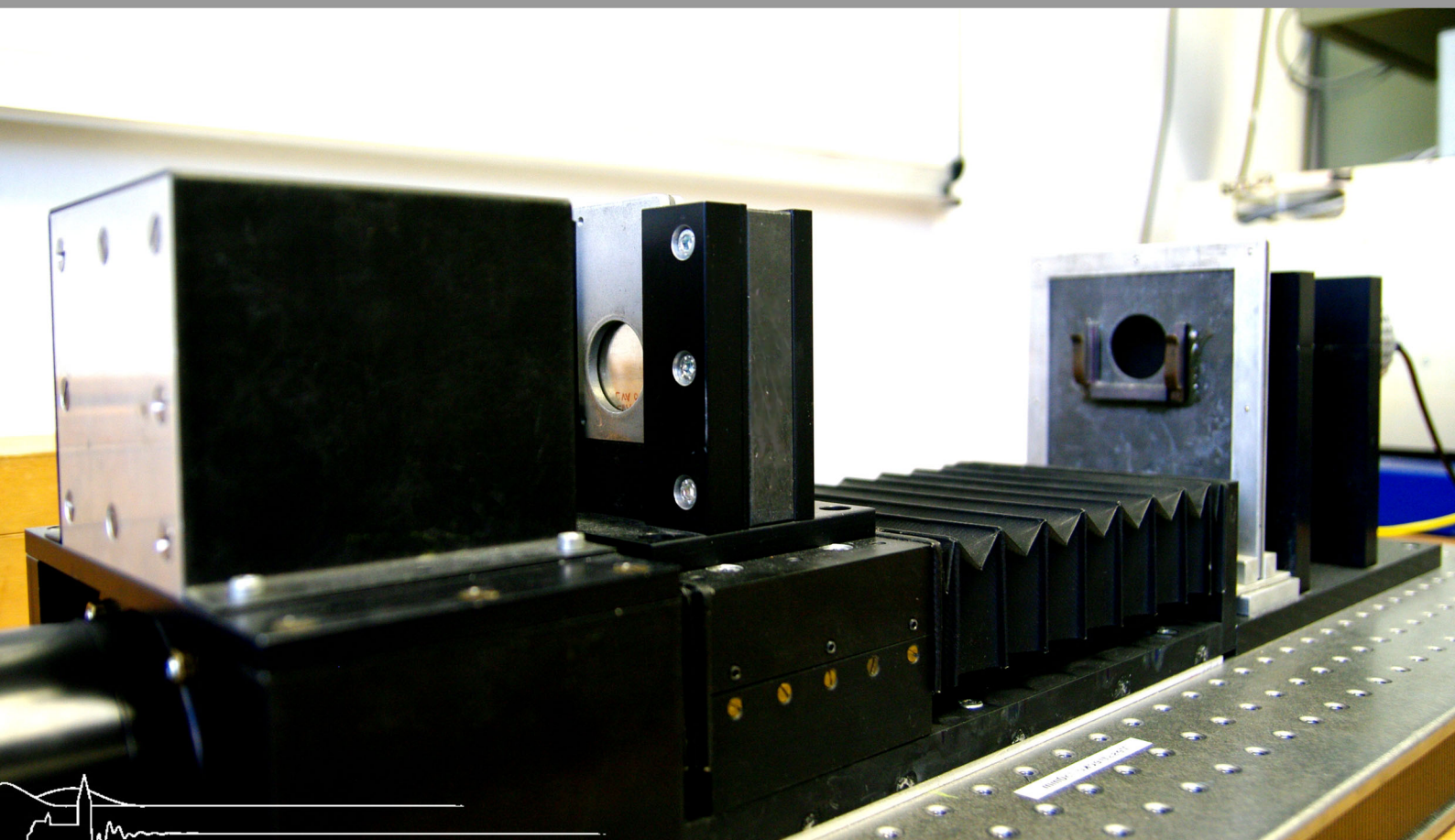




Universität Freiburg

Versuchsanleitung
**Fortgeschrittenen
Praktikum**
Teil II

Der Mößbauer-Effekt



Der Mößbauer-Effekt

INSTITUT FÜR MATHEMATIK UND PHYSIK
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT
FREIBURG IM BREISGAU

26. JUNI 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Übersicht	1
1.1	Ziel des Versuches	1
1.2	Vorwort zum Versuch	1
2	Grundlagen	2
2.1	Grundlagen des Mößbauereffektes	2
2.2	Allgemeine Grundlagen	3
3	Versuchsaufbau	3
4	Aufgabenstellung und Durchführung	6
5	Auswertung	7
6	Geräteliste	8
7	Literatur	9
	Quellenverzeichnis	9
8	Anhang	10
8.1	Informationen über die radioaktive Quelle	10
8.2	Informationen über die Fluoreszenzquelle	10
8.3	Debye-Waller-Faktor	11
8.4	Transmission von γ -Quanten	12
8.5	Abschwächungskoeffizienten	13

1 Übersicht

1.1 Ziel des Versuches

Mit Hilfe des Mößbauereffektes sollen Absorptionslinien in Edelstahl und Natureisen aufgenommen werden. Dazu wird eine Eisen-Quelle verwendet, die eine sehr schmale Linie bei 14,4 keV aussendet. Die Breite dieser Linie lässt sich aber aufgrund der schlechten Energieauflösung eines Szintillationszähler-Systems nicht einmal annähernd direkt messen. Im FP1 Versuch 'Kurze Halbwertszeiten' - auch hier wird die Lebensdauer (und damit die Breite) des 14,4 keV Zustands von ^{57}Fe bestimmt - hatte man mit einem Time-to-Pulse-Converter (TPC) die Zeit zwischen Be- und Entvölkerung des Zustands gemessen und damit die Lebensdauer. Beim Mößbauereffekt misst man hingegen, wie die Transmission durch eine resonant absorbierende Folie sich durch Dopplerverschiebung der γ -Energie mit der Geschwindigkeit ändert. Dadurch kann auf die Lebensdauer des Zustands geschlossen werden. 'Chemical shifts' = Isomerieverschiebungen können damit genau vermessen werden, wie auch Magnetfelder am Kernort.

