

Physik III Atom- und Quantenphysik

Kapitel 9: Feinstruktur und Hyperfeinstruktur

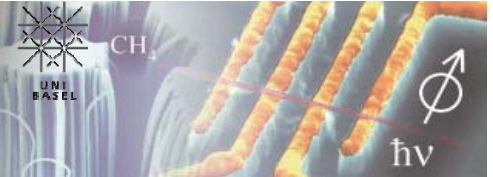
Prof. Dr. Christian Schönenberger
www.nanoelectronics.ch

basierend auf der Vorlesung von
Prof. Dr. Philipp Treutlein
<http://atom.physik.unibas.ch>

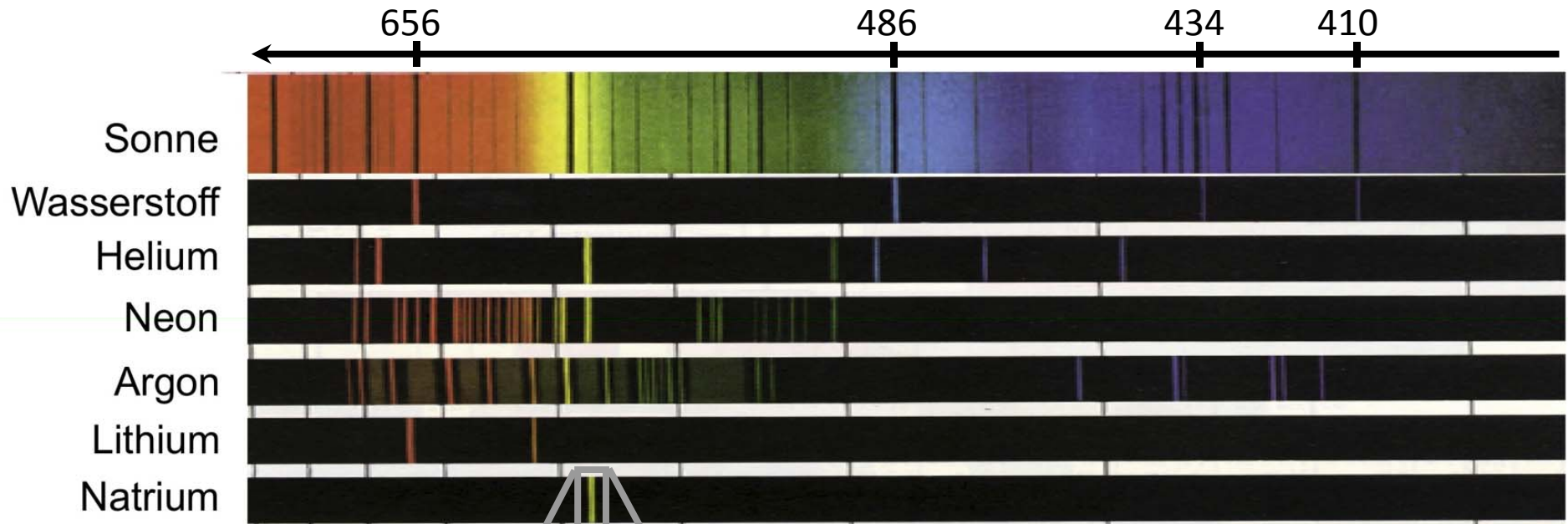


Feinstruktur der Na D-Linie

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

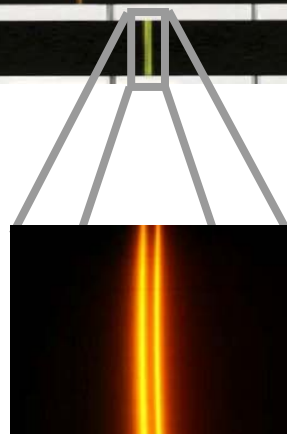


Wellenlänge [nm]



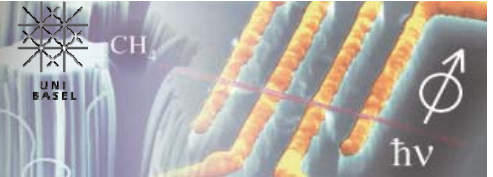
D1-Linie: 589.59 nm

D2-Linie: 588.96 nm



Zahlreiche weitere Linien von Wasserstoff und Alkali-Atomen weisen ebenfalls eine Dublett-Struktur auf

Gesamtdrehimpuls LS-Kopplung



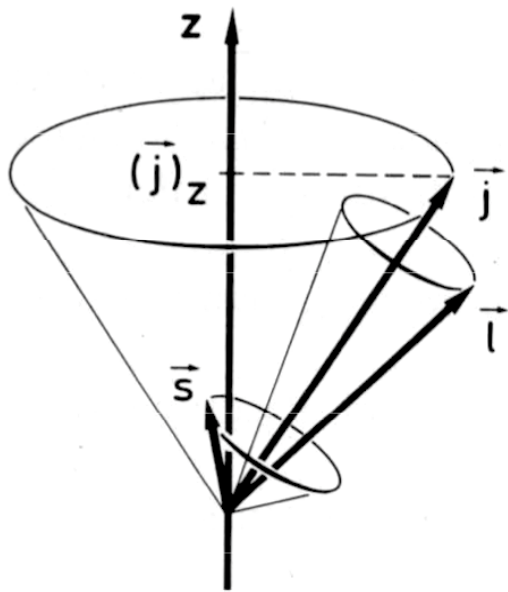
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

