

1. Absorption
2. Photolumineszenz
3. PLE - Photolumineszenzanregungspektroskopie
4. Aufnahme verschiedener Spektren
5. Anwendungen von Photolumineszenz

- Absorption eines Photons Anregung eines Elektrons in energetisch höher liegendes Niveau
- Absorptionswahrscheinlichkeit maximal, sofern Energie des Photons der Energiedifferenz der beiden Niveaus entspricht

Absorptionskoeffizient α :

$$\alpha = C \cdot \sum n_i n_f P_{if}$$

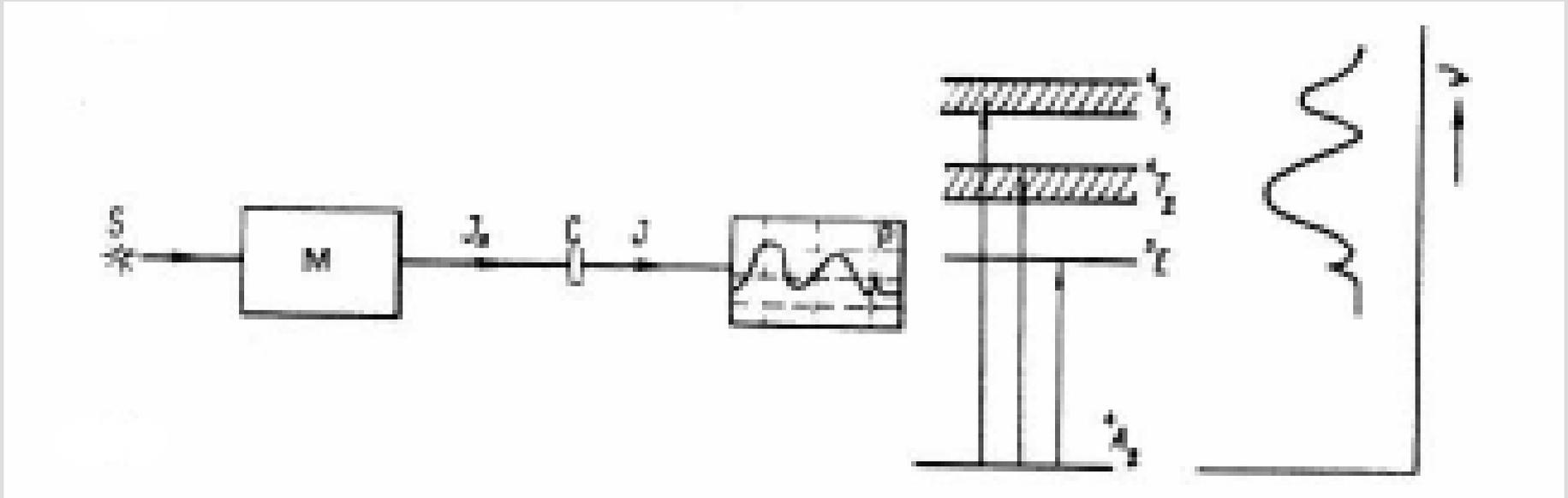
n_i : Elektronendichte im Anfangszustand

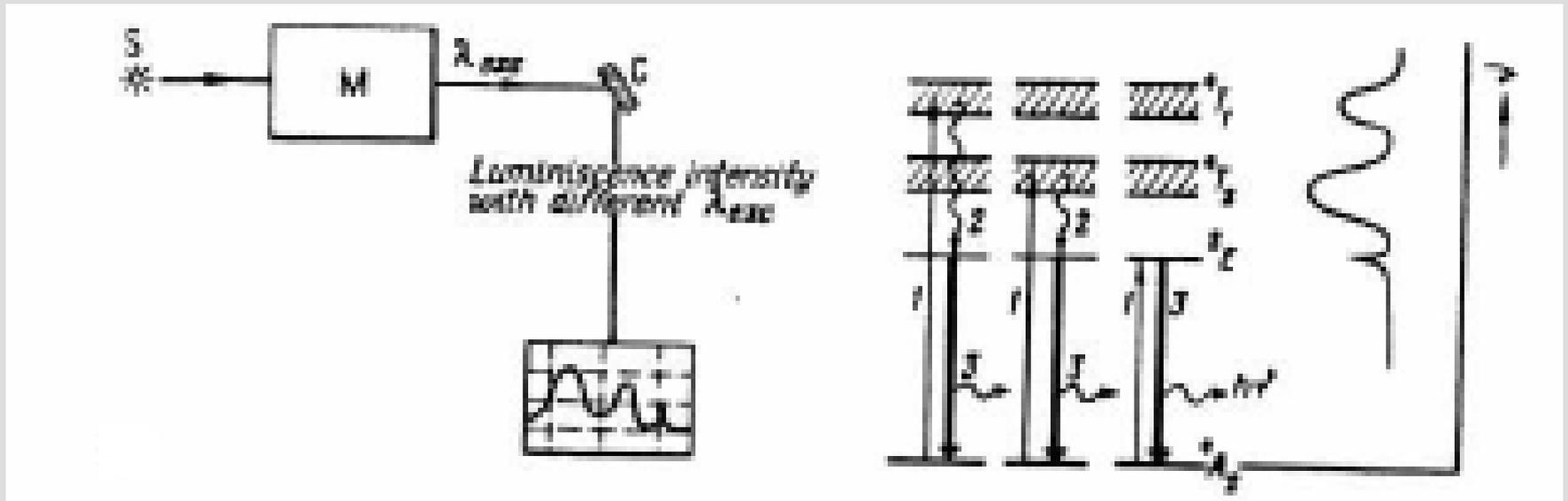
n_f : Dichte der leeren Endzustände

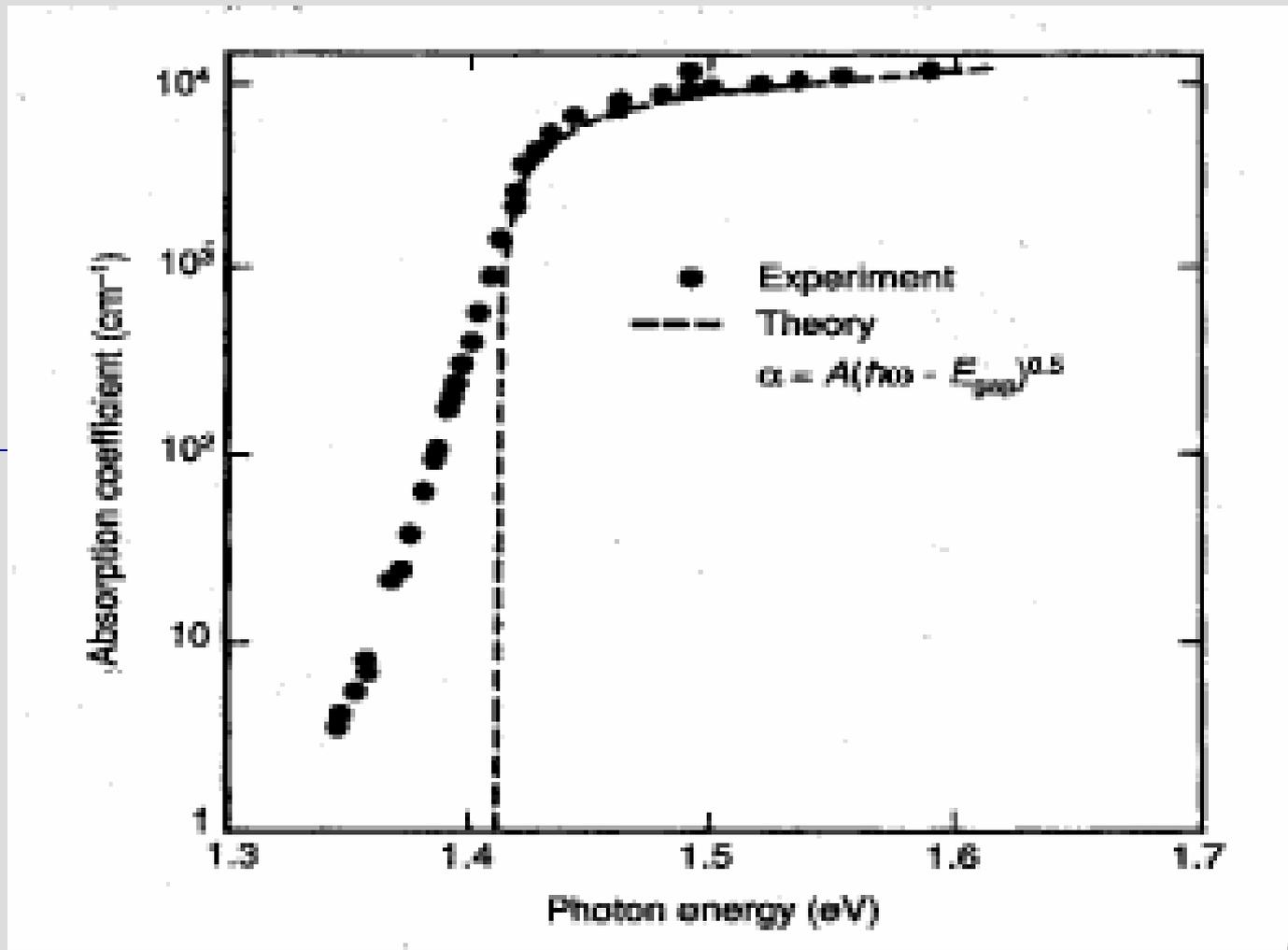
P_{if} : Übergangswahrscheinlichkeit vom Anfangs-zum Endzustand

