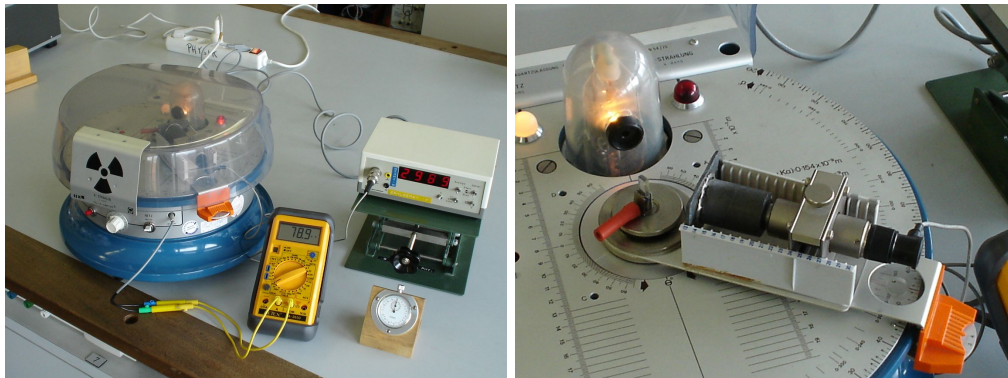


Röntgenstrahlung und Radioaktivität



Dieses Experiment besteht aus zwei Teilen: Zunächst werden Sie das Röntgenspektrum einer Röntgenröhre analysieren und mit deren Strahlung einen Kristall identifizieren. Anschließend betrachten Sie das Spektrum eines α -Strahlers und messen die Absorption von α -Strahlung in Luft.

Zusätzlich werden Sie zwei verschiedene Möglichkeiten kennenlernen, hochenergetische Strahlung zu messen. Nach dem Versuch sollten Sie in der Lage sein, mit den entsprechenden Apparaten umzugehen und deren Vor- und Nachteile abzuwägen.

Teil I. Vorbereitung

1. Realitätsbezug

Nachdem Röntgenstrahlen und Radioaktivität entdeckt waren, stand den Medizinern eine völlig neue Methode zur Verfügung: Sie konnten Einblicke in einen Organismus

gewinnen, ohne diesen aufschneiden zu müssen. Das war aber nicht die einzige medizinische Anwendung: Es wurde populär, sich in einem Kaufhaus spaßeshalber durchleuchten zu lassen und Ärzte verschrieben radioaktive Bäder und Tabletten gegen Rheuma und andere Krankheiten. Sie wissen natürlich heute, dass daraus Krebserkrankungen und zahlreiche Behinderungen der damals zur Welt gekommenen Kinder resultierten. Schlimmer noch, die Kriegsindustrie verwendete das radioaktive Uran neben den Atombomben zur Verbesserung von Geschossen, bis sich herausstellte, dass dies ungewollte tödliche Nachwirkungen hatte. Die Zerstörung von Zellen hat aber auch etwas gutes: richtig dosiert hilft die Strahlentherapie bei der gezielten Zerstörung von Krebszellen und hat sicher schon manchen Menschen das Leben gerettet.

Bedenken Sie zusätzlich, dass ein Röhrenbildschirm, wie z.B. ein Fernseher aus dem Jahr 2000, freie Elektronen erzeugt, die mit Hochspannung beschleunigt und anschließend (in der Leuchtschicht) schnell abgebremst werden. Wie Sie weiter unten erfahren werden, ist dies exakt das Bauprinzip einer Röntgenröhre – das bedeutet, dass fast jeder von Ihnen im Wohnzimmer eine eigene Röntgenröhre stehen hat.

2. Eigenrecherche

- Um verantwortlich mit Röntgen- und Gammastrahlung arbeiten zu können, müssen Sie wissen, wie hochenergetische elektromagnetische Strahlung mit Materie wechselwirkt¹ (Bragg-Reflexion², Absorption³, (Kern-)Photoeffekt⁴, Comptoneffekt⁵ und Paarbildung⁶). Gehen Sie darauf stichpunktartig ein und
- Erklären Sie, warum Röntgenstrahlung für einen (menschlichen) Organismus gefährlich ist⁷. Zählen Sie die wichtigsten Möglichkeiten auf, sich vor dieser Strahlung zu schützen.
- Radioaktive Strahlung kann in den Formen α , β und γ auftreten. Geben Sie kurz an, was damit gemeint ist⁸, wie die verschiedenen Strahlungsarten mit Materie wechselwirken⁹, welche dieser Strahlungsarten für den menschlichen Organismus am gefährlichsten ist¹⁰ und wie hoch die Reichweiten der genannten Formen in Luft sind.
- Skizzieren Sie erweiternd zu den unten genannten Ausführungen, wie ein Röntgenspektrum aufgebaut ist¹¹ und gehen sie darauf ein, welche Auswirkungen eine

¹Wichtig: [Tip94], S. 1413-1418

²[Mes04], S. 783 ff.

³[Tip94], S. 1292 f. und [Mes04], S. 791

⁴[Tip94], S. 1292 f. und [Mes04], S. 792

⁵[Mes04], S. 606 f. und [Tip94], S. 1292 f.

⁶[Mes04], S. 794 f. und [Tip94], S. 1292 f.

⁷WW mit Materie, [Tip94], S. 1413-1418 und [Mes04], S. 927

⁸[Tip94], S. 1400 ff.

⁹[Tip94], S. 1413-1418

¹⁰WW mit Materie, [Tip94], S. 1413-1418 und [Mes04], S. 926

¹¹[Mes04], S. 788 ff. und [Tip94], S. 1203

Änderung des Anoden- bzw. Kathodenmaterials bewirkt.

- Um zu verstehen, wie ein Halbleiterdetektor funktioniert, sollten Sie die entsprechenden Kapitel über Halbleiter im Anhang 7.1 lesen. Dieser Teil ist nur mündlich vorzubereiten.

Teil II.

Röntgenstrahlung

3. Vorbereitung

3.1. Versuchsaufbau

Sie werden selbständig ein abgeschirmtes Röntgengerät betreiben. Die austretende Strahlung wird an einem Einkristall gebeugt und mit einem Fensterzählrohr nachgewiesen. Durch die im Kristall auftretende Bragg-Beugung wird das Röntgenlicht spektral zerlegt, wodurch Sie je nach Messwinkel verschiedene Röntgenenergien analysieren können. Da die Röntgenstrahlung je nach Anodenmaterial in der Röhre ein charakteristisches Spektrum zeigt, können Sie durch die Messung des Ablenkwinkels einer charakteristischen Röntgenlinie die Gitterkonstante des Kristalls berechnen.

