

Institut für Physik der Kondensierten Materie
der TU Braunschweig

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene

Mößbauerspektroskopie

Literatur

- [1] G. Schatz, A. Weidinger, *Nukulare Festkörperphysik*, B.G. Teubner Verlag, 1992
- [2] H. Wegener, *Der Mössbauereffekt*, Band 2/2a, 1966
- [3] G. Wertheim, *Mössbauereffekt: Principles And Applications*, Academic Press, 1964
- [4] H. Frauenfelder, *The Mössbauereffekt*, Benjamin Inc., 1963
- [5] Royal Society of Chemistry, *Introduction to Mössbauer Spectroscopy*, <http://www.rsc.org/membership/networking/interestgroups/mossbauerspect/intropart1.asp>, Stand 7.3..2016
- [6] C. Röhr, Methoden der anorganischen Chemie, Vorlesungsskript, Kapitel I.5. Mößbauerspektroskopie, http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/methoden_I_5.xhtml, Stand 7.3.2016
- [7] D. Freude, Spektroskopie für Physiker, Vorlesungsskript, Kapitel 9 Mößbauer-Spektroskopie, <http://home.uni-leipzig.de/energy/pdf/freusd9.pdf>, Stand 7.3.2016

Grundlagen - Vorkenntnisse

Für die Durchführung des Versuches sind Vorkenntnisse zu diesen Begriffen notwendig:

- γ -Strahlung, Emission und Absorption
- Proportionalzählrohre
- Lebensdauer, (natürliche) Linienbreite
- Auflösungsvermögen
- Rückstoß, Energie- und Impulserhaltung
- Dopplereffekt
- Phononen
- Rückstoßfreie Emission und Lamb-Mößbauer-Faktor
- Resonanzspektroskopie
- Isotope und Isomere
- Elektronenorbitale
- Monopol-, Dipol- und Quadrupolmomente
- Zeeman-Effekt
- Valenz oder Wertigkeit
- Liganden
- Elektronegativität
- Form des Mößbauer-Spektrums
- Isomerieverschiebung, Quadrupolaufspaltung, magnetische Hyperfeinaufspaltung

Versuchsziele

In diesem Versuch soll die Mößbauerspektroskopie als wichtiges Werkzeug zur spektroskopischen Untersuchung der elektrischen und magnetischen Wechselwirkungen eisenhaltiger Verbindungen kennengelernt werden. Dazu steht ein Mößbauerspektrometer mit einer ^{57}Fe - γ -Strahlungsquelle zur Messung von Transmissionsspektren bereit. Insbesondere sollen Linienbreiten und relative Linienschärfe sowie die mikroskopischen Größen Isomerieverschiebung, Quadrupolaufspaltung und magnetisches Hyperfeinfeld an ausgesuchten Proben untersucht werden.

Achtung, in diesem Versuch wird γ -Strahlung verwendet. Die Aktivität der Quelle ist dabei deutlich höher als in den Radioaktivitätsversuchen des Anfängerpraktikums! Solange die abschließbare Abschirmung des Spektrometers geschlossen ist sind keine Erhöhungen der Dosisleistung gegenüber der natürlichen Hintergrundstrahlung messbar. Beim Öffnen der Abschirmung ist jedoch mit einer deutlichen Zunahme zu rechnen. Das Öffnen der Abschirmung und Arbeiten am Inneren dürfen daher nur im Beisein des Betreuers durchgeführt werden!

1. γ -Strahlung

Der Atomkern besitzt, ähnlich der Elektronenhülle, diskrete Energieniveaus. Ein Übergang von einem angeregten Zustand a in einen Grundzustand g kann ebenso wie in der Elektronenhülle durch Emission eines γ -Quants erfolgen. Dabei gilt:

$$E_a - E_g = h\nu_0 \quad (1)$$

Bei γ -Strahlung handelt es sich also um hochenergetische Photonen. Meist tritt γ -Strahlung infolge der Umwandlung eines Atomkerns (überwiegend durch α - oder β -Zerfall) auf, dabei bleibt der neue Atomkern zunächst in einem angeregten Zustand der mit einer endlichen Lebensdauer durch Emission eines γ -Quants in den Grundzustand übergeht.

1.1. Das Isotop ^{57}Fe

Die in diesem Versuch (und auch sonst in der überwiegenden Mehrzahl der Mössbauerspektroskopie-Versuche) verwendete Strahlung ist die 14,4 keV-Linie des ^{57}Fe . Die Gründe für die häufige Verwendung dieser Linie werden im Folgenden noch offensichtlich. Die 14,4 keV-Linie entsteht, wie in Bild 1 dargestellt, wenn ein ^{57}Co -Kern durch K-Einfang ($T_{1/2} \approx 270$ d) in einen angeregten ^{57}Fe -Kern bei 136,3 keV umgewandelt wird. Dieser hochangeregte Zustand zerfällt mit einer Lebensdauer von $T_{1/2} \approx 10^{-8}$ s in einen niederenergetischeren Zustand bei 14,4 keV der dann wiederum mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{-7}$ s in den Grundzustand relaxiert.

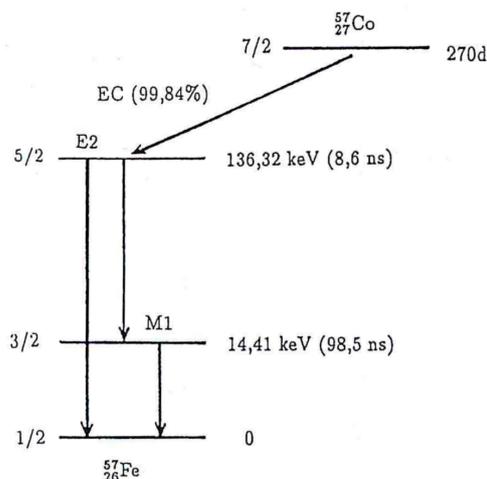


Abbildung 1: Zerfallskaskade von ^{57}Co .

1.2. Linienbreite und Auflösungsvermögen

Die Linienbreite Γ beschreibt das Frequenz- oder Wellenlängenintervall ($\Delta\nu$ bzw. $\Delta\lambda$) einer Spektrallinie im Experiment. Die natürliche Linienbreite Γ_{nat} ist dagegen die mi-

nimale Linienbreite der Emission ohne Verbreiterungen die z.B. durch den Dopplereffekt oder Beugung entstehen können. Sie ist über die Heisenberg'sche Unschärferelation mit der Zerfallskonstanten λ_Z bzw. der Lebensdauer $\tau = \lambda_Z^{-1}$ des Zustandes vor der Emission verknüpft.

$$\Gamma_{nat} = \hbar \lambda_Z = \frac{\hbar}{\tau} \quad (2)$$

Die Form solcher Spektrallinien wird durch eine Cauchy-Verteilung beschrieben, in der Physik hat sich dafür der Begriff der Lorentz-Linie etabliert. Für die 14,4 keV-Linie des ^{57}Fe mit einer Lebensdauer von etwa 140 ns ergibt sich eine sehr kleine natürliche Linienbreite von nur

$$\Gamma_{nat}(^{57}\text{Fe}) \approx 5 \text{ neV} \quad (3)$$

Durch die hohe Energie von 14,4 keV der γ -Quanten ergibt sich damit für die γ -Spektroskopie mit Eisen bei Verwendung dieser Emissionslinie eine maximal erreichbare Auflösung von

$$\frac{\Delta E}{E} \approx 10^{-12} \quad (4)$$

Dabei ist bereits berücksichtigt, dass die natürliche Linienbreite sowohl bei der Emission als auch bei der Absorption berücksichtigt werden muss. In einfachen Experimenten ist diese hohe Auflösung nicht zu erreichen. Erst durch geschickt gewählte experimentelle Randbedingungen und die Ausnutzung des Mößbauer-Effekts, der im Folgenden noch erläutert wird, ist eine solche Auflösung auch praktisch zu realisieren.

