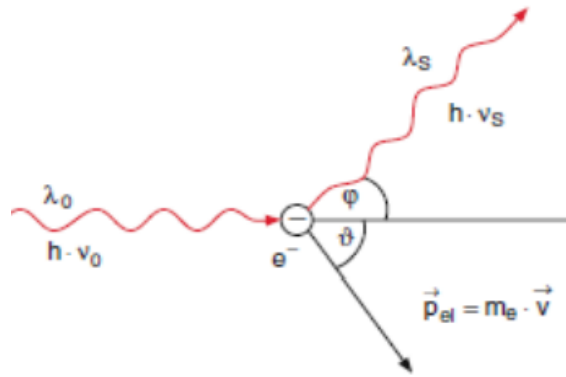
Als Röntgenstrahlung bezeichnet man im Allgemeinen elektromagnetische Strahlung in einem Frequenzbereich zwischen  $0,5 \cdot 10^{18}$  Hz und  $60 \cdot 10^{18}$  Hz. Bei technischen Anwendungen wird besagte Strahlung (hier Bremsstrahlung) durch eine Röntgenröhre erzeugt. Dabei werden Elektronen aus einer Glühkathode emittiert und mit einer Anodenspannung von einigen Kilovolt (kV) auf dieselbe beschleunigt. Treffen die beschleunigten Elektronen auf die Anode, werden sie durch Wechselwirkungsprozesse mit den Atomen des Anodenmaterials abgebremst und verlieren dabei Energie die in Form von Brems- beziehungsweise Röntgenstrahlung emittiert wird.

### 2.2 Comptoneffekt

Der Comptoneffekt beschreibt das Phänomen der Streuung von Photonen an Elektronen. Dabei wird der Teilchencharakter des Photons in dem Sinne veranschaulicht, dass eine sehr gute Beschreibung des Phänomens mittels Energie und Impulserhaltung analog zu dem Modell eines elastischen Teilchenstoß gelingt. Setzt man die Energie und den Impuls des Elektrons beziehungsweise des Photons in die zugehörigen Gleichungen ein, erhält man nach einigen elementaren Umformungen:

$$E_S = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \varphi)} \quad (1)$$

Hier ist  $E_0$  beziehungsweise  $E_S$  die Photonenenergie vor respektive nach der Streuung. Weiters treten der Streuwinkel  $\phi$  sowie die Lichtgeschwindigkeit  $c$  und die Ruhemasse des Elektrons  $m_0$  auf.



**Abbildung 1:** Zeigt den Streuvorgang beim Comptonprozess ( $\phi$  ist der Streuwinkel des Photons,  $\theta$  der des Elektrons), weiters sind die Terme für den Elektronen- und Photonenimpuls vor und nach dem Stoßprozess dargestellt[3]

## 2.3 Röntgenfluoreszenz

Als Röntgenfluoreszenz wird das durch Röntgenstrahlung verursachte Herausschlagen von Elektronen in inneren Atomschalen bezeichnet, das wiederum eine Emission von Röntgenquanten zufolge hat. Dies geschieht dadurch, dass das aus dem Atom geschlagenen Elektron durch ein Elektron aus einer energetisch höher liegenden Schale nachbesetzt. Die hierbei vorhandene Energiedifferenz zwischen der höher und der tiefer gelegenen Elektronenschale wird hierbei in Form von Röntgenstrahlung emittiert. Der Energieunterschied  $\Delta E$  bestimmt über  $\nu \cdot h = \Delta E$  die Frequenz  $\nu$  des korrespondierenden Photons, wobei  $h$  das Plank'sche Wirkungsquantum ist. In diesem Versuch wird die sogenannte  $K_\alpha$ - und  $K_\beta$ -Linie untersucht. Dabei meint man den Elektronenübergang von der 2. Schale in die innertste (K-Schale) bzw. von der 3. Schale in die K-Schale. Nach dem Moseleyschem Gesetz gibt es für leichtere Elemente mit Ordnungszahl  $Z < 30$  einen einfachen Zusammenhang:

$$\sqrt{\frac{E}{R_y}} = (Z - \sigma_{2,1}) \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}} \quad (2)$$

Dabei ist  $E$  die Energie,  $R_y \approx 13,6$  eV eine Konstante,  $Z$  die Ordnungszahl,  $n_i$  die  $i$ -te Schale und  $\sigma_{2,1}$  die Abschirmkonstante. Diese beschreibt den Einfluss der äußeren Elektronen. Bei der  $K_\alpha$ -Linie ist diese approximativ  $\sigma_{2,1} \approx 1$  und bei der  $K_\beta$ -Linie  $\sigma_{3,1} \approx 2$ . Für eine genaue Erläuterung wird hier auf das Buch Experimentalphysik 3 verwiesen[1][3][2].

