

# Kapitel 4

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit gibt einen Einblick in die faszinierende Welt der Nanotechnologie mit Rastersondenmethoden. Es wurden konkrete Beispiele aus der Nanoanalytik (Kapitel 2) und der Nanostrukturierung (Kapitel 3) vorgestellt.

Bei der Nanoanalytik erfolgte eine Konzentration auf die Analyse von 2D-Dotierprofilen (2.2) mit der Rasterkapazitätsmikroskopie (2.2.1). Hier konnte ein volles Verständnis dieser komplexen Methode gewonnen werden. Erstmals konnten alle Effekte, die mit dieser Mikroskopieart bei Raumtemperatur beobachtbar sind, auch aufgeklärt werden. Daneben gelang die Erarbeitung einer Präparationsmethode, die qualitativ hochwertige SCM-Messungen erlaubt (2.2.1.3). Diese Präparationstechnik ist die unbedingte Voraussetzung für reproduzierbare und zuverlässige Messergebnisse. Aus dem Verständnis der Kapazitätssensor-Eigenschaften (2.2.1.1) und des Sondeneinflusses (2.2.1.2) konnten erstmalig auch konkrete Aussagen über die – mit SCM erreichbare – Dotierungs- (2.2.1.4) und laterale Auflösung (2.2.1.5) getroffen werden. Ferner wurden Methoden zur Eichung des Messsystems entwickelt (2.2.1.6).

Vielfältige Messungen von Proben aus der industriellen Fehleranalyse belegen, dass das SCM auch heute schon gewinnbringend in der Halbleiterindustrie eingesetzt werden kann. Seine Bedeutung würde noch um vieles steigen, wenn aus den Messsignalen konkrete 2D-Dotierprofile bzw. Ladungsdichte-Verteilungen ausgerechnet werden könnten. Um dahin zu gelangen wurde eine Konversionsmethode entwickelt, die problemlos für Proben mit kleinen Dotierungsgradienten eingesetzt werden kann. Für Proben mit großem Gradienten wurde ein Weg aufgezeigt. Damit gelang erstmalig die Konversion eines p-n-Übergangs.

Neben der Mikroskopie wurde auch die Spektroskopie weiterentwickelt. Zwei SCS-Varianten wurden vorgestellt (2.2.2). Die hervorragende Übereinstimmung von Theorie (Simulation) und Experiment konnte anhand der Spektroskopie eines p-n-Übergangs gezeigt werden.

Daneben wurde auch die Physik, die hinter der Hysterese von C-V-Kurven steht, verstanden und modelliert, so dass die Auswirkungen dieses Effekts besser beurteilt und eingeordnet werden können.

Für die Optimierung der 2D-Dotierprofil-Bestimmung mit dem SCM sind drei Schwerpunkte zu nennen:

1. Die Weiterentwicklung einer Konversionsmethode für Proben mit großem Gradienten (z.B. p-n-Übergänge).
2. Die Weiterentwicklung des Kapazitätssensors hinsichtlich einer Steigerung der Sensitivität und einer Reduzierung der Messamplitude.
3. Die Weiterentwicklung der SCS, so dass es möglich ist, ein großes Feld von C-V-Kurven aufzunehmen.

Bei der Nanostrukturierung erfolgte eine Konzentration auf die Datenspeicherung mit Ladungsdots (3.1.1). Strukturen mit einem Durchmesser von minimal 150nm konnten erzeugt und mit dem SCM abgebildet werden. Simulationen zeigten, dass die Größe der Ladungsdots durch die Höhe der Substratdotierung, die Sondenbreite und die angelegte Biasspannung bestimmt wird. Abschließend wurden Möglichkeiten genannt, die zu kleineren Strukturgrößen – und damit größeren Datendichten – führen könnten.

Zudem wurde ein Prototyp vorgestellt, mit dem eine Datentransferrate von über 100kBit/s bei einem Signal-Rausch-Verhältnis von 60dB erreicht werden konnte. Der Aufbau eines zweiten Prototyps, der eine automatische Spurverfolgung (Auto-Tracking) ermöglichen soll, wurde präsentiert.

Für weitere Entwicklungen auf diesem Sektor sollte

1. die Probenstruktur optimiert werden (z.B. Polymer-Oberfläche).
2. die Sonde optimiert werden (dabei sollte man sich an den Erfahrungen aus dem Bereich der Schreib-Leseköpfe von Festplatten orientieren).
3. ein Auto-Tracking-System entwickelt werden.

Neben den Ergebnissen, die in den Kapiteln 1 bis 3 dargestellt wurden, konnten auch die Grundlagen für andere Themenbereiche erarbeitet werden, deren Weiterentwicklung höchst interessant wäre. Sie sollen im Folgenden aufgeführt werden.

Bei den Untersuchungen von Selbstorganisations-Phänomenen ligandenstabilisierter Cluster (eine gute Einführung in diese Thematik gibt [Eva94]) stießen wir auf eine einfach durchzuführende Lithografiemethode: Mit der entsprechenden Präparation (Einzelheiten siehe [Bar00]) konnten großflächige Monolagen von 2nm großen Clustern auf HOPG hergestellt werden, die sich mit dem SFM im Contact-Mode leicht manipulieren ließen. Die Strukturierung wurde im Contact-Mode, die Abbildung im Tapping-Mode durchgeführt. Solch eine Struktur könnte als Maske verwendet werden, um z.B. Nanoelektroden auf der Oberfläche herzustellen. Zwischen diesen Nanoelektroden könnten mit Hilfe eines elektrischen Feldes geladene Cluster eingefangen werden. Erste Versuche zeigten, dass sich geladene Kolloide (in unserem Fall waren es Goldkolloide mit einem mittleren Durchmesser von 18nm) durch ein elektrisches Feld zwischen zwei Elektroden gezielt an einer Elektrode anlagern lassen ([Bar00]). Dies eröffnet ein weites Feld für die Herstellung von Einzelelektronen-Transistoren (für eine einführende Betrachtung siehe [Gra92]).

Des weiteren wurde ein Tieftemperatur-tauglicher höchstempfindlicher Kapazitätssensor entwickelt [Hag99]. Erste Testmessungen wurden schon in flüssigem Helium durchgeführt und zeigten eine gute Übereinstimmung mit Simulationen, die mit einer Temperatur von 70K bzw. 4K durchgeführt wurden (Bild 106).

Dieser Sensor ließe sich für ein Tieftemperatur-SCM (TT-SCM) verwenden, das u.a. für die Untersuchung von Quantenphänomenen eingesetzt werden könnte (näheres zu dem Thema siehe [Soh97], [Ash92] und [Tes98]).

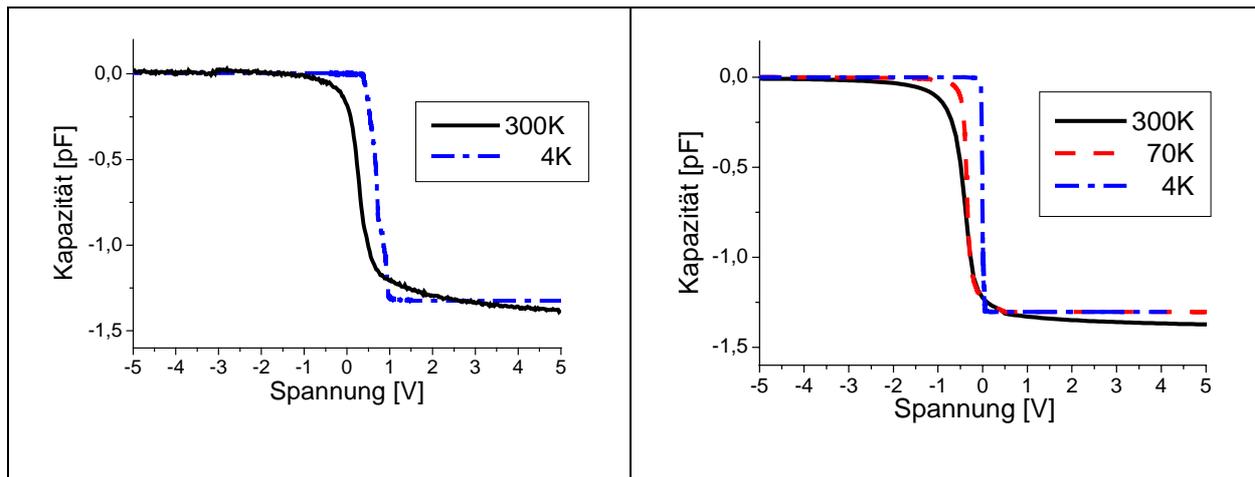
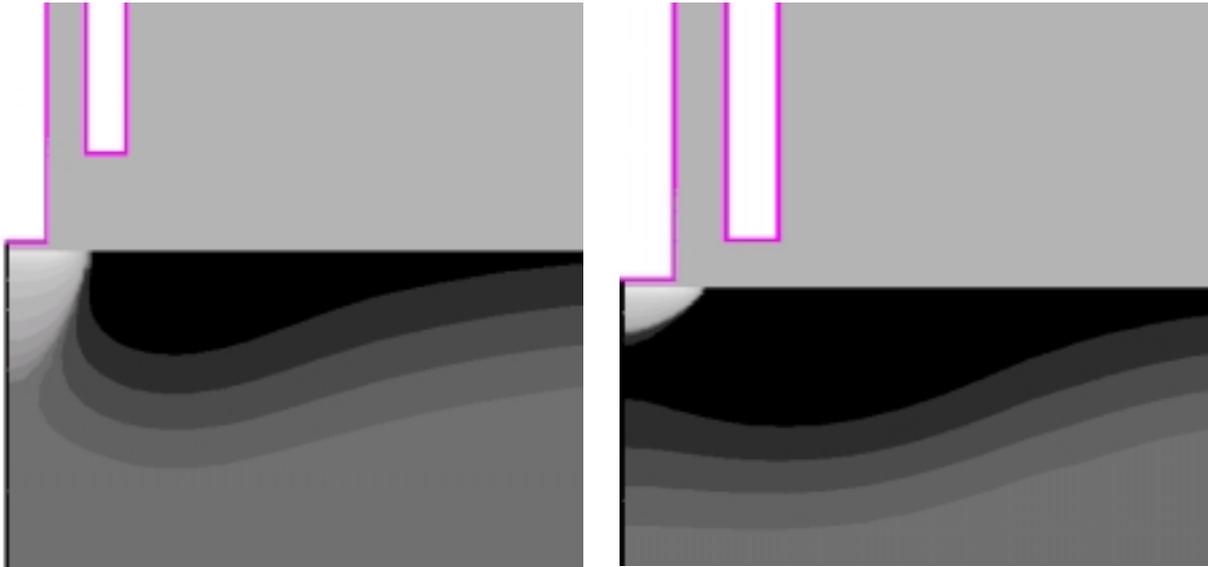


Bild 106: Experimentelle (links) und simulierte C-V-Kurven einer MOS-Struktur mit großer Gate-Elektrode bei unterschiedlichen Temperaturen.

