

# Christoph Steinebach

## Darstellung der Forschungsaktivitäten

Zielsetzung dieses Projektes war es, mit Hilfe von selbstkonsistenten Verfahren die Grundzustandsenergien und die dynamischen Anregungen von niedrigdimensionalen Elektronensystemen, wie Quantum Wells, Quantendrähten und Quantenpunkten zu berechnen. In der zweiten Förderungsperiode des Graduiertenkollegs sollten insbesondere anhand der akustischen Magnetoplasmonen von doppelagigen Quantendrähten und -punkten innere Anregungen niederdimensionaler Elektronengase studiert werden. Hierzu sollten in einem ersten Schritt selbstkonsistente Hartree- und Hartree-Fock Grundzustandsrechnungen durchgeführt werden. Aufbauend darauf sollten mit Hilfe der Random-Phase Approximation (RPA) die elektronischen Anregungen bestimmt werden. In vollkommen symmetrischen Systemen können akustische Moden mit Ferninfrarot (FIR)-Strahlung ohne eine Komponente des elektrischen Feldes in Wachstumsrichtung nicht angeregt werden. Es sollte untersucht werden, wie durch gezieltes Einbringen einer Asymmetrie in den Ladungsdichten oder den Potentialformen der beiden Schichten die Frequenz und die Anregungsstärke der akustischen Mode beeinflusst werden kann. Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Abstand der beiden Lagen. Im Fall sehr kleiner Abstände, etwa 5 nm und kleiner, kommt es zur Ausbildung symmetrischer und antisymmetrischer Zustände bezüglich der vertikalen Richtung. Diese Zustände sind durch die Energiedifferenz  $\Delta_{\text{SAS}}$  getrennt. Der Einfluß dieses symmetrisch-antisymmetrischen Gaps auf die Absorption sollte untersucht werden. Weiter sollten die Raman-Anregungen von Quantenpunkten und hierbei insbesondere der Anregungsmechanismus und der Charakter der Einteilchenanregungen (SPE's) studiert werden.

Die in Zusammenarbeit mit diesem Projekt erstellten Veröffentlichungen sind in den Zitaten [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] dargestellt. Für dieses Theorie-Projekt erwies sich die enge Einbindung in die experimentelle Forschungsgruppe Halbleiterphysik, die einen direkten Vergleich der Resulte mit den Experimenten ermöglicht, als sehr vorteilhaft. In Zusammenarbeit mit den in der Gruppe vorhandenen Raman- und Ferninfrarot-Aktivitäten, die von Dr. C. Schüller bzw. Dr. T. Kurth betreut wurden, entstanden zahlreiche gemeinsame Publikationen. Auch mit den Arbeitsgruppen von Herrn Hansen [6] und Herrn Wiesendanger [19] am Institut für Angewandte Physik, mit der Arbeitsgruppe von Herrn Kramer am I. Theoretischen Institut sowie mit der Arbeitsgruppe von Herrn Kotthaus [5] an der LMU München entstanden gemeinsame Publikationen. Weiterhin zeigte die sehr intensive Zusammenarbeit mit Dr. Vidar Gudmundsson von der University of Iceland sehr gute Erfolge. Herr Gudmundsson hielt sich im Rahmen des Graduiertenkollegs „Physik nanostrukturierter Festkörper“ im Sommer 1996, 1997 und 1998 jeweils für etwa 6 Wochen in Hamburg auf. In dieser Zeit und während meiner Besuche in Reykjavik entstanden gemeinsame Veröffentlichungen.