## 3 Beschreibung der Versuchsanordnung

Das Röntgengerät steht stabil auf einem Tisch und ist über ein Netzgerät an das Stromnetz angeschlossen. Etwaige stromführende Kabel des Detektors, beziehungsweise des Goniometers, werden so gelegt, dass es weder zu einem Einhaken oder Abklemmen derselben kommen kann.

### 3.1 Comptoneffekt

#### 3.1.1 Kalibrierung für die Messungen

Die Eintrittsöffnung des Kollimators ist mit einem Zr-Filter versehen und befindet sich in der für das Einbringen des Kollimators vorhandenen Einschuböffnung. Am Kollimatorausgang ist eine Abschwächblende aufgesetzt. Der Detektor ist auf  $0^\circ$  gestellt und der Probenstisch entfernt. Das Gerät ist mit der KVA-Box des Cassylab 2 verbunden. Zudem zeigt der an das Gerät angeschlossene PC-Bildschirm das zugehörige Cassylab 2 Programm, welches für die Betriebsdauer des Geräts geöffnet bleibt. Die für die Erzeugung der Röntgenstrahlen notwendige Hochspannung ist auf  $U_E = 30$  kV begrenzt und der Experimentenraum ist mit einer Bleiglasscheibe verschlossen. Der zur Spannung gehörige Strom  $I_E = 0,05$  mA ist am Bedienfeld des Röntgengeräts eingestellt. Im Cassylab-2-Programm werden bei den messungsrelevanten Einstellgrößen folgende Werte angezeigt bzw. gewählt: Vielkanalmessung mit 512 Kanälen, negative Pulse mit einem Verstärkungsfaktor von  $K_f = -4$  und eine Messzeit von  $t_m = 5$  min.

#### 3.1.2 Aufnahme der Compton-Spektren bei verschiedenen Winkeleinstellungen

Die Abschwächblende ist entfernt und der Probenstisch wieder in der dafür vorgesehenen Steckvorrichtung eingeschoben. Am Probenstisch liegt ein Plexiglasquader auf. Das Goniometer verharrt samt Detektor in der bisher eingenommenen Position, während der Experimentierraum wiederum, nach aktivierter Hochspannung verriegelt ist. Die zuvor eingerichteten Cassylab-2-Parameter bleiben unverändert. Der Hochspannung folgende Emissionsstrom ist nun auf  $I_E = 1$  mA begrenzt. Der Experimentierraum ist geschlossen und die Hochspannung aktiv.

### 3.2 Röntgenfluoreszenz

Sowohl Kollimatorausgang als auch der Detektor sind 6 cm von der Drehachse des Goniometers entfernt. Im Probenhalter ist das Kalibrierblech eingelegt. Der Targetwinkel steht in einem  $45^\circ$  Grad Winkel zur Drehachse. Der Sensorwinkel auf  $90^\circ$  bezogen auf denselben Bezugspunkt. Für die betreffende Analyse und notwendige Kalibrierung wird der Parameter "Verstärkungsfaktor" auf  $K_f = -2,5$  verringert. Die Messplättchen (Zink (Zn) und Eisen (Fe) für die Referenzmessung und Titan (Ti), Eisen (Fe), Nickel (Ni), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Zirkonium (Zn), Molybdän (Mo) und Silber (Ag)) für die Referenzmessung und die Messreihe liegen für das Einlegen auf den Probenstisch bereit.

### 3.3 Untersuchung einer unbekannten Probe: Bestimmung der Zusammensetzung eines Meteoriten

Für die Röntgenfluoreszenzanalyse der unbekannten Probe bleiben alle Winkeleinstellungen sowie die gesetzten Parameter mit Ausnahme der Messzeit  $t_m = 10$  min gleich. Die Probe befindet sich bereits am Probenstisch, die Experimentenkammer ist verriegelt und die Hochspannung aktiv.