Gesamtdrehimpuls: $\hat{\mathbf{J}} = \hat{\mathbf{L}} + \hat{\mathbf{S}}$

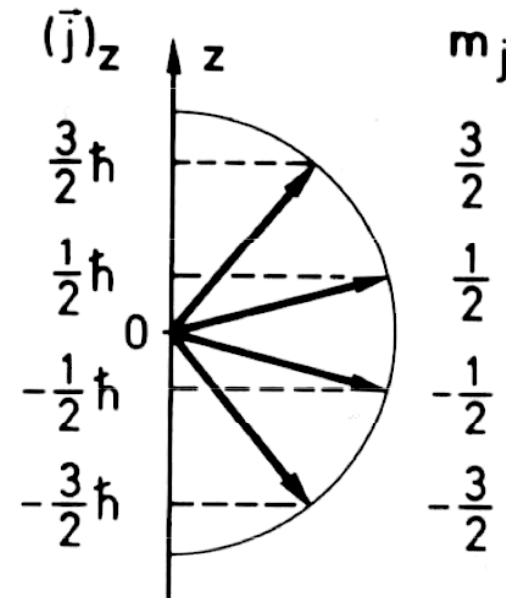
Eigenwerte: $|\mathbf{J}| = \hbar\sqrt{j(j+1)}$ mit $j = |l \pm 1/2|$ da $s = 1/2$

$$J_z = \hbar m_j = \hbar(m_l + m_s) \quad m_j = -j, -j+1 \dots j-1, j$$

anschaulich: \mathbf{L} und \mathbf{S} präzedieren um den von ihnen aufgespannten Vektor \mathbf{J}



Bsp.: $l = 2, s = 1/2, j = 5/2$

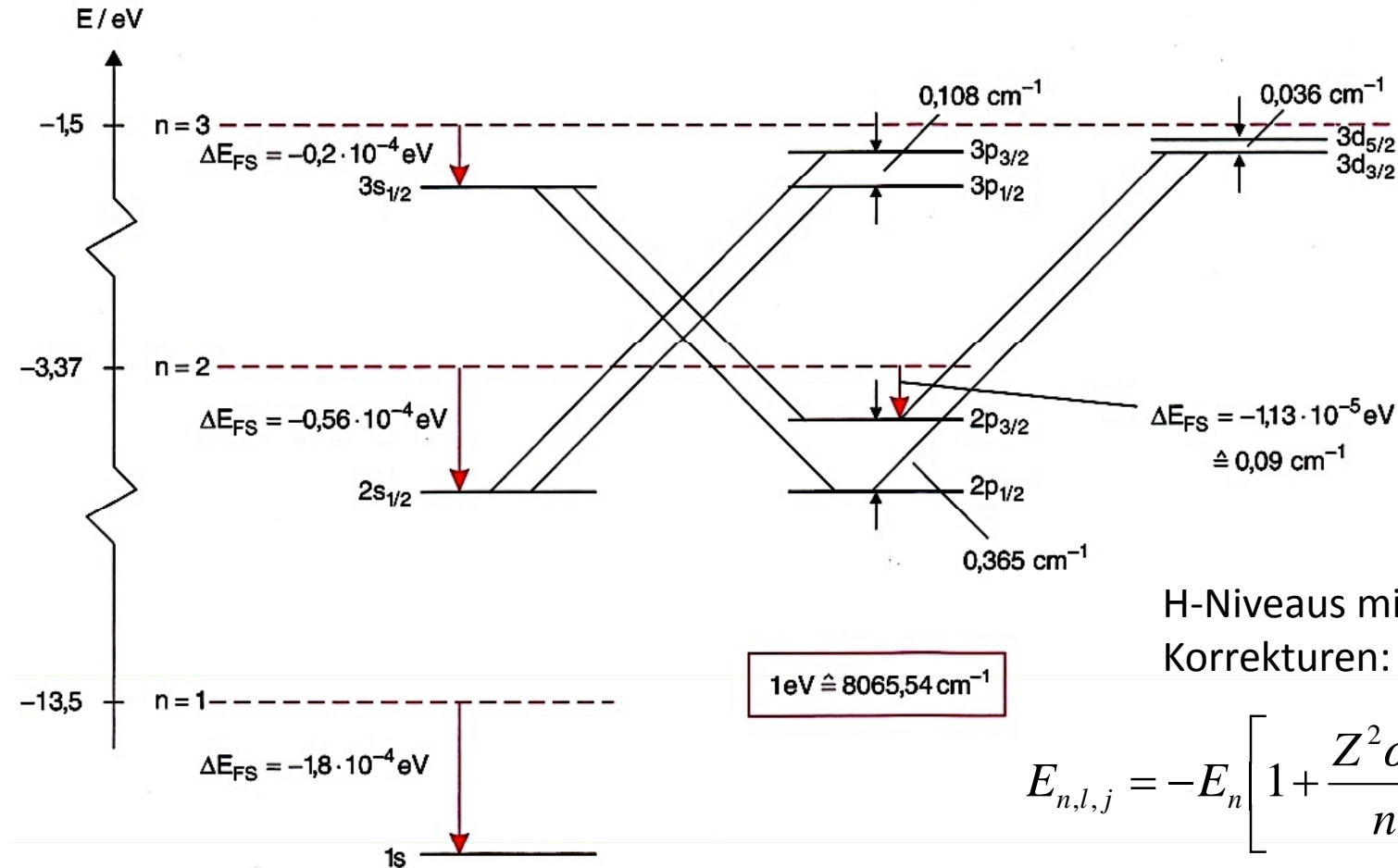


Bsp.: $l = 1, s = 1/2, j = 3/2$

Feinstruktur im H-Atom

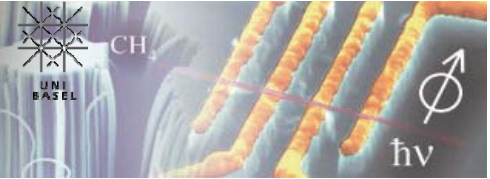
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

- berücksichtigt: Spin-Bahn-Kopplung und relativistische Effekte
- gestrichelt: Energieniveaus E_n ohne Berücksichtigung der Feinstruktur



