

zu induzieren, in den die Atome zu Beginn der ganzen Prozedur über eine Gasentladung angeregt werden müssen. Das Alter des Probenwassers ergibt sich schließlich aus dem Vergleich der Verhältnisse ($^{81}\text{Kr}/\text{Kr}_{\text{tot}}$) in der Probe und in „frischem“ Wasser. Die Empfindlichkeit der Methode zeigt sich darin, dass Lu et al. ihre einige hundert identifizierten ^{81}Kr -Atome aus mehreren Tonnen Sahara-Grundwasser isoliert haben.

Doch damit nicht genug: Für Anwendungen in der Medizin haben Physiker am Argonne National Laboratory und an der Universität Mainz kürzlich gezeigt, dass es die ATTA-Methode auch ermöglicht, das radioaktive Isotop ^{41}Ca in einer Konzentration von weniger als 10^{-8} quantitativ nachzuweisen [2]. Im Gegensatz zu Kr lässt sich Ca im Grundzustand mit handelsüblichen Lasern bei einer Wellenlänge von 423 nm anregen. Da ^{41}Ca in der Natur nur mit einer Konzentration von ca. 10^{-14} vorkommt, eignet sich dieses Isotop hervorragend zur Markierung des Ca-Stoffwechsels bei der Osteoporose-Forschung. Ist z. B. auf medikamentöse Weise die ^{41}Ca -Konzentration im menschlichen Knochengewebe künstlich erhöht, so lässt sich durch den quantitativen Nachweis von ^{41}Ca im Urin direkt kontrollieren, ob eine zu prüfende Osteoporose-Behandlung in der Tat zu einem verminderten Ca-Abbau führt. Da ^{41}Ca eine Halbwertszeit von 103000 Jahren hat, ist seine Radioaktivität auch bei relativ hoher Konzentration unbedenklich. Zum Nachweis von ^{41}Ca kommt zwar auch die Beschleuniger-Massenpektroskopie infrage, doch ist ATTA aus rein wirtschaftlicher Sicht (table-top Apparatur!) deutlich überlegen.

Auch unter dem Datierungs-Aspekt ist ^{41}Ca äußerst interessant, um Knochenfunde aus dem Pleistozän, d. h. aus der Zeit der Menschwerdung, oder Millionen Jahre alte Kalksedimente am Ozeanboden zu datieren. Dazu muss die Empfindlichkeit der Methode allerdings noch um einige Größenordnungen verbessert werden. Während die bisherigen Messungen mit angereicherterem ^{41}Ca (Verhältnis $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ von 10^{-8}) durchgeführt wurden, erfordert die Datierung einen quantitativen Nachweis von einem Verhältnis von weniger als 10^{-14} ! Neben der Gruppe von Lu in Chicago ist auch unsere Arbeitsgruppe am KVI in

Groningen dabei, sich diesem Ziel deutlich zu nähern. Um das vom ^{40}Ca verursachte Untergrundsignal weiter zu reduzieren, lenken wir in unserer Apparatur die gewünschten Isotope nach dem Zeeman-Abbremsen um 30° ab (Abb. 1), sodass nur diese in die Atomfalle gelangen. Zudem wird der Atomstrahl vor der Abbremsung mit Hilfe von Laserstrahlung komprimiert. Wie Abb. 2 zeigt, ist auch bei uns der Nachweis einzelner Atome in der Falle gelungen [3]. Angesichts der viel versprechenden Anwendungsmöglichkeiten ist zu erwarten, dass in Zukunft weitere Gruppen auf diesem Gebiet tätig werden, um die Methode zu optimieren und auf neuen Gebieten einzusetzen.