Der Versuchsaufbau (Abb. 1) besteht im Wesentlichen aus einer Röntgenröhre, einem Kristallhalter und einem Messarm, auf dem verschiedene Geräte, wie z.B. Zählrohr, Blenden, Filter usw. in einem Diamagazin¹² unterzubringen sind.

3.2. Physikalische Grundlagen

3.2.1. Entstehung der Röntgenstrahlung

In einer Röntgenröhre werden die an der Kathode durch Glühemission erzeugten Elektronen durch Hochspannung (einige keV) zur Anode hin beschleunigt (Abb. 2). Beim Auftreffen treten sie in Wechselwirkung mit den Atomen des Anodenmaterials. Dabei wird die kinetische Energie der Elektronen in Wärme (etwa zu 99%) und Röntgenstrahlung umgewandelt.

Je nach ihrer Entstehung unterscheidet man Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung.

Bei der **Bremsstrahlung** werden die Elektronen in einem oder mehreren Schritten von den Atomen des Anodenmaterials abgebremst. Die dadurch entstehende Strahlung besitzt ein kontinuierliches Spektrum, welches unabhängig vom Anodenmaterial ist. Dieses Bremsspektrum hat eine scharfe kurzwellige Grenze, die von der Beschleuni-

¹²aus Experimentierstation E. S.

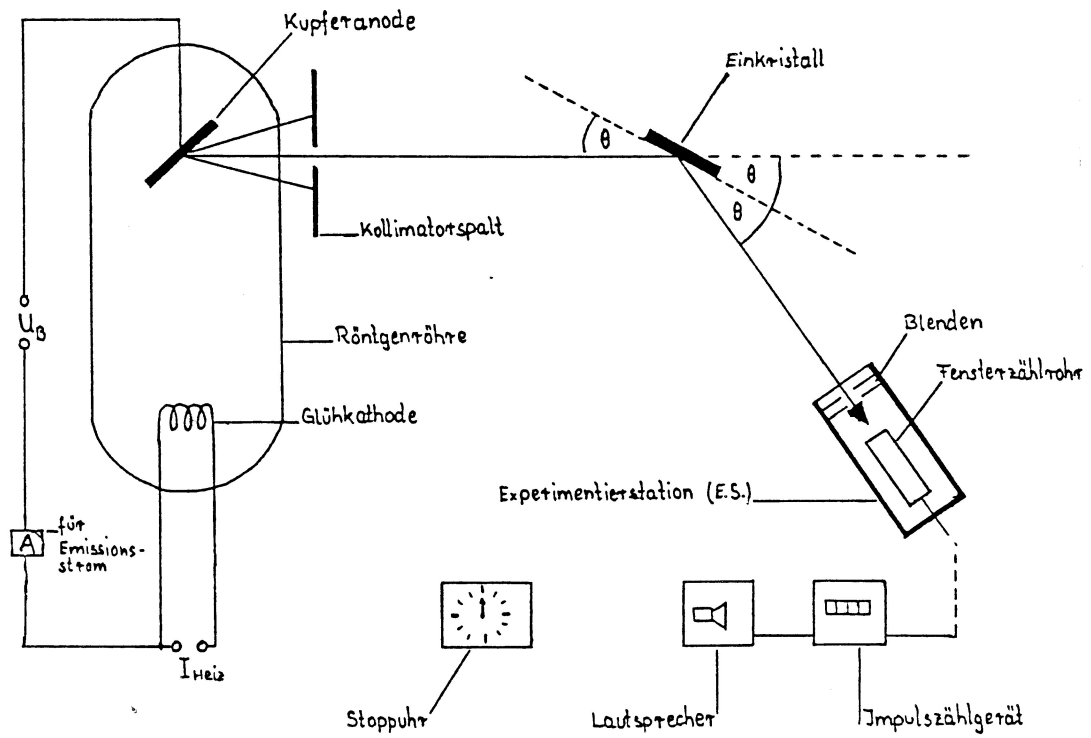


Abbildung 1: Versuchsaufbau (schematisch)

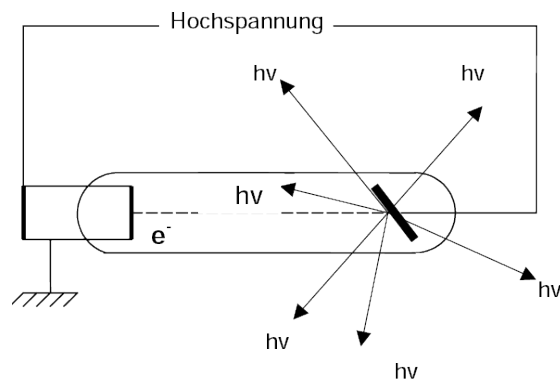


Abbildung 2: Röntgenröhre, schematisch (Quelle:[EN97], „Röntgenstrahlung“)

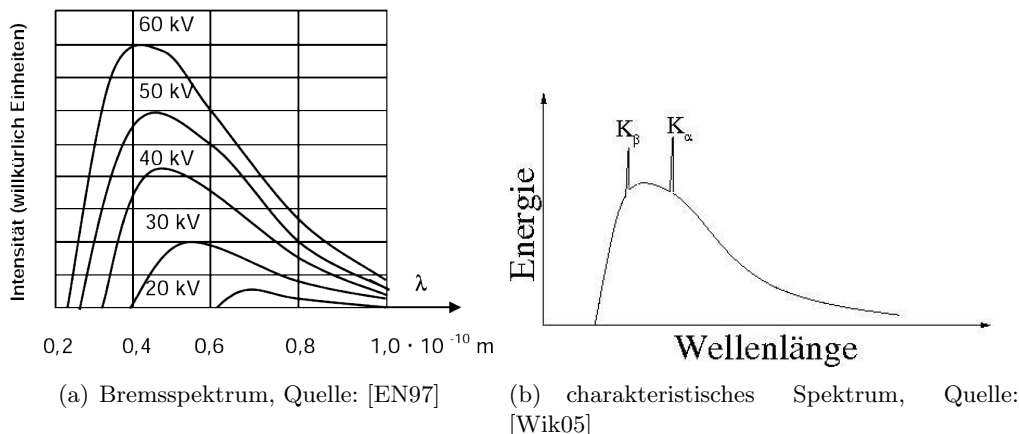


Abbildung 3: Spektrum der Röntgenröhre, schematisch

gungsspannung U abhängt (Abb. 3(a)). Es gilt:

$$hf_{\text{Grenz}} = h \frac{c}{\lambda_{\text{Grenz}}} = e \cdot U \tag{1}$$

Machen Sie sich klar, aus welchem Modell für Röntgenstrahlung Gleichung (1) folgt!