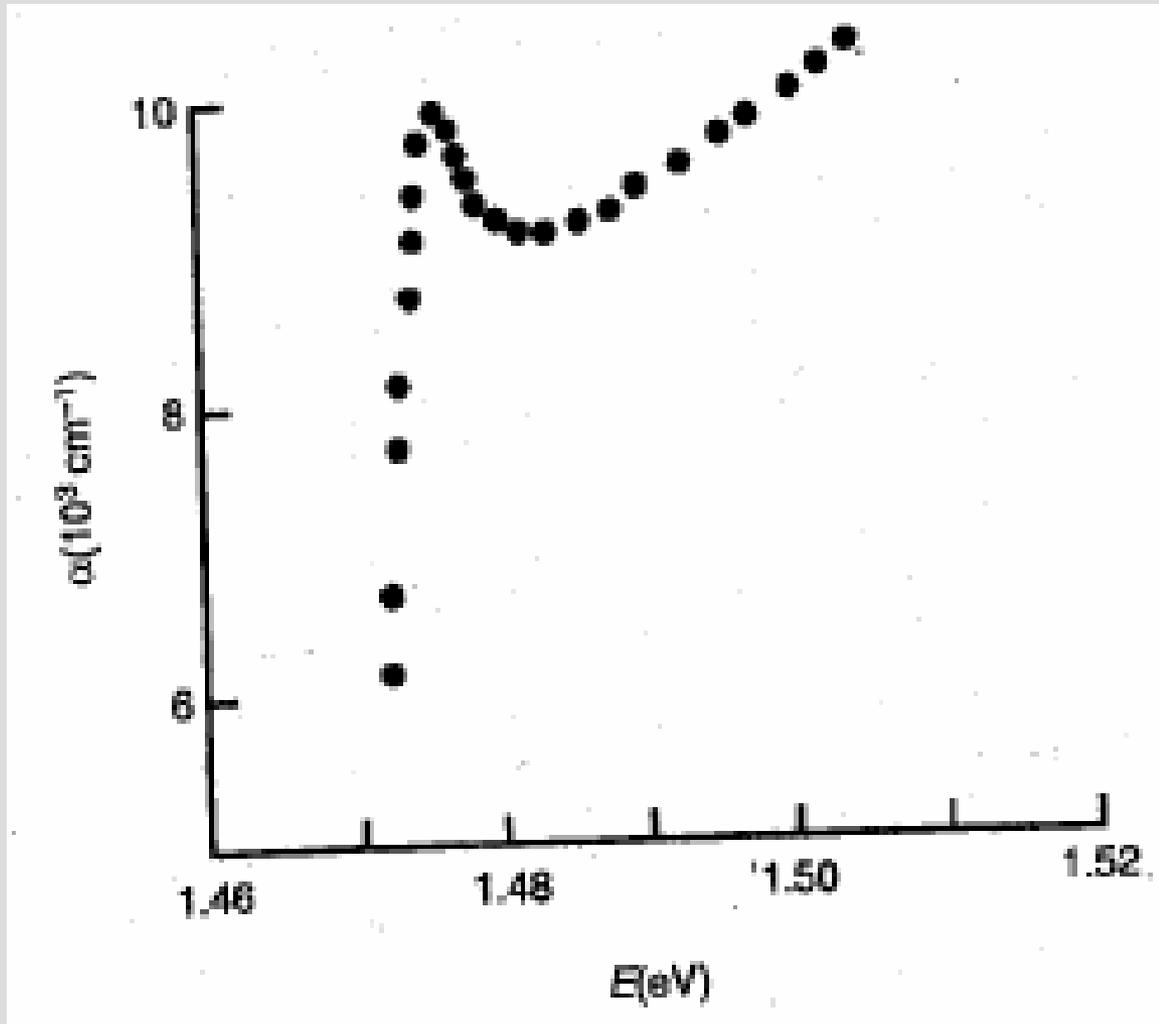
C : Konstante

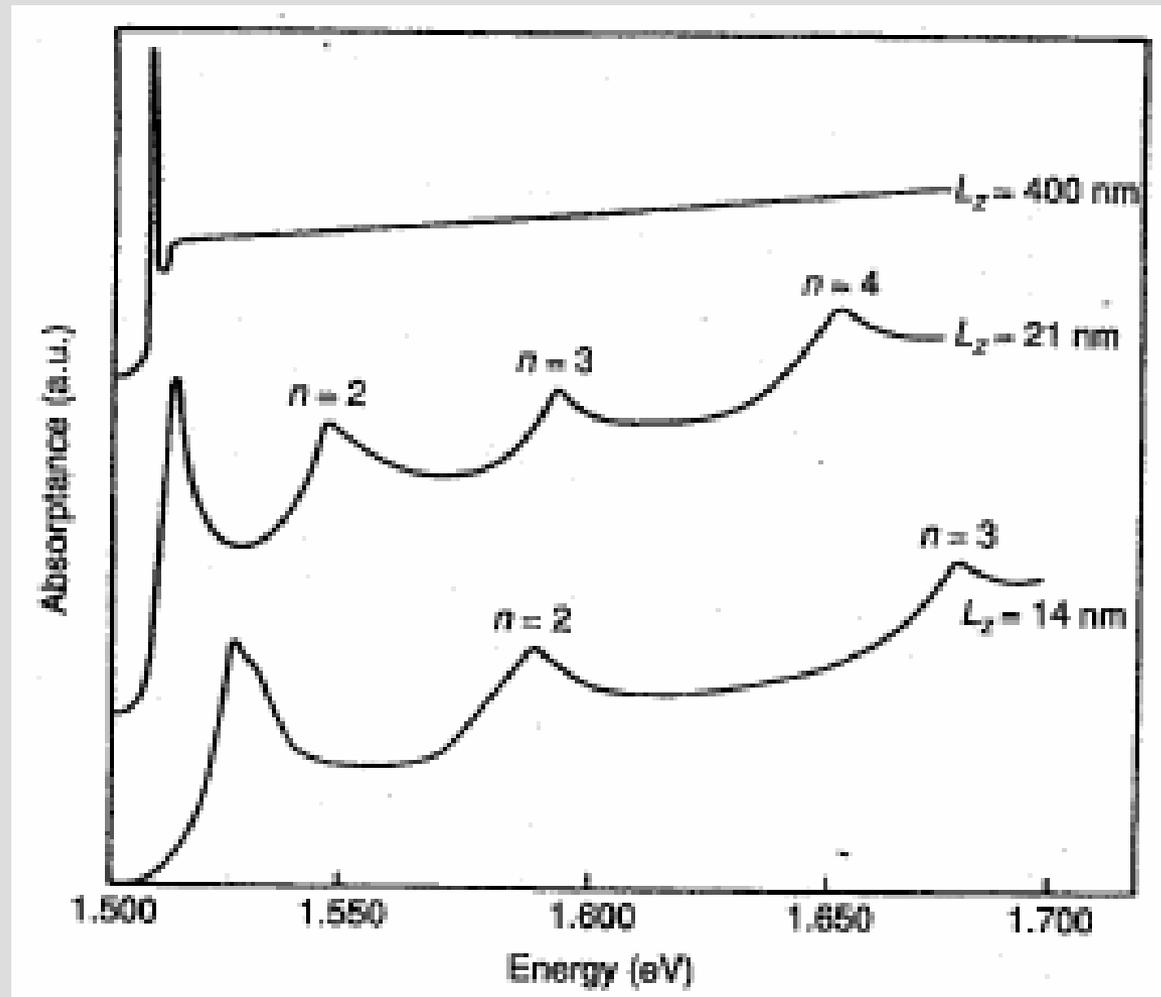
(summiert wird über alle Zustände, deren Energiedifferenz der Energie des Photons entspricht)



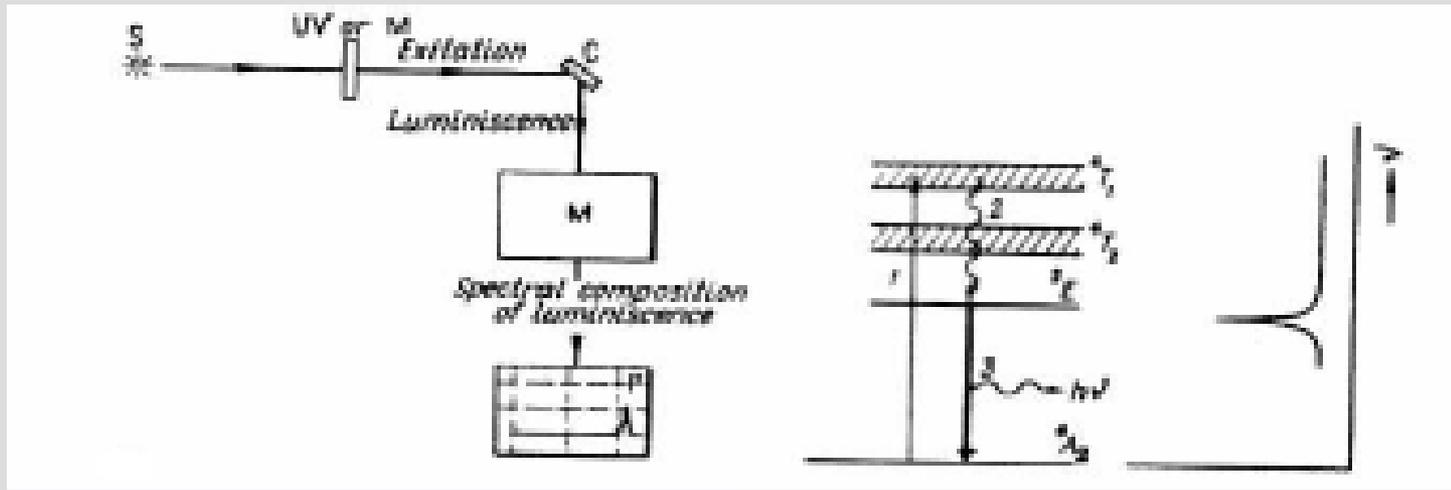


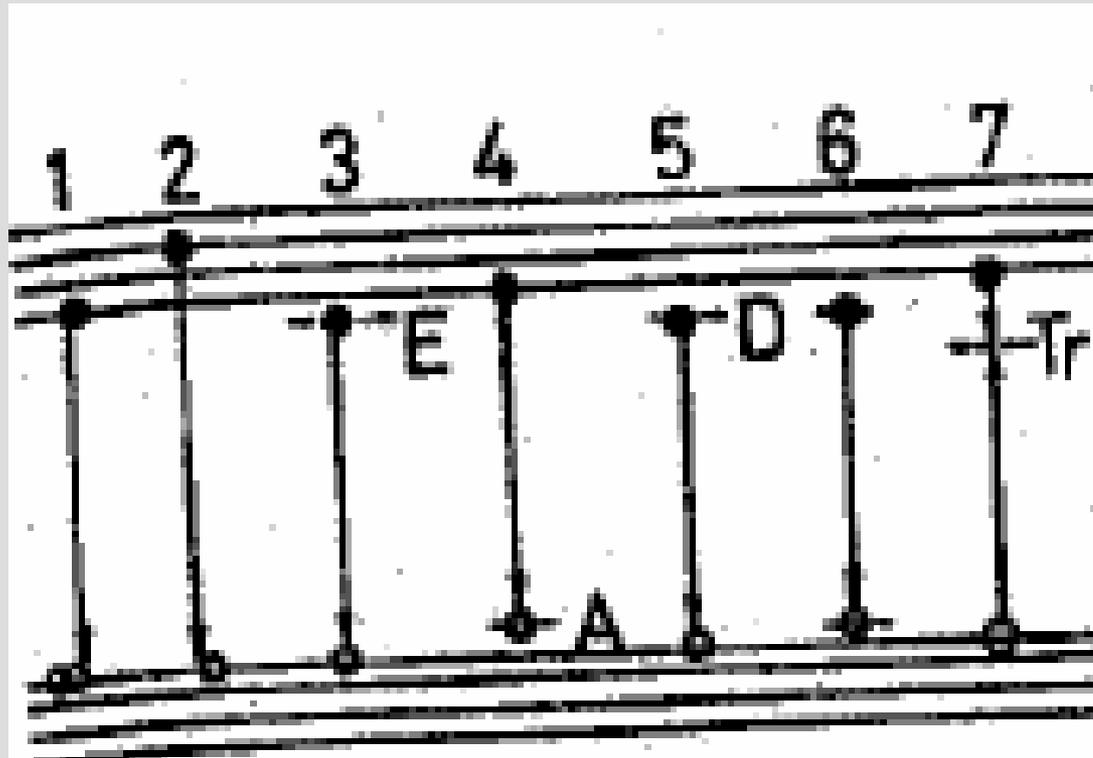




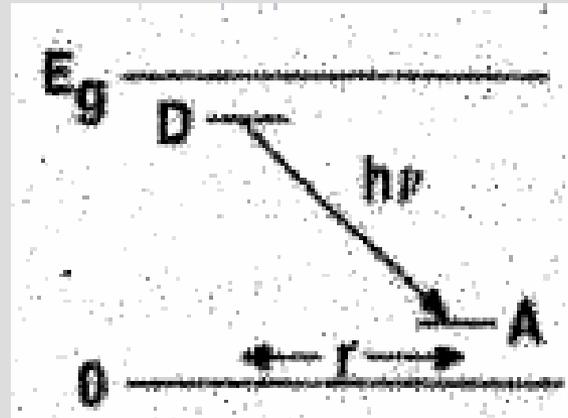


- als Lumineszenz bezeichnet man die Rekombination eines angeregten Elektrons unter Emission eines Photons
- zur Lumineszenz konkurrierender Prozess: strahlungslose Rekombination
- Voraussetzung für Lumineszenz:
Vorhandensein eines Ungleichgewichtszustandes in der Ladungsträgerkonzentration in Energiebändern verursacht durch
 - intensive Lichteinstrahlung: Photolumineszenz
 - elektrische Felder: Elektrolumineszenz

