

ASDEX Upgrade, im europäischen Gemeinschaftsexperiment und derzeit weltweit größten Tokamak JET in Culham, England, sowie im japanischen Tokamak JT-60U beobachtet [3]. Darüber hinaus lassen sich gewöhnliche ELMs („Typ I“) durch schnelle Plasmabewegungen oder auch durch Einschleusen von gefrorenen Deuterium-Pellets in das Plasma auslösen, sodass die ELM-Frequenz in gewissen Grenzen frei eingestellt werden kann [4]. Experimente am Lausanner Tokamak TCV und am ASDEX Upgrade haben gezeigt, dass mit steigender ELM-Frequenz der Energieverlust pro ELM abnimmt. Eine aktive ELM-Kontrolle erlaubt es daher

möglicherweise, die Wärmebelastung unter die Ablationsschwelle zu drücken und eine schnelle Erosion der Wand zu vermeiden, falls aus anderen Gründen die komplette Unterdrückung von ELMs nicht möglich sein sollte.

Bislang ist noch offen, ob sich diese Möglichkeiten einsetzen lassen, um die ELMs bei ITER zu beeinflussen. Derzeit wird der Einbau eines Satzes von Störfeldspulen innerhalb oder außerhalb des Plasmagefäßes geprüft. Aufgrund des Platzbedarfs wäre dies wahrscheinlich eine größere Herausforderung als z. B. ein Injektor für Deuterium- oder Tritium-Pellets, der ohnehin zur Plasmanachfüllung benötigt

wird. Ob allerdings und mit welchen Methoden ELMs in ITER unterdrückt werden können, können zur Zeit wohl nur weitere experimentelle Untersuchungen an den gegenwärtigen Maschinen sowie Fortschritte bei der numerischen Modellierung des Transports während ELMs zeigen.

Wolfgang Suttrop

Priv.-Doz. Dr.
Wolfgang Suttrop,
Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik,
85740 Garching

- [1] G. Federici et al., J. Nucl. Mat. **313**, 11 (2003)
- [2] T. Evans et al., Nature Physics **2**, 335 (2006)
- [3] J. Stober et al., Nucl. Fusion **45**, 1213 (2005)
- [4] P. T. Lang et al., Nucl. Fusion **45**, 502 (2005)

■ Reibung ohne Kontakt

Hoheempfindliche Messungen mit Hilfe eines Rastersondenmikroskops haben gezeigt, dass dielektrische Schwankungen in einem Substrat zu kontaktfreier Reibung zwischen Substrat und einem schwingenden Kantilever führen.

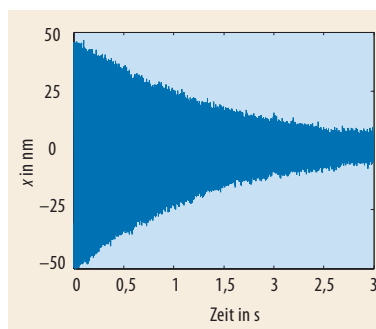
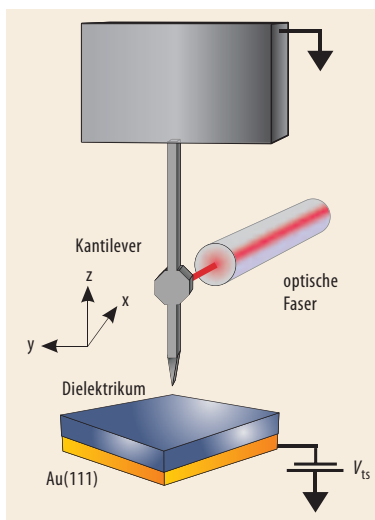
Die Reibung zwischen zwei Festkörpern geht üblicherweise mit mechanischem Kontakt einher. Reibungskräfte sind proportional zur Last, mit der die beiden Körper gegeneinander gedrückt werden. Man unterscheidet zwischen statischer Reibung (F_s) und kinetischer Reibung (F_k). Erstere ist eine Schwellenkraft, die überwunden werden muss, um ein System vom Stillstand zum Gleiten überzuführen. F_k hingegen ist die Kraft, die im gleitenden Zustand herrscht. Sie hängt unter üblichen Bedingungen nicht stark von der Gleitgeschwindigkeit v ab.

