

Tribologie: Reibung und Verschleiß

“It is one of the dirty little secrets of physics that while we physicists can tell you a lot about quarks, quasars and other exotica, there is still no universally accepted explanation of the basic laws of friction“ (D. Kessler, nature 413, 2001)

Bedeutung: makroskopisch

- Reibung:**
- + Autoreifen, Schuhsohlen etc am Boden
 - Verluste bei Lagerreibung, Seismologie: Erdbeben
- Verschleiß:**
- + Zerspanende Bearbeitung von Materialien
 - Abnützung von Autoreifen, Lagermaterialien etc

Mikro- und nanoskopisch:

Zunehmende praktische Bedeutung von MEMS und NEMS

Literatur:

Ingenieurwerkstoffe : Einführung in ihre Eigenschaften und Anwendungen / M. F. Ashby ; D. R. H. Jones. Dt. Übersetzung v. P. P. Schepp, Springer , 1986

Principles and applications of tribology / Bharat Bhushan, John Wiley & Sons , 1999

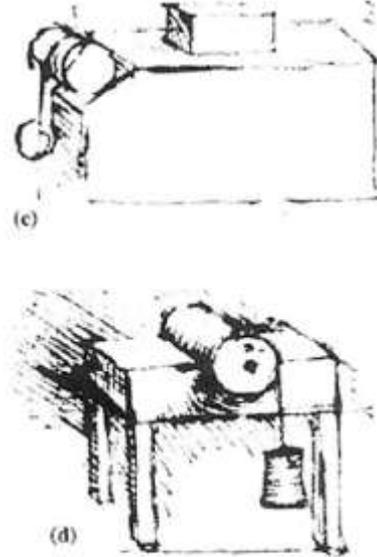
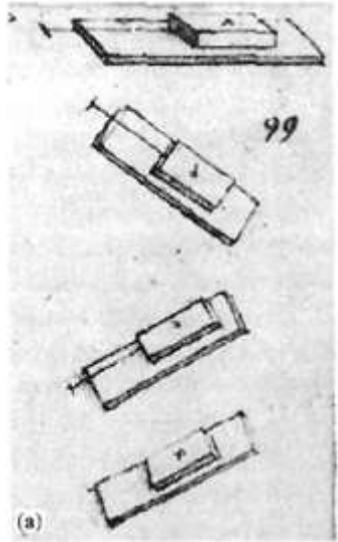
Reibung, makroskopisch

Empirische "Gesetze":

Amontons (1699):

Reibungskraft ist proportional zur Normalkraft, Proportionalitätskonstante ist der Reibungskoeffizient μ , Reibungskraft immer parallel und entgegengesetzt der Bewegungsrichtung

Reibungskraft ist unabhängig von Berührungsfläche

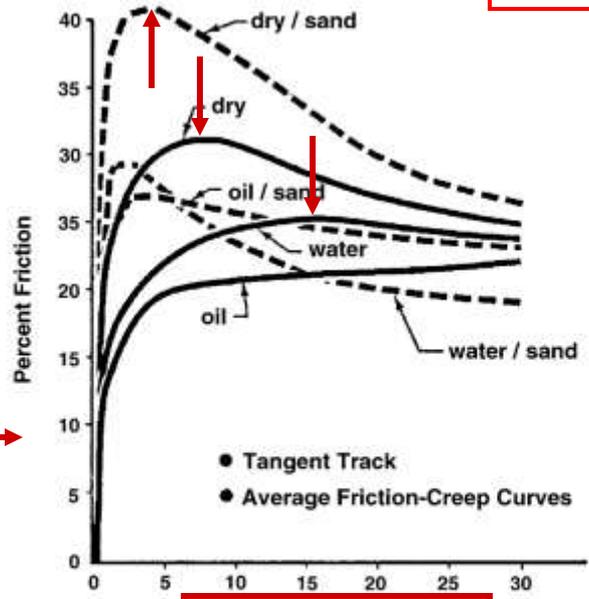


Leonardo da Vinci

Coulomb (1785):

- 1) Gleitreibungskoeffizient ist unabhängig von der Geschwindigkeit
- 2) Gleitreibungskoeffizient μ_G ist niedriger als Haftreibungskoeffizient μ_H