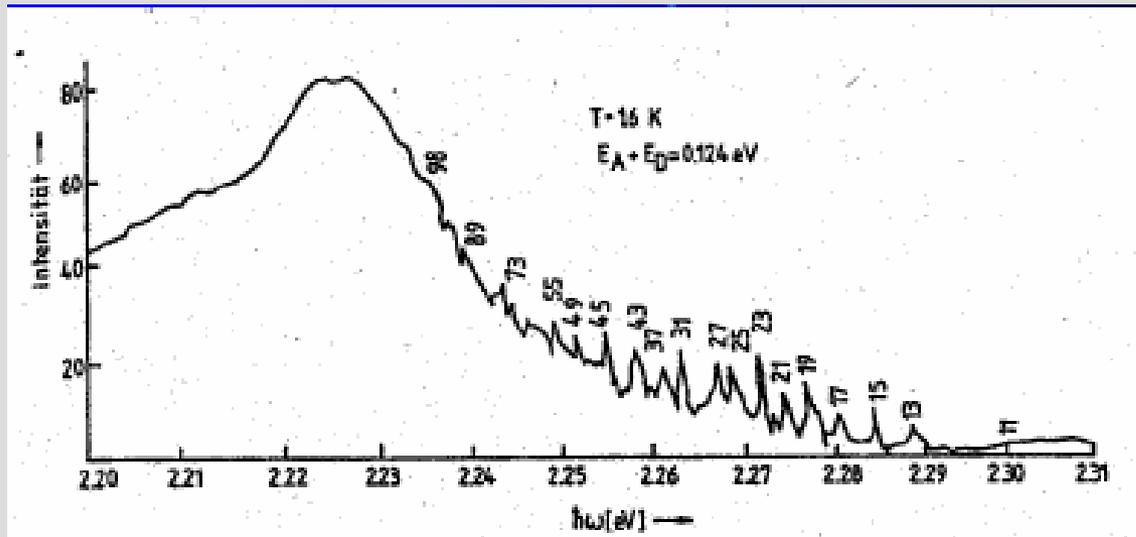




Spektrum von Si-Te Paaren in GaP



$$E_{D^{\circ}A^{\circ}} = E_{gap} - E_D - E_A + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon R}$$

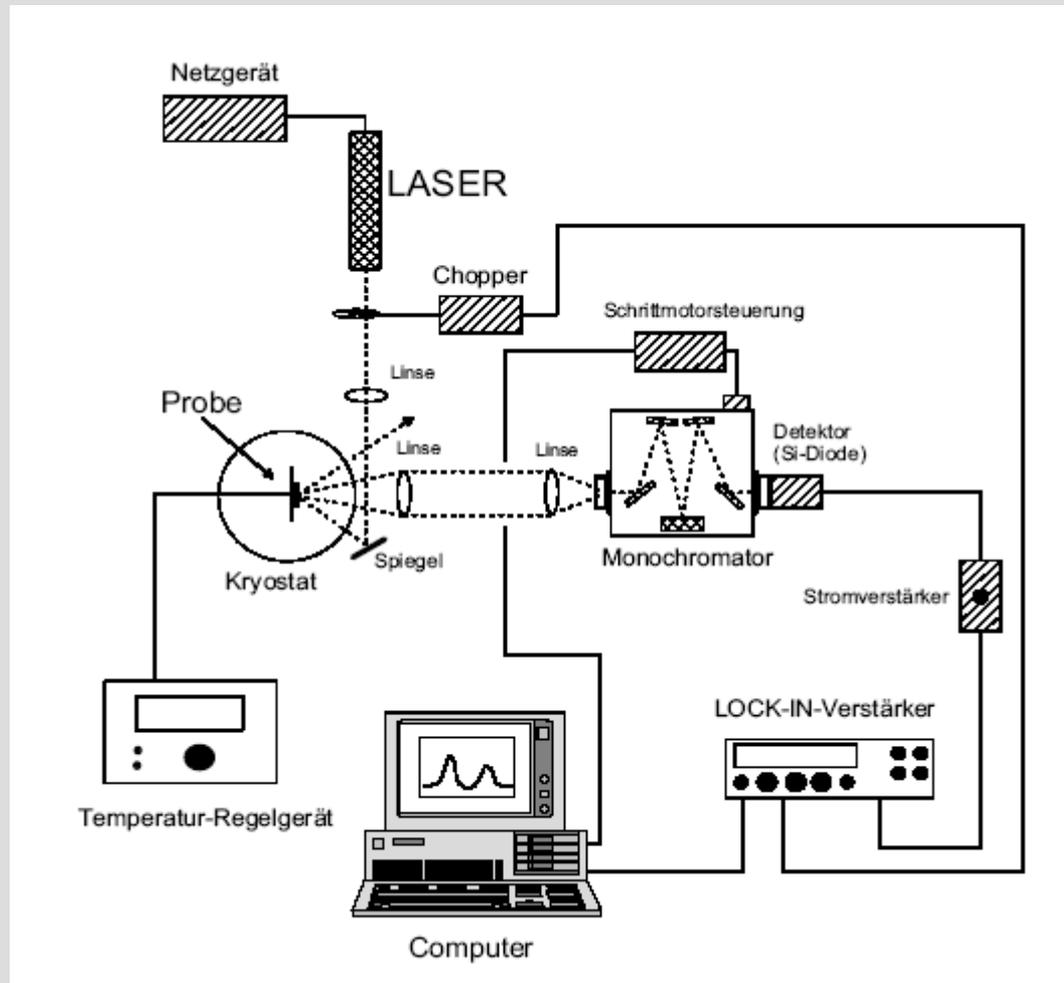


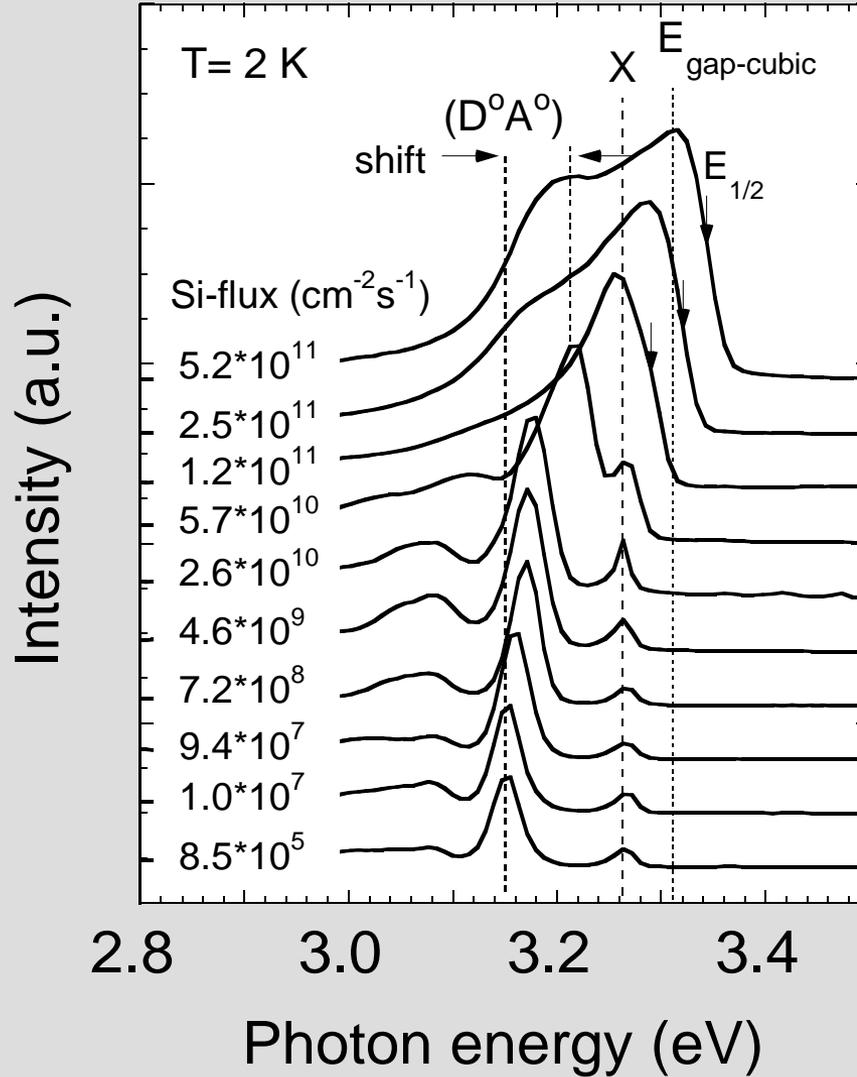
Im PL-Spektrum hinterlassen Störstellen und Defekte charakteristische Merkmale

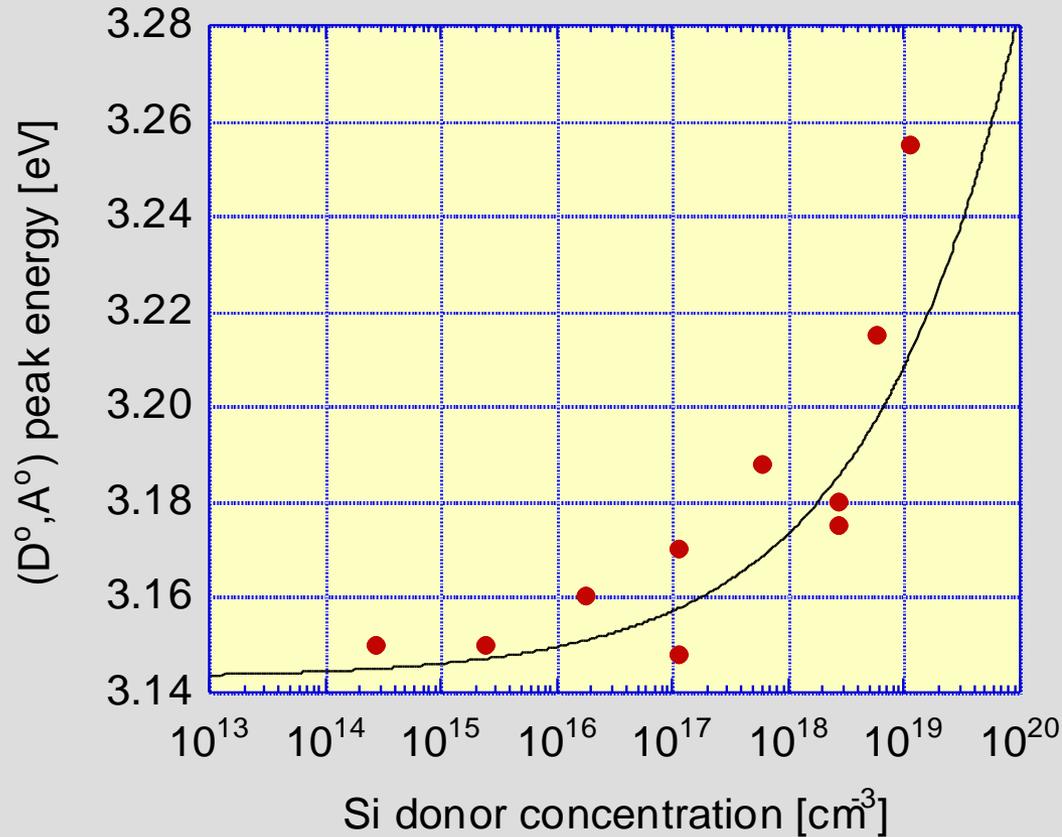
⇒ Photolumineszenz ist optische Methode zur Charakterisierung von Störstellen und Defekten in Halbleitern