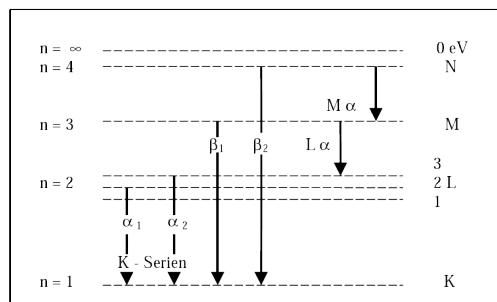


Abbildung 4: Termschema eines Atomkerns, schematisch. Quelle: [EN97]

Die **charakteristische Strahlung** besteht aus einem Linienspektrum, welches für das verwendete Anodenmaterial typisch ist. Dabei werden die Atomkerne durch Stöße auf ein höheres Energieniveau angeregt. Wenn sie wieder in den Grundzustand zurückfallen (Termschema Abb. 4), emittieren Sie dabei Strahlung ganz bestimmter Wellenlängen. Diese Strahlung wird dem Bremspektrum überlagert (Abb. 3(b))

Eine **Änderung der Beschleunigungsspannung** ändert die kinetische Energie der Elektronen. Dies hat zur Folge, dass sich die Wellenlängenverteilung der Bremsstrahlung und damit die Durchdringungsfähigkeit (Härte der Strahlung) ändert.

Eine **Änderung der Heizstromstärke** ändert die Zahl der austretenden Elektronen und damit die Intensität der

3.2.2. Bragg-Reflexion

Wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt, haben Röntgenstrahlen Energien von einigen keV; die Wellenlängen sind also in der Größenordnung von einigen Å. Das entspricht ungefähr

dem Gitterabstand von Kristallen. Daher eignen sich diese ideal zur Beugung von Röntgenstrahlung.

Die Bragg-Reflexion ist eine Beugungs- und Interferenzerscheinung, die beim Auftreffen eines Röntgenstrahles auf einen Kristall beobachtet wird. Vereinfacht kann man sich vorstellen, dass die Röntgenstrahlung an den Netzebenen des Kristalls, die durch den Abstand d voneinander getrennt sind (Abb. 5), reflektiert wird. Das Reflexionsvermögen wächst mit der Elektronendichte in der Netzebene.

Wenn die Wellennormale der einfallenden Röntgenwelle mit der Netzebene den Winkel ϑ einschließt, beträgt der Gangunterschied zweier an benachbarten Ebenen reflektierten Wellen $2d \sin \vartheta$. Konstruktive Interferenz zwischen den von benachbarten Ebenen reflektierten Wellen tritt immer dann auf, wenn ihr Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches ihrer Wellenlänge ist:

$$2d \sin \vartheta = n\lambda \quad (\text{Bragg-Bedingung}).$$

Damit kann man die Gitterkonstanten unbekannter Kristalle ermitteln, wenn man Röntgenstrahlung einer bekannten Wellenlänge verwendet. Umgekehrt kann die spektrale Zusammensetzung von Röntgenstrahlung untersucht werden, falls die Gitterkonstanten gegeben sind.

Im folgenden Versuch wird mit einem kubischen LiF-Einkristall die spektrale Zusammensetzung der von der Kupferanode ausgehenden Röntgenstrahlung ermittelt.

3.2.3. Geiger-Müller-Zählrohr

Das Geiger-Müller-Zählrohr besteht aus einem Draht (Anode) und einem diesen umgebenden Rohr (Kathode) (Abb. 6(a)). Über einen hochohmigen Widerstand wird zwischen Kathode und Anode des Fensterzählrohrs eine Spannung angelegt. Diese verursacht in der unmittelbaren Umgebung des dünnen Anodendrahtes eine große elektrische Feldstärke¹³.

Die Spannung ist so hoch eingestellt, dass selbständige Entladungen gerade noch nicht auftreten können. Erst durch das Eintreffen ionisierender Teilchen (z.B. Röntgenphotonen) wird durch Stoßionisation eine Glimmentladung gezündet, die in kurzer Zeit den ganzen Anodendraht schlauchförmig umgibt. Dadurch wird in der Umgebung des Drahtes eine große Zahl von positiven Ionen gebildet.

Durch die sich aufbauende Raumladung wird die elektrische Feldstärke am Draht so stark erniedrigt, dass die Entladung erlischt. Durch den hochohmigen Widerstand kann

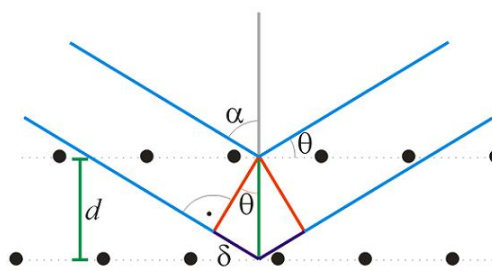


Abbildung 5: Schema der Bragg-Reflexion.
Quelle: [Dip05]

¹³(Spitzeneffekt)

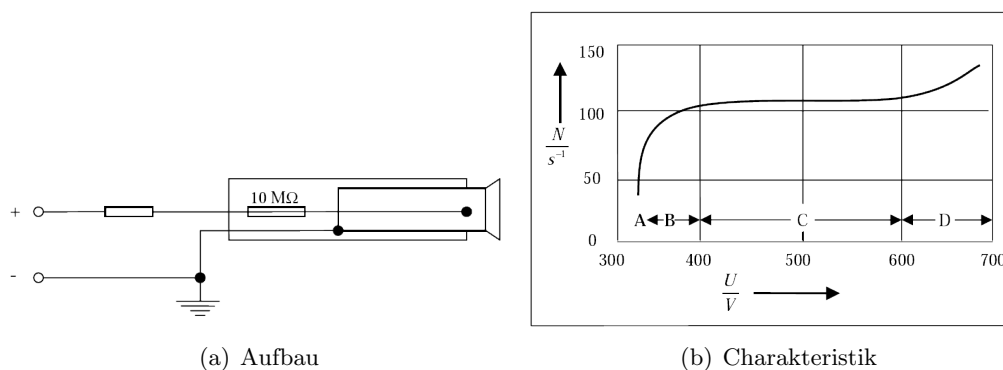


Abbildung 6: Schemata zum Geiger-Müller-Zählrohr. Quelle: [EN97]

sich nun wieder die ursprüngliche Ladungsverteilung herstellen. Nach einer gewissen Totzeit ist das Fensterzählrohr für das nächste Teilchen betriebsbereit.

