

Der **Physik-Preis 2008** wurde Herrn André Schirmeisen, Münster, in Anerkennung seiner bedeutenden wissenschaftlichen Arbeiten auf dem Gebiet der Oberflächenphysik/Nanotribologie verliehen.

Nanotribologie – Wenn Atome ins Rutschen kommen

ANDRÉ SCHIRMEISEN

Reibung ist allgegenwärtig. Sie bestimmt den Bremsweg von Fahrzeugen, zwingt Autofahrer, regelmäßig nach dem Ölstand zu schauen, und sorgt dafür, dass Kinder vom Schlitten fallen, wenn sie beim Rodeln auf einen Asphaltweg geraten. Doch was passiert eigentlich genau, wenn zwei Oberflächen aneinander reiben? Im Gebiet der Nanotribologie beschäftigen sich Wissenschaftler mit den grundlegenden Prozessen von Reibung und Verschleiß, indem sie das mechanische Verhalten von kleinsten Kontakten im Nanometerbereich untersuchen. An der Universität Münster haben wir in diesem Zusammenhang einen neuen Ansatz entwickelt, bei dem mit Hilfe eines speziellen Kraftmikroskops Nanoteilchen über eine Oberfläche geschoben werden [1].



André Schirmeisen, Privatdozent für Physik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Träger des Physik-Preises 2008

Je größer ein Felsblock ist, den man verschieben möchte, desto mehr Reibungskraft muss überwunden werden. Das ist schon den Ägyptern vor 3000 Jahren beim Bau von Pyramiden bewusst geworden. Im Mittelalter stellte Leonardo da Vinci systematische Reibungsuntersuchungen an und fand dabei bis heute gültige Gesetzmäßigkeiten heraus: Die Reibung eines Körpers ist unabhängig von der Auflagefläche und proportional zu der von oben drückenden Lastkraft. Diese allgemein bekannten Gesetze, nach denen die Reibung proportional zur Auflagekraft und zudem unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit ist, gelten erstaunlich gut auf makroskopischer Skala im Fall der trockenen Gleitreibung. Trotzdem gelang es bis vor kurzem nicht einmal ansatzweise, sie aus mikroskopischen Grundprinzipien abzuleiten.

Besonders deutlich werden die Grenzen des Verständnisses der Reibungsprozesse in der Mikrosystemtechnik, in der man sich mit der Entwicklung von miniaturisierten bewegten Systemen beschäftigt, welche oft nur wenige Mikrometer Größe erreichen. Auf dieser Längenskala können die meist unzureichenden Reibungseigenschaften kaum, wie sonst üblich, durch Schmierung verbessert werden. Außerdem ist die Anzahl der möglichen Materialien durch die notwendige Kompatibilität zu den etablierten Herstellungsverfahren stark eingeschränkt. Als Konsequenz daraus sind die unzureichenden Reibungs- und Abriebeigenschaften solcher Mikromotoren und die daraus resultierende Einschränkung der Lebensdauer heutzutage das Haupthindernis für deren weitere Verbreitung.

Der wesentliche Grund, warum das Verständnis der Reibung trotz deren technologischer Bedeutung über die Jahrhunderte hinweg mangelhaft blieb, ist die Tatsache, dass Experimente zur Reibung meist durch Abrieb, plastische Deformation, Schmierung oder unterschiedliche Beschaffenheit der Oberflächen beeinflusst werden. Zudem spielt die komplexe Geometrie realistischer Kontakte eine wichtige Rolle. Wenn man die Grenzfläche eines makroskopischen Kontaktes näher betrachtet, so erkennt man, dass nicht die gesamten Flächen im Kontakt sind, sondern dass sich wegen der Oberflächenrauigkeit beide Oberflächen nur an wenigen Punkten tatsächlich berühren (siehe Abbildung 1). Die reale Kontaktfläche ist somit um viele Größenordnungen kleiner als die makroskopische scheinbare Kontaktfläche. Zur Untersuchung von grundlegenden Reibungsprozessen ist es daher sinnvoll, sich einen einzelnen Kontakt herauszugreifen und die Prozesse an dieser prototypischen Geometrie zu studieren.