Eine dieser Energieauflösung äquivalente optische Auflösung böte die Möglichkeit von der Erde aus 2 benachbarte Pixel auf einem Monitor auf dem Mond trennen zu können. Übertragen auf Massen wäre die Gewichtszunahme der Golden Gate Bridge um die Masse eines Sandkorns messbar. Die Mößbauer-Spektroskopie ist aufgrund dieser extrem feinen Energieauflösung die genaueste aller Spektroskopiemethoden.

1.3. Energie- und Impulserhaltung

Neben der Energie $E = h\nu_0$ (Gl. 1) besitzen γ -Quanten auch einen Impuls $p = \hbar k$. Für optische Strahlung ist der Impuls aufgrund der großen Wellenlängen und der damit kleinen k meist vernachlässigbar. Für γ -Strahlung mit ihrer deutlich kleineren Wellenlänge und dem daraus resultierenden größeren k muss der Impuls dagegen berücksichtigt werden.

1.3.1. freies Atom

Aufgrund der Impulserhaltung muss der emittierende Atomkern bei freien Atomen den entsprechenden entgegengesetzten Impuls des γ -Quants aufnehmen. Dies bedeutet, dass die Energie $h\nu_0$ nicht vollständig vom γ -Quant aufgenommen wird sondern ein geringer Anteil als „Rückstoßenergie“ R im emittierenden Atom verbleibt. Die Rückstoßenergie für einen Kern der Masse M ist

$$R = \frac{p^2}{2M} = \frac{h^2 \nu^2}{2Mc^2} \quad (5)$$

Die Energiebilanz (Gl. 1) muss daher für freie Atome um R erweitert werden und lautet dann:

$$E_a - E_g = h\nu_0 + R \quad (6)$$

Analog wird diese Energie auch bei der Absorption eines γ -Quants dem absorbierenden Atomkern zugeführt. Typischerweise liegt R für niederenergetische γ -Strahlung im Bereich einiger meV und damit deutlich über der natürlichen Linienbreite. Dadurch kann resonante Absorption von γ -Quanten bei freien Atomkernen im Allgemeinen nicht stattfinden da die Energie der Quanten um $2R$ zu niedrig ist.

1.3.2. Atome im Festkörper

Im Festkörper sind weder der emittierende noch der absorbierende Atomkern frei beweglich, sondern an das Gitter gebunden. Die Rückstoßenergie kann daher nur

- Gitterschwingungen (Phononen) anregen oder
- das Atom von seinem Gitterplatz losreißen.

Phononen besitzen allerdings kein kontinuierliches Anregungsspektrum sondern unterliegen Quantisierungsgesetzen, d.h. der Festkörper kann nur bestimmte Energiequanten unter Erzeugung eines Phonons absorbieren. Ist die zur Verfügung stehende Energie, hier die Rückstoßenergie R des γ -Quants, kleiner als die benötigte Phononenenergie $E_{Ph} = h\nu_{Gitter}$, kann keine Energie vom γ -Quant auf den Festkörper übertragen werden und die Energie bleibt vollständig im γ -Quant erhalten. In diesem Fall spricht man von „rückstoßfreier“ oder genauer „rückstoßenergiefreier“ γ -Emission. Es gilt dann exakt:

$$E_a - E_g = h\nu_0 \quad (7)$$

Ganz analog kann im Festkörper auch die Absorption eines γ -Quants rückstoßfrei erfolgen.

1.3.3. Der Mößbauer-Lamb-Faktor

In der Realität wird nur ein gewisser Anteil der γ -Quanten rückstoßfrei emittiert und absorbiert. Dieser Anteil wird durch den Mößbauer-Lamb-Faktor (MLF), der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann beschrieben. Häufig findet man auch die nicht ganz korrekte Bezeichnung Debye-Waller-Faktor, die den identischen Faktor für den Fall der Neutronen- oder Röntgenstreuung bezeichnet.

Der MLF kann auch interpretiert werden als Dämpfung durch die thermische Auslenkung der Gitteratome aus ihrer Ruhelage. In der Näherung eines harmonischen Oszillators erhält man mit dem Streuvektor \vec{k} und der mittleren quadratischen Auslenkung der Atome $\langle x^2 \rangle$ den Ausdruck:

$$\text{MLF} = \frac{I}{I_0} e^{-\frac{1}{3} \vec{k}^2 \langle x^2 \rangle} \quad (8)$$

Eine exakte Berechnung ist aufgrund des unbekanntenen Phononenspektrums in Festkörpern im Allgemeinen nicht möglich. Eine genauere Näherung ergibt sich im Debye-Modell

mit einer Zustandsdichte der Phononen $N(\omega) \propto \omega^2$ unterhalb der Abschneidefrequenz ω_D . Man erhält dann für die Grenzfälle kleiner und großer Temperaturen bezogen auf die Debye-Temperatur Θ_D die Näherungen:

$$\text{MLF} = \begin{cases} e^{-\frac{R}{k_B \Theta_D} \left(\frac{3}{2} + \frac{\pi^2 T^2}{\Theta_D^2} \right)} & \text{für } T \ll \Theta_D \text{ und} \\ e^{-\frac{6RT}{k_B \Theta_D}} & \text{für } T \gg \Theta_D \end{cases} \quad (9)$$

Für ein gutes Signal-zu-Rausch Verhältnis sollte der Mößbauer-Lamb-Faktor sowohl für die Strahlungsquelle als auch für den Absorber möglichst nahe bei 1 sein um möglichst viele resonante Emissions- und Absorptionsereignisse zu erhalten.

Diskutieren Sie die Formeln 8 und 9 kurz im Skript. Welche Bedingungen an das Mößbauer-Experiment, die Strahlungsquelle und den Absorber lassen sich daraus ableiten?

2. Der Mößbauer-Effekt

Der experimentelle Nachweis der rückstoßfreien Kernresonanzabsorption an Iridium-191 wurde erstmals 1958 von Rudolf Mößbauer veröffentlicht. Die rückstoßfreie Kernresonanzabsorption ist daher heutzutage unter dem Namen Mößbauer-Effekt bekannt.

2.1. Grundlagen

Ohne weiteren Aufwand beobachten lässt sich der Mößbauer-Effekt nur bei identischen Strahlungsquellen und Absorbieren da nur dann die Energieniveaus der Atomkerne identisch sind. Für unterschiedliche Materialien bzw. unterschiedliche Umgebungen der emittierenden und absorbierenden Atome werden die Energieniveaus des Atomkerns durch die Hyperfeinwechselwirkung verschoben, so dass im Allgemeinen keine Resonanz mehr auftritt. Diese Verschiebung durch die elektrische und chemische Umgebung des Atomkerns liegt typischerweise im Bereich einiger Nano- bis Mikroelektronenvolt.

