

Praktika der Angewandten Physik

Schwerpunktfach „**Nanotechnologie**“:

- Fortgeschrittenen-Praktikum in Angewandter Physik / Nanotechnologie

Wahlfach „**Mikrostrukturen**“:

- Praktikum zur Physik und Technologie der Halbleiter
- Elektronenmikroskopisches Praktikum

Fortgeschrittenen-Praktikum in Angewandter Physik / Nanotechnologie

Inhalt :

- Methodischer und exemplarischer Querschnitt durch die Thematik des Instituts:
 - Elektronenoptik und –mikroskopie
 - Nanostrukturen und mesoskopische Physik
 - Physik der molekularen und biologischen Materie

d.h.: **grundlegende Herstellungs- und Charakterisierungsverfahren von Nanostrukturen und Materialien**

- 10 von 11 angebotenen Versuchen
- ca. 5h Versuchsdauer
- 1 x wöchentlich während der Vorlesungszeit
- Kompaktanleitung im Internet, ausführliche Anleitung mit Hintergrundmaterial in der Präsenzbibliothek

25 Teilnehmer im SS 08

Fortgeschrittenen-Praktikum in Angewandter Physik / Nanotechnologie

Grundlagen:

- Holographie / Fourieroptik
- Elektronensonde

Charakterisierungsmethoden:

- Lichtmikroskopie
- TEM
- REM
- Rasterkraftmikroskop
- Infrarotspektroskopie

Herstellungsverfahren/Anwendungen:

- Optische Lithographie
- Dünne Schichten
- Solarzelle
- Quanten-Hall-Effekt

Fortgeschrittenen-Praktikum in Angewandter Physik / Nanotechnologie

Grundlagen:

- Holographie / Fourieroptik
- **Elektronensonde** → C7 P41 (T. Ohnweiler)

Charakterisierungsmethoden:

- Lichtmikroskopie
- TEM
- REM
- Rasterkraftmikroskop
- **Infrarotspektroskopie** → C7 N03 (Dr. A. Gerlach)

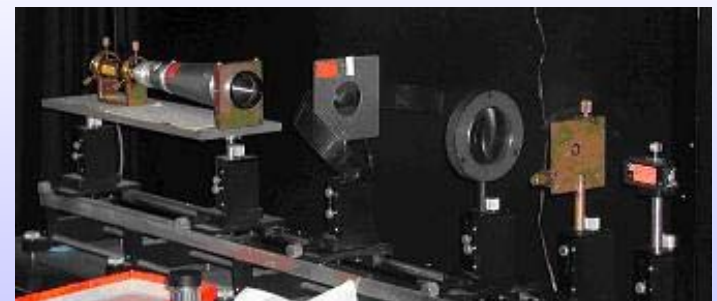
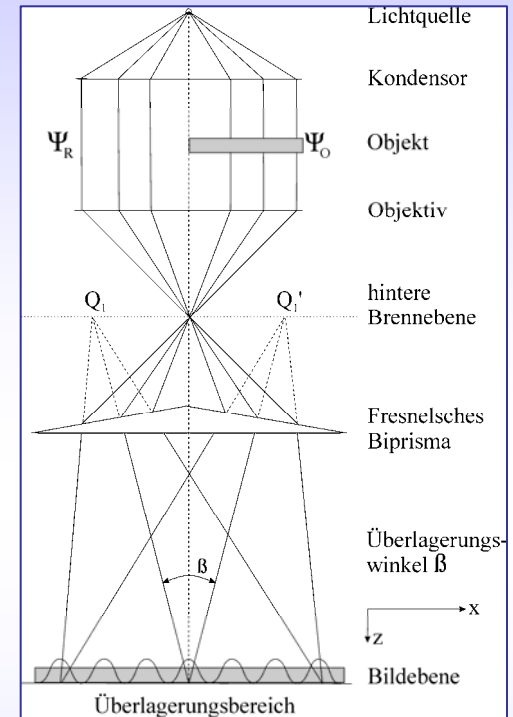
Herstellungsverfahren/Anwendungen:

- Optische Lithographie
- Dünne Schichten
- **Solarzelle** → C8 A10 (M. Ruoff)
- **Quanten-Hall-Effekt** → C8 A35 (Tantisantisom)

Versuch: Holographie (Fourieroptik)

Inhalt:

- Fourieroptik:
 - Fourierspektren und Leistungsspektren einfacher beugender Objekte wie Blende, Gitter, Kreuzgitter
- Optische Filterung:
 - Amplitudenfilterung zur Beeinflussung der Bildinformation und Amplituden- und Phasenfilterung als Phasenkontrastmethoden
- Holographie:
 - Aufzeichnung eines Hologramms mit Hilfe der Bildebenen-Off-Axis-Holographie
 - Lichtoptische Rekonstruktion der im Hologramm gespeicherten Amplituden- und Phaseninformation

