

Mössbauer-Effekt

Fortgeschrittenen-Praktikum Sommersemester 2007

Philipp Buchegger, Yvonne Schiele
Betreuer Patrick Dillmann

Konstanz, den 1. Juni 2007

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	2
1.1 Magnetische Wechselwirkung	2
1.2 Quadrupolwechselwirkung	2
1.3 Isomeriewerschiebung	2
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Natürliche Linienbreite	2
2.2 Rückstoß und Dopplerverschiebung	3
2.3 Debye-Waller-Faktor	3
2.4 Zerfallsschema von ^{57}Co	4
2.5 Magnetische Wechselwirkung	4
2.6 Elektrische Quadrupolwechselwirkung	5
2.7 Szintillationsdetektor oder Proportionalzählrohr	5
2.8 Isomeriewerschiebung	5
3 Auswertung	6
3.1 Spektrum der ^{57}Co -Quelle	6
3.2 Magnetische Aufspaltung	6
3.3 Eisenfolie	7
3.4 Fe_2O_3	8
3.5 Edelstahl	9
3.6 Ausmessen und Analyse einer anderen Substanz: Fe_3PO_4	11
3.7 Quadrupolwechselwirkung	11
3.8 Isomeriewerschiebung	12
Literatur	13

Abbildungsverzeichnis

1 Zerfallsschema von ^{57}Co	4
2 Zeeman-Aufspaltung	5
3 Mößbauer-Spektrum	6
4 Spektrum von Eisenfolie	7
5 Spektrum von Fe_2O_3	8
6 Spektrum von Edelstahl	9
7 Spektrum von Fe_3PO_4	11
8 Spektrum von $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Natrium-Nitroprussid)	11
9 Struktur des $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Natrium-Nitroprussid)	12
10 Spektrum von FeCl_2	12
11 Spektrum von FeCl_3	13

1 Aufgabenstellung

Aufnahme des Energiespektrums der ^{57}Co Quelle mit verschiedenen Kernstrahlungsdetektoren. Wählen Sie den für Ihre Zwecke geeignetsten aus. Vergleichen Sie Ihre Spektren mit Ihrer Antwort zur Frage 5.

„Ausblendung“ der 14,4 keV Mößbauerlinie.

1.1 Magnetische Wechselwirkung

Aufnahme der Mößbauerspektren einer „angereicherten“ Eisenmetallfolie, von Fe_2O_3 und Edelstahl.

Berechnen Sie aus Ihren Meßdaten das Dipolmoment des angeregten Eisenkerns.

Bestimmen Sie das Magnetfeld am Kernort für Ihre untersuchten Absorber.

Warum sind diese Felder unterschiedlich groß?

Vergleichen sie Ihre gemessenen Feldstärken mit normalen Labor-Magnetfeldern.

Wie entstehen diese starken Hyperfeinfelder?

Bestimmen Sie die Isomerieverschiebung von Fe-Metall.

Vergleichen Sie die Linienbreiten Ihrer Mößbauerspektren mit der sog. natürlichen Linienbreite.

Was kann den Unterschied bewirken ?

1.2 Quadrupolwechselwirkung

Aufnahme des Mößbauerspektrums von Natrium-Nitroprussid $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Berechnen Sie die Quadrupolwechselwirkungsenergie des angeregten Eisenkerns mit seiner Umgebung.

Suchen Sie in der chem. Literatur die Struktur der untersuchten Substanz heraus (Skizze!) Wodurch kommt der Feldgradient zustande?

Warum hat dieses Spektrum eine geringere Intensität als die vorhergehenden?

1.3 Isomerieverschiebung

Aufnahme von Mößbauerspektren von FeCl_2 und FeCl_3

Schätzen Sie aus den gemessenen Isomerieverschiebungen die Dichte der s-Elektronen am Eisenkern für beide Verbindungen ab.

Welche der Ihnen aus den vorhergehenden Mößbauerspektren bekannten Hyperfeinwechselwirkungen ist für die beobachteten Linienaufspaltungen verantwortlich?

Ausmessen und Analyse einer anderen Substanz

Herstellung und Ausmessen neuer Absorber.

2 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen wurden primär mit Hilfe des Skripts [GS] erarbeitet. Der Mößbauereffekt ist die Beobachtung der rückstoßfreien Resonanzabsorption von γ -Strahlung. Durch Energiequantelung kann ein γ -Quant nur dann absorbiert werden, wenn seine Energie der Anregungsenergie eines Kernniveaus entspricht. Dies ist aber nicht immer bei Emission und Absorption am gleichen Kernübergang der Fall, da bei der Emission dem emittierenden Kern ein Rückstoß erteilt wird und der Kern nicht unendlich schwer ist. Bei der Absorption tritt ein ähnlicher Effekt auf: Aus Impulserhaltungsgründen wird ein Teil der Energie in kinetische Energie des absorbierenden Kerns verwandelt. Mößbauer hat 1957 gefunden, dass dieser Rückstoßeffect ausgeschaltet werden kann, wenn man das Atom in ein Kristallgitter einbaut. Die dabei auftretende rückstoßfreie Emission und Absorption wird als Mößbauereffekt bezeichnet.