Aus dem PL-Spektrum lassen sich

- die unterschiedliche Defekte identifizieren
- die Konzentrationen von Defekten ermitteln
- Anzeichen für Qualität des Materials und deren kristalline Struktur finden (FWHM der Peaks)
- Energielücken bestimmen (z.B. $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$)
- Inhomogenitäten im Material ermitteln
- die Amplitude und Richtung mechanischer Spannung im Material messen



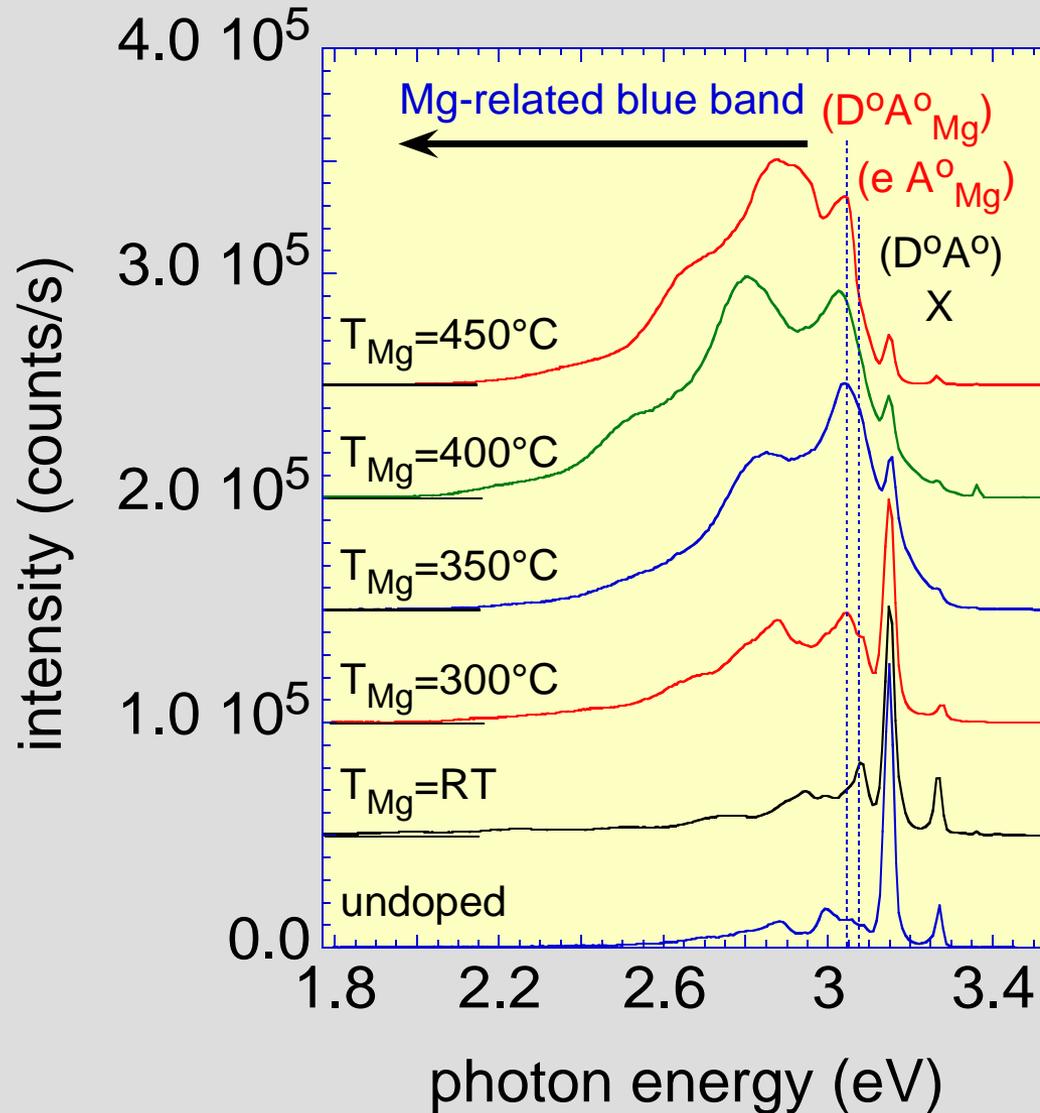


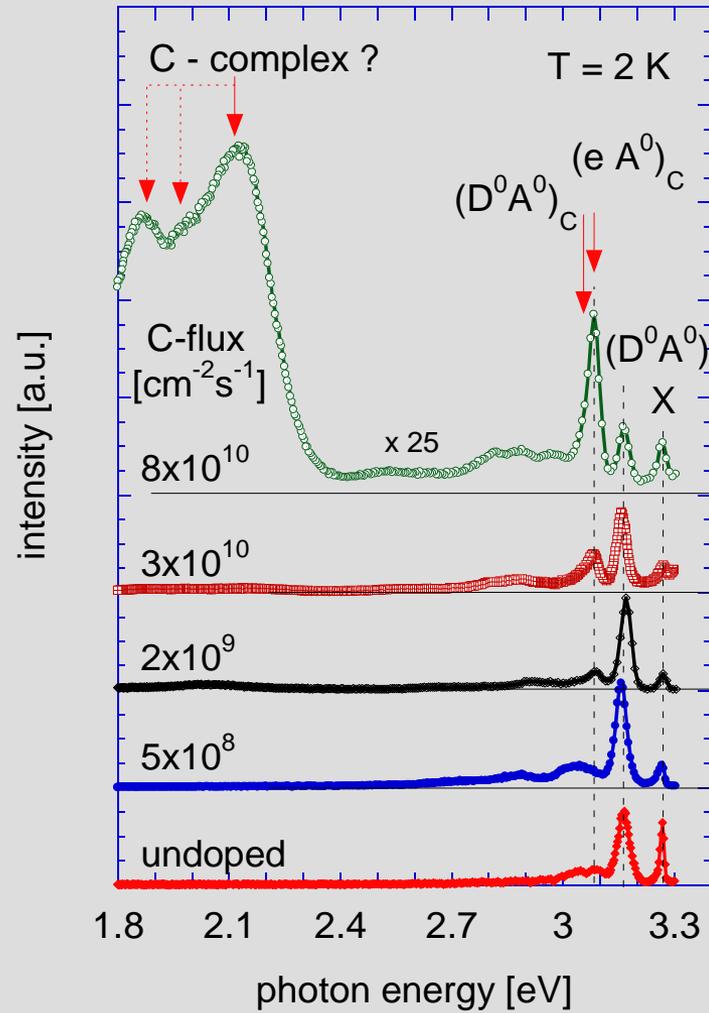


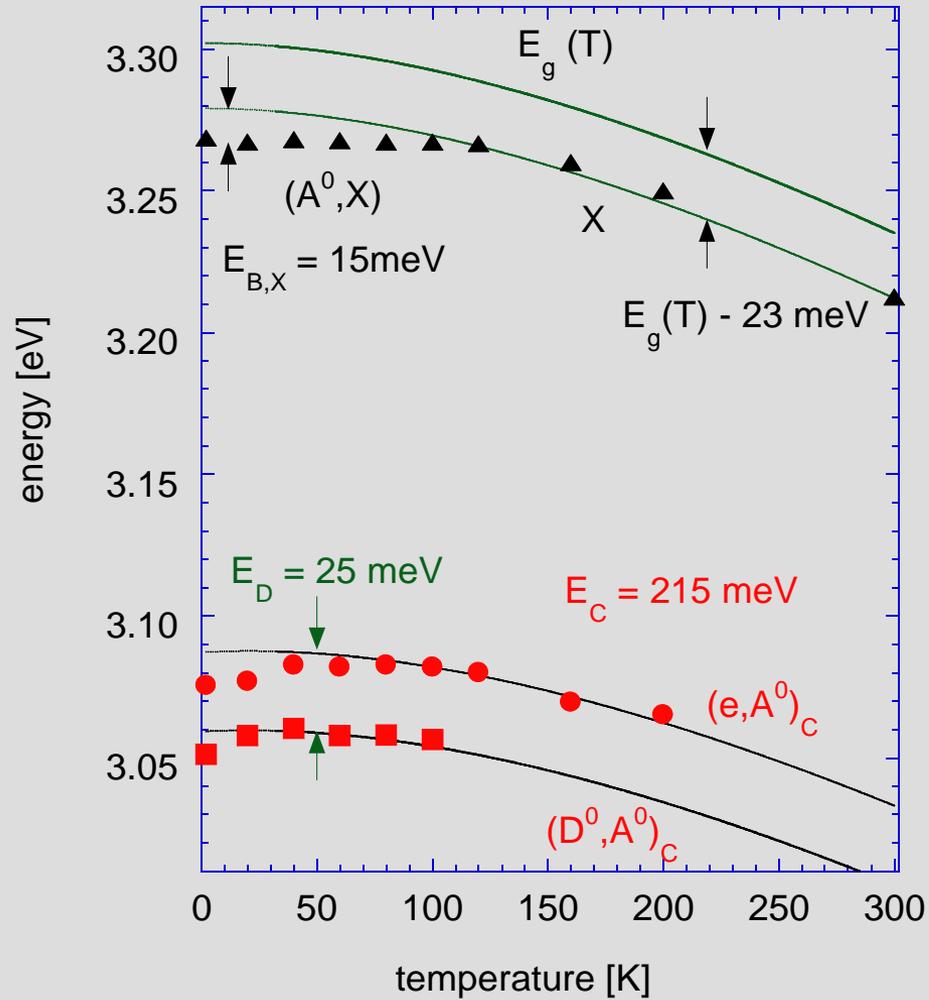
Energie des Donator Akzeptor Übergangs:

$$E_{D^{\circ}A^{\circ}} = E_{gap} - E_D - E_A + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon R}$$

