

6.7. Röntgenstrahlung – Erzeugung und bildgebende Verfahren

„X-rays will prove to be a hoax.“

— Lord Kelvin¹

SICHERHEITSHINWEISE:

- Da der Umgang mit Röntgenstrahlen potenziell gesundheitsschädlich ist, unterliegt er der Röntgenverordnung (RöV). Bei der Durchführung dieses Versuches sind die Anforderungen dieser Verordnung strikt einzuhalten. Bitte informieren Sie sich vor Versuchsbeginn entsprechend.
- Vor Versuchsbeginn ist das Röntgengerät auf sichtbare Schäden insbesondere an der Abschirmung (Fenster, ...) und am Sicherheitsschalter zu überprüfen. Eine beschädigte Anordnung darf nicht in Betrieb genommen werden.

Bei während dem Versuch auftretenden Beschädigungen ist der Versuch sofort abzubrechen und der Praktikumsleiter zu informieren.

Zusammenhang mit der Sportwissenschaft

Röntgenstrahlen durchdringen Materie, wobei die Absorption durch das durchdrungene Gewebe abhängig von der Weglänge und der Art des Materials ist. Je höher die Ordnungszahl der Atome des durchdrungenen Materials ist, desto mehr Röntgenstrahlung wird absorbiert; der Absorptionskoeffizient steigt etwa mit der vierten Potenz der Ordnungszahl. Das chemische Element Calcium hat eine Ordnungszahl von 20 (man schreibt ${}_{20}\text{Ca}$) und somit einen deutlich höheren Absorptionskoeffizienten als das weiche, umgebende Gewebe, das überwiegend aus Wasser (also ${}_{1}\text{H}$ und ${}_{8}\text{O}$) und organischen Polymeren (also in erster Linie ${}_{6}\text{C}$ und ${}_{1}\text{H}$) besteht. Dies ermöglicht die Abbildung von Knochen durch Röntgenaufnahmen. Für sportwissenschaftliche Fragestellungen ist vor allem die Knochendichte und deren Veränderung über die Lebensspanne oder während Trainingsinterventionen von Interesse. Eine Abnahme der Knochendichte (Osteoporose) im Alter ist die bedeutendste degenerative Veränderung des Bewegungsapparates. Die Entwicklung von geeigneten Trainingsprogrammen bedarf jedoch einer Messung der Knochendichte, wie sie durch Röntgenabsorption ermöglicht wird. Der vorliegende Versuch gibt einen Einblick in die Erzeugung von Röntgenstrahlen und ihre Anwendung für bildgebende Verfahren.

Ziel

Ziel des Versuches ist es, die Erzeugung von Röntgenstrahlung und ihren Einsatz in bildgebenden Verfahren nachvollziehen und erklären zu können.

¹Zitat entnommen aus [JP01].

Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchsdurchführung wissen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in der unten angegebenen Literatur.

- Wie erzeugt man hochenergetische Partikelstrahlen (Elektronen, Ionen und Photonen)?
- Welche Effekte beobachtet man, wenn diese hochenergetischen Partikelstrahlen auf einen Block Materie treffen? Grobe Einteilung der Beobachtung.
- Welche Effekte werden im Speziellen durch hochenergetische Photonen ausgelöst?
- Welche der betrachteten Effekte sind zur Detektion von hochenergetischen Photonen oder anderen Partikelstrahlen verwendbar?
- Wie kann Röntgenstrahlung zur Untersuchung der elementaren Zusammensetzung einer Probe eingesetzt werden?
- Was versteht man unter Computertomografie?

Zubehör

- Röntgengerät² bestehend aus folgenden Komponenten:
 - Röntgenröhre mit Molybdän-Anode und Leuchtschirm
 - aktiv gekühlter Si-PIN-Halbleiterdetektor mit Vielkanalanalysator
 - Röntgenbilddetektor auf Halbleiterbasis
- optische Digitalkamera
- PC mit Sensor-CASSY[®] und Software CASSY[®]Lab 2 zur Datenaufnahme
- PC mit Software zur Bildbearbeitung (GIMP 2, ImageJ)³
- PC mit Software Computertomografie Pro
- USB-Stick zum Speichern der Daten⁴

²Leybold Didactic Nr. 55481 oder LD Didactic Nr. 554800. Die Geräte sind von Aufbau und Bedienung her sehr ähnlich.

³Zur Vereinfachung können Sie an beiden Versuchstagen Ihren eigenen Laptop mitbringen. Die vorgeschlagenen Programme sind frei im Internet und auf dem AP-Server verfügbar.

⁴Bitte bringen Sie nach Möglichkeit zu beiden Versuchstagen einen eigenen USB-Stick mit.

Grundlagen

Bremsstrahlung⁵

Wird eine elektrische Ladung beschleunigt, so sendet sie dabei elektromagnetische Strahlung aus. Die Wellenlänge hängt dabei von der Beschleunigung ab. In einer Röntgenröhre werden die Elektronen zunächst im elektrischen Feld zwischen der Kathode und der Anode auf hohe Geschwindigkeit gebracht und dann beim Auftreffen auf die Anode sehr plötzlich abgebremst. Dabei emittieren sie energiereiche durchdringende Strahlung, wie schon Wilhelm Conrad Röntgen am 8. November 1895 bei Experimenten mit einer Gasentladungsröhre entdeckte.⁶

Der Wirkungsgrad einer Röntgenröhre ist näherungsweise gegeben durch

$$\eta \approx Z \cdot \frac{U}{10^9 \text{ V}} \quad (6.7.1)$$

mit

Z = Ordnungszahl des Anodenmaterials,
 U = Beschleunigungsspannung.