2.1 Natürliche Linienbreite

Hat ein Kernzustand eine mittlere Lebensdauer τ_N , so besitzt der Zustand eine Energieunschärfe $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau_N}$. Die Größe Γ bezeichnet man als natürliche Linienbreite. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass das Frequenzspektrum der emittierten γ -Strahlung einer Lorentzverteilung mit der Halbwertsbreite $\frac{\Gamma}{\hbar}$ genügt. Für den häufig benutzten Atomkern ^{57}Fe erhält man folgende Werte. Die Energie des Niveaus ist $\hbar\omega_0 = 14,4\text{keV}$ und die Lebensdauer $\tau_N = 10^{-7}\text{s}$.

Daraus ergibt sich für die Linienbreite von ^{57}Fe :

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau_N} = 4.6 \cdot 10^{-9} \text{eV} \quad (1)$$

und für die relative Energieunschärfe

$$\frac{\Gamma}{\hbar\omega_0} = 3 \cdot 10^{-13} \quad (2)$$

Durch die Beobachtung der Resonanzabsorption ist es möglich, Energiemessungen bis zur Begrenzung durch die natürliche Linienbreite vorzunehmen und damit eine bis dahin unerreichte Genauigkeit zu erreichen.

2.2 Rückstoß und Dopplerverschiebung

Beim Aussenden eines γ -Quants erleidet der Kern einen Rückstoß, der zu einer Reduktion der γ -Energie führt. Die Auswirkung dieses Effektes auf das Frequenzspektrum der emittierten γ -Strahlung soll am Beispiel des einatomigen Gases im thermischen Gleichgewicht diskutiert werden.

Die Energie des angeregten Atomkerns vor der Emission ist

$$E_{vor} = E_a + \frac{\vec{p}^2}{2M} \quad (3)$$

wobei $\vec{p} = M \cdot \vec{v}$ der Impuls und M die Masse des Atoms ist. Nach der Emission ist der Impuls um den Wert $\hbar\vec{k}$, also um den Impuls des γ -Quants reduziert, ausserdem ist die Energie E_a im angeregten Zustand durch den Wert E_g im Grundzustand zu ersetzen. Man erhält damit

$$E_{nach} = E_g + \frac{(\vec{p} - \hbar\vec{k})^2}{2M} \quad (4)$$

Die Energiedifferenz ist also

$$E_{vor} - E_{nach} = \hbar\omega = \hbar\omega_0 + \hbar(\vec{k} \cdot \vec{v} - \frac{\hbar k^2}{2M}) \quad (5)$$

Der Term $\hbar(\vec{k} \cdot \vec{v})$ ist durch den geschwindigkeitsabhängigen Dopplereffekt verursacht. Für die ^{57}Fe -Linie und thermischen Geschwindigkeiten erhält man bei Zimmertemperatur ca. 10^{-2}eV .

Der konstante Rückstoßterm $-\frac{\hbar^2 k^2}{2M}$ hat für ^{57}Fe den Wert $2 \cdot 10^{-3} \text{eV}$.

Diese Energien sind 6 Größenordnungen über der natürlichen Linienbreite von $4.6 \cdot 10^{-9} \text{eV}$.

2.3 Debye-Waller-Faktor

Baut man das emittierende Atom in einen Festkörper ein, so muss der Kristall den Rückstoß aufnehmen. Werden keine Phononen angeregt (oder vernichtet), so nimmt der Kristall als Ganzes den Rückstoß auf. Da die Masse des Gesamtkristalls ungefähr 10^{23} mal größer ist, als die Masse des einzelnen Atoms, ist sowohl die thermische Geschwindigkeit wie auch der Rückstoß zu vernachlässigen. Man erhält dann eine unverbreiterte unverschobene Emissionslinie (Mössbauerlinie). Der Anteil der rückstoßfreien γ -Emissionen zu allen γ -Emissionen heißt DEBYE-WALLER-FAKTOR.

f ist temperaturabhängig und am größten bei $T = 0$. Allerdings ist auch am absoluten Nullpunkt wegen der Nullpunktschwingungen der Debye-Waller-Faktor kleiner als 1.

2.4 Zerfallsschema von ^{57}Co

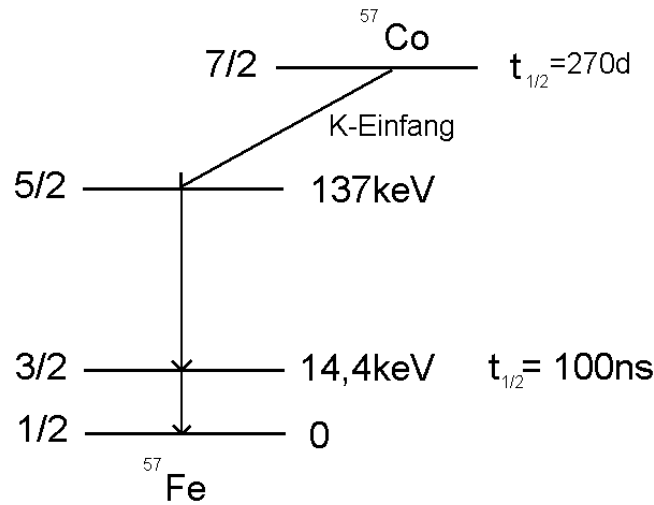


Abbildung 1: Zerfallsschema von ^{57}Co

Das Isotop ^{57}Co kann über die Kernreaktion $^{56}\text{Fe}(d, n)^{57}\text{Co}$ produziert werden. Der Zerfall von ^{57}Co erfolgt durch Einfang eines Elektrons aus der K-Schale der Hülle. Das entstehende Loch in der K-Schale wird anschließend unter Emission von 6.5keV Röntgenstrahlung durch Elektronen aus den höheren Schalen wieder aufgefüllt.