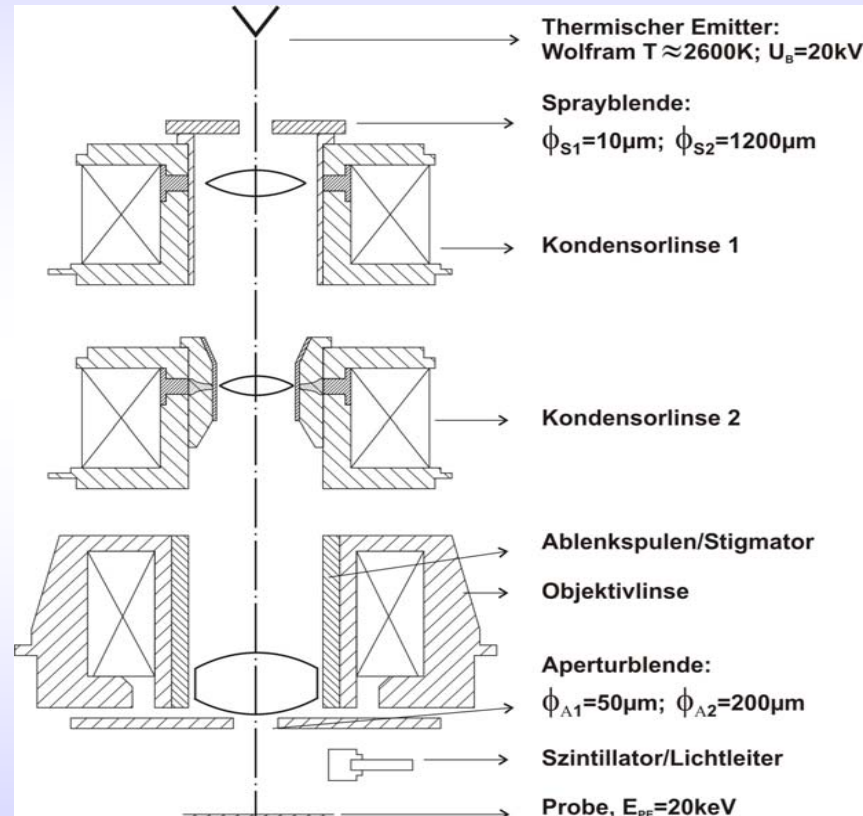


Versuch: Elektronensonde

- Vermittlung der physikalischen Grundlagen zur Funktion eines Rasterelektronenmikroskops (REM) anhand eines modifizierten kommerziellen Geräts. **Vorteil: Verschiedene teilchenoptische Komponenten können direkt verändert, ausgetauscht und betrachtet werden.**
- Wichtige Kenngrößen wie der Richtstrahlwert der Quelle und die Sondengröße werden experimentell bestimmt.



Kommerzielles REM, mod.
(S4-10 der Firma Cambridge)



Schematischer elektronenoptischer Aufbau mit den fokussierenden Elementen in Analogie zur Lichtoptik für die Berechnung des paraxialen Strahlengangs (Gaußsche Dioptrik)