Auf InAs(110) wurden schon spitzen-induzierte Quantenpunkte mit dem STM bei tiefen Temperaturen spektroskopiert [Dom99]. Die Durchführung einer ähnlichen Untersuchung – mit dem TT-SCM – bietet die zusätzliche Option, die Elektronen in dem Punkt abzuzählen.

Durch die Kombination mit einer Koaxialsonde könnte sogar das spitzen-induzierte Potential des Quantenpunktes modifiziert werden. Somit könnte man flache und tiefe Quantenpunkte erzeugen, je nach Potential der äußeren Elektrode (siehe Bild 40). Es besteht sogar die Möglichkeit, mit der äußeren, statt der inneren Elektrode zu messen, und durch eine entsprechende Spannung des Außenleiters „Quantenringe“ zu erzeugen (Bild 107 links; siehe auch [Lor00]). Durch eine geschickte Wahl der Spannungen von Außen- und Innenleiter könnten sogar „Quantenatome“ erzeugt werden. Diese zeichnen sich durch eine Potentialinsel in dem eigentlichen Quantenpunkt aus (Bild 107 rechts).

Mit einem TT-SCM ließen sich diese Quantenringe und –atome spektroskopieren. Der Aufbau eines solchen TT-Systems stellt also eine sehr vielversprechende Herausforderung dar.



*Bild 107: Simulationen der Raumladungszone zweier Koaxialspitzen ( $IL=-5V$ ,  $AL=+5V$ ) mit Zylindergeometrie. Der Radius des ILs, der Abstand zwischen IL und AL und die Dicke des ALs ist 50nm. Bei der linken Spitze ist der AL 100nm, bei der rechten 50nm von der Probenoberfläche entfernt. Die im rechten Bild gezeigte SCR lässt sich auch mit der linken Koaxialsonde – mit anderen Spannungswerten von IL und AL – erzeugen.*

Somit gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, wie die unterschiedlichen Projekte der vorliegenden Arbeit weitergeführt werden könnten. Denn wie Feynman schon 1959 bemerkte, gibt es „Plenty of Room at the Bottom“, wir müssen diesen nur kreativ ausfüllen. Dazu stellt uns die Rastersondenmikroskopie das richtige Werkzeug zur Verfügung.

## Literaturverzeichnis

- [Abb73] E. Abbe: Archiv. Mikros. Anat. **9**, 413 (1873).
- [Alb87] T.R. Albrecht, C.F. Quate: J. Appl. Phys. **62**, 2599 (1987).
- [Alb90] T.R. Albrecht, S. Akmine, T.E. Carver, C.F. Quate: J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 3386 (1990).
- [Alv96] R. Alvis, B. Mantiplay, M. Young: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 452 (1996).
- [Ase99] A. Asenov: Nanotechnol. 10, 153 (1999).
- [Ash92] R.C. Ashoori, H.L. Stormer, J.S. Weiner, L.N. Pfeiffer, S.J. Pearton, K.W. Baldwin, K.W. West: Phys. Rev. Lett. **68**, 3088 (1992).
- [Avo97] P. Avouris, T. Hertel, R. Martel: Appl. Phys. Lett. **71**, 285 (1997).
- [Bab96] K.L. Babcock, V.B. Elings, J. Shi, D.D. Awschalom, M. Duglas: Appl Phys. Lett. **69**, 705 (1996).
- [Bac98] R. Bachelot, G. Wurtz, P. Royer: Appl. Phys. Lett. **73**, 3333 (1998).
- [Bac99] G. Bachmann: „Innovationsschub aus dem Nanokosmos“, VDI, Düsseldorf (1999).
- [Bar61] J. Bardeen: Phys. Rev. Lett. **6**, 57 (1961).
- [Bar91] R.C. Barrett, C.F. Quate: J. Appl. Phys. **70**, 2725 (1991).
- [Bar92] R.C. Barrett, C.F. Quate: Ultramicrosc. **42-44**, 262 (1992).
- [Bar96] M. Barrett, M. Dennis, D. Tiffin, Y. Li, C.K. Shih: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 447 (1996).
- [Bar00] C. Bartsch: „Rastersondenmikroskopie an ligandenstabilisierten Metallclustern“, Diplomarbeit, Uni. Hamburg (2000).
- [Bec88] F. Beck: „Präparationstechniken für die Fehleranalyse an integrierten Halbleiterschaltungen“, VCH, Weinheim (1988).
- [Bec93] F. Beck: „Integrierte Halbleiterschaltungen“, VCH, Weinheim (1993).
- [Bet91] E. Betzig, J.K. Trautman, T.D. Harris, J.S. Weiner, R.L. Kostelak: Science **251**, 1468 (1991).
- [Bin82] G. Binnig und H. Rohrer: Helv. Phys. Acta **55**, 726 (1982).
- [Bin83] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber und E. Weibel: Phys. Rev. Lett. **50**, 120 (1983).
- [Bin86] G. Binnig, C.F. Quate, C. Gerber: Phys. Rev. Lett. **56**, 930 (1986).
- [Bin95] M. Binggeli, C.M. Mate: J. Vac. Sci. Technol. **B13**, 1312 (1995).
- [Bli90] S. Blight: Sol. St. Technol. 175 (1990).
- [Blu97] T. Blum: „Dünnschicht-Thermoelemente im Rasterthermomikroskop und

- Messung des magnetischen Streufeldes stromdurchflossener Leiterbahnen”, Diplomarbeit, Uni. Hamburg (1997).
- [Böh94] C. Böhm, C. Roths, U. Müller, A. Beyer, E. Kubalek: *Materials Sci. and Engineering* **B24**, 218 (1994).
- [Bon98] M. Bonaldi, P. Falferi, R. Dolesi, M. Cerdonio, S. Vitale: *Rev. Sci. Instrum.* **69**, 3690 (1998).
- [Bor96] A. Born: „Analyse und Erzeugung von Nanostrukturen mittels Rasterkapazitätsmikroskopie“, Diplomarbeit, Uni. Hamburg (1996).
- [Bor98] A. Born, R. Wiesendanger: *Appl. Phys.* **A66**, S421 (1998).
- [Boy93] I.W. Boyd, V. Craciun, A. Kazor: *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 6141 (1993).
- [Boy97] J.-Y. Zhang, I.W. Boyd: *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2964 (1997).
- [Bri95] G.E. Bridges, R.A. Said, M. Mittal, D.J. Thomson: *J. Vac. Sci. Technol.* **B13**, 1375 (1995).
- [Bry85] S.R. Bryan, W.S. Woodward, R.W. Linton, D.P. Griffis: *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**, 2102 (1985).
- [Cap99] B. Cappella, G. Dietler: *Surf. Sci. Rep.* **34**, 1 (1999).
- [Cir90] S. Ciraci, A. Baratoff, I.P. Batra: *Phys. Rev.* **B41**, 2763 (1990).
- [Cha98] K.-J. Chao, A.R. Smith, A.J. McDonalds, D.-L. Kwong, B.G. Streetman, C.-K. Shih: *J. Vac. Sci. Technol.* **B16**, 453 (1998).
- [Cho99] C.-H. Choi, J.-S. Goo, T.-Y. Oh, Z. Yu, R.W. Dutton, A. Bayoumi, M. Cao, P.V. Voorde, D. Vook, C.H. Diaz: *IEEE Electron. Dev. Lett.* **20**, 292 (1999).
- [Cla96] T. Clarysse, P. De Wolf, H. Bender, W. Vandervorst: *J. Vac. Sci. Technol.* **B14**, 358 (1996).
- [Cla96a] T. Clarysse, W. Vandervorst, M. Pawlik: *J. Vac. Sci. Technol.* **B14**, 390 (1996).
- [Cla98] T. Clarysse, W. Vandervorst: *J. Vac. Sci. Technol.* **B16**, 260 (1998).
- [Cla98a] T. Clarysse, M. Caymax, P. De Wolf, T. Trenkler, W. Vandervorst, J.S. McMurray, J. Kim, C.C. Williams, J.G. Clark, G. Neubauer: *J. Vac. Sci. Technol.* **B16**, 260 (1998).
- [Coo96] G.A. Cooke, P. Pearson, R. Gibbons, M.G. Dowsett, C. Hill: *J. Vac. Sci. Technol.* **B14**, 348 (1996).
- [DeA98] J.A. DeAro, K.D. Weston, R.W. Herrick, P.M. Petroff, S.K. Buratto: *Semicond. Sci. Technol.* **13**, 1364 (1998).

- [DeM72] H.J.J. De Man: Solid-State Electron. **15**, 177 (1972).
- [DeV95] P.L. DeVries: "Computerphysik", Spektrum, Heidelberg (1995).
- [DeW98] P. De Wolf: "Two-dimensional carrier profiling of semiconductor structures with nanometer resolution", Diss. , Katholieke Universiteit Leuven (1998).
- [Die96] A.C. Diebold, M.R. Kump, J.J. Kopanski, D.G. Seiler: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 196 (1996).
- [Dom99] R. Dombrowski, Chr. Steinebach, Chr. Wittneven, M. Morgenstern, R. Wiesendanger: Phys. Rev. B59, 8043 (1999).
- [Dow92] M.G. Dowsett, G.A. Cooke: J. Vac. Sci. Technol. **B10**, 353 (1992).
- [Dre95] M. Dreyer: „Aufbau eines Rasterkapazitätsmikroskops und Einsatz von Rastersondenmethoden zur elektronischen Strukturierung.", Diplomarbeit, Uni. Hamburg (1995).
- [Eig90] D.M. Eigler, E.K. Schweizer: Nature **344**, 524 (1990).
- [Eva94] D.F. Evans, H. Wennerström: „The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology, and Technology Meet", VCH, New York (1994).
- [FDST] „The Future of Data Storage Technologies“, WTEC Panel Report (1999). {FDST}
- [Fei81] F.J. Feigl, D.R. Young, D.J. DiMaria, S. Lai, J. Calise: J. Appl. Phys. **52**, 5665 (1981).
- [Fis98] U.C. Fischer: in "Scanning Probe Microscopy", Hrsg. R. Wiesendanger, Springer, Berlin, 161 (1998).
- [Fuj99] M. Fujihira: Annu. Rev. Mater. Sci. **29**, 353 (1999).
- [Fuk96] Y. Fukano, Y. Sugawara, T. Uchihashi, T. Okusako, S. Morita, Y. Yamanishi, T. Oasa: Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 2394 (1996).
- [Gao97] C. Gao: Appl. Phys. Lett. **71**, 1801 (1997).
- [Gar83] N. Garcia, C. Ocal, F. Flores: Phys. Rev. Lett. **50**, 2002 (1983).
- [Gaw96] P. Gaworzewski, B. Roos, J. Borngreber, K. Höppner, W. Höppner, U. Henniger: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 373 (1996).
- [Gie95] F.J. Giessibl: Science **267**, 68 (1995).
- [Göd90] T. Göddenhenrich, H. Lemke, U. Hartmann, C. Heiden: J. Vac. Sci. Technol. **A8**, 383 (1990).
- [Guc94] R. Guckenberger, M. Heim, G. Cevc, H.F. Knapp, W. Wiegräbe, A. Hillebrand: Science **266**, 1538 (1994).