1.2 Vorwort zum Versuch

Die Resonanzabsorption von Gammastrahlen bildet im nuklearen Bereich ein Analogon zu der wohlbekannten Erscheinung des optischen Fluoreszenzeffekts. Obwohl ihre Existenz bereits 1929 vorausgesagt war, ist sie erst 1951 zum ersten Male beobachtet worden. Von da an wurden verschiedene Methoden entwickelt, die zur Beobachtung der Resonanzabsorption bei Kernzuständen führten. Ein Durchbruch gelang 1958, als Rudolf Ludwig Mößbauer das Phänomen der rückstoßfreien Resonanzabsorption entdeckte. Dieser neue Absorptionseffekt eröffnete eine Möglichkeit, die bei Emission und Absorption auftretenden Energieverluste zu eliminieren. Die Energieverluste waren das größte Hindernis gewesen, die Resonanzabsorption im Experiment beobachten zu können. Gleichzeitig erhielt man Gammalinien höchster Schärfe.



Bei der Verleihung des Nobelpreises für Physik im Jahre 1961 wurde R. Mößbauer folgendermaßen angesprochen:

„Herr Professor Mößbauer, Sie haben die Wirkung der rückstoßfreien Emission von Gammastrahlen in festen Körpern entdeckt und dadurch ungeahnte Möglichkeiten zu enorm verfeinerten Messungen von fundamentalen Größen anweisen können. Die Experimentalphysik hat dadurch ein neues Hilfsmittel zur Lösung verschiedener Grundfragen erhalten. Wir bewundern besonders, dass Ihre Entdeckung aus einer beobachteten Abweichung von dem erwarteten Ergebnis entstand, die Sie mit dem Scharfsinn des geborenen Forschers ausnützen konnten.“

Abbildung 1: *Rudolf Mößbauer, 1961*

Interessant - vor allem auch hinsichtlich des Wertes seiner Entdeckung - ist auch ein Teil der Ansprache Mößbauers:

„Solange es Menschen gibt, werden sie nicht aufhören, Fragen an die Natur zu stellen. Nach erfolgreicher Beantwortung einiger derartiger Fragen ist man versucht, über den praktischen Wert des bisher Erreichten nachzudenken. Zwar ist mein spezielles Arbeitsgebiet im materiellen Sinne sehr weit von jeglicher Beziehung für das Wohlergehen des Einzelnen entfernt, doch bedeutet es eine gewisse Befriedigung, dass die entwickelten Methoden nicht nur in einem speziellen Gebiet Anwendung finden, sondern in viele Zweige der Physik, Chemie und neuerdings auch der Medizin eindringen und in dieser Weise mitwirken die Verbindung zwischen den einzelnen Disziplinen zu vertiefen. Ich verbinde hiermit auch die Hoffnung, dass diese Entwicklung dazu beitragen möge, im Sinne Alfred Nobels den internationalen Kontakt unter den Wissenschaftlern zu verbessern und in dieser Weise mithelfen möge die internationale Verständigung zu fördern.“

2 Grundlagen

2.1 Grundlagen des Mößbauereffektes

Ein Atomkern, der bei einem Zerfall ein Teilchen emittiert, erfährt einen Rückstoß, der von der Masse des Kerns und dem Impuls des ausgesandten Teilchens abhängt. Die dadurch auf den Kern übergehende Energie vermindert die Energie des Teilchens, und verändert so die Form der Linie im Zerfalls-Spektrum. Ist der Kern fest in einem Kristallgitter eingebunden, muss der Impuls - auf welche Weise auch immer - vom gesamten Kristall aufgenommen werden. Dadurch verringert sich die Energie, die dem ausgesandten Quant fehlt.

Vorbereitung:

- Wie groß sind Impuls- und Energieübertrag auf einen freien Eisen-Kern beim 14,4 keV Übergang?
- Wie ändert sich das, wenn als Masse des Kerns die Masse von 1 mol Eisen angenommen wird (simples Kristallmodell)?

Die Bindung im Kristall ist jedoch nicht beliebig stark, und daher kann der Rückstoß auch als Phonon aufgenommen werden. Allerdings muss dazu exakt die Energie des Phonons auf den Kristall übertragen werden. Ist die Energie der emittierten Strahlung geringer als diese Energie, ergibt sich eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, dass so ein Phonon angeregt wird. Das Phononspektrum eines Kristalls kann mit verschiedenen Modellen vorhergesagt werden.

Vorbereitung:

- Was ist das Einstein-Modell, was das Debye-Modell eines Kristalls?
- Wie sieht ein Spektrum eines Zerfalls theoretisch aus, wenn man das Einstein bzw. das Debye-Modell zugrunde legt? Was ist die Debye-Temperatur? Was hat sie mit einer 'normalen' Temperatur zu tun? Warum ist die thermische Temperatur des Kristalls wichtig? Warum hat Mößbauer den Versuch gekühlt durchgeführt?

Durch diesen Einbau der radioaktiven Atome in einen Kristall kann eine relative Linienbreite von $\approx 10^{-13}$ erreicht werden. Mit dieser scharfen Energie kann sogar der Energieverlust eines Photons im Gravitationsfeld der Erde nachgewiesen werden, was sonst aufgrund von (thermischer) Doppler- oder Rückstoßverbreiterung unmöglich wäre.

Wie nun aber soll eine so schmale Linie vermessen werden? Man bedient sich hier bei der Absorption des selben Effekts wie bei der Emission, um eine Absorptionslinie zu messen, der Resonanzabsorption. Ein Absorber wird auf einem Schlitten montiert, der mit wenigen mm/s von der Quelle weg und auf sie zu bewegt wird. Die Dopplerverschiebung, die durch die Bewegung zu Stande kommt, bewirkt, dass der Absorber eine leicht veränderte Energie des Photons 'sieht', und dieses Photon somit bei verschiedenen Geschwindigkeiten mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit absorbiert. Die Linie kann rekonstruiert werden, wenn man die Rate der nicht absorbierten Teilchen hinter dem Absorber gegen die Geschwindigkeit (i.e. Energie) aufträgt.

