

Übungen zu Oberflächenphysik

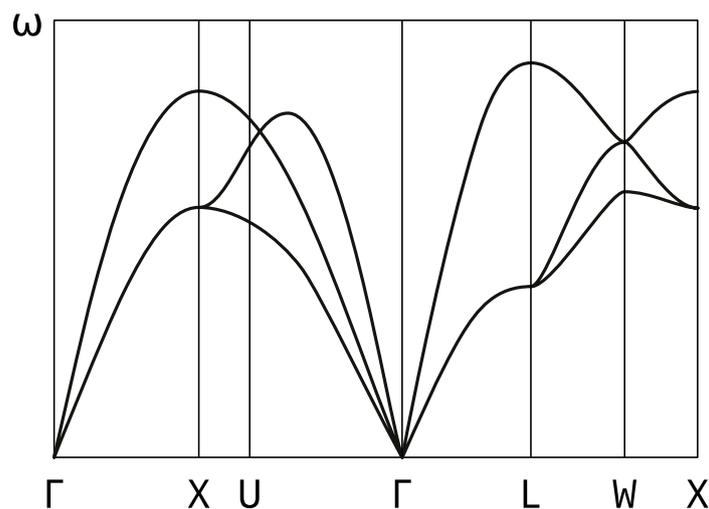
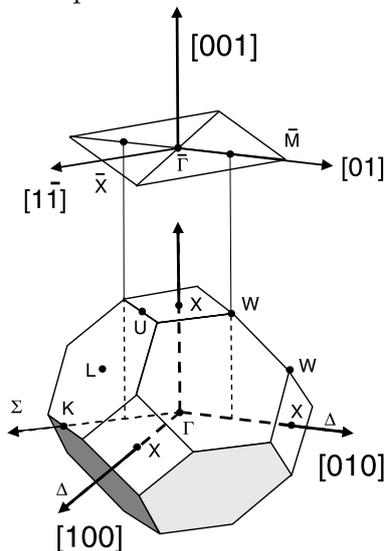
SS 2023

Übungsblatt 6

(Besprechung: 11. Juli 2023, Abgabe bis spätestens 24 Uhr am 10. Juli 2023)

Aufgabe 6.1: Oberflächenphononen

Die Dispersion von Volumen-Phononen in Aluminium ist gegeben:



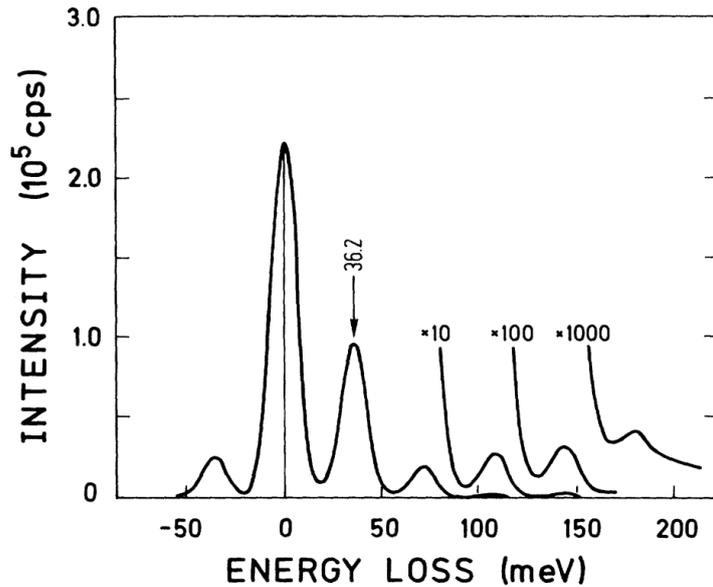
Aus Ibach, H.. *Physics of Surfaces and Interfaces.*, p.620 (2006).

