Inhalt der Vorlesung Nanoelektronik

I Konzept

II Landauer

III Mol. Elektr.

IV QHE

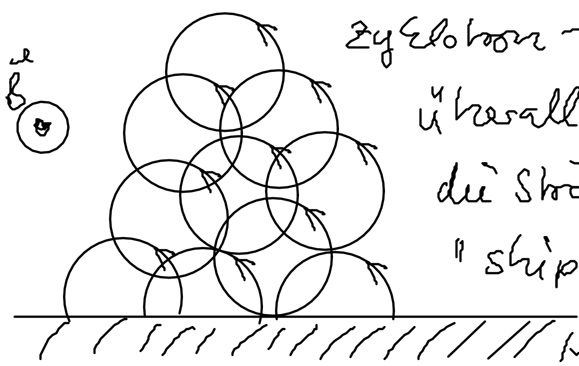
V Interferenz-Effekt ← Aharonov Bohm, Schwache Lokalisierung, Universal cond. fluct

VI Spintronics ← Julliere Modell, GMR, Spin Bahn

VII Einzel-Elektronen Effekte

4.4 Randkanäle

• klassisch



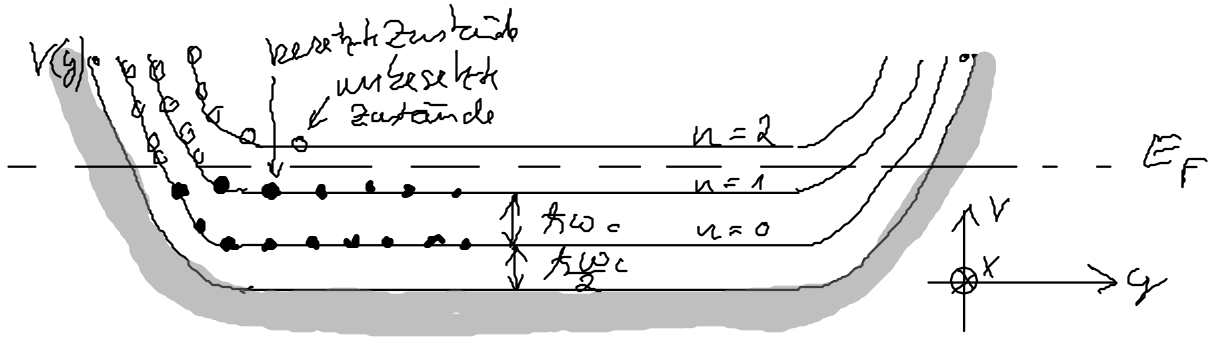
Zyklotron-Bewegung

überall im bulk kompensieren sich die Ströme

"skipping orbits"

Netto Strom am Rand

• QM Landau-Niveaus sind am Rand nach oben gebogen



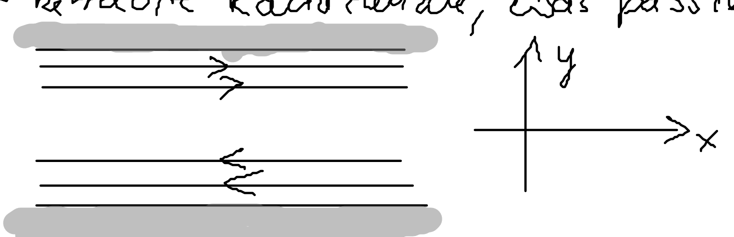
ungefähr gilt $E_{n,k} \approx \hbar\,\omega(n+\frac{1}{2}) + V(y_k)$ $\quad n=0,1,2,\dots$

$\psi_{n,k}(x,y) = \chi_n(y-y_k)\,e^{ikx}$ $\quad y_k = \frac{\hbar c}{|e|B}k$

Gruppengeschwindigkeit $v_x = \frac{1}{\hbar}\frac{\partial E_{nk}}{\partial k} = \frac{1}{\hbar}\frac{\partial V}{\partial y}\frac{\hbar c}{|e|B} \neq 0$

