

Quantisierter Leitwert von Punktkontakten

Ch. Egerland^{1,*}, M. Pfeifer^{1,†}

¹Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Physik
(Versuchsdatum: 22.06.2017)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nam id facilisis ligula, a ultrices nibh. Nullam suscipit tellus nec mauris fermentum, ornare luctus neque tincidunt. Aenean commodo tincidunt varius. Phasellus faucibus metus non erat consectetur bibendum. Duis et luctus risus, at egestas justo. Nunc eleifend lacus ac laoreet scelerisque. Aenean cursus dignissim magna in ultrices. In eget nisl quis nisi.

I. THEORIE

Der Leitwert ist das Inverse des Widerstandes und ist ein Maß dafür, wie gut ein Material Strom leitet. Die Quantisierung des Leitwertes kann wie folgt erklärt werden: Wir modellieren den Quantenpunkt看kontakt als ein effektives Kastenpotential mit Breite d_x und Dicke d_y . Es bilden sich senkrecht zur Bewegungsrichtung stehende Elektronenwellen mit der folgenden Energie aus:

$$E_{lm} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_e} \left(\frac{l^2}{d_x^2} + \frac{m^2}{d_y^2} \right) \quad (1)$$

In Bewegungsrichtung haben wir unter den Voraussetzungen ein kontinuierliches Energiespektrum mit $E_z = \hbar^2 k_z^2 / 2m_e$. Die Gesamtenergie der elektronischen Zustände ist dann: $E_{ges} = E_{lm} + E_z$. Die Zustandsdichte in einem eindimensionalen System ist gegeben durch:

$$D(E)dE = \frac{1}{\pi \hbar} \sqrt{\frac{m}{2E}} dE \quad (2)$$

Bei Anlegen einer kleinen Spannung dV folgt ein kleiner Strom $dI = evdn$, wobei $dn = D(E)dE$. Somit ist (mit $v = \sqrt{2E/m}$):

$$G = \frac{dI}{dV} = \frac{evD(E)dE}{dV} = \frac{e^2 v D(E) dV}{dV} = \frac{2e^2}{h} \quad (3)$$

II. EXPERIMENT

Das Experiment ist bebildert in [1] erklärt und besteht im Wesentlichen aus einem Lock-In-Verstärker an den zunächst zwei Transformatoren sowie die Widerstandsbox angeschlossen sind. Nun wird überprüft, ob der gemessene Widerstand dem angeschlossenen Widerstand entspricht. Die Abweichung vom Idealfall dient uns dann als systematischer bzw. zufälliger Fehler (weiteres

hierzu in Abschnitt III). Nachdem die Widerstandsbox vermessen wurde wird der Messstab in flüssiges Helium getaucht und entsprechend der Tabelle 2.1 in [1] verkabelt. Nun messen wir erneut die Ströme/Spannungen und ermitteln hieraus den Leitwert (weiteres hierzu in Abschnitt III).

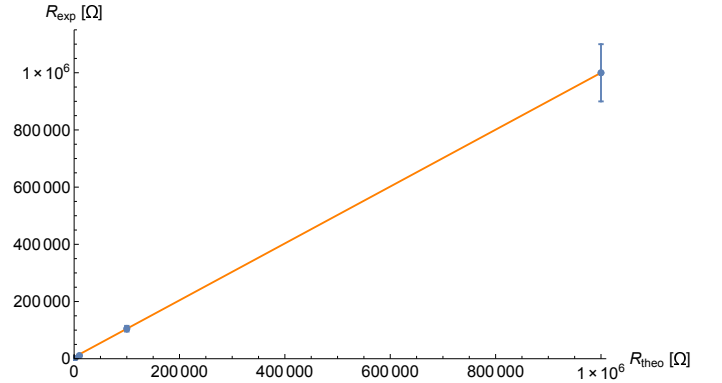


Abbildung 1. lineare Regression (Fehlerbalken verzehnfacht). Wir erhalten mit Model $R_{exp} = a * R_{theo} + b$:
Steigung: $a = 0.9944 \pm 3 * 10^{-4}$
Achsenabschnitt: $b = (5424 \pm 311)\Omega$

III. DATEN UND ANALYSE

III.1. Kalibrierung mittels Widerstandsbox

Die Widerstandsbox mit ihren fest einstellbaren Widerständen bietet uns die Möglichkeit den Messaufbau zu kalibrieren. Hierzu wurden für die festeingestellten Widerstände 100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ und 1 MΩ die Real- und Imaginärteile der Impedanz bei verschiedenen Spannungswerten ermittelt und durch pythagoräische Addition der Widerstand ermittelt. Als Fehler wurde auf der Widerstandsbox 0.1% für den Bereich 100Ω – 10kΩ und 1% für den Bereich 10kΩ – 1MΩ gegeben. Aus unseren Messdaten ergibt sich Abb. 1. Aus dem Achsenabschnitt können wir den Serienleitwert bestimmen:

$$G_S = b^{-1} = (18 \pm 1)mS \quad (4)$$

* Email: egerlanc@physik.hu-berlin.de

† Email: max.pfeifer@physik.hu-berlin.de

Die Abweichung der Steigung von 1 werden wir als systematischen Fehler der Messung interpretieren. Wir müssen also für die folgenden Diagramme den Leitwert wie folgt korrigieren: $G_{exp} \rightarrow a^{-1}G_{exp}$. Diese Kalibrierung erlaubt es uns im nächsten Teil die ermittelten Leitwerte korrekt zu ermitteln und ein somit ein akkurates Ergebnis für die Quantisierung des Leitwertes zu erhalten.