## 4 Material- und Geräteliste

**Tabelle 1:** Auflistung der verwendeten Materialien und Gerätschaften

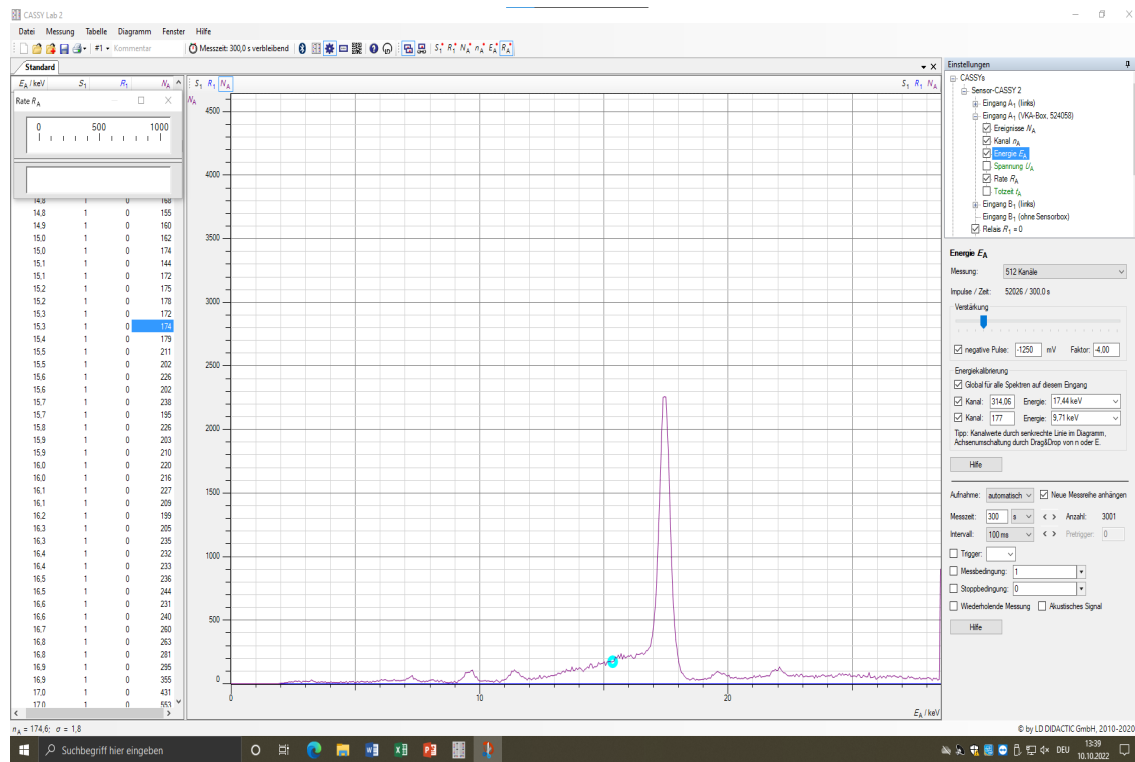
Material/Gerät	Nummer	Typ
Sensor-Cassy 2	524 013	Leybold
VKA-Box MCA-Box	524 058	Leybold
Röntgengerät	554 800	Leybold
verschiedene Metalle		Eisen Titan Nickel Zink Kupfer Zirkonium Molybdän Silber
Meteorit		Eisenmeteorit
Cassy Lab 2		Software