Für den Betrieb des Zählrohrs ist seine Charakteristik von entscheidender Bedeutung. Hierunter versteht man die Abhängigkeit der Zeit der Entladungsstöße von der am Zählrohr anliegenden Spannung. Eine typische Zählrohrcharakteristik ist in Abb. 6(b) gezeigt.

Bei der sogenannten Einsatzspannung A treten die ersten Entladungen auf. Bei einer Erhöhung der Spannung gelangt man in den Proportionalbereich B. Hier ist die Zahl der ausgelösten Impulse der Energie der einfallenden Teilchen proportional und abhängig von der Teilchenart. Das eigentliche Arbeitsgebiet des Geiger-Müller Zählrohres ist der nun folgende Auslösebereich C. Hier verläuft die Zählrohrcharakteristik annähernd horizontal, die Zahl der Entladungen ist nahezu unabhängig von der anliegenden Spannung. Auch die Größe jedes Energiestoßes ist weitgehend unabhängig von der Art und der Energie des Teilchens, jedoch abhängig von der Spannung. Daher ist dieser Bereich gut zur Teilchenbestimmung geeignet. Oberhalb dieses Gebietes, im Bereich D, treten selbständige Zündungen und Dauerentladungen auf, die in kurzer Zeit das Zählrohr zerstören.

3.3. Beschreibung und Inbetriebnahme der Geräte

3.3.1. Röntgenröhre

 **Vorsicht Röntgenstrahlung!**

 **Vorsicht Hochspannung!**

Die Röntgenröhre befindet sich zu Ihrer eigenen Sicherheit in einem Bleiglasdom. Dennoch sollten Sie bei der ganzen Versuchsreihe darauf achten, sich so wenig Strahlung wie

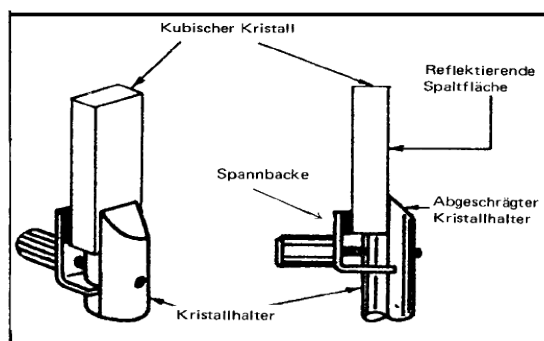


Abbildung 7: Skizze der Kristallhalterung

möglich auszusetzen (kurze Betriebszeit, großer Abstand von der Röhre, Vorausberechnen des Strahlengangs etc.). Es versteht sich von selbst, dass Sie die Röhre (oder zumindest deren Strahlung) erst dann in Betrieb nehmen, wenn der Versuch fertig justiert ist und Sie vorher alle notwendigen Handlungsschritte durchgegangen sind.

Durch Einschalten der Netzspannung wird die Heizspannung eingeschaltet und die Kathode beginnt zu glühen. Lassen Sie diese vor der Versuchsdurchführung etwa 15 min vorglühen. Anschließend können sie die Emission der Röntgenstrahlung durch Betätigen des Tasters „X-Strahlung“ einschalten. Sofort gelangen Röntgenstrahlen durch das Austrittsfenster des Bleiglasdomes in Richtung des Kristallhalters (Abschnitt 3.3.2) ins Freie.

Der Anodenstrom kann über die Buchse „ I_A -Messen“ gemessen werden.

Sollten sie dazu gezwungen sein, die Abschirmhaube des Gerätes zu öffnen, wird die Hochspannung (und damit die Röntgenstrahlung) automatisch abgeschaltet. In Ihrem eigenen Interesse sollten sie die Röhre aber vor jedem Öffnen selbst abschalten.

3.3.2. Justieren der Apparatur

Treffen Röntgenstrahlen im Winkel ϑ auf den Kristall, so werden diese nach dem Reflexionsgesetz in den Winkelbereich 2ϑ gebeugt (Abb. 1). Damit Sie nicht Kristalldrehung und Detektorposition immer wieder aufeinander abstimmen müssen, sind diese fest miteinander verbunden. Überprüfen Sie, ob Messarm und Kristallhalter derart gekoppelt sind, dass sie sich im Verhältnis 2 : 1 drehen. Dadurch ist gesichert, dass ein auf dem Messarm angebrachter Detektor um den doppelten Winkel¹⁴ bewegt. Da sich je nach Wellenlänge verschiedene Reflexionswinkel ergeben, ist somit eine brauchbare Darstellung des gesamten Spektrums möglich.

3.3.3. Einsetzen des Kristalls

Setzen Sie den Einkristall hochkant und senkrecht auf die Stufe des Kristallhalters; dabei ist die matt erscheinende Fläche die reflektierende Seite für die Röntgenstrahlung.

¹⁴gemessen bzgl. dem Einfallswinkel der Strahlen am Kristall

Diese Fläche soll gegen die abgeschrägte Seite des Kristallhalters stoßen (Abb. 7). Verschieben Sie den Kristall derart in horizontaler Richtung, dass diesen der ankommende Röntgenstrahl in der Drehachse des Kristallhalters trifft.

3.3.4. Strahlungsnachweis

Das Zählrohr wird mit einem Impulszählgerät gekoppelt, welches kann maximal 9999 Impulse zählen kann. Zusätzlich können sie einen Lautsprecher anschließen, um die Impulse hörbar zu machen. Führen Sie zur Messung das Zählrohr über den gesamten zu untersuchenden Winkelbereich und bestimmen Sie für jeden Messpunkt die Intensität der Strahlung durch Zählen der angekommenen Impulse in einem Zeitintervall von 10 s (diese Zeit können Sie mit einer Stoppuhr messen, falls der Impulszähler keine eingebaute Zeitmessung hat).

Achten Sie besonders peinlich auf die genaue Einstellung des gewünschten Winkels des Messarms, da sonst bei der Auswertung „falsche“ Werte entstehen!

4. Aufgaben

4.1. Röntgenspektrum

Treffen 30 keV-Elektronen auf die Kupferanode, so entstehen Röntgenstrahlen. Ermitteln Sie deren spektrale Zusammensetzung.

4.1.1. Vorbereitung

Überprüfen Sie, ob der

- 1 mm-Kollimatorsplatt in den Bleiglasdom und die
- 1 mm Bleisplattblende in das Diamagazin (E.S. 13) eingesetzt sind.
- Die 1 cm Doppelkreisblende sollte sich in in E.S. 10,
- der Zählrohrhalter in E.S. 21 und 24 befinden.
- Richten Sie das Zählrohr darin so aus, dass sich die Öffnung direkt hinter der Kreisblende befindet.
- Verwenden Sie zur Bragg-Beugung den LiF -Einkristall.

