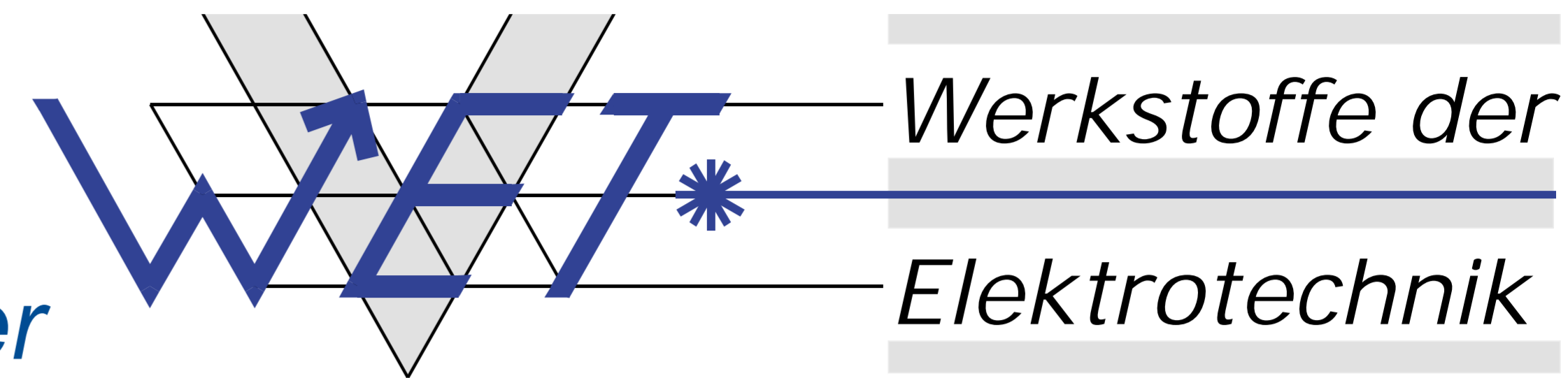


## Nano-Optik an magnetisch dotierten Halbleiter-Nanostrukturen

In Kooperation mit der Soul University (Prof. Hyeon) und der University of Washington (Prof. Gamelin)

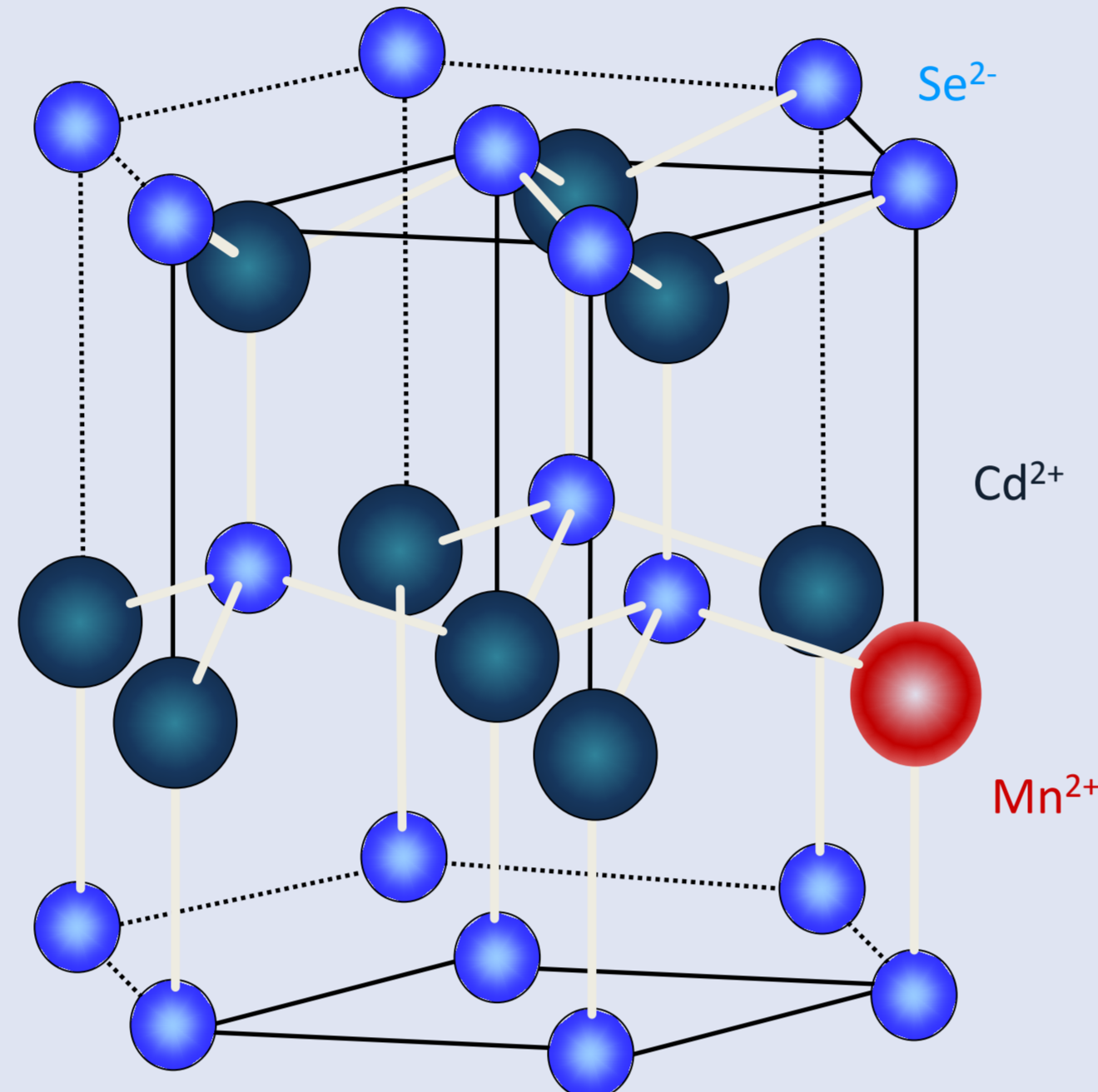
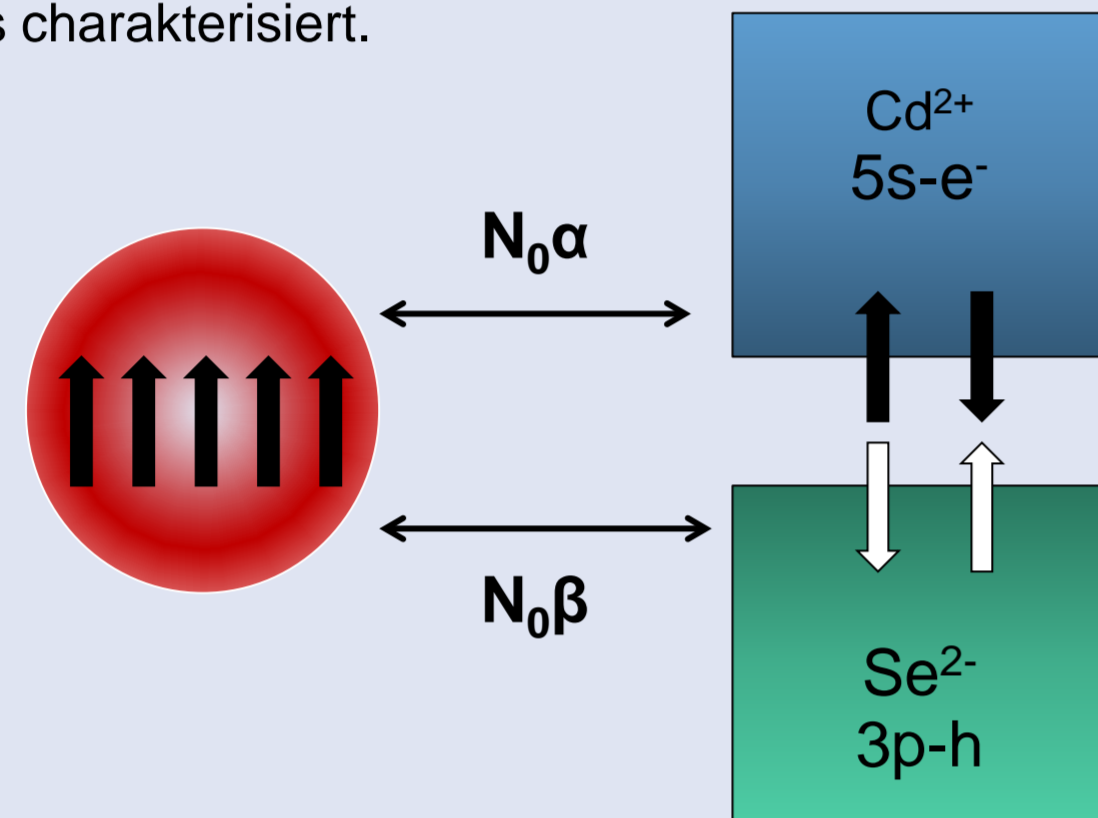