Der größte Teil der kinetischen Energie der Elektronen wird also nicht in Röntgenstrahlung umgewandelt, sondern in strahlungslosen Prozessen umgesetzt.

Ein Röntgenphoton kann maximal die gesamte kinetische Energie eines Elektrons haben, die das Elektron wiederum aus der Beschleunigungsspannung bekommen hat. Daher gilt:

$$E_{\max} = U \cdot e \quad (6.7.2)$$

mit

E_{\max} = maximale Photonenenergie,
 U = Beschleunigungsspannung,
 e = Elementarladung,

Charakteristische Strahlung

Außer der Bremsstrahlung findet man bei bestimmten vom Anodenmaterial abhängigen Wellenlängen noch besonders intensive Strahlung, die sog. charakteristische Strahlung. Wie wir heute wissen entsteht diese, wenn Elektronen aus den innersten Elektronenschalen eines schweren Elementes herausgeschlagen werden und die entstandene Lücke durch Elektronen aus den höherliegenden Schalen wieder aufgefüllt wird. Bei diesem Vorgang

⁵Auch in der englischsprachigen Literatur wird der Ausdruck „*bremsstrahlung*“ verwendet.

⁶Röntgen selbst bezeichnete seine Entdeckung als „X-Strahlen“ und auch heute noch ist das die weltweit üblichste Bezeichnung (z. B. (engl.) *X-rays*). Interessanterweise ist kaum etwas über die näheren Umstände der Entdeckung und gar nichts über das Ziel der durchgeführten Experimente bekannt. Röntgen hat sich darüber ausgeschwiegen. Weitere historische Details sind in [Hüb03] nachzulesen.

kann die freiwerdende Bindungsenergie in Form eines Röntgenphotons abgestrahlt werden. Es sind allerdings auch andere Prozesse möglich, so dass die Ausbeute insgesamt recht gering ist.

Abbildung 6.7.1 zeigt beispielhaft ein charakteristisches Linienspektrum für eine Molybdän-Anode. Das kontinuierliche Bremspektrum ist als „Grundlinie“ sichtbar.

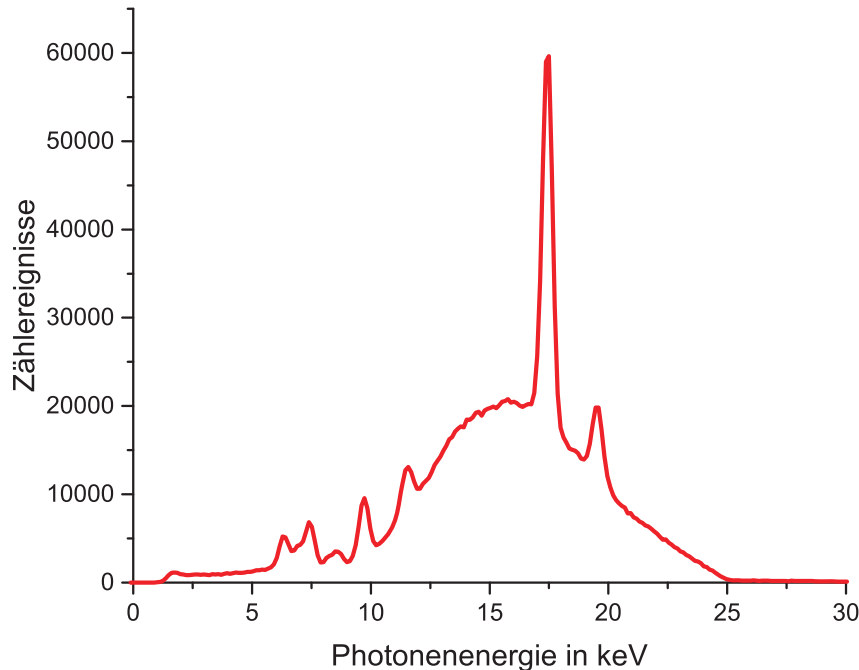


Abbildung 6.7.1.: Typisches Röntgenspektrum einer Molybdän-Anode mit charakteristischen Linien auf dem Bremskontinuum bei einer Beschleunigungsspannung von 25 keV. Man erkennt die K_{α} -Linie bei 17.48 keV und die K_{β} -Linie bei 19.61 keV.

Das moseleysche Gesetz

Die Abhängigkeit der Energie der charakteristischen Röntgenstrahlung von der Ordnungszahl des Anodenmaterials kann in einer einfachen Formel ausgedrückt werden, die eine Verallgemeinerung der Rydbergformel für die Wasserstoffspektrallinien darstellt und als moseleysches Gesetz bekannt ist:

$$E = R_{\infty} \cdot h \cdot c \cdot (Z - a)^2 \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (6.7.3)$$

mit

$$\begin{aligned}
 R_\infty &= \text{Rydbergkonstante} \\
 &= 10973731.568525(73) \text{ m}^{-1} \quad , \\
 h &= \text{plancksches Wirkungsquantum,} \\
 c &= \text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,} \\
 Z &= \text{Ordnungszahl des Anodenmaterials,} \\
 a &= \text{Abschirmzahl.}^7
 \end{aligned}$$

Dieses Gesetz hat eine gewisse Bedeutung dadurch erlangt, dass bei seiner Entdeckung manche Elemente des Periodensystems noch gar nicht bekannt waren. Die Lücken im Moseley-Diagramm ließen vermuten, dass es eventuell noch weitere Elemente geben könnte, und man hatte auch gleich eine passende Messmethode zur Hand, um das Vorhandensein dieser Elemente in einer Probe nachzuweisen. Auf diese Weise wurde u. a. das Element Hafnium entdeckt.