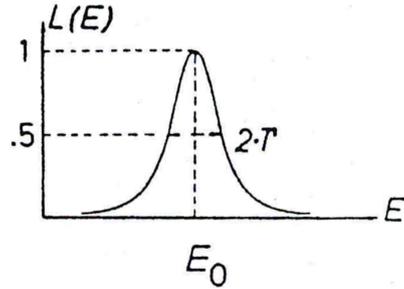
Für die Mößbauer-Spektroskopie wird die Energie der Emission oder der Absorption so moduliert, dass wieder Resonanz auftritt. Durch die bekannte Energiemodulation können so die Verschiebung der Energieniveaus des Atomkerns gemessen und Rückschlüsse auf die elektronische und chemische Umgebung des Atomkerns gezogen werden. Die nur sehr kleine Modulation wird normalerweise durch den Dopplereffekt und eine Schwingung der Strahlungsquelle realisiert.

Bewegen sich γ -Quelle und Absorber relativ zueinander führt dies aufgrund des Dopplereffektes zu einer Energieverschiebung der γ -Quanten deren Größe vom Verhältnis v/c abhängt:

$$h\nu = h\nu_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (10)$$

Da die Geschwindigkeit v im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit c sehr klein ist lässt sich so eine minimale energetische Verschiebung realisieren.

$$I(E) \propto \frac{\Gamma}{\Gamma^2 + (E - E_0)^2} \quad (11)$$



beschrieben. Dabei ist Γ die *halbe Halbwertsbreite* der Lorentz-Linie. Bei einem Vergleich von experimentellen, theoretischen oder Literatur-Linienbreiten ist darauf zu achten, ob *halbe*¹ oder *volle*² Halbwertsbreiten gemeint sind.

Das Mößbauer-Absorptions-Spektrum wird für dünne Absorber in guter Näherung durch eine Faltung zweier Lorentz-Linien, die wiederum eine Lorentz-Linie ergibt, beschrieben. Die Breite der neuen Linie ist dann durch die Summe der Halbwertsbreiten von Emissions- und Absorptionsprozess gegeben.

2.1.3. Dicke und dünne Absorber

Ein dünner Absorber bedeutet physikalisch, dass je γ -Quant kein oder nur ein Streuprozess stattfindet. Sobald ein Teilchen mehrfach gestreut wird geht die Information der resonanten Streuung verloren bzw. das Signal wird deutlich abgeschwächt.

Mathematisch bedeutet die Näherung dünner Absorber die Reihenentwicklung einer Exponentialfunktion (vgl. [2]). Diese Reihenentwicklung ist aber nur erlaubt solange der Exponent klein gegenüber eins ist. Er setzt sich aus dem Produkt $t_A \cdot \sigma_r$ zusammen. Dabei ist σ_r die Breit-Wigner-Formel des Absorbers nach einer Normierung von Gleichung 11, so dass $\max(I(E)) = 1$ gilt. Der Exponent wird daher im Wesentlichen durch die „effektive Dicke“

$$t_A = n_{Fe} \cdot f_A \cdot \beta \cdot \sigma_0 \cdot d \quad (12)$$

mit der Konzentration der Eisenatome n_{Fe} , dem MLF f_A , der Isotopenhäufigkeit β , dem Wirkungsquerschnitt des einzelnen Mößbaueratoms σ_0 und der Absorberdicke d bestimmt.

Berechnen bzw. schätzen Sie die effektiven Dicken der vermessenen Absorber ab. In welchen Fällen ist die Näherung dünner Absorber noch erlaubt? Bei Absorbern, die ein Spektrum mit mehreren Linien erzeugen, ist zu beachten, dass die effektiven Dicken der einzelnen Linien entsprechend ihrem Flächenanteil am gesamten Absorptionsspektrum reduziert sind.

Für den Fall, dass kein dünner Absorber vorliegt lässt sich das Spektrum trotzdem durch eine Lorentz-Linie beschreiben, solange $t_A \leq 10$ gilt. Allerdings muss dann eine neue halbe Halbwertsbreite Γ_{eff} eingeführt werden. Diese ist mit Γ aus Gleichung 11 in guter Näherung durch

$$\Gamma_{eff} = \Gamma \cdot (2,01 + 0,3 \cdot t_A - 0,005 \cdot t_A^2) \quad (13)$$

¹HWHM: **H**alf **W**idth at **H**alf **M**aximum

²FWHM: **F**ull **W**idth at **H**alf **M**aximum

verknüpft. Γ_{eff} ist ebenfalls zu berechnen und mit den experimentell ermittelten Halbwertsbreiten zu vergleichen.

2.2. beobachtbare Effekte

Mit der Mößbauer-Spektroskopie können im wesentlichen drei Effekte beobachtet werden, die eine Verschiebung der Energieniveaus des Atomkerns durch die elektronische Umgebung verursachen. Diese Effekte sind

- die Isomerieverschiebung,
- die Quadrupolaufspaltung und der
- Kern-Zeeman-Effekt.

Die Auswirkungen dieser drei Effekte auf die Energieniveaus des Atomkerns und die Mößbauer-Spektren sind in Abbildung 3 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert.

2.2.1. Isomerieverschiebung

Der Atomkern hat im angeregten (a) und im Grundzustand (g) unterschiedliche Kernradien r_a und r_g . Beide Kerne enthalten bei unterschiedlichen Radien dieselbe Kernladung Ze weswegen sich das elektrostatische Potential im Kerninneren für beide Zustände unterscheiden muss. Liegt im Festkörper am Kernort eine Ladungsdichte Φ vor (überwiegend durch s -Elektronen), beeinflusst ihre Wechselwirkung mit der Kernladung die Energieniveaus E_a und E_g unterschiedlich. Im Vergleich zur unbeeinflussten Energie $E_a - E_g$ der Quelle ergibt sich unter Annahme eines kugelförmigen Kerns mit räumlich konstanter Ladungsdichte die Verschiebung:

$$E_{iso} = \frac{Ze^2}{6\epsilon_0} |\Psi(0)|^2 \langle r^2 \rangle \quad (14)$$

Da die gleiche Verschiebung für Strahlungsquelle und den Absorber gilt erhält man allgemein die im Spektrum messbare Isomerieverschiebung

$$\delta E_{iso} = \frac{Ze^2}{6\epsilon_0} (|\Psi_A(0)|^2 - |\Psi_Q(0)|^2) (\langle r_a^2 \rangle - \langle r_g^2 \rangle) \quad (15)$$

wobei die Indizes den Absorber (A) bzw. die Strahlungsquelle (Q) kennzeichnen.

Es sei hier nur am Rande erwähnt, dass der quadratische Dopplereffekt (relativistische Frequenzverschiebung) einen gleichen Effekt bezüglich der Energieverschiebung verursacht und daher von der Isomerieverschiebung schwierig zu trennen ist. Über die Wechselwirkung der äußeren und der Ligandenelektronen mit den s -Elektronen können aus der Isomerieverschiebung u.a. Informationen zum Oxidationszustand des Eisens, der Bindungsart und der Elektronegativität der Liganden gezogen werden.

