

Physik III Atom- und Quantenphysik

Kapitel 8: Zeemaneffekt und Spin

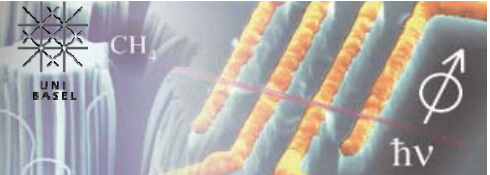


Prof. Dr. Christian Schönenberger
www.nanoelectronics.ch

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

Zeeman-Effekt

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Aufspaltung der atomaren Energieniveaus im statischen Magnetfeld B

The Nobel Prize in Physics 1902

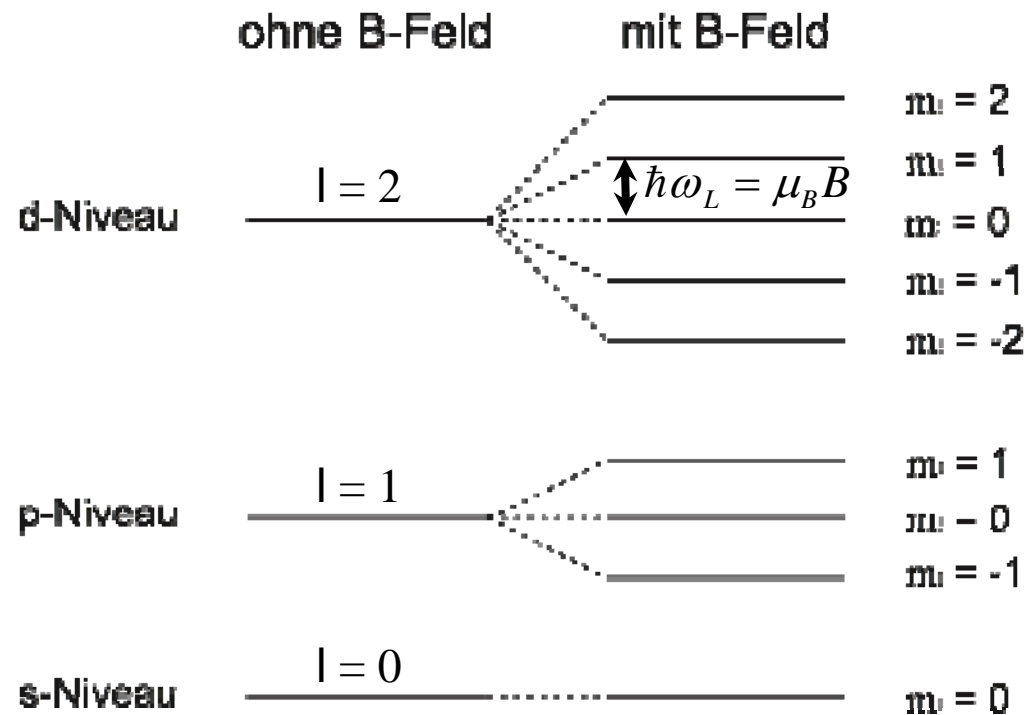


Hendrik Antoon Lorentz
Prize share: 1/2



Pieter Zeeman
Prize share: 1/2

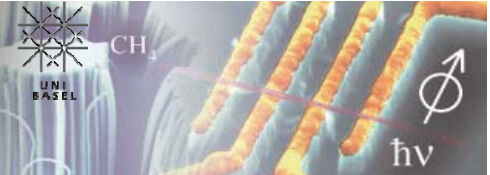
The Nobel Prize in Physics 1902 was awarded jointly to Hendrik Antoon Lorentz and Pieter Zeeman "in recognition of the extraordinary service they rendered by their researches into the influence of magnetism upon radiation phenomena"



- Nur Bahnmagnetismus, d.h. Energieniveaus mit Quantenzahlen (n, l, m_l)
- Spin und Kernspin sind noch vernachlässigt ($S = 0, I = 0$)

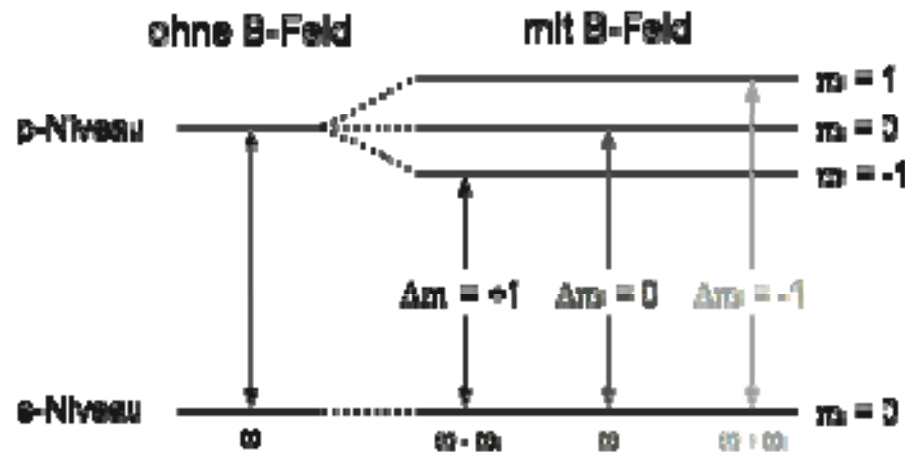
Optische Übergänge

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

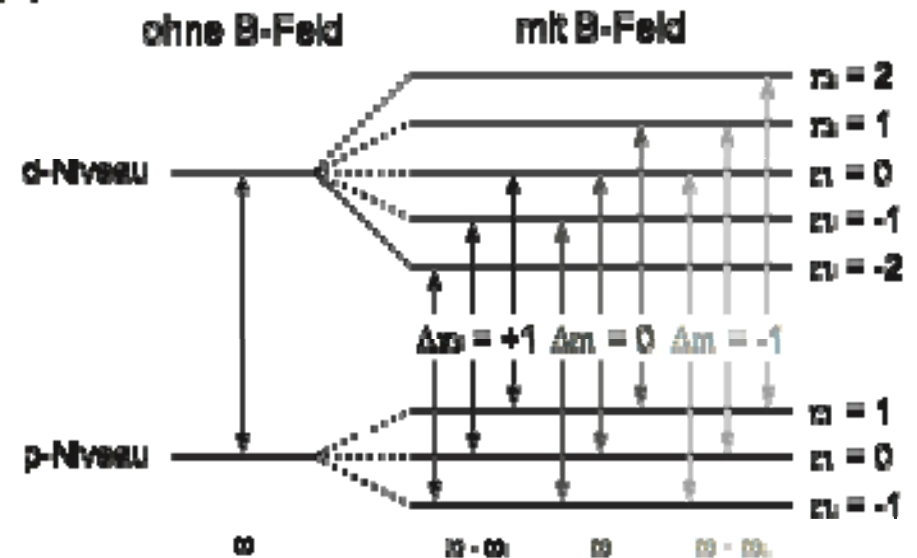


Auswahlregeln: erlaubt sind Übergänge mit: Δn beliebig, $\Delta l = \pm 1$, $\Delta m_l = 0, \pm 1$

(a)



