

Physik der Nanostrukturen

613348

14. Juli 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Nanomaterialien	2
1.1	Nanopartikel und Nanodrähte	2
1.1.1	Nanopartikel	2
1.1.2	Nanodrähte	2
1.2	Quantenmaterialien aus Halbleiter-Heterostrukturen	2
1.2.1	Heterofeldeffekt-Transistor	3
1.2.2	Aharonov-Bohm-Effekt	3
1.3	Kohlenstoffbasierte Nanostrukturen	4
1.3.1	Fullerene	4
1.3.2	Kohlenstoffnanoröhren	4
1.3.3	Graphen	4
1.4	Van-der-Waals 2D-Materialien	5
2	Physikalische Eigenschaften	6
2.1	Mechanische Eigenschaften	6
2.2	Optoelektronische Eigenschaften	6
2.3	Elektrische Eigenschaften	6
2.4	Thermoelektrische Eigenschaften	7
3	Nanotechnologie	8
3.1	Epitaxie	8
3.2	Lithografie	8
4	Anhang	9
4.1	Die goldenen 3	9
4.2	Zustandsdichte von quasi-0d-, -1d-, -2d- und -3d-Materialien	10
4.3	Quantisierter Leitwert	14
4.4	Drude-Modell	15
4.5	Mathematische Beschreibung der Nanophysik	15
4.6	Spezifischer Widerstand Metalle und Halbleiter	15
4.7	Streumechanismen	16

1 Nanomaterialien

1.1 Nanopartikel und Nanodrähte

1.1.1 Nanopartikel

Nanopartikel sind Objekte mit einer Größe von 1 nm bis < 100 nm.

Eigenschaften	- erhöhtes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis - tiefer Schmelzpunkt
Beispiele	- Metalle (Gold) - Oxide
Anwendung(spotential)	- Katalysator - Sonnencreme - Antibakterielle Kleidung - Zement

1.1.2 Nanodrähte

Nanodrähte sind Materialien mit zwei Raumrichtungen, die im nanoskaligen Bereich von 1 nm bis < 100 nm liegen.

Eigenschaften	- vielseitige Wachstumsformen
Anwendung(spotential)	- Substrat in Batterie (Struktur ist nach mehreren Zyklen erhalten)

1.2 Quantenmaterialien aus Halbleiter-Heterostrukturen

Materialien, deren physikalische Eigenschaften maßgeblich durch quantenmechanische Effekte bestimmt sind. Je nachdem, wie viele Raumrichtungen eingeschränkt sind, d.h. im Bereich der De-Broglie-Wellenlänge liegen, spricht man von Quantenfilmen, -drähten oder -punkten.

Eigenschaften	- Zustandsdichte $Z(E)$ je nach Dimension - quantisierter Leitwert - Aharonov-Bohm-Effekt
Beispiele	- Graphen (Film) - Heterofeldeffekt-Transistor (Film) - Quantenpunktkontakt (Draht) - Quantenring
Anwendung(spotential)	- Quantenkommunikation - Quantensensoren - Quantencomputing - Einzelphotonenquelle / Photodetektor (Quantenpunkt)