## 5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

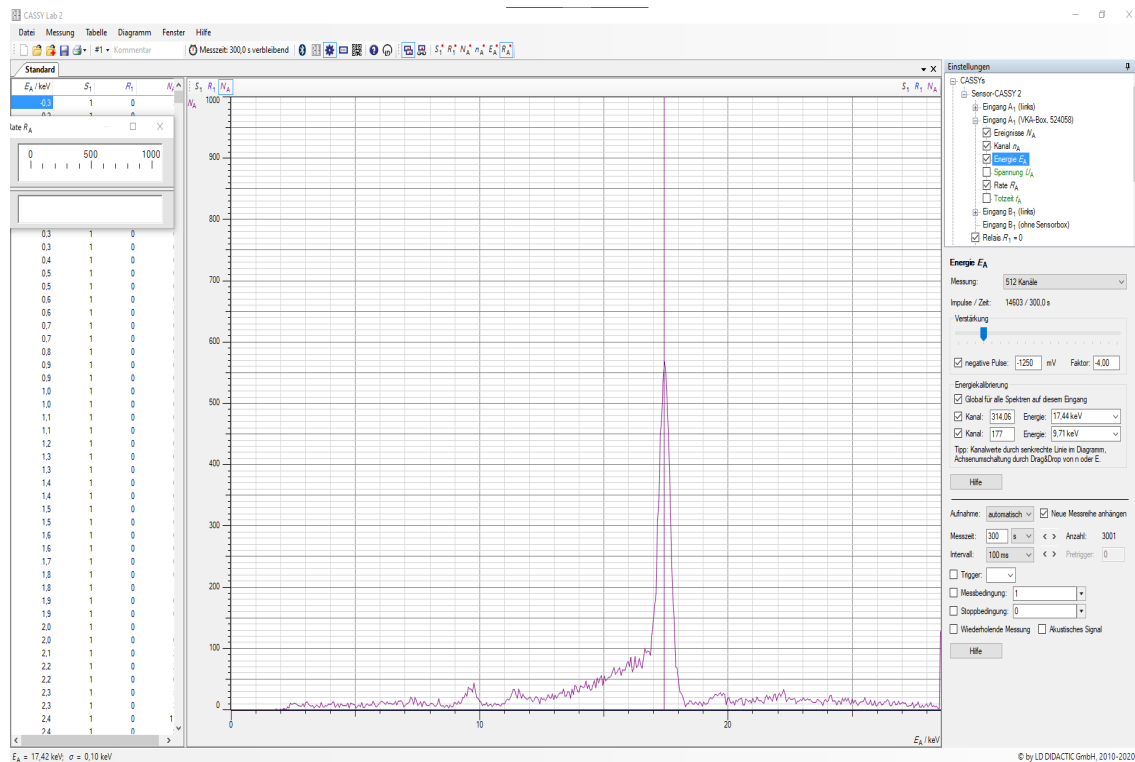
### 5.1 Comptoneffekt

Zuerst wird das Kalibrierspektrum aufgenommen (siehe Abbildung 2). Die Peaks werden anhand der Programmfunktion 'Peakschwerpunkt berechnen' identifiziert. Bei der globalen Energiekalibrierung werden nun der erste Peak der Energie der Au  $L_\alpha$  (9,71 keV) und der höchste Peak der Energie der Mo  $K_\alpha$  (17,44 keV) zugeordnet. Weiters wird das Spektrum als csv-Datei gespeichert.

Anschließend wird der Plexiglas-Streukörper auf den Targettisch aufgelgt und der Targetwinkel auf 20° eingestellt. Nun werden die Energiespektren mithilfe des Sensors bei einem Sensorwinkel von 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135° und 150° aufgenommen, sowie als csv-Datei gespeichert. Die Peaks werden wiederum mithilfe der Funktion 'Peakschwerpunkt berechnen' identifiziert (siehe Abbildung 3). Hier ist ein großer Vorteil, dass auch direkt die Unsicherheit berechnet wird. Jedoch wird bei der weiteren Auswertung von der größten angezeigten Unsicherheit von 0,2 keV für alle Messdaten ausgegangen. In der Tabelle 2 sind die Messergebnisse gelistet.



**Abbildung 2:** Screenshot des Kalibrierspektrums beim Versuch zum Comptoneffekt. Der erste Peak entspricht der Energie der Au  $L_{\alpha}$  (9,71 keV) und der höchste Peak der Energie der Mo  $K_{\alpha}$  (17,44 keV)



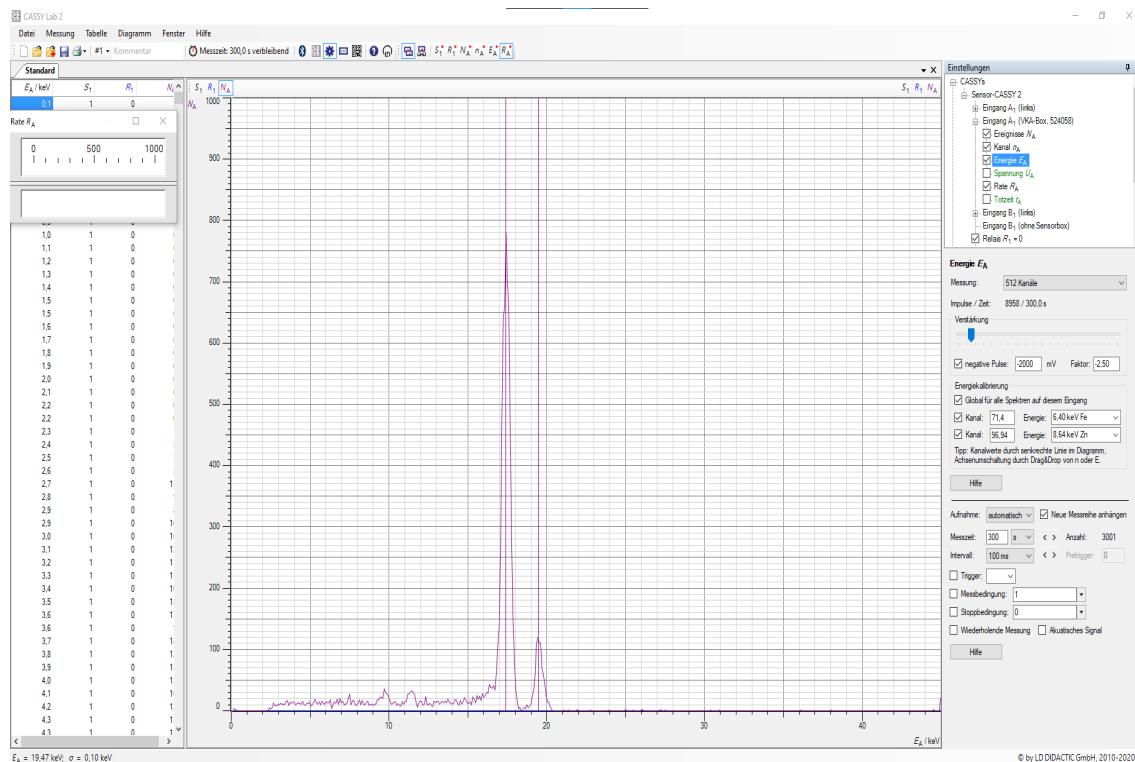
**Abbildung 3:** Screenshot des aufgenommenen Spektrums beim Versuch zum Comptoneffekt beim Sensorwinkel von  $30^\circ$ . Mit der vertikalen Linie ist der berechnete Peakschwerpunkt aufgezeigt. Unten links ist der Wert mit der dazugehörigen Unsicherheit dargestellt ( $E_A = E_S = 17,42$  keV,  $\sigma = 0,1$  keV).

