Fortgeschrittenenpraktikum Physik



Versuch 11

Der Mössbauereffekt

Version 1.1 10. Dezember 2008

Inhaltsverzeichnis

rkenntnisse Physikalische Grundlagen Mößbauereffekt Beeinflussung des Mößbauerspektrums durch verschiedene Effekte Geräte und Versuchsaufbau Image: state	3 3 3 3 3 3 4 4 5 5
arsuchsaufbauAntrieb und AusleseAbsorberfolienAbsorberfolienHeizeinheit, Temperaturmessung und Vakuumtechnik	4 4 5 5
	0
BrsuchsdurchführungVorbereitende Messungen2 Messung eines Mößbauerspektrums3 Meßprogramm4.3.1 Debye-Waller-Faktoren4.3.2 Natürliche Linienbreite4.3.3 Hyperfeinstrukturaufspaltung4.3.4 Quadratischer Dopplereffekt	6 6 6 7 7 7 8
gänzende Angaben ichtige Größen für den Versuch	9
	4.3.4 Quadratischer Dopplereffekt

1 Einleitung und Zielsetzung des Versuchs

Der Mößbauereffekt gehört zu den vielschichtigsten Experimenten im Fortgeschrittenenpraktikum. Er vereint Elemente aus der Kern- und Festkörperphysik und setzt fundiertes Wissen über physikalische Grundlagen voraus.

Im Jahr 1958 berichtete Rudolf L. Mößbauer erstmalig über den später nach ihm benannten Effekt der rückstoßfreien Gammaemmission. Für diese Entdeckung wurde ihm im Herbst 1961 der Nobelpreis verliehen. Mößbauer wies nach, daß Atomkerne Strahlung emittieren und absorbieren können, ohne daß die Energie der Gammaquanten durch Rückstoß- oder Anregungseffekte beeinflußt wird. Die Energie der Strahlung entspricht daher sehr exakt der Energie des zugrundeliegenden Übergangs im Atomkern. Im Falle des Eisenisotopes 57 Fe ist die Energieunschärfe ΔE 13 Größenordungen geringer als die Übergangsenergie E. Der Mößbauereffekt stellt somit ein spektroskopisches Verfahren zur Erzeugung und Detektion von extrem schmalbandiger Gammastrahlung dar. Wegen dieser extremen Energieschärfe können sehr geringe Unterschiede zwischen der Festkörperumgebung der Quelle und des Absorbers untersucht werden. Es lassen sich also Eigenschaften der Matrix, in welche die Mößbaueratome eingebaut sind, bestimmen. Weiterhin findet der Effekt seine Anwendung bei der Untersuchung diverser kernphysikalischer Eigenschaften, wie z.B. der Bestimmung von Lebensdauern, magnetischen Momenten etc. Das hochgenaue energetische Auflösungsvermögen erlaubt es außerdem, prinzipielle physikalische Fragen, wie z.B. die Rotverschiebung elektromagnetischer Strahlung im Gravitationsfeld (der Erde) experimentell zu bestätigen.

Dieser Versuch soll mit den physikalischen und meßtechnischen Grundlagen des Mößbauereffektes sowie typischen Anwendungen vertraut machen. Dazu sollen folgende Effekte untersucht werden:

- (a) Bestimmung der Debye-Waller-Faktoren von Quelle und Absorber
- (b) Bestimmung der natürlichen Linienbreite
- (c) Untersuchung der Hyperfeinstruktur des ferromagnetischen ⁵⁷Fe bei Raumtemperatur
- (d) Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des Magnetfeldes am Ort des ⁵⁷Fe-Kerns von Atomen im ferromagnetischen Gitter zwischen Raumtemperatur und Curietemperatur
- (e) Untersuchung des quadratischen Terms des relativistischen Dopplereffektes als temperaturabhängige Verschiebung der Mößbauerlinien

2 Vorkenntnisse

2.1 Physikalische Grundlagen

Als physikalische Grundlagen werden das Wissen um elektromagnetische Wellen, deren Abstrahlung und Frequenzbreite vorausgesetzt. Zum Verständnis des Mößbauereffekts ist die Kenntnis der Heisenbergschen Unschärferelationen notwendig. Hieraus lassen sich Rückschlüsse auf die minimale Linienbreite emittierter Gammastrahlung ziehen.