4.1.2. Messung

Messen Sie die Intensität der am LiF -Einkristall gebeugten Röntgenstrahlen im Winkelbereich $2\theta \in [12^\circ; 120^\circ]$ in 1° - und im Bereich der Maxima in $0,1^\circ$ -Schritten. Messen Sie für jeden Messpunkt die Anzahl der Impulse in einem Zeitintervall von 10 s bei einem Emmissionsstrom von 0,05 mA.

Kristall	Gitterkonstante
<i>LiF</i>	402 pm
<i>MgO</i>	420 pm
<i>NaCl</i>	564 pm
<i>KCl</i>	628 pm
<i>RbCl</i>	654 pm
<i>KBr</i>	659 pm
<i>RbBr</i>	685 pm
<i>KJ</i>	705 pm
<i>RbJ</i>	733 pm

Tabelle 1: Netzebenenabstände einiger Kristalle

4.1.3. Auswertung

- Tragen sie gemessene Zählrate (in Impulsen/ s) logarithmisch über dem Winkel 2ϑ auf.
- Wie viele Elektronen treffen bei dem von Ihnen gemessenen Emmissionsstrom auf die Anode?

4.2. Bestimmung der Gitterkonstanten des Einkristalls

Messen Sie nun mit Hilfe der charakteristischen Linien des Röntgenspektrums die Gitterkonstante eines unbekanntem Einkristalls.

4.2.1. Vorbereitung

Verwenden Sie dafür den Versuchsaufbau aus Aufgabe 4.1.1 und tauschen Sie den bisher verwendeten Kristall mit dem unbekanntem Kristall (blau gekennzeichnet) aus.

4.2.2. Messung

Messen Sie das Röntgenspektrum wie in Aufgabe 4.1.2.

4.2.3. Auswertung

Bestimmen Sie mit Hilfe der Braggbeziehung den Gitterebenenabstand des unbekanntem Kristalls. Verwenden Sie dafür die bekannten Wellenlängen $\lambda_{K_\alpha} = 154$ pm und $\lambda_{K_\beta} = 138$ pm. Finden Sie anschließend heraus, mit welchem Kristall Sie gearbeitet haben. Tabelle 1 zeigt dafür die Gitterebenenabstände einiger Kristallarten.

Teil III.

Radioaktivität

5. Vorbereitung

5.1. Versuchsaufbau

In diesem Experiment lernen sie eine Möglichkeit kennen, das Energiespektrum radioaktiver Strahlung direkt zu messen. Anschließend beobachten sie die Absorption von α -Strahlung in Luft.

Die Versuche sind im Prinzip denkbar einfach aufgebaut: Sie stellen ein radioaktives Präparat vor einen Detektor und messen. Die Schwierigkeit liegt im Detail des Detektors.

5.2. Kernstrahlungsmessgerät 7140 von Neva

Das Messgerät gestattet die Detektion *und* energetische Voranalyse von α - und β -Teilchen. Es besteht aus einem Halbleiterdetektor, einem Ladungsverstärker und einem Betriebsgerät.

5.2.1. Der Halbleiterdetektor

Der Halbleiterdetektor, dessen physikalische Grundlagen näher im Anhang 7.1.4 auf Seite 18 beschrieben werden, kann lt. Herstellerangaben α -Teilchen mit Energien $E_\alpha \leq 12$ MeV und β -Teilchen mit Energien kleiner als 150 keV ideal detektieren, da diese in der Sperrschicht vollständig absorbiert werden. γ - und Röntgenstrahlen werden nur schwach in der Sperrschicht dieses Detektors absorbiert und können deswegen nicht nachgewiesen werden.

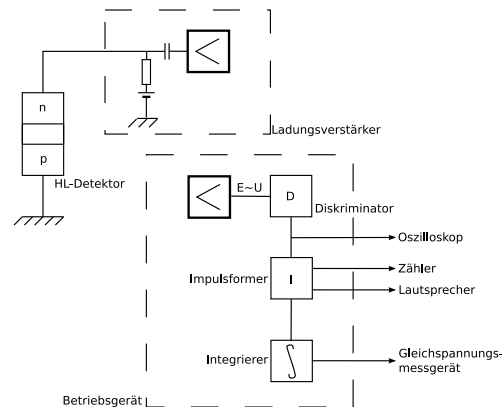


Im sichtbaren und Infrarotbereich ist der Sperrschichtdetektor sehr empfindlich, weswegen er bei Messungen an ionisierenden Teilchen abgedunkelt werden muss. Durch einfallendes Licht wird die Empfindlichkeit für ionisierende Teilchen verringert. Sogar Kontrollämpchen können störend wirken. Wechsellicht ist unbedingt zu vermeiden.

5.2.2. Ladungsverstärker und Diskriminator

Die Ladungspulse, die auftreffende ionisierende Teilchen im Sperrschichtdetektor erzeugen, werden elektronisch weiterverarbeitet, wie aus dem schematischen Schaltbild in Abb. 8 zu entnehmen ist.

Der **Ladungsverstärker** hat die Aufgabe, eine der erzeugten Ladung Q proportionale Spannung U abzugeben. Diese wird im Betriebsgerät nochmals verstärkt und gelangt dann zu einem **Diskriminator**, der entscheidet, ob ein Spannungspike – der auch aus dem Rauschen stammen kann – verarbeitet wird oder nicht. Sie können die Schwellenhöhe des Diskriminators mit dem frontseitigen Regler einstellen. Da nach den

Abbildung 8: Blockschaltbild der Elektronik des α -Detektors

Überlegungen im Anhang die Impulshöhe ein Maß für die kinetische Energie der Teilchen darstellt, ist es so möglich, Energiespektren aufzunehmen. Außerdem ist noch eine feste Schwellenhöhe wirksam, um das Rauschen zu unterdrücken.

Die Verstärkung des Betriebsgerätes kann an einem Kippschalter um den Faktor 10 geändert werden, um das geringe Ionisationsvermögen der β -Teilchen auszugleichen. Bei kleiner Verstärkung (Position α) werden nur α -Teilchen detektiert; bei großer Verstärkung (Position β) werden beide Teilchensorten nachgewiesen. Eventuell störende α -Teilchen können durch ein Blatt Papier ausgefiltert werden.

5.2.3. Anzeige



Bei allen Messungen ist darauf zu achten, dass die Zählrate $1000/\text{s}$ nicht übersteigt, da die Zählgeschwindigkeit des Ladungsverstärkers und Betriebsgerätes beschränkt sind.