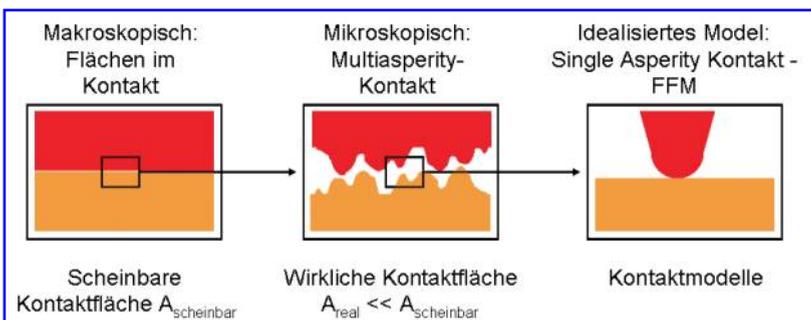


Abbildung 1: Evolution vom makroskopischen Kontakt, der sich mikroskopisch als Vielfachkontakt darstellen lässt, bis hin zur Geometrie des Einzelkontaktes. Gegenstand der Reibungskraftmikroskopie ist die Untersuchung eines definierten nanoskaligen Einzelkontaktes.

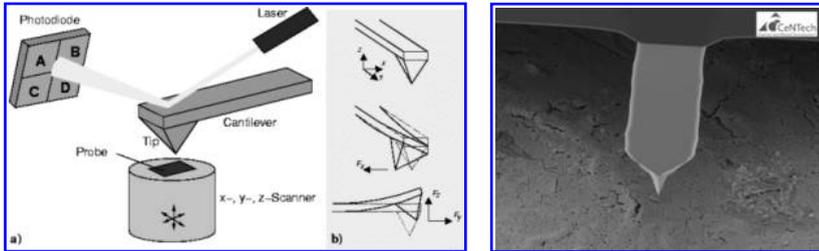


Abbildung 2: a) Rasterkraftmikroskop: Während die Probe relativ zum Federbalken in der x - y -Ebene bewegt wird, werden mit Hilfe eines Lichtzeigers Verbiegung und Torsion des Balkens gemessen. b) Die Torsion des Cantilevers (Mitte) wird nur durch in x -Richtung wirkende Lateralkräfte verursacht, während sowohl Normalkräfte (F_z) als auch in y -Richtung wirkende Lateralkräfte (F_y) eine Verbiegung des Cantilevers bewirken (unten). c) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Größenvergleich zwischen mikrometergroßen Latexkugeln und der Spitze eines Rasterkraftmikroskops (J. Sondhauss).

Als sehr erfolgreiche Technik hat sich die Rasterkraftmikroskopie (siehe Abbildung 2) etabliert, deren Messgeometrie dem idealisierten Einzelkontakt besonders nahe kommt. Das Kraftmikroskop besteht aus einer scharfen Spitze, welche am Ende eines sehr weichen Federbalkens angebracht ist und sich in Kontakt mit der Probenoberfläche befindet. Während eines Messvorganges wird die Probenoberfläche in x - y -Richtung gerastert, und gleichzeitig wird die Verbiegung des Federbalkens bestimmt. Mit dem in Abbildung 2a dargestellten Laserstrahldetektionssystem können die Verbiegung und die Torsion des Balkens gleichzeitig bestimmt werden. Die Torsion des Balkens wird dabei durch Lateralkräfte in x -Richtung (F_x) verursacht, und die Verbiegung wird durch Kräfte hervorgerufen, die senkrecht zur Probenoberfläche in z -Richtung (F_z) wirken.