## Plasmonen in einlagigen Quantendrähten

Die Arbeiten konzentrierten sich zunächst auf die Frage, inwieweit die Einschränkungen des verallgemeinerten Kohn'schen Theorems gebrochen und innere Anregungen, die wichtige Informationen über die Elektron–Elektron Wechselwirkung liefern, studiert werden können. Hierzu wurden zunächst selbstkonsistente Rechnungen an einlagigen Quantendrähten durchgeführt. Dabei gelang es den Modencharakter der experimentell bekannten Bernstein–Moden anhand der induzierten Dichteoszillationen zu klären. Weiterhin wurde das Anticrossing–Verhalten von höheren Magnetoplasmonen mit Harmonischen der Zyklotronresonanz  $\omega_c$  erklärt. Der Vergleich mit dem Experiment zeigte auch, daß es zum Verständnis von Spindichte-anregungen (SDE), im Gegensatz zu den Plasmonen, essentiell ist, die endliche Ausdehnung des Elektronengases in Wachstumsrichtung zu berücksichtigen. Diese Arbeiten werden ausführlich in den Referenzen [1, 2, 3, 4, 6, 10, 11, 12, 14, 15] beschrieben.

## Plasmonen in doppelagigen Quantendrähten

Ein Schwerpunkt der Arbeit in der zweiten Förderungsperiode lag auf der Untersuchung von lateral und vertikal gekoppelten Quantendrähten. Doppellagige Elektronensysteme haben neben den optischen Plasmonen, bei denen die beiden Systeme in Phase schwingen, auch akustische Moden. Diese sind Anregungen, die einer Antiphase–Bewegung der Elektronengase entsprechen. Ihre Energie und Oszillatorstärke hängen empfindlich vom Abstand der Lagen und dem Unterschied der Einschlußpotentiale in den beiden Drähten ab. Die Magnetfelddispersion der akustischen Mode zeigt interessante Oszillationen, die direkt das Abschirmungsverhalten des Elektronengases widerspiegeln. Diese Arbeiten werden ausführlich in den Referenzen [8, 17] beschrieben.

## Plasmonen in doppelagigen Quantendrähten mit Tunneln

In zweilagigen Systemen die zusätzlich durch quantenmechanisches Tunneln miteinander gekoppelt sind, können im Magnetfeld eine Reihe interessanter, wechselwirkungsinduzierter Grundzustände beobachtet werden. Im Rahmen dieses Projektes wurden Ladungsdichtewellen und phasenkohärente Zustände beim Füllfaktor  $\nu = 1$  studiert. Diese Arbeiten werden ausführlich in den Referenzen [8, 17] beschrieben.

## Ladungsdichte-, Spindichte- und Einteilchenanregungen in der Ramanspektroskopie

Der Streumechanismus von sogenannten Einteilchenanregungen (SPE's) im Raman-Spektrum von niederdimensionalen Elektronensystemen ist ein seit über 20 Jahren kontrovers diskutiertes Problem. Am Beispiel von Quantenpunkten wurde der resonante Streuquerschnitt unter Berücksichtigung von Valenzbandzuständen berechnet. Es wurde gezeigt, daß es sich bei den SPE's um Ladungsdichte- bzw. Spindichte-anregungen mit kleinen kollektiven Verschiebungen handelt. Hierzu wurden Rechnungen sowohl im Rahmen der lokalen Dichtenäherung (LDA), als auch, für den Fall von Quantenpunkten mit nur sechs Elektronen, im Rahmen einer exakten Diagonalisierung durchgeführt. Diese Arbeiten werden ausführlich in den Referenzen [9, 10, 13, 18, 20] beschrieben.

## Zusammenarbeit mit anderen Mitgliedern des Graduiertenkollegs

- Lucia Rolf (FG Halbleiterphysik):

Die Rechnungen beschreiben unmittelbar die Messungen, die von der Raman-Gruppe an niederdimensionalen Elektronensystemen durchgeführt werden. Hieraus resultierte eine Vielzahl von gemeinsamen Publikationen.

- Silke Bargstädt-Franke (FG Halbleiterphysik):

Präpariert und optimiert die Proben, an denen die Raman- und FIR-Messungen durchgeführt werden.

- Dieter Schmerek (FG Halbleiterphysik):

In diesem Projekt wurden Kapazitätsmessungen an Quantendrähten auf der Basis von MISFET Strukturen durchgeführt. Diese wurden mit Kapazitätsdaten verglichen, die aus einer selbstkonsistenten Bandstrukturrechnung erhalten wurden.