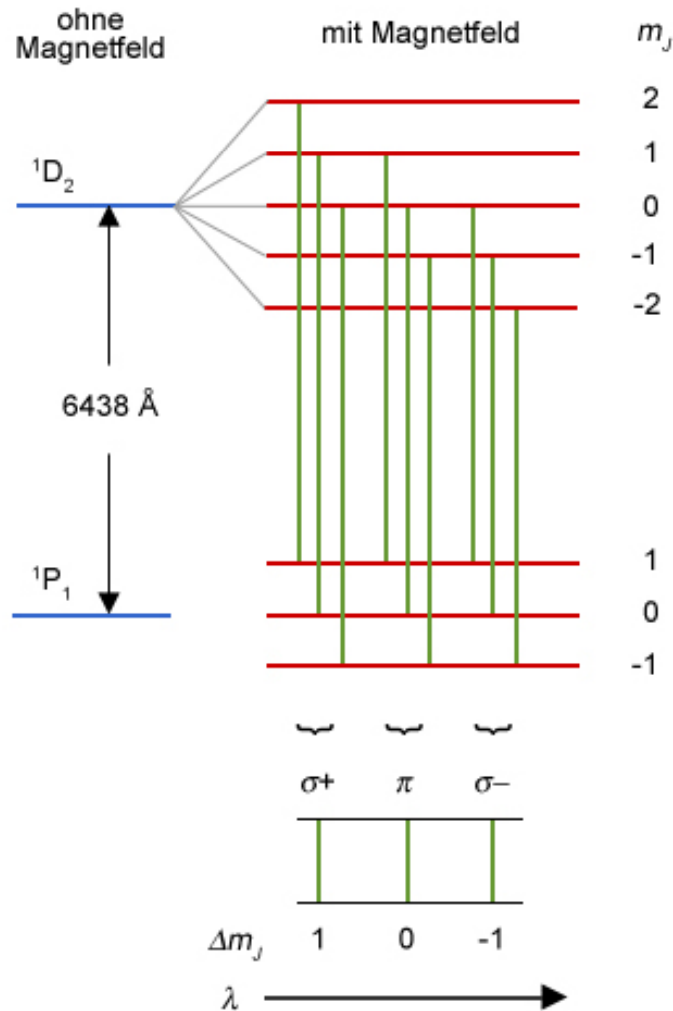
(b)



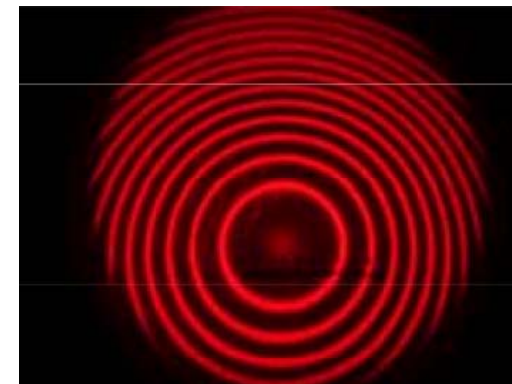
Die Spektrallinien spalten im Magnetfeld in 3 Komponenten auf (**Lorentz-Triplett**)
 ("normaler" Zeemaneffekt, d.h. Spin $S = 0$, Kernspin $I = 0$)

Lorentz-Triplet

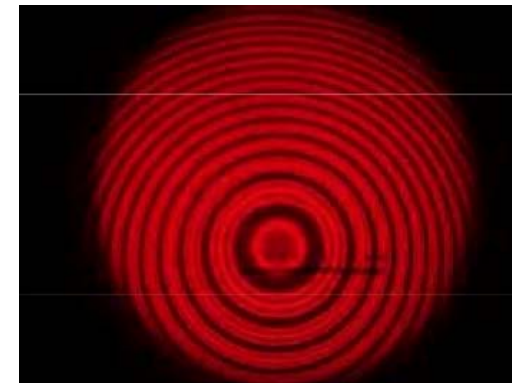
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Interferenzmuster



B = 0



B = 1 T

Abb.1 | 6438 Å-Linie des Cadmiums

Der normale Zeeman-Effekt bei der 6438 Å-Linie des Cadmiums. Jede Linie (π , σ^+ , σ^-) stammt in Wirklichkeit von drei Übergängen mit identischer Frequenz resp. Wellenlänge.

Messprinzip

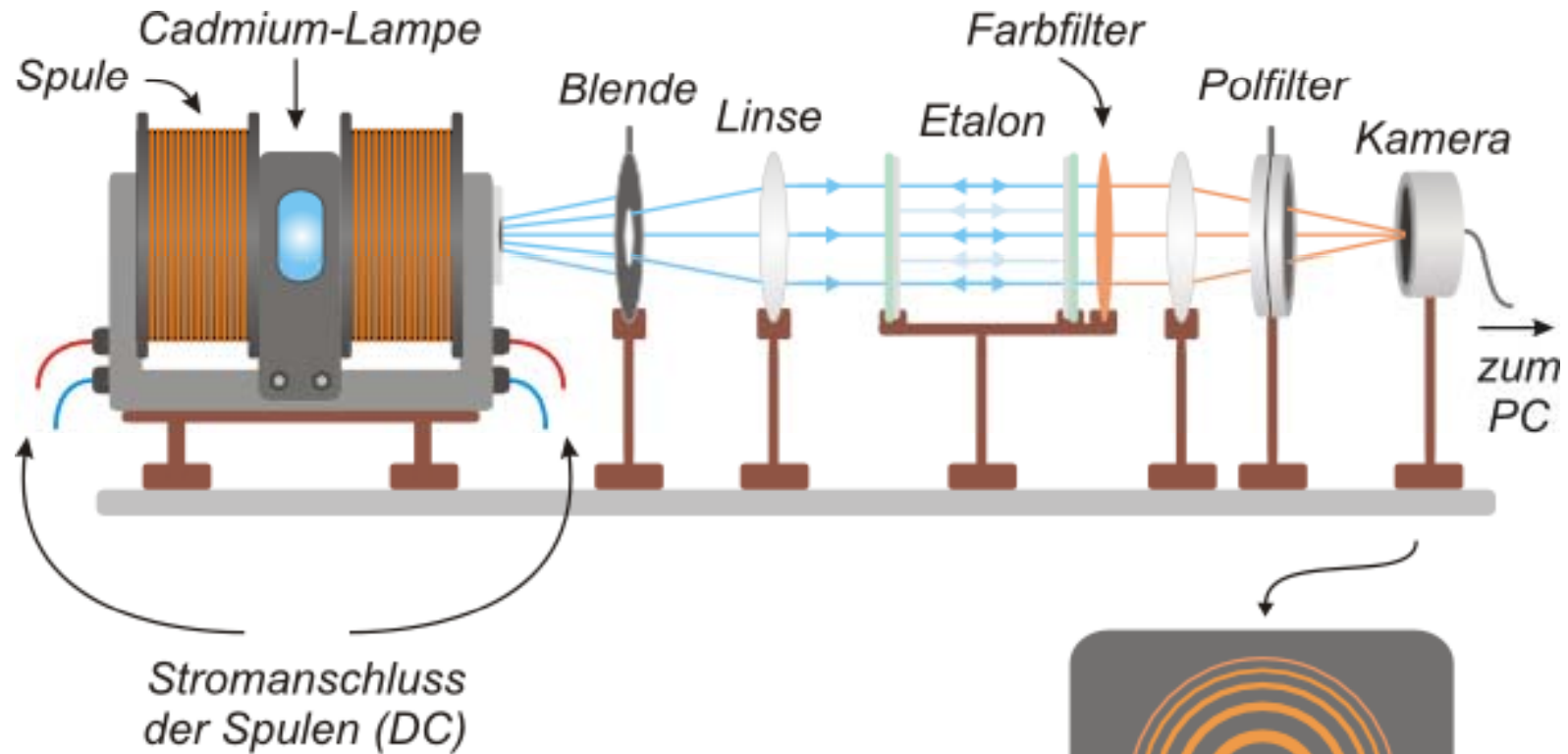
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



CH

UNI
BASEL

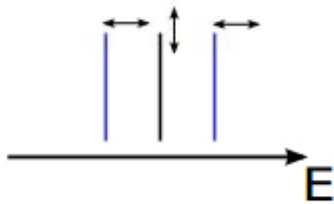
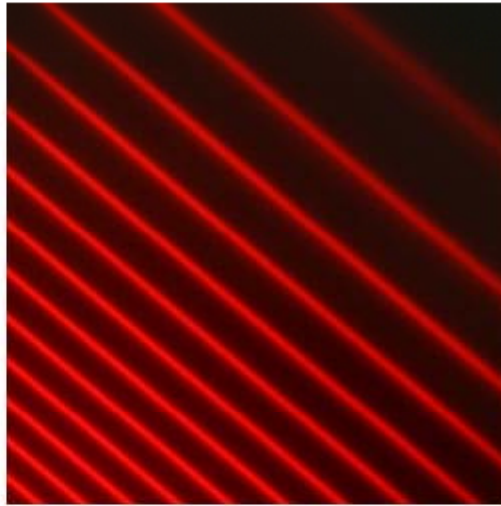
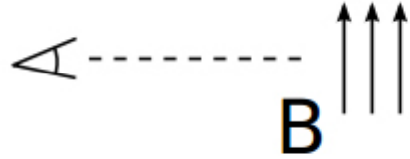
$\hbar\nu$