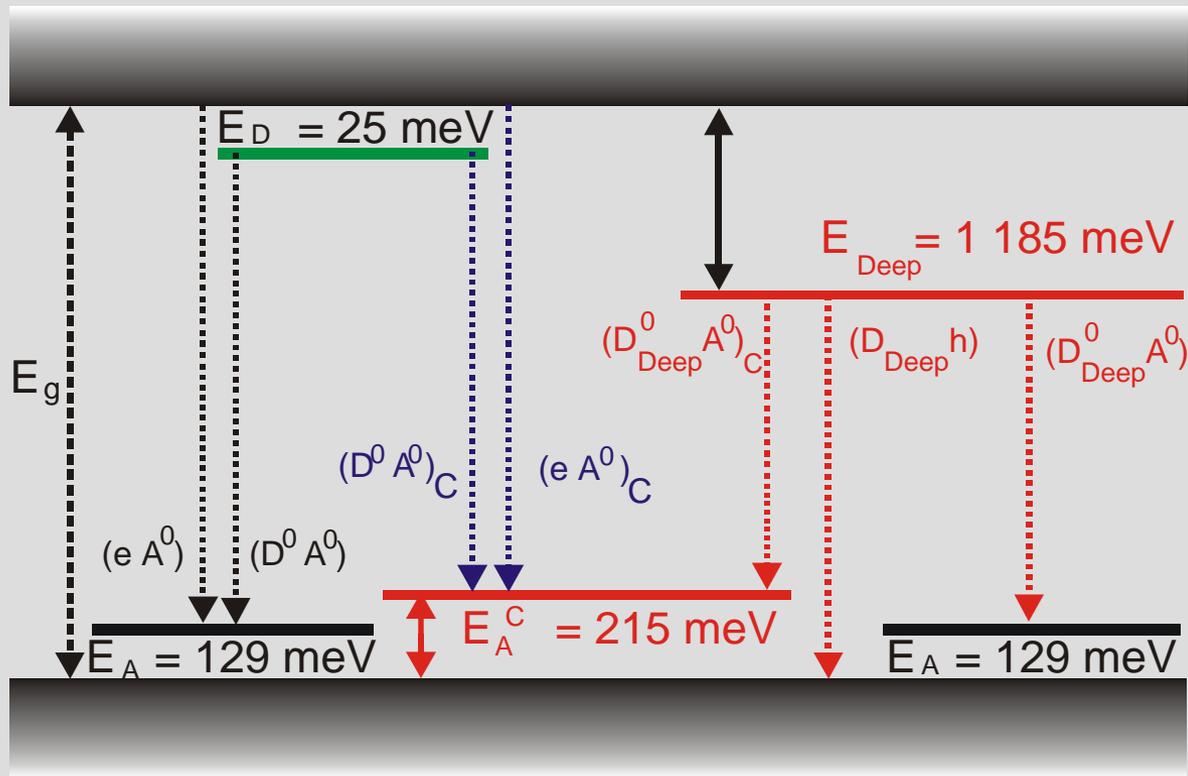
$$R \approx \sqrt[3]{N_{Si}}$$

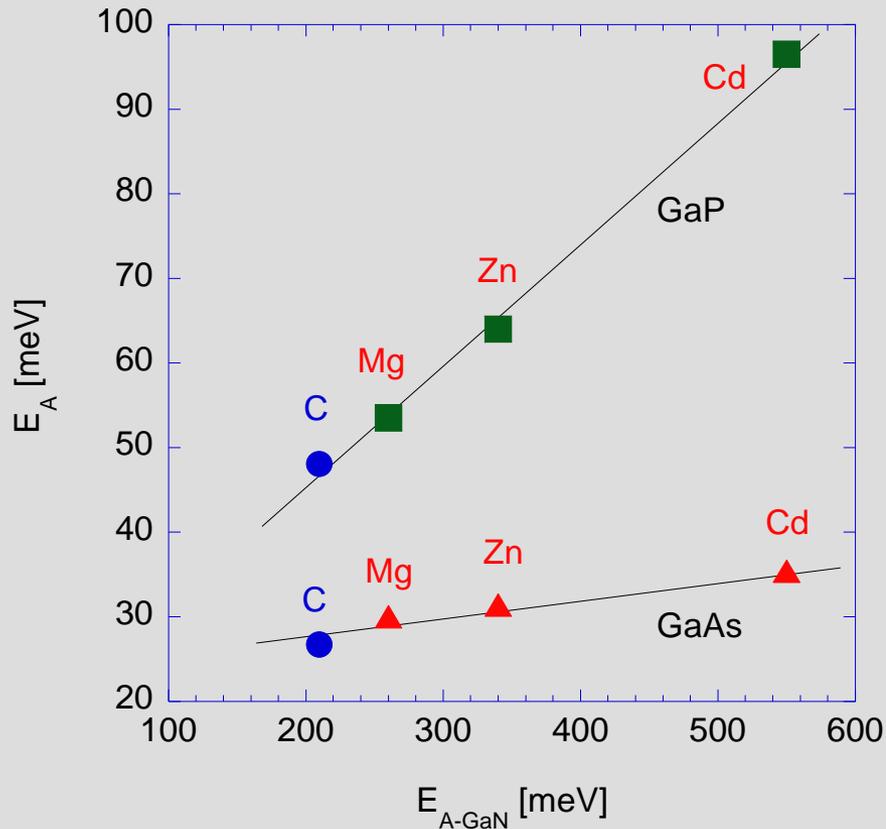






Schematic diagram of the energy levels in carbon doped cubic GaN epilayers





Effective-mass-theory (EMT) [14, 15]:

$$E_A = \frac{13.58 \text{ eV}}{\varepsilon(0)^2} \cdot m_{hh} \cdot \gamma$$

} γ is 0.6 [14,15]

} $\varepsilon(0) \rightarrow \varepsilon(\infty)$ [16]

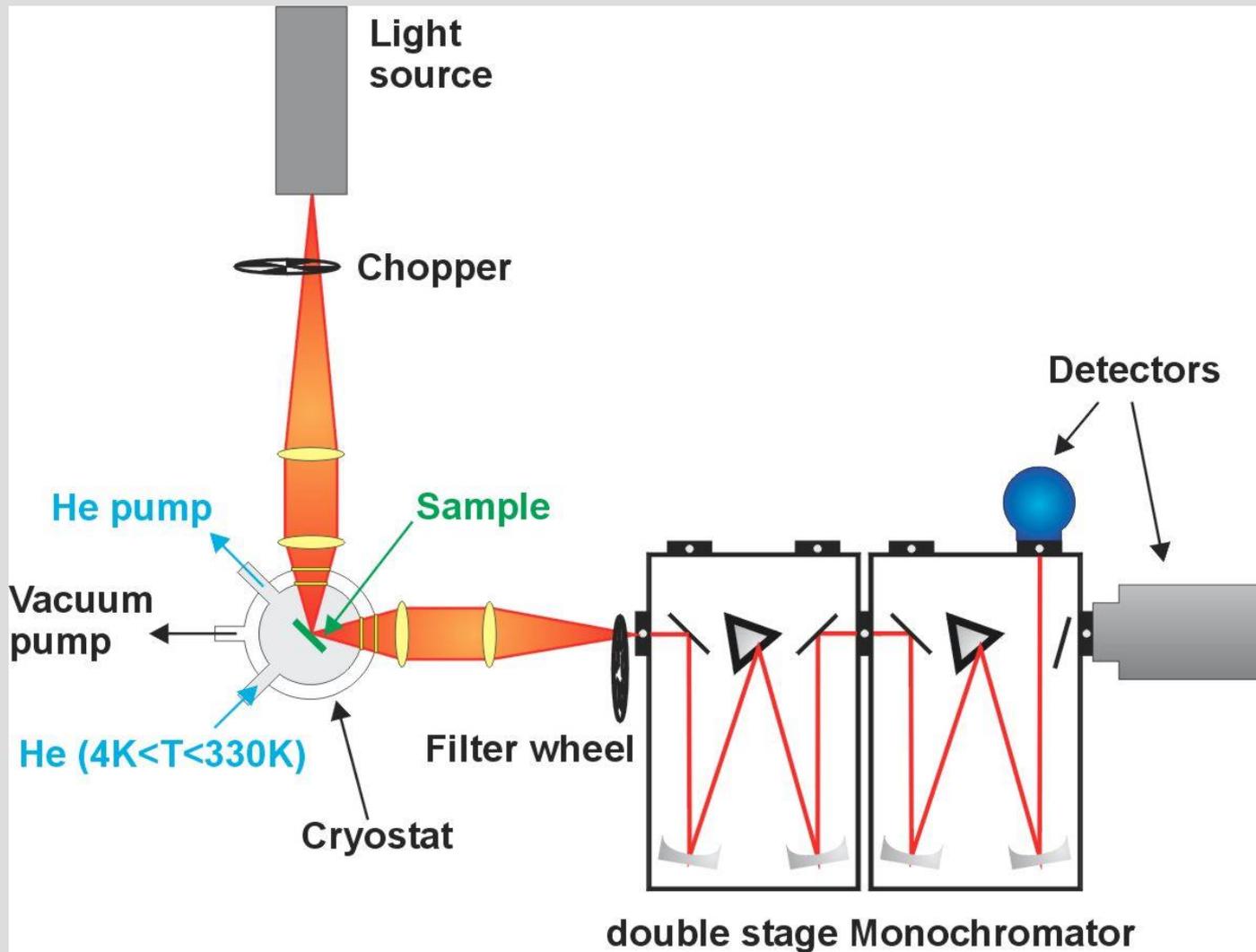
$$E_A = 0.213 \text{ eV}$$

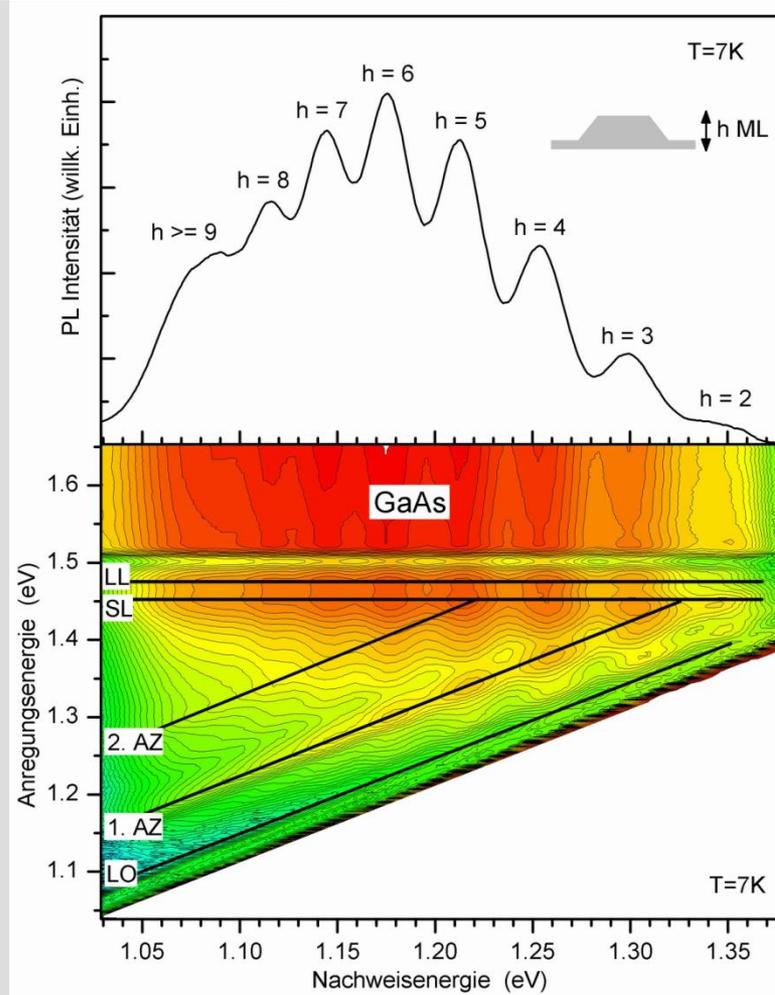
[14] B.L. Gel'mont et al., *Sov. Phys. Semicond.* **5** (11), 1905 (1972)

[15] S. Fischer et al., *Appl. Phys. Lett.* **67** (9), 1298 (1995)