- [Gra92] „Single Charge Tunneling.“, Hrsg.: H. Grabert und M.H. Devoret, Plenum Press, New York (1992).
- [Hag99] V. Hagen: „Entwicklung eines Tieftemperatur-Kapazitätssensors und Zweidimensionale Dotierprofilanalyse von Halbleitermikrostrukturen“, Diplomarbeit, Uni. Hamburg (1999).
- [Har89] U. Hartmann: Phys. Lett. **A137**, 475 (1989).
- [Har99] U. Hartmann: Annu. Rev. Mater. Sci. **29**, 53 (1999).
- [Hei96] L.A. Heimbrook, F.A. Baiocchi, T.C. Bittner, M. Geva, H.S. Luftman, S. Nakahara: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 202 (1996).
- [Hei98] M. Heim: “Elektrische Leitfähigkeit oberflächenadsorbierter Wasserschichten und deren Anwendung zur Rastertunnelmikroskopie von Isolatoren und biologischen Molekülen”, Diss., Uni. München (1998).
- [Her81] H. Hertz, J. Reine: Angew. Math. **92**, 156 (1881).
- [Hil95] M.M. Hills: J. Vac. Sci. Technol. **A13**, 412 (1995).
- [Hil96] U. Hilleringmann: „Silizium-Halbleitertechnologie“, Teubner, Stuttgart (1996).
- [Hil98] M.L. Hildner, R.J. Phaneuf, E.D. Williams: Appl Phys. Lett. **72**, 3314 (1998).
- [Hoc96] T. Hochwitz, A.K. Henning, C. Levey, C. Daghljan, J. Slinkman, J. Never, P. Kaszuba, R. Gluck, R. Wells, J. Pekarik, R. Finch: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 440 (1996).
- [Höl98] H. Hölscher, U.D. Schwarz, O. Zwörner, R. Wiesendanger: Phys. Rev. **B57**, 2477 (1998).
- [Hol79] R. Holm: „Electric Contacts“, 4th Edt., Springer, Berlin (1979).
- [Hos88] S. Hosaka, S. Hosoki, K. Takata, K. Horiuchi, N. Natsuaki: Appl. Phys. Lett. **53**, 487 (1988).
- [Hud98] S. Hudlet, M. Saint Jean, C. Guthmann, J. Berger: Eur. Phys. J. **B2**, 5 (1998).
- [Hu86] J.Z. Hu, L.D. Merkle, C.S. Menoni, I.L. Spain: Phys. Rev. **B34**, 4679 (1986).
- [Hu95] J. Hu, X.-D. Xiao, D.F. Ogletree, M. Salmeron: Science **268**, 267 (1995).
- [Hu99] C. Hu: Nanotechnology **10**, 113 (1999).
- [Hua95] Y. Huang, C.C. Williams, J. Slinkman: Appl. Phys. Lett. **66**, 344 (1995).

- [Ise99] J. Isenbart: "Simulationen zur Rasterkapazitätsmikroskopie", Diplomarbeit, Uni. Hamburg (1999).
- [Isr92] J. Israelachvili: "Intermolecular and Surface Forces", 2nd Ed., Academic, New York (1992).
- [Jac97] H.O. Jacobs, H.F. Knapp, S. Müller, A. Stemmer: Ultramicrosc. **69**, 39 (1997).
- [Jac98] H.O. Jacobs, P. Leuchtmann, O.J. Homan, A. Stemmer: J. Appl. Phys. **84**, 1168 (1998).
- [Joh71] K.L. Johnson, K. Kendall, A.D. Roberts: Proc. R. Soc. Lond. **A324**, 301 (1971).
- [Joh93] M.B. Johnson, O. Albrechtsen, R.M. Feenstra, H.W.M. Salemink: Appl. Phys. Lett. **63**, 2923 (1993).
- [Kom96] T. Komeda, S. Gwo, H. Tokumoto: Surf. Sci. **357-358**, 38 (1996).
- [Kop98] J.J. Kopanski, J. F. Marchiando, D.W. Berning, R. Alvis, H.E. Smith: J. Vac. Sci. Technol. **B16**, 339 (1998).
- [Kra00] O. Krause: "Simulationen zur Bestimmung von 2D-Dotierprofilen mittels Rasterkapazitätsmikroskopie", Diplomarbeit, Uni. Hamburg (2000).
- [Kuz96] W. Kuzmicz: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 408 (1996).
- [Lai99] L. Lai, K.J. Herbert, E.A. Irene: J. Vac. Sci. Technol. **B17**, 53 (1999).
- [Law96] M.E. Law: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 213 (1996).
- [Lew84] A. Lewis, M. Isaacson, A. Harootunian, A. Muray: Ultramicrosc. **13**, 227 (1984).
- [Lik98] K.K. Likharev : Appl. Phys. Lett. **73**, 2137 (1999).
- [Lik99] K.K. Likharev : Nanotechnology **10**, 159 (1999).
- [Lin82] S.-T. Lin, J. Reuter: Sol. St. Electron. **26**, 343 (1983).
- [Lin88] S.M. Lindsay und B. Barris: J. Vac. Sci. Technol. **A6**, 544 (1988).
- [Loh99] J. Lohau, S. Kirsch, A. Carl, G. Dumpich, E.F. Wassermann: J. Appl. Phys. **86**, 3410 (1999).
- [Lor00] A. Lorke, R.J. Luyken, A.O. Govorov, J.P. Kotthaus, J.M. Garcia, P.M. Petroff: Phys. Rev. Lett. **84**, 2223 (2000).
- [Mal99] I. Malsch, Nanotechnology **10**, 1 (1999).
- [Maj99] A. Majumdar: Annu. Rev. Mater. Sci. **29**, 505 (1999).
- [Mam86] H.J. Mamin, E. Ganz, D.W. Abraham, R.E. Thompson, J. Clarke: Phys. Rev. **B34**, 9015 (1986).

- [Mar87a] Y. Martin, C.C. Williams, H.K. Wickramasinghe: J. Appl. Phys. **61**, 4723 (1987).
- [Mar87b] Y. Martin, H.K. Wickramasinghe: Appl. Phys. Lett. **50**, 1455 (1987).
- [Mar88] Y. Martin, D.W. Abraham, H.K. Wickramasinghe: Appl. Phys. Lett. **52**, 244 (1988).
- [Mar98] J.F. Marchiando, J.J. Kopanski, J.R. Lowney: J. Vac. Sci. Technol. **B16**, 463 (1998).
- [Mat85] J.R. Matey, J. Blanc: J. Appl. Phys. **57**, 1437 (1985).
- [Mat89] C.M. Mate, R. Erlandsson, G.M. McClelland, S. Chiang: Surf. Sci. **208**, 473 (1989).
- [May94] M. Maywald, R.J. Pylkki, L.J. Balk: Scann. Microsc. **8**, 181 (1994).
- [Mei96] J.D. Meindl: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 192 (1996).
- [Meg90] T.J. Mego: Solid State Technol. , 159 (1990).
- [Mey88] G. Meyer, N.M. Amer: Appl. Phys. Lett. **53**, 1045 (1988).
- [Mik97] T. Mikolajick, V. Häublein, H. Ryssel: Appl. Phys. **A64**, 555 (1997).
- [Mün97] M. Münz: "Aufbau eines nahfeldoptischen Mikroskops in Reflexionsgeometrie", Diplomarbeit, Uni. Hamburg (1998).
- [Mur93] M.P. Murrell, M.E. Welland, S.J. O'Shea, T.M.H. Wong, J.R. Barnes, M. Heyns, S. Verhaverbeke: Appl. Phys. Lett. **62**, 786 (1993).
- [Nic82] E.H. Nicollian, J.R. Brews: "MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology", Wiley, New York (1982).
- [Niw92] M. Niwano, M. Suemitsu, Y. Ishibashi, Y. Takeda, N. Miyamoto, K. Honma: J. Vac. Sci. Technol. **A10**, 3171 (1992).
- [NNI00] "National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution", IWGN, US-Gov., Washington (2000). {NNI}
- [Non92] M. Nonnenmacher, H.K. Wickramasinghe: Appl. Phys. Lett. **61**, 168 (1992).
- [Oht88] H. Ohtani, R.J. Wilson, S. Chiang und C.M. Mate: Phys. Rev. Lett. **60**, 2398 (1988).
- [Olb99] A. Olbrich: „Charakterisierung dünner Dielektrika mittels modifizierter Rasterkraftmikroskopie“, Diss., Uni. Regensburg (1999).
- [OMa99] M.L. O'Malley, G.L. Timp, W. Timp, S.V. Moccio, J.P. Garno, R.N. Kleinman: Appl. Phys. Lett. **74**, 3672 (1999).
- [OSh95] S.J. O'Shea, R.M. Atta, M.P. Murrell, M.E. Welland: J. Vac. Sci.