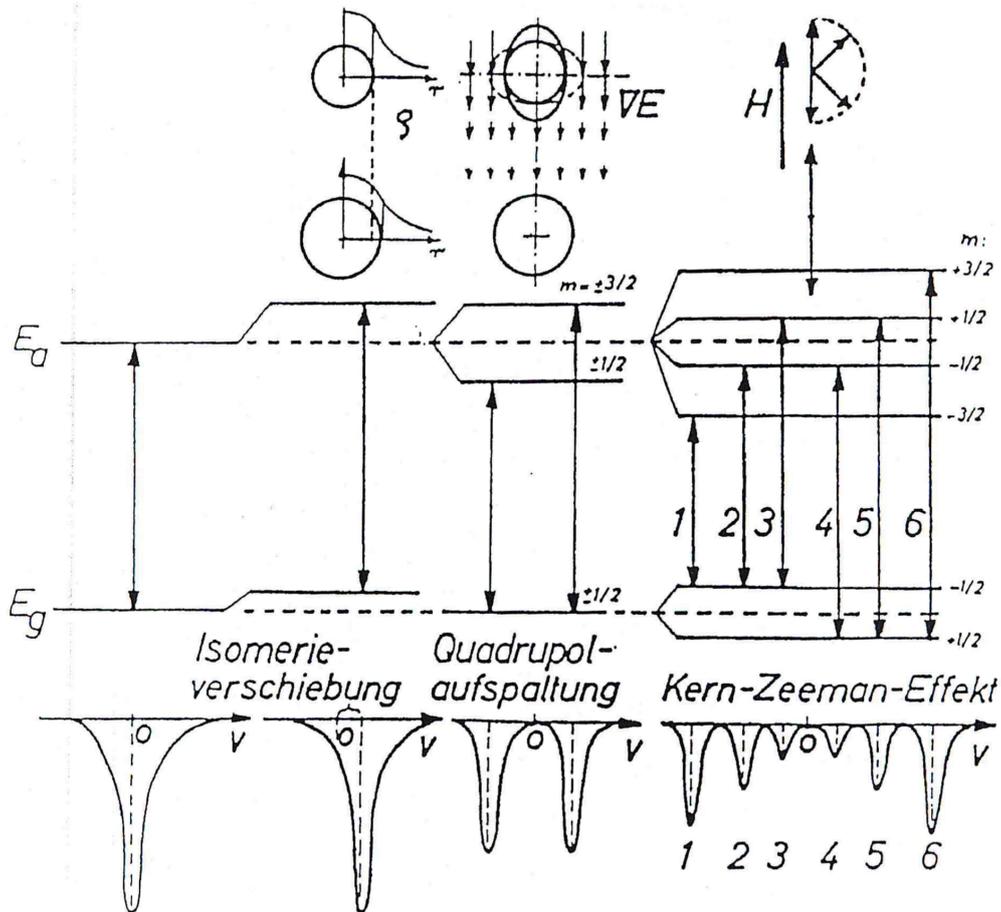


Abbildung 3: Einflüsse der Hyperfeinwechselwirkung auf das Mößbauer-Atom: Oben sind der Grundzustand und der angeregte Zustand des Atomkerns sowie die entsprechenden Wechselwirkungen schematisch dargestellt. In der Mitte sind die daraus resultierenden Verschiebungen der Kern-Energieniveaus und unten die im Experiment zu erwartenden Mößbauer-Spektren skizziert.

2.2.2. Quadrupolaufspaltung

Der ^{57}Fe -Kern besitzt nur im angeregten Zustand ein von Null verschiedenes Quadrupolmoment $e \cdot Q$. Herrscht am Kernort durch die Umgebung des Mößbauer-Atoms ein elektrischer Feldgradient V_{zz} , so entsprechen den möglichen räumlichen Orientierungen des Atomkerns unterschiedliche Energien. Diese Orientierungen werden durch die magnetische Quantenzahl m beschrieben. Die Wechselwirkungsenergie zwischen Quadrupolmoment und Feldgradient ist [4]:

$$E_Q = \frac{eQV_{zz}}{4I_a(2I_a - 1)} (3m_a^2 - I_a(I_a + 1)) \quad (16)$$

Damit folgt für den ^{57}Fe -Kern unmittelbar eine Aufspaltung des angeregten Energieniveaus in 2 Linien.

2.2.3. Kern-Zeeman-Effekt

Herrscht am Ort des Mößbauer-Atomkerns ein Magnetfeld, so findet eine Wechselwirkung mit dem magnetischen Moment μ_a bzw. μ_g des Kerns statt. Maßgebend für das magnetische Moment ist der Spin des Kerns. In der Quantentheorie wird gezeigt, dass die Spinkomponente in Feldrichtung quantisiert ist, d.h. es sind nur bestimmte Winkel zwischen Spin und Magnetfeld erlaubt. Der Kernspin präzediert auf einem Kegelmantel mit entsprechendem Winkel um die Achse des Magnetfeldes. Das magnetische Moment m ist definiert als Projektion des Spins I auf die Quantisierungsachse (die Feldrichtung), es kann daher nur diskrete Werte $-I \leq m \leq I$ mit $|\delta m = 1|$ annehmen.

Für das ^{57}Fe -Atom folgt daraus eine vierfache Aufspaltung des angeregten Niveaus und eine zweifache Aufspaltung des Grundzustandes. Für die Energie der Übergänge gilt

$$E = \left(E_a - \frac{\mu_a B m_a}{I_a} \right) - \left(E_g - \frac{\mu_g B m_g}{I_g} \right) \quad (17)$$

wobei wegen quantentheoretischer Auswahlregeln nur Übergänge mit $\delta m \pm 1$ oder $\delta m = 0$ erlaubt sind. Diese entsprechen magnetischer Dipolstrahlung.

3. Das Experiment

Für die erfolgreiche Durchführung des Experimentes ist es notwendig alle beteiligten Komponenten zu verstehen und bedienen zu können. Um Schäden an den z. T. empfindlichen Geräten zu vermeiden ist es außerdem erforderlich die unter Punkt 3.2 gesondert aufgeführten Punkte zum Ein- und Ausschalten zu beachten. Das Einschalten sollte erst erfolgen, wenn die Funktion und das Zusammenspiel aller Geräte verstanden ist! Die Justage des Spektrometers, die Messungen sowie das Ausschalten erfolgen dann nach Absprache mit dem Betreuer.

3.1. Geräte

Für die Messung der Mößbauerspektren ist das optimale Zusammenspiel vieler, überwiegend elektrischer, Komponenten erforderlich. Um diese Komponenten bedienen und optimal einstellen zu können werden die Geräte sowie deren Funktionen und Einstellmöglichkeiten im Folgenden kurz erläutert. Die meisten Geräte (Abschnitte 3.1.3 bis 3.1.10) sind im Mößbauerrack eingebaut. In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau und das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten schematisch dargestellt. Zusätzlich findet sich ein Realbild des Spektrometers mit der Zuordnung einiger Baugruppen in Abbildung 5. Die Verkabelung ist bereits vollständig vorhanden und sollte nicht geändert werden. Lediglich zur Betrachtung einiger Signale auf dem Oszilloskop (Abschnitt 3.3.1) müssen kurzzeitig Steckverbindungen getrennt werden.