Das lambert-beersche Gesetz

Für monoenergetische Photonenstrahlung nimmt die transmittierte Intensität $I(x)$ exponentiell mit der durchstrahlten Schichtdicke x ab:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (6.7.4)$$

mit

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \text{Anfangsintensität bei } x = 0 \quad , \\
 \mu &= \text{material- und energieabhängiger Schwächungskoeffizient.}
 \end{aligned}$$

Man bezeichnet diesen Zusammenhang als lambert-beersches Gesetz und gibt für diesen Fall eine sog. Halbwertsschichtdicke an, nach deren Durchlaufen die Intensität auf die Hälfte abgefallen ist.

Mechanismen der Schwächung von Photonenstrahlung

Die Schwächung von Photonenstrahlung – zu der auch die Röntgenstrahlung gehört – in Materie erfolgt durch eine Reihe unterschiedlicher Prozesse, die je nach Photonenenergie zu unterschiedlichen Anteilen beitragen:

1. Rayleighstreuung

Durch elastische Streuung wird die Strahlung zwar nicht im eigentlichen Sinne geschwächt, allerdings wird gerichtete Strahlung quasi „in alle Richtungen“ verteilt, so

⁷Die Abschirmzahl gibt an, wie stark die Ladung des Kerns für ein Elektron auf einem bestimmten Niveau durch die anderen Elektronen abgeschirmt wird. Sie beträgt z. B. 1 für die K-Linien und fast 8 für die L-Linien.

dass zumindest die sich in gerader Linie weiter ausbreitende Strahlung geschwächt wird. Dieser Effekt tritt auch bei sehr niedrigen Energien auf. Ein typisches Beispiel ist die Streuung von Licht im Nebel. Das Licht eines Autoscheinwerfers wird durch vielfache Streuung an den kleinen Nebeltröpfchen von der geraden Bahn abgelenkt, so dass man aus dem Auto heraus nur noch eine „helle weiße Wand“ sieht, aber schon auf kurze Entfernungen keine Konturen der Umgebung mehr zu erkennen sind.

2. Photoeffekt

Der Photoeffekt ist für Energien bis 50 keV der dominierende Prozess. Dabei verliert das Photon seine gesamte Energie⁸ in einem Ionisationsprozess, bei dem ein Elektron den Großteil der Energie aufnimmt und diese dann auf seinem Weg in weiteren Ionisationsprozessen nach und nach wieder abgibt.

3. Comptonstreuung

Bei Energien > 100 keV tritt vermehrt inelastische Streuung auf, bei der das Photon nur einen Teil seiner Energie und seines Impulses auf ein Elektron überträgt, das dadurch vom Atom gelöst wird. Das Photon verliert dabei nicht nur Energie, sondern ändert auch seine Ausbreitungsrichtung.

4. Für noch höhere Photonenenergien kommen als weitere Prozesse die **Paarbildung** (ab ≈ 1.03 MeV) und **Kernreaktionen** (ab ≈ 10 MeV) hinzu. Diese Prozesse spielen in diesem Praktikumsversuch keine Rolle.

Diese Betrachtung zeigt, dass das Lambert-Beersche Gesetz für hohe Photonenenergien nur eine erste Näherung sein kann, denn durch die verschiedenen Prozesse wird ja auch die Energie und sogar die Art der Strahlung verändert, so dass andere Schwächungskoeffizienten ins Spiel kommen. Es kann also vorkommen, dass die „1. Halbwertsschichtdicke“ für eine bestimmte Strahlung dünner ist als die „2. Halbwertsschichtdicke“ mit der die so veränderte Strahlung noch einmal um den Faktor zwei geschwächt werden kann. Man beobachtet in diesem Fall also eine Abweichung vom exponentiellen Verlauf.⁹

Bei den im Praktikumsversuch vorkommenden Photonenenergien ist der Photoeffekt der bei weitem wichtigste Schwächungsmechanismus, so dass für jede Wellenlänge jeweils mit einem konstanten Schwächungskoeffizienten gerechnet werden kann.

„Faustregel“ zur Absorption

Die Absorption ist umso stärker, je höher die Dichte ρ und die Ordnungszahl Z eines Materials sind.

Detektion von Röntgenstrahlung

In diesem Versuch werden Röntgenspektren aufgenommen, bei denen die Häufigkeit, mit der bestimmte Photonenenergien auftreten, als Funktion der Photonenenergie aufgetragen

⁸Mit anderen Worten: das Photon wird absorbiert.

⁹Das ist kein Widerspruch zum Lambert-Beerschen Gesetz, da dieses ja nur für monoenergetische Strahlung gilt. Wenn sich die Energie ändert, muss das entsprechend berücksichtigt werden.

sind. Gezählt werden die Photonen dabei mit Hilfe eines Halbleiterdetektors, der immer dann ein Signal ausgibt, wenn er ein Röntgenphoton empfängt. Die Größe des Signals ist proportional zur Energie des Photons. Diese Signale werden in einem sog. Vielkanalanalysator (VKA) nach der Größe sortiert gezählt.¹⁰ Die Kanalnummer ist dabei proportional zur Größe des Signals und damit zur Photonenenergie. Um einen Absolutwert für die Energie zu bestimmen, muss die Energieachse noch kalibriert werden. Das erfolgt, indem man die gut bekannten Energien bestimmter charakteristischer Röntgenlinien ausnutzt.