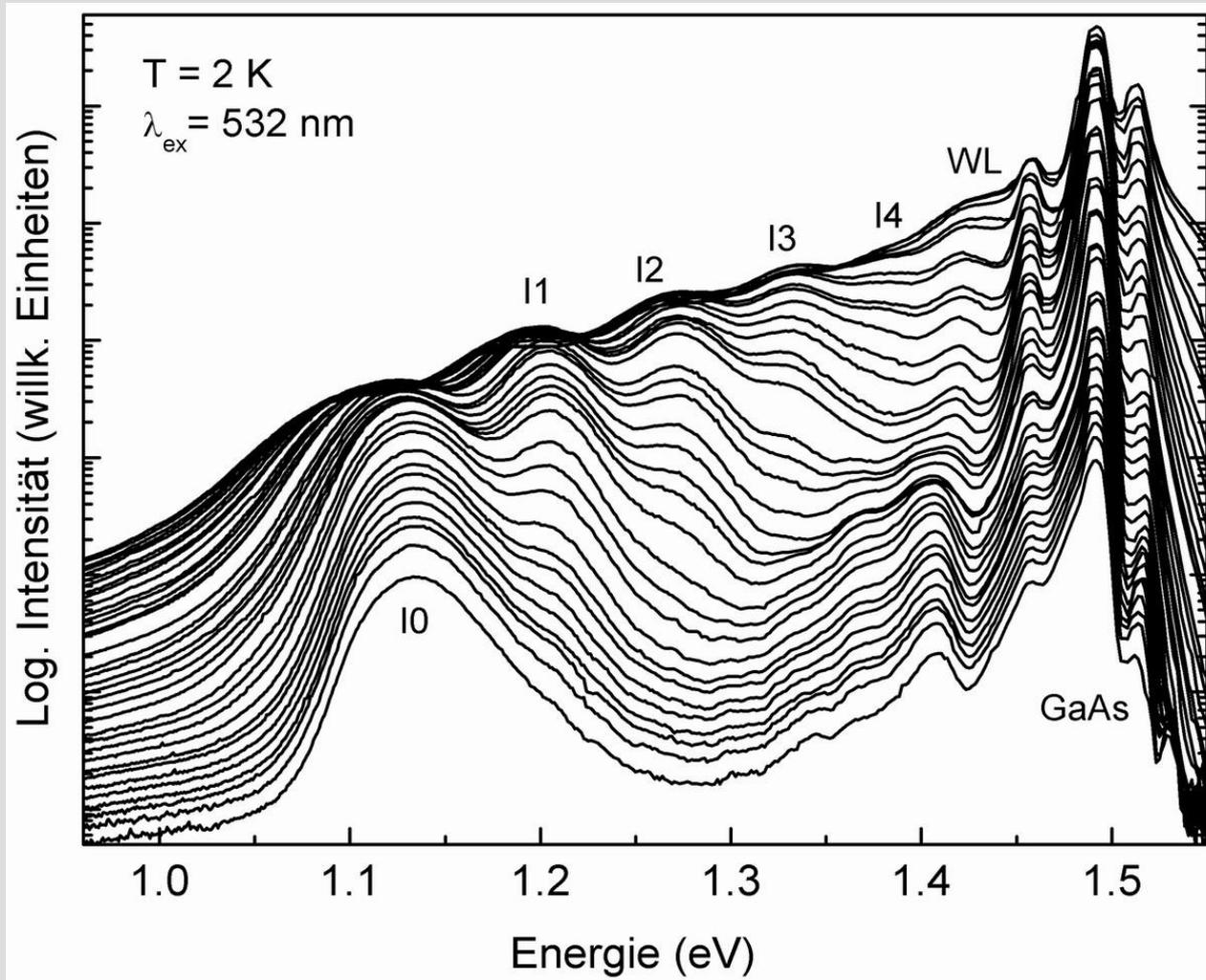
[16] J.W. Orton, *Semicond. Sci. Technol.* **10**, 101 (1995)

[17] H. Siegle et al., *Solid State Commun.* **96** (12), 943 (1995)

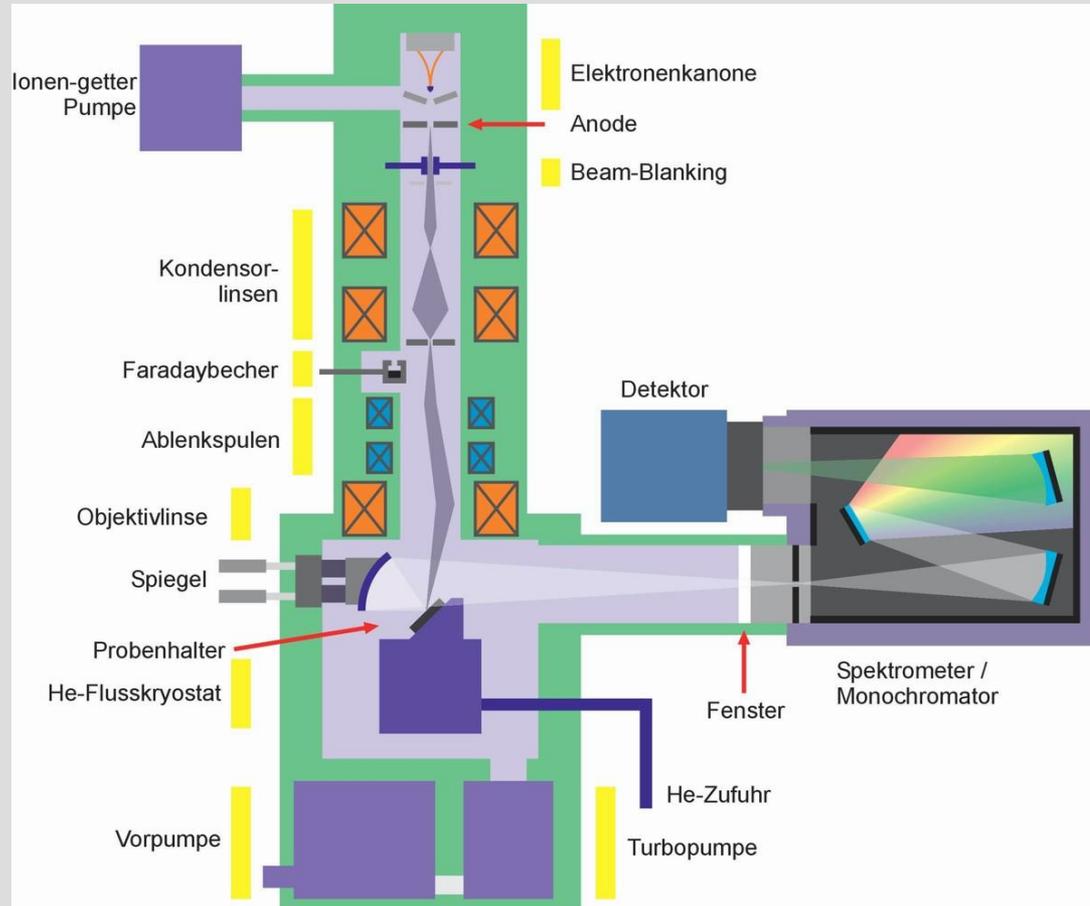




Oben: PL Spektrum von InAs Quantenpunkten bei einer Anregungsenergie von 1,65 eV und geringer (!) Anregungsdichte. Die verschiedenen Peaks stammen von QP-Subensembles unterschiedlicher Höhe, wie im Inset skizziert. Unten: Zugehöriger PLE-Konturplot. Bei 1,5 eV ist die Resonanz der GaAs Matrix zu sehen. Die horizontalen Linien markieren die Resonanzen der Schwerloch (SL) und Leichtloch (LL) Zustände der Benetzungsschicht und die schrägen Linien zeigen den Verlauf des ersten (1. AZ) und zweiten (2. AZ) angeregten QP-Zustandes sowie der LO-Resonanz (LO).



PL Spektren unter sukzessiver Erhöhung der Anregungsdichte (von unten nach oben). Mit steigender Anregungsdichte ist ein Auffüllen der QPe in Form von neuen Lumineszenzbanden aus angeregten Zuständen (I1-I4) zu beobachten. Schließlich wird auch die Benetzungsschicht (WL) unter den QPen befüllt. Diese Peaks sind nicht mit Lumineszenz aus QP-Subensembeln wie in Abb. 4 verwechseln. Für eine geringe Anregungsdichte zeigt der Grundzustandspeak I0 keine Modulation!