- Technol. **B13**, 1945 (1995).
- [Pae96] M. Paesler, P. Moyer: „Near-Field Microscopy“, Wiley, New York (1996).
- [Pal82] R.C. Palmer, E.J. Denlinger, H. Kawamoto: RCA Review **43**, 194 (1982).
- [Pan99] S.H. Pan, E.W. Hudson, J.C. Davis: Rev. Sci. Instrum. **70**, 1459 (1990).
- [Pat97] N. Patel, M.C. Davies, M. Lomas, C.J. Roberts, S.J.B. Tendler, P.M. Williams: J. Phys. Chem. **B101**, 5138 (1997).
- [Pet87] J.B. Pethica, W.C. Oliver: Phys. Scr. **T19**, 61 (1987).
- [Pet99] C.A. Peterson, R.K. Workman, D. Sarid, B. Vermeire, H.G. Parks, D. Adderton, P. Maivald: J. Vac. Sci. Technol. **A17**, 2753 (1999).
- [Pie92] G.J. Pietsch: „Struktur und Chemie technologischer Silicium-Oberflächen“, VDI Verlag, Düsseldorf (1992).
- [Poh84] D.W. Pohl, W. Denk, M. Lanz: Appl Phys. Lett. **44**, 651 (1984).
- [Poh86] D.W. Pohl: IBM J. Res. & Develop. **30**, 417 (1986).
- [Que85] H.J. Queisser: „Kristallene Krisen“, Pieper, München (1985).
- [Rau99] W.D. Rau, P. Schwander, F.H. Baumann, W. Höppner, A. Ourmazd: Phys. Rev. Lett. **82**, 2614 (1999).
- [Rug84] J. Ruge: „Halbleiter-Elektronik Bd. 4, Halbleiter-Technologie.“ Springer-Verlag, Berlin (1984).
- [Sak96] A. Sakai, S. Kurokawa: J. Vac. Sci. Technol. **A14**, 1219 (1996).
- [Sal91] M. Salmeron, D.F. Ogletree, C. Ocal, H.-C. Wang, G. Neubauer, W. Kolbe, G. Meyer: J. Vac. Sci. Technol. **B9**, 1347 (1991).
- [Sar91] D. Sarid: “Scanning Force Microscopy“, 1.Ed., Oxford University Press, New York (1991).
- [Sar97] D. Sarid: “Scanning Probe Microscopy with Mathematica“, Wiley, New York (1997).
- [Schaa99] D.M. Schaadt, E.T. Yu, S. Sankar, A.E. Berkowitz: Appl. Phys. Lett. **74**, 472 (1999).
- [Schen98] M. Schenk, M. Fütting, R. Reichelt: J. Appl. Phys. **84**, 4880 (1998).
- [Schme95] D. Schmerek: „Kapazitätsspektroskopie an niedrigdimensionalen Elektronensystemen.“, Diplomarbeit, Uni. München (1995).
- [Schön90] C. Schönenberger, S.F. Alvarado: Phys. Rev. Lett. **65**, 3162 (1990).
- [Schro90] D.K. Schroder: “Semiconductor Material and Device Characterization“, Wiley, New York (1990).

- [Schwa97] U. Schwarz: in "Handbook of Microscopy. Methods II", Hrsg.: S. Amelinckx, D. van Dyck, J. van Landhuyt, G. van Tendeloo, VCH, Weinheim, 827 (1997).
- [Sco95] J.F. Scott: Physics World, 46 (1995).
- [Sha94] C. Shafai, D.J. Thomson, M. Simard-Normandin, G. Mattiussi, P.J. Scanlon: Appl. Phys. Lett. **64**, 342 (1994).
- [She94] R. Sherman, D. Hirt, R. Vane: J. Vac. Sci. Technol. **A12**, 1876 (1994).
- [She98] V. Shevyakov, S. Lemeshko, V. Roschin: Nanotechnology **9**, 352 (1998).
- [Soh97] "Mesoscopic Electron Transport.", Hrsg.: L.L. Sohn, L.P. Kouwenhoven und G. Schön, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1997).
- [Spi96] C. Spinella, V. Raineri, F. La Via, S.U. Campisano: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 414 (1996).
- [Ste98] R. Stephenson, A. Verhulst, P. De Wolf, M. Caymax, W. Vandervorst: Appl. Phys. Lett. **73**, 2597 (1998).
- [Ste00] R. Stephenson, A. Verhulst, P. De Wolf, M. Caymax, W. Vandervorst: J. Vac. Sci. Technol. **B18**, 405 (2000).
- [Str88] J.A. Stroscio, R.M. Feenstra: J. Vac. Sci. Technol. **B6**, 1472 (1988).
- [Sub92] R. Subrahmanyam: J. Vac. Sci. Technol. **B10**, 358 (1992).
- [Sze88] S.M. Sze: „VLSI Technology“, McGraw-Hill Book Company, New York (1988).
- [Tab84] M. Tabe: Appl. Phys. Lett. **45**, 1073 (1984).
- [Ter83] J. Tersoff, D.R. Hamann: Phys. Rev. Lett. **50**, 1998 (1983).
- [Ter85] J. Tersoff, D.R. Hamann: Phys. Rev. **B31**, 805 (1985).
- [Ter93] B.D. Terris, R.C. Barrett, H.J. Mamin: SPIE 1855, 195 (1993).
- [Tes98] S.H. Tessmer, P.I. Glicofridis, R.C. Ashoori, L.S. Levitov, M.R. Melloch: Nature **392**, 51 (1998).
- [Tiw96] S. Tiwari, F. Rana, H. Hanafi, A. Hartstein, E.F. Crabbe, K. Chan: Appl. Phys. Lett. **68**, 1377 (1996).
- [Tor93] M. Tortonese, R.C. Barrett, C.F. Quate: Appl. Phys. Lett. **381**, 834 (1993).
- [Tre98] T. Trenkler, W. Vandervorst, L. Helleman: J. Vac. Sci. Technol. **B16**, 349 (1998).
- [Tre00] T. Trenkler, T. Hantschel, R. Stephenson, P. De Wolf, W. Vandervorst,

- L. Hellemans, A. Malavé, D. Büchel, E. Oesterschulze, W. Kulisch, P. Niedermann, T. Sulzbach, O. Ohlsson: J. Vac. Sci. Technol. **B18**, 418 (2000).
- [Uch96] T. Uchihashi, T. Okusako, Y. Sugawara, Y. Yamanishi, T. Oasa, S. Morita: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 1055 (1996).
- [Ukr98] V.A. Ukraintsev, R. McGlothlin, M.A. Gribelyuk, H. Edwards: J. Vac. Sci. Technol. **B16**, 476 (1998).
- [Ume98] S. Umemura, M. Igarashi, Y. Andoh, R. Kaneko, S. Aizawa, K. Noguchi, T. Dekura, A. Toda: J. Vac. Sci. Technol. **B16**, 38 (1998).
- [Van96] W. Vandervorst, T. Clarysse, H.E. Smith: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 404 (1996).
- [Van97] W. Vandervorst, T. Clarysse, P. De Wolf, T. Trenkler, T. Hantschel, R. Stephenson: Future Fab. Int. 4, 287 (1997).
- [VDI99a] VDI-Nachrichten Nr.8 vom 26.2.1999.
- [VDI99b] VDI-Nachrichten Nr.16 vom 23.4.1999.
- [Ven96] D. Venables, D.M. Maher: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 421 (1996).
- [Vet99] P. Vettinger, J. Brugger, M. Despont, U. Drechsler, U. Dürig, M. Lutwyche, H. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G. Binnig: J. Microelectron. Eng. 46, 11 (1999).
- [Vil97] J.S. Villarrubia: J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **102**, 425 (1997).
- [vonB92] H.C. von Baeyer: „Taming the Atom: The Emergence of the Visible Microworld.“, Random House, New York (1992).
- [vonC94] R. von Criegern, F. Jahnel, M. Bianco, R. Lange-Gieseler: J. Vac. Sci. Technol. **B12**, 234 (1994).
- [vonC98] R. von Criegern, F. Jahnel, R. Lange-Gieseler, P. Pearson, G. Hobler, A. Simionescu: J. Vac. Sci. Technol. **B16**, 386 (1998).
- [vonN97] A. von Nahmen, M. Schenk, M. Sieber, M. Amrein: Biophys. J. **72**, 463 (1997).
- [Wei91] T.P. Weihs, Z. Nawaz, S.P.
- [Wid96] D. Widmann, H. Mader, H. Friedrich: „Technologie hochintegrierter Schaltungen“, 2. Aufl., Springer, Berlin (1996).
- [Wie90] R. Wiesendanger, H.-J. Güntherodt, G. Güntherodt, R.J. Gambino, R. Ruf: Phys. Rev. Lett. **65**, 247 (1990).
- [Wie94] R. Wiesendanger: “Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy”,

Cambridge University Press, Cambridge (1994).

- [Wil86] C.C. Williams, H.K. Wickramasinghe: Appl. Phys. Lett. **49**, 1587 (1986).
- [Wil99] C.C. Williams: Annu. Rev. Mater. Sci. **29**, 471 (1999).
- [Wild96] K. Wilder, C.F. Quate, B. Singh, R. Alvis, W.H. Arnold: J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 4004 (1996).
- [Wol91] O. Wolter, T. Bayer, J. Greschner: J. Vac. Sci. Technol. **B9**, 1353 (1991).
- [Wri98] W.M. Wright, D.G. Chetwynd: Nanotechnology **9**, 133 (1998).
- [Yam99] Y. Yamashita, A. Asano, Y. Nishioka, H. Kobayashi: Phys. Rev. **B24**, 15872 (1999).
- [Yu99] G.M. Yu: "A Two-dimensional Implantation and Diffusion Study using Scanning Capacitance Microscopy", Diss., Stanford Uni. (1999).
- [Zho93] Q. Zhong, D. Inniss, K. Kjoller, V.B. Elings: Surf. Sci. Lett. **290**, L688 (1993).
- [Zie75] K. Ziegler, E. Klausmann, S. Kar: Sol. St. Electron. **18**, 189 (1975).

## Internet-Adressen

- {Buehler} <http://www.buehler.com>
- {Cantilever} <http://ourworld.compuserve.com/homepages/nanosensors>  
<http://www.ntmdt.ru>
- {Ciba-Geigy} <http://www.ciba-geigy.com>
- {FDST} <http://itri.loyola.edu/pdf/hdmem.pdf>
- {FIB} <http://www.micrion.com>
- {Hamburg} <http://www.nanoscience.de>
- {IBM} <http://www.almaden.ibm.com/>
- {ITRS} <http://www.semichips.org/>
- {Mars} <http://mars.jpl.nasa.gov/2001/lander/meca/micro1.html>
- {München} <http://www.biophysik.physik.uni-muenchen.de>
- {Münster} <http://www.nanoanalytics.de>
- {Nanonet} <http://www.nanonet.de>
- {Nanoanalytik} <http://www.nanoanalytik.de/zentrum>
- {NNI} <http://itri.loyola.edu/nano/IWGN/nni.pdf>
- {SnowJet} <http://www.tectra.de>
- {SPM} <http://www.embl-heidelberg.de/~altmann/>
- {SSRM} <http://home.ee.umanitoba.ca/~spm/srm/srm.html>
- {TCAD} <http://www.ise.ch>

## Anhang

### Höchstempfindliche Kapazitätssensoren

Das Herzstück des SCMs ist der Kapazitätssensor. Um Kenngrößen des SCMs, etwa die laterale Auflösung oder die Dotierungs-Auflösung, zu optimieren, muss die Empfindlichkeit des Sensors vergrößert werden. Die Grenzen der Sensitivität von Kapazitätssensoren sollen in diesem Anhang aufgeführt werden.

