

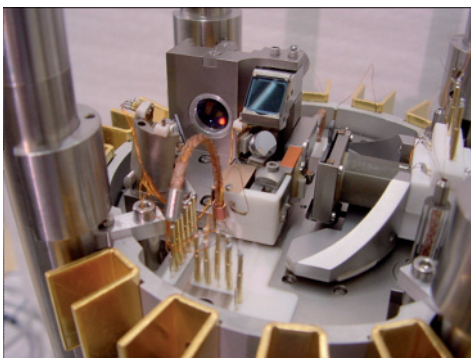
# Nanotribologie auf Kupfer: Reibung und Verschleiß auf atomarer Skala

Bennewitz, R. (1)

**Nanotribologie widmet sich der Untersuchung von Reibung und Verschleiß auf kleinster Skala. Mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie im Ultrahochvakuum ist es möglich, diese Untersuchungen auch auf Metalle auszuweiten. Auf Kupferoberflächen wird ein Regime niedrigster Reibung beobachtet, der auf die Bildung einer nanometer-großen Kupferbrücke zwischen gleitender Spitze und Kupferoberfläche zurückgeführt wird. Weiterhin kann die Bildung einzelner Versetzungen in Einkristallen registriert werden, wenn die Spitze des Rasterkraftmikroskops in einen Kupferkristall hineingedrückt wird.**

## Nanotribologie

Reibung und Verschleiß in gleitenden Kontakten zwischen rauen Oberflächen sind schwierig vorherzusagen. Das liegt insbesondere an der Komplexität des Problems. Eine Vielzahl von mikroskopischen Einzelkontakten wird ständig verformt, abgerissen und neu gebildet. Die Entwicklung jedes Einzelkontakts hängt von der Mikrostruktur und eventuell vorhandenen Adsorbaten auf den Oberflächen ab. Die Gesamtreibung ergibt sich aus dem Zusammenspiel aller Einzelkontakte und der Entwicklung der gesamten Oberflächenstruktur, oft auch aus der Bildung dünner Filme zwischen den gleitenden Oberflächen. Experimente, die auf ein grundlegendes Verständnis der Mechanismen



**Bild 1: Rasterkraftmikroskop zum Einsatz im Ultrahochvakuum. Gut zu erkennen sind die graue Piezoröhre zur Positionierung und die optischen Elemente zum Auslesen des Kraftsensors.}**

von Reibung und Verschleiß abzielen, sind daher auf eine Vereinfachung der betrachteten Systeme angewiesen.

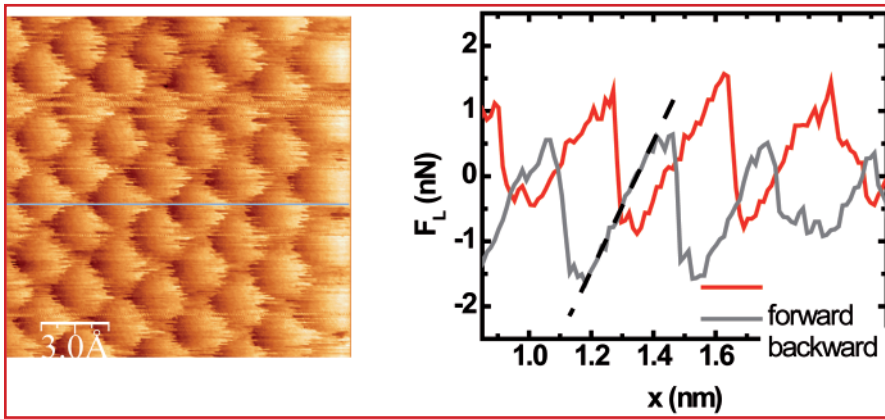
Nanotribologie – die wissenschaftliche Untersuchung von Reibung und Verschleiß auf der Skala von wenigen Nanometern – ist ein Weg zur Erforschung mikroskopischer Vorgänge in Kontakten. Die Entstehung dieses Forschungsgebiet beruht auf zwei wichtigen methodischen Entwicklungen. Auf Seiten der Modellierung führen die immer stärkere Leistung von Computern und die Entwicklung von neuen numerischen Konzepten dazu, dass heute mechanische Experimente mit Proben aus hunderttausenden von Atomen simuliert werden können. Auf Seiten der Experimentalphysik erlaubt die Entwicklung des Rasterkraftmikroskops, atomare Kräfte zu vermessen und Oberflächen mit atomarer Auflösung abzubilden. Beide Methoden überlappen nun bezüglich der untersuchten Längenskala, so dass die der Reibung und der plastischen Verformung zugrundeliegenden atomaren Prozesse studiert werden können [1]. Seit der ersten Beobachtung von atomaren Reibungsprozessen vor gut 20 Jahren wurden vor allem Schichtmaterialien wie Graphit und MoS<sub>2</sub> untersucht, die als feste Schmierstoffe Anwendung finden. In den letzten Jahren haben wir daran gearbeitet, nanotribologische Untersuchungen auch auf Metalle auszuweiten, über die wir hier am Beispiel Kupfer berichten.