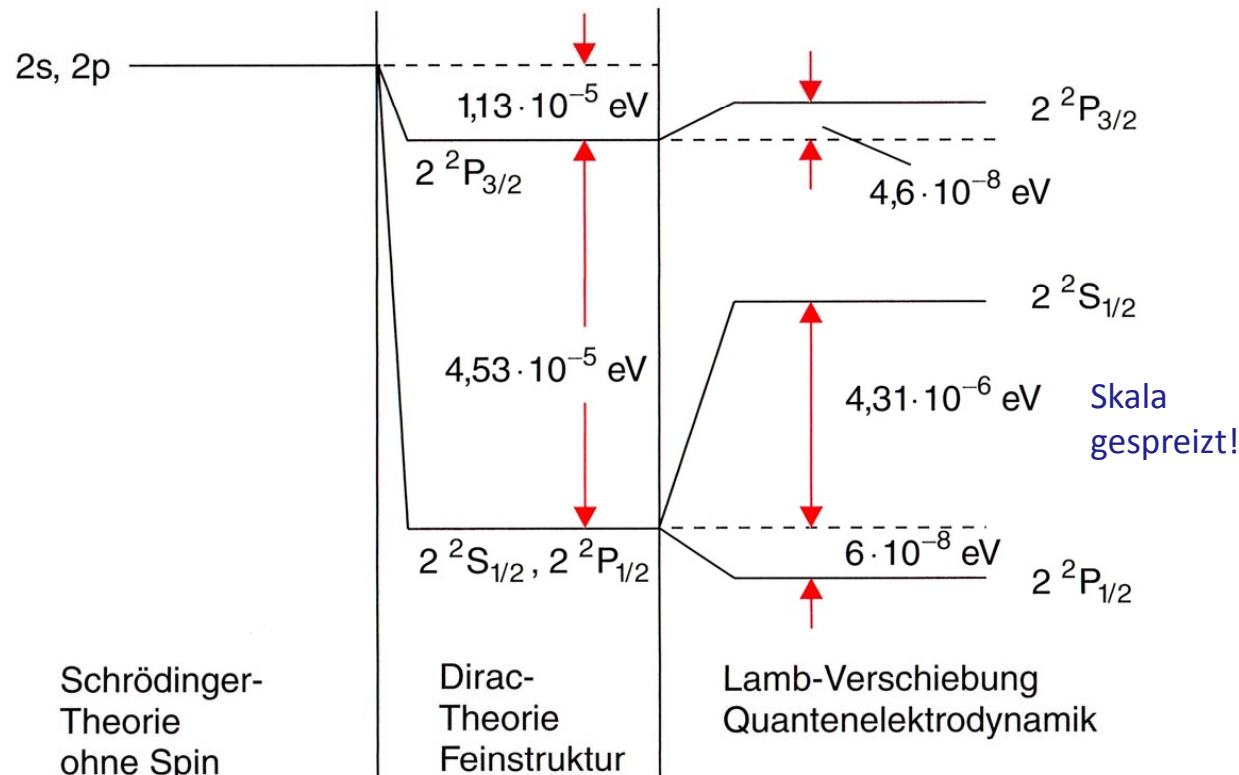
Niveaus mit selbem J sind entartet (wird erst durch Lamb-Verschiebung aufgehoben)

Feinstruktur + „Lamb-shifts“



Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

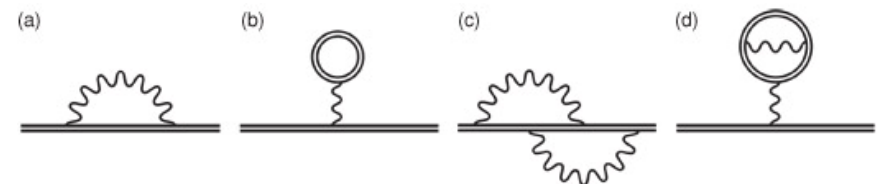
- berücksichtigt: Spin-Bahn-Kopplung, relativistische Effekte und Lamb-Verschiebung (komplette Feinstruktur und **QED-Effekte**)
- gezeigt für Wasserstoffzustände mit $n = 2$



Lamb-Verschiebung durch QED-Effekte
 “Zitterbewegung” des Elektrons durch Emission und Absorption von virtuellen Photonen

J-Entartung wird durch Lamb-Verschiebung aufgehoben

QED Korrekturen





Hierarchie der Energien im H-Atom

Bohr Bindungsenergie	$\alpha^2 mc^2$
Feinstrukturkorrektur	$\alpha^4 mc^2$
Lambshift	$\alpha^5 mc^2$
Hyperfeinaufspaltung	$(m / m_p) \alpha^4 mc^2$

Lamb-Rutherford Experiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

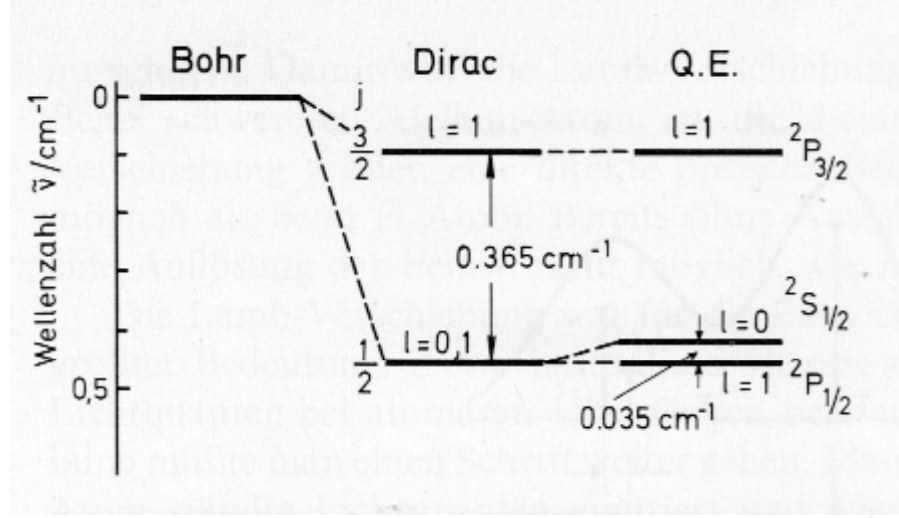
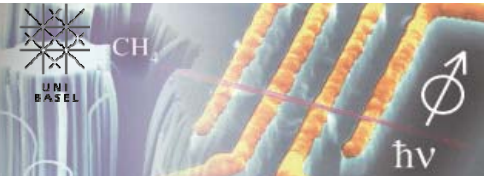