Grundsätzlich muss bei der Bestimmung von Kapazitäten zwischen Gleich- ( $C_{DC}:=Q/V$ ) und Wechsellspannungsresponse ( $C_{AC}:=dQ/dV$ ) unterschieden werden. Letztere, die auch als differentielle Kapazität bezeichnet wird, soll mit einer besseren Auflösung als 1aF bestimmt werden.

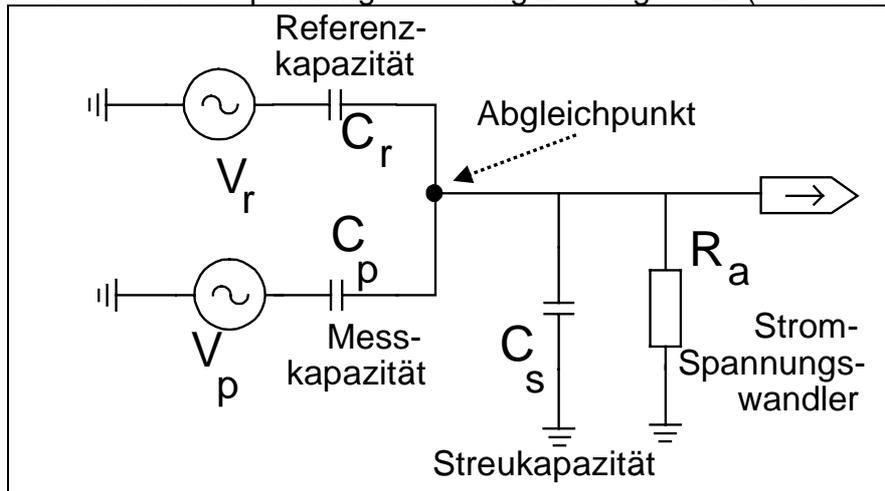
Während die Messung großer Kapazitätswerte – für die Gleichspannungsresponse ( $C_{AC}>1pF$ ) durch eine Transformation in eine Zeitmessung (Bestimmung der Aufladezeit) und für die Wechsellspannungsresponse ( $C_{AC}>1pF$ ) durch eine Transformation in eine Frequenzmessung – einfach durchzuführen ist, bereitet die Bestimmung kleiner Kapazitäten ( $C_{AC}<1fF$ ) größere Probleme. Das derzeit empfindlichste kommerzielle Kapazitäts-Messgerät, das Modell 2500A von Andeen-Hagerling, erreicht eine maximale Auflösung von 0.5aF bei einer Integrationszeit von 0.5s und basiert auf einer Kapazitätsbrücken-Schaltung. Der in den 70er-Jahren entwickelte RCA-Kapazitätssensor [Pal82] erreicht eine maximale Auflösung von 0.5aF bei einer Integrationszeit von einigen  $\mu s$  und basiert dagegen auf dem Resonanzkreis-Prinzip. Beide möglichen Messschaltungen werden nun – nach der Auflistung der speziellen Anforderungen – gegenübergestellt und ihre Vor- und Nachteile herausgearbeitet.

Anforderungen an einen Kapazitätssensor für:	IC-Analytik und Datenspeicherung	Untersuchung von Einzelelektronen- und Quantengrößen-Effekten
Temperatur	$T = 300K$	$T \leq 4K$
Bandbreite	$> 100kHz$	$> 1Hz$
Maximale Auflösung	$< 1aF$	$< 1aF$
Messfrequenz	$> 1MHz$	variabel
Messamplitude	$< 1V$	$< 0.1V$

Für die beiden unterschiedlichen Einsatzbereiche wird hinsichtlich der maximalen Auflösung die gleich hohe Anforderung von besser als 1aF gestellt. Bei der IC-Analytik und Datenspeicherung kommt es zudem auf eine hohe Bandbreite an, während bei der Untersuchung der Einzelelektronen- und Quantengrößen-Effekten die große mechanische Stabilität des Tieftemperatur-Systems auch geringere Bandbreiten – also lange Messzeiten – erlaubt. Messfrequenz und Messamplitude richten sich nach den physikalischen Gegebenheiten. Bei der IC-Analytik werden HF-C-V-Kurven gemessen; dies erfordert eine Frequenz von  $>1MHz$ . Um die Kleinsignal-Bedingung zu erhalten – d.h. um einen einfachen Vergleich zwischen Theorie/Simulation und Experiment zu ermöglichen – wären Amplituden von  $<0.1V$  von Vorteil (größere Amplituden führen zu Mittelungs-Effekten und Nicht-Linearitäten). Bei der Datenspeicherung ist die Amplitude hingegen durch die Verringerung der lateralen Auflösung mit steigender Messamplitude eingeschränkt. Die Untersuchung von Quantengrößen-Effekten verlangt eine Beschränkung der Messamplitude unterhalb 0.1V. Variable Frequenzen wären für die Untersuchung

zeitlicher Vorgänge bei verschiedenen Temperaturen von Vorteil (z.B. für Deep Level Transient Spectroscopy, DLTS).

Die *Kapazitätsbrücke* basiert auf einer Vergleichsmessung der Probenkapazität ( $C_p$ ) mit der Referenzkapazität ( $C_r$ ), an die je eine Wechselstrom-Spannungsquelle angeschlossen ist. Sind beide Spannungsquellen um  $180^\circ$  phasenverschoben und verhalten sich ihre Amplituden umgekehrt proportional zu den Kapazitäten ( $V_p/V_r=C_r/C_p$ ), so ist das Stromsignal am Abgleichspunkt A Null. Eine Änderung der Probenkapazität um  $\Delta C$  bewirkt eine Stromänderung  $\Delta I$ . Diese wird mit einem Strom-Spannungswandler in eine Spannungsänderung  $\Delta V$  umgesetzt (siehe Grafik).



Für die abgegliche Kapazitätsbrücke ergibt sich mit  $C=C_r=(C_p - \Delta C)$  folgender Betrag der Übertragungsfunktion:

$$H(\omega) := \frac{\omega \cdot R_a \cdot \Delta C}{\sqrt{1 + R_a^2 \cdot \omega^2 \cdot (2 \cdot C + \Delta C + C_s)^2}}$$

Mit  $\Delta C \ll C \ll C_s$  und  $1 \ll R_a^2 C_s^2 \omega^2$  folgt:

$$H(\omega) := \frac{\Delta C}{C_s}$$

Damit ergibt sich ein Spannungssignal von:

$$\Delta V := \frac{\Delta C}{C_s} \cdot V_p$$

Wird nur das thermische Rauschen des Strom-Spannungswandlers  $R_a$  berücksichtigt, so gilt:

$$n(\omega) := \frac{\sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R_a \cdot bw}}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot R_a^2 \cdot C_s^2}}$$

Mit obigen Ungleichungen folgt:

$$n(\omega) := \sqrt{4 \cdot k \cdot T} \cdot \frac{\sqrt{bw}}{\omega \cdot C_s \cdot \sqrt{R_a}}$$

Somit ergibt sich ein Signal-Rausch-Verhältnis (engl. signal-to-noise ratio, SNR) von

$$SNR := \frac{\sqrt{R_a \cdot \omega \cdot V_p \Delta C}}{\sqrt{4 \cdot k \cdot T} \cdot \sqrt{bw}}$$

und eine maximale Auflösung (minimal detektierbare Kapazität) von

$$\Delta C_{\max} := \frac{\sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot \sqrt{bw}}}{\sqrt{R_a \cdot \omega \cdot V_p}}$$

$\Delta C_{\max}$  wird also umso kleiner, je größer Messfrequenz und Amplitude und je kleiner Bandbreite und Temperatur gewählt werden. Auch eine Vergrößerung des Widerstandes  $R_a$  führt zu einer besseren Auflösung. Bei der Wahl von  $R_a$  und  $\omega$  ist ferner die Ungleichung  $1 \ll R_a^2 C_s^2 \omega^2$  zu erfüllen.

Die experimentell ermittelten Werte einer nach obigem Prinzip aufgebauten Kapazitätsbrücke ergaben eine hervorragende Übereinstimmung mit den hergeleiteten (vereinfachten) theoretischen Werten.

Kapazitätsbrücke mit $T := 300\text{K}$ , $V_p := 2.5\text{V}$ , $f_0 := 98.2\text{kHz}$ , $C_s := 3.3\text{pF}$ , $\Delta C := 20\text{aF}$ , $R_a := 10\text{M}\Omega$ , $bw := 20.5\text{kHz}$	Experimentelle Werte	Theoretische Werte
Signal [ $\mu\text{V}$ ]	15	15
Rauschen [ $\mu\text{V}$ ]	10	3
Maximale Auflösung [ $\text{aF}$ ]	13	4

Ähnliche Resultate lassen sich auch mit den Werten aus den Arbeiten von Ashoori [Ash92] und Schmarek [Schme95] erzielen. Das Rauschen ist im realen System folglich größer. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in der bisherigen Herleitung nur thermisches Widerstandsrauschen berücksichtigt wurde. Eine genauere Analyse muss zudem noch die Eingangs-Rauschkenngößen des verwendeten Impedanzwandlers berücksichtigen. Die niedrigste Rauschdichte ist dann – bei entsprechend hohen Frequenzen – durch die Eingangsrauschdichte (z.B.  $U_{in} = 4.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  beim OPA637) des Impedanzwandlers gegeben. Dann gilt:

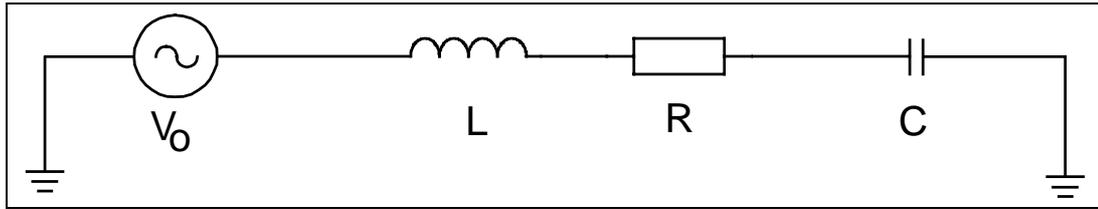
$$\Delta C_{\max} := \sqrt{U_{in}^2 \cdot bw} \cdot \frac{C_s}{V_p}$$

Die maximal mögliche Auflösung lässt sich folglich nur noch erhöhen, wenn die Streukapazität verkleinert wird. Diese hängt von der Probe-Messsonden-Geometrie und der Eingangs-Streukapazität des verwendeten Impedanzwandlers ab und lässt sich nur mit großem experimentellen Aufwand (aktive Abschirmung bei hohen Frequenzen) deutlich unter  $0.1\text{pF}$  drücken.