Versuch: Elektronensonde

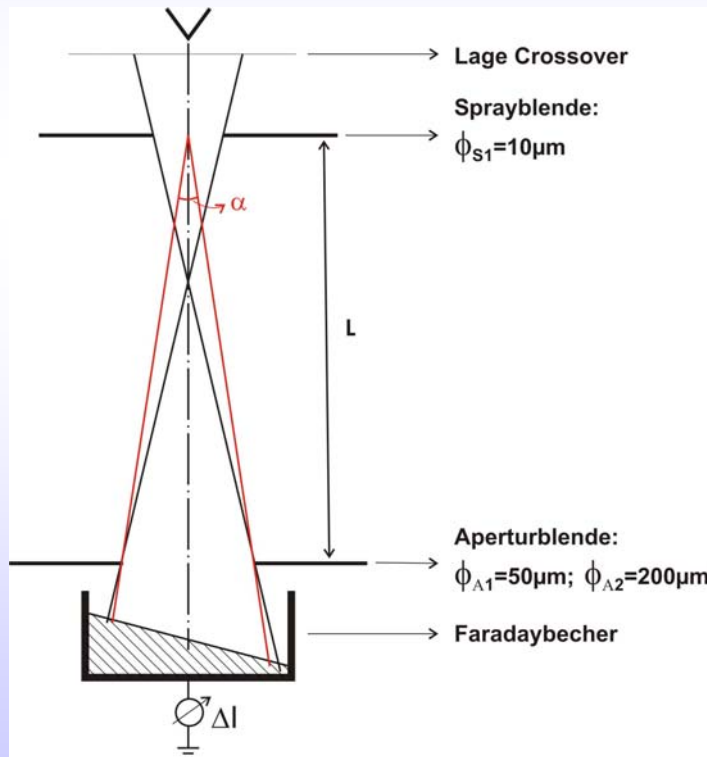
Bestimmung des Richtstrahlwerts

$$R = \frac{\Delta I}{\Delta F \Delta \Omega}$$

Nach dem „Zwei-Blenden-Verfahren“ gilt

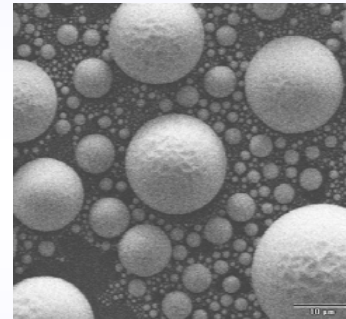
ΔI = Faradaybecherstrom

$$\Delta F = \pi/4 \Phi_S^2 \quad \Delta \Omega = \frac{\pi \Phi_A^2}{4 L^2}$$

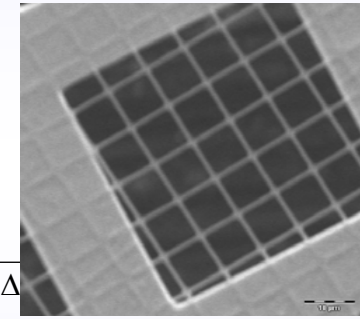


Bestimmung der Sondengröße

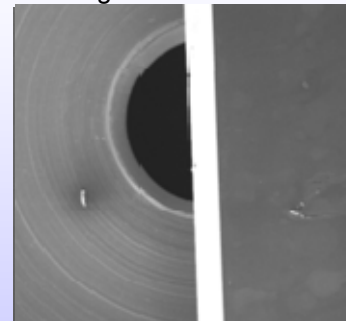
1. Berechnung des paraxialen Strahlengangs (Gaußsche Dioptrik) und Berücksichtigung axialer Bildfehler.
2. Messung der kleinsten Details auf einer Zinn/Kohle Probe.
3. Linescan der Sonde über eine Siliziumkante. Bestimmung der Sondengröße unter verschiedenen Annahmen aus dem gemessenen Faradaycup-Strom.



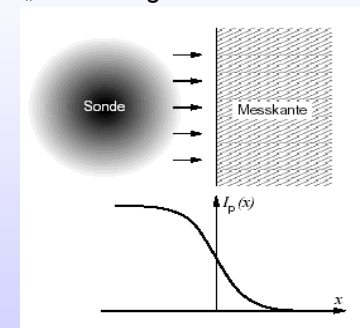
Zinnkügelchen



„Quantifoilgitter“



Siliziumkante auf Faradaybecher



Sondenstrom $I_p(x)$

Versuch: Lichtmikroskopie inkl. Interferenzmikroskopie

Inhalt:

- Köhlersche Beleuchtung
- Bildentstehung im Lichtmikroskop anhand eines Strichgitters
- Messungen am Michelson-Interferenz-Lichtmikroskop unter Ausnutzung der Zweistrahlinterferenz:
 - Bestimmung der spektralen Breite eines Filters
 - Messung der Höhe kleiner Strukturen im μm -Bereich
 - Ausdehnung bzw. Kontraktion eines piezoelektrischen Materials in Abhängigkeit von einem äußeren elektrischen Feld
- Demonstration der prinzipiell besseren Tiefenauflösung beim Tolansky-Lichtmikroskop unter Ausnutzung der Vielstrahlinterferenz

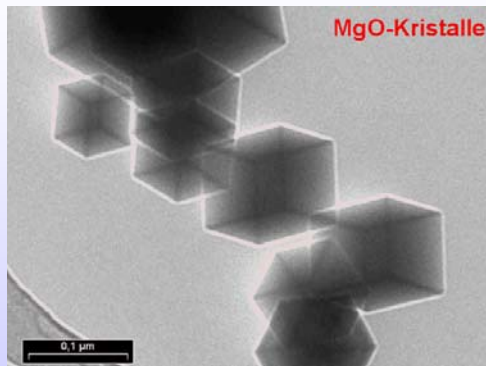
ULTRAPHOT II von Zeiss



Versuch: Transmissionselektronenmikroskop

Inhalt :