Abb. 12.21. Zur Lamb-Verschiebung: Feinstruktur des $n=2$ -Niveaus beim H-Atom nach Bohr, nach Dirac und quantenelektrodynamisch unter Berücksichtigung der Lamb-Verschiebung. Die j -Entartung ist aufgehoben

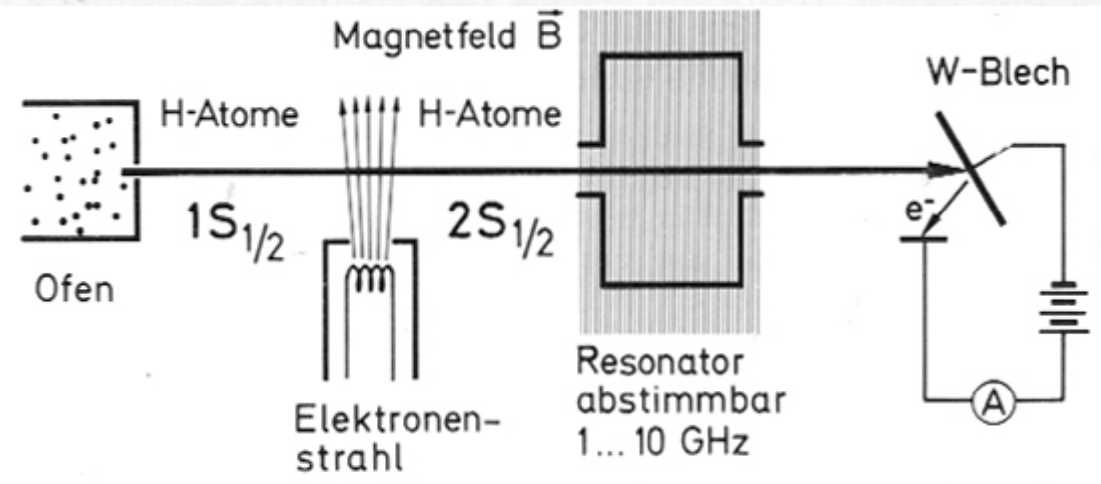
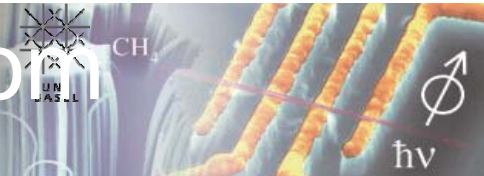
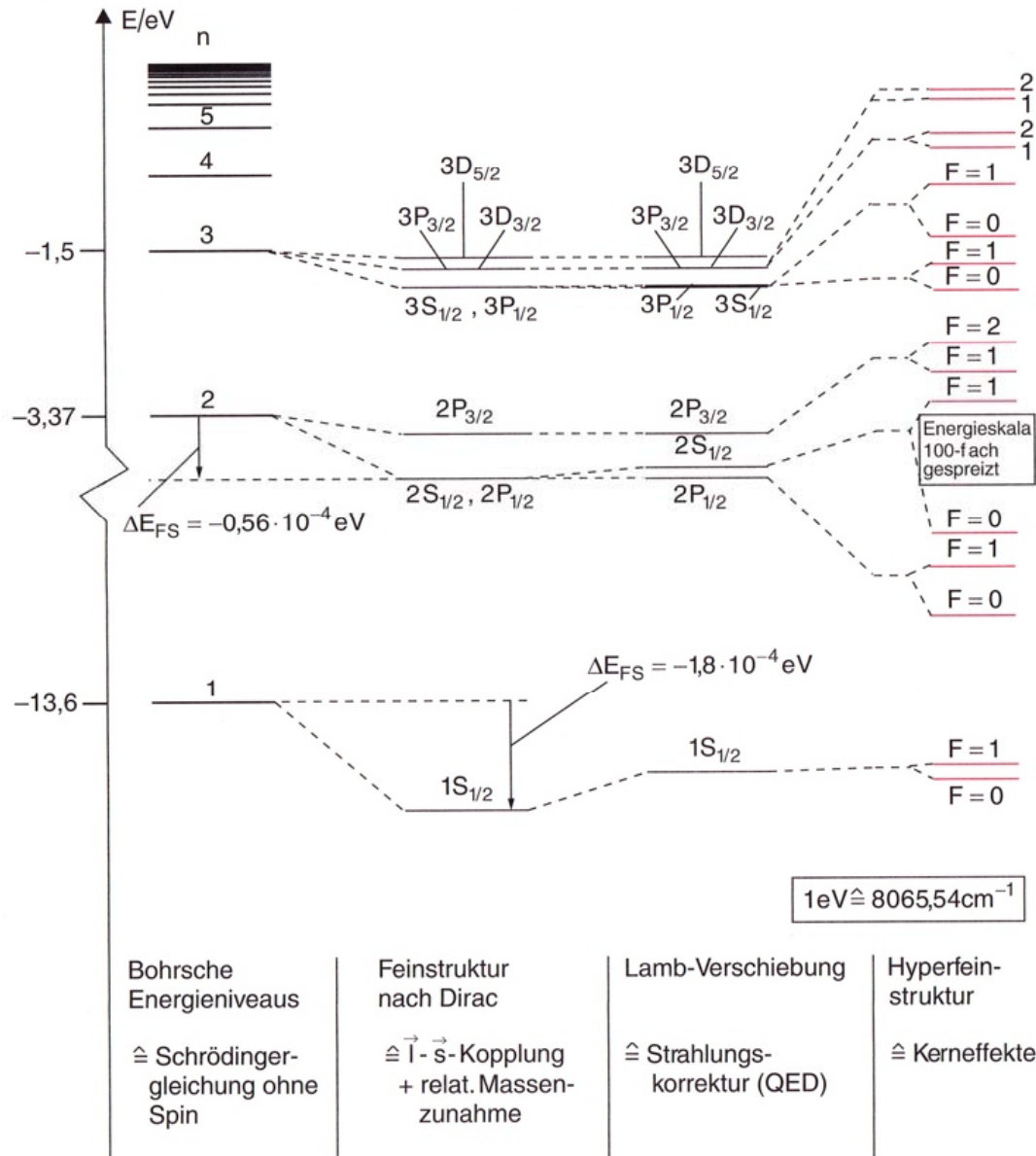


