

2.3. Atome in äusseren Feldern

2.3.1. Der Zeeman-Effekt



H. A. Lorentz



P. Zeeman

Nobelpreis für Physik 1902
(„...researches into the
influence of magnetism
upon radiation phenomena“)

Die Wechselwirkung eines Atoms mit einem externen Magnetfeld erfolgt über sein magnetisches Moment $\vec{\mu}_j$.

$$\text{mit } \vec{j} = \vec{l} + \vec{s}_p$$

Bahndrehimpuls Spin

Der zusätzliche Wechselwirkungsterm im Hamiltonoperator für ein Atom im Magnetfeld ist:

$$V_B = -\vec{\mu}_j \vec{B}$$

Wechselwirkungsterm für
Atome im Magnetfeld

Grenzfall: Schwaches Magnetfeld

$$V_B \ll V_{LS}$$

oder ungefähr $B \ll 1 \text{ T}$ (Magnetfeld am Ort des Elektrons)

Die Spin-Bahn-Kopplung dominiert. \vec{l} und \vec{s} koppeln zum Gesamtdrehimpuls \vec{j}
Die Wechselwirkung mit dem äusseren Feld ist eine kleine Störung.

Die Aufspaltung der Energieniveaus ist proportional zur magnetischen Quantenzahl m .

Es erfolgt eine Aufspaltung in $2j+1$ äquidistante Niveaus (proportional zu B)