- Aufbau eines TEMs und Funktionsweise einzelner Komponenten
- Bedienung eines TEMs
- Abbildungs- und Elektronenbeugungsmodus
- Wechselwirkungen zwischen Elektronenstrahl und Probe
- Kontrastentstehung
- Präparationsverfahren
- *state of the art* der Elektronenmikroskopie



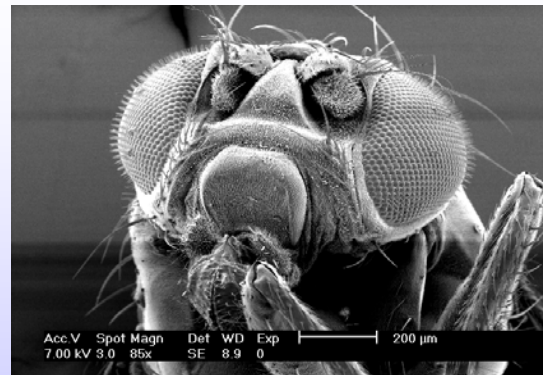
Versuch: Rasterelektronenmikroskopie und EDX

Inhalt :

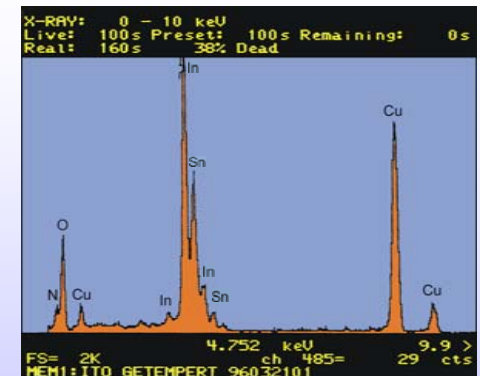
- Aufbau und prinzipielle Funktionsweise des REMs, Bildentstehung, Detektoren
- Wechselwirkungen der Elektronen mit dem Objekt, SE, RE
- Erarbeitung der unterschiedlichen Kontrastmechanismen an Hand diverser Proben (Topographiekontraste, Material-, Potentialkontrast)
- Auflösungsvermögen und Schärfentiefe, Abhängigkeit von Apertur, Messung
- Qualitative und quantitative Materialanalyse mittels energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX), ZAF-Korrektur



REM XL30 FEG mit EDX



REM-Bild einer Drosophila-Fliege

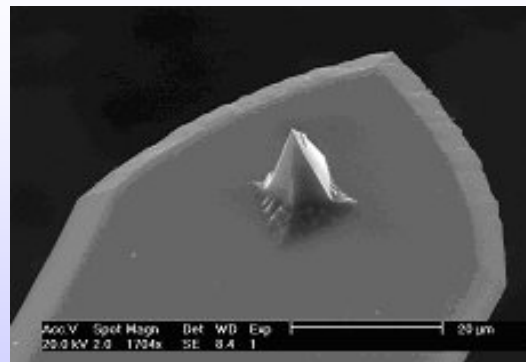


EDX-Spektrum

Versuch: Rasterkraftmikroskopie (AFM)

Inhalt :

- Prinzipielle Funktionsweise des AFMs: Geräte- und Messtechnik, Detektionsprinzipien
- Betriebsmodi
- Theorie der Spitzen/Proben-Wechselwirkung
- Biegetheorie der Kraftsensoren
- Oberflächenuntersuchung einer Si-Referenzprobe, Justierung des Aufbaus und Charakterisierung des Sensors
- Aufnahme einer Kraftkennlinie und quantitative Abschätzung der Kräfte