Abb. 12.22. Zur Messung der Lamb-Verschiebung: ein Atomstrahl aus H-Atomen wird durch Elektronenbeschuss in den metastabilen $2S_{1/2}$ -Zustand angeregt und durchfliegt so einen Resonator. Wenn dort elektromagnetische Übergänge induziert werden, vermindert sich die Anzahl der im angeregten Zustand auf das als Empfänger dienende Wolfram-Blech treffenden H-Atome und damit der gemessene Elektronenstrom. Das Magnetfeld \vec{B} dient zu einer zusätzlichen energetischen Trennung der Zustände $S_{1/2}$ und $P_{1/2}$. Damit wird eine Mischung dieser Zustände und damit ein unmittelbarer Zerfall über den Zustand $2P_{1/2}$ behindert

Vollständiges Termschema H-Atom



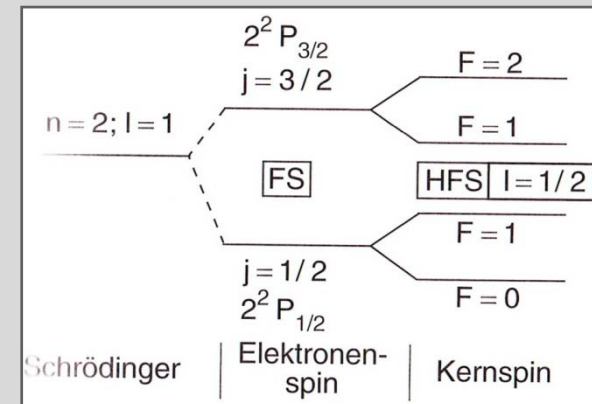
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Fein- und Hyperfeinstruktur sowie Lamb-Verschiebung nicht massstabsgerecht gezeichnet

Bezeichnung eines Terms:
 Quantenzahlen (n, l, s, j, I, F)

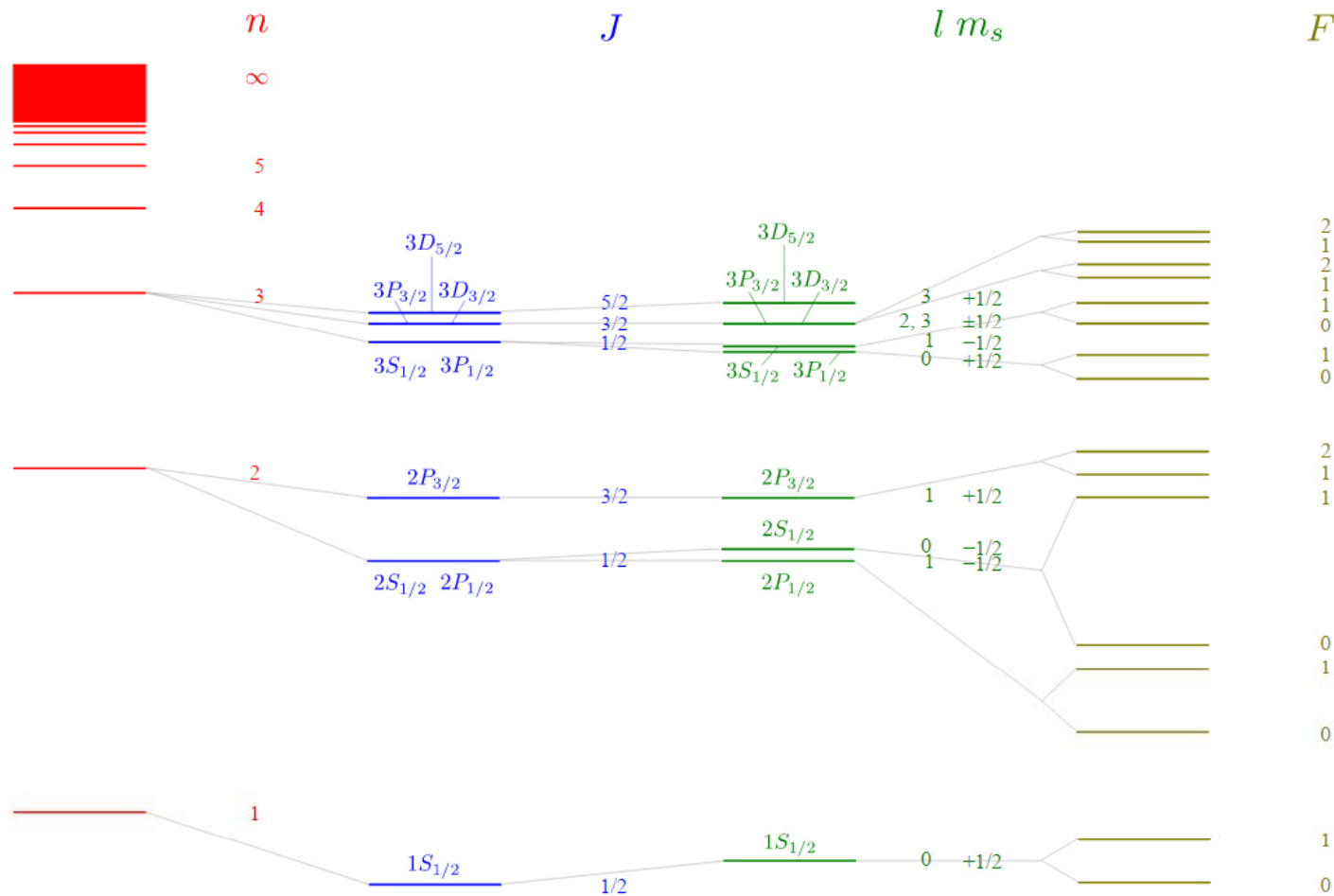
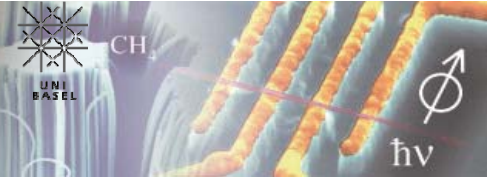
$$n^{2s+1} L_j \text{ sowie } I, F$$



Hinzu kommt im Magnetfeld die Quantenzahl m_F

Feinstruktur + „Lamb-shifts“

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Bohr

Lösungen der Schrödingergleichung ohne Spin.
Entartung: n^2

Feinstruktur

Spin-Bahn-Kopplung und relativistische Korrektur.