Röntgenstrahlen in der Medizin

Die Einsatzmöglichkeiten von Röntgenstrahlen in der Medizin sind vielfältig. Die erste Aufnahme eines menschlichen Körperteils war vermutlich eine Aufnahme von Röntgens Hand aus dem Jahr 1895. Diese wurde allerdings nie veröffentlicht. Die erste veröffentlichte Aufnahme stammt ebenfalls aus dem Jahr 1895 und zeigt die Hand von Röntgens Frau. In Abbildung 6.8.3 ist diese Aufnahme zusammen mit einer modernen Aufnahme einer Hand dargestellt.

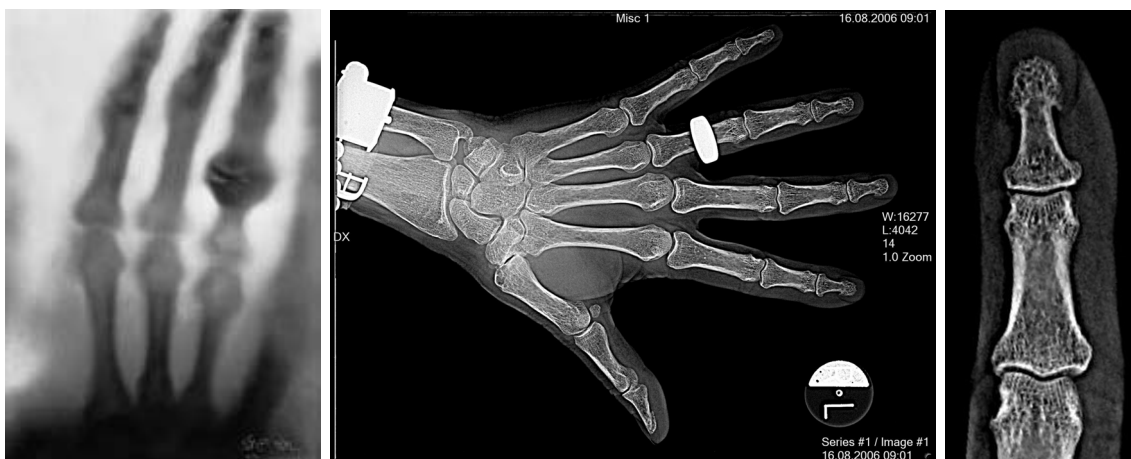


Abbildung 6.7.2.: Links ist die erste veröffentlichte Röntgenaufnahme eines menschlichen Körperteils abgebildet. Es handelt sich um die Hand von Röntgens Frau Anna, aufgenommen Ende des Jahres 1895. Rechts daneben zum Vergleich eine mit moderner Technik angefertigte Aufnahme aus dem Jahr 2006. Um die hohe Qualität der Aufnahme zu zeigen, ist rechts noch eine Ausschnittvergrößerung des Zeigefingers eingefügt.

Bei einer Computertomografie (CT) werden in kurzer Folge sehr viele Röntgenaufnahmen aus verschiedenen Richtungen gemacht, um die dreidimensionale Verteilung

¹⁰Im Grunde funktioniert ein VKA nicht viel anders als eine Eiersortiermaschine, wie sie z. B. hier bei der Sendung mit der Maus erklärt wird:
<https://www.youtube.com/watch?v=7zCSttY-os>

des Absorptionskoeffizienten zu rekonstruieren.¹¹ Aus diesen dreidimensionalen Daten werden dann verschiedene Darstellungen wie Schnittbilder und räumliche Darstellungen berechnet. Das Rekonstruktionsverfahren ist im Detail mathematisch recht aufwendig, die prinzipielle Funktionsweise kann aber z.B. mit Hilfe des Applets unter <http://ottmarlabonde.de/L1/Tomo/TomoTest.html> nachvollzogen werden.

Die Zunahme von Röntgenuntersuchungen, insbesondere der Computertomografien, trägt leider auch wesentlich zur „zivilisatorisch bedingten“ Strahlenexposition des Menschen bei.

Bei der praktischen Anwendung von Röntgenstrahlung in der Medizin ist es daher wichtig, die Strahlenbelastung des Patienten möglichst niedrig zu halten und gleichzeitig Durchdringungsvermögen und Kontrast zu maximieren. Der Einsatz von Filtern kann hier sehr vorteilhaft sein. Als Filter dienen meist Aluminiumbleche mit einer Dicke von mehreren Millimetern. Diese absorbieren einen großen Teil der langwelligen Strahlung, die im Wesentlichen eine Strahlenbelastung der Haut verursachen würde, haben aber vergleichsweise wenig Einfluss auf die kurzwellige Strahlung, die für die Abbildung von z. B. Knochen nötig ist. Das Spektrum wird also gezielt verändert, man sagt auch, die Strahlung werde „aufgehärtet“.

Versuchsdurchführung

Hinweise:

- **WICHTIG!!!: Notieren Sie sich jedes(!) Starten einer Messung in Ihrem Messprotokoll. In der von Ihnen gespeicherten Datei sind alle(!) Messkurven enthalten.**
Zur Auswertung müssen Sie diese später den einzelnen Messaufgaben zuordnen können.
- Die Röntgenanlage darf aus Sicherheitsgründen nur von Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor in Betrieb genommen werden!
- Verwenden Sie die Anlage ausschließlich bestimmungsgemäß. Achten Sie darauf, dass die Bleiglasschiebetüren während der Messung unbedingt geschlossen sein müssen.
- **Speichern Sie vor(!) dem Verlassen des Programms alle Messungen** (die CASSYLab-Spektren als „*.labx“ und „*.txt“) und übertragen Sie die Dateien nach dem Versuch auf einen USB-Stick. Belassen Sie eine Kopie für Ihre Tutorin/Ihren Tutor auf dem Desktop.
Alle eingesetzten Programme können Sie kostenlos aus dem Internet oder vom AP-Server herunterladen und zur Auswertung der Daten verwenden.