Die Anzeige und Messung der auftreffenden Teilchen kann auf vierfache Weise geschehen:

- Der Ausgang des Diskriminators kann direkt am Oszilloskop betrachtet werden (grüne Buchse)
- Der Ausgang Zähler (gelbe Buchse) liefert Normimpulse eines Impulsformers, die ausgelesen werden können.
- Ein Integrierer gibt eine zur Zählrate proportionale Gleichspannung ab (Mittelwertanzeige). Diese kann mittels Drehschalter in 3 Stufen geschaltet werden. 1V gemessene Spannung entspricht der jeweils eingestellten Impulsrate. Zur Anzeige ist jedes Gleichspannungsmessgerät geeignet.
- Zum akustischen Nachweis kann wie beim Geiger-Müller-Zählrohr ein Lautsprecher ($R \geq 4\Omega$) angeschlossen werden.

Weitere Details über das Gerät stehen im Anhang 7.2 auf Seite 19.

5.3. Der Impulshöhenanalysator 7144 von Neva

Der Impulshöhenanalysator ermöglicht zusammen mit dem o.g. Kernstrahlungsmessgerät die schnelle und einfache Aufnahme von Energiespektren von α -Strahlern. Die zur Energie proportionalen Pulse, die aus dem Kernstrahlungsmessgerät kommen, können gleichzeitig in 256 Kanälen gezählt werden. In jedem dieser Kanäle werden nur Impulse registriert, deren Höhe in ein für jeden Kanal typisches „Fenster“ fällt.

6. Aufgaben



6.1. Kennenlernen der Geräte

Stellen Sie die Geräte nach Abb. 8 auf Seite 12 zusammen und überprüfen Sie mit Hilfe des ^{241}Am -Präparats die verschiedenen Möglichkeiten zur Registrierung der auf den Detektor treffenden α -Teilchen:

- durch Beobachtung der Spannungsimpulse am Oszillographen (zeitliche Impulsfolge, Form der Einzelimpulse)
- durch Anschluss eines Gleichspannungsmessgerätes an den Integrierausgang

Untersuchen und beschreiben Sie qualitativ für beide Registrierungsmöglichkeiten den Einfluss des Abstands s zwischen Präparat und Detektor, sowie die Wirkung des Schwellenhöhenreglers.

6.2. Test und Eichung des Impulshöhenanalysators

6.2.1. Kennenlernen

Schließen Sie den Impulshöhenanalysator an das Betriebsgerät an, beobachten Sie auf dem Oszilloskop das Aufnehmen des Impulshöhenspektrums der α -Teilchen aus ^{241}Am (Betriebsart: Einlesen) und stellen Sie anschließend die aufgenommene Impulshöhenverteilung am Oszilloskop dar (Betriebsart: Auslesen).

Was bewirkt die Änderung der Verstärkung von 5/5 nach 5/2?

6.2.2. Eichung

Voraussetzung für eine quantitative Energiespektrographie ist die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Impulshöhe und kinetischer Energie der α -Teilchen. Dieser Zusammenhang kann unter Zuhilfenahme eines Eichpräparates ermittelt werden. Dabei werden für ein Präparat mit bekannter Energie die Impulsspektren bei zwei verschiedenen Abständen Präparat-Detektor aufgenommen. Abbildungen 9 zeigen solche Messungen, bei denen als Eichpräparat ^{241}Am verwendet wurde (Verstärkung $v = 5/5$).

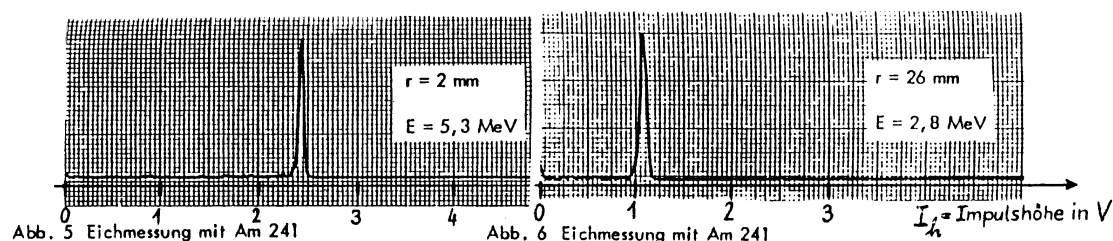


Abbildung 9: Eichmessung des Impulshöhenanalysators, Präparat: ^{241}Am , Verstärkung $v = 5/5$

Bestimmen Sie aus den beiliegenden Eichmessungen die Koeffizienten a und b aus der Umrechnungsgleichung

$$E_{\alpha} = a + b \cdot I_h$$

6.3. Abhängigkeit der α -Energie von der durchlaufenen Wegstrecke s in Luft

6.3.1. Messung

Variieren Sie den Abstand s zwischen dem ^{241}Am -Präparat und Detektor in 2 mm-Schritten von 0 bis zur Reichweite der α -Teilchen. Bestimmen Sie jeweils am Oszillographen die zugehörige Impulshöhe der α -Linie von ^{241}Am ($E_0 = E_{\text{kin}}(s = 0) = 5,486 \text{ MeV}$) und die daraus folgende Teilchenenergie.

6.3.2. Auswertung

Stellen Sie das Messergebnis als $E_{\alpha} = f(s)$ und auch in der Form $\frac{\Delta E_{\alpha}}{\Delta s} = g(s)$ graphisch dar ($\frac{\Delta E_{\alpha}}{\Delta s}$ ist die Steigung der Messkurve $E_{\alpha} = f(s)$). Diskutieren Sie kurz die so erhaltenen Kurven.

6.4. α -Spektrum eines ^{226}Ra -Präparats

Ersetzen Sie das ^{241}Am -Präparat durch ^{226}Ra .

- Nehmen Sie mit dem Impulshöhenanalysator bei möglichst kleinem Abstand s das Energiespektrum der α -Teilchen aus dem ^{226}Ra -Präparat auf, skizzieren Sie es ins Heft und ordnen Sie den beobachteten Linien Zerfallsschritte in der Zerfallskette von ^{226}Ra zu (Abb. 2).
- Was passiert, wenn Sie ein Blatt Papier zwischen Präparat und Detektor bringen?