Aus P. Scharoch *et al.*, *Acta Phys. Pol. A* **97**, 349 (2000)

- [A] Projizieren Sie die 3D-Dispersion auf die 2D-Brillouin-Zone der (100) Oberfläche. Bestimmen Sie qualitativ die Phononenbandstruktur auf der Al(100) Oberfläche entlang $\bar{\Gamma} - \bar{X} - \bar{M} - \bar{\Gamma}$.
- [B] Betrachten Sie die ersten drei Lagen des fcc Kristalls in (100) Richtung. Wie viele Oberflächenmoden erwarten Sie höchstens? Wie viele akustische und wie viele optische Moden? Welche Polarisationsrichtungen sind entlang der Hochsymmetrierichtungen möglich?
- [C] Wie können die Oberflächenphononen experimentell nachgewiesen werden? Diskutieren Sie Stärken und Schwächen verschiedener Messtechniken. Gibt es Moden, die nicht gemessen werden können?

Aufgabe 6.2: Fuchs-Kliewer Oberflächenphononen

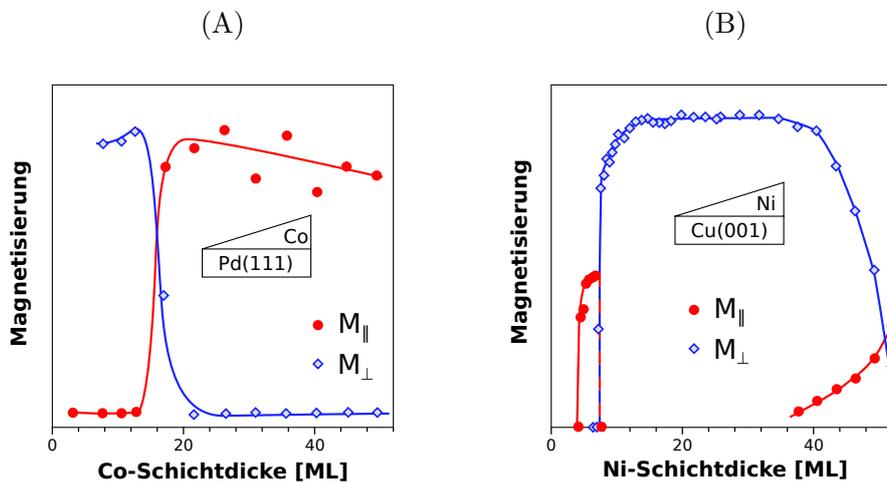
Eine saubere GaAs(110)-Oberfläche wurde mittels HREELS untersucht. Bei Primärenergie von 5 eV beobachtet man mehrere Nebenpeaks bei $-36,2$ meV, $36,2$ meV, $72,4$ meV, $108,6$ meV usw.



Aus: R. Matz und H. Lüth, *Phys. Rev. Lett.* **46**, 500 (1981).

- [A] Diskutieren Sie die Ursache dieser Peaks. In welchen Materialien erwarten Sie Fuchs-Kliwer Phononen? Wie können Oberflächenphononen mit EELS angeregt werden? Warum werden mehrere Nebenpeaks beobachtet?
- [B] Für dieses Experiment wurde GaAs mit Chrom dotiert, sodass die freie Ladungsdichte extrem niedrig ist. Welche Änderungen des Spektrums erwarten Sie für eine GaAs Probe mit einer höheren Elektronendichte?

Aufgabe 6.3: Magnetische Anisotropie



- [A] Die Magnetisierungsrichtung einer Cobaltschicht auf Palladium(111) ist dickenabhängig. Die Komponenten der Magnetisierung senkrecht und parallel zur Oberfläche sind oben in Bild A als Funktion der Dicke eingetragen.

Unter der Annahme uniaxialer Anisotropie gilt für die Energiedichte \mathcal{E} des Systems $\mathcal{E} = -K \cos^2 \theta$, wo θ der Winkel zwischen der Magnetisierung und der Normale zur Oberfläche ist. Die Anisotropiekonstante K setzt sich aus dem Volumen- und dem Oberflächenbeitrag zusammen.

- Ist die Volumenanisotropiekonstante positiv oder negativ?
- Ist die Oberflächenanisotropiekonstante positiv oder negativ?

- Wie groß ist das Verhältnis zwischen den zwei Konstanten?