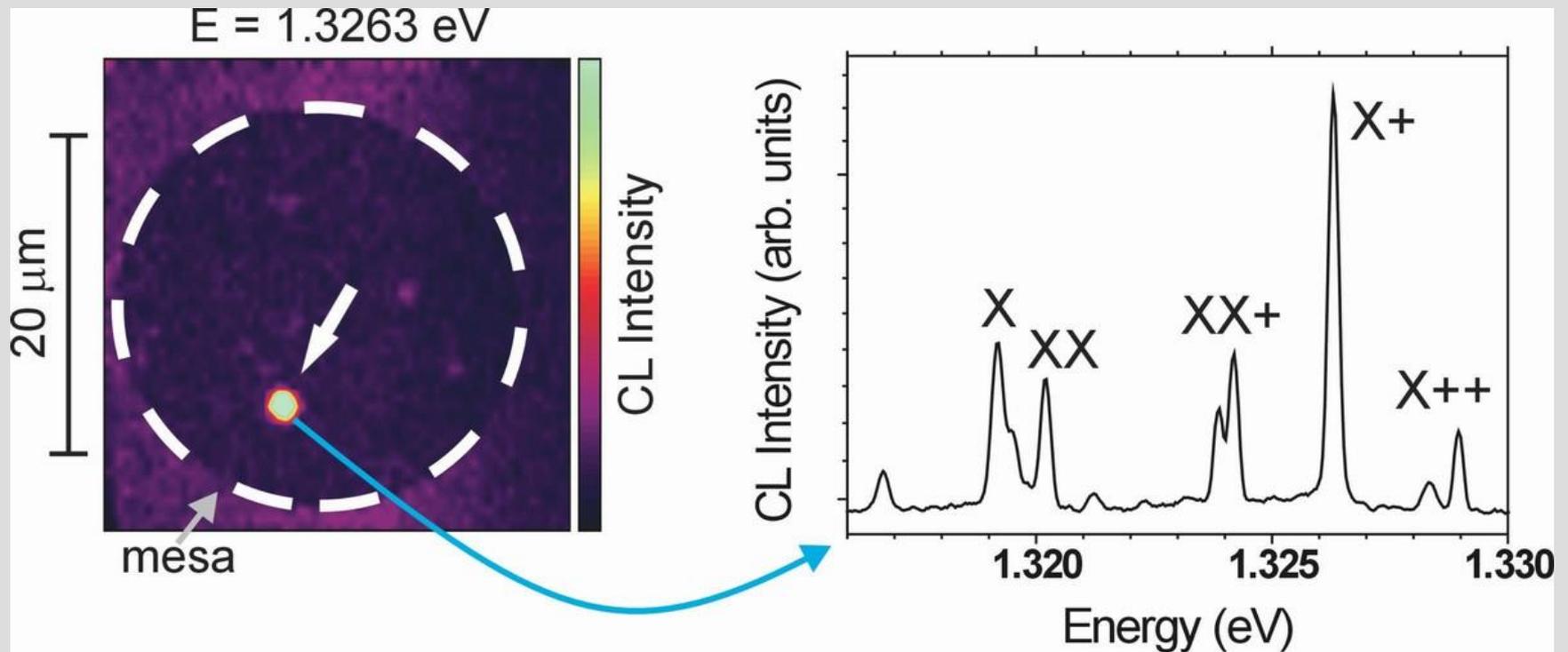


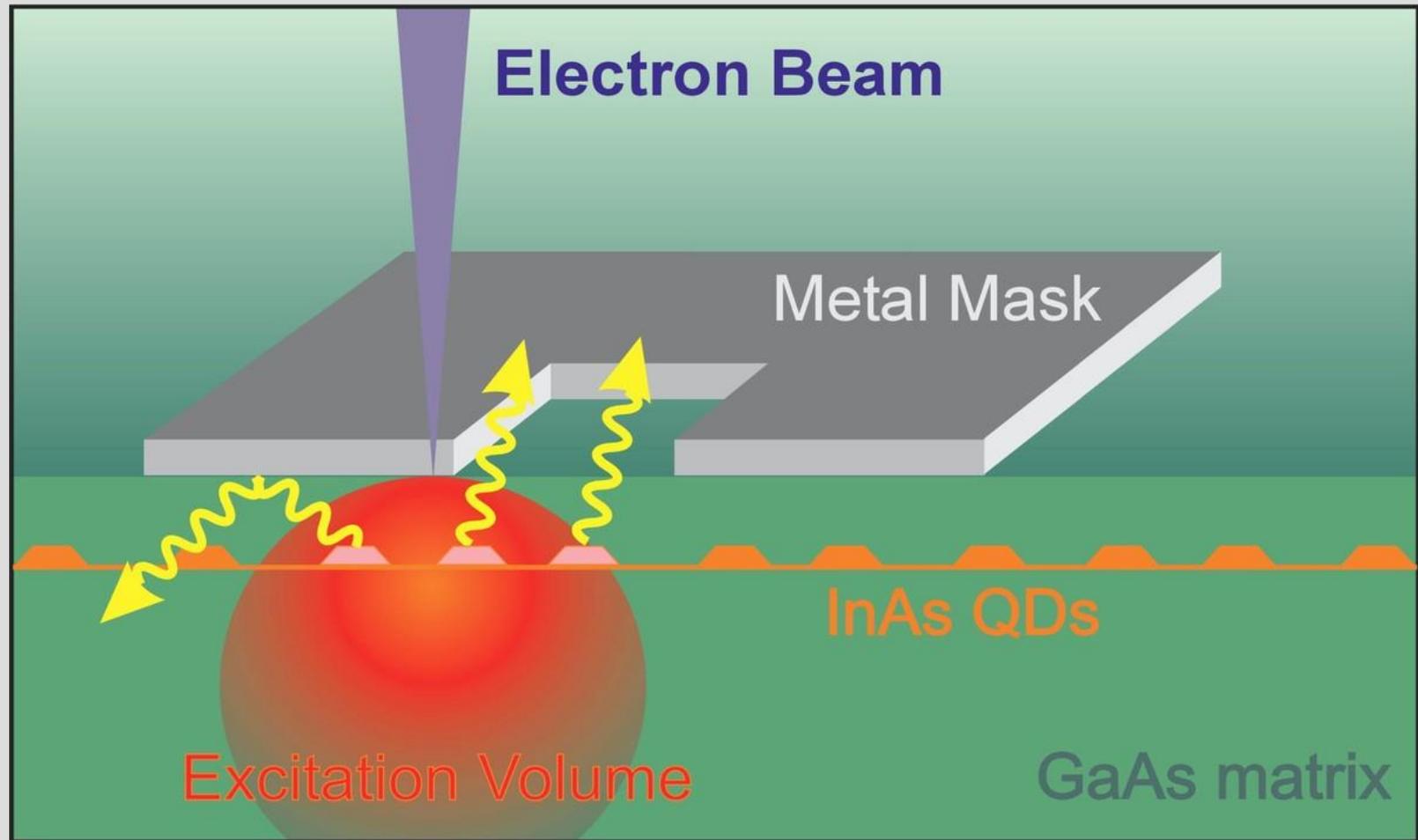
Messverfahren: Lokale Spektren, spektral und orts aufgelöste Bilder (beides auch zeitaufgelöst)
 Räumliches Auflösungsvermögen: 25 nm bis einige 100 nm je nach Beschleunigungsspannung und
 Diffusionslänge der Ladungsträger

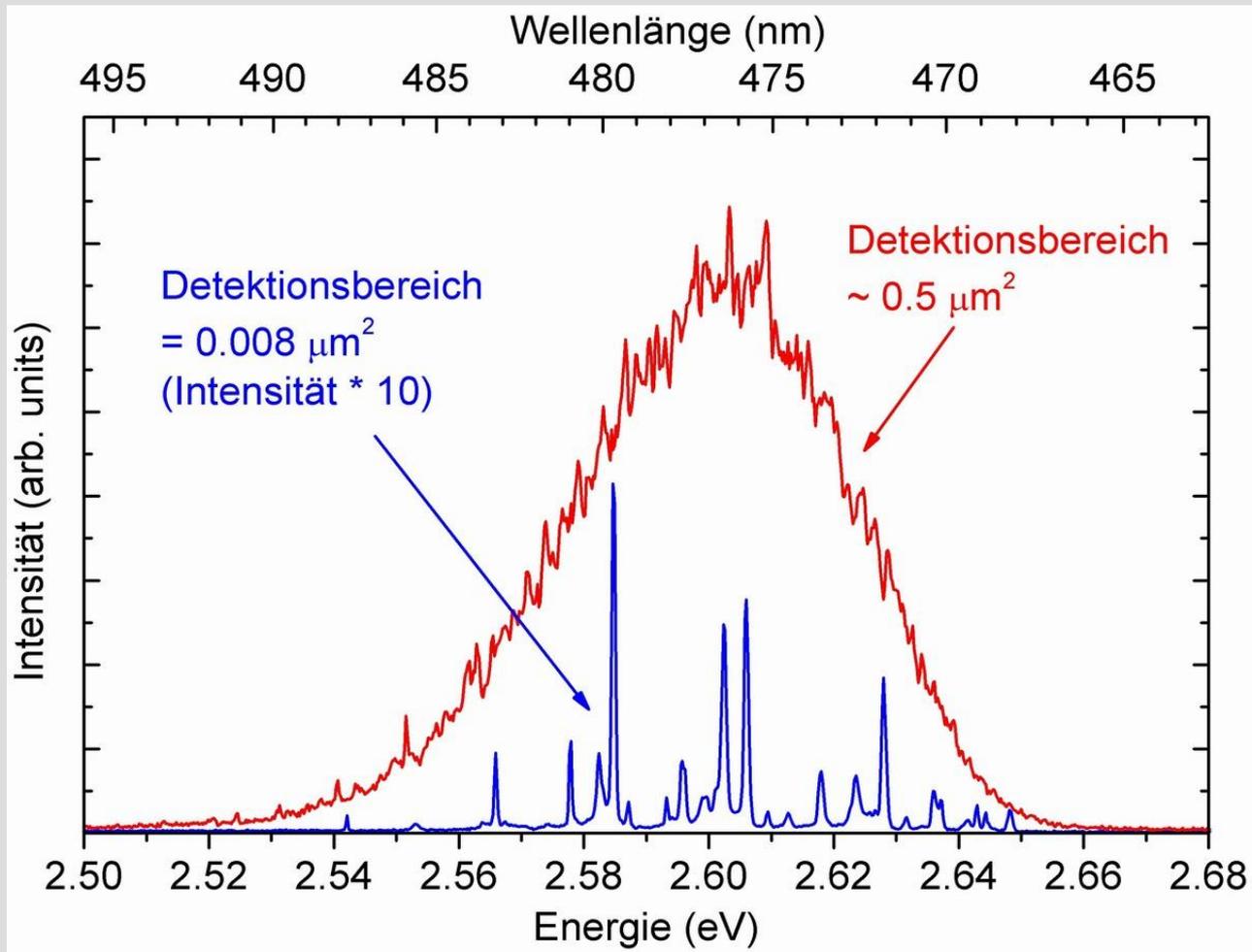
Zeitliches Auflösungsvermögen: bis 35 ps