• am Rand verschiedenes Vorzeichen

• betrachte Randkanäle, was passiert bei E_F



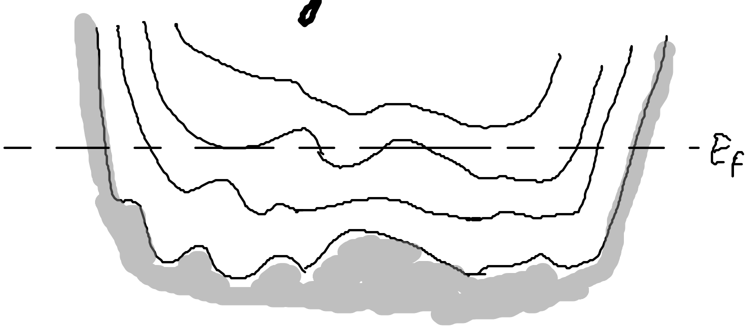
• Strom $j_x = eN(E_F)v_x\, eV = \frac{e^2}{h}V$

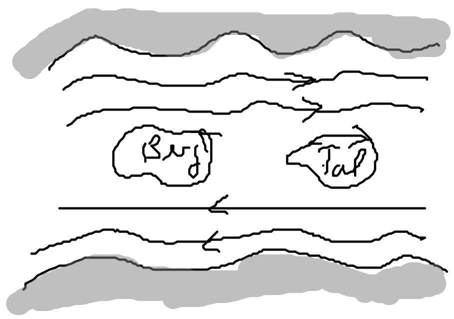
• Zustandsdichte $N(E) = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{\partial E}{\partial k}\right)^{-1} = \frac{1}{2\pi\hbar}\frac{1}{v_x}$

• Gruppengeschw. • Zustandsdichte = const

$\Rightarrow \quad G = \underbrace{2}_{\text{Spin}}\frac{e^2}{h}$ pro Kanal

• Unordnung





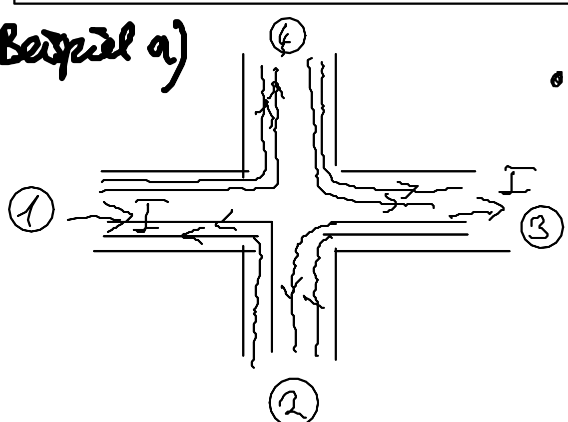
• Solange Potential nicht zu stark ungeordnet ist, sind die Randkanäle auf beiden Seiten entkoppelt

Hall Probe

Büttiker: Multi-Proben, Multi-Kanal-Formel

$$\boxed{\frac{h}{2e}I_\alpha = (N_\alpha - R_\alpha)\mu_\alpha - \sum_{\beta\neq\alpha} T_{\beta\to\alpha}\mu_\beta}$$

Beispiel a)



• Annahme: $N_\alpha = N$

$R_\alpha = 0$

$T_{14} = T_{43} = T_{32} = T_{21} = N$

Rest = 0

$I_1 = -I_3 = I$ und $I_2 = I_4 = 0$

① $\frac{h}{2e}I = N\mu_1 - N\mu_2$

② $0 = N\mu_2 - N\mu_3$

③ $-\frac{h}{2e}I = N\mu_3 - N\mu_4$

④ $0 = N\mu_4 - N\mu_1$

$\mu_4 = \mu_1 \; ; \; \mu_3 = \mu_2$

① $\frac{h}{2e}I = N(\mu_1 - \mu_3)$

② $\frac{h}{2e}I = N(\mu_4 - \mu_2)$

$\uparrow$ Spin

• **Hall-Widerstand** $R_H = R_{13\,42} = \frac{\mu_4 - \mu_2}{eI} = \frac{1}{N}\frac{h}{2e^2}$