Mikromechanischer Balken mit der Tast-Spitze

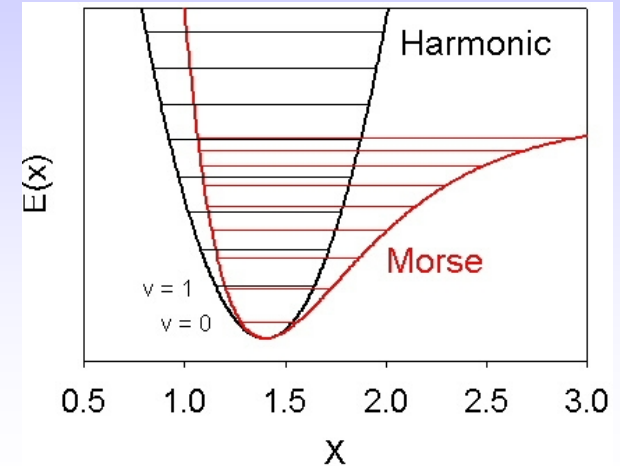
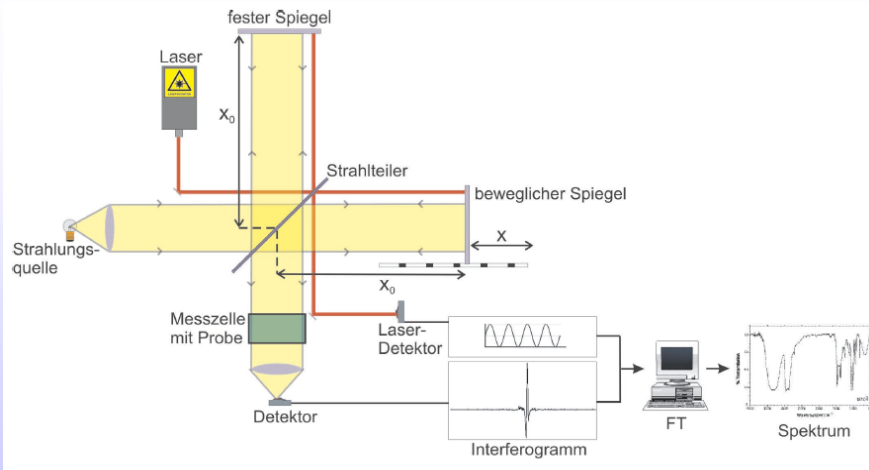
Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR)

Ziele:

- Umgang mit einem modernen Spektroskopieverfahren, einschließlich Probenpräparation
- Bestimmung der Sekundärstruktur einiger Proteine

Prinzip:

- Anregung von Molekülschwingungen durch IR-Strahlung
- Messung der stoffspezifischen Absorptionsspektren



Potential für angeregte Zustände von Molekülschwingungen

Anwendung:

- Identifikation von Stoffen
- Untersuchung ihrer chemischen Umgebung

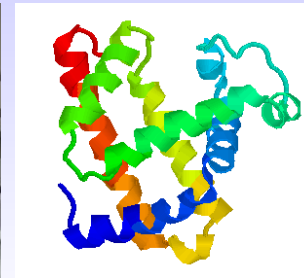
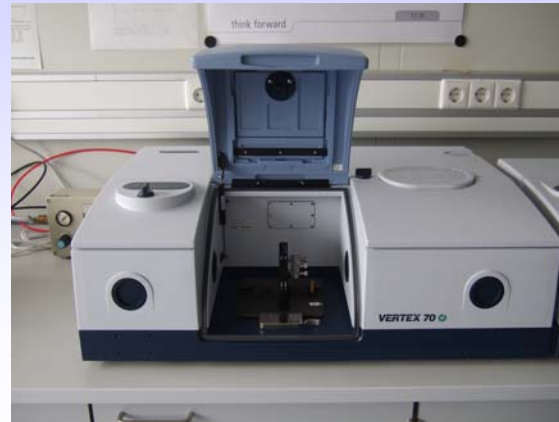
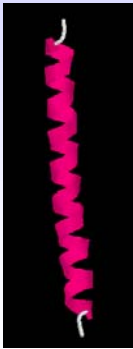
Vorteile:

- schnelle Messung
- exzellentes Signal zu Rausch Verhältnis
- große Wellenzahlgenauigkeit

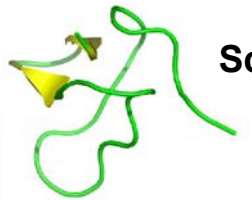


FTIR-Spektroskopie: Protein-Sekundärstrukturaufklärung

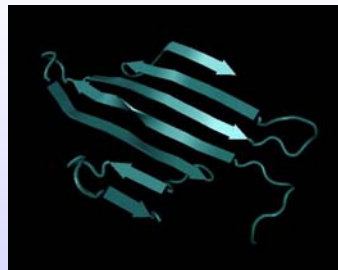
α -Helix



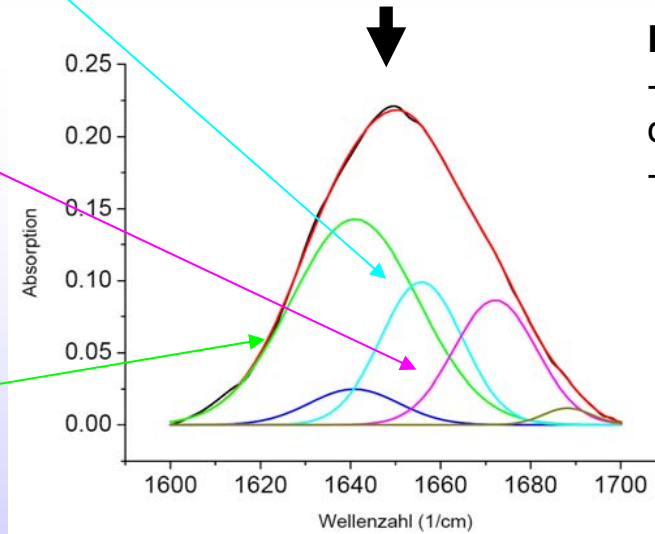
- Myoglobin**
- Sauerstofftransport im Muskel
 - vorwiegend α -Helix