Interferenzbild

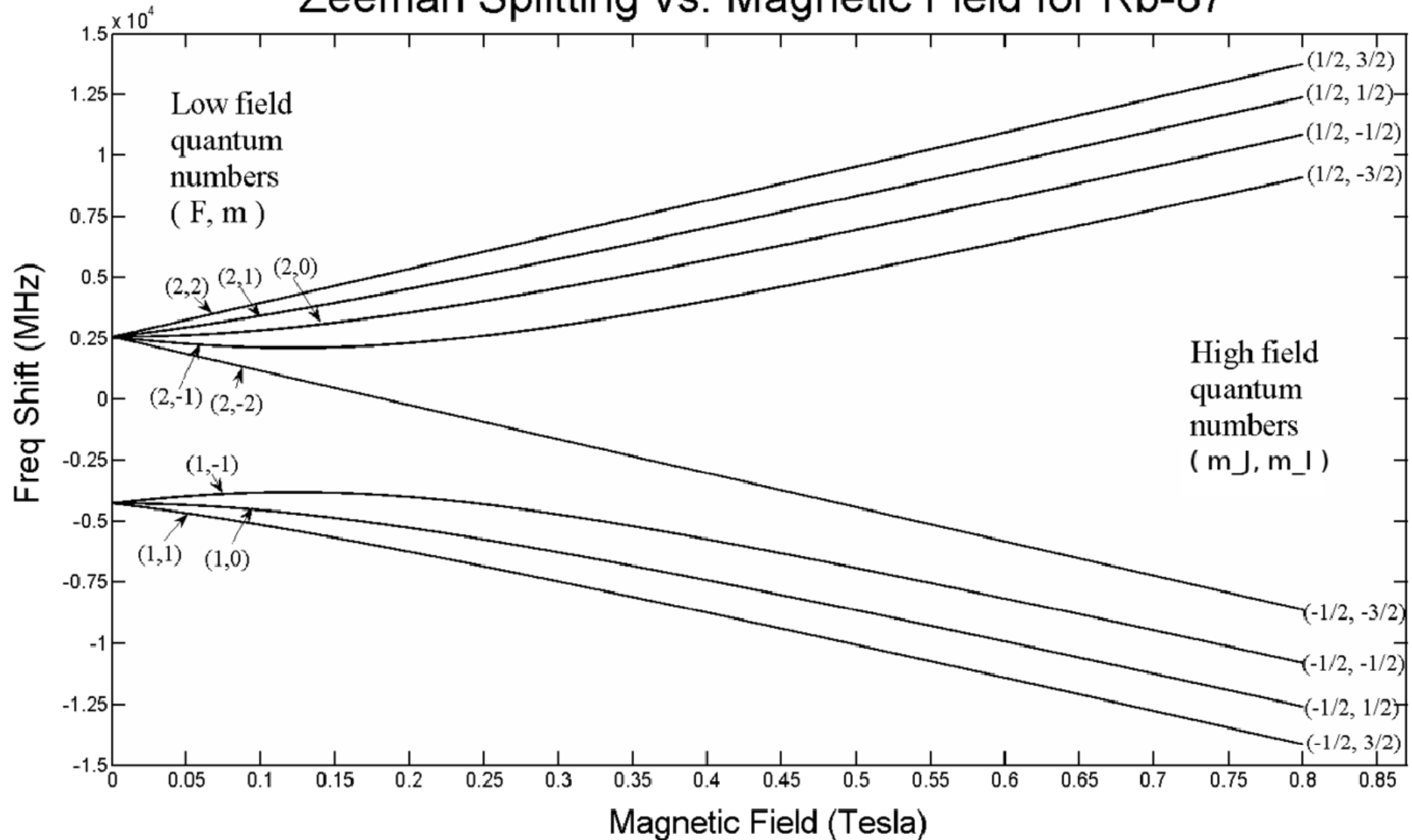
Lorentz-Triplet

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



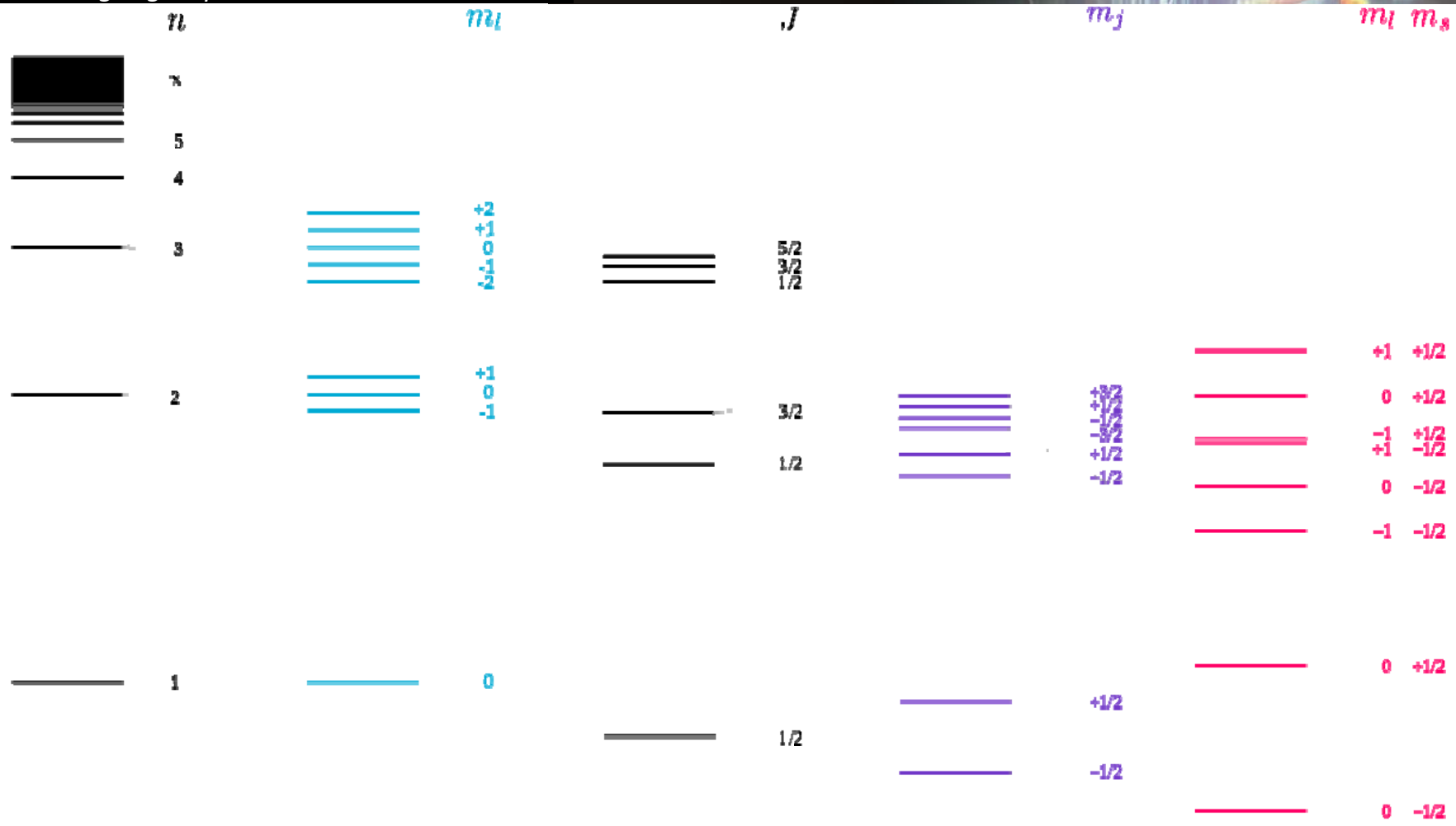
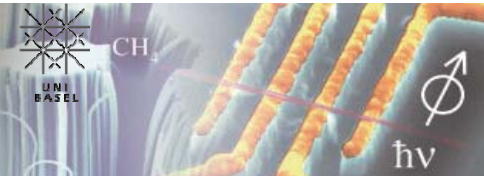
K. Heil und M. Mayer
Uni Heidelberg

Zeeman Splitting vs. Magnetic Field for Rb-87



Aufspaltung im Magnetfeld

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Bohr
 Lösungen der Schrödinger-Gleichung ohne Spin.