—————→ Zeeman-Effekt

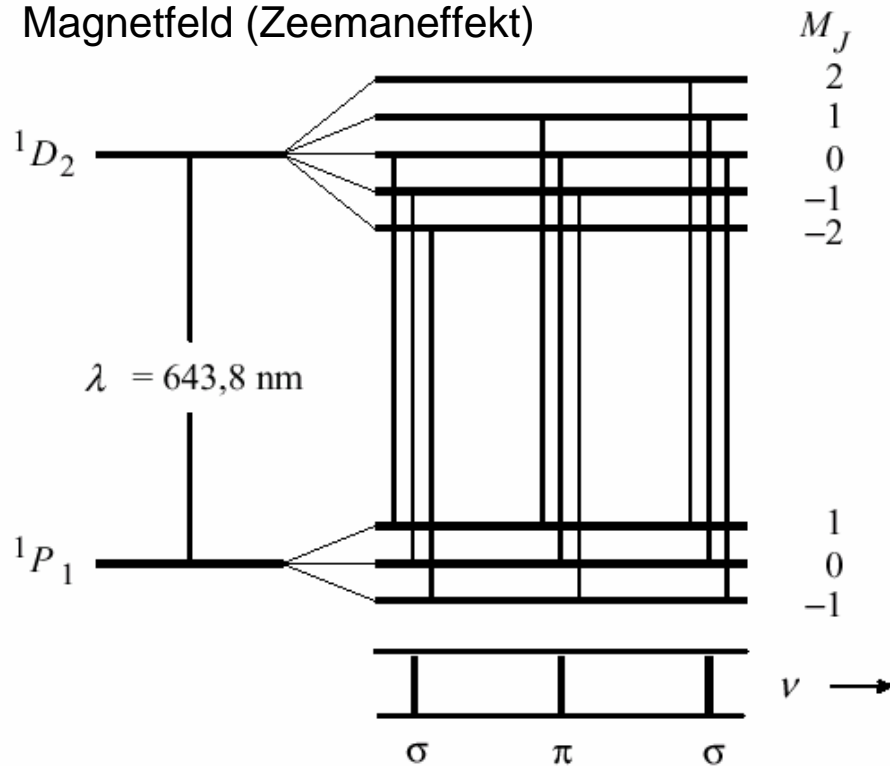
Grenzfall: Starkes Magnetfeld

$$V_B \gg V_{LS}$$

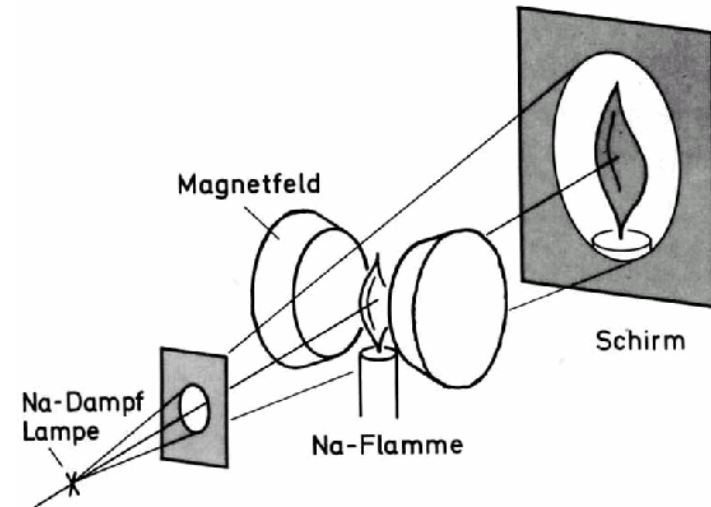
oder ungefähr $B \gg 1 \text{ T}$

Die Aufspaltung im starken Feld heisst Paschen-Back-Effekt.

Aufspaltung der Cd-Linie im schwachen Magnetfeld (Zeemaneffekt)



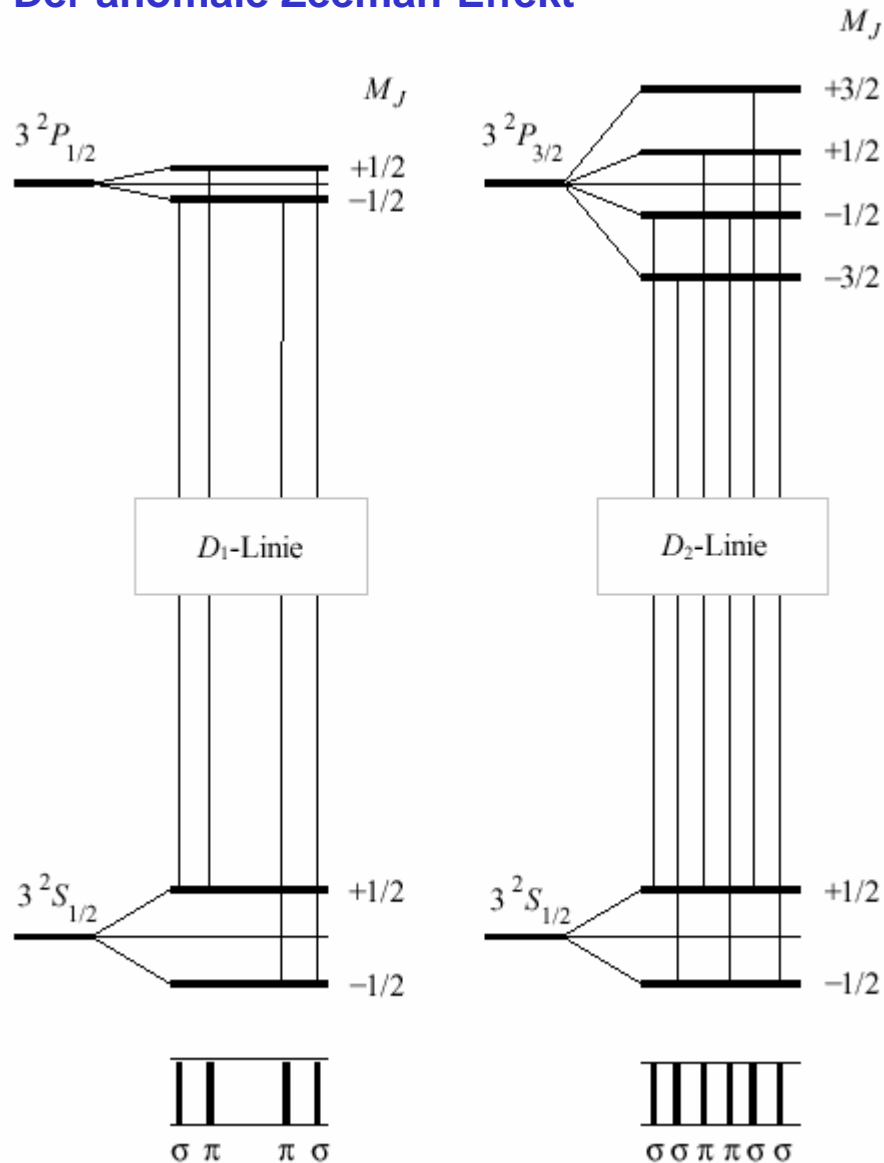
Experimenteller Nachweis der Linienverschiebung beim Zeemaneffekt:



Bemerkung: Die Überlegungen bleiben korrekt für Mehrelektronenatome mit den Ersetzungen:

$\vec{L} = \sum \vec{l}_i$	Gesamtbahndrehimpuls
$\vec{S} = \sum \vec{s}_i$	Gesamtspin
$\vec{J} = \sum \vec{j}_i$	Gesamtdrehimpuls

Der anomale Zeeman-Effekt



Aufspaltung der D_1 und der D_2 -Linie bei Natrium.

