

# Local imaging of graphene and quantum hall systems

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Pascher, Nikola

**Publication date:**

2014

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010106133>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss.-No. ETH 21749

# Local Imaging of Graphene and Quantum Hall Systems

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences (Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Nikola Pascher**

Dipl. Phys. Univ. (Augsburg)  
born December 8, 1985  
citizen of Bayreuth (Germany)

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner  
Prof. Dr. Thomas Ihn, co-examiner  
Prof. Dr. Werner Wegscheider, co-examiner

2014

# Abstract

In this thesis scanning gate microscopy and transport experiments at cryogenic temperatures are presented. These measurement techniques allow deep insight into the physics of a graphene nanoribbon and of edge channel transport in a two dimensional electron gas, confined in a GaAs-AlGaAs heterostructure, in a perpendicular magnetic field. For the second material system a quantum point contact helps to confine the edge channels into a geometry which brings them close together and thus enhances their importance compared to macroscopic samples.

The metallic tip of the scanning probe microscope is used to locally induce a potential in a graphene nanoribbon. Images of the conductance through the device as a function of tip-position show that two centers of enhanced conductance are formed inside the structure. By applying a line-scan-technique, it can be demonstrated that these two features correspond to two charge localizations, exhibiting the characteristics of quantum dots. Scanning gate microscopy allows to characterize them with high resolution both in real space and as a function of energy.

In the case of the GaAs-AlGaAs heterostructure, we measure the conductance of a quantum point contact while the biased tip of the scanning probe microscope induces a depleted region in the electron gas underneath. At finite magnetic field we find plateaus in the real-space maps of the conductance as a function of tip position. Integer as well as fractional values of transmission can be observed. They resemble theoretically predicted compressible and incompressible stripes of quantum Hall edge states. The scanning tip allows to shift the constriction limiting the conductance in real space over distances of many microns. The resulting stripes of integer and fractional filling factors are rugged on scales of a few hundred nanometers, i.e. on a scale much smaller than the zero-field elastic mean free path of the electrons. Our experiments demonstrate that microscopic inhomogeneities are relevant even in high-quality samples and lead to locally strongly fluctuating widths of incompressible regions even down to their complete suppression for certain tip positions. The macroscopic quantization of the Hall resistance observed experimentally in a non-local contact configuration survives in the presence of these inhomogeneities, and the relevant local energy scale for the filling factor 2 state turns out to be independent of tip position.

By placing the biased tip of the microscope at a specific position above a semiconductor surface we can locally shape the potential landscape. Inducing a local repulsive potential in a two dimensional electron gas near a quantum point contact one obtains a potential minimum which exhibits a remarkable behavior in transport experiments at high magnetic fields and low temperatures. In such an experiment we observe distinct and reproducible oscillations in the measured conductance as a function of magnetic field, voltages and tip position. These oscillations follow a systematic behavior consistent with a resonant tunneling mechanism. From the periodicity in magnetic field we can find the characteristic width of this minimum to be of the order of 100 nm. Surprisingly, this value remains almost the same for different values of the bulk filling factors, although the tip position has to be adjusted by distances of the order of one micron.

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über Tieftemperatur- “Scanning Gate” Mikroskopie- und Elektronentransportexperimente berichtet. Die Messtechniken gestatten tiefe Einblicke in die physikalischen Transporteigenschaften eines Graphen “Nanoribbons” und Randkanälen in einem zweidimensionalen Elektronengas, das in einer GaAs-AlGaAs Heterostruktur durch Dotierung entsteht. In diesem Materialsystem hilft ein Quantenpunktkontakt im Magnetfeld senkrecht zur Probenoberfläche die Randkanäle in einer Geometrie so einzuschränken, dass sie an Bedeutung für den Elektronentransport gewinnen.

Die metallische Spitze eines Rastersondenmikroskops wird dazu verwendet, ein elektrostatisches Potential in einem Graphen Nanoribbon zu induzieren. Bilder des Leitwerts der Struktur als Funktion der Spitzenposition zeigen, dass es zwei Zentren mit erhöhtem Leitwert gibt, die sich innerhalb der Struktur bilden. Unter Verwendung einer Technik, bei der dieselbe Linie mehrfach durchlaufen wird, kann gezeigt werden, dass diese zwei Zentren zwei Ladungslokalisierungen entsprechen, die die Charakteristika von Quantenpunkten aufweisen. Mit Scanning Gate Mikroskopie können sie mit hoher Auflösung sowohl im Ort, als auch in der Energie charakterisiert werden.

Im Falle der GaAs-AlGaAs Heterostruktur wird der Leitwert eines Quantenpunktkontakts gemessen, während die elektrisch geladene Spitze des Mikroskops eine Verarmungszone im zweidimensionalen Elektronengas erzeugt. Im Magnetfeld finden sich Plateaus in den Leitwertbildern als Funktion der Spitzenposition. Sowohl ganzzahlige, als auch fraktionierte Werte des Leitwertquants können beobachtet werden. Sie ähneln den theoretisch vorhergesagten kompressiblen und inkompressiblen Streifen in Quanten Hall Randkanälen. Die Spitze des Rastersondenmikroskops gestattet es, die Struktur, die den Leitwert beschränkt, im Ortsraum um einige Mikrometer zu verschieben. Die Streifen mit ganzzahligen oder fraktionierten Füllfaktoren zeigen eine Feinstruktur auf Grössenskalen, die wesentlich kleiner als die elastische mittlere freie Weglänge der Elektronen sind. Unsere Experimente zeigen, dass mikroskopische Unregelmässigkeiten sogar in Proben von herausragender Qualität wichtig sind und local zu einer stark fluktuierenden Breite von kompressiblen und inkompressiblen Streifen, oder sogar zu ihrer vollständigen Unterdrückung an bes-

timmten Spitzenpositionen führen. Die makroskopische Quantisierung des Hallwiderstands, die experimentell in einer nicht-lokalen Kontaktanordnung gemessen wird, überlebt jedoch trotz der Inhomogenitäten. Dabei stellt sich die relevante Energieskala für den Füllfaktor 2 als von der Spitzenposition unabhängig heraus.

Indem die Spitze des Mikroskops an eine bestimmte Stelle über eine Halbleiteroberfläche gestellt wird, kann das elektrostatische Potential lokal geformt werden. Wenn ein lokales, repulsives Potential in einem zweidimensionalen Elektronengas nahe eines Quantenpunktkontakts erzeugt wird, so entsteht eine Potentialsenke, die bemerkenswerte Eigenschaften in Transportexperimenten bei hohen Magnetfeldern und tiefen Temperaturen zeigt. Wir sehen deutliche und reproduzierbare Oszillationen im gemessenen Leitwert als Funktion des Magnetfelds, der Spannungen und der Spitzenposition. Diese Oszillationen verhalten sich im Sinne eines resonanten Tunnelmechanismus systematisch. Die Oszillationsperiode als Funktion des Magnetfelds gestattet eine Abschätzung der charakteristischen Breite der Senke mit der Größenordnung 100 nm. Überraschenderweise bleibt dieser Wert konstant, auch wenn unterschiedliche Füllfaktoren des ungestörten Elektronengases eingestellt werden, selbst wenn dafür die Spitzenposition um mehrere Mikrometer geändert wird.