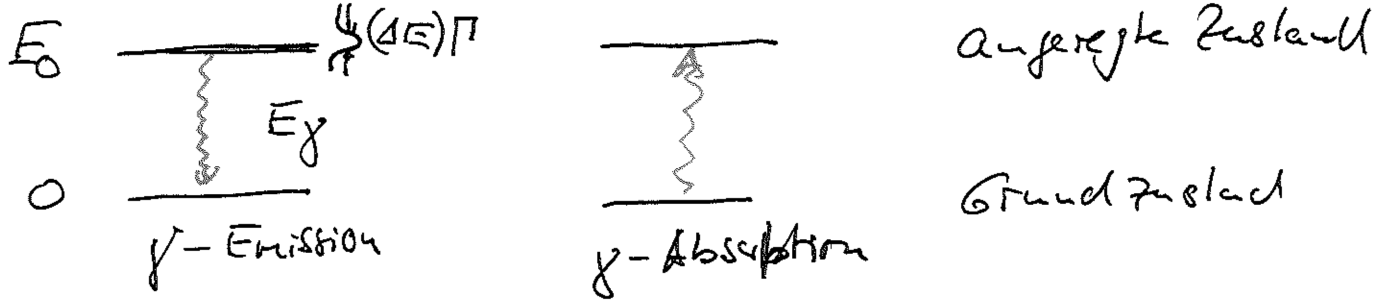
Resonanzabsorption von γ-Strahlen

Resonanzabsorption tritt im Prinzip dann auf, wenn die bei einem Zerfall eines angeregten Niveaus in den Grundzustand emittierte γ-Strahlung von Kernen der gleichen Art absorbiert wird



Prozess wird auch als Kernfluoreszenz bezeichnet

Natürliche Linienbreite $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}$, τ : Lebensdauer

$(\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar \Rightarrow \Gamma \cdot \tau \sim \hbar)$

z. Bsp für den 14,4 keV in ^{57}Fe

ist $\tau = 1{,}4 \cdot 10^{-7}\,s$

$\Rightarrow \Gamma = \frac{\hbar}{\tau} = \underline{4{,}7 \cdot 10^{-9}\,eV}$

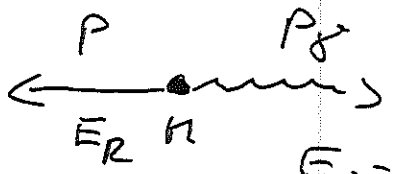
$(\hbar = 6.58 \cdot 10^{-22}\,MeVs)$

In den meisten Fällen von γ-Emission wird der Resonanzeffekt durch folgende Nebenerscheinungen beeinträchtigt.

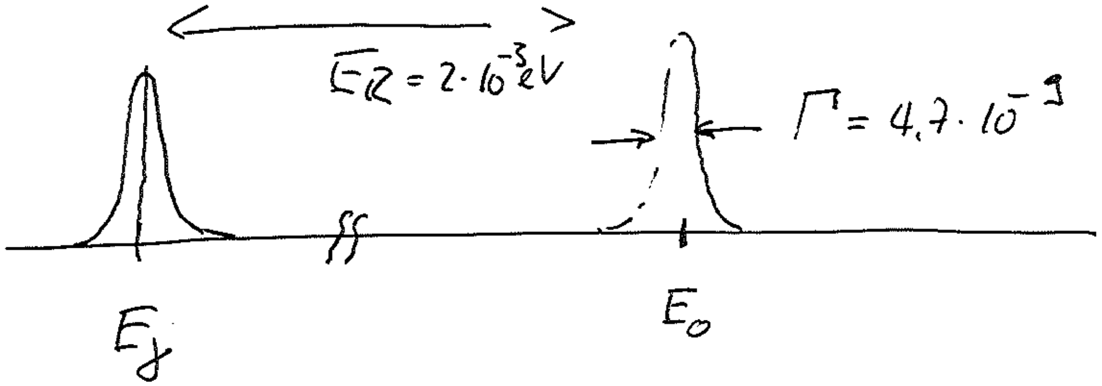
a) γ-Strahlung wird mit Energie E_γ emittiert, die kleiner als die Anregungsenergie E_0 ist

Rückstoßenergie bei Emission:

$$E_R = \frac{p^2}{2M} = \frac{E_0^2}{2Mc^2} = \underline{2 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{eV}}$$