### Motivation

Sämtliche elektronischen Geräte, die unseren Alltag heute prägen, basieren auf Halbleitertechnik. Bei diesen Technologien ist eine Trennung zwischen der Datenverarbeitung durch Manipulation von Ladungsträgern in Halbleiterschaltungen und der nichtflüchtigen Datenspeicherung mithilfe von reversiblen Magnetisierungen magnetischer Materialien zu erkennen. Gelänge es nun, Halbleitern magnetische Funktionalität aufzuprägen, indem man den Ladungsträgerspin als zusätzlichen Informationsträger nutzt, wäre es möglich Materialien herzustellen, die die Vorteile von Halbleitern mit denen magnetischer Materialien verknüpfen.

#### Ansatz: Verdünnte magnetische Halbleiter (DMS)

Bei DMS-Materialien ist ein Halbleiter mit Übergangsmetall-Ionen mit magnetischer Funktionalität dotiert. In dieser Arbeit wurde das Materialsystem Cadmium-Selenid dotiert mit Mangan verwendet ( $\text{Mn}^{2+}:\text{CdSe}$ ). Zwischen Spins der Übergangsmetall-Ionen und den Ladungsträgern des Wirt-Halbleiters tritt eine Austauschwechselwirkung (AWW) auf, die zu außergewöhnlichen magnetooptischen Effekten führt. Die Größe dieser AWW wird durch die AWW-Konstanten  $N_0\alpha$  und  $N_0\beta$  des Leitungs- bzw. Valenzbandes charakterisiert.



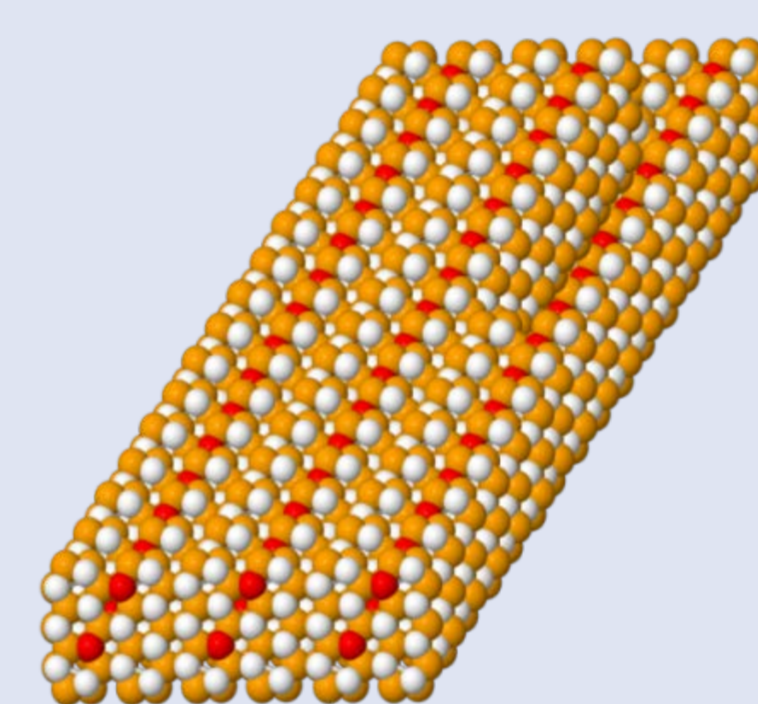
#### Kolloidale DMS-Nanostrukturen

Die AWW in DMS-Materialien nimmt mit zunehmender Temperatur ab – für die Implementierung in Spintronik-Bauelementen ist jedoch Magnetooptik bei Raumtemperatur notwendig. Für DMS-Nanostrukturen wird eine Verstärkung der AWW aufgrund der Quantisierung der Ladungsträger vorhergesagt. Hier stellen sich zwei grundlegende Fragen:

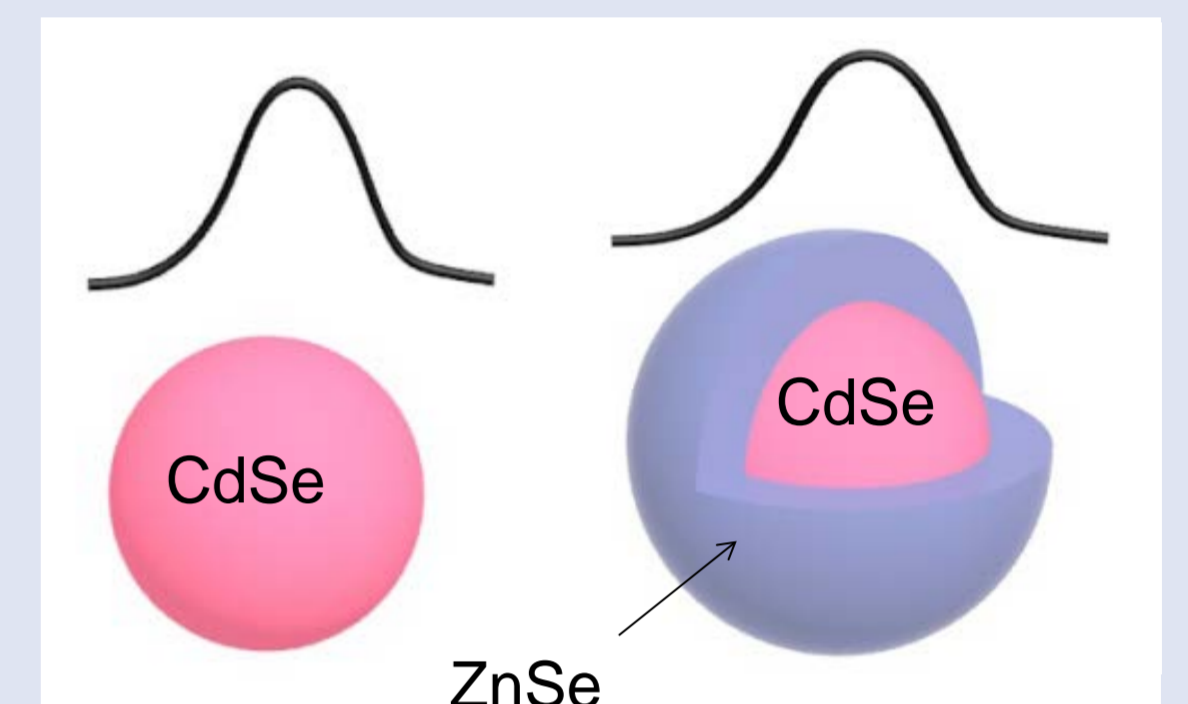
- Ist in DMS-Nanostrukturen Magnetooptik bei Raumtemperatur (RT) möglich?
- Welchen Einfluss übt die Quantisierung auf die AWW-Konstanten  $N_0\alpha$  und  $N_0\beta$  aus?

In dieser Arbeit wurde die Frage nach magnetischer Funktionalität bei RT an zwei Materialien mit unterschiedlichen Quantisierungsarten des gleichen Materialsystems  $\text{Mn}^{2+}:\text{CdSe}$  untersucht. An den in einer Richtung quantisierten Nanoribbons wurde zusätzlich der Einfluss auf die AWW-Konstanten nachvollzogen.

#### Nanoribbons



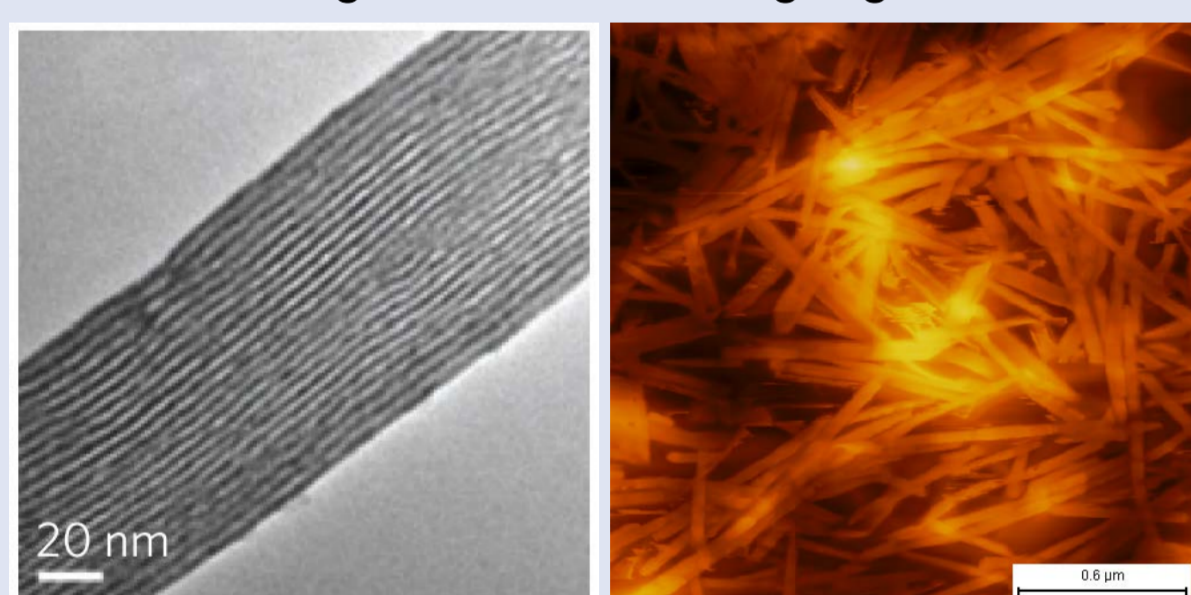
#### Quantenpunkte mit und ohne ZnSe-Shell