1.2.1 Heterofeldeffekt-Transistor

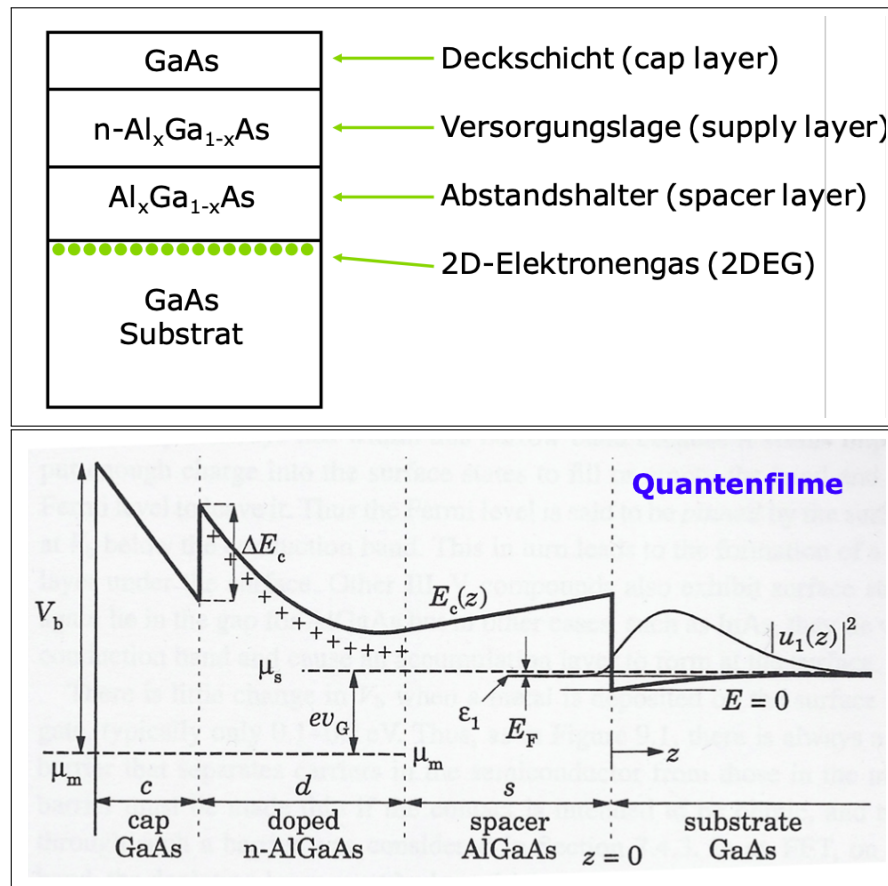


Abbildung 1: Schema und Potential des Leitungsbands eines Heterofeldeffekt-Transistors

- Cap: Schutz vor Oxidation
- Versorgungslage: Stellt Ladungsträger zur Verfügung
- Spacer-Layer erhöht die Beweglichkeit, da Stöße an Dotier-Atomen verringert
- GaAs, AlGaAs haben gute Übereinstimmung in Gitterkonstante
- Anlegen der Gate-Spannung erhöht Fermi-Energie

1.2.2 Aharonov-Bohm-Effekt

- Effekt, der die reale Existenz des Vektorpotentials beweist
- Kann in einem **Quantenring** beobachtet werden = Struktur, bestehend aus 2 2DEG-Reservoirs, die jeweils in zwei Quantendrähte übergehen und einen Ring bilden
- Für die Wellenfunktionen der Wellenfunktion entlang Weg 1 bzw. Weg 2 gilt

$$\psi'_1 = \psi_1 \cdot e^{-i \frac{e}{\hbar} \int_{W_1} \vec{A}(\vec{x}) \cdot d\vec{x}}, \quad \psi'_2 = \psi_2 \cdot e^{-i \frac{e}{\hbar} \int_{W_2} \vec{A}(\vec{x}) \cdot d\vec{x}} \quad (1)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichte der resultierenden Funktion ist dann

$$|\psi'_1 + \psi'_2|^2 = 2|\psi|^2 \left(1 + \cos(\alpha_1 - \alpha_2 - \underbrace{\Delta\phi}_{= \frac{2\pi}{\Phi_0} \Phi}) \right) \quad (2)$$

- Daraus lässt sich die Transmissionswahrscheinlichkeit berechnen, die proportional zum Leitwert ist

$$\frac{1}{R} \propto T = 2T_0 \left(1 + \cos\left(\alpha + \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \right) \quad (3)$$

In Quantenringen lassen sich also **oszillierende Leitwerte** beobachten.

1.3 Kohlenstoffbasierte Nanostrukturen

Beispiel/Anwendungspotential

Diamant

- sp³-hybridisiert

Graphit

- sp²-hybridisiert

1.3.1 Fullerene

Symmetrische, sphärische Anordnung aus 5-6 eckigen Kohlenstoffverbindungen.