Vorbereitung:

- Machen Sie sich die Größenordnungen klar, die hier eine Rolle spielen!
- Um wie viel schmaler ist die natürliche Linienbreite, als eine z.B. optisch in einer Dampfampe gemessene Linie? (Lebensdauer \longleftrightarrow Breite)
- Wie groß ist der Energieverlust (in Einheiten der Linienbreite) eines Photons, das 10 m im erdnahen Gravitationsfeld nach oben zurücklegt. Wie groß ist die Dopplerverschiebung bei einer Geschwindigkeit von 10 mm/s?

2.2 Allgemeine Grundlagen

Neben den Grundlagen des Mößbauereffekts sollten Sie natürlich über weitere grundlegende Dinge Bescheid wissen. Unter anderem:

- Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie
- Funktionsweise des verwendeten Detektors:
Was ist ein Szintillator? Welche Typen gibt es? Welche sind zur Messung der Energie geeignet? Wo liegen die Grenzen der Energiemessung, welche Fehlerquellen gibt es? Was hat die Größe des Kristalls mit der Auflösung zu tun? Weitere Effekte im Kristall?
- Statistik und Fehlerrechnung

3 Versuchsaufbau

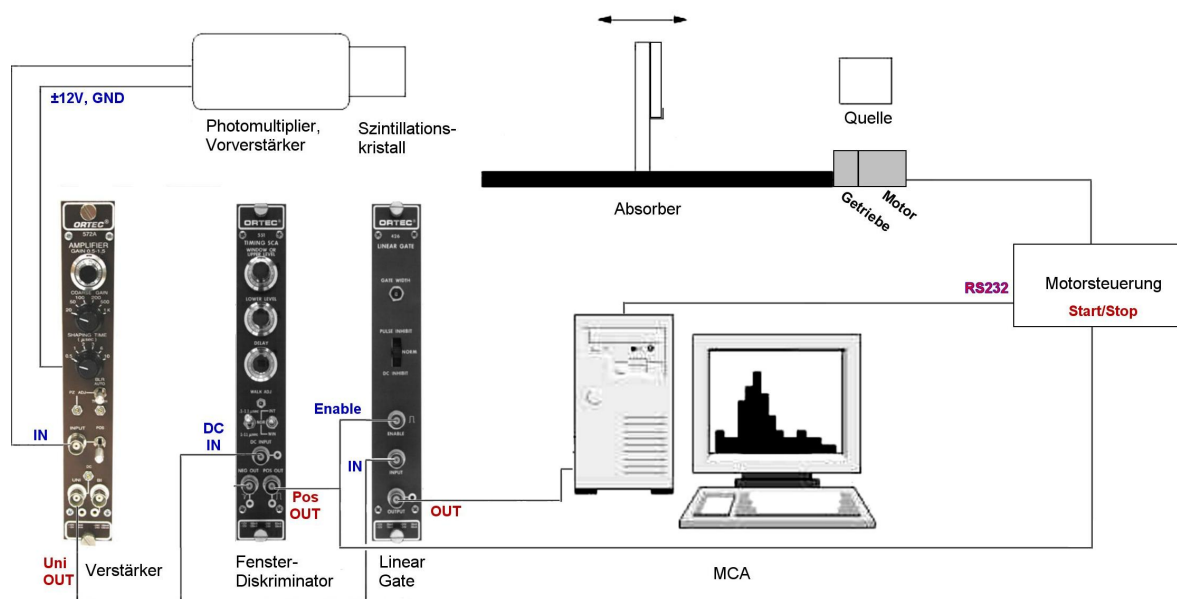


Abbildung 2: Aufbau des Versuches im Blockbild

Die Absorber werden auf einem Schlitten montiert, der von einem Linearmotor bewegt wird. Über eine Motorsteuerung können Werte von (0,01 – 10,0) mm/s gefahren werden.

ACHTUNG: Keine höheren Geschwindigkeiten fahren!

Die Motorsteuerung startet und stoppt die Zähler automatisch nach einigen mm Weg. Diese Verzögerung stellt sicher, dass eine stabile Geschwindigkeit erreicht ist, wenn mit dem Zählen begonnen wird. Die durch den Absorber transmittierten Photonen werden von einem szintillierenden Kristall registriert. Das Ausgangssignal vom Photomultiplier wird verstärkt und auf den Eingang eines Fensterdiskriminators gegeben. Ein nachgeschaltetes Linear Gate lässt das Signal vom Szintillator nur durch, wenn der Fensterdiskriminator ein Signal liefert. Ziel ist, den Diskriminator so einzustellen, dass nur Photonen der 14,4 keV Linie des Eisenpräparats ein Signal am Ausgang erzeugen. Für die Kalibrierung kann das Gate auf 'DC Inhibit' (Details im Handbuch des Gate) gestellt werden, in diesem Modus lässt es das komplette Spektrum durch. Im Modus 'Norm' wird diskriminiert und man kann das Fenster setzen/überprüfen, da hier nur die Hits im MCA sichtbar werden, deren Energie im Fenster liegt.

Vorbereitung:

- Überlegen Sie sich, mit welchen alternativen Aufbauten der Mößbauereffekt ebenfalls gemessen werden könnte.

