

A. Atomdaten

A.1. Fein- und Hyperfeinstruktur im Magnetfeld

A.1.1. Feinstruktur-Aufspaltung

Aus der Spin-Bahn-Kopplung eines Zustandes ($\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$) ergibt sich die Zusatzenergie

$$\Delta E_{LS} = \frac{a}{2} \{J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)\}, \quad (\text{A.1})$$

wobei a die so genannte Spin-Bahn-Kopplungskonstante ist.

A.1.2. ZEEMAN-Aufspaltung / LANDEScher g-Faktor g_J

ZEEMAN-Energie der Feinstruktur-Niveaus im äußeren Magnetfeld:

$$\Delta E_{Zeeman}^{FS} = g_J m_J \mu_B B_0 \quad \text{mit} \quad g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}. \quad (\text{A.2})$$

Tabelle A.1.: Werte des LANDESchen g-Faktors

	$S_{1/2}$	$P_{1/2}$	$P_{3/2}$
g_J	2	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{3}$

Für zwei benachbarte ZEEMAN-Niveaus gilt $\Delta m_J = \pm 1$, wodurch sich ihr Energieabstand bzw. die Übergangs-Frequenz $\Delta \nu_{Zeeman}^{FS} = \Delta E_{Zeeman}^{FS} / h$ ergibt zu:

$$\Delta \nu_{Zeeman}^{FS} (\Delta m_J = 1) = g_J \frac{\mu_B}{h} B_0 \approx g_J 13,996 \frac{B_0}{\text{mT}} \text{ MHz}.$$

A.1.3. Hyperfeinaufspaltung

Durch die magnetische Wechselwirkung des Hüllmomentes $\vec{\mu}_J$ mit dem Kernmoment $\vec{\mu}_I$ und der elektrostatischen Wechselwirkung zwischen Kernen mit einem elektrischen Quadrupolmoment, d.h. nicht kugelsymmetrischer Ladungsverteilung und dem von der Hülle am Ort des Kerns erzeugten elektrischen

Tabelle A.2.: Werte des K - und M -Faktors in der Hyperfeinaufspaltung

		$S_{\frac{1}{2}}$ und $P_{\frac{1}{2}}$		$P_{\frac{3}{2}}$			
$I = \frac{1}{2}$	K	$(F=0) -\frac{3}{2}$	$(F=1) \frac{1}{2}$	$(F=1) -\frac{5}{2}$	$(F=2) \frac{3}{2}$		
$I = \frac{3}{2}$	K	$(F=1) -\frac{5}{2}$	$(F=2) \frac{3}{2}$	$(F=0) -\frac{15}{2}$	$(F=1) -\frac{11}{2}$	$(F=2) -\frac{3}{2}$	$(F=3) \frac{9}{2}$
	M			1,25	0,25	-0,75	0,25
$I = \frac{5}{2}$	K	$(F=2) -\frac{7}{2}$	$(F=3) \frac{5}{2}$	$(F=1) -\frac{21}{2}$	$(F=2) -\frac{13}{2}$	$(F=3) -\frac{1}{2}$	$(F=4) \frac{15}{2}$
	M			0,7	-0,1	-0,55	0,25
$I = \frac{7}{2}$	K	$(F=3) -\frac{9}{2}$	$(F=4) \frac{7}{2}$	$(F=3) -\frac{27}{2}$	$(F=4) -\frac{15}{2}$	$(F=5) \frac{1}{2}$	$(F=5) \frac{21}{2}$
	M			0,536	-0,179	-0,464	0,25

Feldgradienten ergibt sich die Zusatzenergie durch die Hyperfeinstruktur-Aufspaltung zu [Ari77]:

$$\Delta E_{HFS} = \Delta E_{M1} + \Delta E_{E2} = \frac{1}{2} hAK + hB \underbrace{\frac{\frac{3}{2}K(K+1) - 2I(I+1)J(J+1)}{2I(2I-1)2J(2J-1)}}_{\equiv M}, \quad (\text{A.3})$$

mit $K = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$. In Gl. A.3 sind A die magnetische Dipolkonstante und B die elektrische Quadrupolkonstante¹, welche für Zustände mit $J = \frac{1}{2}$ gleich Null ist. Für verschiedene Isotope und Feinstruktur-Zustände sind diese Größen in [Rad85] zusammen gefasst. In Tab. A.2 sind die Werte für K und M für das $S_{1/2}$ Grundniveau und die beiden ersten angeregten Niveaus $P_{1/2}$ und $P_{3/2}$ eines Alkalimetall-Atoms aufgelistet. Die entsprechenden Werte für die magnetische Dipolkonstante A und die elektrische Quadrupolkonstante B sind in Tab. A.4 aufgelistet.