Schleife



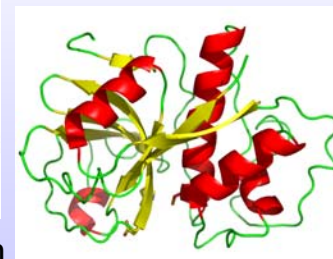
β -Faltblatt



Amid I Absorptionsbande von Papain

BSA

- Aufrechterhaltung osmotischer Druck
- vorwiegend α -Helix



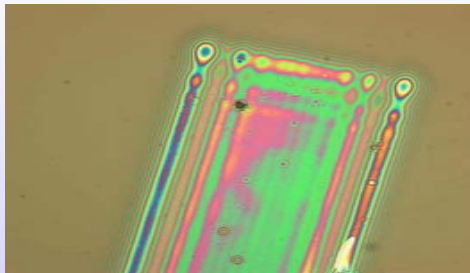
Papain

- Verdauungsenzym
- α -Helix
- β -Faltblatt
- Schleife

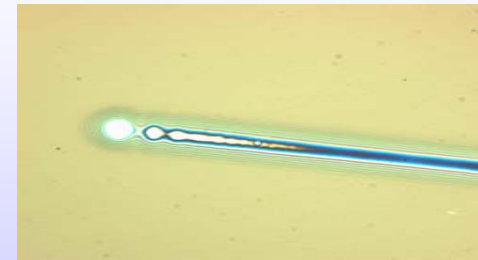
Versuch: Optische Lithographie

Inhalt :

- Durchführung und Bewertung aller wesentlichen Schritte der optischen Lithographie zur Herstellung von Strukturen in einem Photolack
- Photolacke: Funktionsweise, Kontrast, Empfindlichkeit
- Auswirkung von unterschiedlichen Belichtungszeiten und Belichtungsverfahren auf die belichteten Strukturen
- Auflösungsgrenze und Tiefenschärfe in der der opt. Lithographie
- Stehende Wellen durch Reflexion und Interferenzeffekte
- Fresnel-Beugung bei der Proximity-Belichtung, Bestimmung des Abstands zwischen Maske und dem mit Photolack beschichteten Substrat aus dem Abstand der durch Fresnel-Beugung entstehenden Intensitäts-Maxima



Fresnel-Beugung bei einem **breiten**, rechteckigen Streifen (Proximity-Belichtung, teilweise entwickelt).



Fresnel-Beugung bei einem **schmalen**, rechteckigen Streifen (Proximity-Belichtung).

Versuch: Dünne Schichten

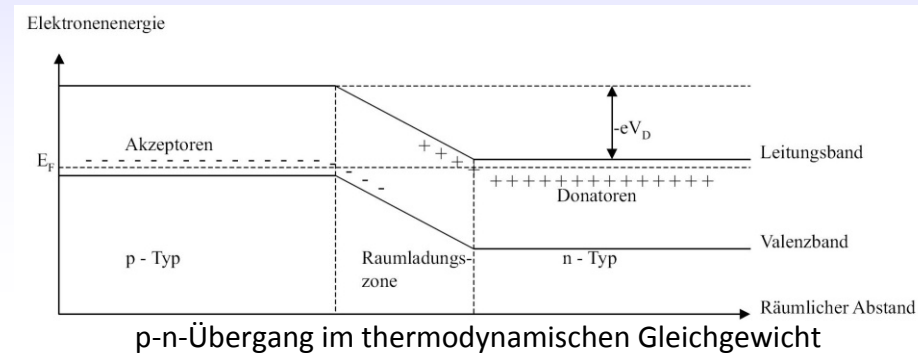
Inhalt :