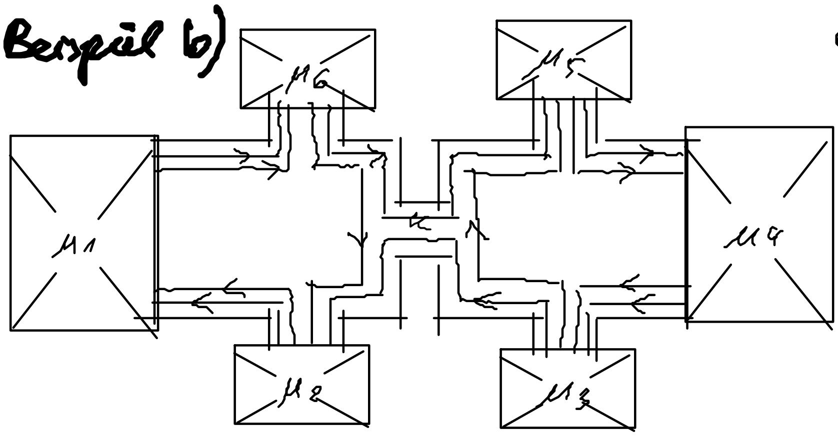
Stromkontakte ↗ ↖ Spannungskontakte

⇒ quantisierter Hall-Widerstand $R_H^{-1} = N\frac{2e^2}{h}$

• **Transportwiderstand**

$R_{13,13} = \frac{\mu_1-\mu_3}{eI} = \frac{1}{N}\frac{h}{2e^2}$ auch quantisiert, wegen Quantentransport

Beispiel b)



• Hall-Widerstand

$R_H = R_{14,62} = ?$

• 2-Punkt-Transportwiderstand

$R^{(2P)} = R_{14,14} = ?$

• 4-Punkt-Transportwiderstand

$R^{(4P)} = R_{14,56} = ?$

• Einschnürung ⇒ partielle Rückstreuung

Rechenweg als Übung

$T_{16} = N = T_{54} = T_{43} = T_{21} \Rightarrow R_H = \frac{1}{N}\frac{h}{2e^2}$

$T_{65} = k \; ; \; T_{62} = N-k \qquad R^{(2P)} = \frac{1}{k}\frac{h}{2e^2}$

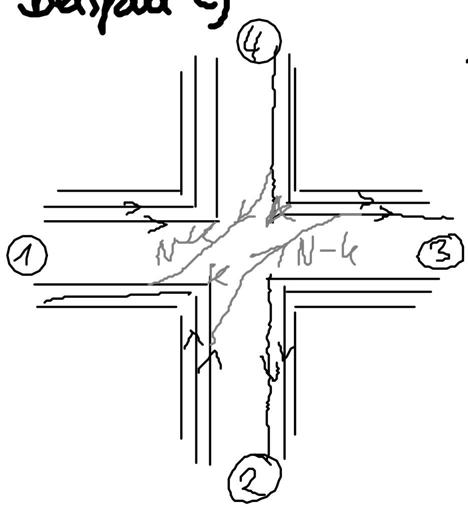
$T_{32} = k \; ; \; T_{35} = N-k \qquad R^{(4P)} = \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{N}\right)\frac{h}{2e^2}$

• Es gilt wieder $R^{(2P)} = R^{(4P)} + \underbrace{\frac{1}{N}\frac{h}{2e^2}}_{\text{Kontaktwiderstand}}$

• ohne Einschnürung $k = N \Rightarrow R^{(4P)} = 0$

$k = 0 \Rightarrow R^{(4P)} = \infty$

Beispiel c)



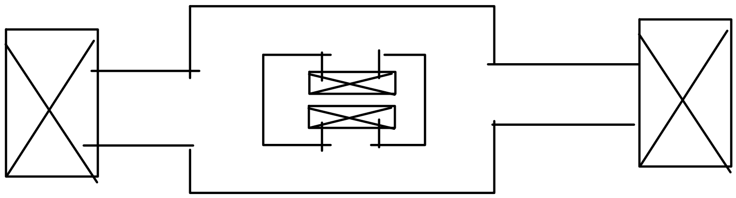
$T_{14} = N = T_{32} \qquad \Rightarrow R_H = \frac{h}{2e}\frac{1}{k}$