Die Mößbauerquelle $^{57}\text{Co}-^{57}\text{Fe}$ bietet für viele Anwendungen ideale Verhältnisse. Das Mutterisotop ^{57}Co besitzt mit $T_{1/2} = 270d$ eine hinreichend lange Lebensdauer, so dass die Experimente ohne häufiges Wechseln der QUelle durchgeführt werden können.

Die Lebensdauer des Mößbauerniveaus $T_{1/2} = 100ns$ führt zu einer Linienbreite, die für viele Anwendungen eine hinreichende Energieauflösung gewährleistet, ohne zu große Anstrengungen bezüglich des Antriebs und der Stabilität zu verlangen, wie es bei einer schärferen Linie erforderlich wäre. Schließlich ist die Energie von 14.4 keV hinreichend klein, um auch bei Zimmertemperatur einen großen Debye-Waller-Faktor zu gewährleisten. Noch kleinere Energien des γ -Quants würden unter Umständen zu Problemen beim Nachweis führen, z.B. bezüglich der Trennung von den gleichzeig emittierten Röntgenquanten.

2.5 Magnetische Wechselwirkung

Die magnetische Wechselwirkung $-\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ führt zu einer Aufspaltung des Kernniveaus und damit zu unterschiedlichen Energien der emittierten γ -Strahlung.

Aufspaltung des Kernniveaus von ^{57}Fe in einem Magnetfeld. Die eingezeichneten γ -Übergänge genügen dem Auswahlregeln $\Delta M, \pm 1$. Man beobachtet nur die 6 für M1-Strahlung erlaubten Übergänge, also handelt es sich um reine M1-Strahlung ($\Delta M, \pm 1$). Für die Übergangenergien gilt

$$\hbar\omega(M_a \rightarrow M_g) = (E_a - \frac{\mu_a}{I_a} M_a B) - (E_g - \frac{\mu_g}{I_g} M_g B) = \hbar\omega_0 - (\frac{\mu_a}{I_a} M_a - \frac{\mu_g}{I_g} M_g) B \tag{6}$$

Da wir eine sich bewegende Quelle haben, ist der Dopplereffekt zu berücksichtigen. Für die Resonanzfrequenz gilt $\omega = \omega_0(1 + \frac{v_{res}}{c})$

$$\hbar\omega_0(1 + \frac{v_{res}}{c}) = \hbar\omega_0 - (\frac{\mu_a}{I_a} M_a - \frac{\mu_g}{I_g} M_g) B \tag{7}$$

$$\Rightarrow v_{res} = -\frac{c}{\hbar\omega_0} (\frac{\mu_a}{I_a} M_a - \frac{\mu_g}{I_g} M_g) B \tag{8}$$

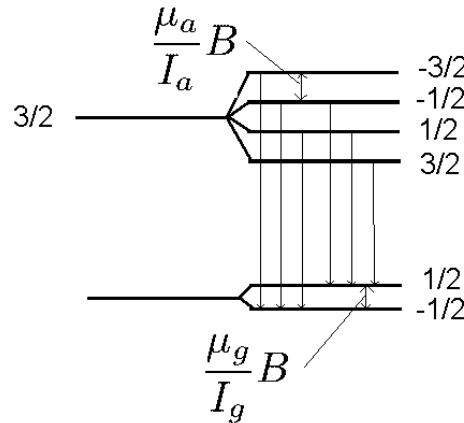


Abbildung 2: Zeeman-Aufspaltung

2.6 Elektrische Quadrupolwechselwirkung

Wenn der deformierte Kern mit einem elektrischen Feldgradienten wechselwirkt, so gibt es eine Aufhebung der Energieentartung bezüglich der m-Unterniveaus. Diese Aufspaltung hängt nicht vom Vorzeichen des m-Zustands ab:

$$E_Q = [3M^2 - I(I + 1)]\hbar\omega_Q, \omega_Q = \frac{eQV_{ZZ}}{4I(2I - 1)\hbar} \quad (9)$$

Für den Abstand der beiden Mößbauerlinien erhält man:

$$\Delta E = 6\hbar\omega_Q = \hbar\omega_0 \frac{\Delta v}{c} \quad (10)$$

$$\Delta v = v_{res}(1) - v_{res}(2) \quad (11)$$

$$\Delta v = \frac{eQV_{ZZ} \cdot c}{2\hbar\omega_0} \quad (12)$$

2.7 Szintillationsdetektor oder Proportionalzählrohr

Wir verwenden das Proportionalzählrohr, da der Szintillationsdetektor keine gute Energieauflösung hat. Das rührt daher, dass die Eindringtiefe in den Kristall nicht linear proportional zu der Energie des γ -Quants ist. Wie der Name des Proportionalzählrohr schon sagt, ist der gemessene Stromimpuls proportional zu der Energie des γ -Quants. Ein Proportionalzählrohr ist im Prinzip ein Geiger-Müller-Zählrohr mit Energieauflösung.