- R. Dombrowski und Chr. Wittneven

In dem von den Kollegiaten R. Dombrowski und Chr. Wittneven aufgebauten Kryorastermikroskop wurden sehr viel beachtete Tunnelspektren an InAs-Oberflächen aufgenommen. Zu deren Interpretation gab es eine rege Zusammenarbeit mit mir. Die Ergebnisse wurden in [19] publiziert.

## Ausblick

Die hier beschriebenen Arbeiten wurde in enger Zusammenarbeit mit dem DFG-Projekt He 1938/6 durchgeführt. Dieses Projekt hat sich als sehr erfolgreich erwiesen. Es gingen über 20 Originalpublikationen aus diesem Projekt sowie zahlreiche Konferenzbeiträge und Vorträge hervor. Das DFG-Projekt wurde im Juni 1999 abgeschlossen. Dieses Arbeitsgebiet, die Berechnung des Grundzustands und der dynamischen FIR und Ramananregungen in niederdimensionalen Elektronensystemen ist nach wie vor von höchster Aktualität. Es soll in der Zukunft im Rahmen des Graduiertenkollegs insbesondere durch die Zusammenarbeit mit Herrn Gudmundsson in Reykjavik und den Arbeitsgruppen von Frau Pfannkuche und Herrn Kramer fortgesetzt werden.

## Publikationen

Angehörige und Gäste des Graduiertenkollegs sind unterstrichen

- [1] G. Biese, C. Schüller, K. Keller, C. Steinebach, D. Heitmann, P. Grambow und K. Eberl: *Coupling of lateral and vertical electron motion in GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum wires and dots*, Phys. Rev. B **53**, 9565 (1996).
- [2] R. Krahn, C. Steinebach, C. Schüller, G. Biese, D. Heitmann, P. Grambow und K. Eberl: *Inelastic Light Scattering by Magnetoplasmons and Bernstein Modes in GaAs-AlGaAs Quantum Wires*, Proceedings of the 23rd International Conference on the Physics of Semiconductors, in M. Scheffler and R. Zimmermann (Hrsg.), World Scientific (Singapore 1996), Seite 1213 (1996).

- [3] C. Steinebach, R. Krahné, G. Biese, C. Schüller, D. Heitmann und K. Eberl: *Internal electron–electron interactions in one–dimensional systems detected by Raman spectroscopy*, Phys. Rev. B **54**, R14281 (1996).
- [4] C. Schüller, G. Biese, K. Keller, C. Steinebach, D. Heitmann, P. Grambow und K. Eberl: *Single–particle excitations and many–particle interactions in quantum wires and dots*, Phys. Rev. B **54**, R17304 (1996).
- [5] W.R. Frank, A.O. Govorov, J.P. Kotthaus, C. Steinebach, V. Gudmundsson, W. Hansen und M. Holland: *Magnetoplasmon mode in connected quantum wire pairs*, Phys. Rev. B **55**, R1950 (1997).
- [6] V. Gudmundsson, A. Brataas, C. Steinebach, A.G. Mal’shukov, K.A. Chao und D. Heitmann: *The Effects of Compressible and Incompressible States on the FIR–Absorption of Quantum Wires and Dots in a Magnetic Field*, Physica Scripta Vol. **T69**, 150–154 (1997), Proceedings of the 17th Nordic Semiconductor Meeting 1996, Trondheim.
- [7] C. Schüller, R. Krahné, G. Biese, C. Steinebach, E. Ulrichs, D. Heitmann und K. Eberl: *Multiple cyclotron resonances in GaAs–Al<sub>x</sub>Ga<sub>1–x</sub>As quantum wells detected by resonant inelastic light scattering*, Phys. Rev. B **56**, 1037 (1997).
- [8] C. Steinebach, D. Heitmann, und V. Gudmundsson: *Far–infrared absorption of acoustic and optical magnetoplasmons in double–layered quantum wires*, Phys. Rev. B **56**, 6742 (1997).
- [9] G. Biese, E. Ulrichs, L. Rolf, C. Steinebach, S. Bargstädt–Franke, Ch. Heyn, D. Heitmann und K. Eberl: *Edge spin–density modes in quantum dots in a magnetic field*, Physica E **2**, 619 (1997).
- [10] E. Ulrichs, G. Biese, C. Steinebach, C. Schüller, D. Heitmann und K. Eberl: *Skipping–Orbit Electron Motion in GaAs/AlGaAs Quantum Wires Detected by Raman Spectroscopy*, phys. stat. sol. **164**, 277 (1997).
- [11] E. Ulrichs, G. Biese, C. Steinebach, C. Schüller, D. Heitmann und K. Eberl: *One–dimensional plasmons in magnetic fields*, Phys. Rev. B **56**, R 12760 (1997).
- [12] A. Brataas, A.G. Mal’shukov, C. Steinebach, V. Gudmundsson und K.A. Chao: *Spin–density and charge–density excitations in quantum wires*, Phys. Rev. B **55**, 13161 (1997).
- [13] C. Schüller, K. Keller, G. Biese, E. Ulrichs, L. Rolf, C. Steinebach und D. Heitmann: *Quasi–Atomic Finestructure and Selection Rules in Quantum Dots*, Phys. Rev. Lett. **80**, 2673 (1998).
- [14] C. Steinebach, C. Schüller, G. Biese, D. Heitmann und K. Eberl: *Observation of finite–thickness effects on the spin–density excitations in quantum wires*, Phys. Rev. B. **57**, 1703 (1998).
- [15] C. Steinebach, T. Kurth, D. Heitmann und V. Gudmundsson: *Manifestation of the magnetic depopulation of one–dimensional subbands in the optical absorption of acoustic magnetoplasmons in side–gated quantum wires*, Physica B **249–251** (1998).