Erstmals gelang es 1987 mit einem Rasterkraftmikroskop, Reibungskräfte zu detektieren und eindeutig mit auf der atomaren Skala sich abspielenden Elementarprozessen in Verbindung zu bringen [2]. Seitdem hat speziell dieses Gerät viel zur Aufklärung der Reibungseigenschaften von Kontaktflächen auf der Nanometerskala beigetragen [3]. Die Messung von Reibungskräften in dieser Anordnung unterliegt allerdings zwei wichtigen Einschränkungen: Erstens ist die Kontaktgröße durch die Spitzegeometrie vorbestimmt, und zweitens kann das Spitzenmaterial nicht frei ausgewählt werden, da die Federbalken nur aus Siliziumverbindungen hergestellt werden. Aber gerade grundlegende Fragestellungen zu Größen- und Materialabhängigkeit der Nanoreibung sind bisher ungelöst.

Ein Ausweg besteht darin, Nanoteilchen auf eine Oberfläche zu bringen und diese mittels der Kraftmikroskopspitze gezielt zu verschieben. Gleichzeitig kann die Reibung gemessen werden, die zum Verschieben der Nanoteilchen benötigt wird. Das Material und die Größe der Teilchen können in einem weiten Bereich durch spezielle Präparationstechniken vorbestimmt werden. Diesen Ansatz haben wir bei der kraftmikroskopbasierten Manipulation von metallischen Antimonteilchen verfolgt. Diese Nanoteilchen waren inselförmige kristalline Partikel aus Antimon mit bis zu 300.000 Quadratnanometern Oberfläche, aufgebracht auf einer atomar glatten Graphitoberfläche. Zuerst wird mit der Spitze des Rasterkraftmikroskops der Umriss der Antimoninseln bestimmt. Um eine der Inseln zu verschieben, wird die Spitze des Mikroskops zuerst an deren Seite positioniert. Dann wird das Nanoteilchen durch eine gezielte Bewegung der Spitze um mehrere Mikrometer zur Seite „geschubst“, während die auftretende Reibungskraft gemessen wird. Dieses Experiment wurde für zahlreiche Partikel unterschiedlicher Größe durchgeführt (Abbildung 3).

In drei Vierteln aller Fälle nahm die gemessene Reibungskraft proportional zur Auflagefläche der Nanopartikel zu. Im Gegensatz zur makroskopischen Welt spielt auf der Nanometerskala die Gewichtskraft der Teilchen keine Rolle, da diese viel zu klein sind. Dafür aber ist die Adhäsionskraft wichtig, mit der das Teilchen an der Unterlage haftet. Diese Adhäsionskräfte

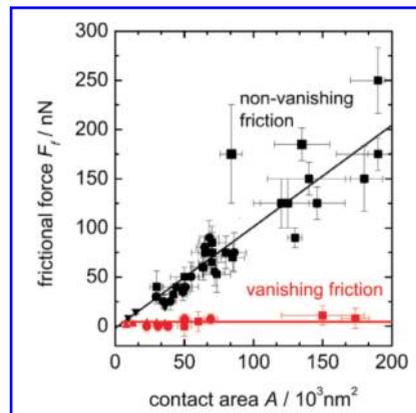
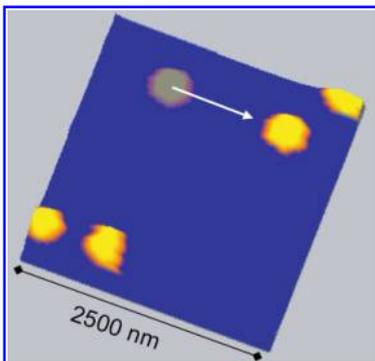


Abbildung 3: Links: Ein Antimon-Nanoteilchen wurde mit der Spitze eines Rasterkraftmikroskops um 1500 nm verschoben. Rechts: Die dabei gemessenen Reibungswerte als Funktion der Kontaktfläche zwischen Insel und Oberfläche zerfallen in zwei Äste. Drei Viertel der Teilchen zeigen einen linearen Anstieg der Reibung mit der Kontaktfläche (schwarz), während beim Rest der Partikel die Reibung fast komplett verschwindet (rot).

sind proportional zur Auflagefläche und stehen daher mit der Reibungskraft in einem konstanten Zahlenverhältnis. Diese Gesetzmäßigkeit erinnert an Leonardo da Vincis Beobachtungen aus der makroskopischen Welt, denn bei vorgegebenen Materialien haben die Reibungs- und die Gewichtskraft ein konstantes Verhältnis.