Wegen der unterschiedlichen Aufspaltung der Zustände mit verschiedener Quantenzahl j beobachtet man eine Vielzahl von Linien (4 bzw. 6).

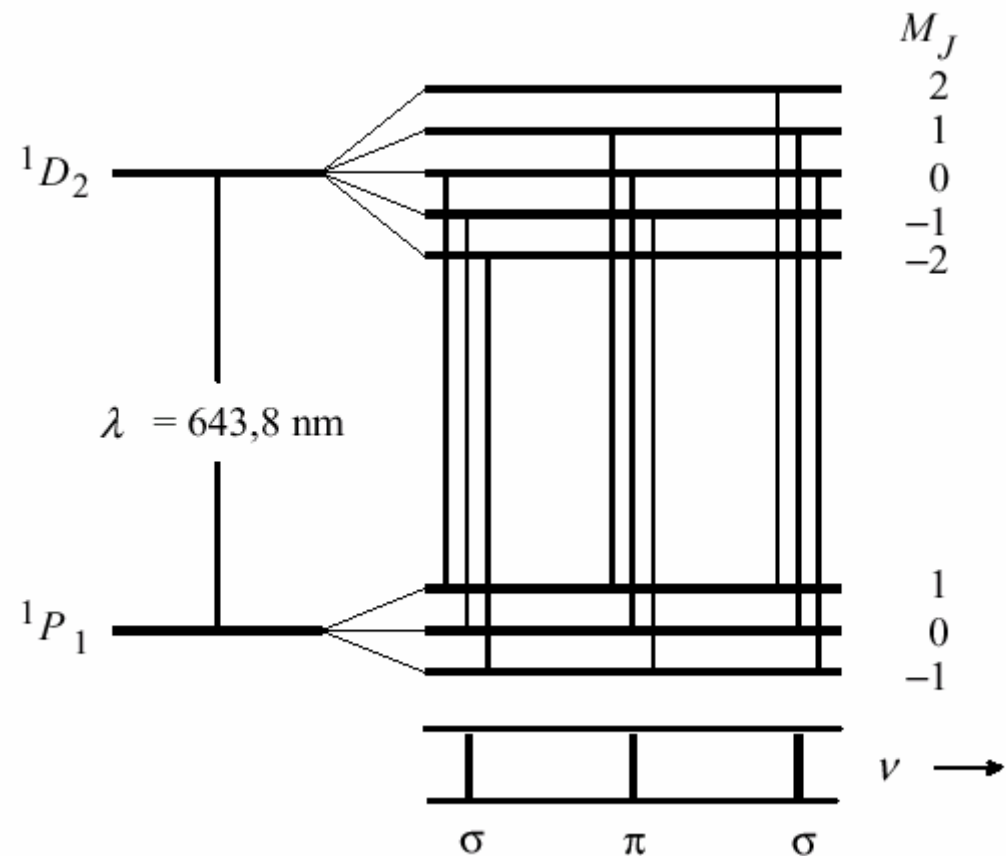
Dieses Verhalten ist der anomale Zeemann-Effekt.

Bem.: Der anomale Zeeman-Effekt ist eigentlich der Normalfall!

Der normale Zeeman-Effekt

Der normale Zeeman-Effekt wird für den Spezialfall $s=0$ beobachtet (klassischer Fall).

