

tope und unterschiedlicher experimenteller Techniken wird helfen, systematische Unsicherheiten zu begrenzen und die behauptete Evidenz zu bestätigen oder zu widerlegen. Es wird aber noch ein paar Jahre dauern, um genügend Daten entsprechender Qualität zu sammeln, weshalb uns die Diskussion um die nun gefundene Evidenz noch eine Weile erhalten bleiben wird.

JOSEF JOCHUM,
LOTHAR OBERAUER

- [1] H. V. Klapdor-Kleingrothaus et al., Mod. Phys. Lett. **16** Nr. 37, 2409 (2001), und hep-ph/0201231
- [2] M. Goepfert-Mayer, Phys. Rev. **48**, 512 (1935).
- [3] M. K. Moe, S. R. Elliot und A. A. Hahn, Phys. Rev. Lett. **59**, 2020 (1987).
- [4] F. Feruglio et al., hep-ph/0201291
- [5] C. E. Aalseth et al., hep-ex/0202018

Erste Erfolge bei „sphärischen Tokamaks“

Ein heißes Plasma einzufangen, ist die hohe Kunst der Fusionsforscher. Kugelförmige Reaktoren konnten nun erstmals lange Einschlusszeiten erreichen. Für einen Reaktor genügt das allerdings noch nicht.

In der Fusionsforschung werden heiße Plasmen in toroidalen Anordnungen durch magnetische Felder eingeschlossen und – zum Zünden der Fusionsreaktionen – auf Temperaturen über 100 Millionen Kelvin erhitzt. In einem künftigen Fusionskraftwerk würden die Fusionsreaktionen mehr Leistung erzeugen, als zuvor für Aufbau und Einschluss des Plasmas aufgewandt werden musste. Gleich zwei Gruppen haben kürzlich über wichtige Entwicklungsschritte beim Plasmaeinschluss in so genannten „sphärischen Tokamaks“ berichtet [1, 2].

Derzeit werden hauptsächlich zwei Konzepte zum Plasmaeinschluss untersucht – der Tokamak und der Stellarator. Beim Stellarator wird das zum Plasmaeinschluss benötigte Magnetfeld ausschließlich durch äußere Magnetfeldspulen erzeugt, wodurch ein Stellarator prinzipiell für stationären Betrieb geeignet ist. Dagegen nutzen Tokamaks einen im Plasma fließenden Strom, um einen Teil des benötigten Magnetfeldes aufzubauen und zugleich das Plasma zu heizen. Der Plasmastrom wird durch Induktion erzeugt: Das Plasma ist also die Sekundärwindung eines Transformators, dessen Primärwindung – wie die Nabe eines Rades – als Magnetspule in der Achse des Plasmarings steht. Durch die Nutzung der Induktion ist ein Tokamak zunächst für stationären Betrieb nicht geeignet. Die intrinsische Heizung hat ihm aber zu einer sehr erfolgreichen Entwicklung verholfen, sodass der Tokamak das zurzeit am weitesten entwickelte Konzept darstellt. Auch ITER, der geplante internationale Experimentalreaktor, der erstmals Plasmen mit einer positiven Leistungsbilanz erzeugen soll [3], wird ein Tokamak sein.

Da solche Anlagen groß – und damit auch teuer – sein werden, untersucht man parallel dazu Alternativen, deren eine darauf beruht, den Plasmatorus kompakter zu gestalten. Sichtbar wird dies im so genannten Aspektverhältnis – dem

Verhältnis aus dem Radius R des Torus zum Radius a des Plasmaschlauches. Dieses Verhältnis liegt heute bei allen Tokamaks im Bereich von 3 bis 3,5. Ihre Form ähnelt damit einem LKW-Reifen oder einem Doughnut. Beim sphärischen Tokamak, wie er 1986 von Y. Peng und D. Strickler vorgeschlagen wurde, liegt dieses Verhältnis bei etwa 1,3, d. h. er ist kompakter. Die Form erinnert an einen Apfel mit ausgestochenem Kerngehäuse. Das Volumen, in dem das Magnetfeld erzeugt werden muss, ist viel kleiner als bei konventionellen Tokamaks, was die Kosten deutlich senkt. Auch ist diese Form magnetohydrodynamisch stabiler, da die Magnetfeldlinien, die sich um den Plasmatorus herumwinden, nun viel länger im Innenbereich des Torus – einem Bereich „günstiger“ Krümmung – herumlaufen.

Priv.-Doz. Josef Jochum, Physik Department E15, TU München, 85747 Garching;
Dr. Lothar Oberauer, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italien

New Scientist findet Antimaterie

Zu den Bestsellern der Physik gehört die Antimaterie. Und so war es keine Überraschung, dass die Meldung vom New Scientist über Spiegel Online bis zum Bayerischen Rundfunk schnell die Runde machte: Forscher fangen erstmals Antiatome. Allein die Doktoranden am Europäischen Zentrum für Elementarteilchenphysik in Genf (Cern) wussten noch nichts von ihrem Glück.

Was war geschehen? Gerald Gabrielse (Foto), Sprecher der Atrap-Kollaboration am Cern, hatte auf einer Tagung die jüngsten Ergebnisse seiner Gruppe vorgestellt.

Beim Atrap-Experiment (Antihydrogen Trap Collaboration) werden Positronen und Antiprotonen in zwei übereinander liegenden Teilchenfallen zunächst getrennt voneinander gespeichert. Anschließend bringen die Cern-Forscher beide Wolken zum Überlapp. Dabei sollen Antiwasserstoffatome durch Dreikörperstöße entstehen. Um dies zu testen, wird kurzzeitig ein elektrisches Feld angelegt, das alle geladenen Teilchen herauskatapultiert. Was übrig bleibt, könnte neutraler An-

tiwasserstoff sein. Tatsächlich wiesen Gabrielse und Mitarbeiter einige Antiprotonen und Positronen nach, doch ebenso gut lassen sich die Resultate durch ein quasi-neutrales Antiproton-Positron-Plasma erklären, das vom elektrischen Feld ebenso wenig beeinflusst wird. „Möglicherweise haben wir Antiwasserstoff erzeugt,“ sagte Gabrielse auf der AAAS-Tagung in Boston und ver-

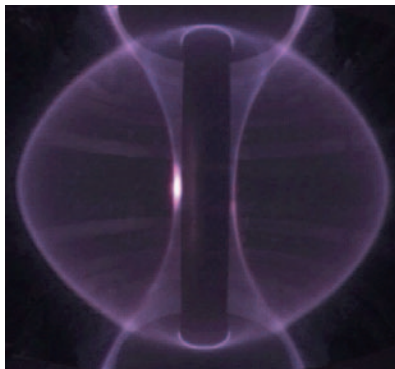
wies auf die alternativen Interpretationen. „Erstmals Antimaterie gespeichert“, schrieb der Reporter vom New Scientist in seiner Online-Meldung. Nachdem Ga-

brielse vergeblich und wiederholt um Korrektur gebeten hatte, warf er der Redaktion in einer Email bewusste Fehlinformation vor: „Warum machen Sie immer noch Aussagen, von denen Sie wissen, dass sie falsch sind?“ Mit Beginn der nächsten Strahlzeit im Mai wollen die Cern-Forscher herausfinden, ob sich tatsächlich Antiwasserstoff zwischen ihren Elektroden befindet. Hoffentlich gibt es dann keinen Prioritätenstreit mit der Presse. (MR/Foto: CERN)



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 Magnetotransporteffekte 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. Vorgeschlagen 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