Festkörperreibung verhält sich damit qualitativ anders als die Reibung zwischen einer Flüssigkeit und einem Brownschen Teilchen bzw. zwischen zwei Festkörpern, die komplett durch eine flüssige Schicht getrennt sind. Diese beiden Fälle kann man gut beschreiben, wenn man annimmt, dass F_k linear von v abhängt. Eine solche lineare Abhängigkeit lässt sich im Rahmen der linearen Antworttheorie verstehen, die immer dann anwendbar ist, wenn ein System sich in der Nähe des thermodynamischen

Gleichgewichtes befindet. Die Bewegung des Brownschen Teilchens oder der durch eine flüssige Schicht getrennten Festkörper wird durch thermische Stöße mit den Flüssigkeitsatomen gedämpft. Die thermischen Schwankungen innerhalb der Flüssigkeit sind daher mit dem Dämpfungseffekt gekoppelt, den die Flüssigkeit ausübt. Formal wird die Beziehung zwischen einer thermischen Zufallskraft und der Reibungskraft auf ein Teilchen (oder allgemein auf einen Freiheitsgrad) im Fluktuations-Dissipations-Theorem (FDT) beschrieben [1], dessen bekannteste Version die Einstein-Relation ist. Sie besagt, dass die Diffusionskonstante D eines Brownschen Teilchens und sein Reibungskoeffizient γ über die Gleichung $D = k_B T / \gamma$ zusammenhängen. γ gibt dabei über die Gleichung $F = \gamma \langle v \rangle$ an, wie groß die Reibungskraft F ist, wenn dem Teilchen eine Driftgeschwindigkeit $\langle v \rangle$ von außen aufgezogen wird.

Was passiert aber mit der Dämpfung, wenn es keine Flüssigkeit zwischen den beiden Festkörpern gibt und die beiden Festkörper sich nicht berühren? Zunächst sei ein-

mal daran erinnert, dass es müßig ist – vermutlich sogar prinzipiell unmöglich –, *rigoros* zu definieren, was Kontakt auf molekularer Ebene bedeutet. Schließlich haben Wechselwirkungen große Reichweiten, und zudem lassen sich auf Grund der quantenmechanischen Natur insbesondere der Elektronen keine scharfen Grenzflächen ziehen. Dennoch kann man die Frage stellen, was zur Dämpfung führt, wenn sich zwei Festkörper, die sich nach unserem intuitiven Verständnis nicht berühren, gegeneinander bewegen. Hier kann man wieder das FDT bemühen, das nicht nur für die Brownsche Molekularbewegung bedeutsam ist, sondern in vielen Bereichen der (statistischen) Physik angewendet wird. So wird ein in der Zeit schwankendes elektromagnetisches Feld unweigerlich zur Dämpfung der Bewegung (freier) Ladungen führen. Dieses Prinzip haben sich Forscher an der Cornell University in Ithaca, New York, zu Nutze gemacht, um die Schwankungen des elektromagnetischen Feldes über einer dielektrischen Schicht zu bestimmen [2, 3]. Es wurde vermutet, dass solche di-



Mit dem Rastersondenmikroskop von S. Kuehn et al. [2] (Schema links) lässt sich die Abklingzeit der Kantilever-Schwingung bestimmen (oben) und damit auf die kontaktfreie Reibung infolge der dielektrischen Fluktuationen schließen.

elektrischen Fluktuationen die Auflösung der Kernspinresonanz-Kraftmikroskopie begrenzen [4]. Diese Methode basiert auf der Idee, die Antwortfunktion eines über einer Oberfläche schwingenden Magneten auszuwerten, um so Messungen an individuellen Spins von Oberflächenatomen vorzunehmen. Das könnte sich für eine dreidimensionale Abbildung von Makromolekülen (z. B. Proteinen) mit atomarer Auflösung eignen oder zum Auslesen der Qubits von zukünftigen spinbasierten Quantencomputern.

Sepe Kuehn et al. [2, 3] nutzten eine Apparatur (Abb.), die in ähnlicher Weise bereits von Dan Rugar und Mitarbeitern am IBM Almaden Forschungszentrum in San José, Kalifornien, verwendet wurde [4]. Ein Kantilever aus Silizium mit extrem kleiner intrinsischer Dämpfung γ_0 und einstellbarer Ladung wird über einem Substrat in Schwingung versetzt. Das Abklingen der Schwingung lässt sich mit einem optischen Glasfaser-Interferometer messen. Aus der Abklingzeit folgt die Gesamtdämpfung γ_t , sodass sich die durch das Substrat vermittelte Dämpfung zu $\gamma_s = \gamma_t - \gamma_0$ bestimmen lässt. Die Cornell-Gruppe untersuchte verschiedene Polymersubstrate, während die IBM-Gruppe vor allem mit Gold- und Siliziumdioxid-beschichteten Oberflächen experimentierte.