## Rasterkraftmikroskopie

In der Rasterkraftmikroskopie wird die Oberfläche der zu untersuchenden Proben mit Hilfe einer sehr feinen mikrofabrizierten Spitze abgetastet und manipuliert. Die Spitze ist in einen Biegebalken integriert, der als Kraftsensor dient. Jede Kraft auf die Spitze, sei es die Auflagekraft auf die Probe oder die Reibungskraft beim Gleiten der Spitze über die Oberfläche, wird als Verbiegung durch die Ablenkung eines vom Biegebalken reflektierten Lichtstrahls detektiert. Das Instrument ist empfindlich genug, um Kräfte zu messen wie sie bei der Trennung einzelner Atome von einer Oberfläche auftreten. Außerdem erlaubt der piezoelektrische Motor der Rasterkraftmikroskops, die Spitze mit atomarer Genauigkeit über die Probe zu rastern. Um die Möglichkeiten des Rasterkraftmikroskops voll auszunutzen, müssen die Proben atomar flach und sauber präpariert werden. Für die Untersuchung von Kupfer bedeutet dies eine Durchführung des Experiments im Ultrahochvakuum, wobei die Bildung einer Oxidschicht zuverlässig ausgeschlossen werden kann.

## Atomare Reibung

Wenn die Spitze des Rasterkraftmikroskops über die Cu(100) Oberfläche eines Einkristalls geführt wird, kann ein Reibungsmechanismus beobachtet werden, der als atomares „stick-slip“-Verhalten bezeichnet wird. Die Spitze springt von einer atomaren Position zur nächsten, sobald die sich aufbauende laterale Kraft ausreicht, um diesen Sprung auszulösen. Die Aufzeichnung der lateralen Kräfte in Bild 2 spiegelt die quadratische Struktur der (100) Oberfläche wider. Der „stick-slip“-Mechanismus zeigt sich in der Sägezahncharakteristik der zu-



**Bild 2:** Die quadratische kristallographische Struktur der Cu(100) Oberfläche spiegelt sich in der Reibungskraft wieder. Die Kraftkurve in der rechten Bildhälfte zeigt die Sägezahncharakteristik, die durch das atomare „stick-slip“-Verhalten zustande kommt.

gehörigen Kraftkurven. Aus diesen und weiteren Ergebnissen lässt sich ein Bild von der Reibung eines mikroskopischen Einzelkontakts auf Cu(100) gewinnen [2]. Zwischen der Spitze und der Cu(100) Oberfläche bildet sich sehr schnell eine kleine Kupferbrücke mit einem Radius von wenigen Nanometern aus. Diese Kupferbrücke wird über die Oberfläche gezogen, so dass tatsächlich die Reibung immer innerhalb eines Kontaktes stattfindet, der unabhängig vom eigentlichen Material der Spitze ganz aus Kupfer besteht. Bemerkenswert erscheint uns dabei das Gleiten entlang der (100) Oberfläche, die eigentlich keine vorrangige Gleitebene in Kupfer ist. Weiterhin erstaunlich sind die extrem niedrigen Reibkräfte, die bei kleinen Auflagekräften gemessen werden und die auch nicht mit steigender Auflagekraft zunehmen. Erst wenn die Auflagekraft so groß wird, dass die feine Kupferbrücke kollabiert, nimmt die Reibung zu und geht das geordnete „stick-slip“-Gleiten in ein mit Verschleiß verbundenes Reiben über.

