



Doctoral Thesis

## Quantum transport in interacting two-dimensional systems

**Author(s):**

Senz, Volkmar

**Publication Date:**

2002

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004320956> →

**Rights / License:**

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

# Quantum transport in interacting two-dimensional systems

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZÜRICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

**Dipl. Phys.**  
**Volkmar Senz**

born May 18, 1972  
in Straubing (Germany)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Klaus Ensslin, examiner  
Prof. Dr. Günther Bauer, co-examiner  
Dr. Thomas Ihn, co-examiner

March 2002

# Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die elektronischen Eigenschaften von zweidimensionalen p-Typ SiGe Quantentöpfen untersucht. Der elektronische Transport in diesem System zeigt Eigenschaften eines durch Dichtemodulation verursachten Metall-Isolator Übergangs, welcher in zwei Dimensionen theoretisch nicht erlaubt ist. Die auffällige Ähnlichkeit zwischen den von der Temperatur und dem elektrischen Feld abhängigen Daten kann auf Erwärmungseffekte durch das elektrische Feld zurückgeführt werden. Die Wärme wird über Deformations- und piezoelektrische Kopplung an das Kristallgitter abgegeben. Die ungewöhnliche metallische Temperaturabhängigkeit des Widerstands in p-SiGe Quantentöpfen kann durch die Kombination von semiklassischen Effekten mit Quantenkorrekturen beschrieben werden. Die Leitfähigkeit lässt sich schreiben als

$$\sigma = \sigma_D + \delta\sigma_I + \delta\sigma_{WL}.$$

$\sigma_D$  steht für die Drude Leitfähigkeit,  $\delta\sigma_{WL}$  für die Korrektur der schwachen Lokalisierung, und  $\delta\sigma_I$  stellt die Quantenwechselwirkungskorrektur dar. Die Wechselwirkungseffekte führen zu einer weiteren Lokalisierung des Lochgases und können daher als Ursache für das metallische Verhalten der Leitfähigkeit ausgeschlossen werden. Der Drudeanteil der Leitfähigkeit,  $\sigma_D$ , kann sehr gut durch eine temperaturabhängige Streuzeit beschrieben werden. Die starke metallische Temperaturabhängigkeit in SiGe wird insgesamt durch die Temperaturabhängigkeit der Polarisierungsfunktion verursacht. Obwohl sich das System in einem energetischen Bereich befindet, in dem Wechselwirkungen nicht vernachlässigt werden können ( $r_s \approx 5$ ), kann doch die konventionelle Theorie der Fermiflüssigkeiten zur Beschreibung des Transports verwendet werden. Dies zeigt, daß eine störungstheoretische Behandlung in diesem Wechselwirkungsbereich noch gerechtfertigt ist.

Auf der isolierenden Seite des Metall-Isolator Übergangs wird ein mögliches Modell untersucht, in dem das Elektronengas in einzelne Fragmente zerfällt, die über Quanten-Punkt-Kontakte miteinander verbunden sind. Um dieses Modell zu überprüfen werden Messungen an einem einzelnen Quanten-Punkt-Kontakt durchgeführt, der in einer AlGaAs/GaAs Heterostruktur implementiert ist. Die Temperatur- und die elektrische Feldabhängigkeit des Übergangs zweier aufeinanderfolgender Leitfähigkeitsplateaus wird untersucht. Die Modellbeschreibung dieses Übergangs mit einer Fermifunktion ist nur gerechtfertigt, wenn die thermische Energie die dominierende Energieskala im System ist. Mit einem erweiterten Modell, welches die Effekte der Potentialform des Punkt-Kontakts und des elektrischen Feldes mitberücksichtigt, können die experimentellen Daten gut beschrieben werden.