Für den Versuch spielt der Zerfall von ⁵⁷Co in ⁵⁷Fe eine wichtige Rolle. Viele Eigenschaften der Mößbauerquelle ergeben sich also aus grundlegenden Zuhammenhängen radioaktiver Zerfälle. Im Versuchsverlauf werden auch Magnetfelder vermessen. Insbesondere die Temperaturabhängigkeit der spontanen Magnetisierung sollte erklärt werden können.

Weiterhin wird die Wechselwirkung magnetischer Felder mit magnetischen Momenten in der Quantenmechanik angesprochen.

2.2 Mößbauereffekt

Der Mößbauereffekt ist keine Eigenschaft jedes Kristallgitters mit eingebetteten Gammastrahlern. Gammaspektren sind stark von der Art der molekularen Bindung eines Gammastrahlers abhängig. Verschiedene Effekte, die, abhängig von der Bindung des Stahlers, Einfluß auf dessen Spektrum haben, sollten bekannt sein.

Die quantitative Beschreibung des Mößbauereffekts in einem Festkörper geschieht über den Debye-Waller-Faktor [11](Kap. I). Die Kenntnis der Aussagen des Debye-Waller-Faktors über Quelle und Absorber wird vorausgesetzt.

2.3 Beeinflussung des Mößbauerspektrums durch verschiedene Effekte

In dem Versuch treten drei verschiedene Effekte auf, die Einfluß auf Form und Position des Mößbauerspektrums haben. Dies sind die Isomerieverschiebung, die magnetische Hyperfeinwechselwirkung und der quadratische Dopplereffekt [11](Kap. V). Diese Effekte sollten bekannt sein und, im Falle der Hyperfeinwechselwirkung und des quadratischen Dopplereffekts, auch durch die formalen physikalischen Zusammenhänge beschrieben werden. Ein weiterer Effekt, die elektrische Quadrupolaufspaltung, ist hier von nachrangiger Bedeutung.

2.4 Geräte und Versuchsaufbau

Die Kenntnis des Versuchsaufbaus und der Meßmethodik ist Grundvoraussetzung für die Durchführung des Versuchs (vgl. Abschnitt 3). Die Detektion der Gammastrahlung erfolgt mit einem NaJ-Szintillationsdetektor. Aufgrund der für den Betrieb nötigen Hochspannung und der damit verbundenen Gefahren ist die Kenntnis über den Aufbau und die Funktionsweise des Detektors nötig. Im temperaturabhängigen Teil des Versuchs wird ein sehr gutes Vakuum benötigt. Zu dessen Erzeugung kommt eine Turbomolekularpumpe zum Einsatz. Kernstück dieser Pumpe ist ein ultraschnelldrehender Rotor, weshalb die Pumpe im Betrieb sehr empfindlich ist. Also sind auch Basiskenntnisse von Vakuumtechnologie zur Gewährleistung der Sicherheit während der Versuchsdurchführung erforderlich.