2.8 Isomeriewerschiebung

Die Energie eines Kernzustandes für einen ausgedehnten Kern mit mittlerem quadratischen Kernradius $\langle r^2 \rangle$ verschiebt sich gegenüber einem punktförmigen Kern. Es gilt

$$\Delta E = \frac{Ze^2}{6\epsilon_0} |\Psi(0)|^2 \langle r^2 \rangle \quad (13)$$

Beim Mößbauerexperiment misst man diese Energie relativ zwischen Quelle und Absorber. Für die bewegte Quelle Q erhält man für den Übergang vom Grundzustand g zum angeregten Zustand a unter Berücksichtigung des Dopplereffekts und der Isomeriewerschiebung

$$\hbar\omega_Q = \hbar\omega_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right) + \frac{Ze^2}{6\epsilon_0} |\Psi_Q(0)|^2 \{ \langle r_a^2 \rangle - \langle r_g^2 \rangle \} \quad (14)$$

Für den ruhenden Absorber A lautet der Ausdruck:

$$\hbar\omega_A = \hbar\omega_0 + \frac{Ze^2}{6\epsilon_0} |\Psi_A(0)|^2 \{ \langle r_a^2 \rangle - \langle r_g^2 \rangle \} \quad (15)$$

Resonanzabsorption erhält man für $\omega_Q = \omega_A$. Daraus ergibt sich für die Geschwindigkeit der Quelle

$$v_{res} = \frac{Ze^2c}{6\epsilon_0\hbar\omega_0} (|\Psi_A(0)|^2 - |\Psi_Q(0)|^2) (\langle r_a^2 \rangle - \langle r_g^2 \rangle) \quad (16)$$

$\delta = v_{res}$ bezeichnet man als Isomerieverschiebung. Die Vorzeichenkonvention für Isomerieverschiebung ist derart, dass v positiv ist, wenn sich die Quelle auf den Absorber zubewegt.

Isomerieverschiebung ist eine Relativgröße. Deshalb muss man immer eine Bezugssubstanz angeben, z.B. Isomerieverschiebung gegenüber Fe in Pt. Damit eine Isomerieverschiebung auftritt müssen folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein:

$$|\Psi_A(0)|^2 |\Psi_Q(0)|^2 \neq 0 \quad \text{und} \quad (17)$$

$$\langle r_a^2 \rangle - \langle r_g^2 \rangle \neq 0 \quad (18)$$

Für ^{57}Fe ist $\langle r_a^2 \rangle - \langle r_g^2 \rangle$ negativ.

3 Auswertung

3.1 Spektrum der ^{57}Co -Quelle

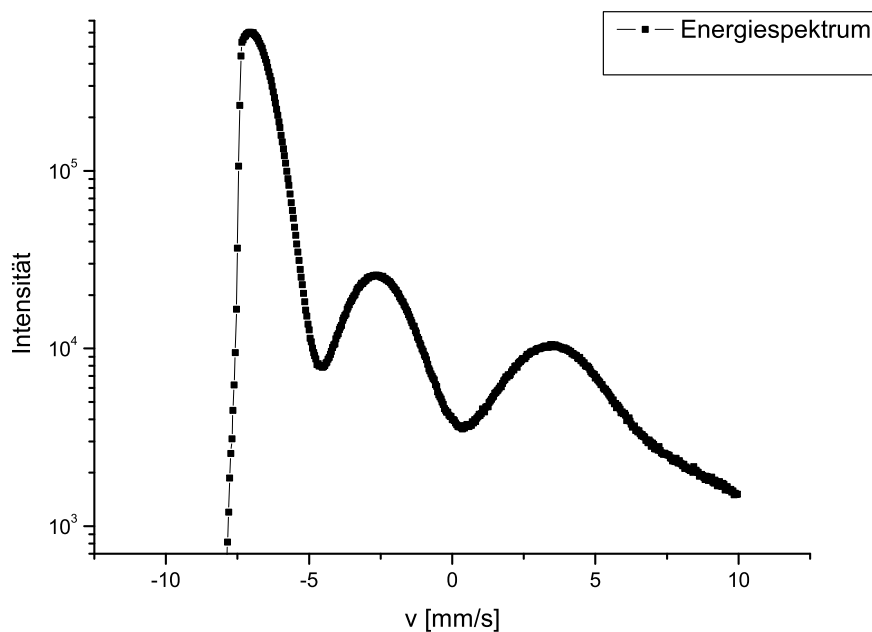


Abbildung 3: Mößbauer-Spektrum

3.2 Magnetische Aufspaltung

Zu ermitteln ist das Dipolmoment des angeregten Eisenkerns. Für die Geschwindigkeit gilt

(19)

Natürlich ist $\hbar\omega_0$ hier die Energie des „Mössbauer-Übergangs“, also $\hbar\omega_0=14.4\text{keV}$. Die Drehimpulsquantenzahlen sind $l=\frac{3}{2}$ für den angeregten bzw. $l=\frac{1}{2}$ für den Grundzustand. Daraus folgt direkt $M_g = \pm\frac{1}{2}$ und $M_a=\pm\frac{3}{2}$; $\pm\frac{1}{2}$. Setzt man nun die Drehimpulsquantenzahlen und $M_{a,g}$ in die Formel zur Bestimmung der Geschwindigkeit ein, erkennt man, dass es zwei verschiedene Beträge der Geschwindigkeitsdifferenzen gibt.

$$\Delta v_\alpha = -\frac{c}{\hbar\omega_0} \cdot B \frac{2}{3} \mu_a \tag{20}$$

$$\Delta v_\beta = \frac{c}{\hbar\omega_0} \cdot B(2\mu_g + \frac{2}{3}\mu_a) \tag{21}$$