Normaler Zeeman-Effekt
 Magnetfeld ohne Berücksichtigung des Spins.

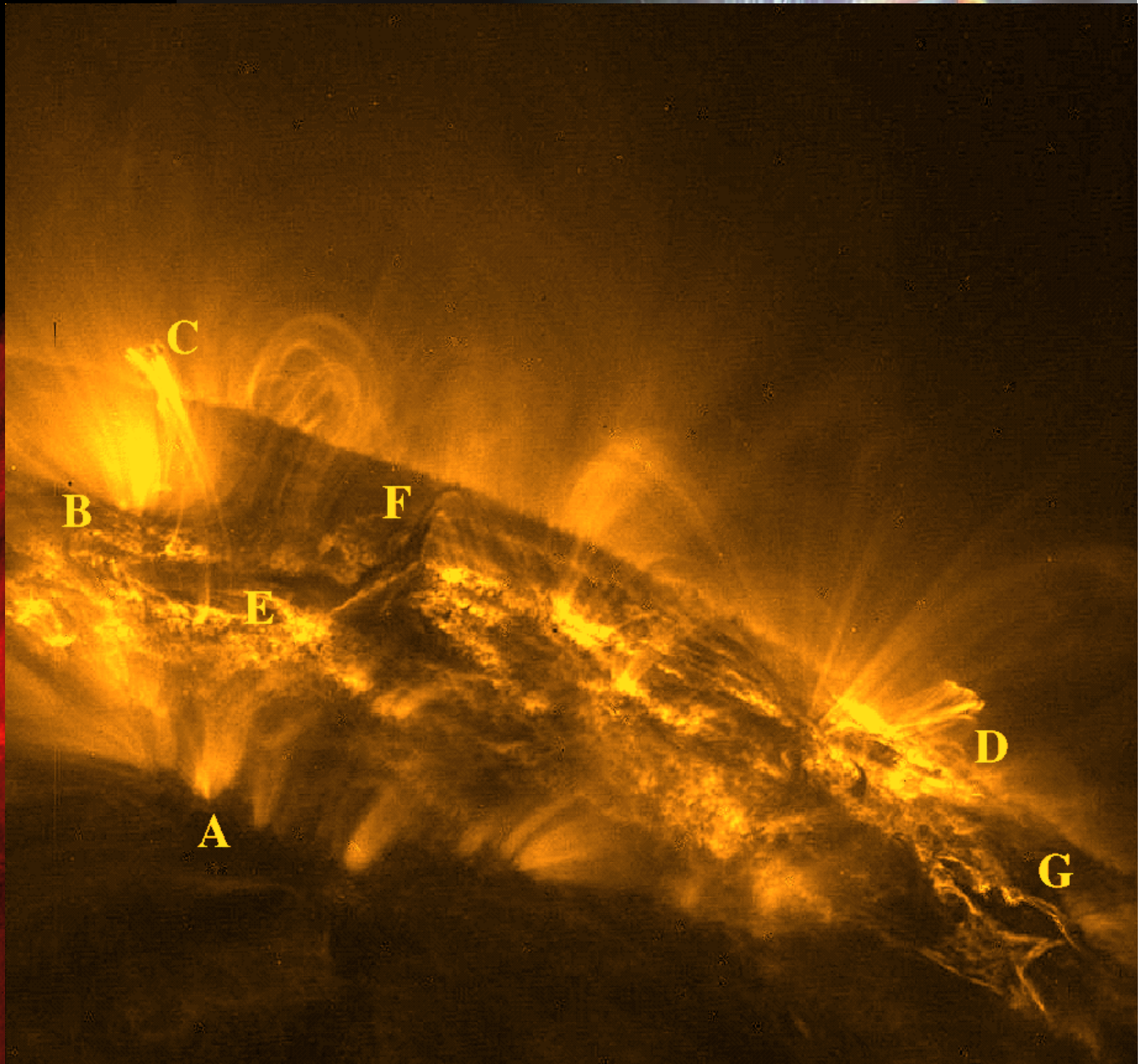
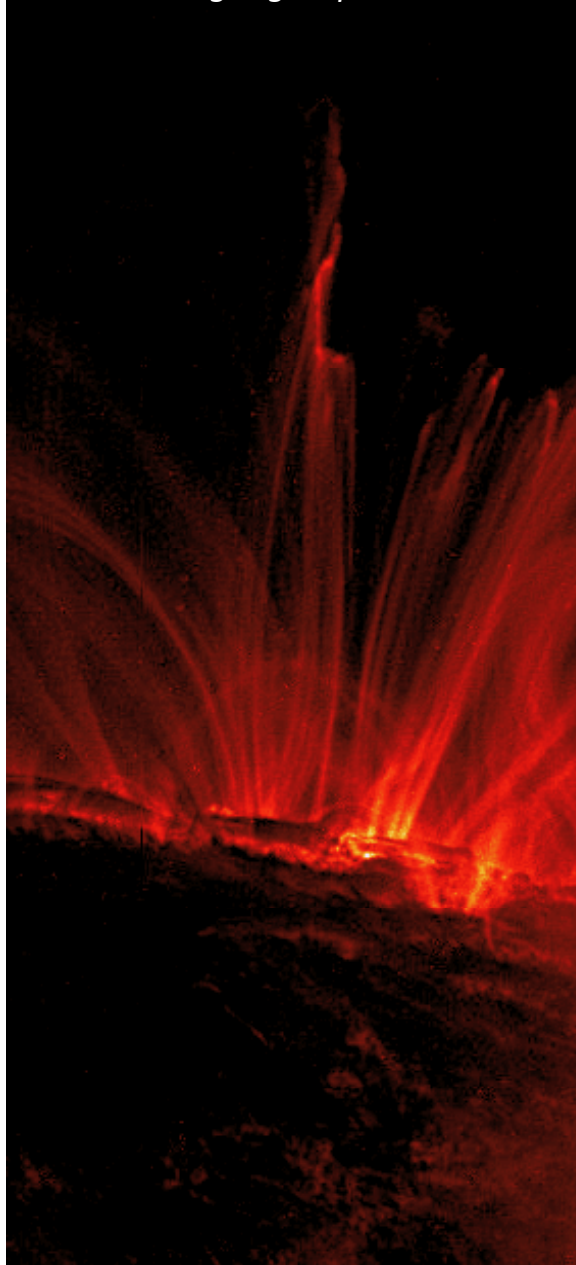
Feinstruktur
 Spin-Bahn-Kopplung und relativistische Korrektur.