REINHARD MORGENSTERN,
RONNIE HOEKSTRA UND
STEVEN HOEKSTRA

- [1] N. C. Sturchio et al., Geophysical Res. Lett., **31**, L05503 (2004)
- [2] I. D. Moore et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 153002 (2004)
- [3] S. Hoekstra et al., in FOM Jahrbuch 2003, H. Eggen (Hrsg.), Utrecht (2004), S. 87

Wie geschmiert: Reibung in der Nanowelt

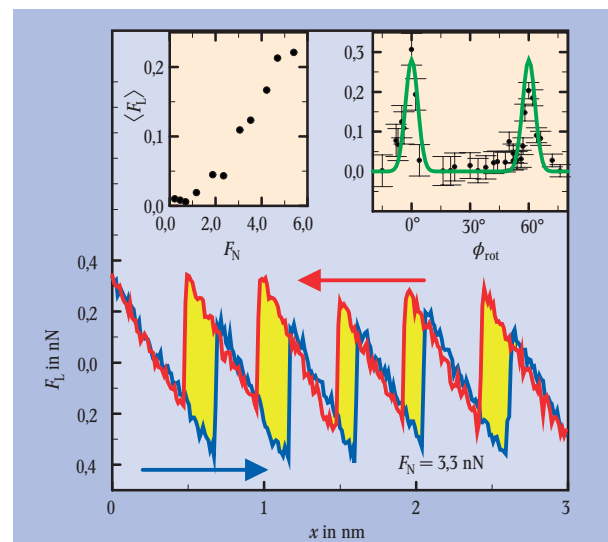
Im Allgemeinen erwartet man große Reibung in der Nanowelt, weil das Verhältnis zwischen Kontaktfläche und Volumen relativ groß ist. Zwei Forschergruppen in den Niederlanden und der Schweiz haben nun gezeigt, dass genau das Gegenteil möglich ist: Reibung zwischen ungeschmierten Festkörpern kann unmessbar klein werden.

Wenn zwei makroskopische Festkörper gegeneinander reiben, hängt die Reibungskraft, die zwischen ihnen wirkt, gemäß dem Coulombschen Reibungsgesetz erstaunlich wenig von der Relativgeschwindigkeit der beiden Festkörper ab. Prandtl lieferte dazu bereits im Jahr 1928 eine überzeugende Erklärung [1]: Sie basiert im Wesentlichen darauf, dass Energieverluste durch unkontrollierte Sprünge (bzw. Instabilitäten) einzelner oder mehrerer Atome nahezu immer unvermeidbar sind. Die Prandtlsche Analyse impliziert aber auch, dass die Gleitreibung extrem klein würde, wenn die Sprünge vermieden werden könnten. Eine mögliche Realisierung dieses Szenarios bestünde darin,

zwei schwach deformierbare Festkörper direkt – also ohne Schmiermittel – gegeneinander zu reiben. Es bliebe höchstens ein Stokesscher Reibungsmechanismus übrig, sodass die Reibung im Limes kleiner Geschwindigkeiten linear verschwände und damit um viele Größenordnungen kleiner wäre als üblich.

Die Forschungsgruppe um Ernst Meyer an der Universität Basel hat sich die Frage gestellt, ob es möglich ist, diese Hypothesen mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie im Ultrahochvakuum (UHV) nachzuweisen [2]. Sie ging dabei (implizit) von modernen Theorien über Reibung aus, die besagen, dass (elastische) Instabilitäten auf mikroskopischer Skala im UHV zwischen chemisch inaktiven Festkörpern bei kleinen Drücken nicht zu erwarten sind [3]. Das heißt, unkontrollierte Sprünge und einhergehende Ener-

Prof. Dr. Reinhard Morgenstern, Prof. Dr. Ir. Ronnie Hoekstra, M. Sc. Steven Hoekstra, Kernfysisch Versnellend Instituut, Rijksuniversiteit Groningen, Zernikelaan 25, 9747 AA Groningen, Niederlande



Beim „Rückgleiten“ der Spitze eines Rasterkraftmikroskops über ein Substrat tritt eine Hysterese zwischen Vorwärts- und Rückwärtsbewegung auf. Die gelbe eingeschlossene Fläche entspricht dem Energieverlust [2]. Reduziert man die Normalkraft F_N , so verschwindet die Gleitreibung $\langle F_L \rangle$ unter einem gewissen Schwellenwert (linkes Inset). Das rechte Inset veranschaulicht die Abnahme der Reibung mit zunehmender Verdrehung ϕ_{rot} zwischen Grafitflocke und Substrat [5].