[B] In dünnen Nickel Schichten auf Kupfer(100) gibt es zwei Reorientierungsübergänge: zwischen 6 und 7 ML und ab 37 ML (s. Bild B). Es wurde in der Vorlesung gezeigt, dass die magnetoelastische Anisotropie eine große Rolle in diesem System spielt. Die Anisotropie des Systems lässt sich mithilfe folgender Formel beschreiben:

$$K = -\frac{1}{2}\mu_0 M^2 + K_{ME} + K_O/d,$$

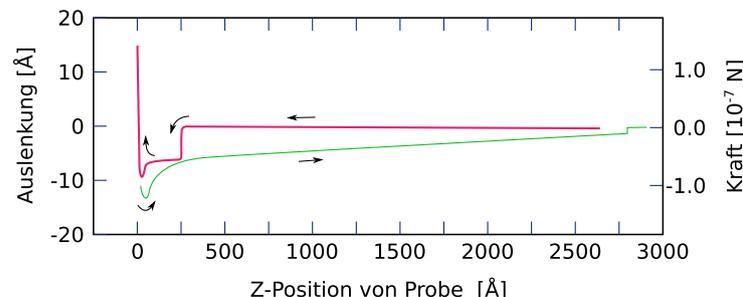
wobei K_{ME} die magnetoelastische und K_O die Oberflächenanisotropiekonstante ist.

- Bestimmen Sie K_O . Nehmen Sie für K_{ME} den in der Vorlesung ausgerechneten Wert $5,35 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ an. Berücksichtigen Sie dabei die Dickenabhängigkeit der Curie-Temperatur und der kritischen Exponente β : $M = M_0(1 - T/T_C)^\beta$. Im gegebenen Bereich gilt $\beta_{d < 7 \text{ ML}} = 0,2$, $\beta_{d > 6 \text{ ML}} = 0,4$, $T_C = 627 \text{ K} \times (1 - 1,44 \text{ ML}/d)^{1,76}$, $M_0 = 0,62 \mu_B/\text{Atom}$.
- Wenn die Nickelschicht mit einer extra Kupferschicht bedeckt wird, steht die Magnetisierung schon bei 6 ML senkrecht zur Oberfläche. Erklären Sie dieses Phänomen und berechnen Sie die Reorientierungsdicke für eine freihängende Ni-Schicht.
- Chappert und Bruno haben bewiesen (*J. Appl. Phys.* **64** 5736), dass es eine kritische Schichtdicke d_c gibt, so dass für $d > d_c$ die Verzerrung ε_{11} nicht mehr gleich den Gitterfehlpass η ist, sondern dickenabhängig ist mit $\varepsilon_{11} = -\eta d_c/d$ wegen Versetzungsbildung. Rechnen Sie d_c für Ni/Cu(100) aus. Nehmen Sie dabei an, dass die Magnetisierung bei 37 ML in der Ebene liegt. Warum ist die tatsächliche Reorientierung kontinuierlich?

Aufgabe 6.4: Rasterkraft- und Raster-Kelvin-Mikroskopie (AFM & TPFM)

In einem Rasterkraftmikroskop wird die Kraft zwischen einem biegbaren Cantilever und der Oberfläche gemessen. Die Messung verschiedener Komponenten dieser Kraft erlaubt eine Untersuchung verschiedener Eigenschaften der Oberfläche.

- [A] Um die Kraft an einer Stelle der Probe zu charakterisieren werden in AFM sog. Kraft-Abstands-Kurven gemessen. Dabei wird die Kraft, die an der Spitze wirkt, als Funktion des Abstands zwischen Probe und Cantileverfeststelle gemessen. Wie sehen solche Kurven aus für eine typische Oberfläche? Zeichnen Sie Kurven für beide Annäherung und Zurückziehen der Spitze.
- [B] Auf komplizierteren Oberflächen wo mehr Kräfte ins Spiel kommen, können Kraft-Abstands Kurven komplizierter aussehen. Betrachten Sie folgende Kurven, die auf einer flüssigen Polymer-Schicht gemessen wurden. Wie kann der Unterschied zwischen diesen Kurven und den aus A erklärt werden?



Aus : C. Mate, M. Lorenz, V. Novotny, *J. Chem. Phys.* **90**, 7550 (1989).

- [C] Raster-Kelvin-Mikroskopie nutzt die hohe Genauigkeit der Kraftmessung in AFM um die lokale Austrittsarbeit der Oberfläche zu bestimmen. Welche Kraft wird dabei gemessen?

