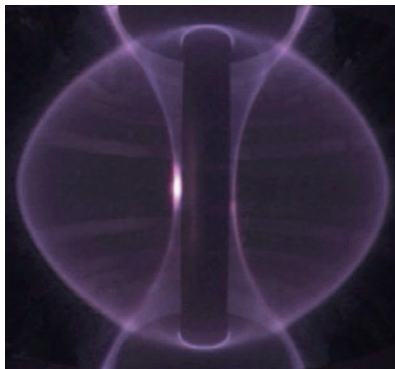


Allerdings ist ein sphärischer Tokamak technisch aufwändiger, denn in der schmalen Innensäule des Torus müssen sowohl die Innenbeine der Toroidalfeldspulen wie auch der Transformator untergebracht werden. Wegen dieser Schwierigkeiten gelang es erst Mitte der 90er-Jahre, dieses Konzept technisch zu realisieren, vor allem mit START (Small Tight Aspect Ratio Tokamak), einer kleinen Anlage in Culham/Großbritannien. Inzwischen werden weltweit mehrere sphärische Tokamaks betrieben oder geplant. Die größten sind der Mega-Amp Spherical Tokamak (MAST) in Culham sowie das National Spheri-

Ansicht eines H-Mode-Plasmas in MAST. Deutlich erkennbar ist die sphärische Gestalt des Plasmas und die sehr schmale zentrale Säule, in der die Transformatorspule und die Innenbeine der Toroidalfeldspulen untergebracht sind.



cal Torus-Experiment (NSTX) in Princeton, die mit  $R = 0,85$  m,  $a \approx 0,67$  m fast identische Dimensionen haben und beide mit Plasmaströmen von mehr als einem Megaampere betrieben werden.

Im vergangenen Jahr gelang es in beiden Experimenten, Plasmen im sogenannten H-Regime (High Confinement Regime) zu betreiben, einem Zustand, in dem der Energieeinschluss, d. h. die Wärmeisolation des Plasmas, etwa einen Faktor 2 besser ist als im üblichen L-Regime (Low Confinement). Nur mit dem 1982 am Garching Tokamak ASDEX entdeckten und seit 1992 auch bei Stellaratoren nachgewiesenen H-Regime erreicht man jedoch die für ein Fusionskraftwerk notwendigen Energieeinschlusszeiten. Indem die großen sphärischen Tokamaks nun nachgewiesen haben, dass sie diese Betriebsweise ebenfalls erreichen, gehen sie den ersten Entwicklungsschritt hin zu einem Fusionskraftwerk. Doch der Weg ist lang und viele Probleme der sphärischen Tokamaks sind noch zu lösen. Insbesondere ist offen, ob die kompakten Plasmen auch bei hohen Temperaturen stabil bleiben und die hohen Leistungsdichten, die durch die kompakte Anordnung bedingt sind,

technisch handhabbar sind.

Sphärische Tokamaks sind also kein neuer „Königsweg“ zum Fusionskraftwerk; sie bieten jedoch viele interessante Einblicke in die Physik von Fusionsplasmen. Insbesondere kann man mit ihrer Hilfe untersuchen, wie das Aspektverhältnis den Energieeinschluss beeinflusst. So wird bereits in den aktuellen Ergebnissen von MAST und NSTX deutlich, dass in sphärischen Tokamaks zum Erreichen des H-Regimes eine viel höhere Heizleistung notwendig ist, als nach den an konventionellen Tokamaks gewonnenen Skalierungsgesetzen zu erwarten war.

Die neuen Ergebnisse stellen deshalb keinesfalls die ITER-Planungen in Frage: In den kommenden Jahren wird nur eine Anlage nach dem konventionellen Tokamak-Prinzip in der Lage sein, energieliefernde Plasmen zu erzeugen und damit die Machbarkeit eines Fusionskraftwerks zu demonstrieren. Unstrittig ist jedoch, dass alternative Konzepte untersucht und weiter entwickelt werden müssen. Nicht nur tragen solche Untersuchungen dazu bei, die Physik heißer Fusionsplasmen besser zu verstehen. Sie können auch helfen, das Konzept eines Fusionskraftwerks zu verbessern. Hierzu werden die sphärischen Tokamaks sicherlich beitragen; die am weitesten fortgeschrittene Alternative jedoch ist der Stellarator. Der gegenwärtig in Greifswald entstehende WENDELSTEIN 7-X soll dabei als ein entscheidender Schritt die Kraftwerkstauglichkeit des Stellarators zeigen.