Lamb-Verschiebung

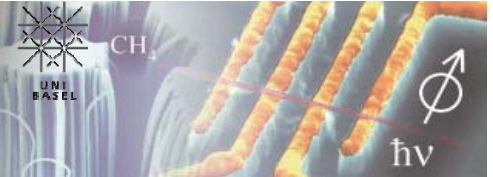
Strahlungskorrektur (QED)

Hyperfeinstruktur

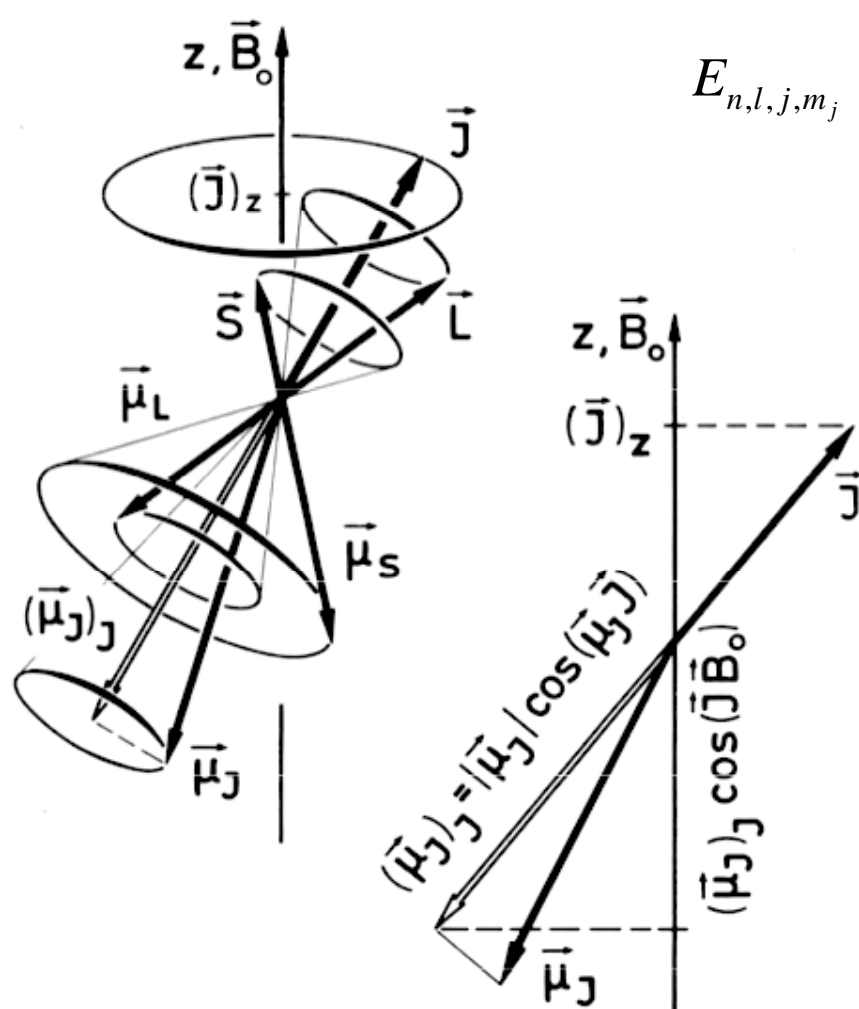
Spin-Spin-Kopplung (Energieskala 100-mal gestreckt)

Anomaler Zeeman-Effekt

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Zeeman-Effekt für Feinstrukturzustände



$$E_{n,l,j,m_j} = -\frac{E_R}{n^2} - \frac{E_R \alpha^2}{n^3} \left(\frac{1}{j+1/2} - \frac{3}{4n} \right) + \mu_B B m_j g_j$$