Vollkommen unerwartet war aber unsere Beobachtung, dass in einem Viertel der Fälle die Reibung fast vollständig verschwand. Wie kann man das erklären? Auf mikroskopischer Ebene kommt die Reibung durch ein Verzahnen der atomaren Gitter von Nanoteilchen und Oberfläche zustande. Falls die Atomgitter von Oberfläche und Teilchen exakt ineinander passen, so muss das Nanoteilchen über eine Gitterposition gehoben werden, um wieder in die benachbarte Gitterlücke hineinzupassen. Vergleichbares passiert, wenn man zwei Eierkartons übereinander schieben möchte. Der obere Karton muss über eine „Gitterlücke“ des unteren hinweggehoben werden. In mikroskopischer Betrachtungsweise muss für diese Bewegung die Adhäsions- bzw. Bindungskraft zwischen Nanoteilchen und Oberfläche aufgebrochen werden. Konsequenz: Die Reibungskraft skaliert mit der Kontaktfläche.

Die Situation ändert sich allerdings dramatisch, wenn die Gitter nicht mehr ineinander passen. Dann muss nämlich so gut wie keine Bindungskraft mehr aufgebrochen werden, um die Gitter gegeneinander zu verschieben, man spricht auch von Superlubrizität. Zum Beispiel reicht schon eine leichte Verdrehung der beiden Eierkartons zueinander, und die Verzahnung ist aufgehoben. Diesen Winkeleffekt hat man bereits mikroskopisch beim Verdrehen zweier atomar glatter Graphitgitter beobachtet [4]. In den neuen Experimenten passen die atomaren Gitter der Antimonteilchen und die der Graphitoberfläche aber in keinem Fall zueinander: Der Fall der verschwindenden Reibung sollte immer auftreten!

Dieser scheinbare Widerspruch lässt sich auflösen, wenn man den Einfluss von kleinen, leicht beweglichen Molekülen an der Grenzfläche von Nanoteilchen und Oberfläche berücksichtigt. Simulationen von Martin Müser und Kollegen [5] haben nämlich gezeigt, dass solche Moleküle als Vermittler zwischen den nichtverzahnenden Atomgittern fungieren können und so zum Zusammenbruch der Suberlubrizität führen. Obwohl die Experimente mit den Antimonteilchen unter extrem sauberen Vakuumbedingungen durchgeführt wurden, lassen sich geringfügige Kontaminationen nicht ausschließen. Anscheinend reichte diese molekulare Verunreinigung aus, um bei der Mehrzahl der Teilchen „normale“ Reibung zu erzeugen, während ein Viertel der Partikel suberlubrisch blieb, was zur beobachteten Dualität der Nanoreibung führte.

Literatur

- [1] D. Dietzel, C. Ritter, T. Mönninghoff, H. Fuchs, A. Schirmeisen, and U. D. Schwarz, *Phys. Rev. Lett.* (2008), 101, 125505.
- [2] C. M. Mate et al., *Phys. Rev. Lett.* 59, 1942 (1987)
- [3] H. Hölscher, A. Schirmeisen, U. D. Schwarz, *Phil. Trans. R. Soc. A* (2008) 366, 1383
- [4] M. Dienwiebel et al., *Phys. Rev. Lett.* 92, 126101 (2004).
- [5] M. H. Müser, L. Wenning, and M. O. Robbins, *Phys. Rev. Lett.* 86, 1295 (2001).