3.1.1. Spektrometer (Antriebseinheit, Probe und Detektor)

Innerhalb der normalerweise verschlossenen weißen Box befindet sich das eigentliche Mößbauerspektrometer. Dieses besteht aus einer Strahlungsquelle die auf einem elektrisch zu

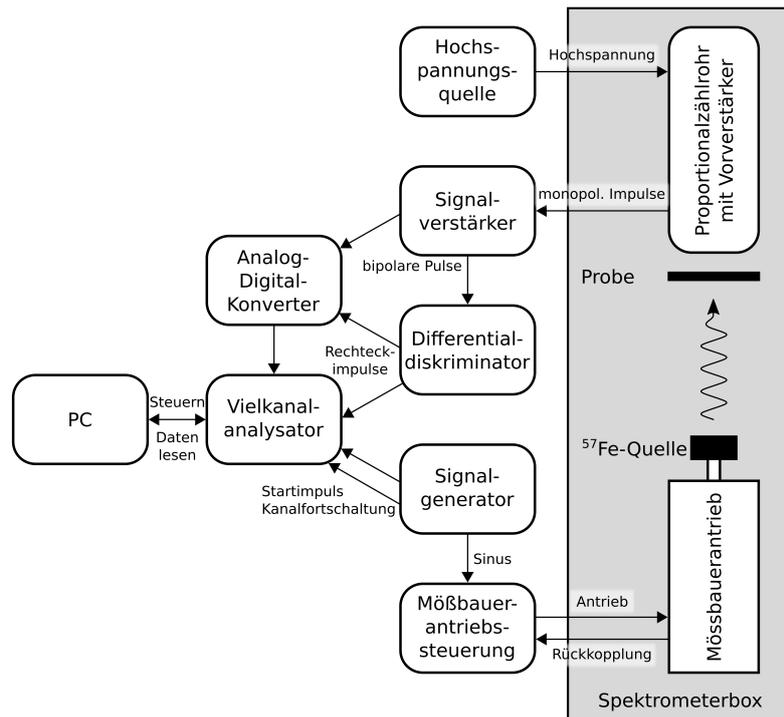


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und Zusammenspiels der elektronischen Komponenten.

Schwingungen angeregten Stab angebracht ist. Über eine zweite Spule wird durch den Stab ein Rückkopplungssignal erzeugt das dazu dient das System in seiner Eigenfrequenz ansteuern zu können. Darüber befinden sich der Probenstisch auf dem die verschiedenen Proben aufgelegt werden können und das Proportionalzählrohr.

3.1.2. Vorverstärker

Der Vorverstärker verstärkt die sehr schwachen Signale des Proportionalzählrohrs. Er befindet sich zwischen Mößbauerrack und Spektrometer und ist durch 3 Kabel mit dem Rack sowie durch 1 Kabel mit dem Zählrohr verbunden.

3.1.3. Signalverstärker (AMP 4)

Der Signalverstärker hat zwei Funktionen. Einerseits dient er dazu die bereits vorverstärkten monopularen Impulse des Detektors weiter zu verstärken (Einstellungen **POLARITY** und **GAIN**). Andererseits wird der Puls für die folgende Weiterverarbeitung zusätzlich differenziert (in sog. bipolare Pulse umgewandelt) und auf eine vorgegebene Zeitspanne gestreckt oder gestaucht (**SHAPING TIME**). Änderungen der Parameter am Signalverstärker sind nur beim Wechseln der Strahlungsquelle notwendig und werden daher **nur durch den Betreuer** durchgeführt.

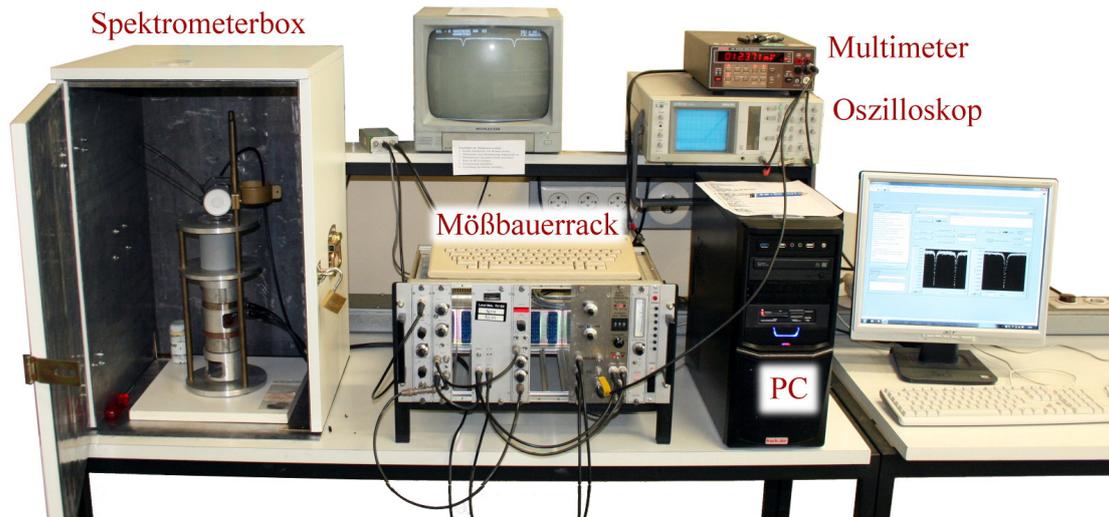


Abbildung 5: Foto des Mößbauer-Spektroskopie-Versuchs mit Beschriftung der wesentlichen Komponenten.

3.1.4. Differentialdiskriminator (TIMING SCA 102)

Der Differentialdiskriminator ermöglicht die Selektion eines frei wählbaren Teils des γ -Energiespektrums. Da die Höhe der bipolaren Impulse vom Signalverstärker von der Energie der γ -Quanten abhängig ist kann anhand der maximalen Spannung der Impulse ein Energiefenster festgelegt werden. Fällt ein Puls in das Energiefenster wird am Ausgang des Differentialdiskriminators ein Rechteckimpuls erzeugt der später je nach Messmodus ausgewertet bzw. gezählt wird. Das untere Ende des Energiefensters wird mit dem Regler LOWER LEVEL festgelegt, der Regler UPPER LEVEL / ΔE steuert je nach Stellung des Kippschalters (UL / ΔE) das obere Ende oder die Breite ΔE des Energiefensters. Der Kippschalter SCA / LLD bleibt immer in der Stellung SCA.

3.1.5. Vielkanalanalysator (MCA 3/1)

Der Vielkanalanalysator (MCA) erstellt aus den γ -Quanten die ins gewählte Energiefenster fallen sowie den Start- und Kanalweitschaltungspulsen des Sinusgenerators das Mössbauerspektrum. Er verfügt als einziges direktes Bedienelement über einen RESET-Schalter. Dieser sollte einmal nach dem Einschalten des Racks betätigt werden um alte Speicherinhalte zu löschen. Gleichzeitig erledigt der Analysator die Steuerung, Aufnahme, Speicherung und Anzeige der Daten und ist damit der zentrale Bestandteil des Mößbauer-versuches. Die Bedienung der vielfältigen Funktionen erfolgt über die Tastatur und den Monitor oberhalb des Mößbauerracks oder über den PC nachdem die Verbindung über die serielle Schnittstelle hergestellt wurde.

3.1.6. Analog-Digital-Konverter (ADC 8K)

Mit dem Analog-Digital-Konverter (ADC) kann ein Spektrum der γ -Intensität als Funktion der Energie aufgenommen werden. Der ADC wandelt einen bipolaren Impuls entsprechend seiner maximalen Signalhöhe in eine Zahl zwischen 0 und 1063 um. Dadurch kann vor Beginn der eigentlichen Mößbauer-Messung das Energiefenster so eingestellt werden, dass nur Ereignisse gezählt werden die im Bereich der 14,4 keV-Linie liegen.