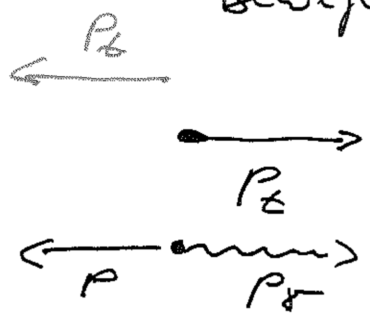


$$E_\gamma = p_\gamma c$$



$$E_\gamma = E_0 - E_R$$

b) Doppler-Effekt: Die Linie wird infolge der thermischen Bewegung der emittierenden Kerne verbreitert

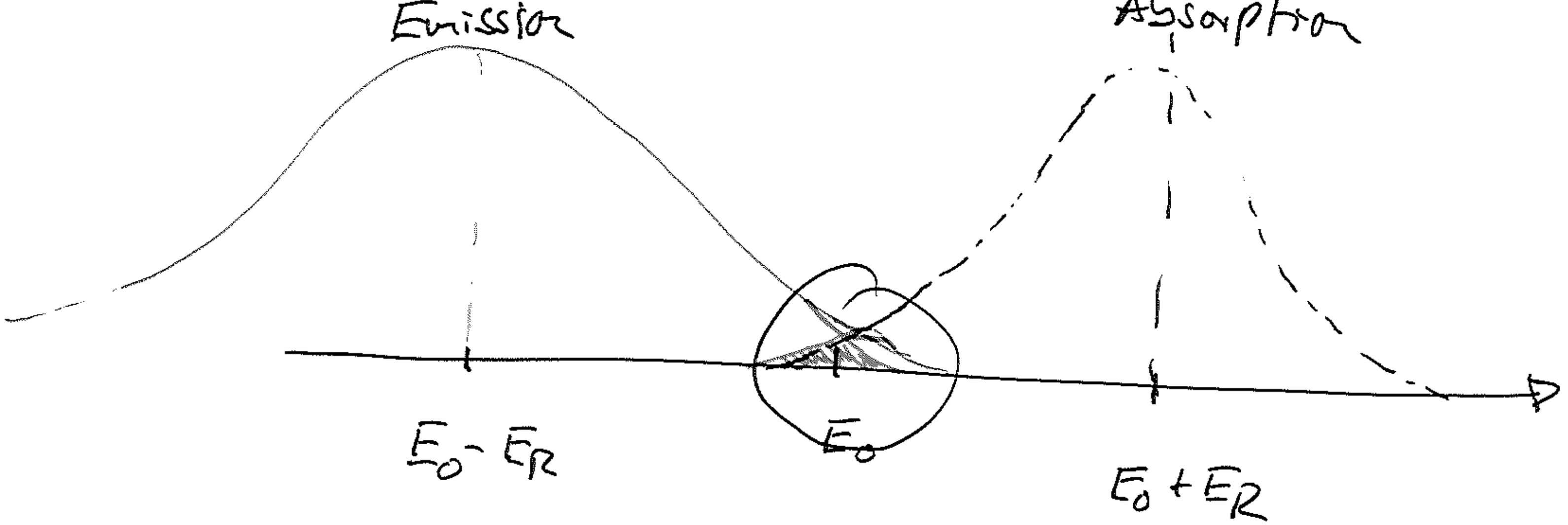


$$E_0 + \frac{p_t^2}{2M} = E_\gamma + \frac{(p_t \mp p)^2}{2M}$$

$$\Delta E = E_0 - E_\gamma = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \pm E_\gamma \frac{v_t}{c}$$

für Maxwell'sche Verteilung $\Delta T = E_0 \sqrt{\frac{2kT}{Mc^2}} \gg \Gamma$

Die gleichen Effekte treten auch bei Absorption der γ-Strahlung auf, so daß Emissions- und Absorptions-spektren folgende Form haben



Resonanzabsorption ist auf kleinen Bereich um E_0 beschränkt.