$\alpha : 4780, 4600 \text{ keV}$ (94, 5; 5, 5%)	^{226}Ra \downarrow	\curvearrowright	$\beta : 3260 \text{ keV}$
	^{222}Rn \downarrow	^{214}Po \downarrow	$\alpha : 7690 \text{ keV}$
$\alpha : 5480 \text{ keV}$	^{218}Po \downarrow	^{210}Pb \downarrow	$\beta : 61 \text{ keV}$
$\alpha : 6000 \text{ keV}$	^{214}Pb \downarrow	^{210}Bi \downarrow	$\alpha : 1160 \text{ keV}$
$\beta : 1030, 670 \text{ keV}$	^{214}Bi \downarrow	^{210}Po \downarrow	$\alpha : 6305 \text{ keV}$
$\beta : 3260 \text{ keV}$	\curvearrowright	^{210}Pb	

Tabelle 2: Zerfallskette von ^{226}Ra

7. Anhang

7.1. Halbleiter

7.1.1. Das Bändermodell: Leiter, Nichtleiter und Halbleiter

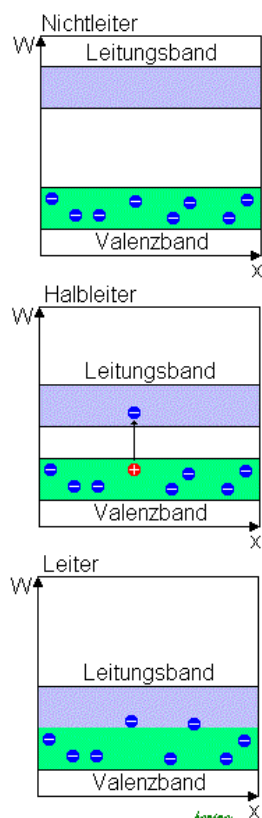


Abbildung 10: Bändermodell mit Leitungsband, verbotener Zone und Valenzband, Quelle: [Hon03a]

Um den Unterschied zwischen der Leitfähigkeit verschiedener Materialien zu erklären, bedient man sich des *Bändermodells*: Elektronen können in einem Festkörper nur bestimmte Energien annehmen. Diese werden als *Energiebänder* bezeichnet. Dabei unterscheidet man zwischen verschiedenen Energiebändern: Das Energieband mit den äußersten vollbesetzten Zuständen nennt man *Valenzband*. Das darüber liegende entweder teilweise gefüllte oder leere Band wird als *Leitungsband* bezeichnet. Elektrischer Strom kann nur dann fließen, wenn das Leitungsband teilweise gefüllt – also weder leer noch voll – ist. Bei Leitern ist das Leitungsband direkt ohne Abstand über dem Valenzband. Dadurch können Elektronen aus dem Valenzband direkt in das Leitungsband übergehen und dort zum Strom beitragen. Bei Halbleitern ist das leere Leitungsband vom voll gefüllten Valenzband durch eine mehr oder weniger breite *verbotene Zone* getrennt (siehe Abb 10). Die Breite E_g dieses sogenannten *Energiegaps*¹⁵ ist maßgebend für die elektrische Leitfähigkeit. Substanzen mit $E_g \leq 3$ eV werden zu den *Halbleitern* gerechnet. Materialien mit größeren Bandabständen zählen zu den *Nichtleitern*.

Zu den Halbleitern (HL) gehören die Elemente der IV. Gruppe (Si, Ge) des Periodensystems bzw. Verbindungen zwischen Elementen der IV. Gruppe (SiC), der III. und V. Gruppe (GaAs, InSb) bzw. der II. und VI. Gruppe (ZnTe, CdSe, HgS).

7.1.2. Dotierte Halbleiter

Der spezifische Widerstand von HL kann erheblich verändert werden durch den Einbau von Fremdatomen. Wird beispielsweise Silicium mit Atomen der V. Gruppe des Periodensystems dotiert¹⁶, dann bringt jedes Störatom ein Elektron mit, das keine Bindung mit nächsten Nachbarn eingeht und durch geringe Energiezufuhr von seinem Atom

¹⁵gap (engl): Abstand. Quelle: [Gmb07]

¹⁶dotieren: in eine Halbleiterkristalloberfläche Ionen eines leitfähigen Materials gezielt einbringen, Quelle: [Lan07]

abgetrennt werden kann. Im Bänderschema sind diese Elektronen energetisch dicht unter der Leitungsbandkante angesiedelt. Betrachtet man die Ionisierungsenergien einiger *Donatoren*¹⁷, so ist ersichtlich, dass bereits bei Raumtemperatur praktisch alle Störstellen ionisiert sind. In diesem Fall beruht die elektrische Leitung vorwiegend auf dem Transport der negativen Elektronen. Der Halbleiter wird deshalb als *n-leitend*¹⁸ oder als *n-Typ* bezeichnet.

Dotiert man jedoch mit Elementen aus der III. Gruppe, so fehlt an jedem Störatom ein Elektron zur Bindung. Bereits durch geringe Energiezufuhr kann dieses lokalisierte *Loch* von einem Elektron des Nachbaratoms ausgefüllt werden. Dadurch wandert das Loch ins Valenzband und kann als freies Loch am Ladungstransport teilnehmen. Die elektrische Leitung beruht also vorwiegend auf der Wanderung der positiven Löcher, man spricht deshalb von *p-Leitung*¹⁹ oder von *p-Typ*-Halbleitern. Da die Störstellen aus der III. Gruppe Elektronen aus dem Valenzband aufnehmen, werden sie *Akzeptoren* genannt.

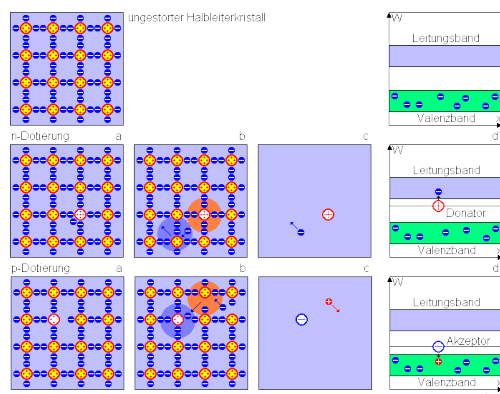


Abbildung 11: Dotierung von HL, Quelle: [Hon03b]

7.1.3. pn-Übergang

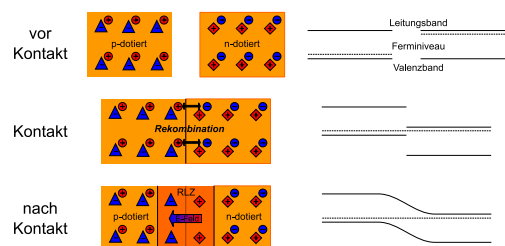


Abbildung 12: pn-Übergang, schematisch, Quelle: [Deg06]

Das Grundelement der meisten Halbleiterbauelemente ist der *pn-Übergang*, in dem p- und n-leitendes Material aneinanderstoßen. Infolge des Konzentrationsunterschiedes an Akzeptoren und Donatoren diffundieren Elektronen aus dem n- ins p-Gebiet und Löcher vom p- ins n-Gebiet und rekombinieren jeweils mit den Überschussladungsträgern²⁰. Die Übergangszone verarmt an beweglichen Ladungsträgern.