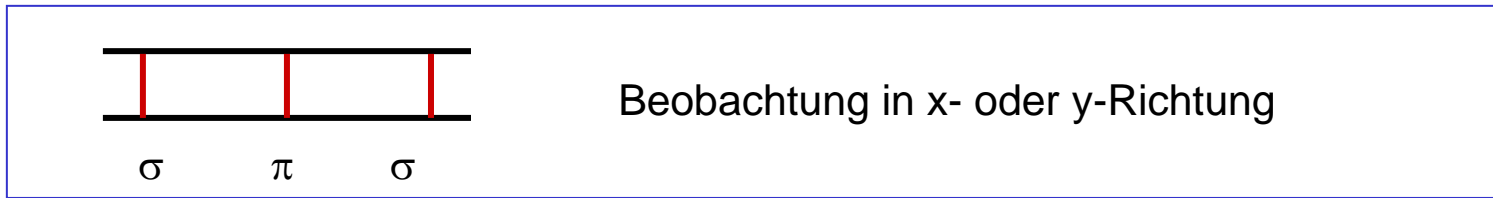
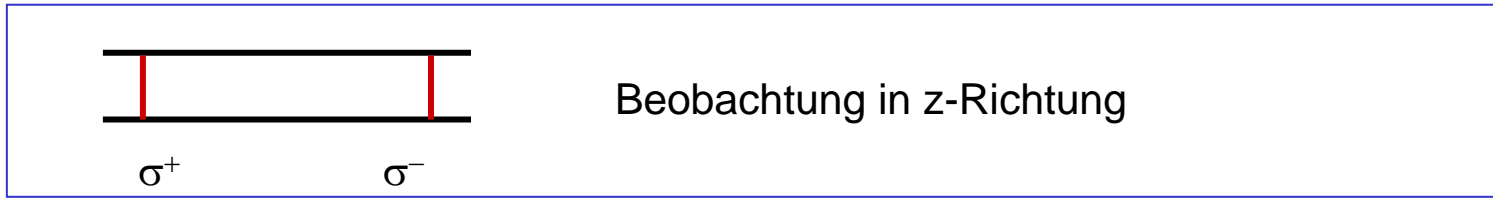
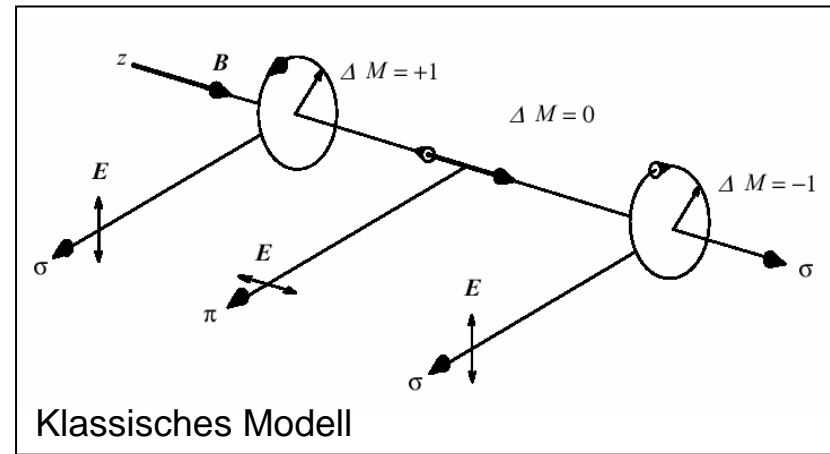
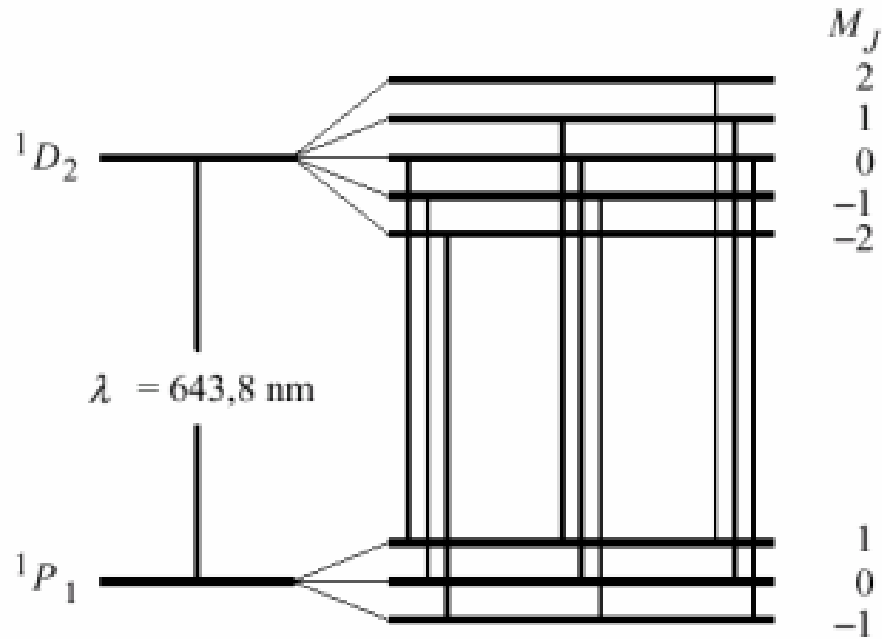
In diesem Spezialfall ist die Aufspaltung unabhängig von der Quantenzahl j und man beobachtet eine kleinere Anzahl von Linien (hier 3).