HANS-STEPHAN BOSCH

- [1] R. J. Akers et al., Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 035002-1
- [2] R. Maingi et al., Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 035003-1
- [3] H.-S. Bosch und A. Bradshaw,

#### Fusion im Becherglas

Auch die Kernfusion auf dem Labortisch gelangte unlängst wieder in die Schlagzeilen. Forscher vom Oak Ridge National Laboratory behaupteten in *Science* (8. März 2002), sie hätten Deuterium-Atome in einem Becherglas Aceton zur Fusion gebracht, und zwar mithilfe von Ultraschall (Sonolumineszenz) und Neutronenbeschuss. Zahlreiche Kritiker zweifeln daran. Die Hintergründe lesen Sie im Mai-Heft des Physik Journals (Red.)

## Spinmanipulation im Halbleiter

**Durch eine geschickte Kombination mehrerer Magnettransporteffekte gelang es, Kernspins in einem Halbleitermaterial rein elektrisch zu manipulieren und zu detektieren.**

Aktuell werden neue Konzepte zur Informationsverarbeitung unter den Schlagworten *Quantum computing* und *Spintronik* intensiv untersucht und erforscht. Der Quantencomputer soll quantenmechanische Superpositionen von Zuständen für Rechenoperationen ausnutzen, um gegenüber herkömmlichen Computern zum Beispiel wesentlich schneller in Datenbanken zu suchen oder Zahlen zu faktorisieren. Erste Erfolge gibt es bereits bei NMR-Experimenten in Flüssigkeiten (NMR steht für *nuclear magnetic resonance*), aber auch bei quantenoptischen und supraleitenden Systemen. Die Vorteile werden vermutlich aber erst bei Quantencomputern zum Tragen kommen, die aus festen und hochskalierbaren Bausteinen, ähnlich den heute in der Halbleitertechnologie benutzten Bauelementen, aufgebaut sind. Ein Konzept in diese Richtung besteht darin, Kernspins in Halbleitern als *quantum bits* oder *Qubits* zu nutzen. Die einzelnen Qubits würden dabei über die Hyperfeinwechselwirkung an die Leitungselektronen und somit auch untereinander koppelbar sein. Vorgesprochen wurde, Kernspins lokalisierter Störstellen in Silizium [1] oder auch in der Nähe eines Quanten-Hall-Systems zu nutzen [2]. Als ein Schritt in diese Richtung gelang es kürzlich Jurgen Smet und seinen Kollegen vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart, die Kernspinpolarisation in einer Halbleiterstruktur rein elektrisch zu manipulieren und damit Information in den Kernspins zu speichern und wieder auszulesen [3].

Dieses Experiment ist gleichzeitig auch ein Beitrag zum aktuellen Forschungsbereich *Spintronik*. Darunter versteht man Speicher- und Schaltungskonzepte, die auf der Manipulation von Spineigenschaften beruhen. Die Spintronik unterscheidet sich damit von herkömmlicher Elektronik, die mit der Manipulation von Ladungen arbeitet, wie z.B. beim bekannten Si-MOS-FET. Spinmanipulation in magneti-

Dr. Hans-Stephan Bosch, MPI für Plasmaphysik, Boltzmannstr. 2, 85748 Garching

Prof. Dr. Rolf Haug, Abteilung Nanostrukturen, Institut für Festkörperphysik, Universität Hannover, Appelstr. 2, 30167 Hannover

schen Metallen ist seit langem bekannt und wird für eine Vielzahl von Speicheranwendungen benutzt. Halbleiter spielen dabei jedoch bislang keine Rolle, werden aber im Hinblick auf Spintronik-Anwendungen intensiv untersucht, da sich die elektronischen Eigenschaften gezielt beeinflussen lassen. Elektronen- und Lochspins in Halbleitern zu manipulieren und zu detektieren war bislang nur optisch möglich, nicht aber rein elektrisch.