Die „inneren“ beiden Linien liegen näher beieinander, als die anderen 4 Linien. v_β ist also die Geschwindigkeitsdifferenz der dritten und vierten Linie, v_α sind die Abstände der ersten zur zweiten, der zweiten zur dritten, der vierten zur fünften und der fünften zur sechsten Linie. Mit Kenntnis von $\mu_g = 0.0906 \cdot \mu_N$, wobei $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5.05 \cdot 10^{-27} \text{Am}^2$ ist, lassen sich so elegant μ_a und das Magnetfeld B bestimmen:

$$\mu_a = -\frac{3\mu_g}{1 + \frac{\Delta v_\beta}{\Delta v_\alpha}} \tag{22}$$

$$B = -\frac{3\hbar\omega_0\Delta v_\alpha}{2c\mu_a} \tag{23}$$

3.3 Eisenfolie

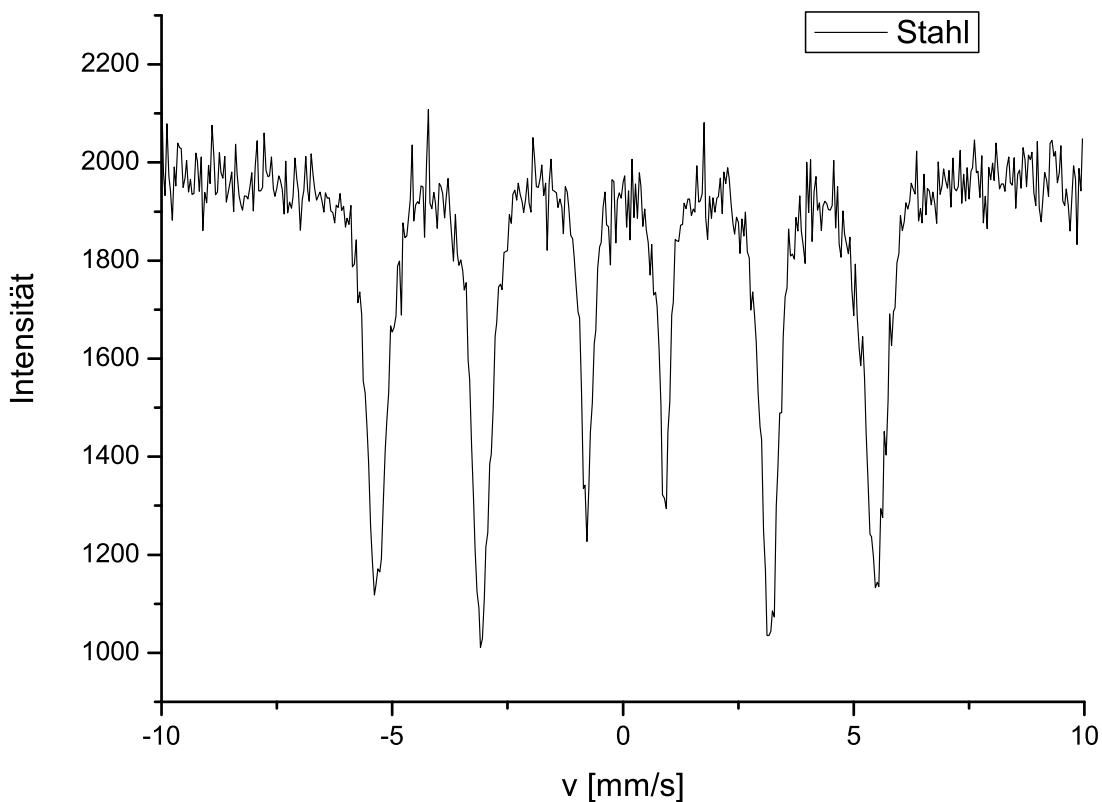


Abbildung 4: Spektrum von Eisenfolie

Mittels eines 6-fachen Gauss-Fit ließen sich folgende Werte für die Geschwindigkeiten ermitteln:

Peak	$v [\frac{mm}{s}]$	Fehler [$\frac{mm}{s}$]
1	-5.3331	± 0.0073
2	-3.06781	± 0.00621
3	-0.78207	± 0.00685
4	0.90254	± 0.00722
5	3.18218	± 0.00601
6	5.47421	± 0.00774

Das ergibt für $\Delta v_\alpha = 2.281 \pm 0.013 \frac{mm}{s}$ und für $\Delta v_\beta = 1,685 \pm 0.014 \frac{mm}{s}$
Also erhalten wir