Hinweis: Stellen Sie sich zwei isolierte Körper im Vakuum vor. Wie ändert sich die elektronische Struktur des Systems wenn diese Körper miteinander elektrisch verbunden werden? Welche Kraft entsteht zwischen den Körper und wie hängt sie von der Austrittsarbeit der zwei Körper und dem Abstand dazwischen ab?

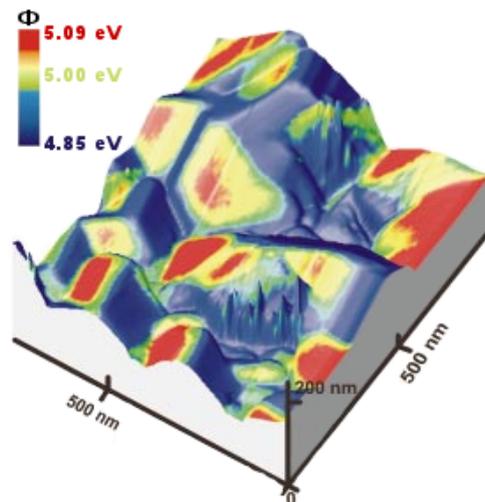
- [D] In einer vereinfachten TPFM-Messung wird zwischen Spitze/Cantilever und Probe eine Wechselspannung $V_{\text{bias}} = V_{\text{dc}} + V_{\text{ac}} \sin(\omega_{\text{mod}}t)$ angelegt. Wie nutzen Sie diesen Versuchsaufbau am besten, um die Austrittsarbeit zu messen?

Hinweis: Ein Lock-in Verstärker ist für diese Messung nötig. V_{dc} wird während der Messung angepasst.

In KPFM/TPFM wird die Oszillationsamplitude bei der Frequenz ω_{mod} detektiert und gemullt, indem die Gleichspannung so gewählt wird, dass $V_{\text{dc}} = V_{\text{sp}}$ und somit $F_{\omega_{\text{mod}}} = 0$.

- [E] Dünne Filme von p-type CuGaSe₂ sind als Solarzellenmaterial interessant. Ein polykristalliner Film dieses Materials wurde mittels KPFM untersucht. Im Quasi-3D-Bild ist die Topographie des Filmes dargestellt. Zusätzlich ist die gemessene lokale Austrittsarbeit in jedem Punkt als Farbwert angegeben. Interpretieren Sie das Bild. Wie kommen die Unterschiede in der Austrittsarbeit zustande?

Hinweis: CuGaSe₂ hat dieselbe Kristallstruktur wie Chalcopyrite/Zinkblende mit alternierenden Se- und CuGa-Flächen.

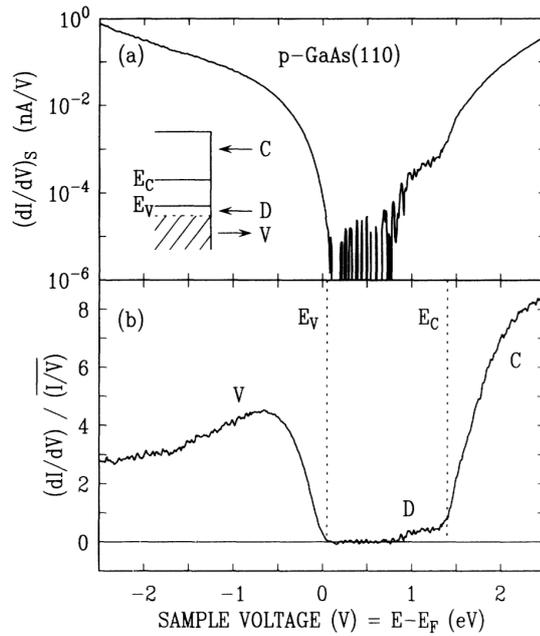


Aus: Sadewasser et al., *Appl. Phys. Lett.* **80**, 2979 (2002)