A.1.4. ZEEMAN-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur / g_F -Faktor

Für geringe äußere Feldstärke B_0 , für die die ZEEMAN-Energie der Hyperfeinstruktur-Komponenten klein gegen die Hyperfeinstruktur-Aufspaltung ist, ergibt sich der ZEEMAN-Effekt der Hyperfeinstruktur. Die Aufspaltung der Hyperfein-Niveaus in je $2F+1$ ZEEMAN-Niveaus mit den magnetischen

¹Jeweils in Einheiten von Hz wie sie meistens in der Literatur angegeben werden. Deshalb ist auch in Gl. A.3 und Gl. 2.3 jeweils ein h davor im Gegensatz zu manchen Lehrbüchern.

Tabelle A.3.: Werte für den g_F -Faktor (erster Term) in der ZEEMAN-Aufspaltung der Hyperfeinstruktur

	$I = \frac{1}{2}$		$I = \frac{3}{2}$			$I = \frac{5}{2}$				$I = \frac{7}{2}$			
	$F=1$	$F=2$	$F=1$	$F=2$	$F=3$	$F=1$	$F=2$	$F=3$	$F=4$	$F=2$	$F=3$	$F=4$	$F=5$
$S_{\frac{1}{2}}$	1		$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$			$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$			$-\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	
$P_{\frac{1}{2}}$	$\frac{1}{3}$		$-\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$			$-\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$			$-\frac{1}{12}$	$\frac{1}{12}$	
$P_{\frac{3}{2}}$	$\frac{5}{3}$	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	-1	$\frac{1}{9}$	$\frac{7}{18}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	0	$\frac{4}{15}$	$\frac{2}{5}$

Quantenzahlen m_F ist gegeben durch [May85]:

$$\Delta E_{Zeeman}^{HFS} = g_F m_F \mu_B B_0 \quad (\text{A.4})$$

mit

$$g_F = g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} - g_I \frac{\mu_K}{\mu_B} \frac{F(F+1) - J(J+1) + I(I+1)}{2F(F+1)}.$$

Im ersten Term ist $g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$ der LANDEsche g-Faktor². Der zweite Term kann aufgrund von $\frac{\mu_K}{\mu_B} \approx \frac{1}{1836}$ vernachlässigt werden (Werte vgl. Tab. A.3). Die Aufspaltung der Hyperfein-Niveaus im schwachen Feld erfolgt in $2F + 1$ äquidistante Unterniveaus, deren jeweiliger Abstand proportional zum äußeren Magnetfeld ist.

² $g_J(S_{1/2}) = 2$; $g_J(P_{1/2}) = 2/3$; $g_J(P_{3/2}) = 4/3$

A.2. Alkalimetall-Daten

Tabelle A.4.: Datensammlung von Alkalimetalle, Werte grosteils aus [Rad85]

Groen	³⁹ K	⁴¹ K	⁸⁵ Rb	⁸⁷ Rb	¹³³ Cs	Einheiten	vgl.
nat. Hufigkeit	93,3	6,7	72,2	27,8	100	%	
Kernspin	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{7}{2}$	\hbar	
Kernladung Z	19		37		55	e	
gyromag. Verh. γ	12,5	6,86	25,9	87,8	35,3	MHz/T	Gl. 2.2
Schmelzpunkt	336,5		312,1		301,6	K	
Siedepunkt	1027		973		958	K	
λ_{D1} (Luft)	769,90		794,76		894,35	nm	
λ_{D2} (Luft)	766,49		780,03		852,11	nm	
nat. Lebensdauer D-Linien τ_a	26		(D1) 28,5 (D2) 26,5		31	ns	Gl. 2.7
nat. Linienbreite D-Linien $\Delta\nu_{ag}$	6,1		(D1) 5,6 (D2) 6,0		5,1	MHz	Gl. 2.7
$f_{ga}(D1)$	0,35		0,32		0,39		Gl. 2.5
$f_{ga}(D2)$	0,70		0,67		0,81		Gl. 2.5
krit. Magnetfeld $B_c(S_{1/2})$	16,5	9,1	109	244	328	mT	
$A(S_{1/2})$	230,86	127,01	1011,9	3417,3	2298,2	MHz	Gl. A.3
$\Rightarrow \Delta\nu_{HFS}(S_{1/2})$	461,72	254,01	3035,7	6834,7	9192,6	MHz	
$A(P_{1/2})$	27,8	15,2	120,7	406	292	MHz	Gl. A.3
$\Rightarrow \Delta\nu_{HFS}(P_{1/2})$	56	30	362	812	1168	MHz	
$A(P_{3/2})$	6,1	3,4	25	84,9	50,3	MHz	Gl. A.3
$B(P_{3/2})$	2,8	3,3	26	12,6	-0,4	MHz	Gl. A.3
$\Delta\nu_{Doppler}(T = 500\text{K})$	1,00		0,653		0,466	GHz	Gl. 2.10
$\Delta\nu_{Druck}(p_{N_2} = 1\text{bar})$	25		14		22	GHz	Gl. 2.16