$$\frac{\Delta v_\beta}{\Delta v_\alpha} = [0.7387 \pm 0.004] \quad (24)$$

und daraus

$$\mu_a = [-0.155 \pm 0.001] \mu_N$$

$$B = [-33,28 \pm 0.014] T$$

3.4 Fe₂O₃

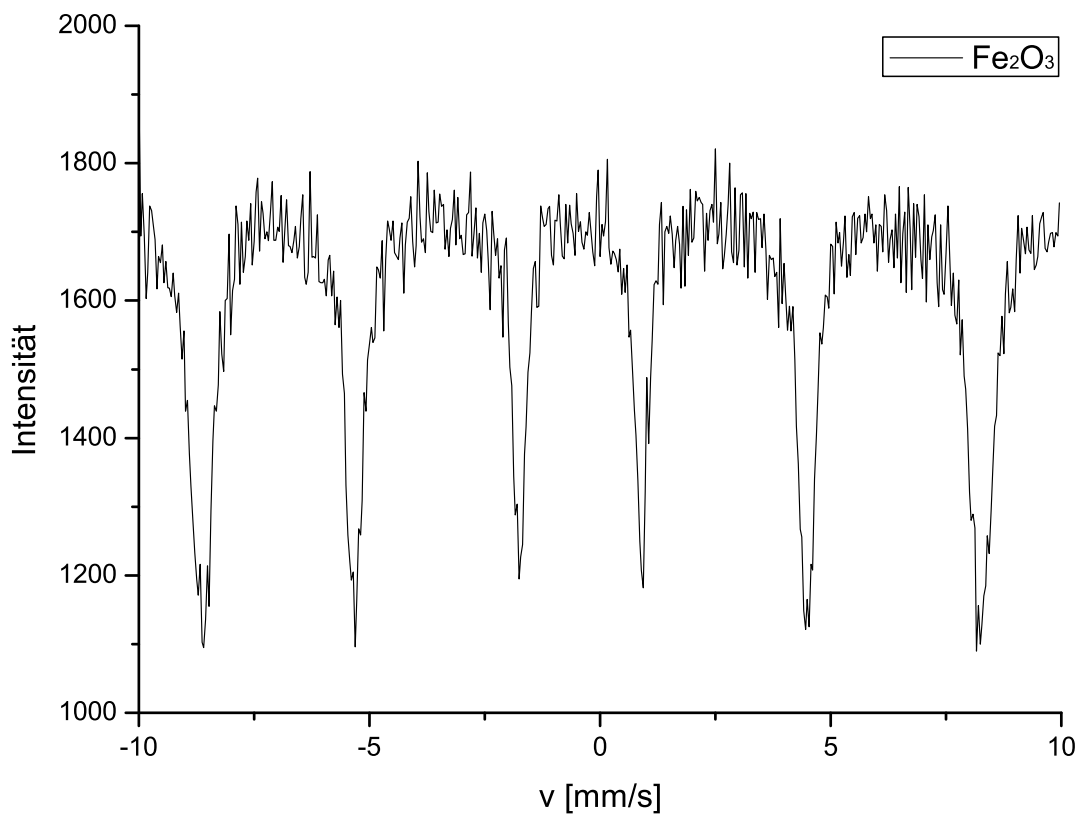


Abbildung 5: Spektrum von Fe₂O₃

Peak	$v [\frac{mm}{s}]$	Fehler $[\frac{mm}{s}]$
1	-8,6363	± 0.02144
2	-5,3125	± 0.01961
3	-1,75781	± 0.02609
4	0,9375	± 0.02716
5	4,45313	± 0.02158
6	8,26129	± 0.04371

Das ergibt für $\Delta v_\alpha = 3.552 \pm 0.059 \frac{mm}{s}$ und für $\Delta v_\beta = 2.698 \pm 0.065 \frac{mm}{s}$
Also erhalten wir

$$\frac{\Delta v_\beta}{\Delta v_\alpha} = [0,7596 \pm 0.004] \quad (25)$$

und daraus

$$\mu_a = [-0.154 \pm 0.001] \mu_N$$

$$B = [-52,45 \pm 0.05] T$$

Dabei weichen wir nur gering vom Literaturwert $B=51.5T$ [GS95] ab. Eine zu kurze Messperiode hätte eventuell das Ergebnis verbessern können. Die Isomerieverschiebung beträgt $\delta=0.41 \frac{mm}{s}$