**Tabelle 2:** Messergebnisse beim Versuch zum Comptoneffekt, wobei  $\varphi$  der Winkel des Sensors ( $\Delta\varphi = 0,1^\circ$ ) und  $E_S$  die Energie des jeweiligen Peakschwerpunktes darstellt ( $\Delta E_S = 0,2$  keV).

$\varphi / ^\circ$	$E_S / \text{keV}$
30	17,4
45	17,4
60	17,3
75	17,1
90	16,9
105	16,8
120	16,7
135	16,6
150	16,5

## 5.2 Röntgenfluoreszenz

Auch hier wird zuerst das Kalibrierspektrum aufgenommen. Hier sei angemerkt, dass nicht nur ein Spektrum aufgenommen wurde, sondern zwei (Zink- und Eisenblech). Anschließend werden nacheinander die verschiedenen Metalle eingelegt und jeweils ein Spektrum aufgenommen, die Peakschwerpunkte berechnet und als csv-Datei abgespeichert (siehe Abbildung 4). In einem Spektrum sollte man die  $K_\alpha$ - und die  $K_\beta$ -Linie sehen. Es stellt sich heraus, dass das nicht bei allen Metallen gut funktioniert hat (siehe Tabelle 3).



**Abbildung 4:** Screenshot des aufgenommenen Spektrums von Molybdän beim Versuch zur Röntgenfluoreszenz. Die  $K_\alpha$ - ( $E = (17,42 \pm 0,11)$  keV) und die  $K_\beta$ -Linie ( $E = (19,47 \pm 0,10)$  keV) sind als vertikale Linien gekennzeichnet.

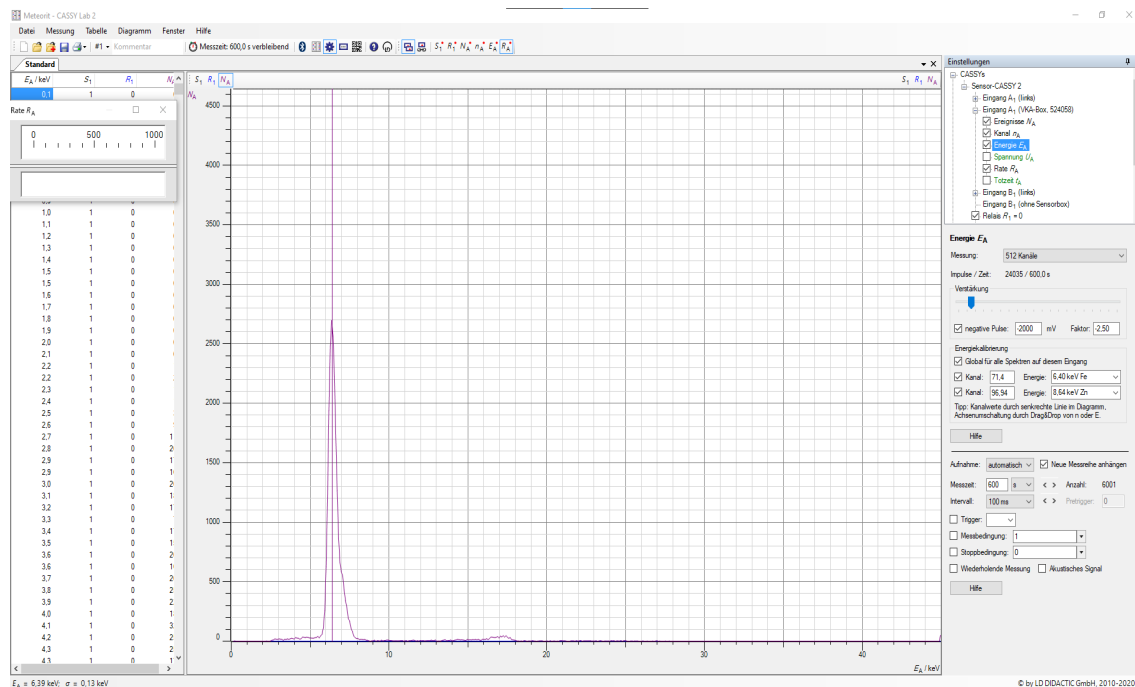


**Tabelle 3:** Messergebnisse beim Versuch zur Röntgenfluoreszenz, wobei  $E_{K_\alpha}$  die Energie des Peakschwerpunktes der  $K_\alpha$ -Linie darstellt und  $E_{K_\beta}$  jene der  $K_\beta$ -Linie ( $\Delta E_{K_\alpha} = \Delta E_{K_\beta} = 0,2$  keV).