Beispiele	- Bucky-Ball
Anwendung(spotential)	- Transport von Nanopartikeln

1.3.2 Kohlenstoffnanoröhren

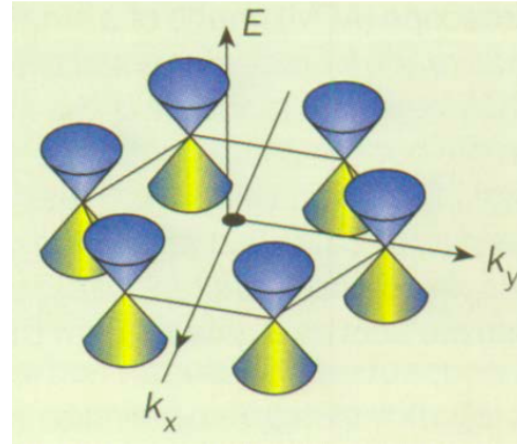
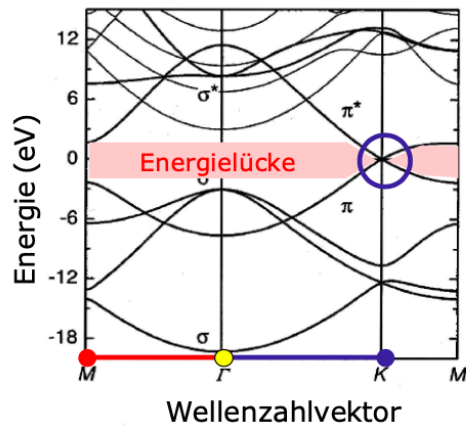
Zylindrische Nanostrukturen aus ein- oder mehrwandigen Graphenschichten.

Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> - je nach Wickelart metallisch, halbleitend - hohes Aspektverhältnis - erhöhte Zugfestigkeit σ_{\max} - erhöhte Beweglichkeit μ - erhöhte thermische Leitfähigkeit λ - chemisch inert
Anwendung(spotential)	<ul style="list-style-type: none"> - Spitze des Rastertunnelmikroskops (RTM) - Spitze des Rasterkraftmikroskops (RKM) - "Damaszener Schwert"

1.3.3 Graphen

Monolage des Graphits, d.h. quasi-zweidimensionale hexagonale Kohlenstoffstruktur.

Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> - monoatomare Ausdehnung - hohe Zugfestigkeit - hohe elektrische Leitfähigkeit - Bandstruktur: Halbleitende Eigenschaften am M-Punkt; K-Punkt: Lineare Dispersion (Dirac-Kegel), Elektronen wie masselose Dirac-Fermionen; anisotrope Leitfähigkeit
---------------	--



1.4 Van-der-Waals 2D-Materialien

Van-der-Waals 2D-Materialien sind Heterostrukturen, die durch abwechselndes Stapeln verschiedener 2D Schichten erzeugt werden ([LEGO-Prinzip](#)).

Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> - Starke, kovalente Bindungen innerhalb einer Schicht - Schwache van-der-Waals-Bindungen zwischen den Schichten
Anwendung(spotential)	<ul style="list-style-type: none"> - ultradünne Dielektrika - selektive permeable Membrane - Graphen-basierte Bauelemente

2 Physikalische Eigenschaften

2.1 Mechanische Eigenschaften

- **Elastizitätsmodul E**
Gibt den Zusammenhang zwischen der auf das Material wirkenden "Spannung" (**technische Zugspannung**) σ und der "Dehnung" (**technische Zugdehnung**) ε

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

- **Zugfestigkeit σ_{\max}**
Maximale Spannung σ_{\max} , die ein Material aushält, bevor es reißt
- **Abrieb**
- **Bruchfestigkeit**

Beispiel

Die maximale Länge eines Weltraumaufzuges aus Stahl gegenüber eines Aufzuges aus Kohlenstoff-nanoröhrchens ist etwa 150mal kürzer.

$$\begin{aligned} L_{\max, \text{Stahl}} &\approx 26 \text{ km} \\ L_{\max, \text{KNR}} &\approx 4100 \text{ km} \end{aligned}$$