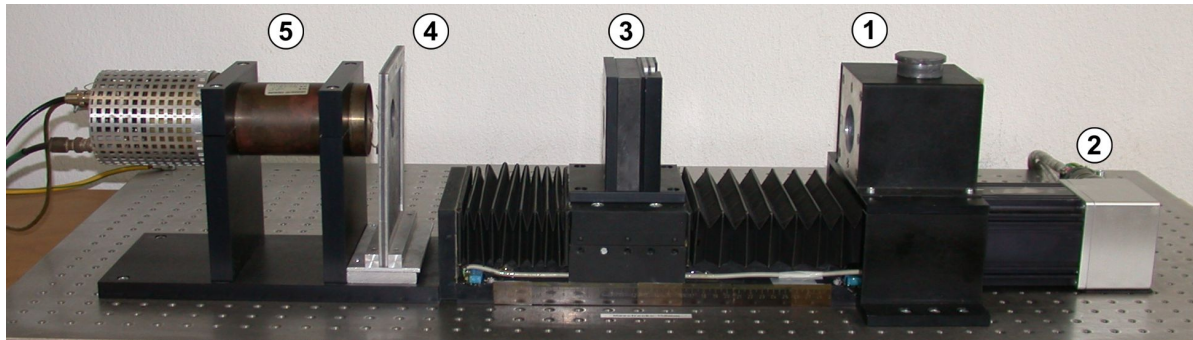


Abbildung 3: 1) Cs-Quelle 2) Motor (ohne Getriebe) 3) Schlitten mit Target-Halterung auf Linearschiene 4) Abschirmblende 5) NaJ-Szintillator

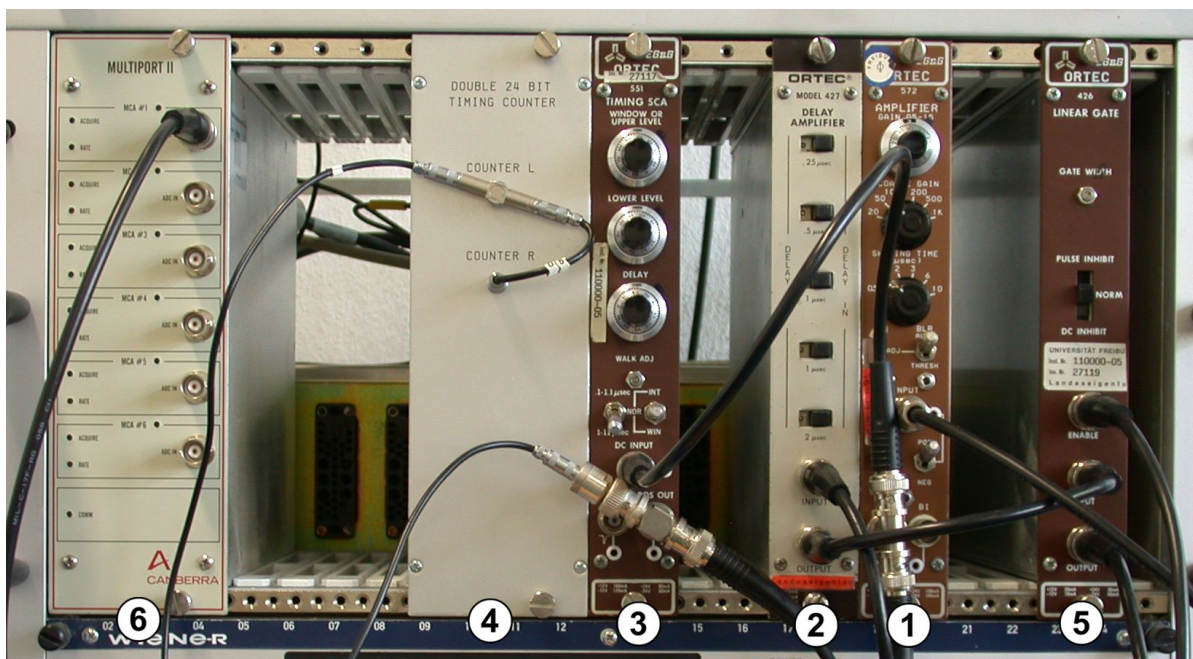


Abbildung 4: 1) Verstärker 2) Delay 3) Einkanalanalysator 4) Counter 5) Linear Gate 6) Mehrkanalanalysator