3 Versuchsaufbau

3.1 Antrieb und Auslese



Abbildung 1: Aufbau zur Messung des Mößbauereffekts

Im Rahnen dieses Versuches soll mit Hilfe des Mößbauereffektes das 14,4 keV-Kernniveau des Eisenisotops ⁵⁷Fe untersucht werden. Der prinzipielle Aufbau des Versuchs ist in Abb. 3 dargestellt. Quelle, Absorber und Detektor befinden sich dabei auf einer Linie, wobei die Quelle mit verschiedenen Geschwindigkeiten bezüglich des Absorbers bewegt wird [11](Kap. I). Durch den hierbei auftretenden Dopplereffekt "sieht" der Absorber die von der Quelle emittierten Gammaquanten mit leicht verschobener Frequenz. Ist diese Frequenz deckungsgleich mit der/einer Resonanzfrequenz der Absorberkerne, können die Gammaquanten von diesen absorbiert werden. Mit einem Szintillationszähler wird hinter dem Absorber die Anzahl von transmittierten Gammaquanten gemessen.

Die Signale des Szintillationsdetektors werden verstärkt und anschließend mit einem Analog-Digital-Converter (ADC) verarbeitet. Der ADC wandelt die Spannungspulse aus dem Verstärker in Rechtecksignale um. Außerdem bietet er die Möglichkeit eine obere und untere Schranke für die Höhe der verstärkten Szintillatorpulse zu setzen. Auf diese Weise werden dann nur Pulse durchgelassen, die ungefähr der Energie der 14,4 keV Gammaquanten entsprechen. Man reduziert dadurch die Untergrundzählrate.

Die Einstellung der Schwellen erfolgt unter Zuhilfenahme eines Multi-Channel-Analysers (MCA). Dieses Gerät erhält die Information über die Signalhöhe in digitaler Form vom ADC. Ausgelesen wird der MCA von einem Computer, welcher direkt das Spektrum so darstellt, wie es vom ADC gesehen wird.

Die Geschwindigkeit der Quelle wird von einer Antriebsregelung kontrolliert. Diese Regelung gibt außerdem Signale aus, die benutzt werden können, um die aktuelle Geschwindigkeit extern auszulesen. Der Antrieb erfolgt über einen modifizierten Lautsprecher, der statt einer Membran die Quelle bewegt. Die Maximalgeschwindigkeit $|v_{max}|$ ist an der Antriebsregelung stufenlos variierbar. Zu beachten ist, daß der Wert an der Regelung mit 1,5 mm/s zu multiplizieren ist, um die tatsächliche Geschwindigkeit zu erhalten.

Die eigentliche Vermessung des Mößbauerspektrums erfolgt mittels eines Vielkanalspeichers. Dieser Interpretiert die Geschwindigkeitssignale aus der Antriebsregelung und sortiert eingehende Rechteckimpulse aus dem ADC in einen zur aktuellen Geschwindigkeit gehörenden Speicherkanal. Es stehen 512 Kanäle zur Verfügung. Jeder Kanal entspricht also einer Geschwindigkeit zwischen $-v_{max}$ und $+v_{max}$. Zur Auslese des Vielkanalspeichers wird der MCA, der ursprünglich an den ADC angeschlossen war, nun an den Vielkanalspeicher angeschlossen.

3.2 Absorberfolien

Für den temperaturunabhängigen Teil des Versuchs stehen fünf Folien zur Verfügung:

- 4 nicht ferromagnetische Edelstahlfolien (74% Fe, 18% Cr, 8% Ni) in den Dicken 5, 10, 15 und 25µm,
- sowie eine Folie aus metallischem Eisen, die mit dem Isotop $^{57}{\rm Fe}~(1,9\,{\rm mg/cm^3})$ angereichert ist.

Der temperaturabhängige Teil wird mit einer Folie aus reinem ⁵⁷Fe durchgeführt.

3.3 Heizeinheit, Temperaturmessung und Vakuumtechnik

Die ⁵⁷Fe Folie ist auf einem Ofen aufgespannt, der Temperaturen von über 850 K erzeugen kann. Geheizt wird mit elektrischem Strom. Die maximale Stromstärke liegt hierbei bei ca. 2 A. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem Chromel-Alumel-Thermoelement (vgl. Anhang B), dessen eine Verbindung sich im Ofen in der Nähe der Absorberfolie befindet. Als Referenztemperatur an der zweiten Verbindung dient Eiswasser. Die Thermospannung wird mit einem Digitalvoltmeter gemessen und die Temperatur mittels Kalibriertabelle bestimmt.