2.2 Optoelektronische Eigenschaften

- **Lichtabsorption/-transmission**
- **Photolumineszenz**
Emission von Photonen nach vorheriger Anregung durch Licht

Beispiele

- Geometrie des Quantenpunkts bestimmt Wellenlänge für Absorption/Emission
- **Plasmonenfrequenz** (=Frequenz, mit der Elektronen kollektiv im Material schwingen) bestimmt die Farbe von Nanopartikeln

2.3 Elektrische Eigenschaften

- **elektrische Leitfähigkeit σ / spezifischer Widerstand ρ**
Gibt den Zusammenhang zwischen dem auf das Material wirkende elektrische Feld \vec{E} und der hervorgerufenen Stromdichte \vec{j} an.

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (5)$$

- **Bandlücke E_g**
Energiedifferenz der Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband.

$$E_g = \begin{cases} 0 \text{ eV}, & \text{Leiter} \\ 0,1 - 2 \text{ eV}, & \text{Halbleiter} \\ > 3 \text{ eV}, & \text{Isolator} \end{cases} \quad (6)$$

- **Beweglichkeit μ**

Gibt den Zusammenhang zwischen dem auf das Material wirkenden elektrischen Feld \vec{E} und die dadurch Geschwindigkeit der Ladungsträger \vec{v}_D

$$\vec{v}_D = \mu \vec{E} \quad (7)$$

2.4 Thermoelektrische Eigenschaften

- **Seebeck-Koeffizient S**

Gibt den Zusammenhang zwischen der im Material entstehenden elektrischen Spannung aufgrund einer anliegenden Temperaturdifferenz an

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (8)$$

- **ZT-Wert** Bestimmt die Effizienz eines Thermoelektrikas

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\lambda} \quad (9)$$

3 Nanotechnologie

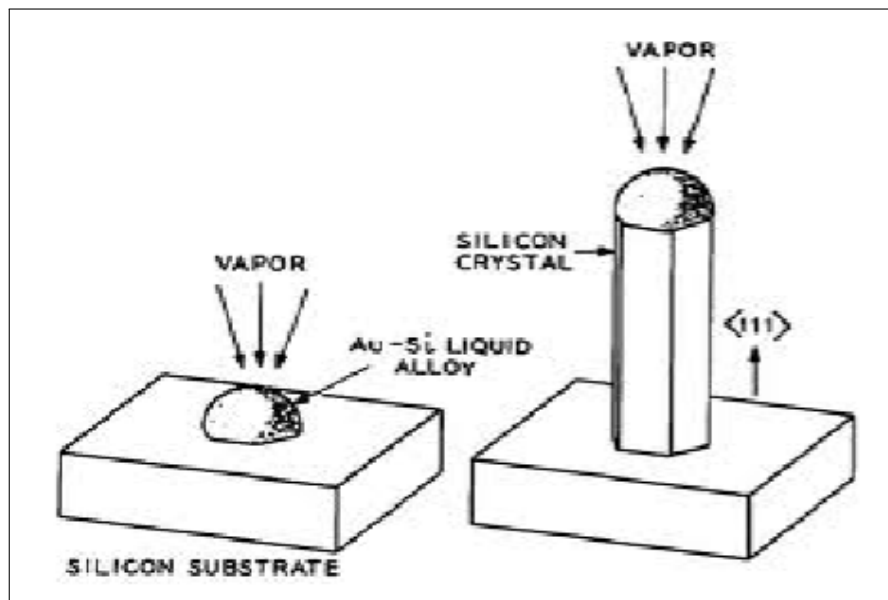
3.1 Epitaxie

- Nanostrukturen können durch [Epitaxie](#) hergestellt werden.
- Man unterscheidet in [Homoepitaxie](#), bei der das Material, auf dem gewachsen wird, dasselbe ist, wie das Material, mit dem gewachsen wird und [Heteroepitaxie](#), bei dem es sich um verschiedene Materialien handelt.
- Für Heteroepitaxie ist vor allem ein ähnlicher Gitterabstand wichtig, damit die Strukturen möglichst geringe Verspannungen haben und hoch gewachsen werden können.