Bei der Verwendung eines HEMT (High-Electron-Mobility-Transistor) als Impedanzwandler ist die Brücke auch für Messungen bei tiefen Temperaturen ( $<0.3\text{K}$ ) geeignet.

Mit einer Bandbreite von  $bw=10\text{kHz}$ , einer Messamplitude von  $0.1\text{V}$ , einer Streukapazität von  $C_s=1\text{pF}$  und bei Verwendung eines HEMTs (T409C) erreicht die Brücke eine maximal mögliche Auflösung von  $0.5\text{aF}$  – bei einer Messfrequenz, die über  $100\text{MHz}$  liegen muss! Dies verlangt einen phasensensitiven Verstärker (engl. Lock-in Amplifier, LIA), der bei diesen Frequenzen arbeiten kann.

Der Kapazitätssensor, der auf einem *Resonanzkreis* basiert, nutzt die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Kapazität ( $\omega_0^2=1/(L \cdot C)$ ) aus, um eine Kapazitätsänderung in eine Frequenz- bzw. Phasenänderung und diese wiederum in eine Spannungsänderung umzusetzen.



Die Sensitivität des Resonanzkreises  $\Delta V/\Delta C$  lässt sich aus zwei Termen zusammensetzen:  $\Delta V/\Delta C := \Delta V/\Delta f \cdot \Delta f/\Delta C$ . Für eine Amplituden-Demodulation, bei der die anregende Frequenz so gewählt wird, dass sie bei der Frequenz liegt, bei der die Amplitude des Resonanzkreises auf die Hälfte abgefallen ist, beträgt der erste Term:  $\Delta V/\Delta f := 0.4 \cdot V_p/B$ .  $V_p$  ist hierbei die maximale Amplitude des Resonanzkreises und  $B$  seine Bandbreite. Für den zweiten Term gilt:  $\Delta f/\Delta C := 0.5 \cdot f_0/C$ . Somit ergibt sich für das Spannungssignal:

$$\Delta V := 0.22 \cdot \frac{V_p}{C} \cdot Q \cdot \Delta C$$

Wird auch hier nur das thermische Rauschen berücksichtigt (kein Rauschen des Oszillators!), so gilt hierfür:

$$n := Q \cdot \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R} \cdot \sqrt{bw}$$

Somit beträgt das Signal-Rausch-Verhältnis:

$$SNR := 0.22 \cdot \frac{V_p \cdot \Delta C}{\sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R} \cdot \sqrt{bw} \cdot C}$$

Und die maximal mögliche Auflösung ergibt sich über:

$$\Delta C_{\max} := \frac{\sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R} \cdot \sqrt{bw} \cdot C}{0.22 \cdot V_p}$$

Wieder wurden die hergeleiteten Werte mit den experimentellen Werten eines realen Kapazitätssensors verglichen.

Resonanzkreis mit $T := 300K$ , $V_p := 5V$ , $f_0 := 915MHz$ , $C_s := 1pF$ , $\Delta C := 1aF$ , $bw := 10kHz$	Experimentelle Werte	Theoretische Werte
Signal [ $\mu V$ ]	50	50
Rauschen [ $\mu V$ ]	25	1
Maximale Auflösung [aF]	0.5	0.02

Der signifikante Unterschied in der Rauschspannung beruht auf einer schlechten Performance des Gesamtsystems (entwickelt in den 70er-Jahren). Die gemessene Rauschdichte am Ausgang des Resonanzkreises stimmt hingegen mit dem simulierten Wert überein.

Bei einer Bandbreite von  $bw=10kHz$  und einer Messamplitude von  $0.1V$  gilt:

$$\Delta C_{\max} := 6 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{R \cdot C}$$

Das Einsetzen der bekannten Zusammenhänge von  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $f_0$  und  $Q$  führt zu

$$\Delta C_{\max} := 0.4 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot Q \cdot f_0^3}}$$

und damit zu einer Forderung nach einer hohen Frequenz, einer großen Güte und einer großen Induktivität, bzw. einem kleinen Widerstand und einer kleinen Kapazität.

Für eine praktische Umsetzung sind dies widersprüchliche Anforderungen. Simulationen einer Luftspule (variiert wurde die Anzahl der Windungen) ergaben für eine große Induktivität immer auch eine große Kapazität und eine kleine Frequenz.

In folgender Tabelle sind die Werte unterschiedlicher Realisierungen eines Resonanz-Kapazitätssensors gegenübergestellt. Die exzellente Güte und der minimale Widerstand von Bonaldi Aufbau [Bon98] führen durch die System-bedingte große Kapazität und die niedrige Frequenz nicht zur höchstmöglichen Auflösung. Auch Dreyers Aufbau [Dre95] kann – aufgrund der großen Streukapazität und des großen Widerstands – nicht überzeugen.

Mit Vp:=0.1 bw:=10kHz	RCA	Dreyer	Bonaldi
fo [MHz]	915	7.26	$147 \cdot 10^{-6}$
Q	45.75	8.75	$1.8 \cdot 10^6$
R [ $\Omega$ ]	3.8	220	$1.5 \cdot 10^{-3}$
L [nH]	30	$44 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^9$
C [pF]	1	11	$390 \cdot 10^3$
$\Delta C_{\max}$ [aF]	1.1	95	1062

Die Forderung nach kleinen Werten von Kapazität und Widerstand führt zur Hochfrequenz-Technik.

Mit einer Bandbreite von bw=10kHz, einer Messamplitude von 0.1V und einer Streukapazität von Cs=1pF folgt für die maximal mögliche Auflösung des Resonanzkreis-Kapazitätssensors:

$$\Delta C_{\max} := 0.6 \cdot 10^{-18} \cdot \sqrt{R}$$

Für einen Widerstand von 1 $\Omega$  würde die Resonanzkreis-Messung eine maximal mögliche Auflösung von 0.6aF erreichen. Mit einer Verringerung des Widerstandes um eine Größenordnung, was einer Erhöhung der Güte um eine Größenordnung gleichkäme (von derzeit 45 auf 450), könnte diese Methode auch eine Auflösung von unter 0.1aF erzielen.

Zusammenfassend folgt für beide Varianten eine gleich hohe maximale Auflösung von 0.5 aF – bei der großen Bandbreite von 10 kHz. Auch die Anforderungen an die Realisierung für höchste Auflösung sind gleich: hohe Messfrequenz und niedrige Streukapazität.

Die Brücke ist hinsichtlich hoher Frequenzen durch die maximal mögliche Frequenz des LIA (der SR844 von Stanford Research Systems kann eine Frequenz von maximal 200MHz verarbeiten) und hinsichtlich niedriger Streukapazität durch die Eingangskapazität des verwendeten Impedanzwandlers (>0.1pF) begrenzt. Die Vorteile der Brücke liegen in der größeren Unempfindlichkeit gegenüber thermischer Drift und Oszillatorrauschen. Zudem kann die Option, mit variablen Messfrequenzen zu arbeiten, ein großer Vorteil für Messungen im Bereich der Grundlagenforschung sein (nicht vorhersehbare Proben und Fragestellungen). Im Bereich der IC-Analytik und Datenspeicherung reicht hingegen eine – ausreichend hohe – Messfrequenz. Der Resonanzkreis ist – bei hoher Frequenz – allein durch die technische Realisation des kleinen Widerstandes (Streifenleiter-Technik) und hinsichtlich niedriger

Streukapazität durch den experimentellen Aufbau begrenzt. Die Vorteile der Resonanztechnik liegen im möglichen kompakten Design ohne externe Komponenten (ein LIA wird beim SCM zur Modulation und nicht für die direkte Messung benötigt) und in der Chance, noch höhere Auflösungen – als mit der Brückentechnik möglich – zu erzielen.

Damit bietet sich die Resonanzkreismethode für die IC-Analytik und Datenspeichertechnik und die Brückenmessung für die Untersuchung von Einzelelektronen- und Quantengrößen-Effekten an.

Bild 1 und 2 zeigen die bisher realisierten Kapazitätssensoren.

Bild 3 präsentiert eine mögliche Weiterentwicklung der Resonanzmethode, bei der die Frequenz nicht in eine Amplitude demoduliert wird. Stattdessen soll ein Phasendetektor (PD) einen spannungsgesteuerten Oszillator (Voltage Controlled Oszillator, VCO) auf maximale Amplitude bzw. verschwindenden Phasenunterschied hinsichtlich des Resonanzkreises regeln. Das Konzept ist als Nachlauf-synchronisation (Phase-Locked-Loop, PLL) in der Funktechnik schon seit Langem bekannt. Entsprechende Bausteine werden heute in der Handy/Mobile- bzw. Satelliten-Technik standardmäßig bis einige 10GHz eingesetzt. Damit könnte ein schneller, kompakter und extrem sensitiver Kapazitätssensor entwickelt werden. Dies soll in Zusammenarbeit mit der Infineon Technology AG geschehen.

Bild1: Kapazitätsbrücke

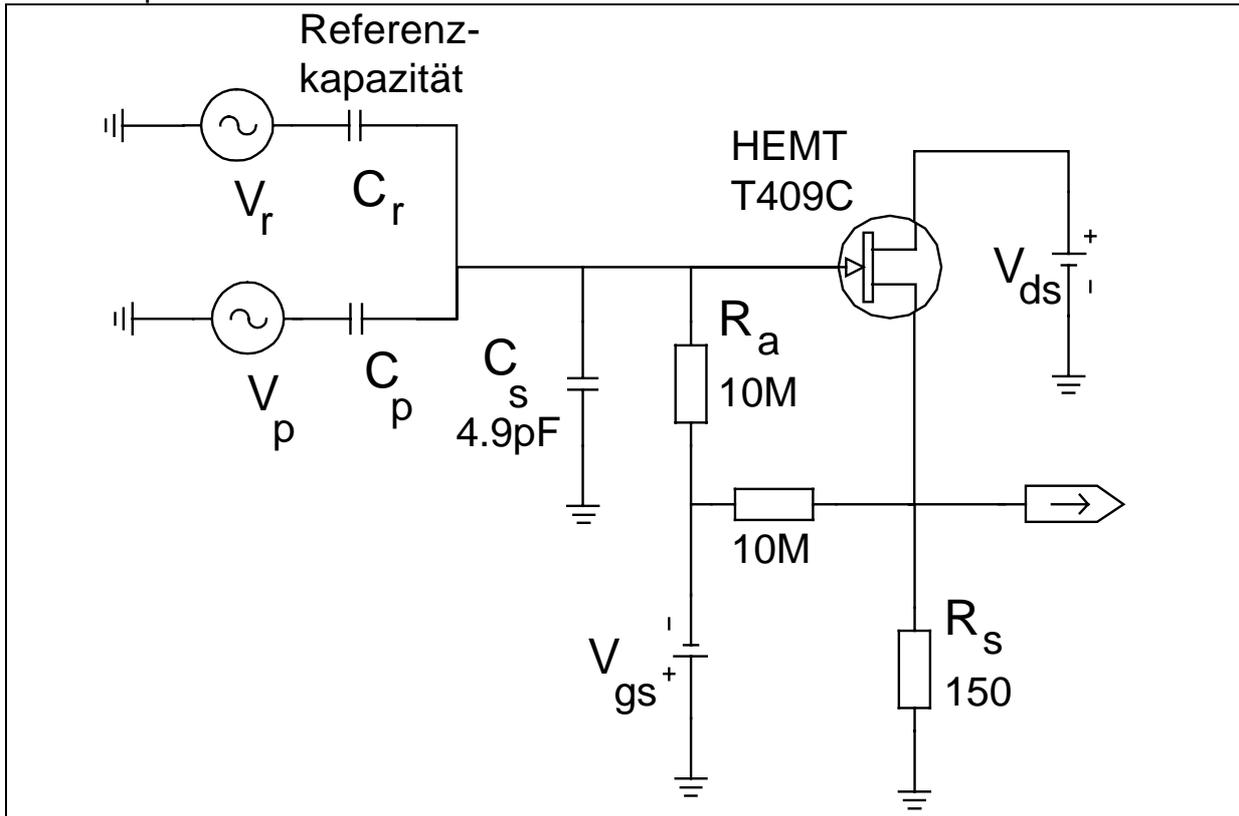


Bild2: Resonanzkreis-Kapazitätssensor (RCA/JVC/DI)