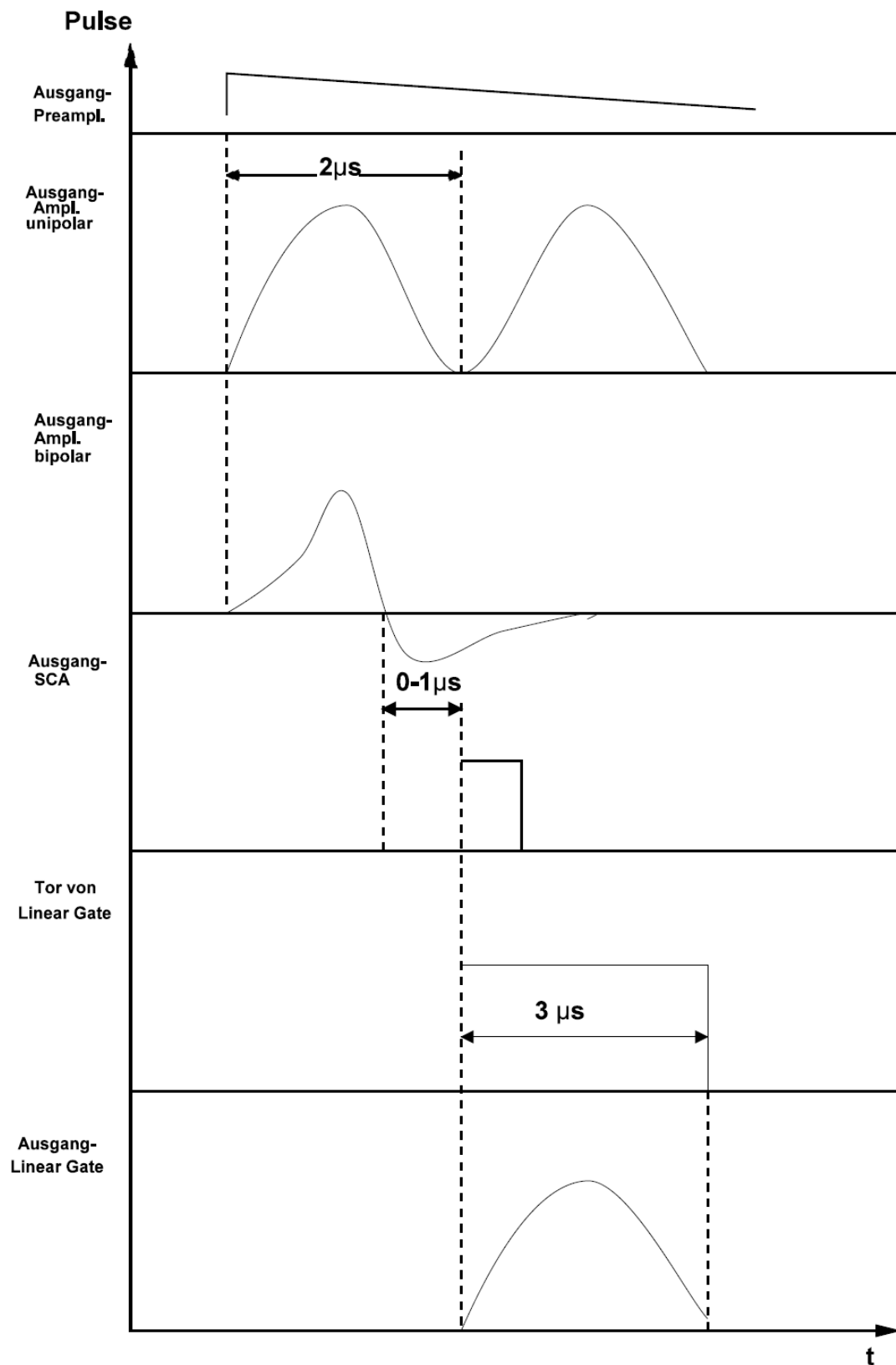


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Pulsform entsprechend der aufzubauenden Schaltung

4 Aufgabenstellung und Durchführung

1. Machen Sie sich mit dem Aufbau vertraut: Machen Sie sich die Signalwege und das Timing klar. Dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen.
2. Nehmen Sie mit einer speziellen Quelle die K_{α} -Linien verschiedener Metalle auf. In der Quelle emittiert ein Americium Strahler auf Schichten verschiedener Metalle, die auf einer drehbaren Scheibe vor dem Kollimator angebracht sind (Cu kann weggelassen werden).
3. Setzen Sie mit dem Diskriminator ein Fenster auf die 14,4 keV Linie im Eisen-Spektrum. Wie groß um den 14,4 keV Peak darf oder soll der Ausschnitt sein? Was hat dieser Ausschnitt mit der natürlichen Linienbreite zu tun?
4. Nehmen Sie zur Bestimmung der Untergrundrate (Photonen aus Compton-Streuung, die zufällig in das Fenster fallen) eine Messreihe auf, bei der Sie schrittweise die Quelle mit Alu-Bleichen abschirmen. Der Schlitten mit Absorber sollte dabei in Ruhe sein. Wählen Sie bei der Planung der Messung sinnvolle Messzeiten.
5. Nehmen Sie die Spektren für den Einlinien- und der Sechslinienabsorber auf. Berücksichtigen Sie bei der Planung der Messung die zu erwartenden statistischen Fehler.

Dokumentieren Sie ihre Versuchsdurchführung gewissenhaft und nachvollziehbar!

Hinweise zur Bedienung:

Die Motorsteuerung erfolgt über die serielle Schnittstelle des PC und ein LabVIEW-Programm. Auf dem Desktop befindet sich eine entsprechende Verknüpfung. Eine Einweisung erfolgt durch den Assistenten.

5 Auswertung

1. Führen Sie eine Energiegleichung durch
2. Bestimmen Sie den Compton-Untergrund
 - Die Fehler der Untergrundmessung sollten viel kleiner sein als die Fehler des Signals. Sollte dies nicht der Fall sein: Wie können Sie dieses Problem lösen?
 - Fitten Sie die Daten und extrapolieren Sie zur Dicke Null. Wie ist der funktionale Zusammenhang zu erklären?
 - Vgl. auch Graphen im Anhang
3. Bestimmen Sie die Abschwächung durch das Plexiglasfenster (Plexiglas = Polymethylmethacrylat, Dichte: $1,19 \text{ g/cm}^3$, siehe auch im Anhang Graph und Tabelle 2).
4. Bestimmen Sie aus den Absorptionsspektren von Edelstahl (E) bzw. Natureisen (N)
 - (a) die Isomerieverschiebung (E, N)
 - (b) die effektive Absorberdicke (E)

Es ist (vgl. [Fr62] S. 218-231)

$$T_A = f_A n_A \beta \sigma_0 d_A \quad (1)$$

d_A : Dicke des Absorbers,
 n_A : Zahl der Eisenatome pro cm^3 ,
 β : Anteil an ^{57}Fe im Isotopengemisch,
 σ_0 : Wirkungsquerschnitt,
 f_A : Debye-Waller-Faktor des Absorbers.

Benötigte Größen: Edelstahl: Dicke $d_A = 25 \mu\text{m}$, $f_A(20^\circ\text{C}) = 0,8$, Eisengehalt (Absorber): $(70 \pm 5) \%$, $\beta = 0,022$. Die Zahl der Eisenatome lässt sich leicht aus Literaturwerten bestimmen. Der Wirkungsquerschnitt berechnet sich wie in der Literatur angegeben.

- (c) den Debye-Waller-Faktor f_Q der Quelle (E).
 Vgl. [We66] S.29. Der Untergrund ist zu berücksichtigen. Mit $f_A = 0,8$ für Edelstahl lässt sich f_Q bestimmen.
- (d) die Lebensdauer des $14,4 \text{ keV}$ Zustandes in ^{57}Fe (E).

Vgl. [Fr62] S.222f. Zur Bestimmung der relativen Linienverbreiterung durch einen 'dicken' Absorber ist neben der effektiven Absorberdicke aus c) die Kenntnis der effektiven Quelldicke T_Q notwendig. Die Quelldicke d_Q wird vom Hersteller nicht angegeben. Man kann sie aber wohl abschätzen zu einigen 100 \AA . Daraus resultiert die Abschätzung für T_Q . Weshalb ist für $T_Q = T_A = 0$ das Verhältnis $\Gamma_a/\Gamma = 2,0$?