E_R = Rydberg Energie

α = Feinstrukturkonstante

g_j = Landé-Faktor

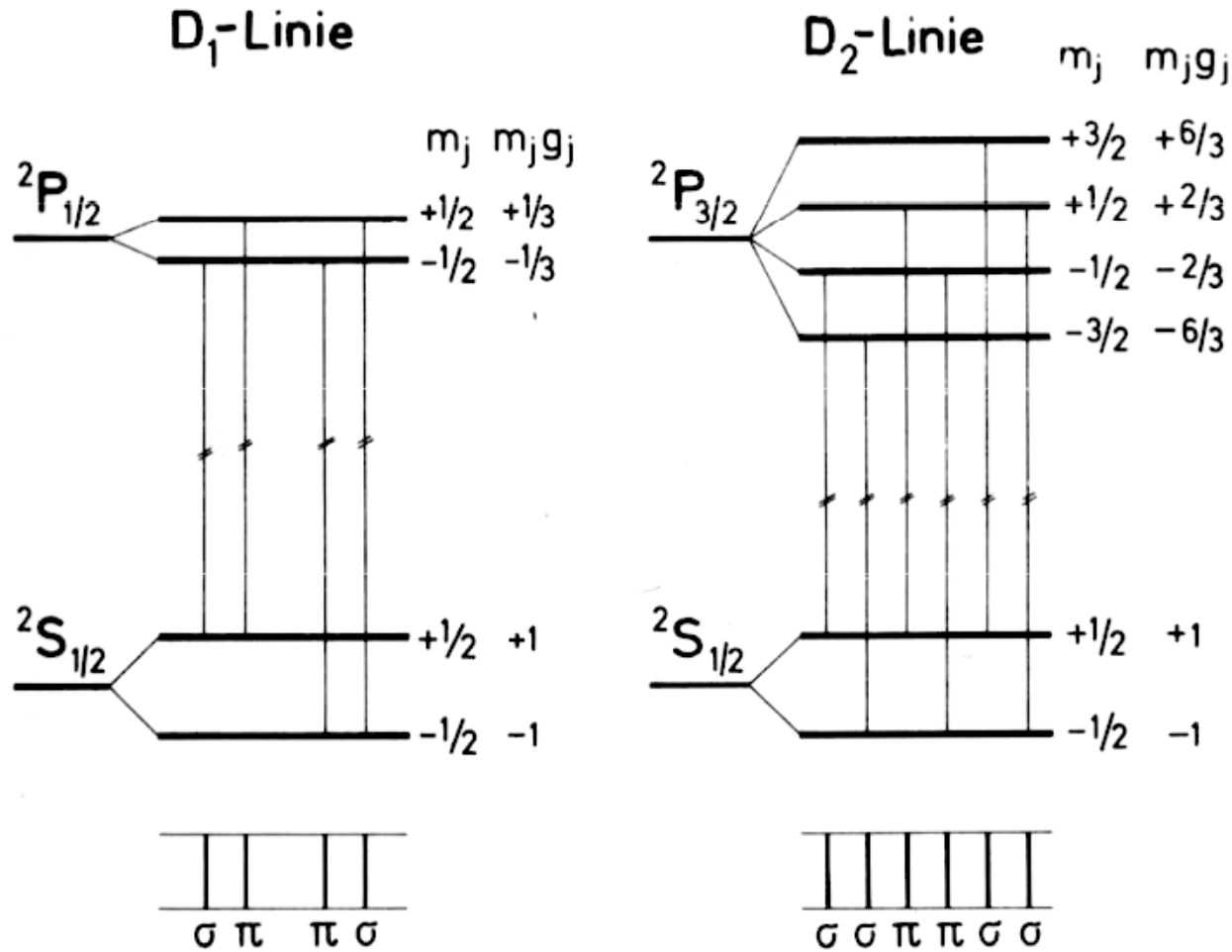
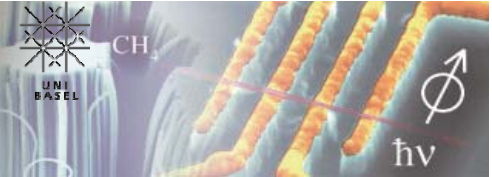
Landé-Faktor für Feinstrukturzustände:

$$g_j = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$$

$$\hat{\mu}_J = -\frac{\mu_B}{h} (g_S \hat{S} + g_L \hat{L}) = -g_J \frac{\mu_B}{h} \hat{J}$$

Zeeman-Effekt für Feinstruktur

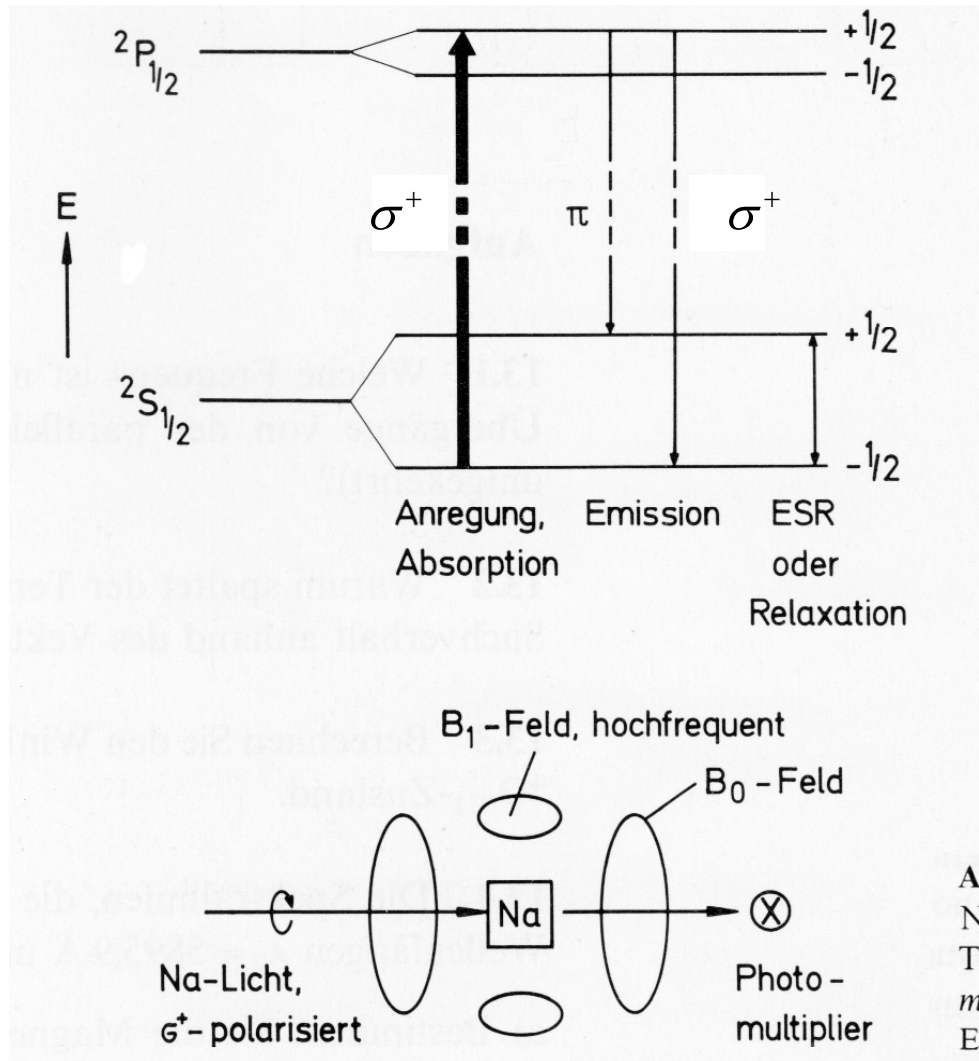
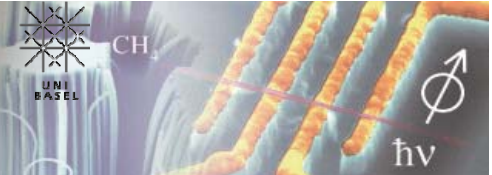
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Hier: **LS-Kopplung** und rel. Korrekturen **dominieren** über externes Magnetfeld. Daher folgt Aufspaltung der Quantenzahl m_j mit speziellem g-Faktor gemäss Landé