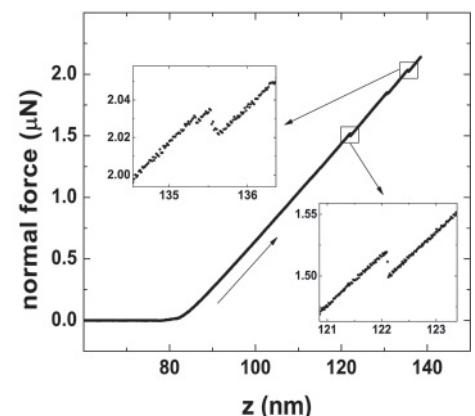
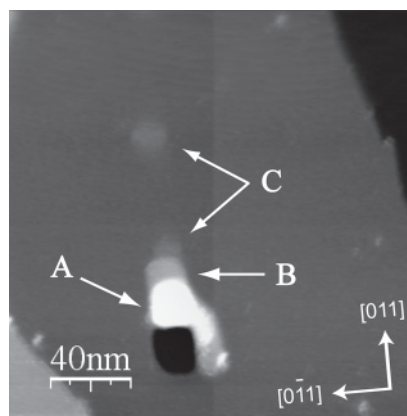
Reibungsexperimente auf der Nanometer-Skala ergeben oft einen Reibungskoeffizienten, der deutlich unter dem von makroskopischen Experimenten liegt. Die hier geschilderten Ergebnisse auf Kupfer legen nahe, dass – wie in allen klassischen Lehrbüchern beschrieben – Reibung durch Verschleiß bestimmt wird. Die nanotribologischen Experimente zeigen einen Weg auf, wie in Maschinen

mit mikroskopischen Abmessungen Reibung eine verschwindend geringe Rolle spielen könnte, wenn die mikroskopischen Kontakte über die Bewegungszyklen hinweg erhalten bleiben.

### Einzelne Versetzungen

Wie schon bei der Reibung ermöglicht die Rasterkraftmikroskopie auch bei der Untersuchung der Verformung von Kupfer Experimente, die die fundamentalen Elemente plastischen Verhaltens aufzeichnen. Dabei wird die Spitze des Rasterkraftmikroskops in der Mitte einer atomar flachen Terrasse aufgesetzt und dann die Auflagekraft solange erhöht, bis die Spannung unterhalb der Spitze ausreicht, um

eine Versetzung im Kristallgitter zu erzeugen. Dabei findet eine Scherung einer begrenzten Gleitebene um eine atomare Position statt, die die Oberfläche entsprechend um den Bruchteil einer atomaren Lage einsinken lässt. Dieses atomare Einbrechen der Oberfläche vermag das Rasterkraftmikroskop aufzulösen, wie die Sprünge in der Kraftkurve in Bild 3 zeigen. Die Kraft zur Erzeugung der ersten Versetzung lässt sich eine Spannung von etwa 8,7 GPa umrechnen. Daraus lässt sich eine kritische Scherspannung von etwa 4,5 GPa für das Gleiten entlang der (111)-Ebene abschätzen, die im oberen Bereich theoretischer Vorhersagen liegt. Diese Werte zeigen, dass die nanoskaligen Experimente auf perfekten Einkristallen die Untersuchung der homogenen Nukleation von Versetzungen ermöglichen. Nach dem Eindrucksexperiment kann dieselbe Spitze benutzt werden, um die Oberfläche in der Umgebung des Eindrucks abzubilden. Dabei können oftmals die frisch erzeugten Versetzungen abgebildet werden, wenn die Versetzungslinien die Oberfläche schneiden. Im Bild 3 ist zum Beispiel eine Aufwölbung der Oberfläche zu beobachten, die auf ein Paar von partiellen Versetzungen an der Oberfläche hinweist [3]. Solche Abbildungen erlauben es, die räumliche Ausdehnung einzelner Versetzungen zu vermessen, in diesem Fall sind es 100 nm entlang der [011]-Richtung.