Die Anzeige **DEADTIME** zeigt die Totzeit nach gezählten Ereignissen an und ist somit ein grobes Maß für die Zählrate. Die Bedienelemente **GAIN** und **RANGE** bleiben unverändert in den Positionen **1K** und **1/1**. Mit dem Kippschalter **GATE** können Ereignisse selektiert werden die koinzident (**CO.**) auftreten, also dann, wenn ein Rechteckimpuls am **GATE**-Eingang **und gleichzeitig** ein bipolarer Puls anliegt, oder antikoinzident (**ANTI.**, bipolarer Puls, aber kein Rechteckpuls am **GATE**). Somit kann zwischen der Messung der Ereignisse innerhalb und außerhalb des gewählten Energiefensters umgestellt werden. Für die Anzeige des gesamten γ -Spektrums muss der Stecker **GATE** entfernt und der Modus **ANTI.** eingestellt werden.

Die Regler **UPPER LEVEL** und **LOWER LEVEL** definieren den Arbeitsbereich des ADC und sind so gewählt, dass ein möglichst großer Energiebereich genutzt wird aber sehr hohe und sehr niedrige Energien abgeschnitten werden. Diese Einstellungen sollten nicht verändert werden da ein zu niedriges **LOWER LEVEL** sehr starkes elektronisches Rauschen verursacht und für ein sehr hohes **UPPER LEVEL** Nichtlinearitäten zu erwarten sind.

3.1.7. Mößbauerantriebssteuerung (ohne Beschriftung)

Der Mössbauerantrieb im Spektrometer ist ein schwingfähiges System. Er besitzt eine Eigenfrequenz in der er normalerweise angeregt wird, kann aber auch in anderen Frequenzen, insbesondere Oberfrequenzen, schwingen. Durch die Steuerung wird das ankommende Signal vom Sinusgenerator mit dem Ist-Signal des Antriebs verglichen. Die Differenz beider Signale wird gemäß der Einstellung **VERSTÄRKER** verstärkt und als Antriebssignal an den Mössbauerantrieb gelegt. **VERSTÄRKER** sollte nicht verändert werden, da das System bei zu großer Verstärkung in die Resonanzkatastrophe getrieben wird und beginnt chaotisch zu Schwingen, was durch betrachten der Signale auf dem Oszilloskop und durch beginnendes Pfeifen leicht zu erkennen ist. Über den oberen Regler **SOLL** wird die Amplitude der Schwingung eingestellt.

3.1.8. Sinusgenerator (DIGIT.-SINUS-GENERATOR)

Der Sinusgenerator erzeugt eine Sinusspannung der eingestellten **Frequenz** zur Steuerung des Mößbauerantriebs. Zusätzlich triggert er die Kanalumschaltung am MCA durch einen Startimpuls je Periode und zeitlich äquidistante Kanalfortschaltungsimpulse entsprechend der eingestellten **Kanalzahl**. Der Kippschalter bleibt immer in der Stellung **Start**.

3.1.9. Hochspannungsquelle (HVS 2)

Die Hochspannungsquelle stellt die Versorgungsspannung für das Proportionalzählrohr zur Verfügung. Mit dem Regler VOLTAGE CONTROL kann die Spannung und damit der Arbeitspunkt des Zählrohres und die Form des gemessenen γ -Spektrums eingestellt werden. Das Zählrohr ist für 1700 - 1950 V spezifiziert, Spannungen darüber dürfen nicht angelegt werden! Beim Ein- und Ausschalten der Hochspannung muss der Kippschalter immer in der mittleren Position 0 V bleiben, bis die Spannung laut Anzeige 0 V erreicht. Erst danach ist eine Beschädigung von Vorverstärker und Zählrohr sicher ausgeschlossen und es kann weitergeschaltet werden.

3.1.10. Spannungsversorgung (ohne Beschriftung)

Die Spannungsversorgung liefert alle notwendigen Spannungen zum Betrieb der Geräte im Mößbauerrack. Der Hauptschalter zum Einschalten des Racks befindet sich unten an der Spannungsversorgung. **Der Hauptschalter darf nur betätigt werden, wenn sich der Kippschalter an der Hochspannungsquelle in der Position OFF befindet! Ansonsten können Spannungsspitzen auftreten die zur Zerstörung des Vorverstärkers und/oder des Proportionalzählrohres führen!**

3.1.11. Digitalmultimeter

Oberhalb des Mößbauerracks befindet sich ein Keithley 1xx Digitalmultimeter mit dem die Mößbauerantriebsspannung gemessen wird. Anhand der Kalibrierkurve kann daraus die Geschwindigkeitsamplitude der ^{57}Fe - γ -Strahlungsquelle berechnet werden.

3.1.12. Oszilloskop

Oberhalb des Mößbauerracks befindet sich zusätzlich ein Oszilloskop. Mit diesem sollen zu Beginn des Versuches einige Signale dargestellt werden um das Verständnis des Messablaufes zu erleichtern. Zusätzlich ist das Oszilloskop notwendig falls nach einem Strahlungsquellenwechsel Parameter neu eingestellt werden müssen, die sonst unverändert bleiben können.

3.1.13. PC

Der PC kann genutzt werden, um das Mößbauerrack bzw. den MCA zu steuern und die Spektren auszulesen. Darüber hinaus dient er zur Visualisierung und Auswertung der gemessenen Spektren.

3.2. Einschalten / Ausschalten

Beim Ein- bzw. Ausschalten der Geräte ist folgende Reihenfolge zwingend einzuhalten um Beschädigungen der Elektronik auszuschließen und die korrekte Kommunikation der Geräte untereinander sicherzustellen:

Einschalten

1. Kontrollieren: Sind der Kippschalter der Hochspannungsquelle in der Position **OFF** und das Kabel vom Mößbauerrack auf der Rückseite des PC abgezogen?
2. Mößbauerrack, PC, und Monitore einschalten.
3. **RESET**-Schalter am MCA betätigen und Hochspannungsquelle zunächst auf **0 V**, dann auf **ON** stellen.
4. Kabel vom Mößbauerrack am PC wieder einstecken.
5. Messprogramm auf dem Desktop starten und „Clear Measurement“ ausführen.
6. Lab-Log (Laborbuch im Messprogramm) auf Hinweise der letzten Benutzer prüfen.

Ausschalten

1. ggf. wichtige Hinweise im Lab-Log für Nachfolger festhalten und Daten sichern.
2. Messprogramm beenden und Kabel vom Mößbauerrack hinten am PC abziehen.
3. Hochspannungsquelle zunächst auf **0 V**, dann auf **OFF** stellen.
4. Rechner herunterfahren, Mößbauerrack, Monitore und andere Geräte ausschalten.

Das Multimeter und das Oszilloskop können beliebig Ein- und Ausgeschaltet werden. Da das Multimeter seine maximale Genauigkeit allerdings erst nach einer Aufwärmphase erreicht sollte es solange der Mößbauerversuch läuft bzw. das Mößbauerrack eingeschaltet ist an bleiben.

3.3. Justieren des Spektrometers

Vor Beginn der Messungen sollten zunächst einige der auftretenden elektrischen Signale betrachtet und skizziert werden um ein besseres Verständnis des Versuchsaufbaus zu erhalten. Anschließend werden die optimalen Betriebsparameter des Spektrometers überprüft bzw. eingestellt. Die Punkte 3.3.3 bis 3.3.6 müssen **vor jeder Aufnahme eines neuen Mößbauerspektrums** erneut durchgeführt werden.

3.3.1. Betrachten der Signale

Schauen Sie sich folgende im Versuch auftretende Signale mit dem Oszilloskop an:

1. Das Ausgangssignal des Vorverstärkers.
2. Das Ausgangssignal des Signalverstärkers. Stellen Sie dazu die Intensität am Oszilloskop hoch ein, die Spannungsskala auf $10 \frac{V}{cm}$ und achten Sie auf Häufungspunkte.
3. Einen der beiden identischen Ausgänge des Differentialdiskriminators.