Um die sehr teure isotopenreine Eisenfolie for Korrosion zu schützen werden Folie und Ofen im Vakuum beheizt. Das Vakuum sollte während der gesamten Zeit besser als 5×10^{-5} mbar sein. Steigt während des Heizvorgangs der Druck zu sehr, muß der Vorgang für eine Weile unterbrochen werden, bis eine Druckminderung sichtbar wird.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Vorbereitende Messungen

Der MCA wird an den ADC angeschlossen. Quelle und Szintillationszähler sollten einen ausreichend hohen Abstand ($\leq 10 \text{ cm}$) zueinander haben, damit eine ausreichende Auflösung des Gammaspektrums der Quelle gemessen werden kann. Nach der Positionierung von Quelle, Absorber und Detektor durch den Betreuer, wird das Gammaspektrum der Quelle mit dem Computer aufgenommen. Hierzu wird in der Software eine Spektrenbreite von 8196 Kanälen gewählt. Sobald der 14,4 keV Peak des Mößbauerübergangs erkennbar wird, kann mit dem ADC ein Fenster um diesen Peak eingestellt werden.

4.2 Messung eines Mößbauerspektrums

Der MCA wird nun an den Vielkanalspeicher angeschlossen und in der Software eine Spektenbreite von 512 Kanälen gewählt. Je nach Alter der Quelle dauert die Aufnahme eines Spektrums zwischen 30 und 60 Minuten. Beispiele für mögliche Spektren sind in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Einflüsse verschiedener Effekte auf das Mößbauerspektrum

4.3 Meßprogramm

Während der folgenden Auswertungen ist häufig die Umrechnung der Kanäle der Mößbauerspektren in die dazugehörigen Energiedifferenzen durchzuführen. Dazu ist prinzipiell die Formel für den relativistischen Dopplereffekt (vgl. Beweis in [11](Kap. V, D)

$$\omega = \omega_0 \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c}} \tag{1}$$

zu benutzen. Aufgrund der geringen Relativgeschwindigkeit v zwischen Quelle und Absorber darf der relativistische Gammafaktor, der für die korrekte Behandlung der Zeitdilatation verantwortlich ist, zu "1"gesetzt werden. Außerdem ist eine Entwicklung des Bruchs

$$\frac{1}{1-x} \approx 1+x \tag{2}$$

zulässig. Es ist darauf zu achten, daß alle Größen auf der rechten Seite von Geichung 1 im Bezugsystem der Quelle gültig sind, also insbesondere das Vorzeichen der Geschwindigkeit invertiert ist.

4.3.1 Debye-Waller-Faktoren

Für die Messung der Debye-Waller-Faktoren von Quelle und Absorber, sowie der natürlichen Linienbreite werden Spektren mit den 4 Edelstahlfolien aufgenommen. Die Debye-Waller-Faktoren können aus der Formel für die relative Zählratendifferenz,

$$\varepsilon \equiv \frac{Z(v \ll v_{res}) - Z(v_{res})}{Z(v \ll v_{res})} = f \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{2}n\beta f'\sigma_0 d} \cdot \mathcal{J}_0 \left(i \cdot \frac{1}{2}n\beta f'\sigma_0 d \right) \right]$$

$$= f \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{2}n\beta f'\sigma_0 d} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{2}n\beta f'\sigma_0 d\right)^{2k}}{4^k \cdot k!^2} \right],$$
(3)

 mit

d : Foliendicke

- n : Teilchendichte
- $\beta~$: Isotopenhäufigkeit
- σ_0 : spezifischer Wirkungsquerschnitt

f: Debye-Waller-Faktor der Quelle

- f': Debye-Waller-Faktor des Absorbers
- \mathcal{J}_0 : Besselfunktion 0. Ordnung (beachte komplexes Argument!),

entnommen werden [11] (Kap. I, Ende). Bei jeder Messung ist zu überprüfen, daß der relative Fehler von ε unter 7,5 % bleibt.