Methoden

- [Molekülstrahlepitaxie](#)
- [Flüssig-Gas-Phasen-Epitaxie](#)

Tropfen flüssigen Metalls wird auf Substrat gebracht und von dort aus mittels Dampfgemisch Einstrahlung im Vakuum gewachsen. Ergebnis ist ein Nanodraht.



3.2 Lithografie

1. Beschichtung des Substrats mit einem Lack
2. Projiziere eine Maske auf den Lack
3. Lackentfernung
4. Ätzen/Dotieren der freien Stellen

Die Lithografie kann mit extrem ultravioletter Strahlung ([EUV](#)) oder [Elektronenstrahlen](#) durchgeführt werden.

4 Anhang

4.1 Die goldenen 3

Gelangt die Geometrie von Materialien in den Bereich von Nanostrukturen,

- Oberflächen-Volumen-Verhältnis
- Systemabmessung der Nanostrukturen erreicht physikalisch charakteristische Längen
- Quanteneffekte

Tabelle 1: Übersicht physikalisch charakteristische Größen

physikalisch char. Größe		(Quasi)Teilchen	Bemerkung
mittlere freie Weglänge (bzw. Stoßzeit)	L_m	Ladungsträger	Unterschritten, findet ballistischer (=keine Streuung) und kein diffusiver Transport statt
De-Broglie-Wellenlänge	λ_{DB}		Kennzeichnet Beginn der Quanteneffekte
Fermi-Wellenlänge	λ_F	Fermionen	spezischer Fall der De-Broglie-Wellenlänge für Fermionen, d.h. Elektronen, Protonen, etc.
Phasenkohärenzlänge	L_ϕ		Unterschritten gibt es eine feste Phasenbeziehung und Interferenzeffekte können beobachtet werden
Spin-Flip-Länge	L_s	Teilchen mit Spin $\neq 0$	
Diffusionslänge			

4.2 Zustandsdichte von quasi-0d-, -1d-, -2d- und -3d-Materialien

Für ein Elektronengas in 0d, 1d, 2d und 3d in einem Volumen mit periodischen Randbedingungen gilt (und falls vorhanden nur unter der Betrachtung des ersten Subbands)

$$Z_{0d}(E) = 2 \cdot \delta(E) \quad (10)$$

$$Z_{1d}(E) = \frac{L}{\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (11)$$

$$Z_{2d}(E) = \frac{A}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{2/2} \quad (12)$$

$$Z_{3d}(E) = \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E} \quad (13)$$

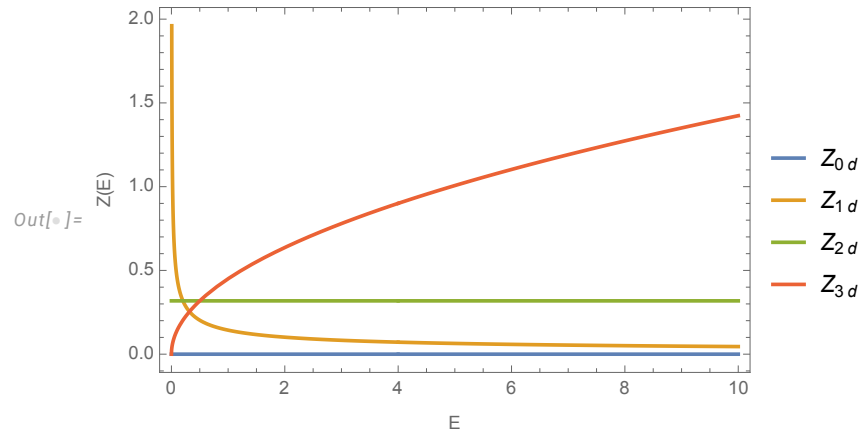


Abbildung 2: Zustandsdichten in Abhängigkeit der Energie für 1d, 2d und 3d

Unter der Berücksichtigung anderer Subbänder, folgt

$$Z_{0d}(E) = 2 \cdot \sum_i \delta(E - E_i) \quad (14)$$

$$Z_{1d}(E) = \frac{L}{\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{1/2} \cdot \sum_{n_1, n_2} \frac{1}{\sqrt{E - E_{n_1, n_2}}} \cdot \Theta(E - E_{n_1, n_2}) \quad (15)$$