4. Start- und Kanalfortschaltungsimpulse am Sinusgenerator. Triggern Sie dazu das Oszilloskop mit dem entsprechenden Signal.
5. Die Signale **SOLL**, **P.U.** und **FEHLER** an der Mößbauerantriebssteuerung. Verwenden Sie dazu die jeweils rechten Anschlüsse. Achten Sie auf das Fehlersignal wenn laute Geräusche, z. B. beim Stühlerücken, auftreten.

Skizzieren und erläutern Sie im Protokoll kurz (jeweils 1 - 2 Sätze) die Form und Funktion der jeweiligen Signale.

3.3.2. Überprüfen der Antriebsfrequenz

Überprüfen Sie, ob der Mößbauerantrieb von der Mößbauerantriebssteuerung in der richtigen Frequenz angesteuert wird. Zeigen Sie dazu den **FEHLER**-Kanal auf dem Oszilloskop an und ändern Sie die Frequenz am Sinusgenerator. Im Resonanzfall wird die Amplitude des Fehlersignals minimal. Mit dieser Frequenz werden alle folgenden Messungen durchgeführt.

3.3.3. Einbauen der Probe

Da die genaue Lage der 14,4 keV- γ -Linie von der Probe und den folgenden Einstellungen leicht beeinflusst wird muss die Probe vor der folgenden Justage eingebaut werden. Dieser und die folgenden Schritte sind daher für jede Probe vor der Aufnahme der Spektren zu wiederholen.

3.3.4. Einstellen der Antriebsamplitude

Stellen Sie die Amplitude der Schwingung des Mößbauerantriebs über den Regler **SOLL** ein. Die Geschwindigkeitsamplitude der Strahlungsquelle kann anhand der aushängenden Kalibrierkurve aus der gemessenen Effektivspannung am Multimeter abgeschätzt werden. Stellen Sie den Wert so ein, dass die Energieverschiebung durch die Bewegung etwas größer ist als die erwarteten Effekte für die jeweilige Probe. Dafür ist es notwendig **vor jeder Messung abzuschätzen oder zu recherchieren**, welche Energien zu erwarten sind.

3.3.5. Einstellen der Hochspannung

Stellen Sie die Spannung der Hochspannungsquelle auf einen Wert von etwa 1900 V und nehmen sie mit dem Analog-Digital-Konverter (Messmodus **M1**, **GATE**-Stecker abgezogen und Kippschalter auf **ANTI**.) ein γ -Spektrum auf. Je nach eingestellter Spannung wird ein leicht veränderter Energiebereich der γ -Strahlung mit etwas anderer Auflösung aufgenommen. Die 14,4 keV- γ -Linie sollte etwa in der Mitte des angezeigten Spektrums liegen und muss ggf. etwas nachjustiert werden.

3.3.6. Einstellen des Energiefensters

Stellen Sie das Energiefenster am Differentialdiskriminator mit den entsprechenden Reglern so ein, dass die komplette 14,4 keV- γ -Linie ausgenommen der Flanken selektiert wird. Durch den Kippschalter ANTI. \leftrightarrow CO. kann zwischen der Anzeige der verworfenen und akzeptierten Ereignisse umgeschaltet werden. Nach jeder Änderungen der Parameter sollte das Spektrum gelöscht werden.

Nach Durchführung aller Einstellungen am Spektrometer muss die laufende Messung, falls noch nicht erfolgt, beendet und das Spektrum gelöscht werden. Danach ist das Spektrometer vorbereitet, um ein Mößbauer-Spektrum aufzunehmen. Da die Aufnahme des Mößbauerspektrums sehr lange (≈ 1 oder mehr Tage) dauert sollte die vorherige Justage mit der entsprechenden Sorgfalt erfolgen.

3.4. Messungen und Auswertung

Für die Messung der Mößbauer-Spektren gibt es diverse Proben in fertig vorbereiteten und gefüllten Plexiglas-Probenhaltern, die in die entsprechende Halterung des Spektrometers passen. Die Proben müssen daher nicht selbst präpariert werden, es ist jedoch beim Einbau darauf zu achten, dass das Pulver möglichst gleichmäßig auf der vollständigen Fläche verteilt ist um eine homogene Absorption zu gewährleisten. **Achtung, die Fenster der Probenhalter sind aus sehr dünnem Glas und daher leicht zerbrechlich!** Die Auswahl der Materialien und Messaufgaben wird durch den Betreuer vorgegeben.

3.4.1. Auswertungshinweise

Für die Auswertung der Spektren sind verschiedene Auswertungsschritte notwendig die hier kurz erläutert werden sollen: Durch die Schwingung der Strahlungsquelle wird während einer Schwingungsperiode ($x(t = 0) = 0$ bis $x(t = T) = x(0)$) das Mößbauerspektrum (Intensität als Funktion der Geschwindigkeit v) doppelt durchlaufen. Um diese redundante Information zu nutzen wird das Spektrum in der Mitte gespiegelt und mit sich selbst addiert. Dadurch entsteht jeweils in den vorderen und hinteren 512 Kanälen einmal das eigentliche Mößbauerspektrum. Diese Teilspektren sind offensichtlich identisch, es sollte daher immer nur eines dieser Teilspektren dargestellt und diskutiert werden. Der beschriebene Vorgang wird Faltung genannt, der Faltungspunkt (Spiegelungspunkt) ist der Punkt mit maximaler bzw. minimaler Geschwindigkeit. Dieser muss nicht exakt dem mittleren Kanal entsprechen. *Die folgenden drei Punkte gehören dabei mit zu der Auswertung und sollen entsprechend im Protokoll wiederzufinden sein!*

1. Zunächst ist der optimale Faltungspunkt zu bestimmen. Der Faltungspunkt zeichnet sich dadurch aus, dass für die Geschwindigkeit der Strahlungsquelle $v = \pm v_{max}$ gilt, wobei v_{max} die Geschwindigkeitsamplitude ist. Im Gegensatz zu den beim Messprogramm einstellbaren Werten sind auch halbzahlige Werte möglich, falls diese Bedingung genau zwischen zwei benachbarten Kanälen erfüllt ist. Testen Sie verschieden Faltungspunkte. Das Optimum ist erreicht, wenn die Absorptionslinie so schmal und tief wie möglich ist.

2. Die Kanäle müssen in Geschwindigkeiten umgerechnet werden. Dazu ist es zweckmäßig zunächst für die Kanäle 0 - 511 die Geschwindigkeit als Bruchteil von v_{max} zu berechnen. Achtung, durch die **sinusförmige** Schwingung bei **zeitlich äquidistanter** Einteilung der Kanäle ist das Geschwindigkeitsintervall für jeden Kanal unterschiedlich. Diese Umrechnung ist für alle Spektren identisch und muss daher nur einmal durchgeführt werden.
3. Durch Multiplikation der im vorigen Schritt berechneten Geschwindigkeiten als Bruchteil von v_{max} mit der Amplitude die aus der Antriebsspannung und der Kalibrierkurve in Abbildung 6 berechnet werden kann ist die Umrechnung von Kanälen in Geschwindigkeiten oder Energien leicht möglich.