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

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

Magnetogramm der Sonne

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

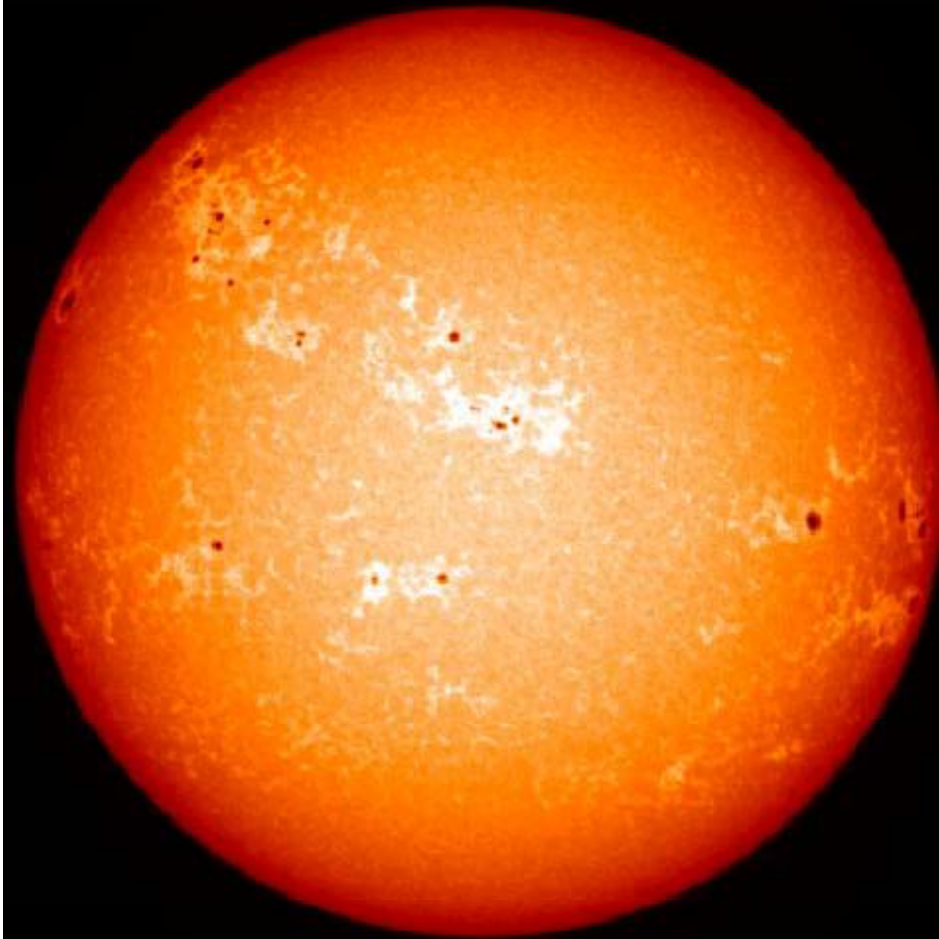


Magnetogramm der Sonne

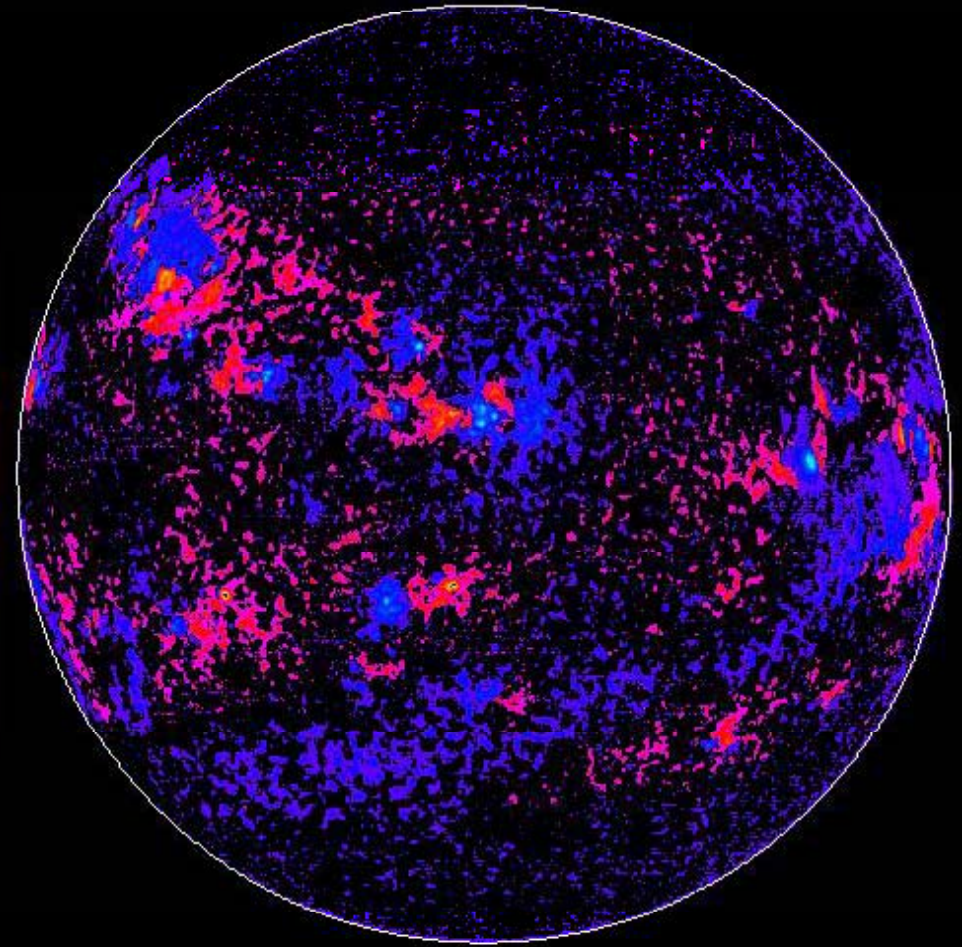
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



10Å Ca K image



Magnetogram

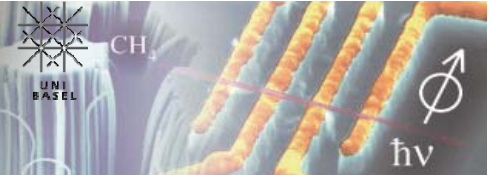


Source: National Solar Observatory (J. Harvey)

HAO A-004

Magnetfallen

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Zeeman-Wechselwirkung

$$H = -\mu \cdot B$$

$$V_m(r) = \mu_B g m |B(r)|$$

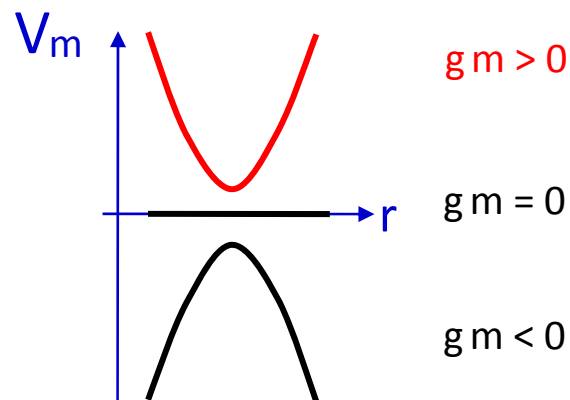
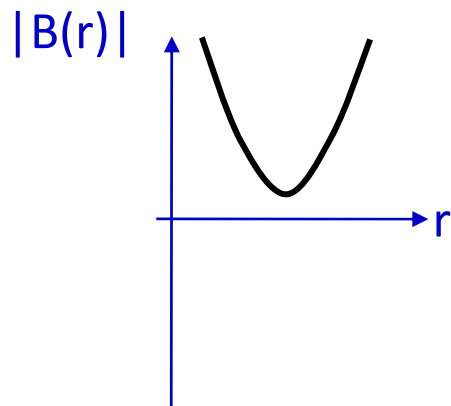
(magnetische Quantenzahl m bleibt bei hinreichend langsamer Bewegung der Atome im Magnetfeld erhalten)

Atome können aufgrund ihres magnetischen Moments in einem lokalen Magnetfeldminimum gefangen werden!