3.5 Edelstahl

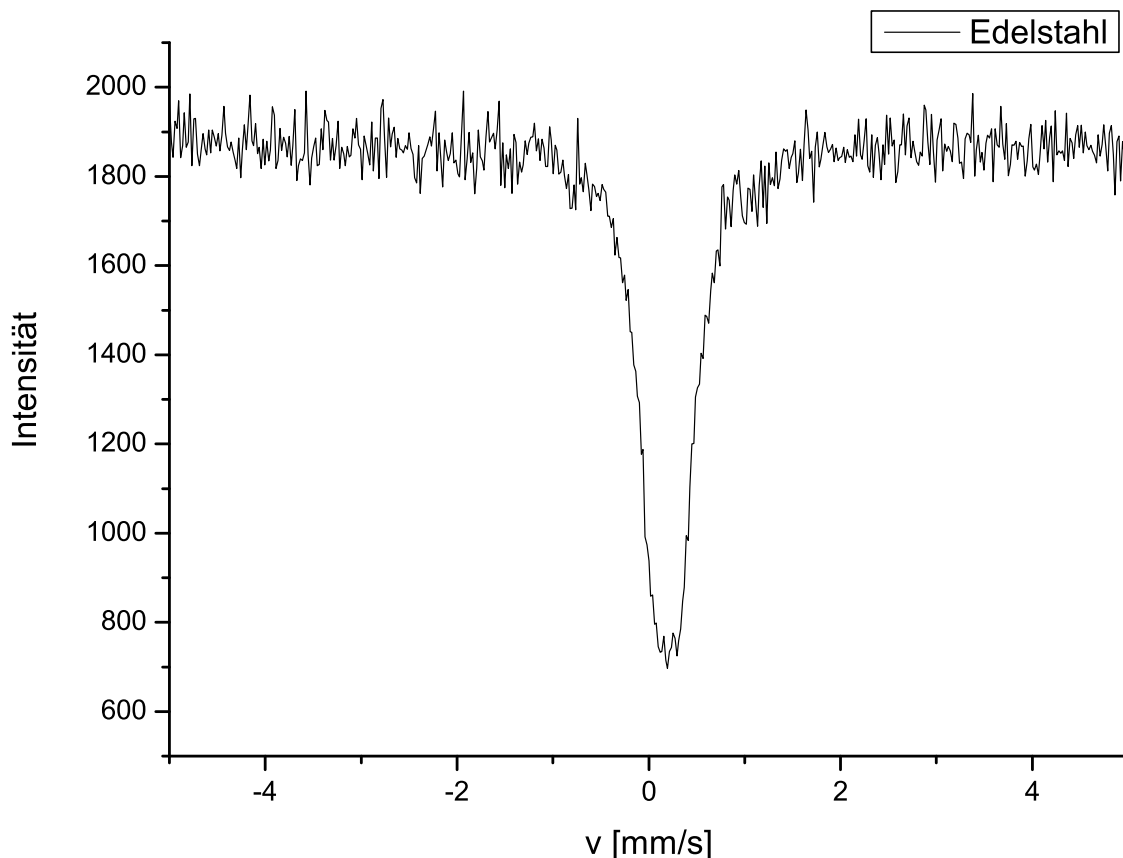


Abbildung 6: Spektrum von Edelstahl

Zuerst wurde das Edelstahl-Mössbauerspektrum mit $v_{max}=10 \frac{mm}{s}$ aufgenommen. Es wurde nicht wie beim Eisen und Eisenoxid eine 6-fache magnetische Hyperfeinaufspaltung beobachtet. Um den interessanten Bereich besser

aufzulösen, wurde noch eine Messung mit $v_{max}=5\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ gemacht. Edelstahl ist sehr reines, mit Kohlenstoff versetztes Eisen. Durch den Kohlenstoff wird die Gitterstruktur des Edelstahls verändert, somit verändert sich die Dynamik des Gitters und die elektronische Umgebung der Eisenatome verändert sich. Es kann keine magnetische Aufspaltung beobachtet werden, da die Relaxationsprozesse ungefähr gleichschnell, wie das Mößbauerniveau sind und somit die Wechselwirkungszeit zu kurz ist. Also gibt es keine Zeeman-Aufspaltung. Als Isomeriewerschiebung messen wir $0.194\pm 0.003\frac{\text{mm}}{\text{s}}$, der Literaturwert beträgt $20.4\frac{\text{mm}}{\text{s}}$.