$$Z_{2d}(E) = \frac{A}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{2/2} \cdot \sum_{n_1} \Theta(E - E_{n_1}) \quad (16)$$

$$Z_{3d}(E) = \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{3/2} \sqrt{E} \quad (17)$$

und somit eine Dirac-Kamm für 0d, ein periodisch erhöhtes und wiederkehrendes Muster von 1d, 2d, aber ein unverändertes 3d, da dort keine Quantisierung und somit keine Subbänder vorliegen.

Die zugehörigen [Dispersionsrelationen](#) sind

$$E_{0d} = E_{n_x, n_y, n_z} \quad (18)$$

$$E_{1d}(k_x) = \frac{\hbar^2}{2m} k_x^2 + E_{n_y, n_z} \quad (19)$$

$$E_{2d}(k_x, k_y) = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2) + E_{n_z} \quad (20)$$

$$E_{3d}(k_x, k_y, k_z) = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \quad (21)$$

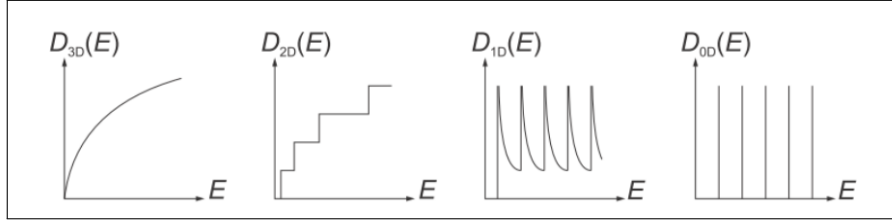


Abbildung 3: Zustandsdichten in Abhängigkeit der Energie für quasi-0d, -1d, -2d und -3d unter der Berücksichtigung der Subbänder

Herleitung

Betrachte ein freies Elektron in einem Volumen mit der periodischen Randbedingung $u(0) = u(L)$.

1d

Die stationäre Schrödinger-Gleichung ist dann

$$\begin{aligned}\hat{H}u(x) &= Eu(x) \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x) &= Eu(x) \\ \Leftrightarrow \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x) &= -\frac{2mE}{\hbar^2} u(x) \equiv -k^2 u(x)\end{aligned}$$

Diese DGL wird gelöst durch

$$u(x) \propto e^{ikx}$$

Aus den Randbedingungen folgt

$$\begin{aligned}u(0) &= u(L) \\ 1 &= e^{ikL} \\ \Leftrightarrow 1 &= \cos(kL) + i \sin(kL) \\ \Rightarrow k_n &= \frac{2\pi}{L} n \\ \Rightarrow E_n &= \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{2\hbar^2 \pi^2}{mL^2} n^2\end{aligned}$$

Der Abstand zwischen zwei Punkten im k -Raum ist somit

$$\Delta k = k_{n+1} - k_n = \frac{2\pi}{L}$$

Die Zustandsdichte im k -Raum ist, unter Berücksichtigung der Spin-Entartung, somit

$$Z(k) = 2 \cdot \frac{1}{\frac{2\pi}{L}} = \frac{L}{\pi}$$

Die Teilchenzahl im Volumen V ist dann

$$\begin{aligned}N &= \int dk Z(k) = 2 \frac{L}{2\pi} \int dk = 2 \frac{L}{2\pi} \int \frac{dk}{dE} dE = 2 \frac{L}{2\pi} \int \frac{1}{\frac{dE}{dk}} dE \\ &= 2 \frac{L}{2\pi} \int \frac{1}{\frac{\hbar^2 k}{m}} dE = 2 \frac{L}{2\pi} \int \frac{1}{\frac{\hbar^2}{m} \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}} dE = 2 \frac{L}{2\pi} \frac{\sqrt{m}}{\hbar} \int \frac{1}{\sqrt{2E}} dE = \\ &= 2 \frac{L}{2\pi} \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} \frac{1}{\sqrt{E}} = \int dE Z(E)\end{aligned}$$