- R. L. Mößbauer (31.1.1929*, 14.9.2011†)
  Nobelpreis 1961
  Für Atome im Kristallgitter ist $\langle E_{phonon} \rangle \simeq 10^{-2}\,eV > E_R$
  „Rückstoßfreie Emission", wenn kein Phononen angeregt wird.
  Näherungsweise gilt $f = 1 - \frac{E_R}{\langle E_{phon} \rangle}$; wobei f: Wahrscheinlichkeit für rückstoßfreie Emission

Debyesche Theorie: Frequenzspektrum d. Oszillatoren mit maximaler Frequenz ω_{max}

Debye-Temperatur: $\Theta = \frac{\hbar \omega_{max}}{k}$ (k: Boltzmannkonstante)

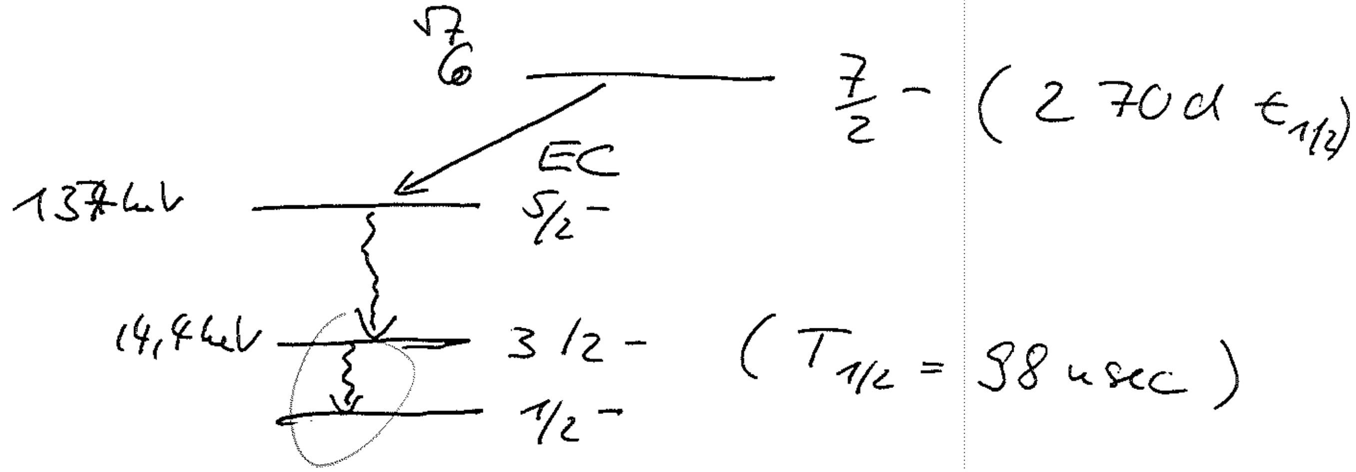
$$\Rightarrow f = \exp\left\{ - \frac{E_R}{k\Theta}\left(\frac{3}{2} + \frac{\pi^2 T^2}{\Theta^2} \right) \right\}$$ Debye-Waller-Faktor