Dies ist nun Jurgen Smet und seinen Kollegen durch eine geschickte Kombination von Magnetotransporteffekten beim Quanten-Hall-Effekt gelungen. Benutzt wurde eine spezielle GaAs/AlGaAs-Heterostruktur, die am Walter-Schottky-Institut in München hergestellt worden war. Wie schon seit vielen Jahren bekannt [4], kann das zweidimensionale Elektronengas im Regime des Quanten-Hall-Effekts einen Phasenübergang zu einem ferromagnetischen Zustand zeigen, der eine ganze Reihe von überraschenden, teilweise noch nicht verstandenen Effekten birgt.

In der speziellen Halbleiterprobe von Jurgen Smet war es nun möglich, über den Feldeffekt diesen Phasenübergang für den gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effekt durch Ändern der Gatespannung zu durchfahren. Direkt am Phasenübergang ist eine deutliche Widerstandserhöhung aufgrund des Zusammenbruchs des gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effektes zu beobachten. Diese Widerstandserhöhung ist noch nicht verstanden, dürfte aber auf Domänenbildung zurückzuführen sein. Sie ist aber ein empfindlicher Detektor für die Spinpolarisation des Systems.

Die Spinpolarisation der Elektronen hängt nicht nur vom angelegten Magnetfeld ab, sondern über die Hyperfeinwechselwirkung auch von der Kernspinpolarisation und dem durch sie verursachten effektiven Feld. Die Detektion des ferromagnetischen Phasenübergangs erlaubt also eine Aussage über die Kernspinpolarisation des Systems. Aus Elektronenspinresonanzexperimenten ist bekannt, dass sich die Kernspinpolarisation über die Hyperfeinwechselwirkung durch ein gleichzeitiges Umklappen der Elektronenspins ändern lässt. Die Spinpolarisation des elektronischen Systems hängt nun wiederum von der Ladungsträgerkonzentration und dem angelegten Magnetfeld ab, wo-

bei allerdings normalerweise die Wechselwirkung zu schwach ist, um ein effektives, gleichzeitiges Umklappen zu bewirken. Hier kommen nun ein weiteres Mal die speziellen Eigenschaften eines zweidimensionalen Elektronensystems im Bereich des Quanten-Hall-Effekts ins Spiel: Ein zweidimensionales Elektronengas kann nämlich spezielle Spintexturen, die Skyrmionen, zum Grundzustand haben. Diese besitzen kollektive, niederenergetische Anregungen, die sehr effektiv an die Kernspins ankoppeln können. Jurgen Smet hat nun unter Ausnutzung dieses Effektes gezeigt, dass er durch kurzzeitige Variation der Ladungsträgerkonzentration bei festem Magnetfeld die Kernspinpolarisation ändern und damit Information „speichern“ kann. Zur Detektion der erreichten Kernspinpolarisation, d.h. zum „Auslesen“ der Information, benutzt er dann jeweils den ferromagnetischen Quantenphasenübergang.

Mit Sicherheit steht dieses Experiment erst am Anfang einer ganzen Reihe von Experimenten zur elektrischen Kernspinmanipulation. So ist z.B. der Einfluss eines elektrischen Stromes auf die Kernspinpolarisation nicht geklärt. In früheren Arbeiten zeigte sich, dass die dynamische Kernspinpolarisation durch Erhöhen des fließenden Stromes deutlich vergrößert werden kann. In der Arbeit von Jurgen Smet scheint der Stromfluss dagegen keinen wesentlichen Einfluss zu haben.

Diese geschickte Kombination verschiedener, im Wesentlichen bekannter Effekte eines Quanten-Hall-Systems zeigt erneut, welche Vielfalt von Phänomenen ein zweidimensionales System wechselwirkender Teilchen im hohen Magnetfeld hervorbringen kann und welche überraschenden Anwendungen sich dabei ergeben können. Dies beweist, wie sinnvoll die Einrichtung des DFG-Schwerpunktprogramms Quanten-Hall-Systeme war.

ROLF HAUG

- [1] *B. E. Kane*, Nature **393**, 133 (1998)
- [2] *V. Priaman et al.*, Phys. Lett. A **239**, 141 (1998)
- [3] *J. H. Smet et al.*, Nature **415**, 281 (2002)
- [4] *S. Koch et al.*, Phys. Rev B **47**, 4048 (1993)