Neben der direkten Berechnung der relativen Linienverbreiterung gibt es eine heute u.a. in der Chemie gerne genutzte Methode, die Verbreiterung durch den Absorber abzuschätzen. Dabei wird die erhaltene Verteilung mit einer Faltung aus Lorentz- und Gaußkurve (sog. Voigt-Funktion) gefittet und als Breite nur der Lorentzanteil betrachtet. Führen Sie auch einen solchen Fit durch und vergleichen Sie die Ergebnisse. Nehmen Sie genug Daten für einen guten Fit auf.

- (e) die magnetische Feldstärke am Kernort und das magnetische Moment des $14,4 \text{ keV}$ Zustandes (N).
- (f) Die zweiwöchigen Gruppen sollten versuchen, f_Q und Γ , bzw. τ , auch aus dem/n Fit(s) für den Sechslinienabsorber (N) zu bestimmen. T_A muss dabei für jede Linie getrennt berechnet werden. Natureisen (kein Fe_2O_3 !): $d = 25 \mu\text{m}$, $f_A(20^\circ\text{C}) = 0,8$, Eisengehalt: $(98 \pm 2) \%$,

$\beta = 0,022$. Man mache sich Gedanken über den Fehler der Geschwindigkeit des Absorberschlittens. Aus eben diesem Fehler resultiert eine Verbreiterung der Lorentz-Peaks. (Kurvengform: Gauß?/Lorentz?/Faltung(=Voigt)?)

Alle Ergebnisse sind soweit möglich mit den Angaben des Herstellers (siehe Datenblatt am Versuch) zu vergleichen.

Sofern Skripte (z.B. root) zur Auswertung benutzt wurden, müssen diese an die Auswertung angehängt werden.

6 Geräteliste

7 Literatur

Wissenschaftliche Arbeiten

- EYGES, L.: *Physics of the Mößbauer Effect*, Am. J. of Phys. Vol. 33 S. 790-802 (Einfaches quantenmechanisches Modell zur Erklärung des Mößbauer-Effektes)
- LIPKIN, H. J.: *Some Simple Aspects of the Theory of the Mößbauer-Effect*, Weizmann Institute of Science, Israel
- LIPKIN, H. J.: *Some Simple Features of the Mößbauer Effect*, Annals of Physics (1962), S. 182-197
- FLÜGGE, S.: *Theoretische Physik III*, S. 278
- MARGULIES, S.; DEBRUNNER, P.; FRAUENFELDER, H.: *Transmission and Broadening in the Mößbauer Effect II*, Nuclear Instr. a. Methods 21 (1962), S. 217-231
- LANDGRAF, U.: *Eichspektrum der Americium-Quelle*, 1997

Weiterführende Literatur

- SCHATZ, G.; WEIDINGER, A.; DEICHER, M.: *Nukleare Festkörperphysik*, Vieweg+Teubner, 4. Aufl., 2010

Quellenverzeichnis

- [Fr62] FRAUENFELDER, H.: *The Mößbauer Effect*, New York, 1962
- [We66] WEGENER, H.: *Der Mößbauer-Effekt*, 2. Auflage, Mannheim 1966
- [Ki63] KITTEL, CH.: *Introduction to Solid State Physics*, 1963

8 Anhang

8.1 Informationen über die radioaktive Quelle

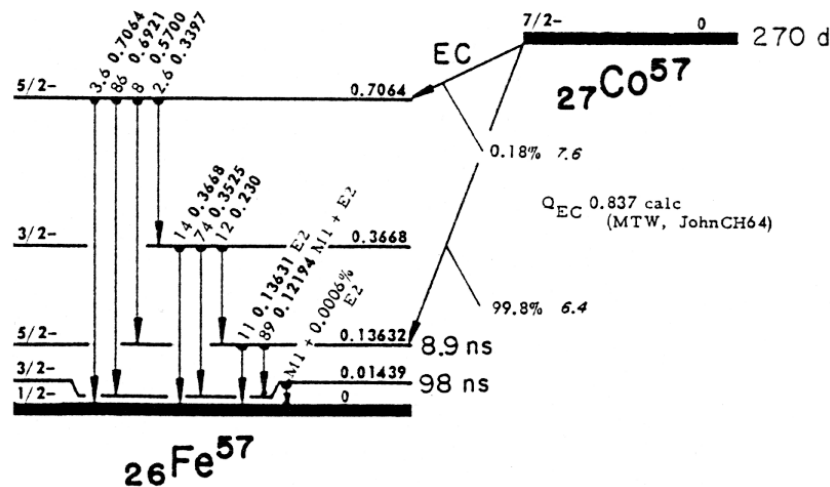


Abbildung 6: Zerfallsschema von ^{57}Co

8.2 Informationen über die Fluoreszenzquelle

Americium-241:

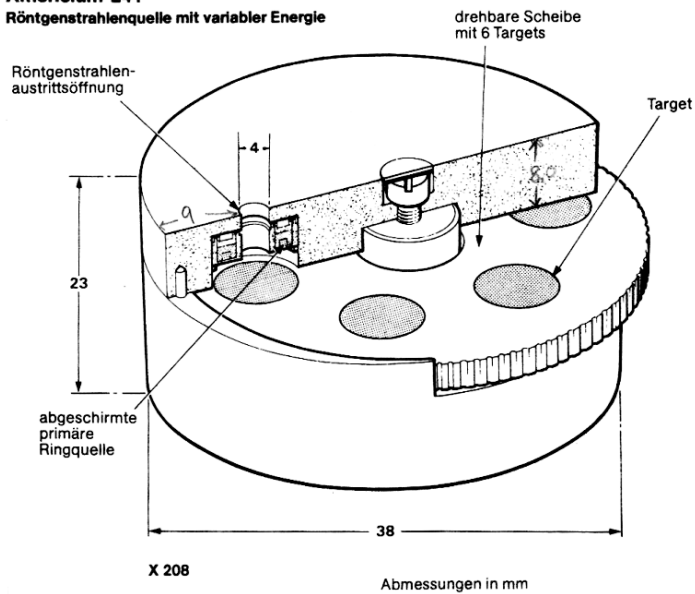
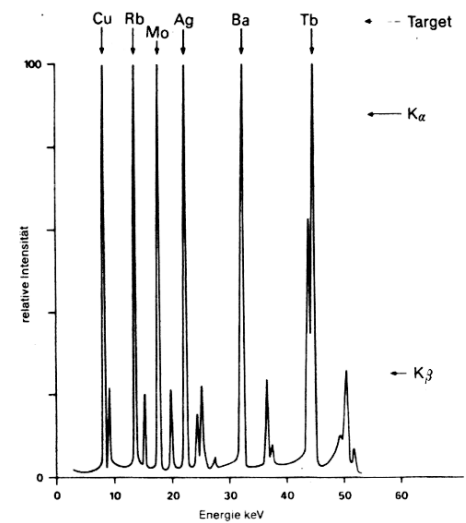
Die variable Röntgenstrahlenquelle eignet sich zur Kalibrierung von Röntgen- und Gammastrahlenspektrometern. Außerdem kann sie zur Demonstration des Röntgenfluoreszenzeffektes verwendet werden. Die Quellen/Target-Einheit besteht aus einer ^{241}Am -Primärquelle und sechs inaktiven Röntgenfluoreszenz-Targets in einem scheibenförmigen Edelstahlhalter.

Die Primärquelle ($10_{-0}^{+2,5}$ mCi) enthält ^{241}Am -Keramik, die nach hinten mit Wolfram abgeschirmt und in eine verschweißte Edelstahlfassung dicht eingeschlossen ist. Diese Quelle umschließt ringförmig die Röntgenstrahlaustrittsöffnung. Die Targets sind auf einer drehbaren Scheibe angeordnet und können wahlweise vor die Quelle geschaltet werden, so dass die für das gewählte Target charakteristische Röntgenstrahlung aus der Öffnung ($\varnothing 4\text{ mm}$) austritt.

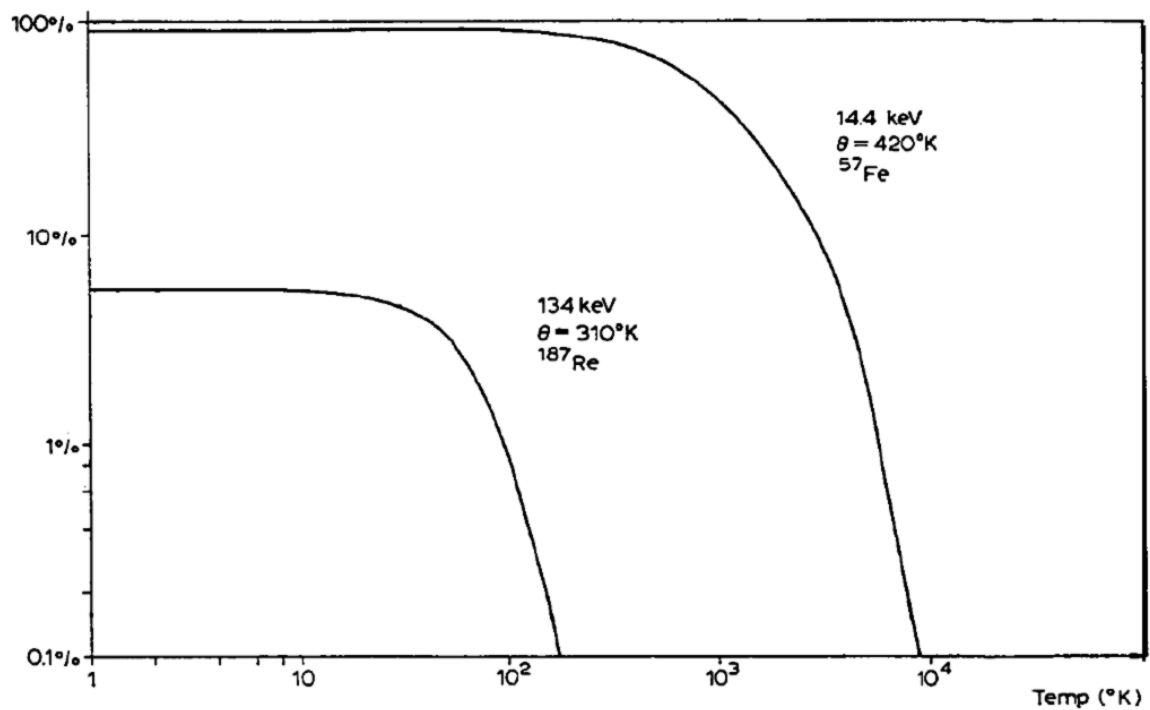
Target	Energie [keV]		Ausbeute* [(γ /s)/sr]
	K_{α}	K_{β}	
Cu	8,04	8,91	$2,5 \cdot 10^3$
Rb	13,37	14,97	$8,8 \cdot 10^3$
Mo	17,44	19,63	$2,43 \cdot 10^4$
Ag	22,10	24,99	$3,85 \cdot 10^4$
Ba	32,06	36,55	$4,65 \cdot 10^4$
Tb	44,23	50,65	$7,6 \cdot 10^4$