### $\text{Mn}^{2+}:\text{CdSe}$ -Nanoribbons Vorarbeit J. Frohleiks

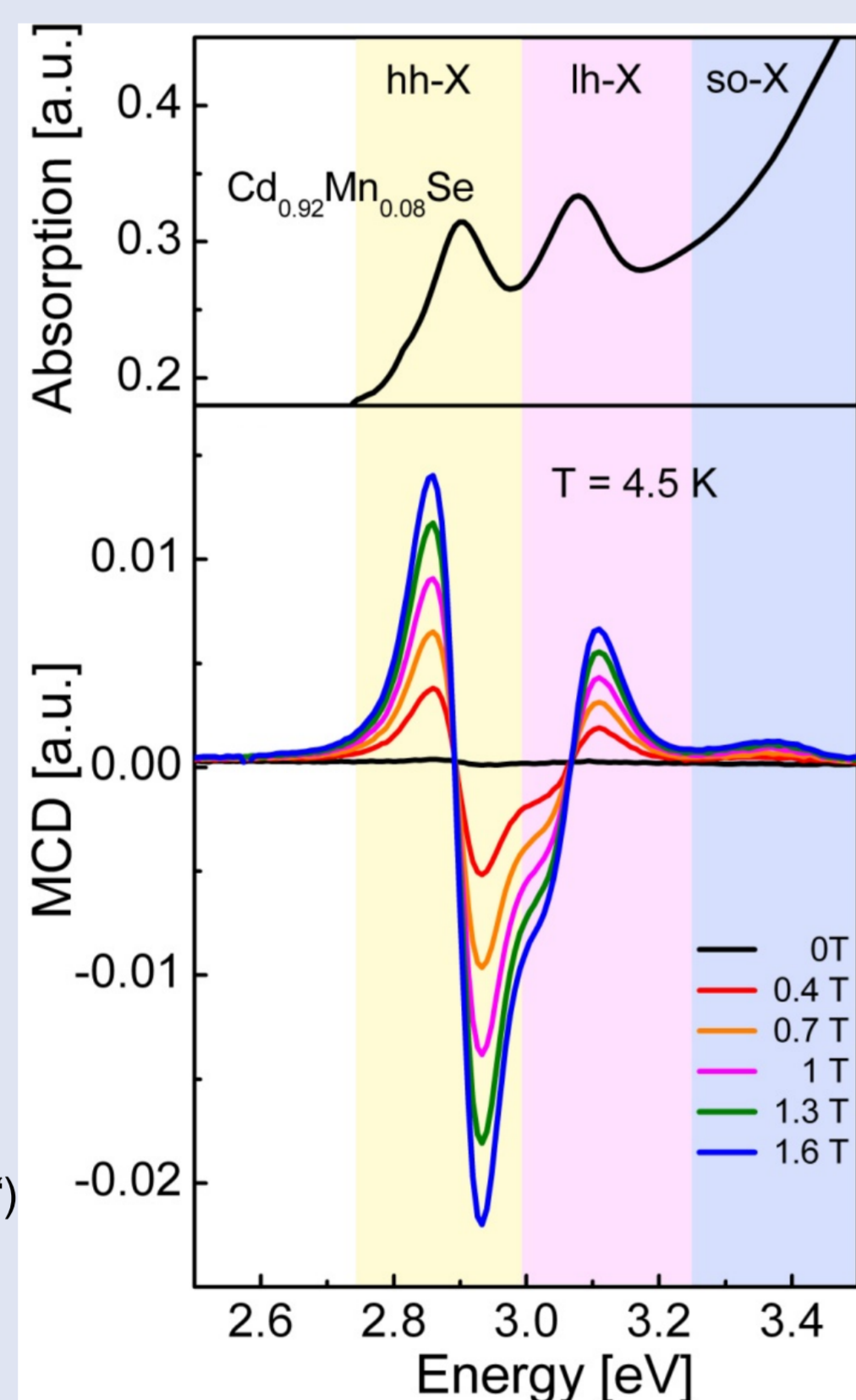
#### Stark anisotrope Struktur:

- Dicke : **1.4 nm**
- Länge: 500 nm bis mehrere  $\mu\text{m}$
- Breite: 10 – 60 nm
- Angeordnet in Stapeln von 20 bis 30 einzelnen Ribbons
- Dotierung bis zu 10 % Mangengehalt



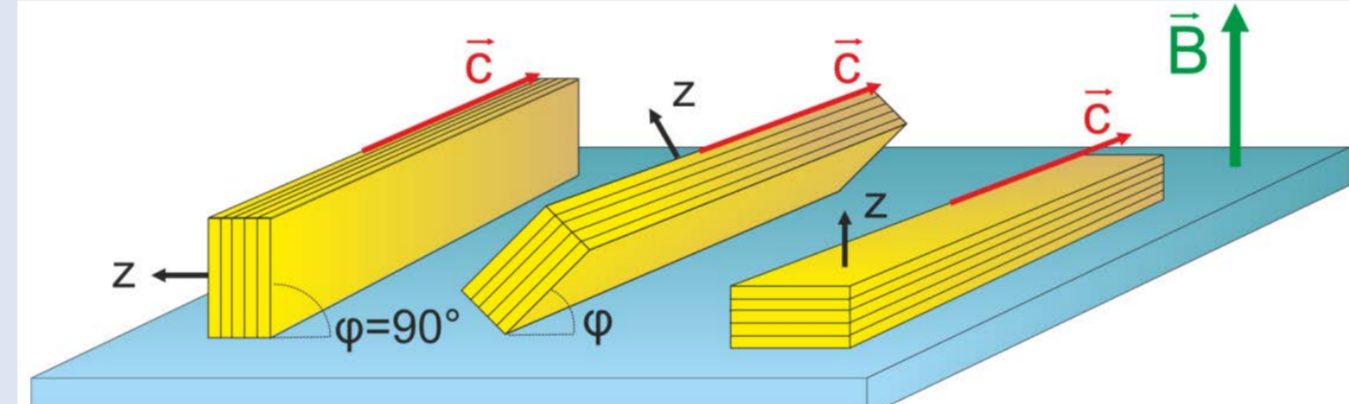
#### Besonderheiten aufgrund der starken Quantisierung:

- deutlich getrennte Übergänge für verschiedene Löcher in Absorption („heavy hole“, „light hole“, „lh“)
- Drei Übergänge in Magnetooptik sichtbar (MCD-Signal: Magnetisch Zirkularer Dichroismus)
- Magnetooptik bis RT (Zeemanaufspaltung  $\Delta E$ )