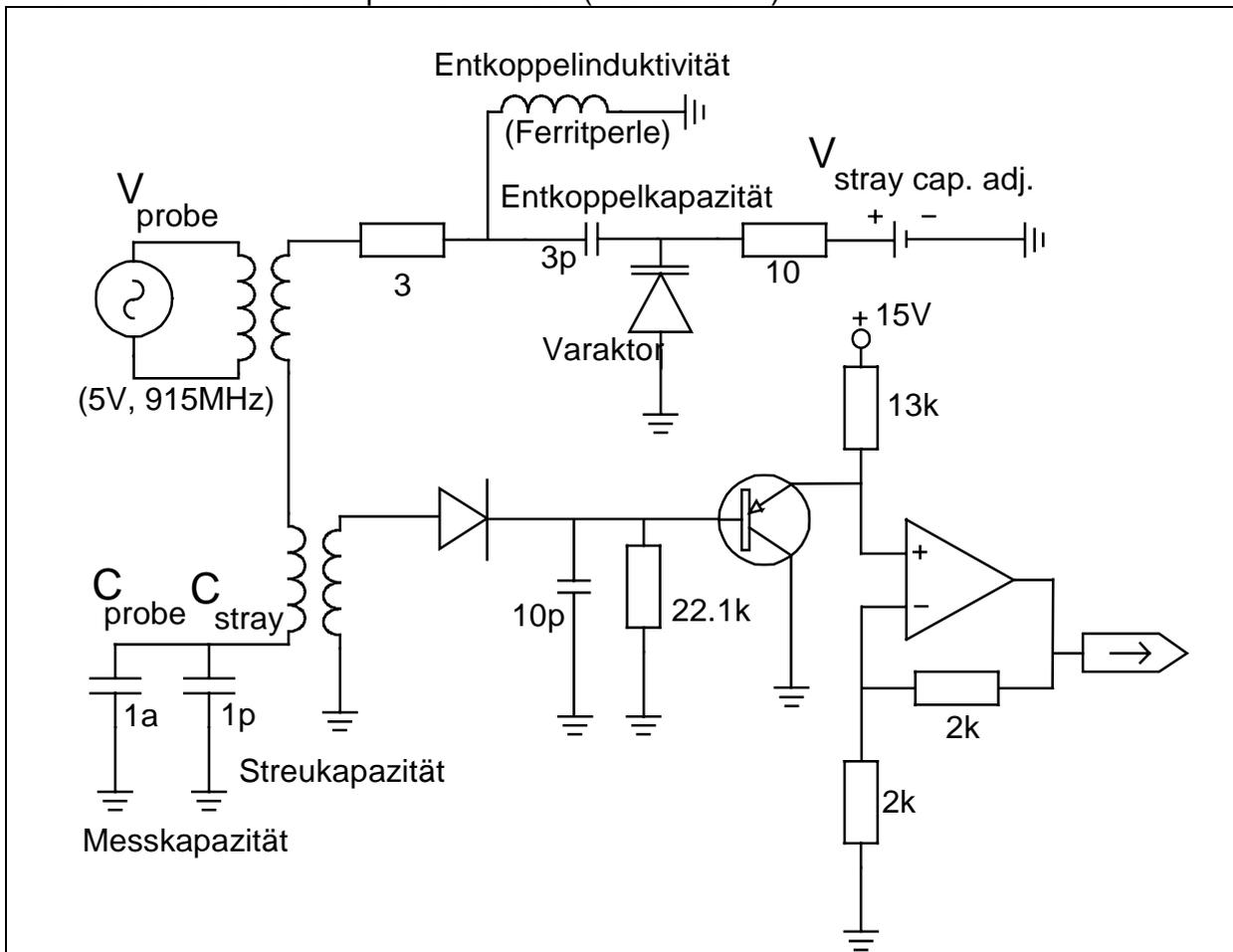
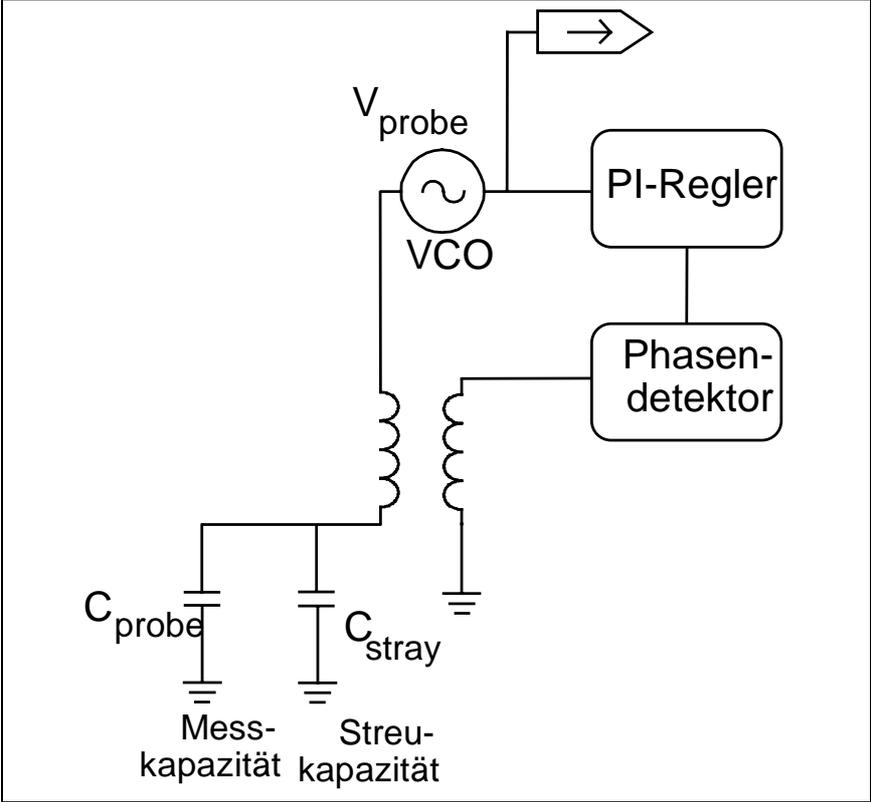


Bild3: Resonanzkreis mit PLL



## Abkürzungsverzeichnis

AFM	Atomic Force Microscope
c-AFM	Conducting-AFM
C-V-	Kapazitäts-Spannungs-(Kurve)
EFM	Electrostatic Force Microscope
FN	Fowler-Nordheim
FIB	Focused-Ion Beam
IC	Integrated Circuit
KFM	Kelvin Force Microscope
MFM	Magnetic Force Microscope
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor
MOSFET	MOS-Field-Effect-Transistor
NTRS	National Technology Roadmap for Semiconductors
ODiM	Oberflächenladungs-Diffusionsmodell
RWM	Random Walk Model
SAM	Self-Assembling/Assembled Monolayer
SCM	Scanning Capacitance Microscopy
SEM	Scanning Electron Microscopy
SFM	Scanning Force Microscope
Si	Silizium
SiO <sub>2</sub>	Siliziumdioxid
SIA	Semiconductor Industry Association
SIMS	Secondary Ion Mass Spectroscopy
SNOM	Scanning Near-field Optical Microscope
SPM	Scanning Probe Microscopy
SPWW	Sonde-Probe-Wechselwirkung
SSRP/M	Scanning Spreading Resistance Profiling/Microscope
SThM	Scanning Thermal Microscope
STM	Scanning Tunneling Microscopy
TCAD	Technology Computer Aided Design
TEM	Transmission Electron Microscopy
TT	Tieftemperatur
UHDS	Ultra-High-Density-Storage

## Veröffentlichungen und Präsentationen

### Publikationen

1. A. Born, C. Hahn, M. Löhndorf, A. Wadas, Ch. Witt, und R. Wiesendanger: "Application of scanning probe methods for electronic and magnetic device fabrication, characterization, and testing.", J. Vac. Sci. Technol. **B 14**, 3625 (1996).
2. A. Born und R. Wiesendanger: „Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: From Basic Research to Industrial Application.“, Informacije MIDEM **27**, 246 (1997).
3. A. Born und R. Wiesendanger: „Scanning capacitance microscope as a tool for the characterization of integrated circuits.“, Appl. Phys. A **66**, S421 (1998).
4. A. Born, A. Olbrich, M. Maywald und R. Wiesendanger: „Analysis of electrical breakdown failures by means of SFM-based methods.“, Appl. Phys. A **66**, S1063 (1998).
5. A. Born und R. Wiesendanger: „Present and future developments of SPM systems as mass storage devices.“, Appl. Phys. A **68**, 131 (1999).
6. A. Born, M. Kleiber, G. Meier, D. Heitmann und R. Wiesendanger: „Nanostrukturierung und Charakterisierung von magnetischen Materialien.“, in Werkstoffe für die Informationstechnik, K. Kempter und J. Haußelt (Hrsg.), 155, Wiley-VCH, Weinheim (1999).
7. A. Born und R. Wiesendanger: „Rastersondenmethoden und Datenspeichertechnik.“, in Bericht zum 152. PTB-Seminar, M. Albrecht (Hrsg.), Braunschweig (2000).
8. A. Born und R. Wiesendanger: „Guidelines for Two-Dimensional Dopant Profiling using SCM.“, In Proceedings zur ISTFA 2000.