$T_{43} = k = T_{21}$ • nicht mehr quantisiert

$T_{41} = N-k = T_{23}$ • k ist keine ganze Zahl

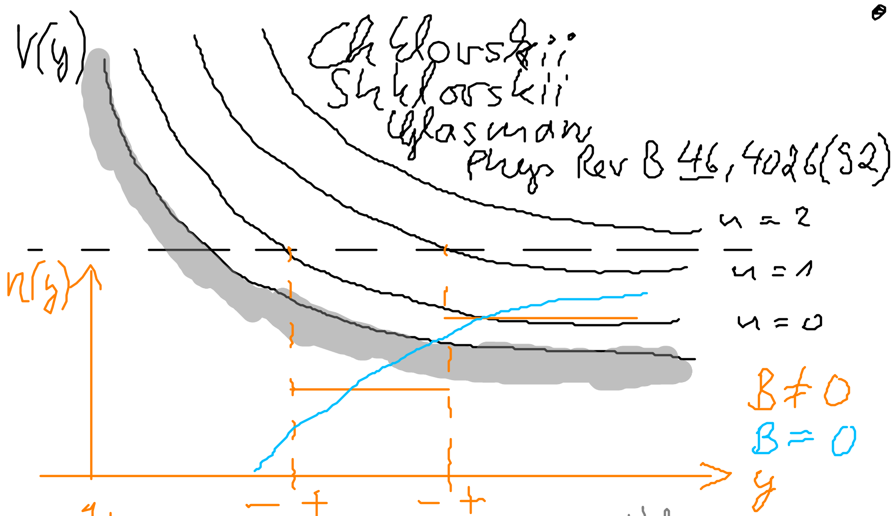
Rest $= 0$

Beispiel 4) $R_{12,34} = ?$



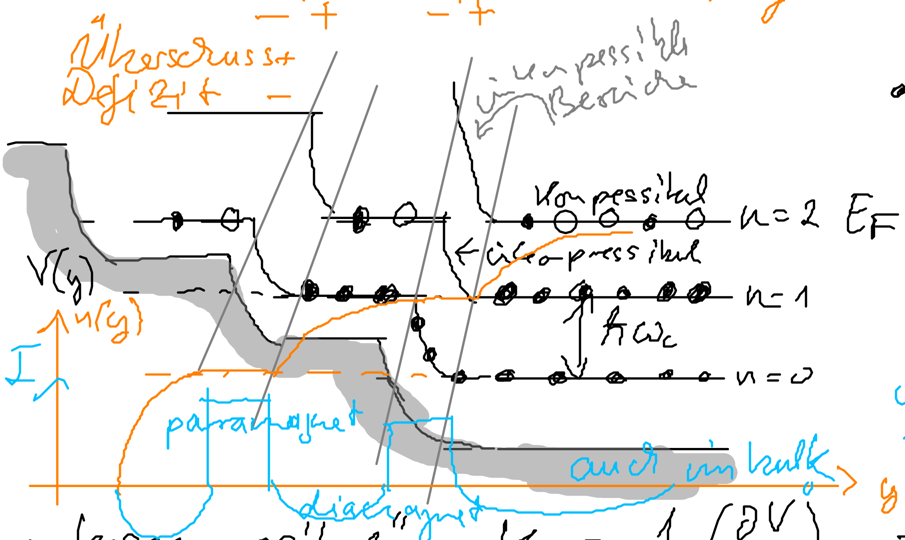
Randkanalbild liefert richtige Ergebnisse für Gesamtströme aber falsche Ergebnisse für Stromverteilung

4.5 Kompressible und inkompressible Bereiche



- Überschuss-Defizit Ladungsdichte verändert Potential $V(y)$
  ↳ muss selbstkonsistent berechnet werden

$$\nabla^2 V = -\frac{4\pi|e|}{\varepsilon}\left(n_B(y)-n_0(y)\right)$$



- Experiment bestätigen Stufen in $V(y)$

Wo fließt der Strom?
⇒ überall

- a) kompressibel

$$\kappa_T = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T = \frac{V}{N^2}\left(\frac{\partial N}{\partial \mu}\right)_{T,V} = \frac{1}{n^2}\left(\frac{\partial n}{\partial \mu}\right)_{T,V}$$

Kompressibilität   Maxwell Relation

$$\boxed{n = \frac{N}{V}}$$

$$\kappa_T = \begin{cases} \to \infty & \text{im Bereich der Plateaus kompressibel} \\ \approx 0 & \text{dazwischen inkompressibel} \end{cases}$$