14,4 keV Übergang von ^{57}Fe ist $f \simeq 0{,}9$ bei Zimmertemperatur

im Allg.: E_R größer $\rightarrow$ f kleiner

T größer $\rightarrow$ f kleiner

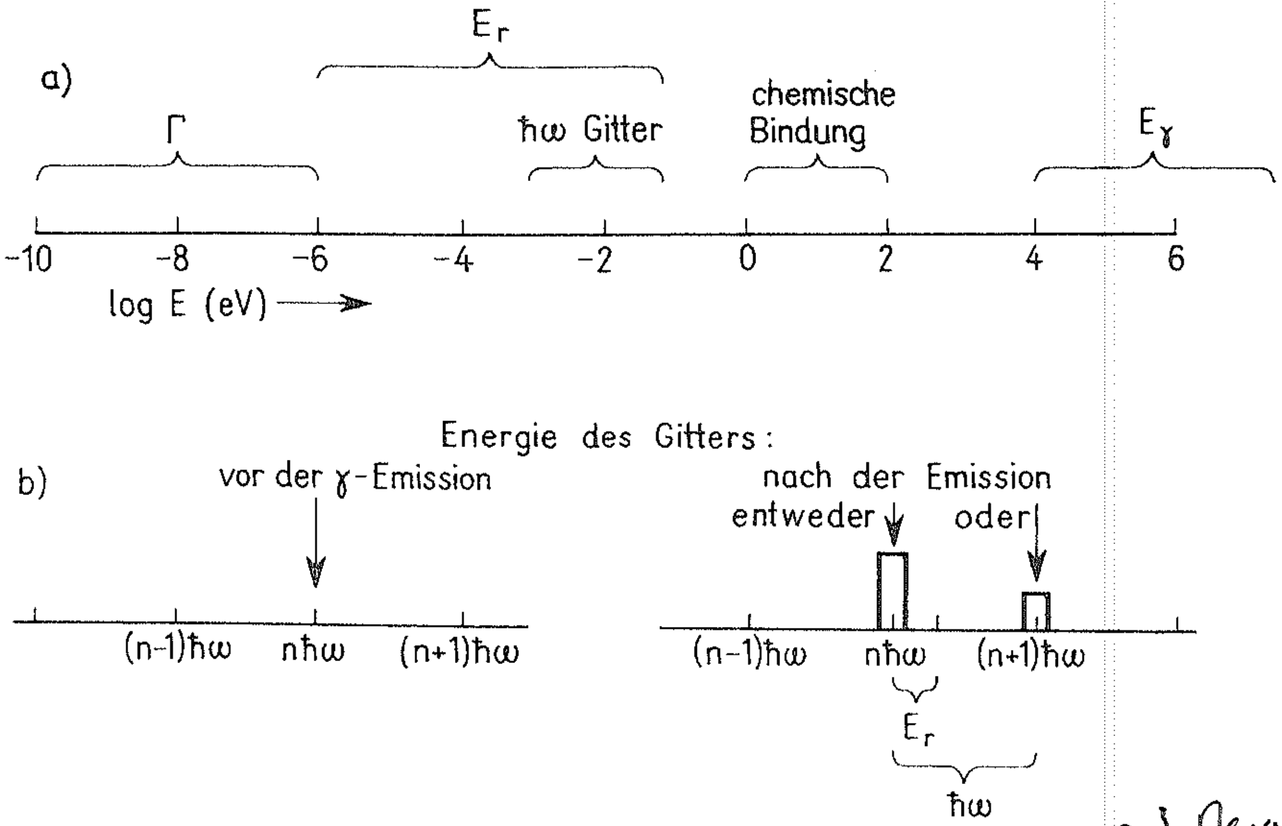
<u>Mößbauerapparatur</u>



aber $E_r < \hbar\omega$, tritt eine schwierigere Situation ein. Da die Energien der Gitterschwingungen in der Größenordnung von 10^{-2} eV liegen und wir beispielsweise bei ^{57}Fe für E_r einen Wert von $2 \cdot 10^{-3}$ eV erhalten haben, ist dieser Fall durchaus realistisch. Wir stellen uns der Einfachheit halber vor, daß im Gitter nur eine einzige Frequenz ω vorkomme (Einstein-Modell). Das Gitter kann daher seine Energie bei der Emission nur um Beträge ändern, die ganzzahlige Vielfache von $\hbar\omega$ sind. Die Aufnahme einer beliebigen Rückstoßenergie E_r ist daher gar nicht möglich. Im Einzelprozeß kann nur entweder gar keine Energie übertragen werden oder aber mindestens $\hbar\omega$. Man kann daher lediglich die quantenmechanische Wahrscheinlichkeit dafür angeben, daß der eine oder andere Fall eintritt. Wenn gar keine Energie übertragen wird, liegt „rückstoßfreie“ Emission vor.

1

2



aus Meyer-Kuckuk

Fig. 40a) Energiebereiche, die bei der Resonanzabsorption wichtig sind:

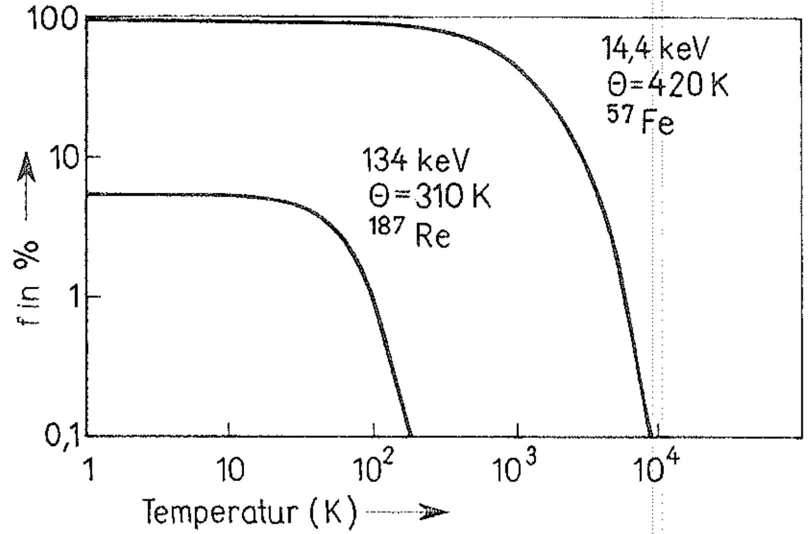
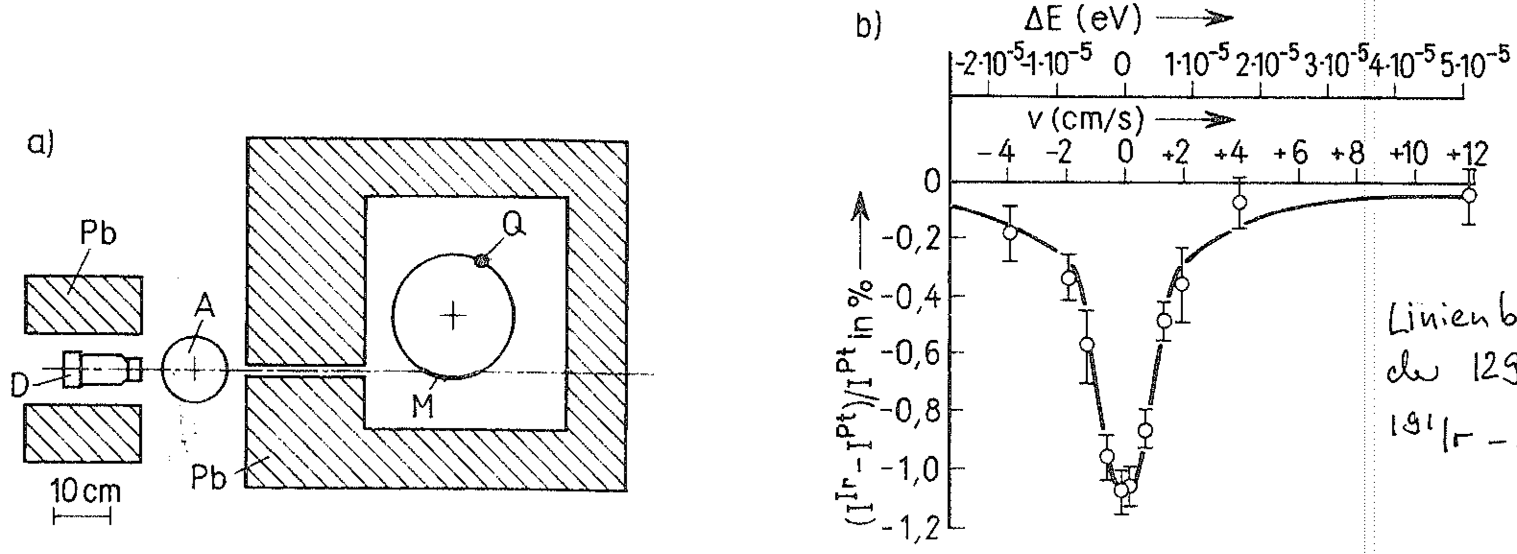


Fig. 41
Debye-Waller-Faktor für zwei typische Übergänge; aus [Mös 65]