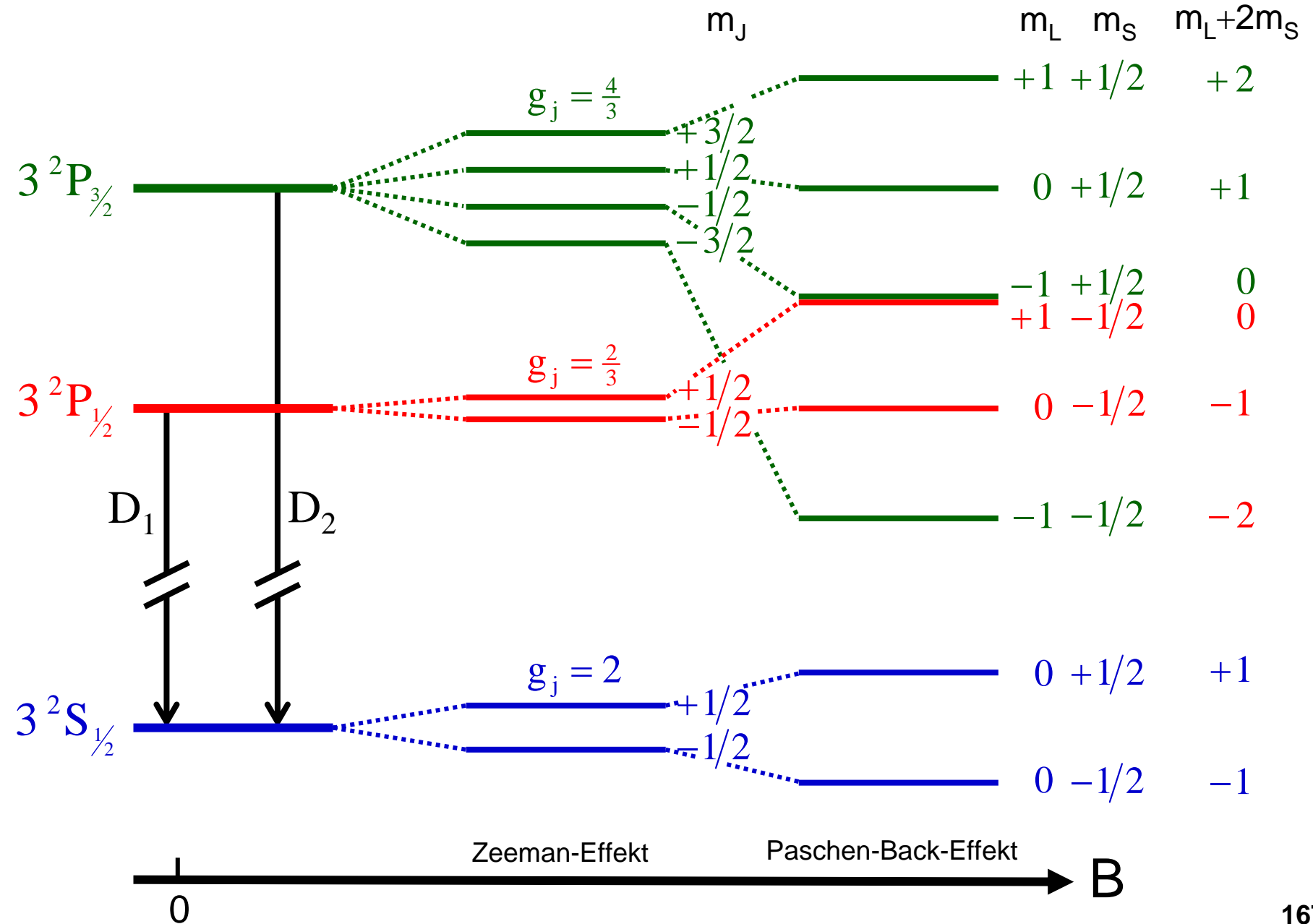
Normaler Zeeman-Effekt beim Cd.