- Anwendungen dünner Schichten: Vergütungsschicht, Dielektrischer Spiegel, Interferenzfilter
- Grundlagen der Vakuumtechnologie, Pumpenarten
- Verfahren zur Herstellung dünner Schichten
- Methoden zur Schichtdicken- und Druckmessung
- Zwei-und Vielstrahlinterferenz, Fresnelsche Formeln für Reflexion und Transmission an optischen Grenzflächen am Beispiel o.g. Anwendungen
- Herstellung eines Interferenzfilters (Ag-Al₂O₃-Ag) mittels Elektronenstrahlverdampfung
- Vermessung der Durchlasskurve des hergestellten Interferenzfilters in Abhängigkeit der Wellenlänge mit einem Spektralphotometer

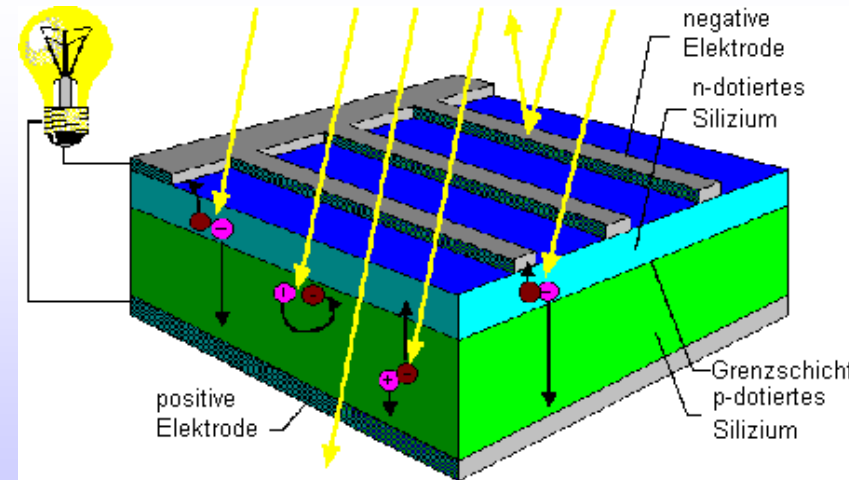
Versuch: Solarzelle

- Dotieren eines Halbleiters mit Fremdatomen ändert Ladungsträgerkonzentration
aus V. Hauptgruppe → freie Elektronen im Leitungsband (n-Typ)
aus III. Hauptgruppe → Löcher im Valenzband (p-Typ)

- Am p-n-Übergang entsteht durch Ladungsträgerdiffusion und Rekombination eine Raumladungszone (RLZ)



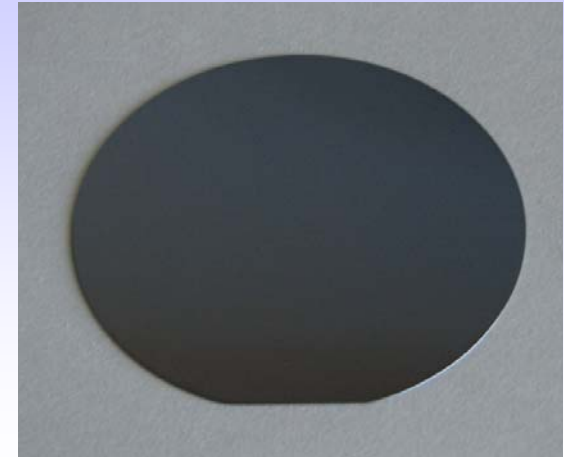
- einfallende Photonen erzeugen Elektron-Loch-Paare
- Potentialgefälle der RLZ trennt Ladungen
- resultierende Spannung an Metallkontakten abgreifbar



Versuch: Solarzelle

Herstellung (vereinfacht)