3.4.2. Kalibrierung mit Eisenfolie

Nehmen Sie ein Mößbauerspektrum von Eisenfolie auf. Wählen sie dabei eine bisher noch nicht in der Kalibrierkurve existierende Antriebsspannung. Aus den Kenndaten des Isotops ^{57}Fe in Anhang B und der Hyperfeinaufspaltung (Gleichung 17) kann aus den Linienabständen des Sextetts die Geschwindigkeitsamplitude zur vorgegebenen Antriebsspannung berechnet werden. Tragen Sie nach Versuchsende den neun Kalibrierpunkt in die aushängende Tabelle ein, mit der Zeit wird so die Kalibrierung immer genauer.

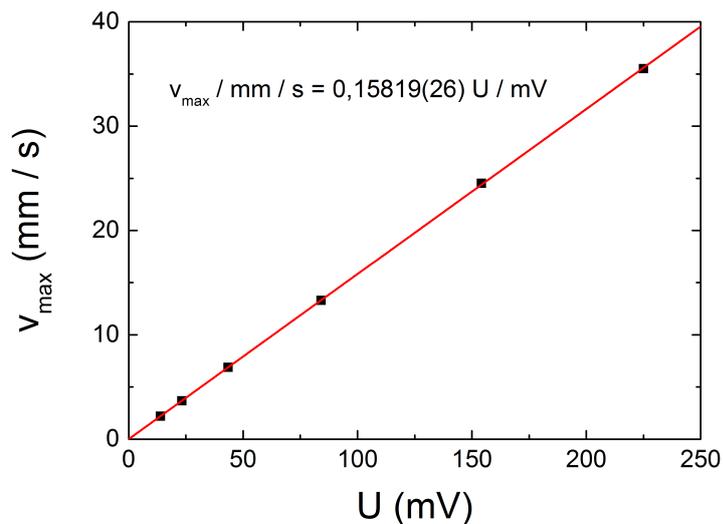


Abbildung 6: Kalibrierkurve zur Umrechnung der Antriebsspannung in Geschwindigkeitsamplituden. Es ist zu beachten, dass die Antriebsspannung U als **Effektivwert** angegeben ist während die Amplitude v_{max} das **Maximum** der Geschwindigkeit ist.

3.5. Weitere Auswertung

Nehmen Sie in Absprache mit dem Betreuer weitere Mößbauerspektren auf. Die zu untersuchenden Proben unterscheiden sich von Gruppe zu Gruppe, eine mögliche Auswahl von Proben sind Fe_2O_3 , FeCl_2 , FeCl_3 , Ferrocen, Edelstahl, Blutlaugensalze und weitere. Die entsprechenden Spektren sind bezüglich ihrer beschreibenden Parameter auszuwerten und sowohl die Spektren als auch die Fitparameter in Einheiten von mm/s anzugeben. Eine begründete Analyse der Fitparameter bezüglich ihrer physikalischen Bedeutung für das vorliegende System gehört zur Analyse dazu, ebenso wie eine Einordnung mit bereits existierenden Literaturwerten.

Weiterhin ist es Aufgabe, die Messreihen untereinander zu Vergleichen. Die genauen Vergleiche sind dabei abhängig von den gewählten Proben und werden mit dem Betreuer während der Durchführung abgesprochen. Mögliche Fragestellungen sind "Warum ändert sich das Spektrum von Singlet in eine andere Form bei Änderung des Oxidationszustands der Probe" oder "Woher stammen die Unterschiede in Aufspaltung / Isomeriever-schiebung / ... der beiden Proben unter Berücksichtigung der am Eisenatom zugrunde liegenden Zustände".

A. Befehle zur Steuerung des Mößbauerspektrometers

Im Folgenden sind die wichtigsten Befehle zur Steuerung des Spektrometers aufgelistet und erläutert. Die vollständige Befehlsliste kann nach dem Einschalten auf dem Monitor des Spektrometers eingesehen werden. Bei der Eingabe auf der Tastatur des Spektrometers (**Befehle** in erster Spalte) muss je nach Einstellung des Systems **vor jedem** Befehl **Esc** gedrückt werden, bei der Eingabe über LabVIEW (*Befehle* in zweiter Spalte) müssen dagegen die Folgeparameter direkt miteingegeben werden.

CC	<i>CC</i>	Continue command list: Befehlsliste auf dem Monitor des Spektrometers anzeigen bzw. nächste Seite der Befehle anzeigen.
A1	<i>A1iiiijjj</i>	Select area 1: Einstellen der verwendeten Kanäle i - j, jeweils vierstellig, normalerweise 0 - 1023.
D1	<i>D1</i>	Display area 1: Anzeigen der mit A1 einstellbaren Kanäle, normalerweise 0 - 1023, die Art des Spektrums ist abhängig vom Messmodus (M0/M1).
DF	<i>DFiiii</i>	Display with folding: gefaltetes Spektrum anzeigen, der Faltungspunkt (Kanal) iiii muss vierstellig angegeben werden.
TI	<i>TImmnn</i>	Time for measurements: Messzeit einstellen im Format <i>mm</i> · 10 ⁿ s. Maximalwert ??????????????????????
M0	<i>M0</i>	Multiscaling on: Messung mit dem Mehrkanalanalysator starten → Mößbauerspektrum (Anzahl Ereignisse vs. Geschwindigkeit der Quelle) aufnehmen.
M1	<i>M1</i>	ADC on: Messung mit Analog-Digital-Konverter (ADC) starten → γ -Spektrum (Intensität vs. γ -Energie) aufnehmen.
MF	<i>MF</i>	Measurement off: Messung anhalten.
CM	<i>CM</i>	Continue measurement: Messung weiterführen.
CL	<i>CLiiiijjj?</i>	Clear channels: Messwert der Kanäle i - j, jeweils vierstellig, löschen. Das ? muss durch Y für Yes oder N für No ersetzt werden.
PR	<i>PRiiiijjj18?</i>	Print channels: Ausgeben der gespeicherten Werte der Kanäle i - j (jeweils 4-stellig) als Text auf dem Monitor und an die serielle Schnittstelle im Format „18“. Das ? muss durch Y für Yes oder N für No ersetzt werden. Achtung, die Ausgabe von 1024 Kanälen dauert etwa 38.

B. Kenndaten des Isotops ^{57}Fe

Energie des MB-Übergangs	14,4	keV
Lebensdauer des angeregten Niveaus	141	ns
halbe natürliche Linienbreite (Γ_{nat})	2,335	neV
relative Linien­schärfe	$3,24 \cdot 10^{-13}$	
Isotopenhäufigkeit	2,19	%
Absorptions-Wirkungsquerschnitt im Resonanzmaximum (σ_0)	$2,56 \cdot 10^{-18}$	cm^2
Rückstoßenergie (R)	1,96	meV
Mößbauer-Lamb-Faktor bei $T = 10\text{K}$	$\approx 0,9$	
Mößbauer-Lamb-Faktor bei $T = 300\text{K}$	$\approx 0,8$	
Energieverschiebung durch Dopplereffekt	$1 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \hat{=} 48$	neV
Energie der charakteristischen Röntgenstrahlung	6,4	keV
innerer Konversionskoeffizient (α)	8,18	
Quadrupolmoment des angeregten Niveaus	0,187	barn
Quadrupolmoment des Grundzustandes	0	barn
magnetisches Moment des angeregten Niveaus	-0,1549	μ_N
magnetisches Moment des Grundzustandes	+0,0902	μ_N
Hyperfeinfeld in Eisen	33	T
Linienabstände des Sextetts		
innere Linien	1,677	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
mittlere Linien	6,167	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
äußere Linien	10,657	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$

μ_N ist hier das Kernmagneton.