Ortsabhängiges Magnetfeld



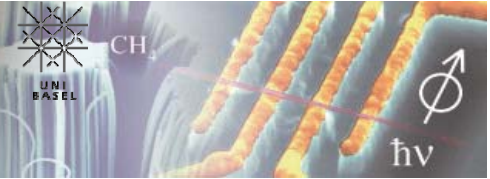
Magnetisches Potential



Nur atomare Zustände mit $g m > 0$ sind magnetisch fangbar

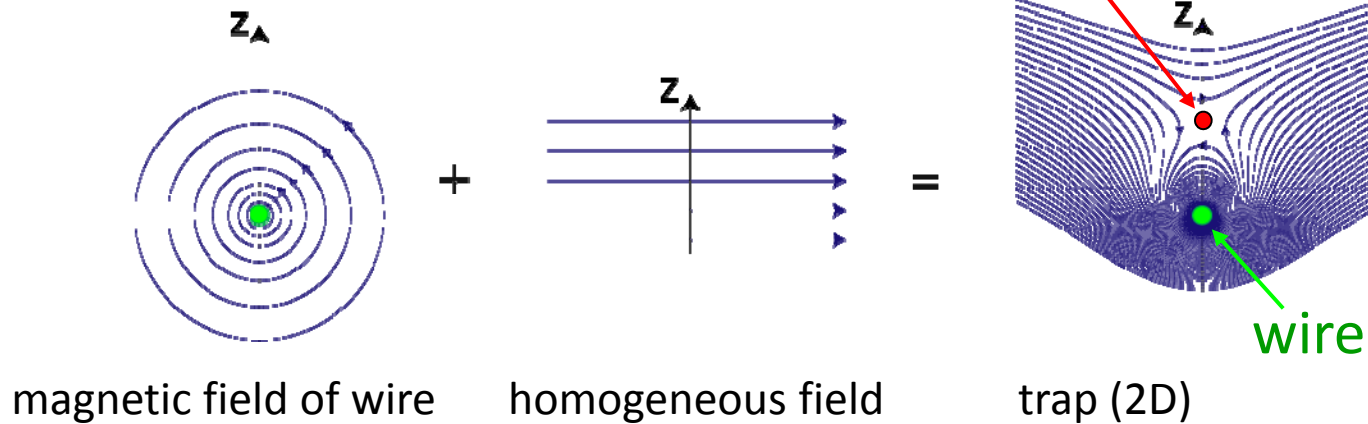
Magnetfallen

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Basic principle: the wire trap

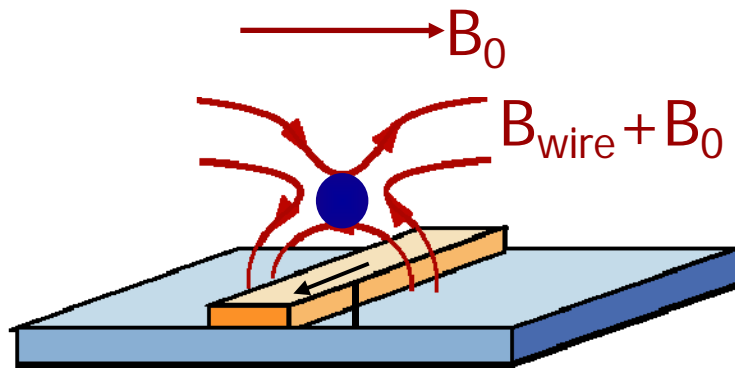
atoms are trapped in B-field minimum



magnetic field of wire

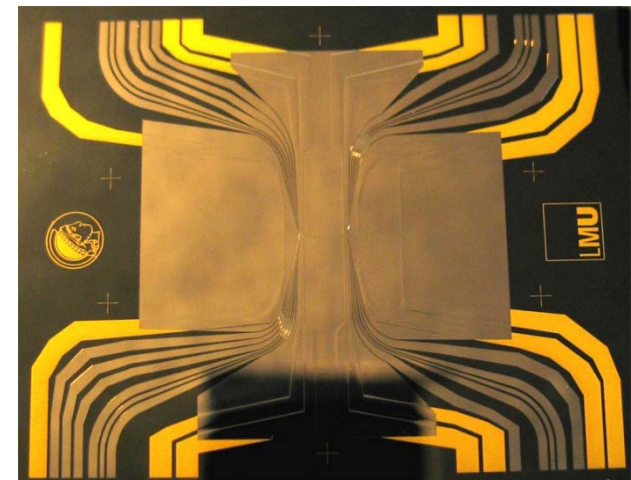
homogeneous field

trap (2D)



high trap frequencies: up to 1 MHz
small atom-surface distance: $< 1 \mu\text{m}$ possible

Micrometer-sized conductor pattern on a chip

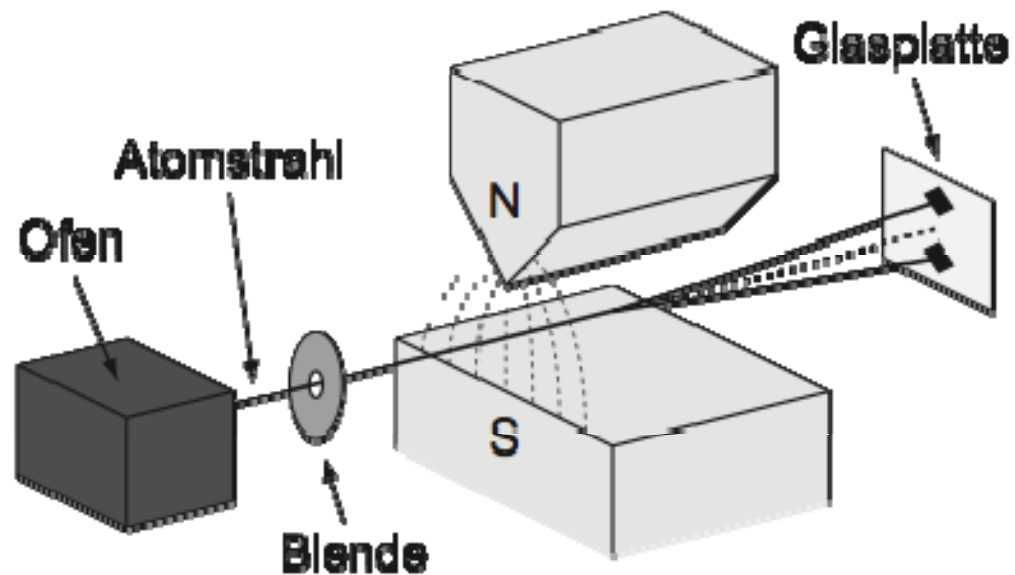


Stern-Gerlach Experiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

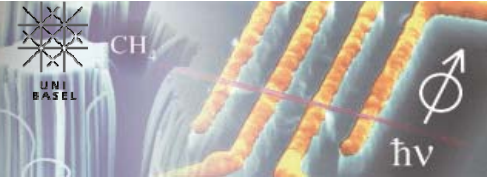


- Nachweis der Richtungsquantelung von Drehimpulsen
- Es werden nur zwei Komponenten beobachtet \rightarrow Spin $S = 1/2$, $m_S = \pm 1/2$
- Das magnetische Moment des Spins ist $\mu_z = \pm\mu_B$, der Landé-Faktor daher $g_S \approx 2$

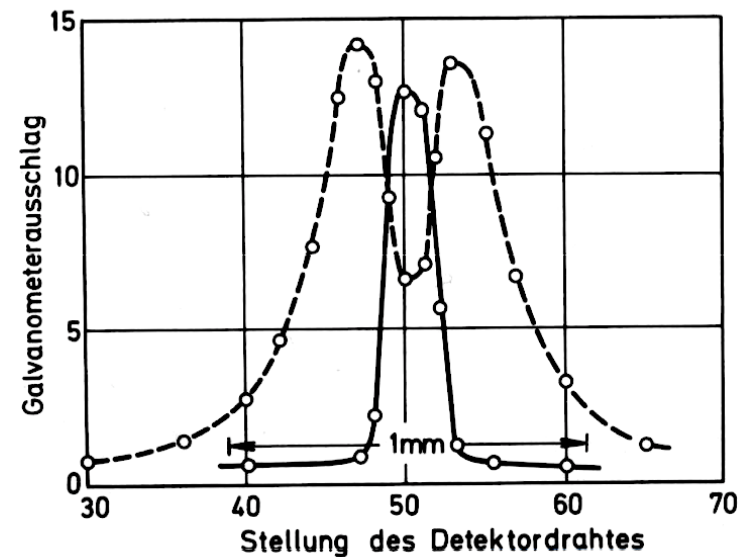
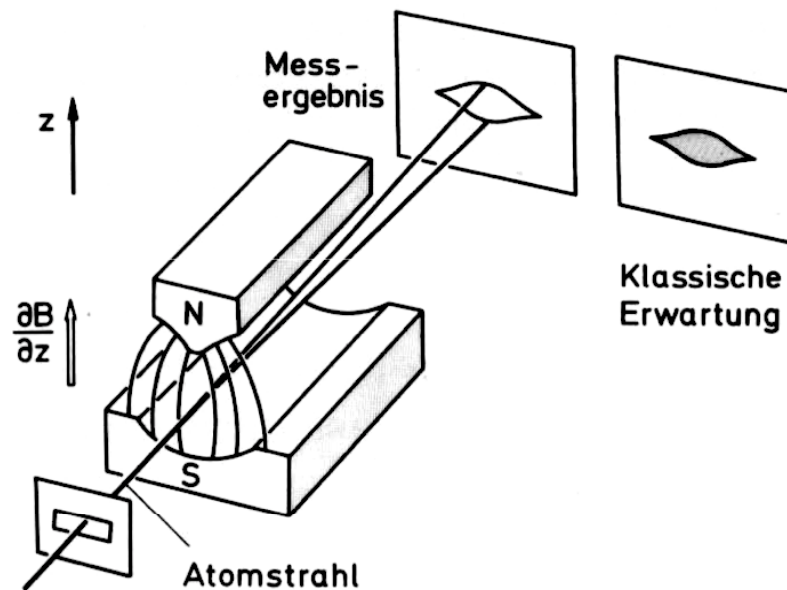