In der grundlegenden Arbeit von Stipe und Mitarbeitern waren die Autoren noch gezwungen, über verschiedene Dissipationsmechanismen zu spekulieren, insbeson-

dere über solche, die durch die Bewegung von Adsorbaten verursacht sind [4]. Der große Fortschritt der Kuehnschen Studie besteht darin, dass die durch das Substrat bedingte Dämpfung überzeugend mit dielektrischen Fluktuationen in Verbindung gebracht werden konnte [2, 3]. Alle drei untersuchten Polymerbeschichtungen, also Polymethyl-Methacrylat (PMMA), Polyvinyl-Acetat (PVAc) und Polystyrol (PS), haben vergleichbare statische Dielektrizitätskonstanten, nämlich $\epsilon_r(\omega=0) = 3,9$ (PMMA), 3,4 (PVAc) bzw. 2,5 (PS). Allerdings unterscheidet sich der Imaginärteil ihrer frequenzabhängigen Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_r''(\omega_0)$ an der Resonanzfrequenz ω_0 des Kantilevers stark. In einer theoretischen Abhandlung gelang es zu zeigen [3], dass $\epsilon_r''(\omega_0)$ und die gemessene Dämpfung γ_s – wie nicht anders

zu erwarten – stark korreliert sind, vorausgesetzt dass dielektrische Fluktuationen hauptverantwortlich für die Dämpfung der Kantilever-Schwingung sind. Die dynamischen dielektrischen Messungen an den Filmen sind konsistent mit der mechanischen Messung $\gamma_s^{\text{PMMA}} \approx 75 \gamma_s^{\text{PS}}$ und $\gamma_s^{\text{PVAc}} \approx 20 \gamma_s^{\text{PS}}$. Die mechanische Dämpfung des Kantilevers ist also deshalb über PMMA besonders groß, weil die dielektrische Dämpfung von PMMA an der Resonanzfrequenz des Kantilevers signifikant ist. Es sei daran erinnert, dass eine starke Dämpfung auf Fluktuationen des elektromagnetischen Feldes hinweist, welche die Auflösung von Kernspinresonanz-Kraftmikroskopen begrenzen. Für deren Design ergibt sich also aus den Kuehnschen Experimenten eine einfache Schlussfolgerung: Substrat und Kantilever müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass der Imaginärteil der Dielektrizitätskonstanten bei der Eigenfrequenz des Kantilevers minimal ist. Es wird vermutlich nicht möglich sein, individuelle Spins zu lesen, ohne diese Bedingung zu erfüllen.

Martin Müser

- [1] R. Kubo, Rep. Prog. Phys. **29**, 255 (1966)
- [2] S. Kuehn, R. F. Loring und J. A. Marohn, Phys. Rev. Lett. **96**, 156103 (2006)
- [3] S. Kuehn, J. A. Marohn und R. F. Loring, J. Phys. Chem. B (in Druck).
- [4] B. C. Stipe et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 096801 (2001)

KURZGEFASST

■ Größe wichtiger als Chemie

Die Bildung von Tropfen in Wolken hängt in stärkerem Maße von der Größe der Kondensationskerne ab als von deren chemischer Zusammensetzung. Das haben Atmosphärenforscher des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz und der dortigen Universität gezeigt. Hauptfaktor für die Fähigkeit von Aerosolen, als Kondensationskern zu fungieren, ist die Anzahl löslicher Moleküle in einem solchen Teilchen, die in der dritten Potenz vom Durchmesser abhängt. Die Behandlung der Wolkenbildung in Klima- und Wettermodellen sollte mit diesen Resultaten deutlich einfacher werden.

U. Dusek et al., Science **312**, 1375 (2006)

■ Der „Wind“ eines Schwarzen Lochs

Damit ein Schwarzes Loch aus seiner Akkretionsscheibe Materie schlucken kann, muss diese Drehimpuls abgeben können. Astrophysiker haben nun in Daten des US-Röntgensatelliten Chandra indirekte Hinweise auf einen solchen Mechanismus gefunden. Im Spektrum eines Systems aus Stern und Schwarzes Loch fanden sie zu kurzen Wellenlängen verschobene Absorptionslinien. Die Forscher folgern, dass das absorbierende Medium ein hochionisierter „Wind“ ist, der die Scheibe mit dem Drehimpuls verlässt; sie schlagen einen magnetischen Prozess vor, der in der Scheibe den Wind antreibt.

J. M. Miller et al., Nature **441**, 953 (2006)