Man beobachtet ein Linientriplett!

Polarisationsverhältnisse im normalen Zeeman-Effekt (Beispiel Cadmium):



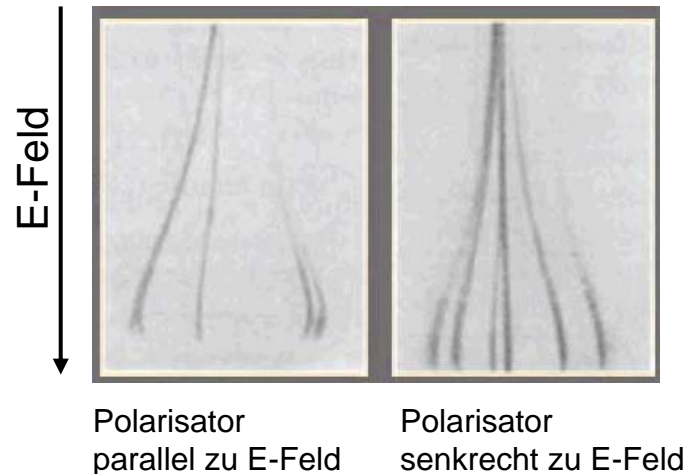
Zeeman- und Paschen-Back-Effekt für die Natrium-Linien D₁ und D₂



2.3.2. Der Stark-Effekt

Phänomenologische Behandlung:

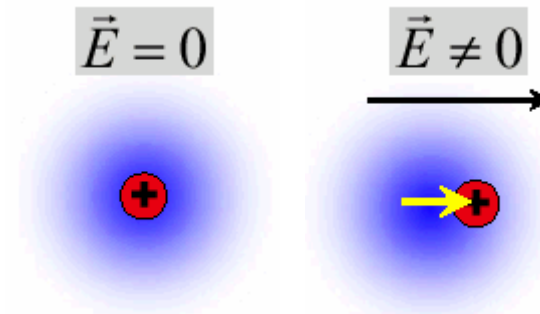
1913 entdeckte Stark eine Aufspaltung von Spektrallinien im elektrischen Feld.



Experimentelle Beobachtung der Aufspaltung einer Helium-Linie bei 438,8 nm.

Erklärung: Ein elektrisches Feld induziert ein elektrisches Dipolmoment durch Verschiebung der Elektronenhülle (Ladungsverteilung).

\longrightarrow Polarisierung $p = \alpha E$
 Dipolmoment \swarrow \nwarrow Polarisierbarkeit



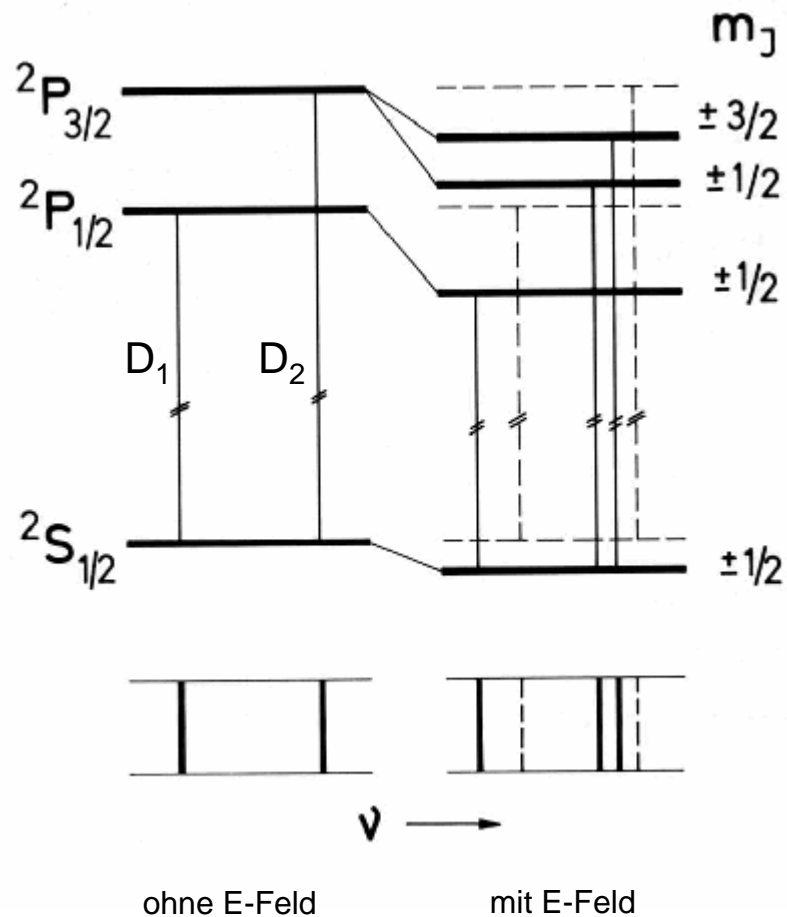
Somit ergibt sich für die potentielle elektrische Energie:

$$V_{el} = pE = \alpha E^2$$

Quadratischer Stark-Effekt

Beobachtung:

- Die Grösse der Aufspaltung der Energieniveaus hängt von der jeweiligen Ladungsverteilung und somit von den Quantenzahlen ab.
- Die Aufspaltung erfolgt in weniger Linien als beim Zeeman-Effekt; Die Aufspaltung hängt nur von $|m_j|$ ab; Aufspaltung in $J+1$ Niveaus.



Stark-Effekt in Natrium

Die Aufspaltung ist nur von der Grössenordnung $0.005 \text{ nm}/(10^7 \text{ V/m})$.

Beim Wasserstoff ist der Effekt komplizierter.

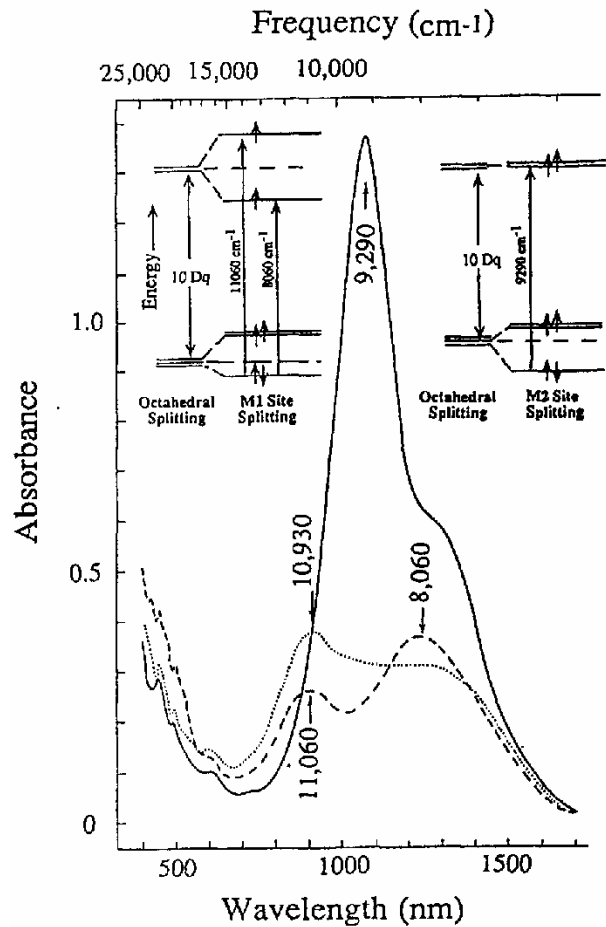
Grund: Es liegen bezüglich l entartete Niveaus vor, deren Entartung durch ein externes elektrisches Feld aufgehoben wird.

Man findet eine lineare Aufspaltung beim Wasserstoffatom:

$$V_{el} = \kappa E \quad \underline{\text{Linearer Stark-Effekt}} \text{ (Sonderfall, z.B. beim Wasserstoffatom!)}$$

Der Stark-Effekt spielt eine besondere Rolle bei:

- Molekülspektren
- Atomen in Kristallen (Kristallfeldaufspaltung)
- hochangeregten Atomen (Rydbergatomen)



Absorption in Olivin

Beispiel: Farbeffekte von Kristallen durch Stark-Aufspaltung im Kristallfeld.

Olivin (Mg,Fe)₂SiO₄: Die Kristallfeldaufspaltung führt zu Absorption im IR, Rot und Blau, somit gelb-grüne Färbung



Almandin (Fe₃Al₂Si₃O₁₂): Starke Absorption von Gelb, Blau, Grün, somit rote Farbe