¹¹Dieses Verfahren sollte nicht mit der Magnetresonanztomografie (MRI, früher auch Kernspintomografie genannt) verwechselt werden, bei der statt Röntgenstrahlen Magnetfelder und Radiowellen zum Einsatz kommen.

- Lesen Sie sich vor Versuchsbeginn auch unbedingt den Abschnitt zur Auswertung durch. Viele Fragen können und sollen auch schon während der Versuchsdurchführung beantwortet werden.
- Die verschiedenen Versuchsteile werden nicht unbedingt in der Reihenfolge ihrer Nummerierung bearbeitet, sondern die Gruppen wechseln je nach Bedarf. Daher ist es sinnvoll, zu beiden Versuchstagen nach Möglichkeit einen eigenen USB-Stick und einen eigenen Laptop mitzubringen.

Vorbereitung (Tag A): Kalibrierung des Halbleiterdetektors

1. Öffnen Sie das Programm CASSYLab 2, wählen Sie den Eingang des Messsignals (beachten Sie den Eingang am Vielkanalanalysator).
2. Wählen Sie in den Einstellungen der PC-Software: Ereignisse N_A
Messung: 256 Kanäle
Verstärkung: negative Pulse, Faktor: -3.00 (diesen Wert nicht ändern!)
Aufnahme: Automatisch, Neue Messreihe anhängen
Messzeit: 50 s
Intervall: 1 s
3. Achten Sie darauf, dass an **Eingang A** die Checkboxen für Ereignisse, Kanal, Energie und Rate aktiviert sind.
4. Stecken Sie, falls noch nicht erfolgt, den Ringkollimator auf das Austrittsfenster der Röntgenröhre.
5. Stellen Sie dann am Röntgengerät folgende Werte ein:
 - Beschleunigungsspannung $U = 35$ kV
 - Anodenstrom $I = 1$ mA
 - Targetwinkel 45°
 - Sensorwinkel 90°
6. Legen Sie als Kalibrierprobe das verzinkte Eisen-Plättchen auf den Targethalter.
7. Schalten Sie die Röntgenröhre an dem Schalter **HV** ein. Beachten Sie: das Gerät arbeitet nur, wenn beide Türen richtig geschlossen sind.
8. Messen Sie für 50 s ein Spektrum. Sie sollten nun deutlich die K_α -Linien von Eisen und Zink erkennen.

Achtung: Beachten Sie die Zählrate des Halbleiterdetektors. Diese sollte im Bereich von 200 Impulse/s bis 400 Impulse/s liegen. Passen Sie wenn nötig den Emissionsstrom an.

9. Bestimmen Sie den Schwerpunkt der beiden Linien mittels „Peakschwerpunkt bestimmen“ (Rechtsklick auf die Graphen, Funktion wählen, dann Bereich der Kurve mit der linken Maustaste markieren). Tragen Sie anschließend die Werte mit ihren zugehörigen Energien in die Energiekalibrierung ein. Zur Anzeige der Energieachse ziehen Sie den Eintrag „Energie“ unter „Einstellungen“ auf die untere Achse.
Diese Kalibrierung wird auch für die später aufgenommenen Spektren benötigt!

Versuchsteil 1: Erzeugung von Röntgenstrahlen (Tag A)

Es soll das Spektrum (Intensität als Funktion der Energie) in Abhängigkeit vom in der Röntgenröhre fließenden Anodenstrom und der Beschleunigungsspannung betrachtet werden.

10. Bauen Sie den Targethalter aus. Fragen Sie bei Problemen Ihre Tutorin/Ihren Tutor.
11. Wählen Sie in den Einstellungen der PC-Software:
Messzeit: 1000 s
12. Stellen Sie dann am Röntgengerät folgende Werte ein:
- Beschleunigungsspannung $U = 23 \text{ kV}$
 - Anodenstrom $I = 1.0 \text{ mA}$
 - Sensorwinkel 12°
13. Stellen Sie eine erhöhte Winkelauflösung von 0.01° ein (nach dem Einschalten ist standardmäßig die größere Schrittweite von 0.1° ausgewählt), indem Sie zunächst mit dem Schalter $\Delta\beta$ die Winkelverstellung anwählen und dann das Einstellrad gegen den Uhrzeigersinn drehen, bis 0° angezeigt werden.
14. Schalten Sie den Röntgenröhre an dem Schalter **HV** ein. Beachten Sie: das Gerät arbeitet nur, wenn beide Türen richtig geschlossen sind.
15. Fahren Sie nun den Detektor vorsichtig(!) in den Strahl (Drehung des Einstellrades gegen den Uhrzeigersinn, der angezeigte Winkel wird dabei kleiner), bis Sie eine Zählrate von $400 \pm 50 \text{ counts/s}$ erhalten. Die Zählrate können Sie sich mit einem Klick auf R_A , oben in der Menüleiste anzeigen lassen. Zur Anzeige muss eine Messung gestartet werden!
16. Wenn die korrekte Zählrate erreicht ist, können Sie die Messung mit der selben Schaltfläche abbrechen, mit welcher Sie die Messung gestartet haben. **Ab diesem Zeitpunkt darf der Winkel nicht mehr verändert werden! Notieren Sie daher zur Sicherheit den eingestellten Winkel.**
17. Wählen Sie in den Einstellungen der PC-Software:
Messzeit: 10 s