### Bestimmung der AWW-Konstanten

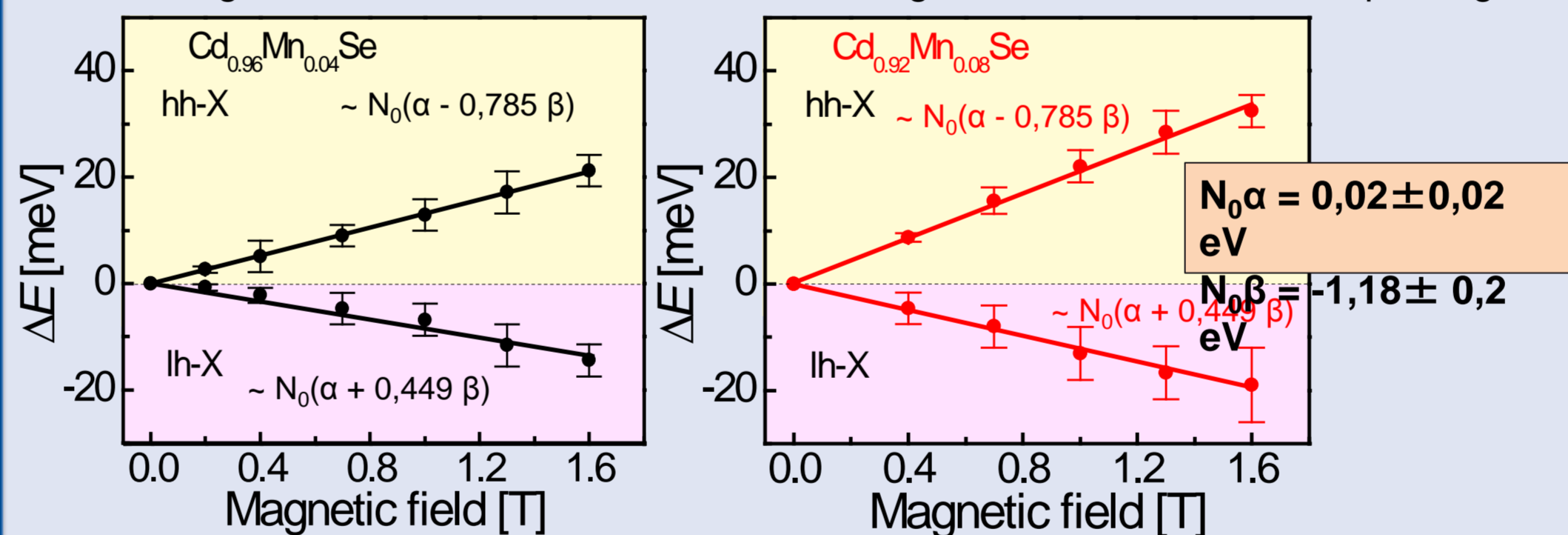
#### Berücksichtigung der geometrischen Ausrichtung der Nanoribbons



#### Beeinflusst:

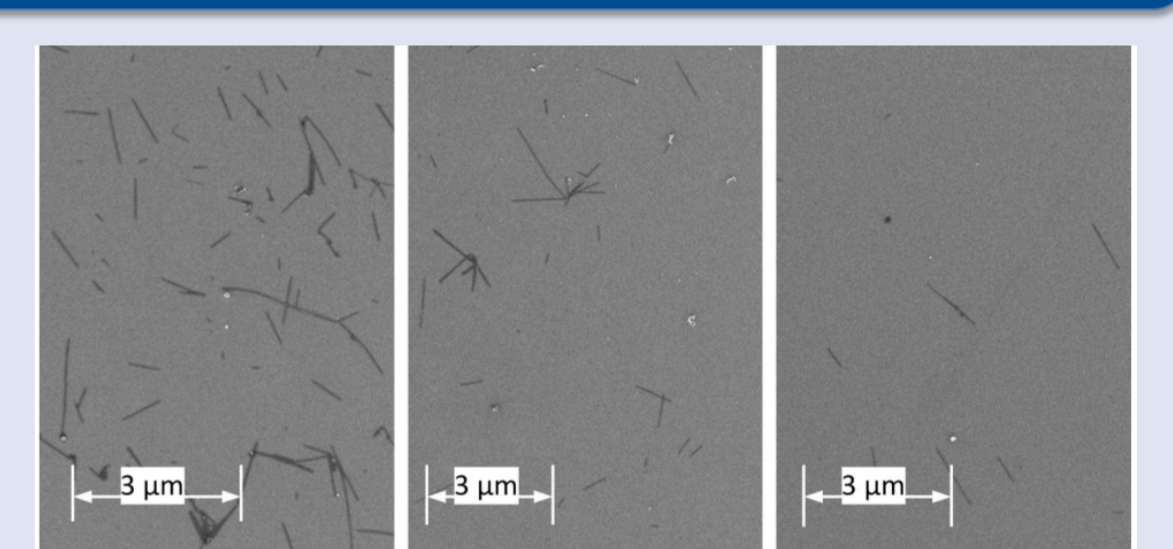
- Zeemanaufspaltung
- Optische Auswahlregeln

Durch eine Mittelung über verschiedenen Winkel zwischen den Nanoribbons und dem Substrat wird der Zusammenhang zwischen der Zeemanaufspaltung  $\Delta E$  der einzelnen Übergänge und den AWW-Konstanten bestimmt. Dies ermöglicht eine unabhängige Bestimmung der Konstanten voneinander aus den gemessenen Zeemanaufspaltungen.