Aufgabe 6.5: Tunnelspektroskopie

- [A] Die unten gezeigte $\frac{dI}{dV}$ -Kurve wurde von R. Feenstra et al. auf p-dotiertem GaAs(100) mithilfe eines RTMs mit einer Wolfram-Spitze gemessen. Interpretieren Sie das Tunnelspektrum.
- [B] Das zweite Spektrum stellt die normierte differentielle Leitfähigkeit ($\frac{dI}{dV} / \frac{I}{V}$) dar. Was ist der Vorteil dieser Darstellung? Hinweis: Welche Faktoren außer der Zustandsdichte enthält $\frac{dI}{dV}$?
- [C] Wie würde das Tunnelspektrum aussehen, wenn die Autoren eine supraleitende Spitze benutzt hätten? Hinweis: Die Zustandsdichte eines Supraleiters in der BCS-Theorie ist gegeben durch:

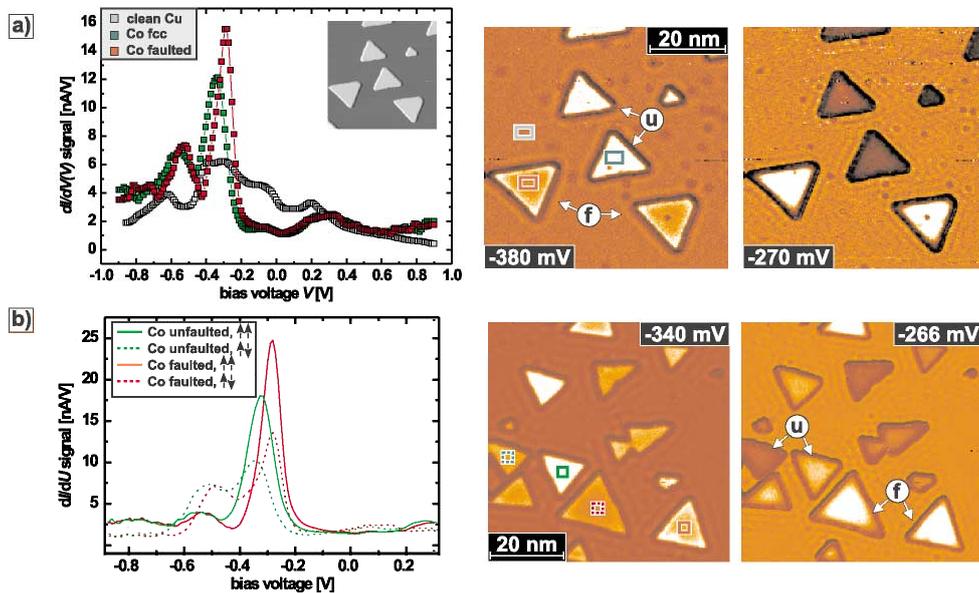
$$\rho(E_F + E) = \begin{cases} \frac{E}{\sqrt{E^2 - \Delta^2}} & E > \Delta, \\ 0 & E < \Delta. \end{cases}$$



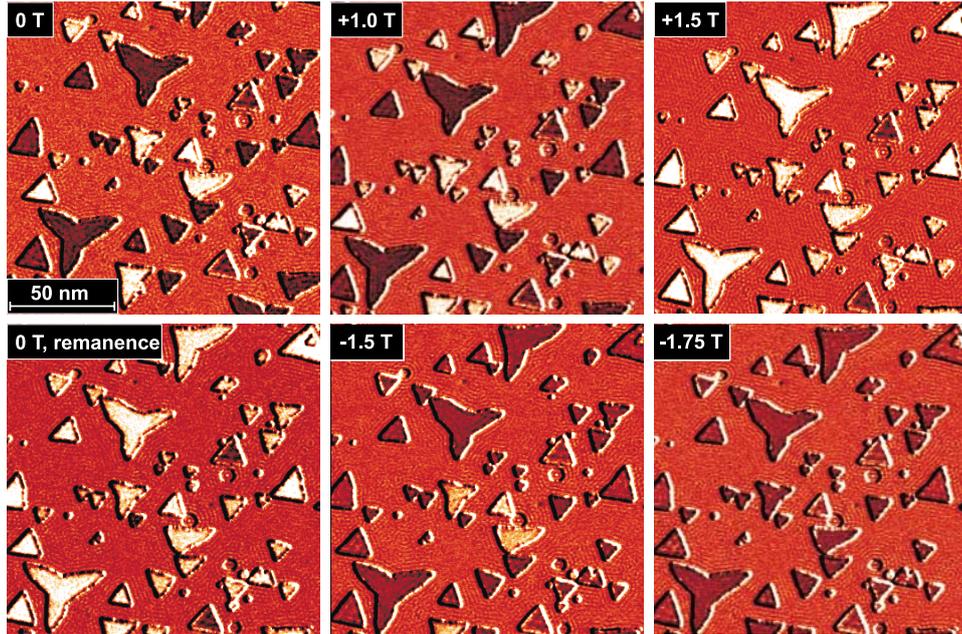
Aus: R. Feenstra *et al.*, Phys. Rev. B **50**, 4561 (1994)