### Buchbeiträge

1. A. Born: „Industrial Applications of Scanning Probe Microscopy.“, in Encyclopedia of Analytical Chemistry: Instrumentation and Application, R. A. Meyers (Hrsg.), Wiley, Chichester (2000).

## **Eingeladene Vorträge**

1. A. Born und R. Wiesendanger: „Rasterkapazitätsmikroskopie an Halbleitern und Halbleiterbauelementen.“, Seminar Molekulare Mustererkennung mit supramolekularen Strukturen, Tübingen, 7.7.1997.
2. A. Born und R. Wiesendanger: „Present and future developments of SPM-systems as mass storage devices.“, First German-Chinese Workshop on: Fundamentals of Nanometer-scale Structuring: Applications of Scanning Probe Microscopy and Selforganisation Processes, Karlsruhe, 28.-31.7.1997.
3. A. Born und R. Wiesendanger: „Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: From Basic Research to Industrial Application.“, MIDEM Conference '97, Godz Martuljek, Slovenia, 24.-26.9.1997.
4. A. Born und R. Wiesendanger: „Rastersondenmikroskopie: spezielle Anwendungen in der Mikroelektronik.“, InCom 98, Düsseldorf, 23.-27.3.1998.
5. A. Born und R. Wiesendanger: „Applications of Scanning Capacitance Microscopy.“, Eröffnung des D.I. Technical Centre and Sales Office, Cambridge, UK, 17.7.1998.
6. A. Born und R. Wiesendanger: „Einsatz der Rastersondenmikroskopie in der Halbleiteranalytik.“, Leoben, Österreich, 14.1.1999.
7. A. Born und R. Wiesendanger: „Rastersondenmethoden und Datenspeichertechnik.“, 152. PTB-Seminar: Technologien für Datenspeicher der Zukunft, Braunschweig, 23.2.2000.

## **Sonstige Vorträge**

1. A. Born und R. Wiesendanger: „Rastersondenmethoden zur Kapazitäts- und Magnetfeldmessung.“, Workshop zum Einsatz von Rastersondenverfahren zur Mikrocharakterisierung von Halbleiterbauelementen, Siemens AG, München, 15.11.1996.
2. A. Born und R. Wiesendanger: „Aufbau eines Prototyps zum Erzeugen und Auslesen von Nanometer-Strukturen im MHz-Bereich.“, BMBF-Projekttreffen, Münster, 29.11.1996.
3. A. Born und R. Wiesendanger: „Anwendungen des Rasterkapazitätsmikroskops für die Analyse von Integrierten Schaltkreisen.“, D.I. User-Workshop, Münster, 18.-20.2.1997.

4. A. Born und R. Wiesendanger: „Analyse von Nanostrukturen integrierter Schaltungen mittels Rasterkapazitätsmikroskopie.“, DPG-Frühjahrstagung 1997, Münster.
5. A. Born und R. Wiesendanger: „Systemlösung für SXM-Speicherkonzepte.“, BMBF-Projekttreffen, Saarbrücken, 11.7.1997.
6. A. Born und R. Wiesendanger: „Nanostructure manipulation by magnetic force microscopy and scanning capacitance microscopy.“, Workshop '97, Nanostructures at Surfaces and Interfaces, Konstanz, 15.-18.7.1997.
7. A. Born und R. Wiesendanger: „Scanning capacitance microscope as a tool for the characterization of integrated circuits.“, STM'97, Hamburg, 20.-25.7.1997.
8. A. Born und R. Wiesendanger: „Qualitätskontrolle von Halbleiterbauelementen mittels Rastersondenmethoden.“, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2.9.1997.
9. A. Born und R. Wiesendanger: „Grundlagen der Rasterkapazitätsmikroskopie.“, D.I. User-Workshop, München, 4.-6.3.1998.
10. A. Born und R. Wiesendanger: „2D-Dotierungsbestimmung von Halbleiterbauelementen mit Rastersondenmethoden.“, Sonderseminar, Siemens AG, München, 17.3.1998.
11. A. Born und R. Wiesendanger: „Kapazitäts- und Oberflächenpotential-Messungen an Halbleiterstrukturen mit Nanometer-Auflösung.“, DPG-Frühjahrstagung 1998, Regensburg.
12. J. Isenbart, A. Born, M. Maywald und R. Wiesendanger: „Simulationen zur Rasterkapazitätsmikroskopie.“, Siemens AG, München, 25.09.1998.
13. A. Born, M. Kleiber, G. Meier, D. Heitmann und R. Wiesendanger: „Nanostrukturierung und Charakterisierung von magnetischen Materialien.“, Werkstoffwoche 1998, München.
14. V. Hagen, J. Isenbart, A. Born und R. Wiesendanger: „Simulationen von SCM-Messungen zur Bestimmung von Dotierungsprofilen.“, D.I. User-Workshop, Dresden, 7.-9.4.1999.
15. O. Krause, J. Isenbart, A. Born und R. Wiesendanger: „Simulationen der Rasterkapazitätsmikroskopie zur Bestimmung von p-n-Übergängen.“, Infineon Technologies AG, München, 21.10.1999.
16. A. Born und R. Wiesendanger: „Strom- und Dotierungsmessung von integrierten Schaltkreisen mit Nanometer-Auflösung.“, Infineon Technologies AG, München, 3.12.1999.

17. C. Bartsch, A. Born und R. Wiesendanger: „Rastersonden-Mikroskopie und – Spektroskopie zur Erforschung von Einzelelektronen- und Quantengrößen-Effekten.“, Projektreffen, Kochel am See, 12.-14.3.2000.
18. J. Isenbart, A. Born und R. Wiesendanger: „Aufbau eines Prototyps für die Massenspeicherung basierend auf Rastersondenverfahren.“, DPG-Frühjahrstagung 2000, Regensburg.
19. O. Krause, A. Born und R. Wiesendanger: „Simulationen zur Rasterkapazitätsmikroskopie“, DPG-Frühjahrstagung 2000, Regensburg.
20. A. Born und R. Wiesendanger: „Quantitative Rasterkapazitätsmikroskopie für die Fehleranalyse von Halbleiterbauelementen.“, DPG-Frühjahrstagung 2000, Regensburg.
21. V. Hagen, J. Isenbart, A. Born und R. Wiesendanger: „Dotierungsprofilanalyse von Halbleitermikrostrukturen mittels Scanning Spreading Resistance Microscopy.“, DPG-Frühjahrstagung 2000, Regensburg.
22. C. Bartsch, A. Born und R. Wiesendanger: „Untersuchung von ligandenstabilisierten Metallclustern mittels SPM.“, DPG-Frühjahrstagung 2000, Regensburg.
23. A. Born und R. Wiesendanger: „The physical principles of scanning capacitance microscopy.“, SPS 2000, Hamburg, 26.-28.7.2000.

### **Posterbeiträge**

1. A. Born und R. Wiesendanger: „Strukturierung und Analyse von Nanostrukturen mittels Rasterkapazitätsmikroskopie.“, DPG-Frühjahrstagung 1996, Regensburg.
2. A. Born und R. Wiesendanger: „Aufbau eines Hochgeschwindigkeits-Rasterkapazitätsmikroskops.“, DPG-Frühjahrstagung 1997, Münster.
3. A. Born und R. Wiesendanger: „Scanning capacitance microscope as a new storage device?!“, STM'97, Hamburg, 20.-25.7.1997.
4. A. Born, A. Olbrich, M. Maywald und R. Wiesendanger: „Analysis of electrical breakdown failures by means of SFM based methods.“, STM'97, Hamburg, 20.-25.7.1997.
5. A. Born und R. Wiesendanger: „Scanning Capacitance Microscopy and Spectroscopy on Semiconductor Devices.“, STM'99, Seoul, Korea, 19.-23.7.1999.
6. A. Wehner, V. Hagen, A. Born und R. Wiesendanger: „IC-Charakterisierung mittels Rastersondenmethoden.“, D.I.-Veeco Usermeeting, Mainz, 14.-16.3.2000.

## **Messe-Beiträge**

1. A. Born und R. Wiesendanger: „Rastersondenmikroskopie für die Datenspeichertechnologie.“, Hannover-Messe, 22.-27.4.1996.
2. A. Born und R. Wiesendanger: „Hochgeschwindigkeits-Rastersondenmikroskop für Massenspeicheranwendungen.“, Forschungsforum'97, 16.-20.9.1997.
3. A. Born und R. Wiesendanger: „Massenspeicheranwendungen.“, Hannover-Messe, 20.-25.4.1998.

# Danksagung

Dank gebührt:

- meinem Erstgutachter Prof. Dr. R. Wiesendanger, dass er mir die größtmögliche Freiheit bei der Durchführung dieser Arbeit gegeben hat, und für das unerschütterliche Vertrauen in meine Leistungsfähigkeit („Ich weiß, dass Sie viel zu tun haben, aber ich hätte da noch...“).
- meinen Zweitgutachtern Prof. Dr. W. Hansen (Dissertation) und Prof. Dr. D. Heitmann (Disputation), dass sie sich die Zeit für die Begutachtung genommen haben.
- meinen engeren Mitarbeitern: Carsten Bartsch, Volker Hagen, Johannes Isenbart, Oliver Krause und Anja Wehner, dass sie mir zu großen Erkenntnissen in der schwierigen Kunst der Menschenführung verhalfen („Johannes, hättest du morgen vielleicht Lust mal etwas früher zu kommen?“).
- meinen Partnern in der Industrie: speziell den Mitarbeitern von Infineon Technologies: Dr. B. Ebersberger, Dr. M. Maywald und Dr. A. Olbrich, dass sie mir – neben ihrem Tagesgeschäft – die größtmögliche Unterstützung gaben.
- „meinen Ingenieuren“: S. Carsten und C. Wobbe, dass sie – wenngleich mit dem Aufbau ihrer Firma beschäftigt – doch noch Support gewährleisteten.
- den Mitgliedern der Gruppe R, die, obwohl meistens mit grundlegenden Dingen beschäftigt („Physik findet im Vakuum statt!“), doch auch gelegentlich Interesse für meine rein angewandte Physik bekundeten.
- den Mitarbeitern aus der Feinmechanik- und der Elektronik-Werkstatt, die meine Aufträge mit all ihrem fachlichen Können ausführten.
  
- meinen Eltern, für die Freiheit die sie mir schenkten.
- meinem Sohn, für die Nachsicht, die er zeigte wenn sein Papa mal wieder keine Zeit für ihn hatte („Papa, wann kommst du???“).
- meiner Frau, für all ihr Verständnis und ihre große Unterstützung, besonders wenn mal wieder kein Ende in Sicht war („Nur noch dieses eine Wochenende!!!“).