**Bild 3:** Oberfläche einer Cu(100) Oberfläche nach einem Eindruck mit der Spitze des Rasterkraftmikroskops. (A) Durch die Spitze verschobenes Material. (B) Monoatomare Terrasse, die vermutlich durch Diffusion der verschobenen Atome zustande gekommen ist. (C) Versetzungslinien durchstoßen die Oberfläche. Im rechten Teil ist die Kraftkurve abgebildet, die während des Eindrucks aufgezeichnet wurde. Die vergrößerten Sprünge zeigen jeweils die Bildung einer Versetzung an.

## Ausblick

Experimente mit dem Rastkraftmikroskop erlauben faszinierende Einblicke in die grundlegenden Mechanismen von Reibung und Plastizität an Metalloberflächen. Zum Erreichen der entsprechenden Empfindlichkeit ist bislang eine Präparation von Einkristalloberflächen im Ultrahochvakuum erforderlich. In Zukunft werden wir uns vermehrt Untersuchungen unter elektrochemischer Kontrolle widmen. Erste Experimente zeigen, dass atoma-

re Reibung auch auf atomaren Kupferfilmen gemessen werden kann, die durch Unterpotentialabscheidung auf Gold präpariert wurden [4]. Da diese Filme auch sehr schnell aufgelöst werden können, ergeben sich interessante Perspektiven für die elektrochemische Schaltbarkeit von Reibung.

## Literatur

[1] I. Szlufarska, M. Chandross, R. W. Carpick, Recent Advances in Single-Asperity Nanotribology, *Journal of Physics D: Applied Physics* 41, 123001 (2008)

[2] N. N. Gosvami, T. Filleter, P. Egberts, R. Bennewitz, Microscopic Friction Studies on Metal Surfaces, *Tribology Letters* (2010) 39:19–24

[3] T. Filleter and R. Bennewitz, Nanometre-scale plasticity of Cu(100), *Nanotechnology* 18 (2007) 044004

[4] A. Labuda, W. Paul, B. Pietrobon, R.B. Lennox, P.H. Grütter, R. Bennewitz, High Resolution Friction Force Microscopy under Electrochemical Control, *Review of Scientific Instruments* 81 (2010) 083701

(1) *Roland Bennewitz, INM – Leibniz Institut für Neue Materialien, Programmbereich Nanotribologie, Campus D2 2, 66123 Saarbrücken*

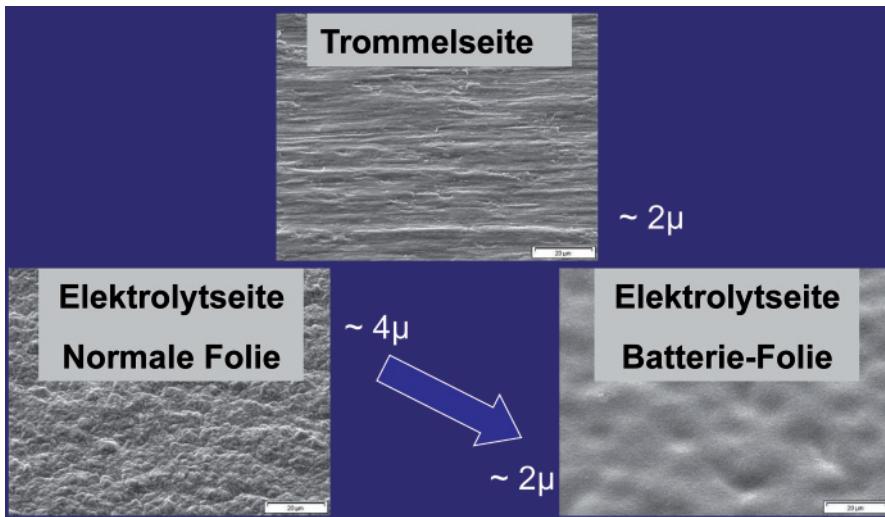


Bild 8: Topographie der Folien für Li-Ionen-Batterien