18. Starten Sie eine Messung und notieren Sie sich die mittlere Zählrate. Diese finden Sie im Fenster „Einstellungen“ unter „Ereignisse“ als „Impulse/Zeit“.
19. Wiederholen Sie dies noch für sechs weitere, geringere Stromstärken.
20. Wählen Sie in den Einstellungen der PC-Software:
Messzeit: 100 s
21. Stellen Sie dann am Röntgengerät folgende Werte ein:
 - Beschleunigungsspannung $U = 23 \text{ kV}$
 - Anodenstrom $I = 1.0 \text{ mA}$.
22. Nehmen Sie ein Spektrum auf indem Sie die Messung starten. **Dieses Spektrum dient als Referenz zu allen anderen an diesem Tag aufgenommenen Spektren!**
23. Nehmen Sie noch 2 weitere Spektren bei jeweils halbiertes Stromstärke auf.
24. Stellen Sie dann am Röntgengerät folgende Werte ein:
 - Beschleunigungsspannung $U = 20 \text{ kV}$
 - Anodenstrom $I = 1.0 \text{ mA}$.
25. Nehmen sie ein Spektrum auf. Wiederholen Sie dies noch für eine Beschleunigungsspannung von 17 kV.

Versuchsteil 2: Röntgenschutz (Tag A)

Abschließend soll an diesem Tag die Schutzwirkung verschiedener Materialien und Materialdicken vor Röntgenstrahlung untersucht werden. Hierfür stehen verschiedene Filter zur Verfügung.

26. Stellen Sie dann am Röntgengerät folgende Werte ein:
 - Beschleunigungsspannung $U = 23 \text{ kV}$
 - Anodenstrom $I = 1.0 \text{ mA}$.
27. Nehmen Sie für verschiedene Dicken von Aluminium (0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm und 2.0 mm) jeweils ein Spektrum auf.
28. Nehmen Sie noch zusätzlich für zwei weitere Materialien als Filter jeweils ein Spektrum auf (Zirkonium zeigt dabei ein interessantes Verhalten).

Versuchsteil 3: Materialanalyse mittels Röntgenfluoreszenz (Tag B)

Es werden verschiedene Proben auf ihre Zusammensetzung hin untersucht.

29. Öffnen Sie das Programm CASSYLab 2, wählen Sie den Eingang des Messsignals (beachten Sie den Eingang am Vielkanalanalysator).
30. Wählen Sie in den Einstellungen der PC-Software: Ereignisse N_A
Messung: 256 Kanäle
Verstärkung: negative Pulse, Faktor: -3.00 (diesen Wert nicht ändern!)
Aufnahme: Automatisch, Neue Messreihe anhängen
Messzeit: 50 s
Intervall: 1 s
31. Achten Sie darauf, dass an Eingang A die Checkboxen für Ereignisse, Kanal, Energie und Rate aktiviert sind.
32. Stecken Sie, falls noch nicht erfolgt, den Ringkollimator auf das Austrittsfenster der Röntgenröhre.
33. Stellen Sie dann am Röntgengerät folgende Werte ein:
 - Beschleunigungsspannung $U = 35 \text{ kV}$
 - Anodenstrom $I = 1 \text{ mA}$
 - Targetwinkel 45°
 - Sensorwinkel 90°
34. Legen Sie zunächst das verzinkte Eisen-Plättchen auf den Targethalter und kalibrieren Sie den Detektor wie an Versuchstag A (ab Punkt 6 auf Seite 707) beschrieben.
35. Schalten Sie den Röntgenröhre an dem Schalter **HV** ein. Beachten Sie: das Gerät arbeitet nur, wenn beide Türen richtig geschlossen sind.
36. Messen Sie nun analog verschiedene Gegenstände. Die Messzeit kann hier nach Bedarf gewählt werden. Es müssen deutliche Signale erkennbar sein. Dies kann u. U. auch schon nach nur 20 s der Fall sein.
Mit der Tastenkombination „ $\langle \text{Alt} \rangle + x$ “ können Sie ein Periodensystem einblenden, aus dem die charakteristischen Röntgen-Linien der Elemente ersichtlich sind.
Achtung: Beachten Sie bei jeder Messung die Zählrate des Halbleiterdetektors. Diese sollte max. 400 Impulse/s betragen. Reduzieren Sie wenn nötig den Emissionsstrom.

Versuchsteil 4: Bildgebung mittels Röntgenabsorption (Tag B)

- Vorbereitungen
 1. Entfernen Sie die Schutzkappe des Fluoreszenzschirms.