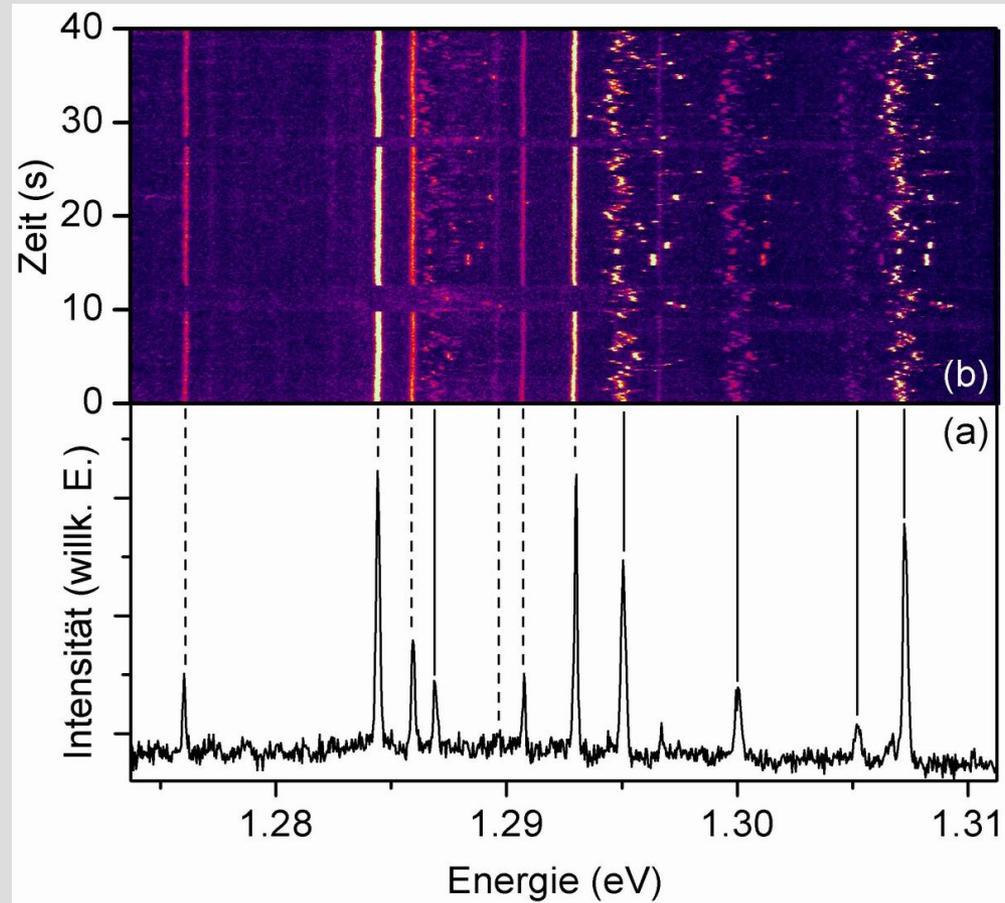
Probentemperatur: 6 – 300 K

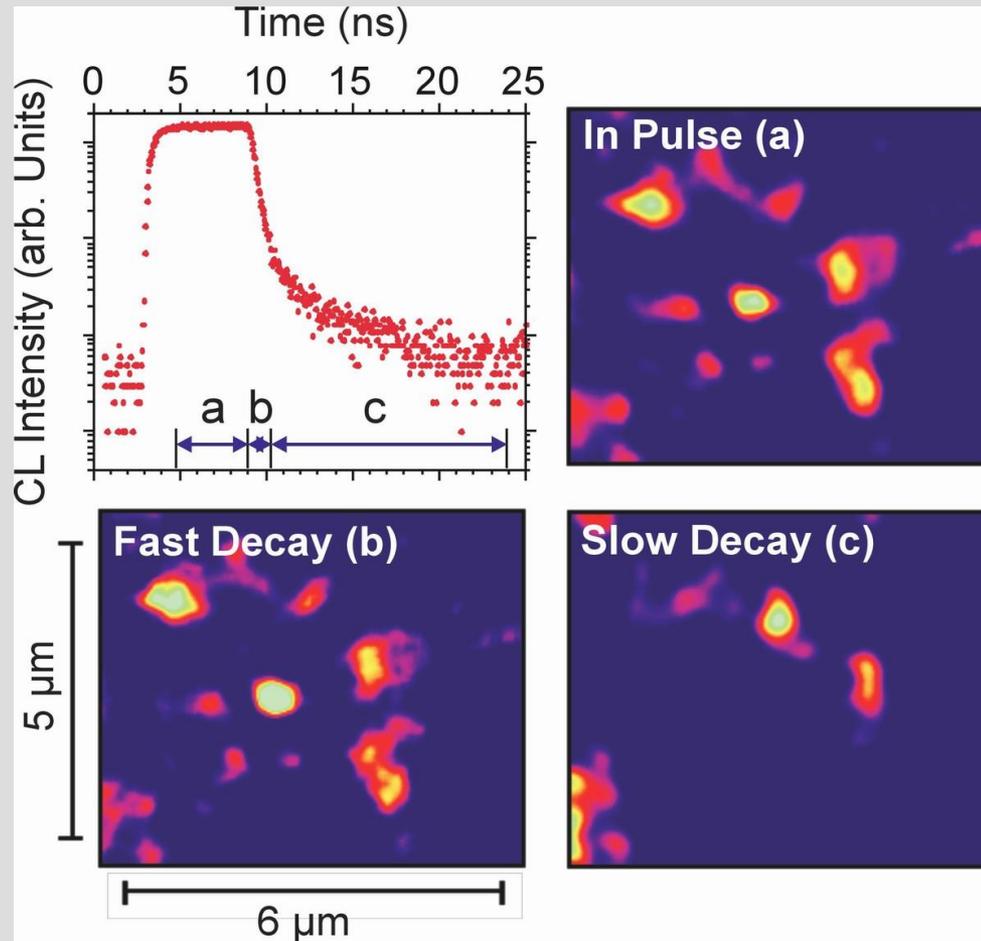
Anregungsenergie: $e \times$ Beschleunigungsspannung (3 kV – 40 kV)

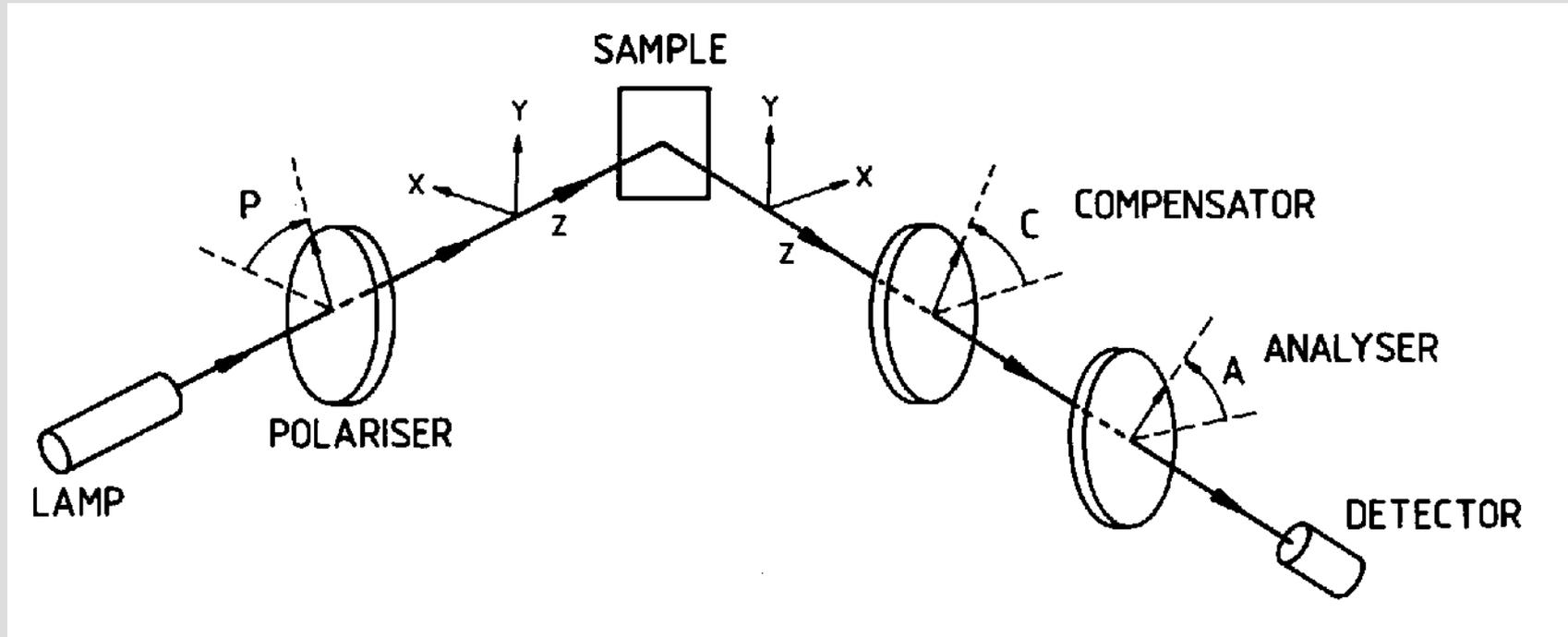












Definition: x in (parallel zur) Einfallsebene \rightarrow p-Polarisation
 y senkrecht zur Einfallsebene \rightarrow s-Polarisation

Fresnelsche (komplexe) Reflexionskoeffizient

$$r_s = E_{rs}/E_{is} \quad r_p = E_{rp}/E_{ip}$$

⇒ Änderung des Polarisationszustandes infolge Reflexion an der Probe;
Messung des Reflexionsverhältnisses

$$\rho = r_p/r_s$$

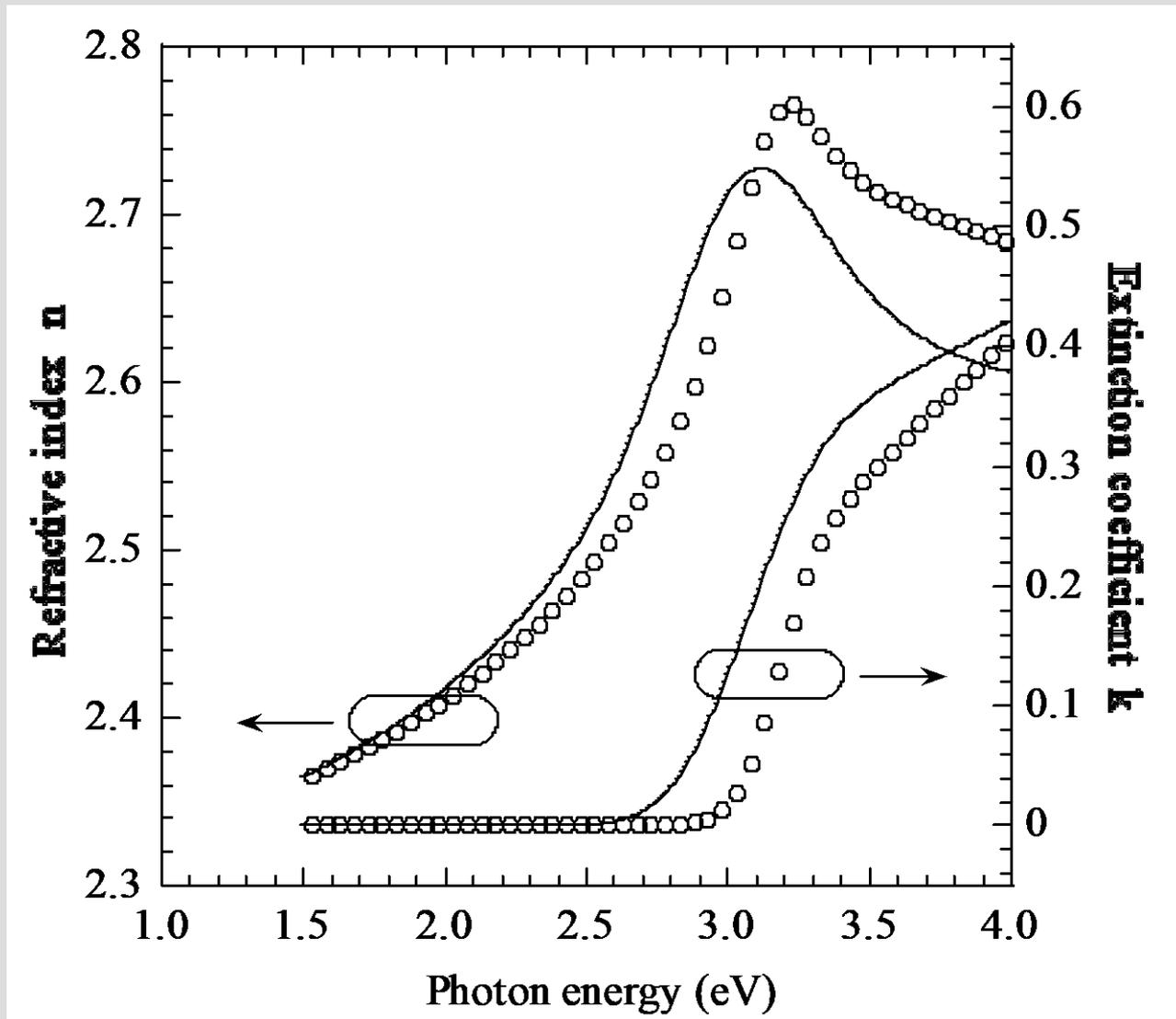
$$\rho = \tan \Psi \cdot \exp(i \cdot \Delta)$$

intrinsische Vorteile:

- ⇒ keine Absolutintensitäten, sondern Verhältnis der s- und p-Komponenten und ihre Phasenbeziehung
- ⇒ gleichzeitig Messung von Phase und Amplitude
- ⇒ Bestimmung von $\text{Re}(\varepsilon)$ und $\text{Im}(\varepsilon)$

Auswertung: **Vorgabe eines Modelles der Probe (i.a. Mehrschichtmodell) und Anpassung an gemessene Werte Ψ und Δ**

Eine Standardmethode zur Bestimmung der Schichtdicke und der optischen Konstanten ist die Spektrophotometrie. Dabei wird die Intensität des transmittierten bzw. reflektierten Lichts gemessen. Diese Methode ist jedoch für die Charakterisierung extrem dünner Schichten nicht besonders gut geeignet.



R. Goldhahn et al., Appl. Phys. Lett. 76 (3), 291 (2000)