Stern-Gerlach Experiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



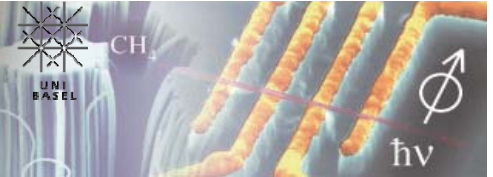
- Nachweis der Richtungsquantelung von Drehimpulsen
- Es werden nur zwei Komponenten beobachtet \rightarrow Spin $S = 1/2$, $m_S = \pm 1/2$
- Das magnetische Moment des Spins ist $\mu_z = \pm \mu_B$, der Landé-Faktor daher $g_S \approx 2$



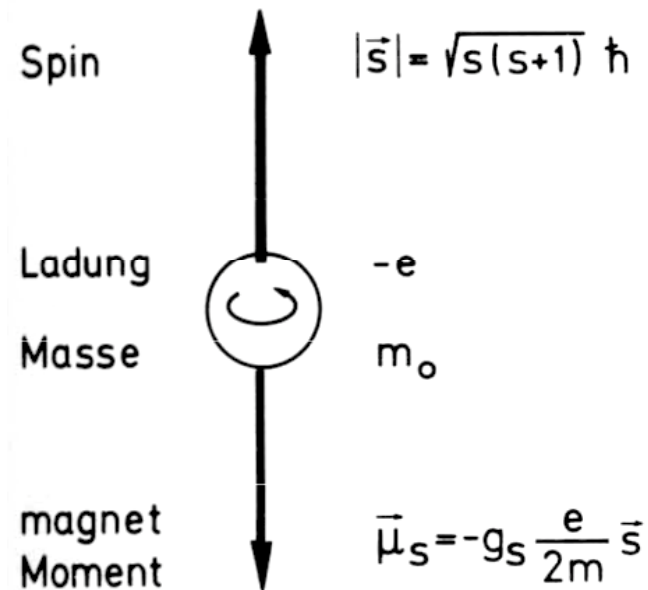
Haken-Wolf, Abb. 12.10+11

Spin der Elektrons

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

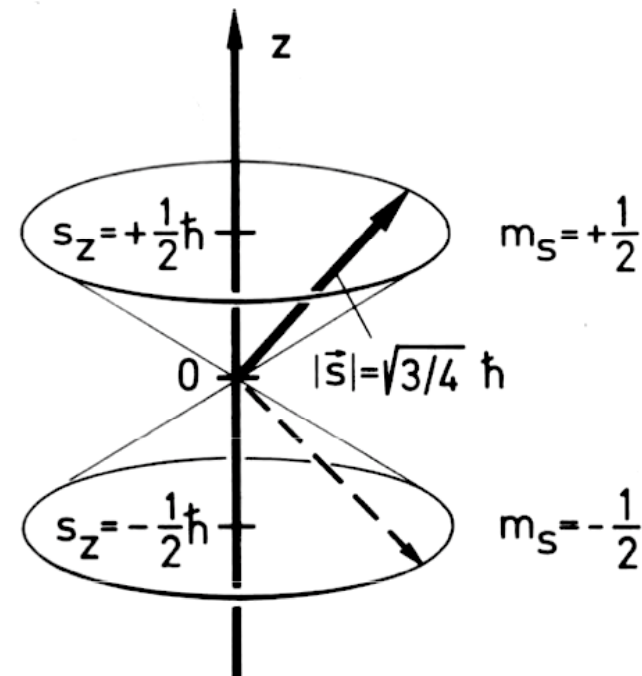


Eigenschaften des Elektrons

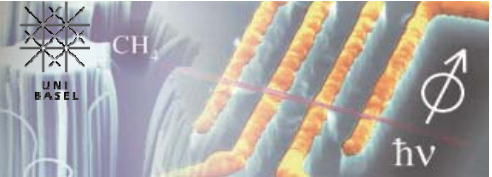


$$g_s = 2.0023$$

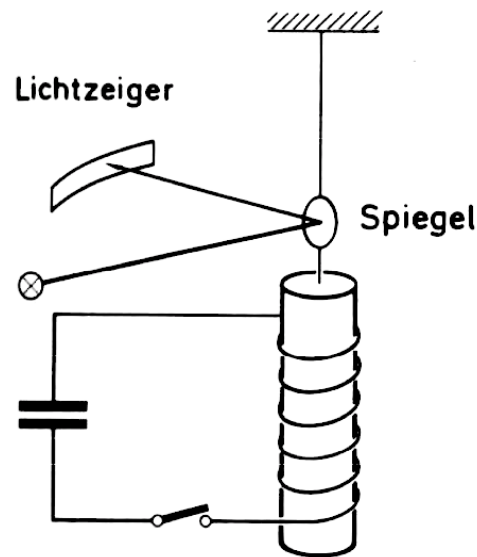
Spin = innerer Drehimpuls/Eigendrehimpuls eines Teilchens