Somit ist die Zustandsdichte im 1d Fall in Abhängigkeit der Energie

$$Z_{1d}(E) = \frac{L}{\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{E}}$$

2d

Im zweidimensionalen Fall ist die Zustandsdichte im k -Raum

$$Z(k) = 2 \cdot \frac{1}{\frac{2\pi}{L}} \frac{1}{\frac{2\pi}{L}} = 2 \frac{L^2}{(2\pi)^2} \equiv 2 \frac{A}{(2\pi)^2}$$

Betrachte erneut die gesamte Teilchenzahl

$$\begin{aligned} N &= \int d^2k Z(k) = 2 \frac{A}{(2\pi)^2} \int d^2k \stackrel{\text{Pol.koord.}}{=} 2 \frac{A}{(2\pi)^2} \int dk k \int d\varphi = \\ &= 2 \frac{A}{(2\pi)^2} 2\pi \int \frac{dk}{dE} dE k = 2 \frac{A}{2\pi} \int \frac{1}{\frac{\hbar^2 k}{m}} dE k = 2 \frac{Am}{2\hbar^2 \pi} \int dE \\ &= \int dE Z(E) \end{aligned}$$

Somit ist die Zustandsdichte im 2d Fall in Abhängigkeit der Energie

$$Z_{2d}(E) = 2 \frac{Am}{2\hbar^2 \pi} \equiv \frac{A}{2\pi} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{2/2}$$

3d

Im dreidimensionalen Fall ist die Zustandsdichte im k -Raum

$$Z(k) = 2 \cdot \frac{1}{\frac{2\pi}{L}} \frac{1}{\frac{2\pi}{L}} \frac{1}{\frac{2\pi}{L}} = 2 \frac{L^3}{(2\pi)^3} \equiv 2 \frac{V}{(2\pi)^3}$$

Betrachte erneut die gesamte Teilchenzahl

$$\begin{aligned} N &= \int d^3k Z(k) = 2 \frac{V}{(2\pi)^3} \int d^3k = 2 \frac{V}{(2\pi)^3} \int dk k^2 \int d\theta d\varphi \sin \theta = \\ &= 2 \frac{V}{(2\pi)^3} \cdot 4\pi \int dE \frac{1}{\frac{\hbar^2 k}{m}} k^2 = 2 \frac{V}{2\pi^2} \frac{m}{\hbar^2} \int dE \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} = \frac{V}{2\pi^2} \frac{2^{3/2} m^{3/2}}{\hbar^3} \sqrt{E} = \\ &= \int dE Z_{3d}(E) \end{aligned}$$

Somit ist die Zustandsdichte im 3d Fall in Abhängigkeit der Energie

$$Z_{3d}(E) = \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{3/2} \sqrt{E}$$

0d

Im quasi nulldimensionalen Fall

4.3 Quantisierter Leitwert

Der quantisierte Leitwert ist

$$g(E) = \frac{2e^2}{h} \sum_{n_1, n_2} \Theta(E - E_{n_1, n_2}) \quad (22)$$

wobei E die Energie der Transportelektronen ist. Diese wird durch die angelegte Gate-Spannung