Element	$E_{K_\alpha}$ / keV	$E_{K_\beta}$ / keV
Eisen	6,4	
Kupfer	8,0	8,8
Molybdän	17,4	19,5
Nickel	7,5	8,2
Silber	21,8	24,5
Titan	4,6	
Zink	8,6	9,6
Zirkonium	15,8	17,6

### 5.3 Meteorit

Hier wird analog wie bei der Röntgenfluoreszenz vorgegangen. In der Abbildung 5 ist das Spektrum sichtbar. Dabei ist ein Peak besonders ausgeprägt. Jener bei  $E_{Meteorit} = (6,4 \pm 0,2)$  keV.

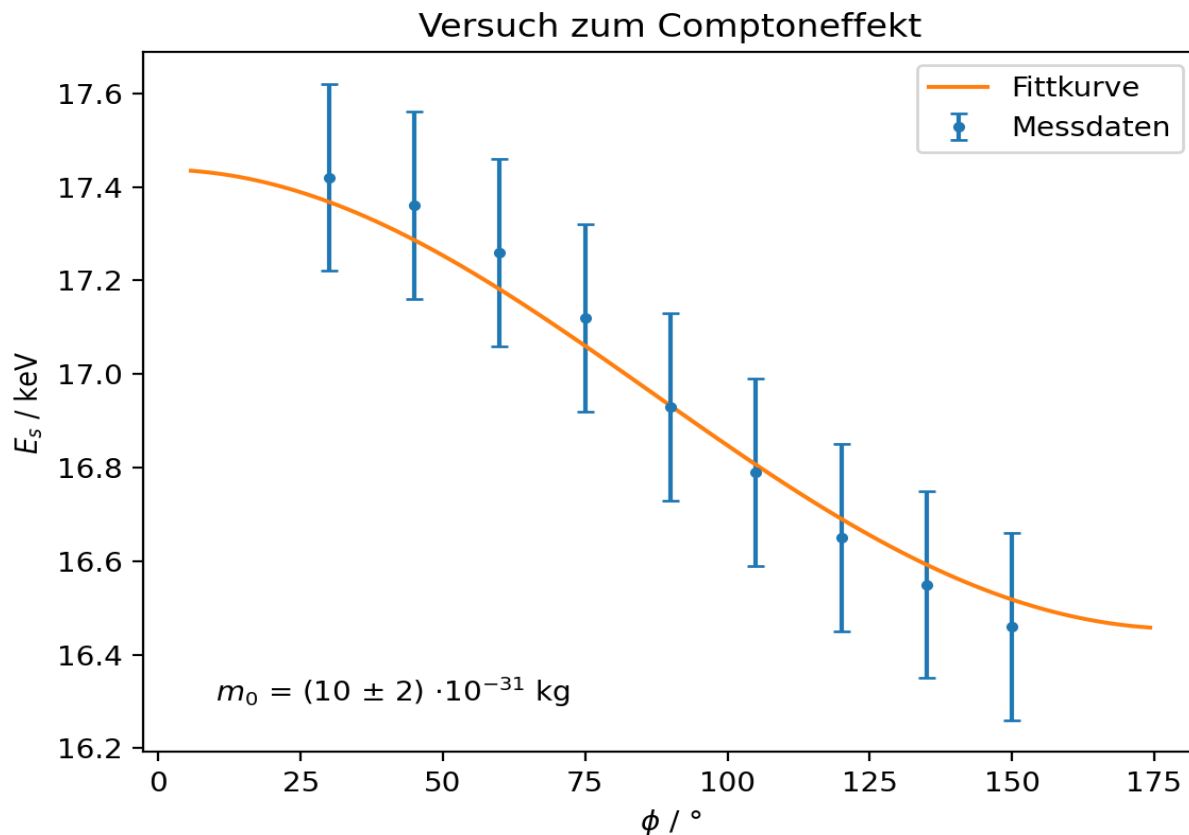


**Abbildung 5:** Screenshot des aufgenommenen Spektrums des Meteoriten anhand Röntgenfluoreszenz.

## 6 Auswertung

### 6.1 Comptoneffekt

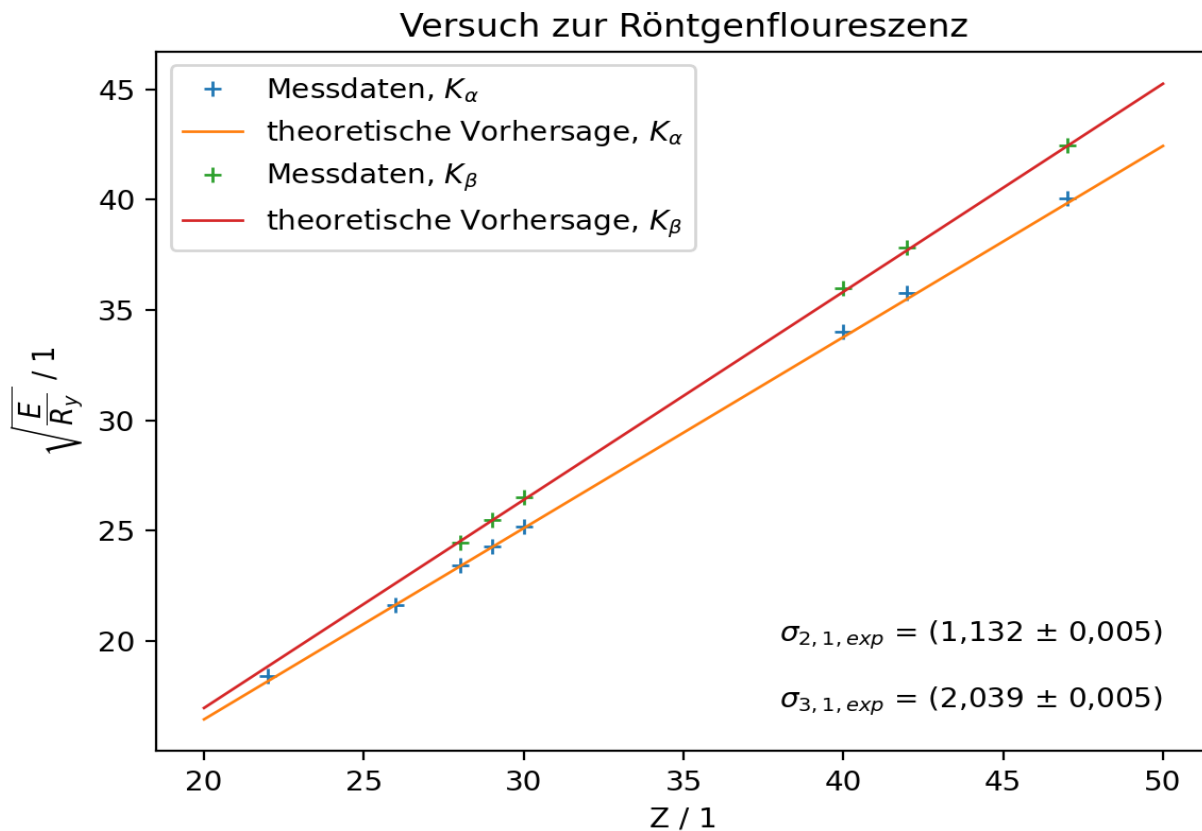
Die gemessenen Daten (siehe Tabelle 2) werden mit der zugehörigen Unsicherheit in einem Diagramm geplottet. Nun werden die Daten mithilfe des Moduls `scipy.optimize` nach der Gleichung gefittet, wobei die Elektronenmasse einen freier Parameter darstellt. Wie in der Abbildung 6 ersichtlich, beträgt der Wert für die Ruhemasse des Elektrons  $m_0 = (10 \pm 2) \cdot 10^{-31}$  kg. Das Modul `scipy.optimize` hat die Unsicherheit des Wertes in der Größenordnung von  $10^{-60}$  kg berechnet. Das erscheint aber sehr unrealistisch. Deshalb wurde die Unsicherheit mithilfe der Ableitungsmethode abgeschätzt.