- [16] W. Hansen, D. Schmerek, und C. Steinebach: *Ground State in One-Dimensional Electron Systems*, Physics-Uspekhi, Advances in Physical Sciences **41**, 175 (1998).
- [17] C. Steinebach, D. Heitmann und V. Gudmundsson: *Far-infrared absorption of interaction-induced ground states of two weakly coupled quantum wires*, Phys. Rev. B **58**, 13944 (1998).
- [18] C. Steinebach, C. Schüller und D. Heitmann: *Resonant Raman scattering of quantum dots*, Phys. Rev. B. **59**, 10240 (1999).
- [19] R. Dombrowski, C. Steinebach, Chr. Wittneven, M. Morgenstern und R. Wiesendanger: *Determining the tip-induced band bending by scanning tunneling spectroscopy of the states of the tip-induced quantum dot on InAs(110)*, Phys. Rev. B. **59**, 8043 (1999).
- [20] C. Ulrichs, C. Steinebach, C. Schüller, Ch. Heyn und D. Heitmann: *Coulomb-Interaction induced Crossover from Confined to Bulk Quantum-Dot States in a Magnetic Field*, Physica E **6**, 364 (2000).

## Teilnahme an Tagungen

- “Akustische und optische Magnetoplasmonen in doppelagigen GaAs/AlGaAs Quantendrähten“  
C. Steinebach und D. Heitmann  
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)  
in Münster, März 1997  
Beitragsform: Poster
- “Manifestation of the magnetic depopulation of one-dimensional subbands in the optical absorption of acoustic magnetoplasmons in side-gated quantum wires“  
C. Steinebach, T. Kurth, D. Heitmann und V. Gudmundsson  
12th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-12)  
in Tokyo, September 1997  
Beitragsform: Vortrag
- “Ramanexcitations in Quantum Dots“  
C. Steinebach, C. Schüller, und D. Heitmann,  
March-Meeting of the American Physical Society,  
in Atlanta, März 1999  
Beitragsform: Vortrag
- “FIR-Absorption von Quantendrähten mit asymmetrischem Einschlußpotential“  
C. Steinebach und D. Heitmann,  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 62. Physikertagung 1998  
in Regensburg 1998  
Beitragsform: Vortrag

## Forschungsaufenthalte und eingeladene Vorträge

- Forschungsaufenthalt an der University of Iceland  
Einladung durch: Dr. V. Gudmundsson  
in Reykjavik, Februar 1997
- “Akustische und optische Magnetoplasmonen in doppellagigen GaAs/AlGaAs Quantendrähten “  
Vortrag in der Universität Regensburg  
Einladung durch: Prof. Dr. U. Rössler  
in Regensburg, April 1997