Tabelle 1: Röntgenstrahlungsmessung; verschiedene Targets der Americium-Quelle

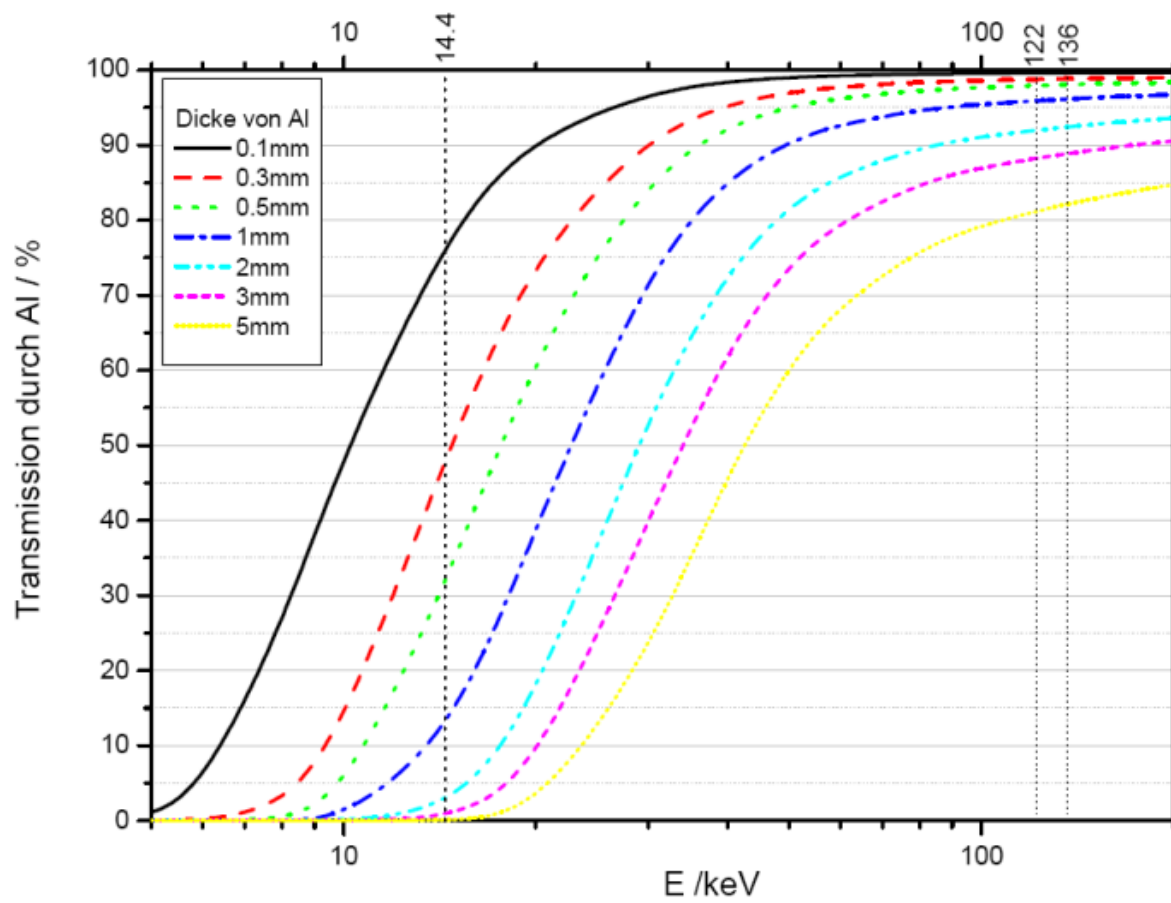
*Die Photoemission ist stark kollimiert, so dass sie auf ca. 0,5 Steradian begrenzt ist.

Americium-241**Röntgenstrahlenquelle mit variabler Energie****Energiespektrum der verschiedenen Targets einer Americium-241-Quelle**

Die K_α-Röntgenstrahlen-Peakhöhen sind hier auf die gleiche relative Intensität normiert.

8.3 Debye-Waller-Faktor

Fractions of recoil-free nuclear transitions (Debye-Waller factors) in ⁵⁷Fe and ¹⁸⁷Re, shown as functions of the temperature.

8.4 Transmission von γ -Quanten

8.5 Abschwächungskoeffizienten

Für Aluminium:

(Daten: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>)

Für Plexiglas:

(Daten: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/pmma.html>)

Energie [MeV]	μ/ρ [cm ² /g]	μ_{en}/ρ [cm ² /g]
1.00000E-03	2.794E+03	2.788E+03
1.50000E-03	9.153E+02	9.131E+02
2.00000E-03	4.037E+02	4.024E+02
3.00000E-03	1.236E+02	1.228E+02
4.00000E-03	5.247E+01	5.181E+01
5.00000E-03	2.681E+01	2.627E+01
6.00000E-03	1.545E+01	1.498E+01
8.00000E-03	6.494E+00	6.114E+00
1.00000E-02	3.357E+00	3.026E+00
1.50000E-02	1.101E+00	8.324E-01
2.00000E-02	5.714E-01	3.328E-01
3.00000E-02	3.032E-01	9.645E-02
4.00000E-02	2.350E-01	4.599E-02
5.00000E-02	2.074E-01	3.067E-02
6.00000E-02	1.924E-01	2.530E-02
8.00000E-02	1.751E-01	2.302E-02
1.00000E-01	1.641E-01	2.368E-02
1.50000E-01	1.456E-01	2.657E-02
2.00000E-01	1.328E-01	2.872E-02
3.00000E-01	1.152E-01	3.099E-02
4.00000E-01	1.031E-01	3.185E-02
5.00000E-01	9.410E-02	3.206E-02
6.00000E-01	8.701E-02	3.191E-02
8.00000E-01	7.641E-02	3.116E-02
1.00000E+00	6.870E-02	3.015E-02
1.25000E+00	6.143E-02	2.882E-02
1.50000E+00	5.591E-02	2.755E-02
2.00000E+00	4.796E-02	2.533E-02
3.00000E+00	3.844E-02	2.210E-02
4.00000E+00	3.286E-02	1.995E-02
5.00000E+00	2.919E-02	1.843E-02
6.00000E+00	2.659E-02	1.731E-02
8.00000E+00	2.317E-02	1.579E-02
1.00000E+01	2.105E-02	1.482E-02
1.50000E+01	1.820E-02	1.348E-02

Tabelle 2: Plexiglas: Massenabschwächungskoeffizient μ/ρ und Massen-Energie-Abschwächungskoeffizient μ_{en}/ρ als Funktion der Photonenenergie