3.6 Ausmessen und Analyse einer anderen Substanz: Fe_3PO_4

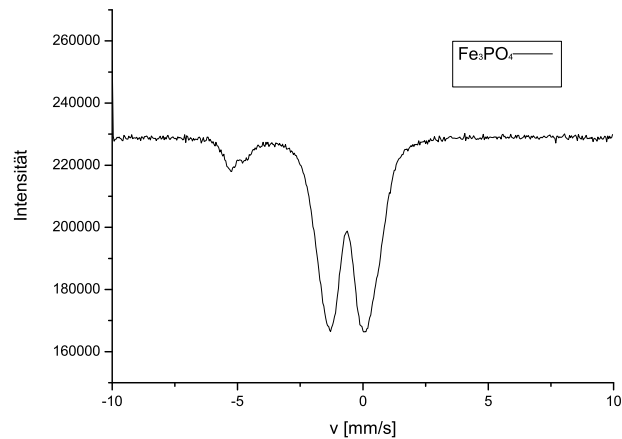


Abbildung 7: Spektrum von Fe_3PO_4

3.7 Quadrupolwechselwirkung

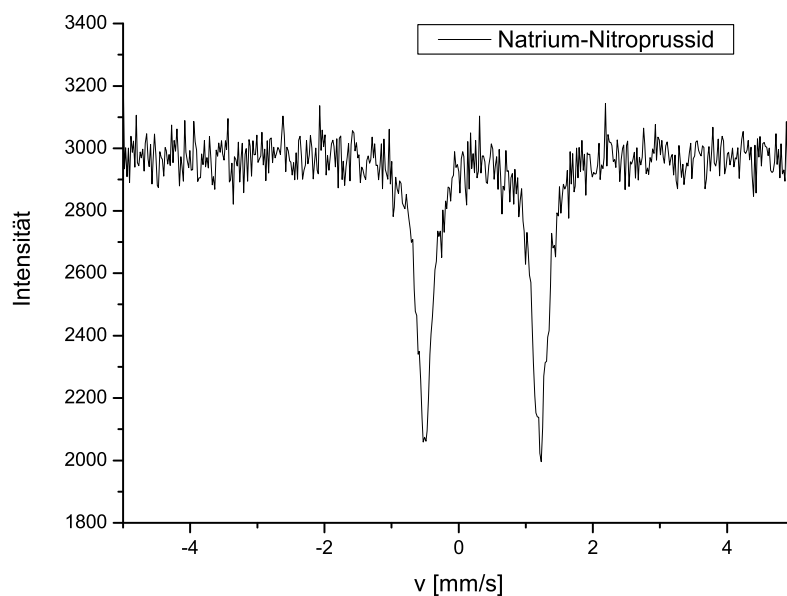
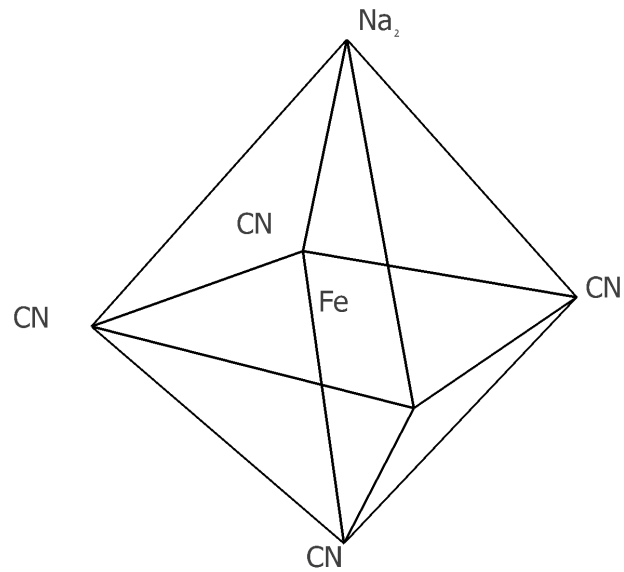
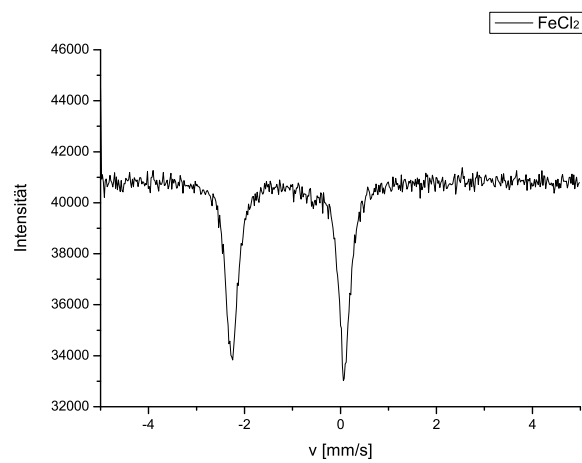


Abbildung 8: Spektrum von $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Natrium-Nitroprussid)

Man erkennt 2 Peaks bei $-0.53 \pm 0.02 \text{ mm}$ und $1.23 \pm 0.02 \text{ mm}$ was zu einer Differenz von $\Delta v = 1.76 \pm 0.04 \text{ mm}$ führt. Das Eisenatom sitzt in der Lücke in der Mitte des Oktaeders. Es wird von CN-Gruppen, sowie einem Na_2 umgeben. Also sind die Oktaederecken asymmetrisch besetzt, was zu asymmetrischen Elektronenkonfiguration und somit zu einem großen Feldgradienten führt. Durch den großen Feldgradienten sehen wir überhaupt erst eine Quadrupolaufspaltung.

Abbildung 9: Struktur des $Na_2Fe(CN)_5 \cdot H_2O$ (Natrium-Nitroprussid)

3.8 Isomerieverschiebung

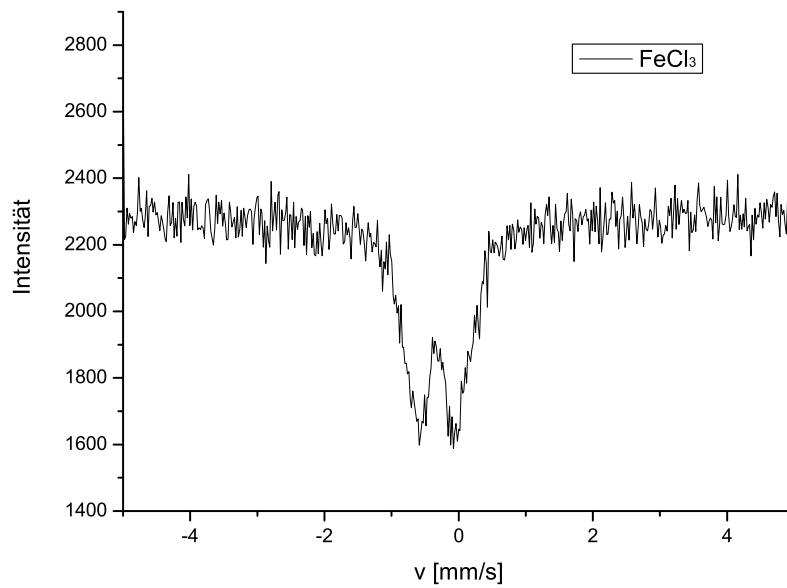
Abbildung 10: Spektrum von $FeCl_2$

$$\Delta v_{\text{quad}} = 2.34 \pm 0.012 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (26)$$

$$\delta = 1.17 \pm 0.006 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (27)$$

$$(28)$$

Für $FeCl_2$ kamen wir zu den zwei Peaks $-0.64757 \pm 0.01438 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ und $-0.0135 \pm 0.01518 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Das bringt uns zu einer

Abbildung 11: Spektrum von FeCl_3

Quadrupolaufspaltung und Isomerieverschiebung von

$$\Delta v_{\text{quad}} = 0.66 \pm 0.014 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (29)$$

$$\delta = 0.33 \pm 0.007 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (30)$$

$$(31)$$

Literatur

[GS] GÜNTER SCHATZ, Alois W.: *Skript zum Mößbauereffekt*. Germany, Konstanz : Schatz, Weidinger 2

[GS95] GÜNTER SCHATZ, Alois W.: *Nukleare Festkörperphysik*. 3., Aufl. Germany : Teubner, 1995 9