4.3.2 Natürliche Linienbreite

Für die natürliche Linienbreite ergibt sich, je nach effektiver Absorberdicke $T \equiv f' n \beta \sigma_0 \cdot d$, ein linearer oder quadratischer Zusammenhang [3](Kap. 3-52).

$$\frac{\Gamma_{app}}{\Gamma_{nat}} = 2,00 + 0,27T \qquad 0 \le T \lesssim 5$$

$$\frac{\Gamma_{app}}{\Gamma_{nat}} = 2,02 + 0,29T - 0,005T^2 \quad 4 \lesssim T \lesssim 10.$$

Dieser Zusammenhang ist mit den genommenen Daten zu überprüfen. Dazu sollen die Daten gemäß einer dieser beiden Formeln gefittet und die ensprechenden Fitparameter mit den hier gegebenen Konstanten verglichen werden. Weiterhin ist über die Extrapolation des Fits auf die *y*-Achse die natürliche Linienbreite zu bestimmen. Dabei muß darauf geachtet werden, ob bei der Bestimmung der Linienbreiten die volle oder halbe Linienbreite ermittelt wurde. Dies muß in die Berechnung von Γ_{nat} einfließen und hat außerdem Einfluß auf die Steigung der Fitfunktion.

4.3.3 Hyperfeinstrukturaufspaltung

Zur temperaturabhängigen Messung von Hyperfeinstruktur und quadratischem Dopplereffekt wird die Aparatur vom Betreuer so umgebaut, daß die Folie im Vakuum als Absorber dient.

Außerdem erklärt der Betreuer die Geräte zur Kontrolle des Drucks. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß während der Heizphase der Druck nicht über 5×10^{-5} mbar steigen sollte.

Es werden nun Spektren mit Hyperfeinstrukturaufspaltung bei Raumtemperatur und bei verschiedenen höheren Temperaturen vermessen. Aus den Spektren lassen sich das magnetische Moment des angeregten Zustands und das Magnetfeld am Kernort berechnen. Mit Erhöhung der Temperatur ändern sich die Abstände der Hyperfeinstrukturlinien zueinander, aber auch der Schwerpunkt des Spektrums. Aus dem Verlauf des Magnetfeldes mit der Temperatur läßt sich die Curietemperatur extrapolieren [11](Kap. VII, Bsp. 5). Leider kann im Versuch die Curietemperatur nicht erreicht werden. Zum Fitten der Meßpunkte eignet sich die Funktion

$$B(T) = p_1 + \frac{p_2}{T - p_3} \tag{4}$$

mit den drei freien Parametern p_0 , p_1 und p_2 .

4.3.4 Quadratischer Dopplereffekt

Die Taylorentwicklung des reziproken Gammafaktors in Gleichung 1

$$\sqrt{1-x^2} \approx 1 - \frac{x^2}{2} \tag{5}$$

liefert einen quadratischen Term, der das gemessene Mößbauerspektrum systematisch verschiebt:

$$\omega \approx \omega \left(v \right) + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \omega \left(v \right), \tag{6}$$

mit

$$\omega\left(v\right) = \frac{\omega_0}{1 - \frac{v}{c}}.$$

Die dafür verantwortliche Geschwindigkeit v ist nun Ergebnis der im Kristallgitter schwingenden Atomkerne und ist vielmehr eine Geschwindigkeitsverteilung um die mittlere Geschwindigkeit v = 0. Mithilfe des Spektrenschwerpunkts kann der Einfluß des quadratischen Dopplereffekts grafisch dargestellt werden. Die quantitative Behandlung der Verschiebung des Spektrums wird in [11](Kap. V, Abschn. D) durchgeführt. Man erhält den linearen Zusammenhang

$$\frac{\partial \omega}{\partial T} = -\omega_0 \frac{c_{\text{Mol}}(T)}{2N_A M}.$$
(7)