Durch den Abzug der Löcher aus dem p-Gebiet entsteht an dessen Rand durch die ionisierten Akzeptoren, die nicht mehr durch die entsprechende Anzahl von Löchern kompensiert wurden, eine *negative Raumladungszone*. Ebenso entsteht im n-Gebiet durch

¹⁷Elektronen„spender“

¹⁸n wie n-egativ

¹⁹p wie p-ositiv

²⁰Hinweis: Löcher werden auch als Ladungsträger angesehen.

die positiven Donatorenrümpfe eine *positive Raumladungszone*. Wegen der positiven und negativen Raumladungszone entstehen ähnlich wie beim Plattenkondensator ein Potentialgefälle und ein elektrisches Feld zwischen dem n- und p-Gebiet. Dabei wird die Potentialdifferenz U_d zwischen n- und p-Gebiet *Diffusionsspannung* genannt, weil sie infolge der Diffusion der beweglichen Ladungsträger entsteht.

Abbildung 12 zeigt anschaulich die Verteilung der Ladungsträger bei einem *pn*-Übergang. Die n-Ecke stellen die ortsfesten ionisierten Akzeptoren und Donatoren dar. Der Bereich rechts symbolisiert das Gebiet der beweglichen Elektronen, der Bereich links das der Löcher. Die Bänderdarstellung rechts zeichnet sich dadurch aus, dass im thermodynamischen Gleichgewicht ohne äußere Spannung das Fermi-Niveau²¹ in allen Bereichen auf gleicher Höhe liegt. Die Bandkanten verschieben sich zwischen dem n- und p-Gebiet um den Energiebetrag $e \cdot U_d$.

Legt man nach eine Spannung U in Sperrichtung²² an, dann werden die beweglichen Elektronen zum Pluspol und die Löcher zum Minuspol gezogen. Dadurch verbreitert sich die Raumladungszone um $e \cdot U$. Es fließt nur noch ein geringer Sperrstrom, der darauf beruht, dass Minoritäten²³ an den Übergang diffundieren und dort von dem starken elektrischen Feld auf die andere Seite befördert werden²⁴. Bei großen Sperrspannungen sättigt der Strom und geht in den Sperrsättigungsstrom I_S über.

Bei einer Spannung U in Flussrichtung baut diese die Diffusionsspannung ab, so dass die „Bandverbiegung“ kleiner wird. Die Breite der Raumladungszone wird verringert um den Energiebetrag $e \cdot U$. Die beweglichen Ladungsträger reichern sich in der Verarmungszone an und dringen ins benachbarte Gebiet ein, wo sie mit den dortigen Majoritäten rekombinieren. Der fließende Strom nimmt mit wachsender Spannung stark zu²⁵.

7.1.4. Der Halbleiterdetektor

Bei dem Halbleiterdetektor handelt es sich um einen Silizium-Oberflächen-Sperrschicht-detektor. Dies ist im Grunde eine *Si-Diode*²⁶, bei der sich die Sperrschicht sehr nahe an der Oberfläche befindet. Treten nun ionisierende Teilchen in die Sperrschicht, werden Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband angehoben. Es entstehen so Ladungsträgerpaare aus Elektronen und Löchern. Verlieren die ionisierenden Teilchen ihre Energie vollständig in der Sperrschicht, so ist die freigesetzte Ladung Q proportional zur kinetischen Energie E dieser Teilchen.

²¹Das Fermi-Niveau ist die höchste Energiekante, die bei einer Temperatur von 0 K noch mit Elektronen besetzt ist.

²²„Sperrspannung“

²³Der in einer Zone vorherrschende Ladungsträgertyp (z.B. Elektronen) heißt *Majoritäten*, der jeweils andere (z.B. Löcher) *Minoritäten*.

²⁴*tunneln*. Man spricht hier auch vom *Tunnelstrom*.

²⁵Eine ausführliche Erklärung findet sich unter http://www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/ (Stand: 08.03.2007).

²⁶Diode=pn-Übergang

7.2. Technische Details des verwendeten Detektors

Versorgungsspannung	220 V \sim
Detektorfläche	12 mm ²
Dicke der Sperrschicht	100 μ m
Fensterdicke über Sperrschicht	< 40 μ g/cm ² Au
Gegenspannung	9 V
Linearitätsbereich	\leq 12 MeV bei α -Teilchen \leq 150 keV bei β -Teilchen

Literatur

- [Deg06] Degreen: *Pn Uebergang*, 2006. http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Pn_Uebergang.svg, Stand: 05.03.2007, Lizenz: cc-by-sa.
- [Dip05] Dipl.Phys.: *Bragg.jpg*, 2005. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Bragg.jpg>, Stand: 14.03.2007, Lizenz: gemeinfrei (public domain).
- [EN97] Erlangen-Nürnberg, Uni: *Anleitungen zum Anfängerpraktikum*, 1997. <http://www.physik.uni-erlangen.de/studium/veranstaltungen/anfaengerpraktikum/anleitungen-zum-anfaengerpraktikum>, Stand: 05.03.2007.
- [Gmb07] GmbH, LEO: *Wörterbuch Englisch-Deutsch*, 2007. <http://dict.leo.org/>, Stand: 05.03.2007.
- [Hon03a] Honina: *Bändermodell*, 2003. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:B%C3%A4ndermodell.PNG>, Stand: 05.03.2007, Lizenz: GFDL.
- [Hon03b] Honina: *Halbleiter1*, 2003. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Halbleiter1.PNG>, Stand: 05.03.2007, Lizenz: GFDL.
- [Lan07] Langenscheidt: *Fremdwörterbuch*, 2007. <http://services.langenscheidt.de/fremdwb/fremdwb.html>, Stand: 08.03.2007.
- [Mes04] Meschede, Dieter: *Gehrtsen Physik*. Springer Verlag, 2004, ISBN 3-540-02622-3.
- [Tip94] Tipler, Paul A.: *Physik*. Spektrum Verlag, 1994, ISBN 3-86025-122-8.
- [Wik05] Wikipedia: *Grafik roentgenspektrum*, 2005. http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Grafik_roentgenspektrum.JPG, Stand: 14.03.2007, Lizenz: gemeinfrei (public domain).