**Abbildung 6:** Plot der aufgenommenen Messdaten beim Versuch mit dem Comptoneffekt. Auf der vertikalen Achse ist die gemessene Energie in keV und auf der horizontalen Achse der Winkel in  $^\circ$  aufgetragen. In orange ist die Fitfunktion aufgetragen, mit dem freien Parameter  $m_0$ , der Ruhemasse des Elektrons.

## 6.2 Röntgenfluoreszenz

Die aufgenommenen Daten (siehe Tabelle 3) werden in einem Diagramm geplottet. Dabei wird nicht direkt die gemessene Energie, sondern die Quadratwurzel des Verhältnisses der Energie zur Konstanten  $R_y = 13,6$  eV in Abhängigkeit der Ordnungszahl aufgetragen. Zusätzlich erfolgt der Plot der theoretisch, vorhergesagten Geraden nach der Gleichung (siehe Abbildung 7). Weiters werden die Daten linear gefittet. Dabei kann nach der Gleichung die Abschirmkonstante experimentell bestimmt werden. Wie in der Abbildung 7 ersichtlich, beträgt diese für die  $K_\alpha$ -Linie  $\sigma_{2,1,exp} = 1,132 \pm 0,005$  und für die  $K_\beta$ -Linie  $\sigma_{3,1,exp} = 2,039 \pm 0,005$ .