 ω_0 ist die unverschobene Frequenz der emittierten Gammaquanten, M die Masse des ⁵⁷Fe-Kerns im Grundzustand und N_A die Avogadrozahl. Die spezifische molare Wärme c_{Mol} darf wegen der ausreichend hohen Temperatur hier mithilfe der Regel von Dulong-Petit berechnet werden.

5 Ergänzende Angaben

Zum Verständnis der Vermessung der Hyperfeinstrukturaufspaltung und des quadratischen Dopplereffekts ist die Lektüre des Originaldokuments von R. S. Preston et al. [9] sehr hilf-reich! Weiterführende Angaben können im Internet gefunden werden. Hierzu werden folgende Internetseiten empfohlen:

- http://astro.uni-wuppertal.de/~atepe/
- http://www.physik.uni-wuppertal.de/Studium/Lehrveranstaltungen/Praktika/FP/

A Wichtige Größen für den Versuch

(Aus [11] und [12])

Lichtgeschwindigkeit	$c = 299792458 \mathrm{m/s}$
Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6,62606896(33) \times 10^{-34} \mathrm{Js}$
	$\hbar = 1,054571628(53) \times 10^{-34} \mathrm{Js}$
Ladung des Elektrons	$e = 1,602176487(40) \times 10^{-19} \mathrm{C}$
Masse des Protons	$m_p = 1,672621637(83)\times 10^{-27}{\rm kg}$
Kernmagneton	$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 3,1524512326(45) \times 10^{-14} \mathrm{MeV/T}$
Avogadrozahl	$N_A = 6,02214179(30) \times 10^{23} \mathrm{mol}^{-1}$
Boltzmannkonstante	$k_B = 1,3806504(24) \times 10^{-23} \mathrm{J/K}$
magn. Mom. d. $^{57}\mathrm{Fe}\text{-}\mathrm{Grundzustandes}$	$\mu_g = 0,0903\mu_N$
Dichte von Eisen	$\varrho({\rm Fe})=7,874{\rm g/cm^3}$
Atommasse von Eisen	$M_A({ m Fe}) = 55,845{ m g/mol}$
⁵⁷ Fe-Isotopenhäufigkeit	$\beta=2,17\%$
Wirkungsquerschnitt	$\sigma_0 = 2,26 \times 10^{-18} \mathrm{cm}^2$
Halbwertsdauer von $^{57}\mathrm{Co}$	$t_{1/2}(Co) = 271,79 d$
Frequenzverschiebung	$-\frac{\partial\omega}{\partial T}\frac{1}{\omega_0}=2,4\times10^{-15}\mathrm{K}^{-1}$

B Spannungstabelle für Chromel-Alumel-Thermoelement

Spannungstabelle für Thermoelemente Typ K (Ni-Cr / Ni-Al) gem. EN 60584 [4] Temperaturbereich: -100 °C... + 1370 °C alle Spannungswerte in mV, Vergleichstellentemperatur: 0 °C

