

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))