**Abbildung 7:** Plot der aufgenommenen Messdaten beim Versuch zur Röntgenfluoreszenz. Auf der vertikalen Achse ist Quadratwurzel des Verhältnisses der gemessenen Energie  $E$  zur Konstanten  $R_y = 13,6$  eV und auf der horizontalen Achse die Ordnungszahl  $Z$  aufgetragen. Die Messdaten für die  $K_\alpha$ - und  $K_\beta$ -Linien sind als Kreuze eingezeichnet und die theoretischen Vorhersagen entsprechen der Geraden (siehe Legende). Aus den linearen Fit wurden die Abschirmkonstanten  $\sigma_{2,1,exp}$  und  $\sigma_{3,1,exp}$  bestimmt.

## 6.3 Meteorit

Wie im Spektrum (siehe Abbildung 5) ersichtlich, besteht der Meteorit hauptsächlich aus Eisen. Bei ungefähr 17 keV ist auch ein schwacher Ausschlag sichtbar. Das würde für einen kleinen Anteil an Molybdän sprechen. Weiters lässt sich bei genauer Betrachtung eine kleine Erhebung bei ungefähr 7 keV erkennen. Das würde bedeuten, dass auch ein kleiner Nickelanteil vorliegt.

## 7 Diskussion und Zusammenfassung

### 7.1 Comptoneffekt

Mithilfe eines Röntgengerätes wurde der Comptoneffekt untersucht. Dabei wurde bei verschiedenen Winkeln die Energie der Röntgenstrahlen gemessen. Anschließend wurden die Messdaten in einem Diagramm geplottet und mit der Gleichung gefittet (siehe Abbildung 6). Der freie Parameter  $m_0 = (10 \pm 2) \cdot 10^{-31}$  kg entspricht der Ruhemasse des Elektrons. Der Vergleich mit einem Tabellenwert  $m_{Tab} = 9,1096 \cdot 10^{-31}$  kg [4] bestätigt die Vorgehensweise bei diesem Versuch.

### 7.2 Röntgenfluoreszenz

Hier wurde das Röntgengerät genutzt, um die Röntgenfluoreszenz zu untersuchen. Dabei wurden verschiedene Metalle genutzt (Eisen, Kupfer, Molybden, Nickel, Silber, Titan, Zink, Zirkonium). Vergleicht man die theoretische Vorhersage mit den Messdaten, lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung feststellen. Bei der  $K_\alpha$ -Linie ist die Abweichung bei  $Z > 30$  erkennbar. Das ist damit zu erklären, dass der Einfluss der äußeren Elektronen mit steigender Elektronenzahl größer wird. Weiters wurden die Abschirmkonstanten zu  $\sigma_{2,1,exp} = 1,132 \pm 0,005$  und  $\sigma_{3,1,exp} = 2,039 \pm 0,005$  aus den experimentellen Daten ermittelt (siehe Abbildung 7).

### 7.3 Meteorit

Wie erwartet besteht der Meteorit laut Röntgenfluoreszenzanalyse hauptsächlich aus Eisen. Interpretiert man die schwach ausgeprägten Peaks nicht als Rauschen, so ergibt sich, dass der Meteorit Anteile an Molybdän und Nickel aufweist.

## Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. 5. Aufl. 2016. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 9783662490945. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1582044>.
- [2] Georg Koller. „Experimente der Atom und Quantenphysik: Compton-Effekt: Messung der Energie der gestreuten Photonen in Abhängigkeit vom Streuwinkel“. Skriptum. Graz: Karl Franzens Universität Univesität Graz, 2022. URL: [https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1918202/mod\\_resource/content/1/R%C3%B6ntgen-Anleitung-Comptoneffekt.pdf](https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1918202/mod_resource/content/1/R%C3%B6ntgen-Anleitung-Comptoneffekt.pdf).
- [3] Georg Koller. „Experimente der Atom- und Quantenphysik mit Röntgenstrahlung: Compton-Effekt: Messung der Energie der gestreuten Photonen in Abhängigkeit vom Streuwinkel“. Diss. Graz: Karl Franzens Universität Univesität Graz, 2022. URL: [https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1918203/mod\\_resource/content/1/R%C3%B6ntgen-Anleitung-RFA%20-%20Nr1.pdf](https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1918203/mod_resource/content/1/R%C3%B6ntgen-Anleitung-RFA%20-%20Nr1.pdf).
- [4] Spektrum. *LEXIKON DER PHYSIK Lexikon der Physik: Elektron*. Hrsg. von Spektrum. Heidelberg, 1998. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/elektron/4067>.