$T (^{\circ}C)$	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0
-100	-3,55	-3,24	-2,92	-2,59	-2,24	-1,89	-1,53	-1,16	-0,78	-0,39	0,00
$T (^{\circ}C)$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,00	$0,\!40$	0,80	1,20	$1,\!61$	2,02	$2,\!44$	2,85	3,27	$3,\!68$	4,10
100	$4,\!10$	4,51	4,92	$5,\!33$	5,74	$6,\!14$	$6,\!54$	$6,\!94$	$7,\!34$	7,74	8,14
200	8,14	8,54	$8,\!94$	$9,\!34$	9,75	$10,\!15$	$10,\!56$	10,97	$11,\!38$	$11,\!80$	$12,\!21$
300	12,21	$12,\!62$	$13,\!04$	$13,\!46$	$13,\!87$	$14,\!29$	14,71	$15,\!13$	$15,\!55$	$15,\!98$	$16,\!40$
400	$16,\!40$	$16,\!82$	$17,\!24$	$17,\!67$	18,09	$18,\!52$	$18,\!94$	19,37	19,79	20,22	$20,\!64$
500	$20,\!64$	21,07	$21,\!50$	21,92	$22,\!35$	22,78	$23,\!20$	$23,\!63$	24,06	$24,\!48$	24,91
600	24,91	$25,\!33$	25,76	$26,\!18$	$26,\!60$	27,03	$27,\!45$	$27,\!87$	28,29	28,71	$29,\!13$
700	29,13	$29,\!55$	29,97	30,38	$30,\!80$	31,21	$31,\!63$	32,04	$32,\!45$	$32,\!87$	$33,\!28$
800	$33,\!28$	$33,\!69$	34,09	$34,\!50$	34,91	35,31	35,72	36, 12	36,52	36,93	$37,\!33$
900	$37,\!33$	37,73	38,12	38,52	38,92	39,31	39,71	40,10	40,49	40,89	41,28
1000	41,28	$41,\!67$	42,05	$42,\!44$	42,83	$43,\!21$	$43,\!60$	$43,\!98$	44,36	44,74	$45,\!12$
1100	45,12	$45,\!50$	$45,\!87$	$46,\!25$	$46,\!62$	47,00	$47,\!37$	47,74	48,11	$48,\!47$	$48,\!84$
1200	48,84	49,20	$49,\!57$	49,93	50,29	$50,\!64$	$51,\!00$	$51,\!36$	51,71	52,06	$52,\!41$
1300	$52,\!41$	52,76	$53,\!11$	$53,\!45$	$53,\!80$	54, 14	$54,\!48$	$54,\!82$			

Literatur

- S. Buch. Einführung in die allgemeine Vakuumtechnik. Wiss. Verl.-Ges., Stuttgart, 1962. UBW: 73 UBU1052.
- [2] S. Dushman. Scientific foundations of vacuum technique. American Journal of Physics, 30(8):612–612, Aug 1962. UBW: 73 UBU1094(2)+1.
- [3] H. Frauenfelder. The Mössbauer effect. Benjamin, New York, 1963. UBW: 91 UHP1441, 91 UHP1441+1 bis 4, 73 UHW1129+1.
- [4] E.-M. GmbH. Spannungstabelle für Thermoelemente Typ K (Ni-Cr / Ni-Al). http://www.ephy-mess.de/deutsch/daten/tekd.pdf.
- [5] H. E. Hall. Solid state physics. Wiley, London [u.a.], 1974. UBW: 73 UIM1416.
- [6] C. Kittel. Einführung in die Festkörperphysik. Oldenbourg, München [u.a.], 2006. UBW: 73 UIM1131(14)+1 bis 14.
- [7] W. Klose. Kleine Einführung in die moderne Festkörperphysik. Bertelsmann-Univ.-Verl., Düsseldorf, 1974. UBW: 73 UIM1246.