1) Ausgangsmaterial: p-vordotierter Silizium-Wafer

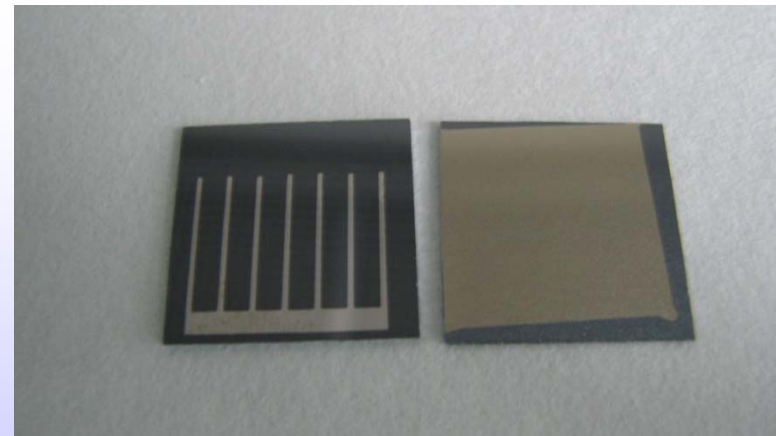


Silizium-Wafer



Dotieren mit Phosphor im Diffusionsofen bei 900°C

2) Dotieren mit Phosphor erzeugt p-n-Übergang

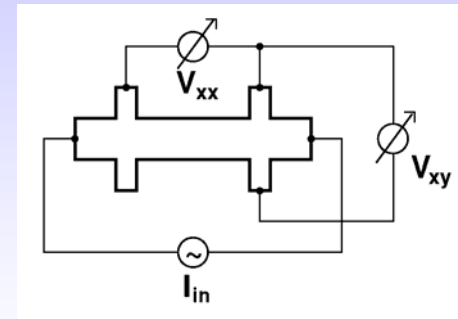
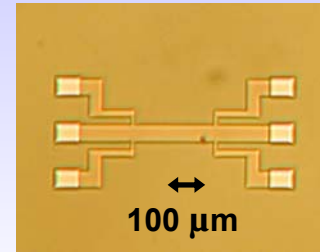


Vorderseite (links) und Rückseite (rechts)
einer im Praktikum hergestellten Solarzelle

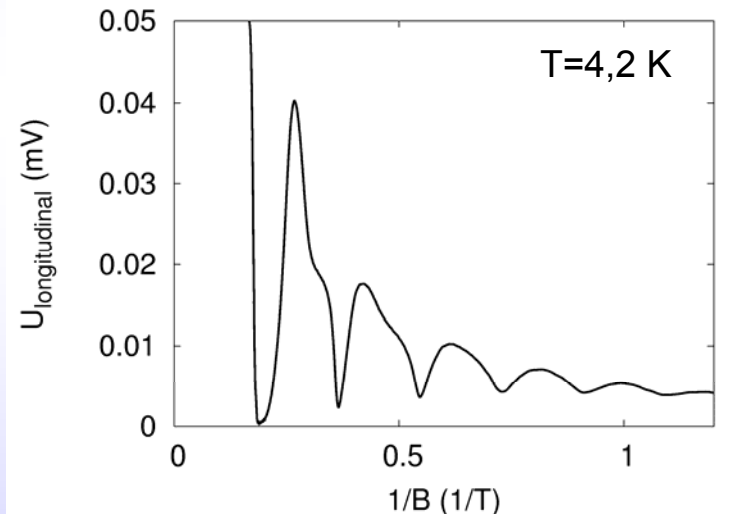
3) Aufdampfen metallischer Kontakte
(mittels Schattenmaske)

Versuch: Quanten Hall Effekt

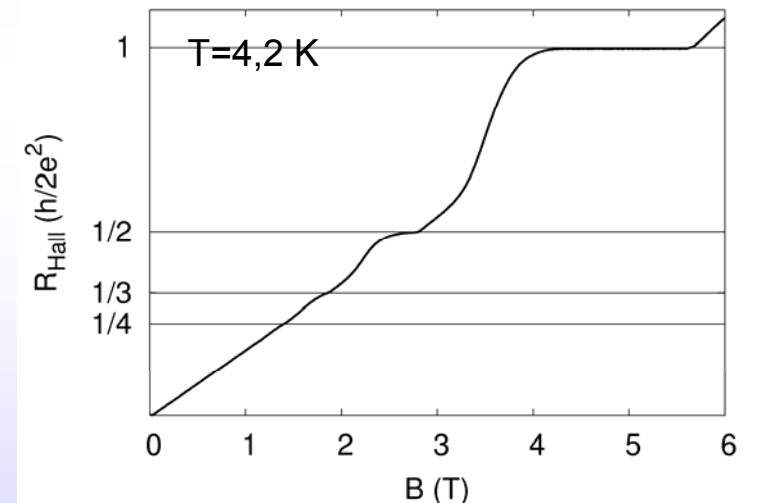
Hallbar-Proben: GaAs/AlGaAs-Heterostruktur mit 2dim Elektronengas in 90 nm Tiefe, strukturiert als Mesa für Vierpunktmessungen



Transportmessungen: Längsspannung & Leitwertsquantisierung im Hallwiderstand



Längsspannung V_{xx} : Shubnikov-de-Haas-Oszillationen (äquidistant in $1/B$), beginnende Spinaufspaltung bei hohen Magnetfeldern



Hallspannung V_{xy} : Leitwertsquantisierung führt zu Plateaus im Hallwiderstand bei $R_n = (h/2e^2)/n \approx 12.906 \text{ k}\Omega / n$ (mit $n=1,2,\dots$)

Versuch: Quanten Hall Effekt

Versuchsaufbau: Glaskryostat mit ^4He und LN_2 Kühlung für Messungen bei 4,2 K