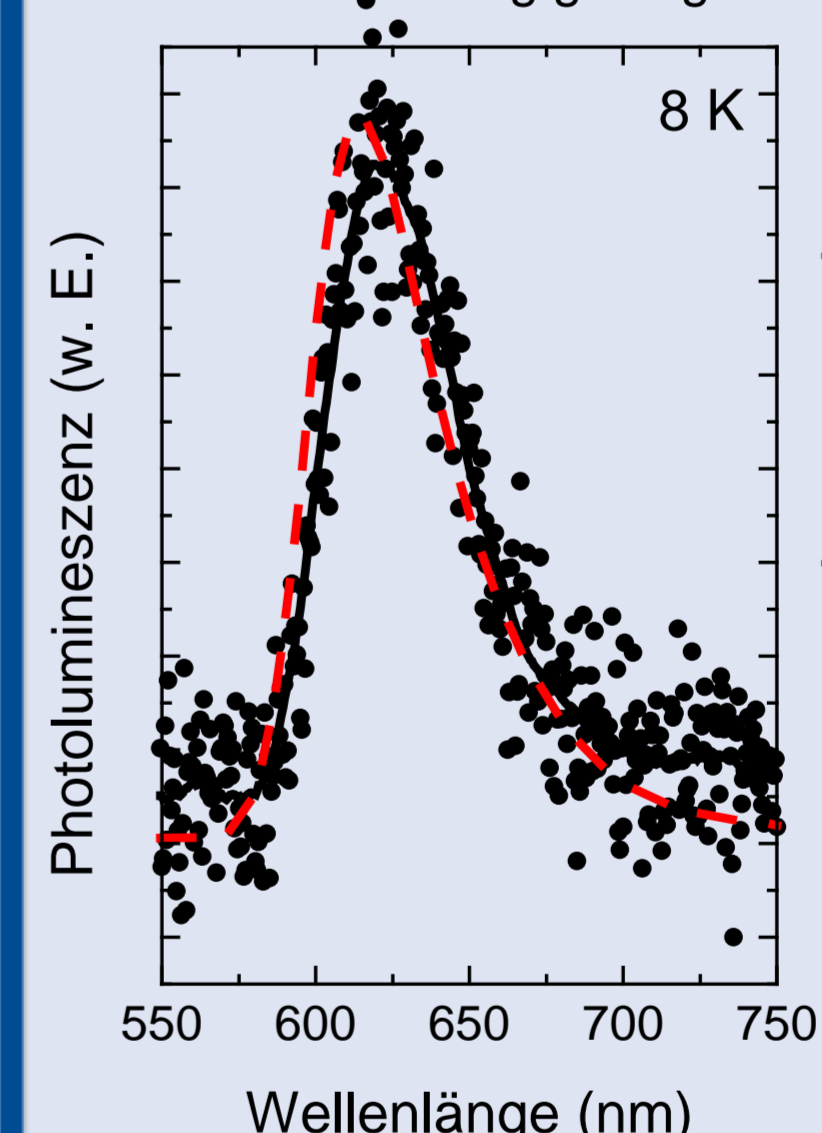


- Bestimmung der AWW-Konstanten unabhängig von einander
- Quantisierungsbedingte Änderung der AWW-Konstanten gegenüber Bulk-CdSe
- Fainblat, Frohleiks, Muckel et al., *Nano Lett.*, 12, 5311 (2012)

### Einzelne Nanoribbons

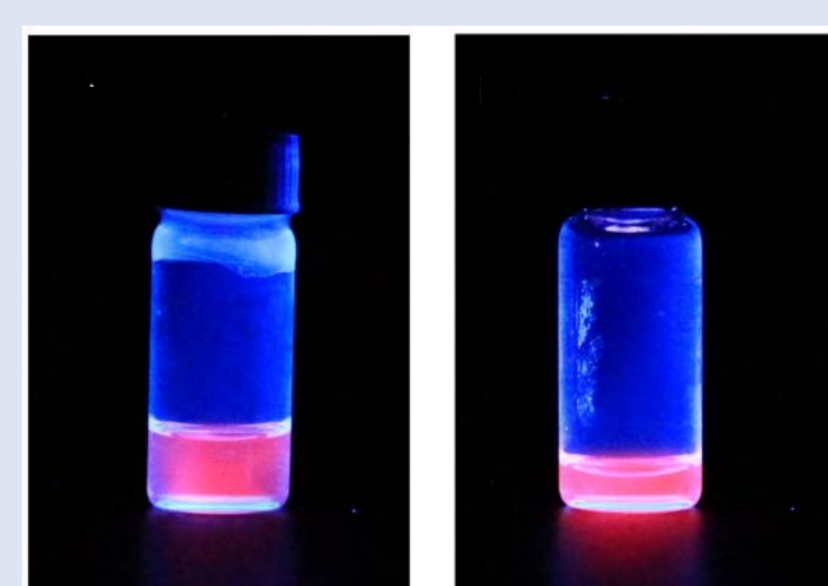


Um die Fehlerquellen einer Ensemblemessung zu umgehen, wurden Photolumineszenzmessungen (PL) an einzelnen Nanoribbon-Stacks durchgeführt. In Rot ist die Ensemblemessung gezeigt.



- PL an einzelnen Nanoribbon-Stacks bis RT
- Kein Unterschied zur Ensemblemessung im gesamten Temperaturbereich

### $\text{Mn}^{2+}:\text{CdSe}$ -Quantenpunkte



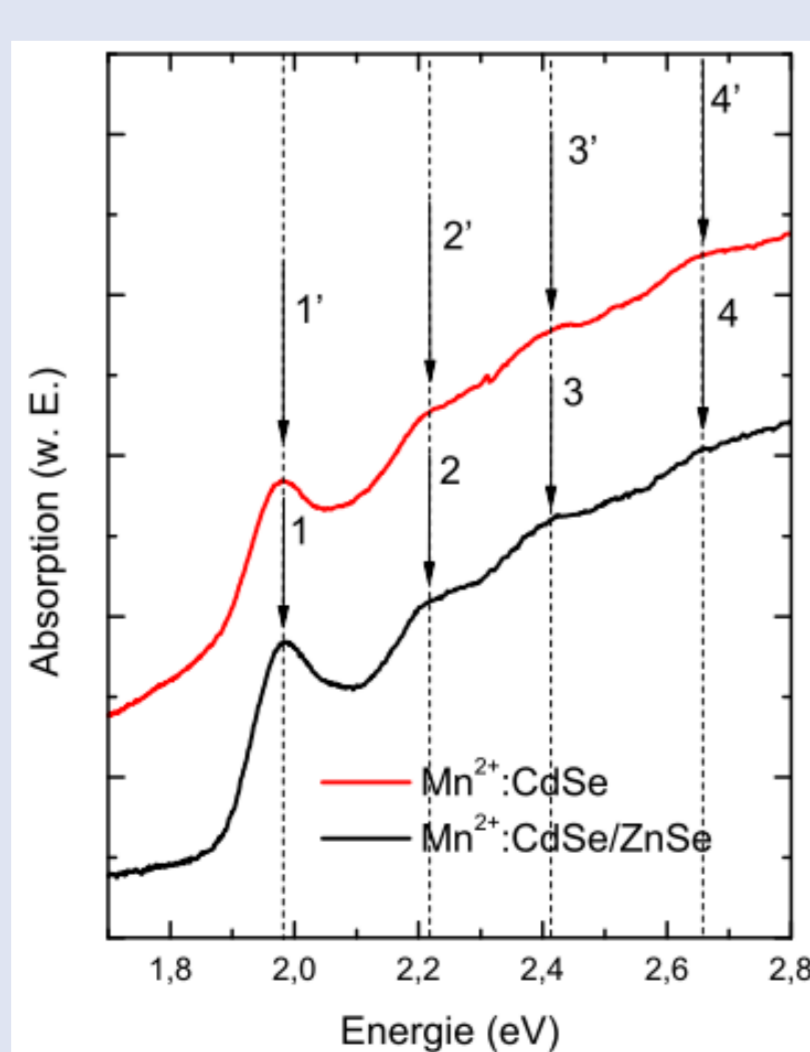
#### $\text{Mn}^{2+}:\text{CdSe}$ -Kern:

- 5,8 nm Durchmesser
- 2,5 % Mangengehalt

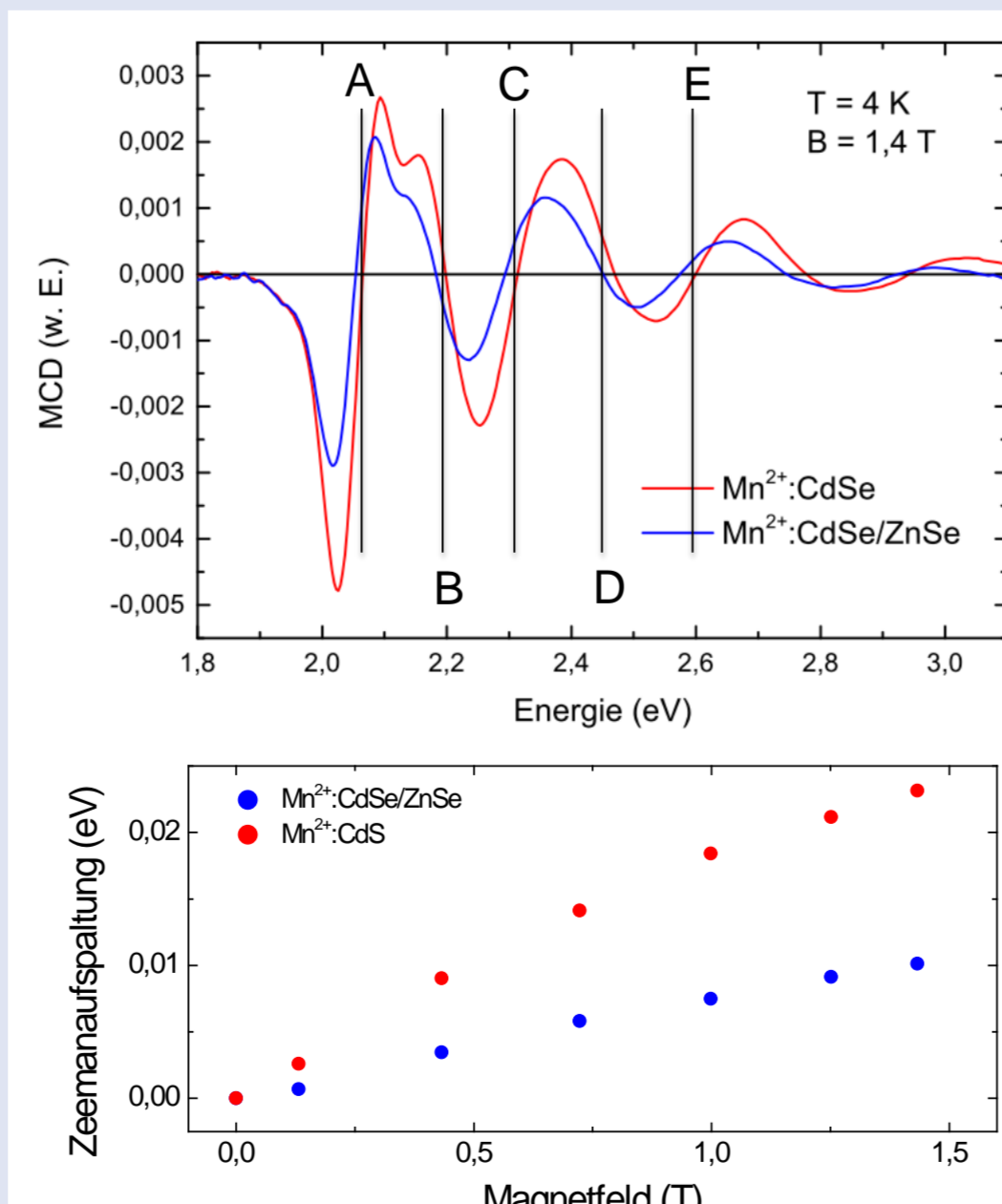
#### Hülle:

- eine Monolage Zinkselenid (ZnSe)