- [8] A. C. Melissinos. Experiments in modern physics. Academic Press, New York [u.a.], 1966. UBW: 05 ZZV549935, 91 UAP1794+1 bis 5.
- [9] R. S. Preston, S. S. Hanna, and J. Heberle. Mössbauer effect in metallic iron. *Phys. Rev.*, 128(5):2207-2218, Dec 1962. http://prola.aps.org/pdf/PR/v128/i5/p2207_1
 http://astro.uni-wuppertal.de/~atepe/dateien/PhysRev128.pdf.
- [10] W. Pupp. Vakuumtechnik. Thiemig, München, 2. aufl. edition, 1972. UBW: 73 UBU1002(2), 73 UBU1002(2)+1, 85 UBU1002(2)+2.
- H. Wegener. Der Mößbauereffekt und seine Anwendung in Physik und Chemie. Bibliographisches Institut AG, Mannheim, 1965. UBW: 73 UHW1137(2), 91 UAP2392(2)+1 bis 5, 73 ULK1002(2), 61 UHW1137(2)+1.
- [12] W.-M. Yao, C. Amsler, D. Asner, R. Barnett, J. Beringer, P. Burchat, C. Carone, C. Caso, O. Dahl, G. D'Ambrosio, A. DeGouvea, M. Doser, S. Eidelman, J. Feng, T. Gherghetta, M. Goodman, C. Grab, D. Groom, A. Gurtu, K. Hagiwara, K. Hayes, J. Hernández-Rey, K. Hikasa, H. Jawahery, C. Kolda, K. Y., M. Mangano, A. Manohar, A. Masoni, R. Miquel, K. Mönig, H. Murayama, K. Nakamura, S. Navas, K. Olive, L. Pape, C. Patrignani, A. Piepke, G. Punzi, G. Raffelt, J. Smith, M. Tanabashi, J. Terning, N. Törnqvist, T. Trippe, P. Vogel, T. Watari, C. Wohl, R. Workman, P. Zyla, B. Armstrong, G. Harper, V. Lugovsky, P. Schaffner, M. Artuso, K. Babu, H. Band, E. Barberio, M. Battaglia, H. Bichsel, O. Biebel, P. Bloch, E. Blucher, R. Cahn, D. Casper, A. Cattai, A. Ceccucci, D. Chakraborty, R. Chivukula, G. Cowan, T. Damour, T. DeGrand, K. Desler, M. Dobbs, M. Drees, A. Edwards, D. Edwards, V. Elvira, J. Erler, V. Ezhela, W. Fetscher, B. Fields, B. Foster, D. Froidevaux, T. Gaisser, L. Garren, H.-J. Gerber, G. Gerbier, L. Gibbons, F. Gilman, G. Giudice, A. Gritsan, M. Grünewald, H. Haber, C. Hagmann, I. Hinchliffe, A. Höcker, P. Igo-Kemenes, J. Jackson, K. Johnson, D. Karlen, B. Kayser, D. Kirkby, S. Klein, K. Kleinknecht, I. Knowles, R. Kowalewski, P. Kreitz, B. Krusche, Y. Kuyanov, O. Lahav, P. Langacker, A. Liddle, Z. Ligeti, T. Liss, L. Littenberg, L. Liu, K. Lugovsky, S. Lugovsky, T. Mannel, D. Manley, W. Marciano, A. Martin, D. Milstead, M. Narain, P. Nason, Y. Nir, J. Peacock, S. Prell, A. Quadt, S. Raby, B. Ratcliff, E. Razuvaev, B. Renk, P. Richardson, S. Roesler, G. Rolandi, M. Ronan, L. Rosenberg, C. Sachrajda, S. Sarkar, M. Schmitt, O. Schneider, D. Scott, T. Sjöstrand, G. Smoot, P. Sokolsky, S. Spanier, H. Spieler, A. Stahl, T. Stanev, R. Streitmatter, T. Sumiyoshi, N. Tkachenko, G. Trilling, G. Valencia, K. van Bibber, M. Vincter, D. Ward, B. Webber, J. Wells, M. Whalley, L. Wolfenstein, J. Womersley, C. Woody, A. Yamamoto, O. Zenin, J. Zhang, and R.-Y. Zhu. Review of Particle Physics. Journal of Physics G, 33:1+, 2006.
- [13] J. M. Ziman. Prinzipien der Festkörpertheorie. Deutsch, Zürich [u.a.], 1975. UBW: 91 UIM3002+2 bis 8, 73 UIM3002+1.

© Andreas Tepe, August 2008