Optisches Pumpen

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

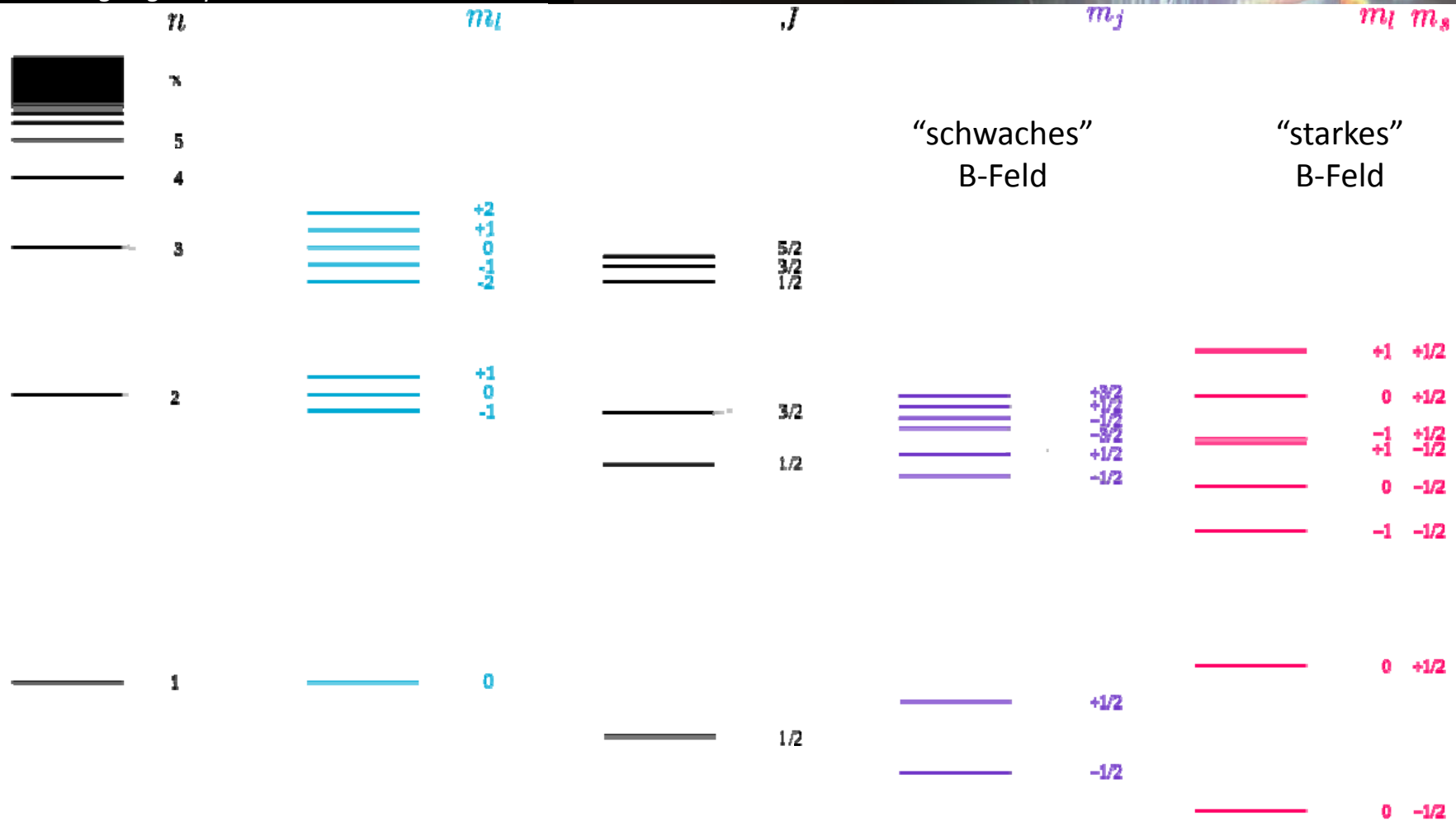


Untersuchung von Zuständen mittels optischer Spektroskopie kombiniert mit Hochfrequenzresonanz (ESR)

Abb. 13.17. Optisches Pumpen am Übergang $2S_{1/2} - 2P_{1/2}$ des Natrium-Atoms. Im Felde B_0 spalten die Terme in die Zeeman-Terme mit $m_j = \pm 1/2$ auf. Nur Atome im Grundzustand $m_j = -1/2$ absorbieren das eingestrahlte σ^+ -Licht. Bei der Emission aus dem angeregten Niveau werden durch π -Übergänge Atome im Grundzustand mit $m_j = +1/2$ angereichert. Mit dem hochfrequenten B_1 -Feld wird durch Übergänge von $m_j = +1/2$ nach $m_j = -1/2$ die Anzahl der absorbierfähigen Atome erhöht

Aufspaltung im Magnetfeld

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Bohr
 Lösungen der Schrödinger-Gleichung ohne Spin.

Normaler Zeeman-Effekt
 Magnetfeld ohne Berücksichtigung des Spins.

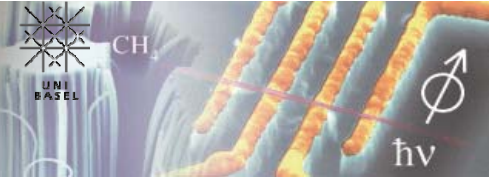
Feinstruktur
 Spin-Bahn-Kopplung und relativistische Korrektur.

Anomaler Zeeman-Effekt
 Magnetfeld mit Berücksichtigung des Spins.
 $B < I_s$ -Kopplung

Paschen-Back-Effekt
 Magnetfeld mit Berücksichtigung des Spins.
 $B > I_s$ -Kopplung

Hyperfeinzustände

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Zeeman-Aufspaltung im Magnetfeld für Hyperfeinzustände