III.2. Serienleitwert MODFET

Nun untersuchen wir den MODFET, welchen wir (an einem Messstab befestigt) in flüssiges Helium getaucht haben. Zusätzlich wird eine Gate-Spannung angelegt, in deren Abhängigkeit wir der Leitwert bestimmen. Für diesen Teil des Experimentes verwenden wir zunächst die Struktur G. In Abb. 2 sind 2 der 3 Bereiche des MODFET gut zu sehen. Im Koordinatenursprung erkennen wir den Sperrbereich des Transistors in dem kein Drain-Strom fließt, der Transistor sperrt. Im Anschluss befindet sich der lineare Bereich, in dem sich der Transistor wie ein ohmscher Widerstand verhält, es gilt: $R = U/I \rightarrow G = I/U$.

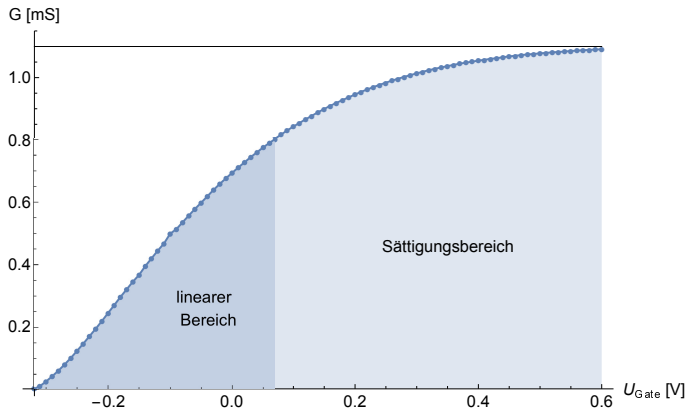


Abbildung 2. Struktur G, Bereiche des Feldeffekttransistors

Der Leitwert nähert sich gegen Ende des linearen Bereiches einem Maximum an, der dem Serienleitwert entspricht. In diesem sogenannten Sättigungsbereich verhält sich der Transistor wie eine nur noch durch die Eingangsspannung gesteuerte Stromquelle, die Gatespannung ändert den Stromfluss nicht mehr. Der Sättigungsleitwert ist in Abb. 2 als schwarze Linie gekennzeichnet und wurde mit $G_{sat} \approx 1.2mS$ abgeschätzt. Dieser entspricht einem Serienwiderstand von $R_s \approx 833\Omega$. Wir verwenden den Serienwiderstand im nächsten Abschnitt um die Quantisierung des Leitwertes zu plotten.

III.3. Quantisierter Leitwert

In diesem Versuchsteil werden wir den quantisierten Leitwert in Abhängigkeit von der Gatespannung beobachten können. Hierfür entnehmen wir aus [1] den folgenden Zusammenhang:

$$R = R_s + R_n \quad (5)$$

Hierbei ist $R = G_{exp}^{-1}$ der Gesamtwiderstand der Schaltung ermittelt aus dem gemessenen Leitwerten, R_s der Serienwiderstand den wir im vorherigen Teil ermittelt haben und $R_n = 1/G_n$ mit $G_n = n * \frac{2e^2}{h}$ der (quantisierte) Widerstand der Struktur. Wir verwenden die Struktur I um den quantisierten Leitwert nachzuweisen. Wir berechnen ihn nach obiger Gleichung mit:

$$G_n = \frac{1}{G_{exp}^{-1} - R_s} \quad (6)$$

Nach Messen der Leitwerte G_{exp} und Korrektur mit dem Serienwiderstand R_s ergibt sich Abb. 3:

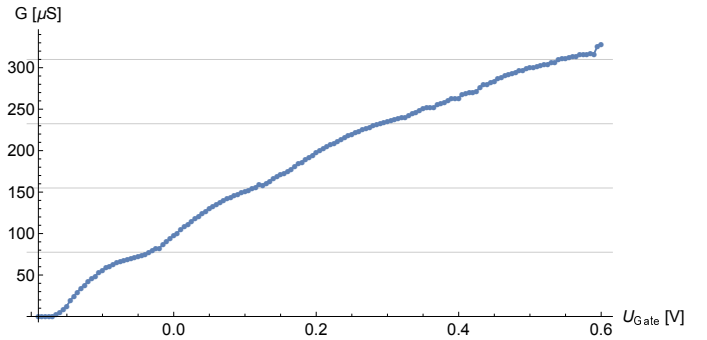


Abbildung 3. Struktur I, quantisierter Leitwert

Als Orientierung sind hier Linien für die Vielfachen von $\frac{2e^2}{h} \approx 77.5\mu S$ eingezeichnet. Die Ausbildung der Plateaus ist erkennbar, wenn auch nicht stark ausgeprägt. Als Referenz befinden sich in Anhang A vom Versuchsbetreuer gegebene Daten einer anderen Struktur, in der die Quantisierung deutlicher erkennbar ist.