Als weiterer Aspekt phasenkohärenten Transports werden die Transporteigenschaften einer, teilweise phasenkohärent, gekoppelten Anordnung von einzelnen Kavitäten untersucht (realisiert in einer AlGaAs/GaAs Heterostruktur). Man beobachtet starke ballistische Leitfähigkeitsfluktuationen, die mit Hilfe von semiklassischen Theorien analysiert werden. Die experimentell bestimmten charakteristischen Größen, Korrelationsenergie  $E_{Th}$  und Korrelationsfeld  $B_c$ , stimmen gut mit Werten überein, die einerseits aus geometrischen Abschätzungen abgeleitet und andererseits aus einer Simulation erhalten werden. Die Simulation ergibt eine exponentielle Verteilung der Trajektorienlänge (typisch für chaotische Bewegung) und eine typische Trajektorienlänge von  $\approx 12L$  (Systemgröße  $L$ ). Als weiteres Indiz für chaotische Bewegung in der Probe dient die Tatsache, daß sich der Lokalisierungspeak nach ausreichender Energiemittelung mit einer Lorentzkurve fitten lässt. Es ist bekannt, daß die Längenverteilungen für chaotische und reguläre Bewegung erst ab einer Trajektorienlänge von  $\mathcal{O}(10^2 L)$  signifikant voneinander abweichen. Wir schließen daraus, daß allein aufgrund der Form des Lokalisierungspeaks noch keine eindeutigen Aussagen über die Art der Bewegung in der jeweiligen Struktur gemacht werden können. Die experimentelle Amplituden des Lokalisierungspeaks und der Leitfähigkeitsfluktuationen deuten darauf hin, daß in beiden Fällen Wechselwirkungseffekte zu einer Verstärkung der Amplitude führen.

# Abstract

We investigate the electronic transport in two dimensional p-type SiGe quantum wells. This system shows signatures of a density driven metal-insulator transition, which, according to well accepted theories, is in principle forbidden in two dimensions. The apparent similarity between the temperature and the electric field dependent data can be mapped to heating via the electric field by insufficient heat dissipation of the lattice due to deformation and piezoelectric potential coupling. The unusual metallic temperature dependence in p-type SiGe quantum wells can be separated into quantum corrections and semi-classical effects. The conductivity is written in the form

$$\sigma = \sigma_D + \delta\sigma_I + \delta\sigma_{WL},$$

where  $\sigma_D$  is the Drude conductivity,  $\delta\sigma_{WL}$  the weak localization correction and  $\delta\sigma_I$  is the quantum interaction correction. The latter one is found to be localizing and therefore, we can exclude the possibility that interaction effects can lead to an enhancement of the conductivity. The remaining Drude part  $\sigma_D$  can be well described using a temperature dependent scattering time. The temperature dependence of the polarizability function is the main origin for the strong metallic temperature dependence in the SiGe material system. Conventional theories for Fermi liquids ( $r_s < 1$ ) can be applied, although the system resides in a regime with the interaction parameter  $r_s \approx 5$ , i.e. where interaction effects cannot be neglected. This shows that the perturbative treatment of interactions in this regime is still justified.

For the insulating side of the metal-insulator transition a picture was invoked where the electron gas fragments into density puddles connected via quantum point contacts. In order to explore the validity of this description measurements on a single quantum point contact (realized in a AlGaAs/GaAs heterostructure) are performed, i.e. measurements of the temperature and electric field dependence of the transition between two subsequent conductance plateaus. The assumption of a Fermi function for this transition is only justified provided that all other energy scales are small compared to the thermal energy. With a model including the effects of the potential shape of the point contact and the externally applied electric field the experimental data can be well described.

Another aspect of phase coherent electron transport is investigated, namely the transport in a system of phase coherently coupled cavities implemented in a AlGaAs/GaAs heterostructure. Strong ballistic conductance fluctuations are observed which are analyzed using semi-classical theories. The experimentally determined parameters, the correlation energy  $E_{Th}$  and the correlation field  $B_c$ , agree with estimates from simple geometric considerations and a numerical simulation. The simulation yields an exponential distribution of the trajectory length in the system (typical for chaotic motion in the structure) and a typical trajectory length of  $\approx 12L$  (system size  $L$ ). After sufficient averaging the weak localization peak can be fitted by a Lorentzian, which we take as another indicator for chaotic motion. It is known that only for trajectories lengths larger than  $\mathcal{O}(10^2 L)$  the probability distribution for regular and chaotic motion differs significantly. Although semi-classical theory works well in order to describe the ballistic conductance fluctuations, we arrive at the conclusion that only from the lineshape of the WL-peak no unambiguous statement about the type of motion can be made. The amplitude of the WL-peak and of the conductance fluctuations indicate that interactions lead to an enhancement of the amplitude in both cases.