2. Positionieren Sie, falls noch nicht erfolgt, die Kamera ca. 10 cm hinter dem Fluoreszenzschirm.
 3. Stellen Sie die Kamera scharf. Verwenden Sie hierfür den manuellen Fokusing vorne am Objektiv (Schalterstellung „M“ am Objektiv). Dieser Schritt ist nur einmal notwendig!
 4. Verwenden Sie bei der Kamera möglichst geringe ISO-Werte (z. B. ISO 400) und lange Belichtungszeiten (z. B. 30 s)
 5. Stellen Sie am Röntgengerät $U = 35 \text{ kV}$ und $I = 1 \text{ mA}$ ein.
- Aufnahme von Absorptionsbildern (Durchleuchtung)
Hinweis: Stellen Sie jeweils ein zu untersuchendes Objekt im Röntgengerät vor den Fluoreszenzschirm. Verwenden Sie hierfür die geeignete Halterung.
6. Nehmen Sie Röntgenbilder folgender Objekte auf:
 - a) elektronischer Drehzahlmesser
 - i. einmal direkt vor der Röntgenröhre und
 - ii. einmal direkt vor dem SchirmWelchen Unterschied stellen Sie fest? Warum?
 - b) vier verschiedene Schokoladentafeln
Was können Sie erkennen? Welche Sorten Schokolade könnten dies sein?
 - c) von Ihnen selbst mitgebrachte Gegenstände (z. B. Erdbeere, Kaktus)
Welche Besonderheiten können Sie erkennen?
Hinweis: Lebensmittel dürfen nach der Verwendung im Labor nicht mehr verzehrt werden!
 7. Setzen Sie die Schutzkappe des Fluoreszenzschirms wieder auf, um ihn vor Umgebungslicht zu schützen.
 8. Bearbeiten Sie ihre Bilder am PC nach (GIMP 2, ImageJ, Photoshop, ...), um die Darstellung zu verbessern!
 - Arbeitsschritte für GIMP 2
 - * Datei/Öffnen
 - * Im Werkzeugkasten „Rechteckige Auswahl“ wählen und gewünschten Bildausschnitt markieren.
 - * Bild/Auf Auswahl zuschneiden
 - * Bild/Modus/Graustufen
 - * Farben/Werte (Regler nach Wunsch verstellen)
 - * Datei/Speichern unter
 - Arbeitsschritte für ImageJ
 - * File/Open

- * In der Werkzeugzeile (unter dem Menü) „Rectangular Selection“ wählen und gewünschten Bildausschnitt markieren.
- * Image/Crop
- * Image/Type/8-bit
- * Image/Adjust/Brightness+Contrast (Regler nach Wunsch verstellen)
- * File/Save As

Versuchsteil 5: Computertomografie (CT) (Tag B)

Beim Praktikumsaufbau wird anders als in der Medizin nicht die Röntgenapparatur um den Patienten herum bewegt, sondern das zu untersuchende Objekt durch einen Schrittmotor gedreht.

- Montieren Sie das Objekt auf dem Probenstisch. Achten Sie darauf, dass es auch bei einer vollen Drehung nicht herunterfallen kann. Bei Objekten mit „innerer Struktur“ müssen Sie darauf achten, dass sich bei der Drehung im Inneren nichts verschiebt.
- Führen Sie die CT-Aufnahme mit Hilfe des Programms **Computertomografie Pro** durch.
- Kopieren Sie die Daten auf einen USB-Stick. Belassen Sie eindeutig benannte Kopien für Ihre Tutorin/Ihren Tutor auf dem Praktikums-PC.

Auswertung

Hinweis: Verwenden Sie im Bericht keine Screenshots der CassyLab-Graphen! Zur Weiterverarbeitung der Daten: Die Daten können aus **CASSYLab 2** mit „Tabelle → Tabelle kopieren“ in die Zwischenablage kopiert und z. B. in Excel eingefügt werden. Dort können die Daten direkt weiterverarbeitet werden. Alternativ können die Daten in Excel als **csv**-Datei gespeichert werden. Diese **csv**-Datei kann dann in beliebige Datenverarbeitungsprogramme, z. B. QtiPlot, Origin, Matlab, LabPlot, usw. importiert werden.

Erzeugung von Röntgenstrahlen

Für die folgende Auswertung muss die Energiekalibrierung durchgeführt worden sein. Sonst ist diese Analyse größtenteils nicht möglich!

1. Zeigen Sie den Einfluss des Anodenstroms auf die Zählrate. Stellen Sie hierfür die mittlere Zählrate in counts/s in Abhängigkeit von der Stromstärke in einem Graph dar. Zeigen sie den funktionellen Zusammenhang mittels einer Regressionskurve. Wie ist dieser Zusammenhang erklärbar?
2. Zeigen Sie den Einfluss des Anodenstroms auf das Spektrum. Normieren Sie die Spektren hierfür auf ihre jeweilige Gesamtzahl der gemessenen Ereignisse. Stellen sie die Kurven in einem Graphen dar!

Hat der Anodenstrom einen Einfluss auf die Form des Spektrums?
Warum war dieses Ergebnis zu erwarten?

3. Zeigen Sie den Einfluss der Beschleunigungsspannung auf das Spektrum. Normieren sie dafür wiederum die Kurven wie oben beschrieben und stellen Sie sie wiederum in einem Graphen dar. Betrachten Sie die charakteristischen Linien und die hochenergetische (kurzwellige) Grenze. Was fällt dabei auf? Wie ist dies zu erklären?
4. Verifizieren Sie das Anodenmaterial anhand der Energie der charakteristischen Linien.
5. Betrachten Sie die niederenergetische Grenze und den letzten Kanal. Wie sind diese beiden Phänomene erklärbar?

Röntgenschutz

6. Stellen Sie die relative Transmission aller untersuchten Gegenstände in einem Graph dar. Denken sie an die Referenzmessung! Beschreiben Sie Auffälligkeiten.
7. Stellen Sie in einem weiteren Graph die relative Transmission der Aluminiumfilter in Abhängigkeit ihrer Dicke für 3 einzelne Energien dar. Bestimmen Sie für jede Energie die Dicke, bei welcher die Intensität auf die Hälfte abgeschwächt wurde. **Hinweis:** Für die Anpassungsfunktion $I = \exp(-b \cdot x)$, wobei I die relative Intensität, x die Dicke der Aluminiumfilter und b der Parameter der Anpassungsfunktion ist, kann die Dicke, bei der die Intensität halbiert wird, mittels $x_0 = \frac{-\ln(0.5)}{b}$ bestimmt werden.