IV. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Quantisierung des Leitwertes in einem Feldeffekttransistor konnte in diesem Versuch nachgewiesen werden. Die Ausbildung der Plateaus, welche uns die Quantisierung anzeigen, sind in Abb. 3 nicht so stark wie gewünscht bzw. nicht so stark wie in den Referenzdaten in Anhang A (Abb.4). Die Gründe hierfür wurden bereits in Abschnitt III.4. diskutiert.

-
- [1] S. F. Fischer et al. : F-Praktikumsversuch Quantisierter Leitwert von Punktkontakten (Versuchsskript) (2011)
 - [2] B. J. van Wees et al. : Quantized Conductance of Point Contacts in a Two-Dimensional Electron Gas, Physical Review Letters Vol. 60 Nr.9 (1988)
 - [3] D. A. Wharam et al. : One-dimensional transport and the quantisation of the ballistic resistance Verlag, Phys. C: Solid State Phys. 21 (1988)
 - [4] Gabriela Apetrii : Quantum point contacts with one and two vertical modes fabricated with an atomic force microscope, Dissertation (2004)
 - [5] Henk van Houten et al. : Quantum Point Contacts, Physics Today July S. 22–27, (1996)
 - [6] Michael H. Knop : Ballistische Gleichrichtung in asymmetrischen elektronischen Wellenleiterkreuzen, Dissertation (2007)
 - [7] S. F. Fischer et al. : Control of the confining potential in ballistic constrictions using a persistent charging effect, Applied Physics Letters Vol. 81 Nr.15 (2002)
 - [8] G. Apetrii et al. : Influence of processing parameters on the transport properties of quantum point contacts fabricated with an atomic force microscope, Institute of Physics Publishing Semicond. Sci. Technol. 17 S. 735–739 (2002)

Anhang A: Referenzdaten und Grafiken

Vom Versuchsbetreuer wurden uns noch die Daten der folgenden Grafiken gegeben. Es sind nur die experimentell ermittelten Leitwerte G_{exp} dargestellt, da uns keine weiteren Informationen (insbesondere die Kalibrierung mit Widerstandsbox) vorliegen. Nichtsdestotrotz ist die Quantisierung des Leitwerts in Abb. 4 und Abb. 5 deutlicher erkennbar, als dies bei unseren Daten der Fall ist.

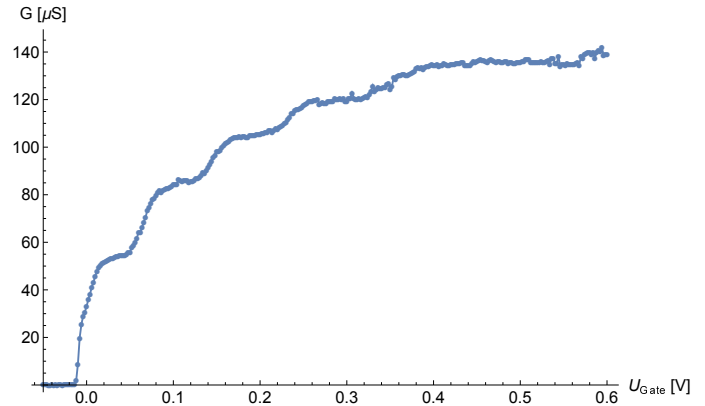


Abbildung 4. Struktur L, quantisierter Leitwert

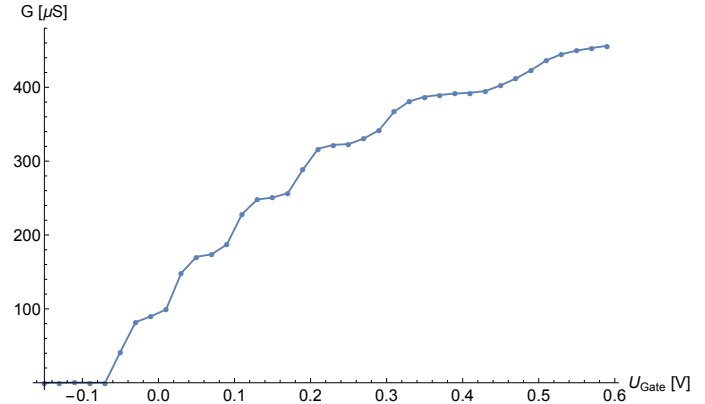


Abbildung 5. Struktur Lfein, quantisierter Leitwert