$$E = E_F + eE \quad (23)$$

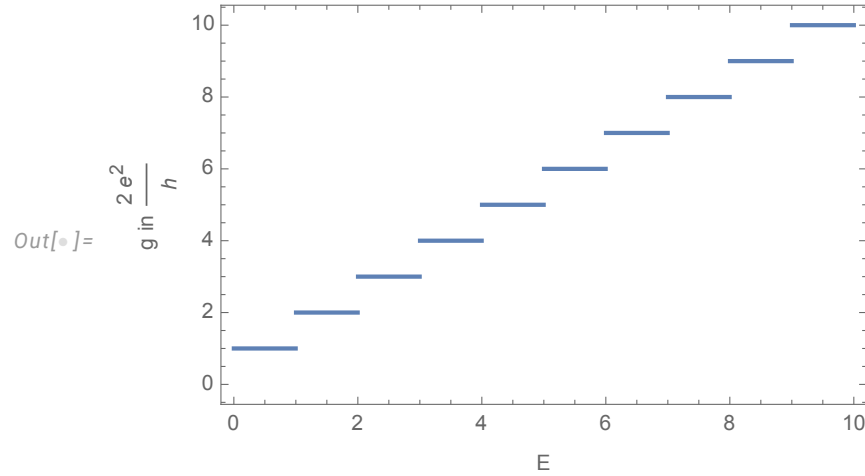


Abbildung 4: Quantisierter Leitwert in Abhängigkeit der Systemenergie

Herleitung

Suche den Leitwert

$$g := \frac{1}{R} = \frac{dI}{dU}$$

Betrachte einen 1d Draht der Länge L . Dabei ist die Stromstärke gleich der -dichte $I = j$. Beginne also bei $j = -env$ mit der Teilchendichte $n = \frac{N}{L}$.

$$\begin{aligned} dj &= -e \cdot dn \cdot v = -e \cdot \frac{dN}{L} \cdot \frac{p}{m} = -e \cdot \frac{D(k) dk}{L} \cdot \frac{\hbar k}{m} = -e \cdot \frac{2 \frac{1}{2\pi} dk}{L} \cdot \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk} = \\ &= -2e \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\hbar} dE = -2e \frac{1}{h} (-e dU) = + \frac{2e^2}{h} dU \\ \Rightarrow g_i &= \frac{\frac{2e^2}{h} dU}{dU} = \frac{2e^2}{h} \\ \Rightarrow g &= \frac{2e^2}{h} \sum_i \Theta(E - E_i) \end{aligned}$$

4.4 Drude-Modell

Das Drude-Modell ist ein klassisches Modell, das die Elektronenbewegung im elektrischen Feld beschreibt.

$$ma = -e\vec{E} - \frac{m}{\tau}v \quad (24)$$

Für den stationären Fall $a = 0$ ergeben sich

$$v_D = -\frac{e\tau}{m}E \quad (25)$$

$$\mu = -\frac{e\tau}{m} \quad (26)$$

$$j = +\frac{n\tau e^2}{m}E \quad (27)$$

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (28)$$

4.5 Mathematische Beschreibung der Nanophysik

- **Symmetrie**
Gruppentheorie zur Lösung qm. Systeme
- **Geometrie**
Euklidische Geometrie zur Beschreibung der Ausdehnung der Probe und folglich der Quantisierung
- **Topologie**
Klassifizierung der Körper unabhängig von ihrer Größe/Geometrie

4.6 Spezifischer Widerstand Metalle und Halbleiter

Der spezifische Widerstand von Metallen und Halbleitern hängt von der Relaxationszeit ab, die wiederum temperaturabhängig ist.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (29)$$

Für Metalle gilt

$$\rho \begin{cases} = \rho_0, & \text{sehr tiefe } T \\ \propto T^5, & T \ll \theta_D \\ \propto T, & T \gg \theta_D \end{cases} \quad (30)$$

wobei der erste Fall durch Streuung an Defekten und die verbleibenden Fälle durch Phononenstreuung verursacht werden.

Für Halbleiter gilt

$$\rho \propto e^{-\frac{E_g}{k_B T}} \quad (31)$$



Abbildung 5: Schematischer Verlauf des spezifischen Widerstands von Metallen und Halbleitern in Abhängigkeit der Temperatur

4.7 Streumechanismen

- Oberflächenstreuung
- Grenzflächenstreuung
- Streuung an magnetischen Defekten
- Spin-Bahn-WW
- Streuung an Elektronen
- Streuung an Phononen
- Streuung an Atomen
- Streuung an Ionen

Um die Gesamtstreurate auszudrücken, verwendet man die [Matthiessen'sche Regel](#)

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_i} \quad (32)$$

mit der Streurrate $\frac{1}{\tau}$ und unter der Voraussetzung, dass die Streumechanismen voneinander unabhängig sind.