gie-dissipation wären nur noch dann möglich, wenn die Spitze des Rasterkraftmikroskops (RKM) quasi als Gesamtheit instabil würde, sprich wenn die RKM-Spitze durch „Rückgleiten“ in periodischen Abständen in Energieminima einrasten würde. Auf das RKM-Experiment bezogen hieße die von Prandtl aufgestellte Bedingung für die Abwesenheit Coulombscher Reibung: Die maximale (laterale) Krümmung des Potentials zwischen Spitze und Substrat muss kleiner sein als die (effektive) Federkonstante der RKM-Spitze oder des Kantilevers, denn dann

gibt es immer genau eine wohldefinierte Gleichgewichtsposition der RKM-Spitze als Funktion der Kantilever-Position. Ruckbewegungen und einhergehende Energieverluste wären dann unterdrückt (siehe auch Abb. 4 in Ref. [1]).

Die Baseler Gruppe hat nun die angesprochene Potentialkrümmung geschickt verändert, indem sie die Normalkraft F_N variierte, mit der die Spitze auf das Substrat gedrückt wird. Je kleiner F_N , desto geringer ist die Korrugation (Rauigkeit), die die RKM-Spitze sieht, wenn sie über das Substrat hin und zurück bewegt wird. Die Korrugation kann man zum Beispiel durch die maximale Lateralkraft (oder Haftreibung) quantifizieren. Bei großen Werten von F_N ergibt sich eine „Ruckgleit-Dynamik“ und die dadurch induzierte Hysterese bzw. Energiedissipation (Abb.). An gewissen Punkten wird die RKM-Spitze instabil und springt in die nächste Gleichgewichtslage. Dort nimmt die Lateralkraft zwischen Substrat und Spitze einen neuen Wert an, der durchaus das entgegengesetzte Vorzeichen haben darf, aber im Betrag kleiner sein muss als in der alten Gleichgewichtslage. Wird F_N nun reduziert, nimmt die Potentialkrümmung (geringfügig) ab. Als Folge dessen werden auch die Sprünge kleiner, so dass die Lateralkraft F_L immer sinus-förmiger wird. Irgendwann setzen die Sprünge aus und

die RKM-Spitze tastet nur noch die Energielandschaft des Substrates ab. Der Durchschnittswert $\langle F_L \rangle$, den man mit der Gleitreibung gleichsetzen kann, verschwindet dann im Rahmen der experimentellen Auflösung (Inset links), obgleich die Haftreibung noch in der Größenordnung von 0,1 nN ist.

Moderne, atomistische Theorien der Reibungslehre [1, 3] gehen aber noch weiter. Wenn mechanische Kontakte hinreichend groß sind und auf atomarer Ebene keine Instabilitäten vorkommen, dann sollte sogar die Haftreibung in vielen Fällen nahezu verschwinden. Die Erklärung ist die Folgende: Wenn zwei Festkörper nicht zufällig dieselbe Gitterkonstante haben und zudem nicht perfekt orientiert sind, dann gibt es eine nahezu systematische Auslöschung der Lateralkräfte, die der eine Körper auf den anderen ausübt, denn – bildlich gesprochen – einige Atome werden nach links gedrückt, andere nach rechts und die Summe ergibt eine sehr kleine Zahl. Elastische Deformationen sollten dieses Bild üblicherweise nur für sehr raue Oberflächen ändern oder aber für Körper mit geringer räumlicher Dimension [4]. Das Phänomen der Abwesenheit von Haftreibung wird auch Superlubrizität oder Strukturschmierung genannt.