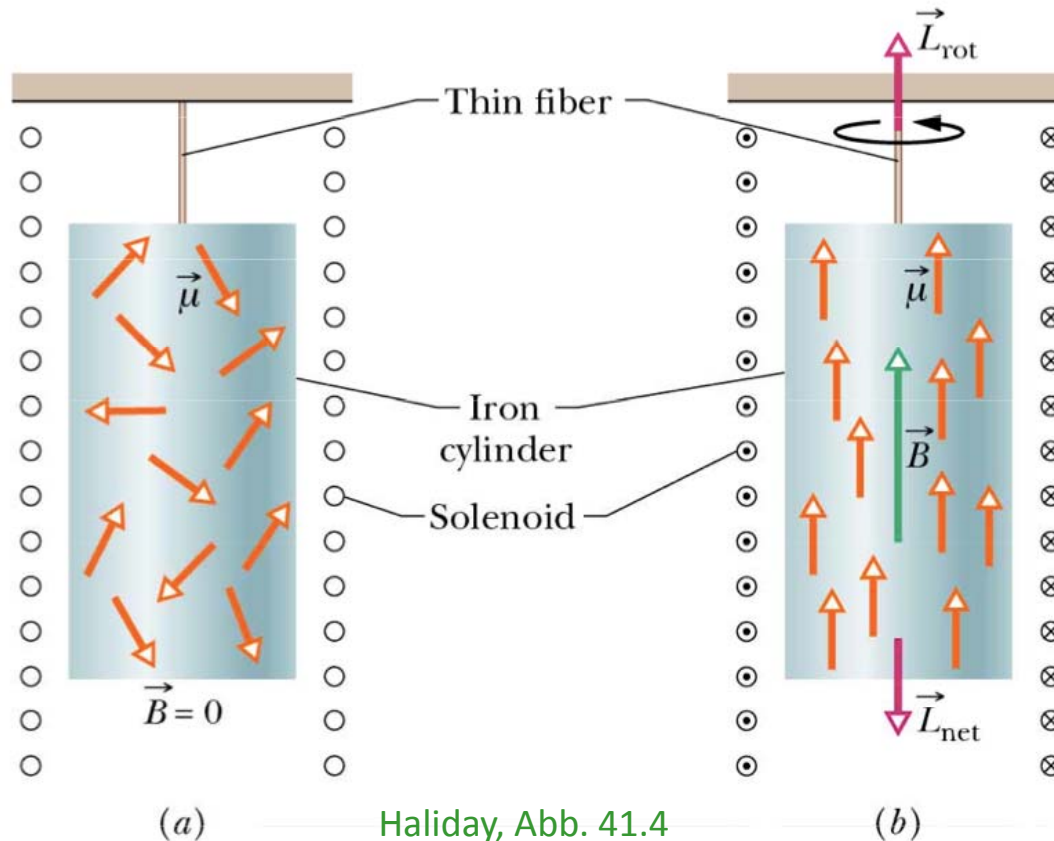
Einstein de-Haas Versuch 1915



Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Haken-Wolf, Abb. 12.9



Haliday, Abb. 41.4

- Spins im Eisenstab werden durch Einschalten des B-Feldes abrupt ausgerichtet
- Der aus den Spins resultierende Drehimpuls muss durch eine entgegengesetzte Drehbewegung des Eisenstabs kompensiert werden (Drehimpulserhaltung)
- Beobachtung der Drehbewegung ist direkter Nachweis des Spins. Vergleich mit Messung des magn. Moments des Eisenstabs liefert den Landé-Faktor $g_s \approx 2$

Elektronenspinresonanz

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

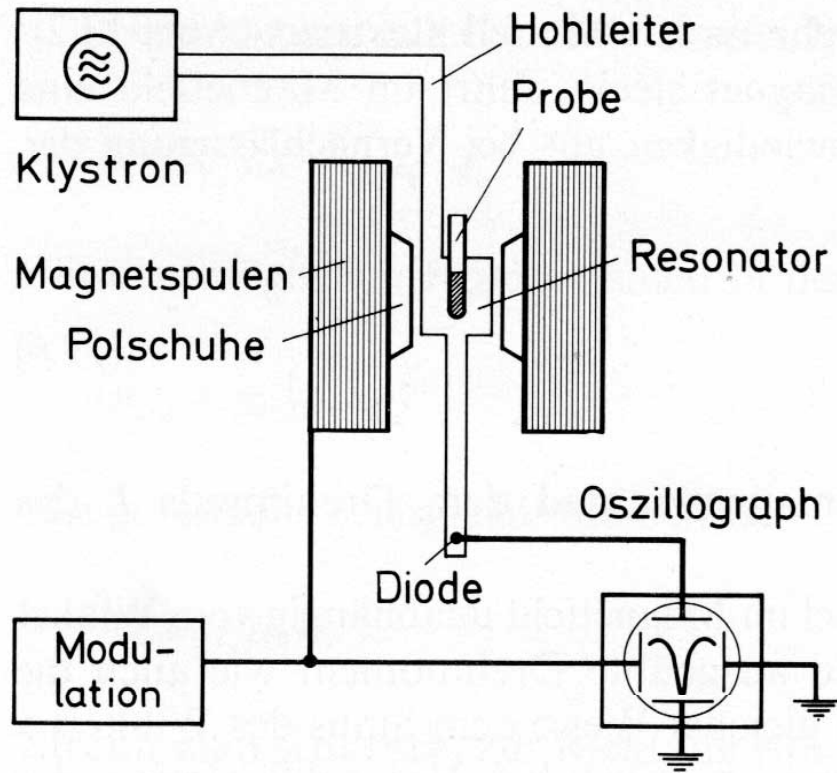
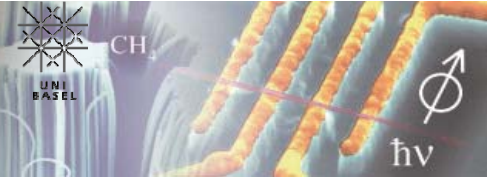
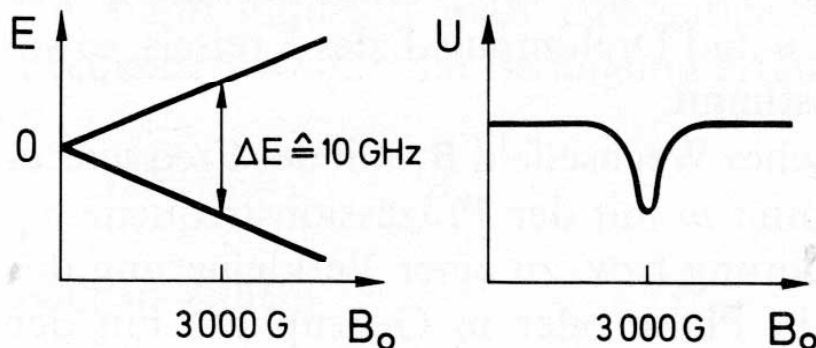


Abb. 13.3. Elektronenspinresonanz. Oben: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung. Die Probe befindet sich in einem Hohlraumresonator zwischen den Polschuhen eines Magneten. Die Mikrowellen werden von einem Klystron erzeugt und mit einer Diode nachgewiesen. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit wird das statische Feld B_0 moduliert. Unten links: Energiezustände eines freien Elektrons in Abhängigkeit vom Magnetfeld. Unten rechts: Signal U an der Diode in Abhängigkeit von B_0 im Resonanzfall



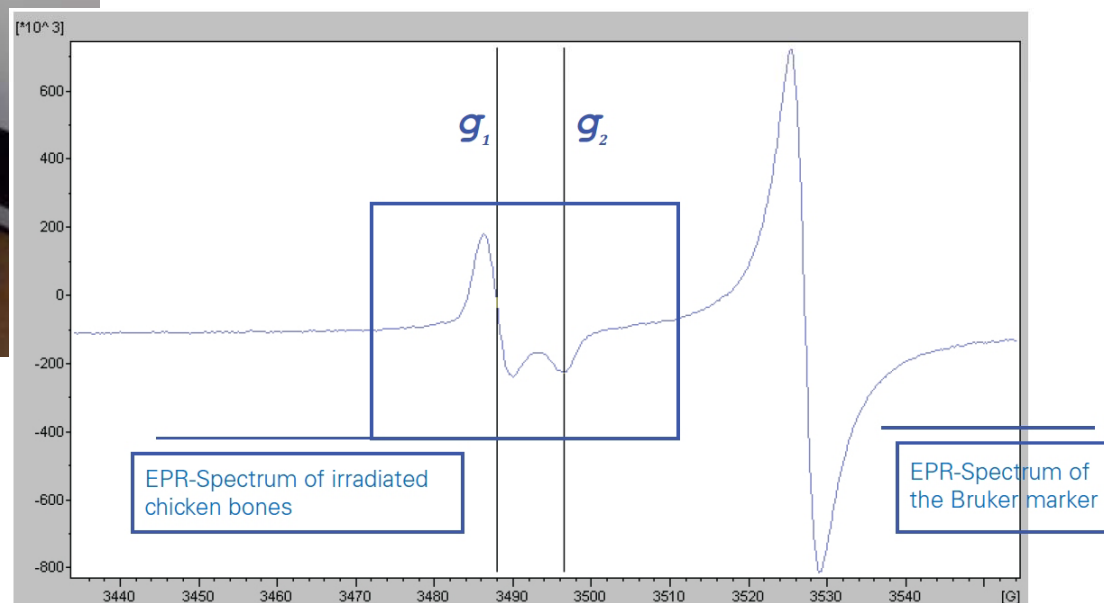
Elektronenspinresonanz

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



CH

$\hbar\nu$



Elektronenspinresonanz

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



NMR
ESR
EPR