## Tagungsbeiträge als Mitautor

- “Magneto-Ramanspektroskopie an GaAs-AlGaAs-Quantenwell- Quantendraht- und Quantenpunktstrukturen“  
E. Ulrichs, C. Schüller, G. Biese, C. Steinebach, D. Heitmann und K. Eberl  
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)  
in Münster, März 1997  
Beitragsform: Poster
- “Selbstkonsistente Berechnung des Kapazitätssignals von Quantendrähten“  
D. Schmerek, C. Steinebach und W. Hansen  
Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)  
in Münster, März 1997  
Beitragsform: Vortrag
- “Edge spin-density modes in quantum dots in a magnetic field“  
G. Biese, E. Ulrichs, L. Rolf, C. Steinebach, S. Bargstädt-Franke, Ch. Heyn,  
D. Heitmann und K. Eberl  
Eigth Annual Conference of Modulated Semiconductor Structures (MSS)  
in Santa Barbara, Juli 1997  
Beitragsform: Poster
- “Skipping-Orbit Electron Motion in GaAs/AlGaAs Quantum Wires Detected by Raman Spectroscopy “  
E. Ulrichs, G. Biese, C. Steinebach, C. Schüller, D. Heitmann und K. Eberl  
Fifth Meeting on Optics of Excitons in Confined Systems  
in Göttingen, Juli 1997  
Beitragsform: Vortrag
- “Ground State in One-Dimensional Electron Systems“  
W. Hansen, D. Schmerek und C. Steinebach  
International Conference on Mesoscopic and Strongly Correlated Electron Systems (MESO)  
in Chernogolovka (Rußland), Juli 1997  
Beitragsform: Vortrag

- “Spectroscopy of Quantum Dots in Magnetic Fields“  
D. Heitmann, K. Bollweg, V. Gudmundsson, T. Kurth, L. Rolf, C. Schüller, C. Steinebach, and E. Ulrichs,  
13th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics  
in Nijmegen 1998  
Beitragsform: Vortrag
- “Raman-Spectroscopy an Magnetoplasmonen in Quantumdots“  
G. Biese, C. Schüller, E. Ulrichs, L. Rolf, C. Steinebach, D. Heitmann und K. Eberl,  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 62. Physikertagung 1998  
in Regensburg 1998  
Beitragsform: Vortrag
- “Eindimensionale Magnetoplasmonen in Quantendrähten“  
M. Bähr, E. Ulrichs, G. Biese, C. Steinebach, C. Schüller, und D. Heitmann,  
Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 62. Physikertagung 1998  
in Regensburg 1998  
Beitragsform: Vortrag
- “Coulomb-interaction induced crossover from confined to bulk quantum-dot states in  
a magnetic field“  
E. Ulrichs, C. Steinebach, C. Schüller, C. Heyn, and D. Heitmann  
EP2DS13  
in Ottawa 1999  
Beitragsform: Vortrag
- “Resonant Raman scattering from low-energy collective excitations in quantum wires“  
M. Sasseti, B. Kramer D. Fichtner, C. Schüller, C. Steinebach, and D. Heitmann  
in: The Physics of Semiconductors, D. Gershoni (Hrsg.), Procs. ICPS24 (World Scientific,  
Singapore 1999), CD VII B-19

## Eigene Vorträge im Rahmen des Graduiertenkollegs

- „Optische Anregungen in niederdimensionalen Elektronengasen“  
1. Workshop des Graduiertenkollegs  
„Physik nanostrukturierter Festkörper“  
in Timmendorfer Strand, Januar 1997
- „GaAs-Aspekte eines Halbleiters“  
2. Workshop des Graduiertenkollegs  
„Physik nanostrukturierter Festkörper“  
in St. Peter-Ording, Januar 1998
- „Few-Electron Quantum Dots“  
3. Workshop des Graduiertenkollegs  
„Physik nanostrukturierter Festkörper“  
in Niderkleevez, Mai 1999