Röntgenfluoreszenz

8. Untersuchen Sie die Zusammensetzung der Gegenstände.
Hinweis: Mit der Tastenkombination „ $\langle \text{Alt} \rangle + x$ “ kann in CASSYLab 2 ein Periodensystem angezeigt werden, welches die charakteristischen Energien der Materialien enthält und in das Diagramm einzeichnet.
9. Stellen Sie ihre Ergebnisse in einem Graph/Graphen dar, in welcher man die charakteristischen Linien deutlich erkennt.

Bildgebung mittels Röntgenabsorption

1. Beschreiben Sie bei jeder untersuchten Probe die Unterschiede hinsichtlich der Sichtbarkeit mit Auge und Kamera. Belegen Sie ihre Aussagen mit Bildern! Können Sie besondere Strukturen erkennen?
2. Ordnen Sie jede Tafel Schokolade einer Sorte zu. Begründen Sie ihre Aussagen.
3. Bonusfrage: Warum bringt Ihnen die Veränderung des Abstands vom Objekt zum Fluoreszenzschirm praktisch keine Vorteile bei der Auflösung der Bilder? Wie könnten Sie eine bessere Auflösung erreichen?

Computertomografie

1. Wählen Sie für jedes untersuchte Objekt geeignete Schnitte aus, auf denen die charakteristischen Strukturen des Objekts gut erkennbar sind und binden Sie diese Bilder in Ihren Praktikumsbericht ein.

Fragen und Aufgaben

1. Warum verwendet man zum Schutz vor Röntgenstrahlung Bleiwesten?
Warum wäre eine „Leichtmetallausführung“ z. B. aus Aluminium nicht praktikabel?
2. Bei Röntgenaufnahmen im medizinischen Bereich werden üblicherweise zwischen der Röntgenröhre und dem Patienten Aluminiumbleche mit einer Dicke von mehreren Millimetern angebracht.
Was bewirken diese Bleche?
Wie verändert sich das Spektrum?
Warum ist das erwünscht?

Ergänzende Informationen

Natürliche Röntgenquellen

Röntgenstrahlung ist in der Natur durchaus nicht unüblich. Jeder Stern, z. B. auch unsere Sonne strahlt auch im Röntgenbereich. Außerdem entsteht Röntgenstrahlung beim Auftreffen ausreichend hochenergetischer radioaktiver Strahlung auf Materie.

Röntgenaufnahmen der Sonne finden Sie z. B. im Internet unter:

<http://www.neunplaneten.de/nineplanets/pxsol.html> oder

<http://www.solarviews.com/cap/sun/xsun.htm> .

Schwächung von Strahlung aus geladenen Teilchen

Andere Arten ionisierender Strahlung wie z. B. Elektronen- und Positronenstrahlen (β^+ und β^-) oder Heliumkerne (α -Strahlen) verlieren ihre Energie nach anderen Gesetzmäßigkeiten. Die geladenen Teilchen können viel effizienter Atome ionisieren. Bei jedem Ionisationsvorgang verlieren sie Energie und haben dadurch eine begrenzte Reichweite. Da der Wirkungsquerschnitt für Ionisation auch von der Teilchenenergie abhängt, ist die Reichweite allerdings nicht direkt proportional zur Energie. Man kann diesen Effekt nutzen, um Teilchen in einer relativ definierten Tiefe einer Probe zu stoppen, sei es zu wissenschaftlichen Zwecken oder zur Tumorbehandlung in der Medizin.

Literaturhinweise

- Standardlehrbücher, z. B. [Mes02],
- zum kontinuierlichen Spektrum ($\lambda_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \lambda_{\text{grenz}}$):
[HW87] S. 316–318, [Hel74], [Gob80] S. 167,

- zum charakteristischen Spektrum: [HW87] S. 315 ff., [Hel74], [Gob80] S. 152–159,
- historische Informationen: [Hüb03],
- für den Studiengang Physik auch ausführlichere Beschreibungen in [Mar73].

Literaturverzeichnis

- [Gob80] GOBRECHT, HEINRICH (Herausgeber): *Bergmann-Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band IV: Aufbau der Materie. Walter de Gruyter, Berlin, 2. Auflage, 1980.
- [Hel74] HELLWEGE, KARL HEINZ: *Einführung in die Physik der Atome*. Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg, 4. Auflage, 1974.
- [Hüb03] HÜBNER, KLAUS: *Eine Original-Versuchsanordnung von Röntgen für das Deutsche Museum: Erzeugung, Absorption und ionisierende Wirkung der Röntgenstrahlen*. Deutsches Museum; Diepholz: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik, Berlin · München, 2003.
- [HW87] HAKEN, HERMANN und HANS CHRISTOPH WOLF: *Atom- und Quantenphysik*. Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg, 3. Auflage, 1987.
- [JP01] JARGODZKI, CHRISTOPHER and FRANKLIN POTTER: *Mad about Physics: Braintwisters, Paradoxes, and Curiosities*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1. edition, 2001.
- [Mar73] MARMIER, P.: *Kernphysik I – Vorlesung von Prof. Dr. P. Marmier*. Verlag der Fachvereine an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich, 7. Auflage, 1973. ausgearbeitet von Eric Sheldon und Roland Szostak.
- [Mes02] MESCHEDE, DIETER: *Gerthsen - Physik*. Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg, 21. Auflage, 2002.