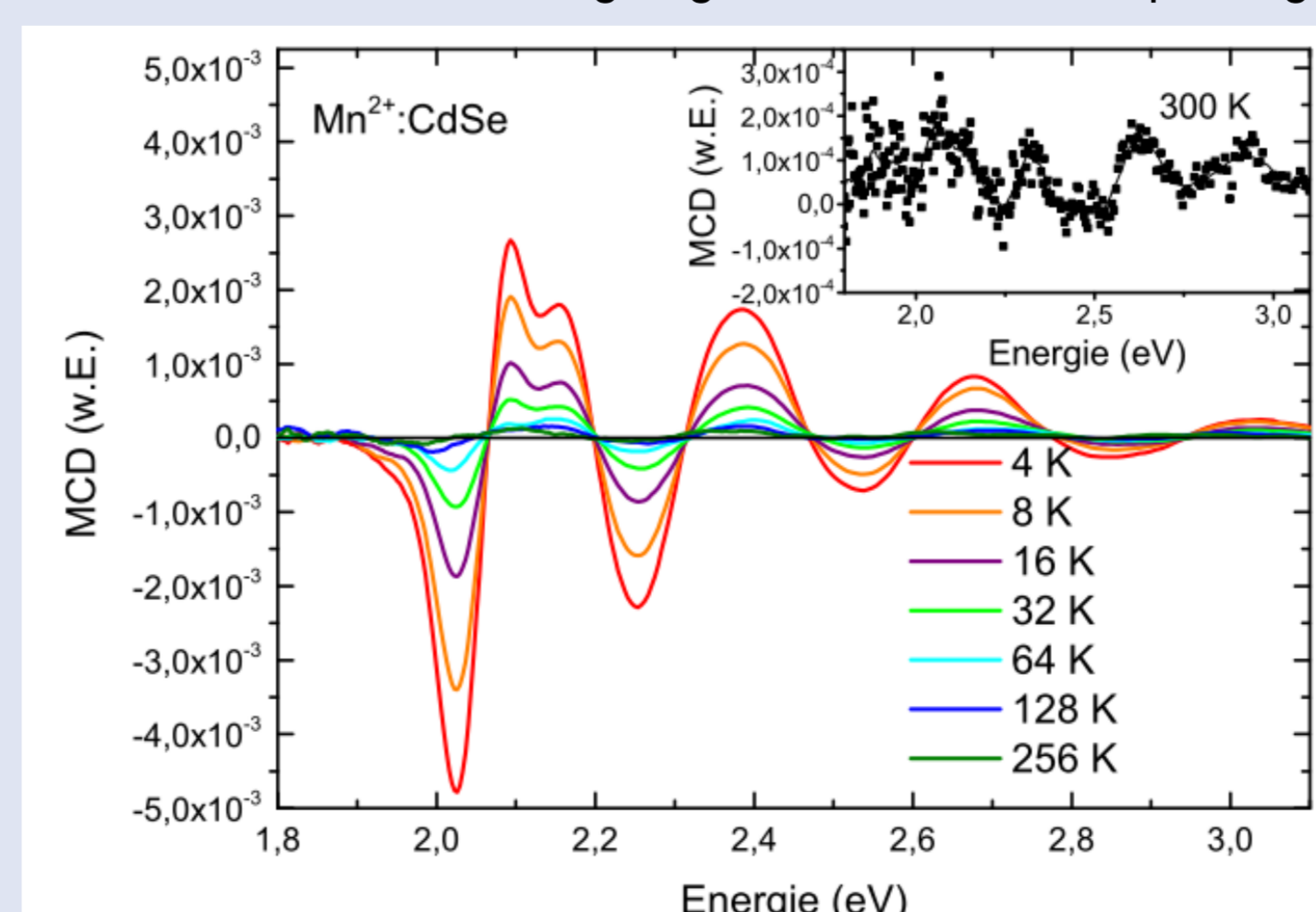
#### Mehrere Übergänge in Absorption



### Magnetooptik – Tief- und Raumtemperatur

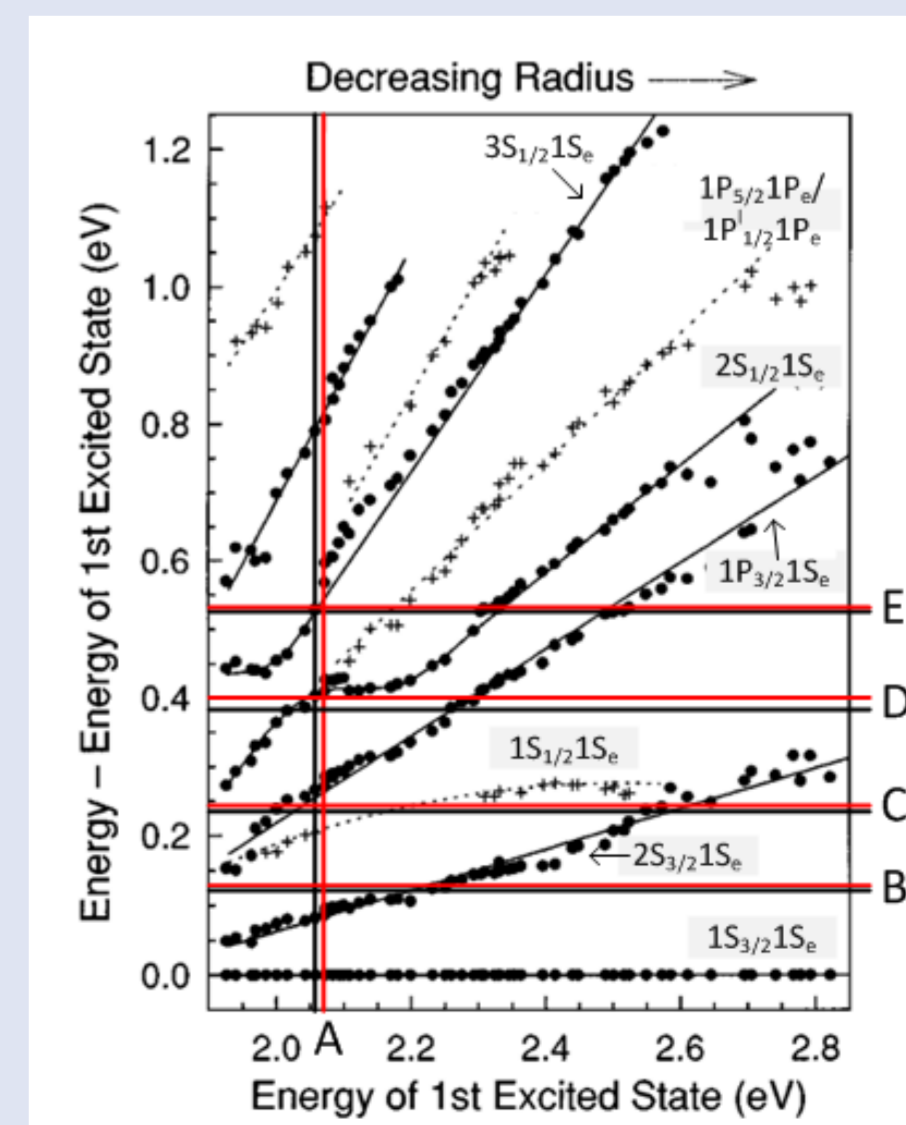


- Mindestens fünf Übergänge in Magnetooptik
- Partikel ohne Shell zeigen größere Zeemanaufspaltung



- Magnetooptik bis nahe RT (bei beiden Proben)

### Zuordnung der Übergänge



Zuordnung anhand von Norris et al., *Phys. Rev. B.*, 53, 16338 (1996)

Übergang	Zuordnung
A	$1S_{3/2}1S_e$
B	$2S_{3/2}1S_e$
C	$1P_{3/2}1P_e$
D	$2S_{1/2}1S_e$
E	$3S_{1/2}1S_e$

- Erfolgreiche Zuordnung aller Übergänge



Franziska Elisabeth Muckel,  
Master of Science

Betreuung: Prof. Dr. rer. nat. Gerd Bacher, Dipl.-Phys. Rachel Fainblat