In der niederländischen Gruppe von Joost Frenken an der Universität Leiden hat Martin Dienwiebel

den Effekt solcher extrem kleinen Reibung im Rahmen seiner Dissertation untersucht [5]. Er hat sich dabei zu Nutzen gemacht, dass eine kleine Grafitflocke besser an einer (oxidierten) Wolframspitze haftet als auf einer Grafitoberfläche. Durch einige raffinierte experimentelle Tricks gelang es, die relative Orientierung zwischen der Grafitflocke und dem Substrat kontrolliert einzustellen und die Kraft zwischen ihnen in allen drei Raumrichtungen simultan zu messen. War die Flocke mit dem Substrat ausgerichtet, ergab sich hohe Reibung. Mit zunehmender Verdrehung fiel diese aber rapide auf Werte nahe null ab (s. Abb., rechtes Inset). Durch dieses Experiment wurde also gezeigt, dass Inkommensurabilität die von Hirano und Shinjo vorgeschlagene Strukturschmierung bewirken kann.

Die beiden hier besprochenen Arbeiten sind als bahnbrechend anzusehen, da sie als bisher überzeugendste experimentelle Evidenz für die Strukturschmierung zwischen Festkörpern auf der Nanoskala gelten können. Sie sind vorherigen Studien insbesondere dadurch überlegen, dass sie *kontrolliert* durch Änderung äußerer Parameter zwischen einer verschwindenden und einer nicht-verschwindenden Reibung hin und herschalten, sei es durch die Variation der Normalkraft (in Basel) oder die Änderung der relativen Orientierung (in Leiden). Dennoch sollten frühere Indizien nicht in Vergessenheit geraten. Zu nennen wären die superkleinen Reibungskoeffizienten, die in der Gruppe von Jean-Michel Martin an der Ecole Centrale de Lyon zwischen MoS_2 -Oberflächen gemessen wurden [6], sowie die frühen Untersuchungen in den Gruppen um Shinjo und Hirano in Tokyo [7]. Die Hoffnung auf eine reibungsfreie Zukunft in der Nanowelt hat auf alle Fälle neue Nahrung erhalten.

MARTIN MÜSER

- [1] M. H. Müser, *Physik Journal*, September 2003, S. 43
- [2] A. Socoliuc et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 134301 (2004)
- [3] K. Shinjo und M. Hirano, *Surf. Sci.* **283**, 473 (1993)
- [4] M. H. Müser, *Europhys. Lett.* **66**, 97 (2004)
- [5] M. Dienwiebel et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 126101 (2004)
- [6] J. M. Martin et al., *Phys. Rev. B* **48**, 10583 (1993)
- [7] M. Hirano et al., *Phys. Rev. Lett.* **67**, 2642 (1991)

Prof. Dr. Martin Müser, Department of Applied Mathematics, WSC 159, Faculty of Science, University of Western Ontario, London, Ontario, Kanada

Kakteen im Computer

Die spiralförmigen Muster, die sich in Kakteen (links), Pinienzapfen oder Sonnenblumen zeigen, lassen sich oft durch die Fibonacci-Reihe beschreiben, bei der jedes Element die Summe der beiden vorhergehenden Zahlen ist (1, 1, 2, 3, 5, 8 ...): Verbindet man die kleinen Hügel, welche die Kakteenstachel tragen, von der Mitte nach außen mit ihren nächsten Nachbarn, so entstehen Spiralmuster mit 3, 5 oder 8 Armen.

Die beiden Mathematiker Patrick Shipman und Alan Newell von der University of Arizona in Tuscon haben nun eine Theorie entwickelt, mit der sich die Entstehung dieser Spiralmuster auf einfache mechanische Kräfte zurückführen lässt. Ihr Modell be-

schreibt die elastischen Eigenschaften und Spannungen der wachsenden Pflanzenspitze, aus der die neuen Blätter herauswachsen. Diese Spitze besteht aus einer Schale, die das weiche Innere umgibt. Da die Schale

schneller wächst als das Innere, bilden sich spiralförmige Falten. Schneiden sich diese Falten, so entstehen Hügel und Täler. Die beiden Mathematiker berechneten

diejenigen „Hügelmuster“, die am stabilsten waren, und konnten so die Spiralen lebender Kakteen am Computer simulieren (rechts). Das Modell ermöglicht auch Vorhersagen, etwa über die Dicke der äußeren Schale. (P. D. Shipman und A. Newell, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 181602 (2004))