Linienbreite der 129 keV
^{191}Ir-Linie

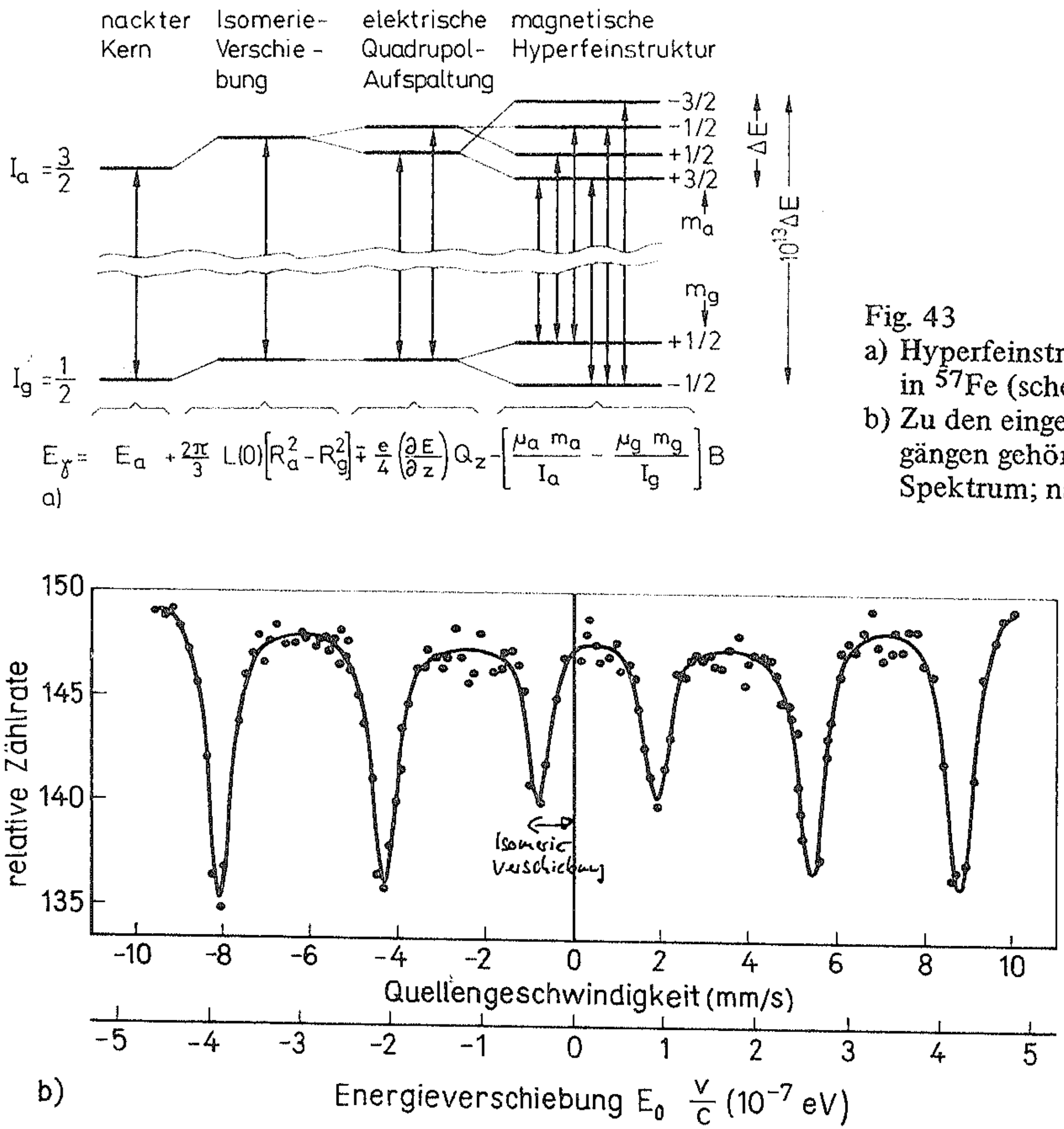


Fig. 43
a) Hyperfeinstrukturaufspaltung in ^{57}Fe (schematisch)
b) Zu den eingezeichneten Übergängen gehörendes Mößbauer-Spektrum; nach [Kis 60]

Aus Mayer-Kuckuk

Meßbare relative Breite der Mößbauerlinien

^{191}Ir : $\Gamma / E_\gamma = 3 \cdot 10^{-11}$

^{57}Fe : $\Gamma / E_\gamma = 3 \cdot 10^{-13}$

^{67}Zn : $\Gamma / E_\gamma = 5 \cdot 10^{-16}$

Anwendungen :

- Test d. allg. Relativitätstheorie (Übungsaufgabe)
- Isomerieverschiebung (chemische Verschiebung)
- Quadrupolaufspaltung :
- Magnet. Aufspaltung : Magnetfeld am Kernort
  $\Rightarrow$ magnet. Hyperfeinstruktur

Bsp: allg. Relat. Theorie:

Photon der Energie $h\nu$ hat äquiv. Masse ($E=mc^2$)
$\frac{h\nu}{c^2}$. Potentialdifferenz $\Delta\varphi$

aufgenommene Energie $\delta E =$ Masse $\cdot \Delta\varphi$

$$= \frac{h\nu}{c^2}\Delta\varphi$$

$$= \frac{h\nu}{c^2} g h$$

Höhe $d_{1/2}$ sei Höhe nach der γ-Strahlung eine Linienverschiebung von einer Halbwertsbreite erfährt:

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = 1{,}09 \cdot 10^{-18} d_{1/2} = \frac{\Gamma_0}{E}$$

$$d_{1/2} = \begin{cases} 3\,\text{km} & \text{für } ^{57}Fe \\ 4{,}8\,\underline{\text{m}} & \text{für } ^{67}Zn \end{cases}$$