A.3. ^{129}Xe , ^3He und Protonen DatenTabelle A.5.: Wichtige Daten der Isotope ^{129}Xe , ^3He und ^1H .

Größen	^{129}Xe	^3He	^1H	Einheiten	vgl.
nat. Häufigkeit	26,4	0,00014	99,985	%	
Kernspin: I	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	\hbar	
Kernladung: Z	54	2	1	e	
Kern-Moment: μ_I/μ_K $\mu_K \approx 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Am}^2 = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ J/T}$	-0,778	-2,128	2,793		
Kern g-Faktor: g_I	-1,556	-4,255	5,586		Gl. 2.1
gyromag. Verh.: $\gamma/2\pi$	-11,8	-32,4	42,6	MHz/T	Gl. 2.2
$P_{therm}(B_0 = 3 \text{ T}, T = 300 \text{ K})$	$\approx 3 \cdot 10^{-6}$	$\approx 8 \cdot 10^{-6}$	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$		Gl. 2.23
Selbstdiffusions-Koeff.: $D_{jj}(T = 300 \text{ K})$	0,06	1,6		$\frac{\text{cm}^2}{\text{s atm}}$	
Diffusions-Koeff.: $D_{inN_2}(T = 300 \text{ K})$	$\approx 0,09$	$\approx 0,7$		$\frac{\text{cm}^2}{\text{s atm}}$	
Preis pro Liter bei 1 atm	≈ 20	≈ 200		DM	

A.4. Spinzerstörungs- und Spinaustausch-Raten

Tabelle A.6.:

Die wichtigsten Spinzerstörungs- (k_{Alk-X}) und Spinaustausch-Raten ($k_{SEdl-Alk}$) einer optisch gepumpten Spinaustausch-Quelle (alle Raten in Einheiten von cm^3/s). Sofern nicht anders angegeben sind es experimentell bestimmte Werte.

Größen	K	Rb	Cs
k_{Alk-O_2}		$5,2 \times 10^{-10}$ [Nag98]	
$k_{Alk-Alk}$	$1,8 \times 10^{-13}$ [Chu87]	8×10^{-13} [Chu87, Lar91, Wag94] $3,9 \times 10^{-14}$ [Bar98b] $4,4 \times 10^{-14}$ [Kad98]	$7,9 \times 10^{-12}$ [Bha80b]
k_{Alk-N_2}		8×10^{-18} [Wag94] 4×10^{-18} [McN62] 5×10^{-18} [Fra76]	3×10^{-17} [Fra74]
k_{Alk-He}	2×10^{-20} [Ber65]	8×10^{-20} [Ber65] 4×10^{-19} [Fra76] $\leq 2 \times 10^{-18}$ [Wag94]	3×10^{-18} [Fra74]
k_{Alk-Xe}		5×10^{-16} [Fra59] 6×10^{-15} [Bou72]	
$k_{SEHe-Alk}$ berechnet [Wal98] ($\times 10^{-19}$) berechnet [Wal89] ($\times 10^{-19}$)	0,49 1,8	$1,2 \times 10^{-19}$ [Chu87] 6×10^{-20} [Bar98b, Lar91] 0,56 1,7	0,81 2,2
$k_{SEXe-Alk}$ berechnet [Wal98] ($\times 10^{-16}$) berechnet [Wal89] ($\times 10^{-16}$)	0,62 2,1	$3,7 \times 10^{-16}$ [Cat92] 1,2 3,1	2,7 4,7