Aufgabe 6.6: Spinpolarisierte RTS

[A] Co Inseln auf Cu(111) wurden im RTM mit einer nicht-magnetischen Spitze (a) und einer magnetischen Spitze (b) untersucht. Auf der Abbildung sind dI/dU Scans zu sehen. Wodurch entsteht der Kontrast zwischen verschiedenen Inseln?



[B] In demselben System wurde die Feldabhängigkeit dieses Kontrastes untersucht. Was kann über die Anisotropie der Inseln ausgesagt werden?



Aus : O. Pietzsch al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 057202 (2004).

Aufgabe 6.7: Dzyaloshinskii-Moriya-Wechselwirkung (DMI)

In magnetischen Festkörpern mit ausreichender Spin-Bahn-Wechselwirkung und gebrochener Inversionssymmetrie existiert eine Austauschwechselwirkung, die eine zueinander senkrechte Spinkonfiguration begünstigt (Dzyaloshinskii-Moriya-Wechselwirkung). Betrachten Sie den konkurrierenden ferromagnetischen Austausch und die DMI Wechselwirkung in einer eindimensionalen Spinkette:

$$H = - \sum_{ij} J_{ij} \mathbf{S}_i \mathbf{S}_j - \sum_{ij} D_{ij} (\mathbf{S}_i \times \mathbf{S}_j) \quad (1)$$

[A] Zeigen Sie, dass eine Spinspirale mit der Periode $Q_s \sim |D|/(|J|a)$ den feldfreien Grundzustand darstellt. Setzen Sie für die Spindichte folgenden Ausdruck an: $\mathbf{S}(Q) = \mathbf{S}_1 \cos(Qr) + \mathbf{S}_2 \sin(Qr)$ mit $|\mathbf{S}_1| = |\mathbf{S}_2| = S_Q$ und $\mathbf{S}_1 \perp \mathbf{S}_2$.

[B] Was passiert, wenn Sie entlang der Spinkette ein magnetisches Feld \mathbf{B} anlegen? Skizzieren Sie das Phasendiagramm im B-T-Raum für $T \ll T_c$, wobei $T > T_c$ den paramagnetischen Zustand darstellt.

[C] Bei Temperaturen nahe T_c und endlichem Feld in $\langle 110 \rangle$ Richtung, konnte im Helimagneten MnSi eine zusätzliche Phase identifiziert werden, und zwar ein hexagonales Skyrmiongitter (Abb. 1). Dabei ist das magnetische Moment im Zentrum des Skyrmions antiparallel zum externen Feld ausgerichtet und durch einen Wirbel umgeben. Motivieren Sie das Zustandekommen dieses Zustands qualitativ. *Tipp*: Das hexagonale Skyrmiongitter kann als Superposition dreier Spinspiralen mit 120° zwischen den Q-Vektoren betrachtet werden.

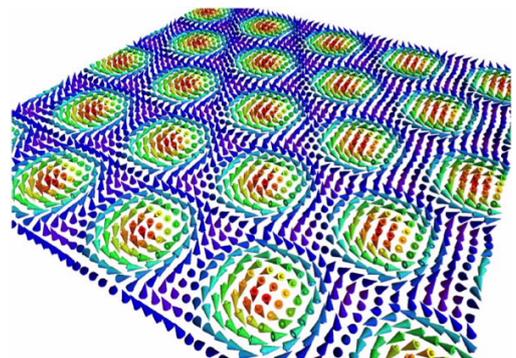


Abbildung 1: Aus

<https://phys.org/news/2017-06-neutron-skyrmions-material.html> (12.06.2021)