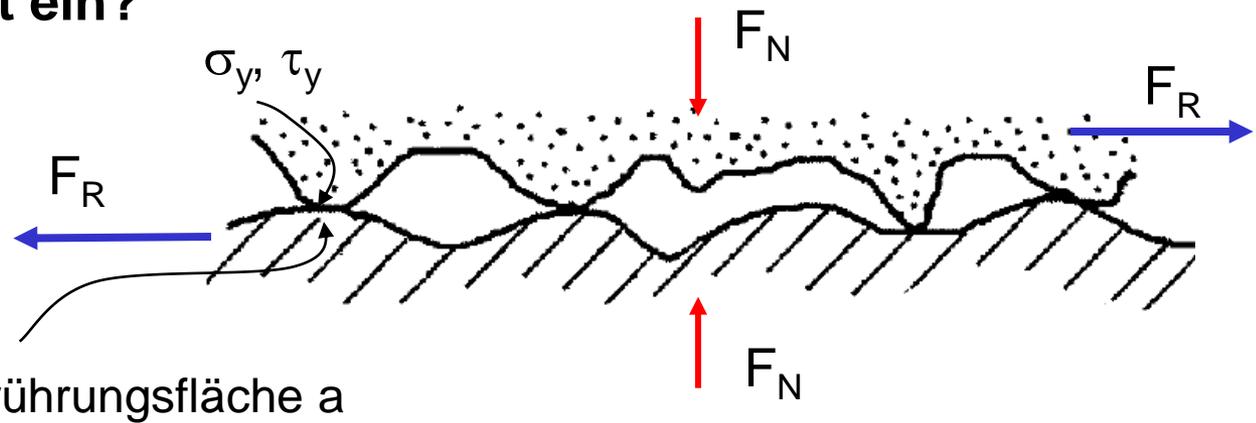
aber: Mikroslip (E-Loks!)



Schlupf %

Wieso geht Fläche nicht ein?

Betrachtung der Berührungsfläche zweier Materialien



Ashby-Erklärung (-> Bowden, Tabor) für Amontons-Coulomb Gesetz

Beim Kontakt werden Oberflächenrauigkeiten plastisch verformt, bis

$$F_N = \sigma_y \cdot a$$

An Grenzfläche Adhäsions (Kohäsions-)bindung mit

$$\tau_y \approx \frac{1}{2} \sigma_y \text{ (Schmid!)},$$

Reibungskraft

$$F_R = \tau_y \cdot a, \text{ also } \mu = \frac{1}{2} .$$

Stimmt mit Erfahrung ganz gut. Erklärt Unabhängigkeit von μ von Rauhtiefe, Anstieg für sehr kleine Rauhtiefen (wenig plastische Verformung -> grosse Adhäsionsflächen)

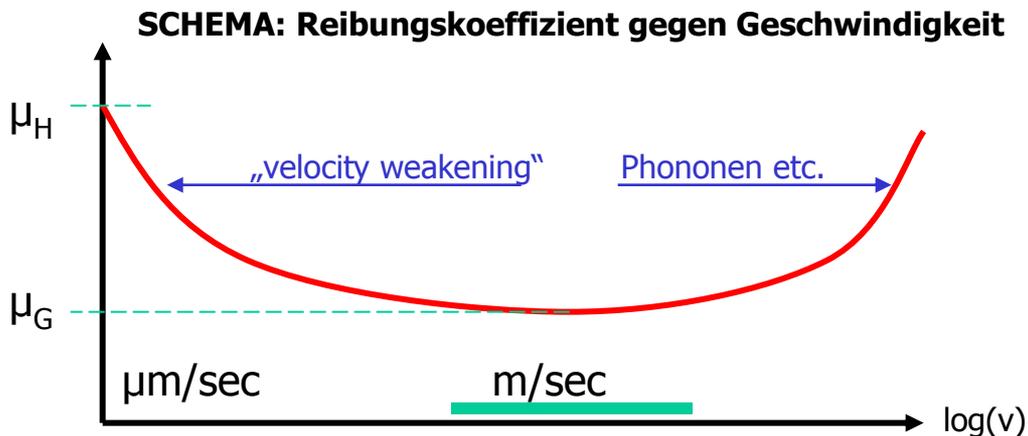
Kritik an Ashby-Erklärung:

- 1) Schmid-Gesetz an Versetzungen (in Grenzfläche) gebunden – wahrscheinlich richtig
- 2) Grenzfläche ist eher Grosswinkelkorngrenze, Anwendung von Schmid-Gesetz fraglich
- 3) Auch plastische Verformung bringt nicht notwendig atomare Bindung -> UHV-Dichtungen!
- 4) Nahezu alle Metalle (ausser z.B. Au) sind mit Oxidhaut überzogen.

Ad 4): Beweis der Wichtigkeit dieser (dünnen) Oxydhaut: „Fressen“ von Lagern in frühen Weltraumfahrzeugen (-> Teflon!), im UHV mit saubereren Metalloberflächen:
 $\mu \geq 5$!! (Vergleiche Kaltschweissung) Auch unter Schutzgas ist μ grösser als in Atmosphäre.

Ungeschmierte Gleitreibung

Keine überzeugende Erklärung für $\mu_G \leq \mu_H$ in der Literatur. Evtl. Abnahme der effektive Kontaktfläche, da Zeit zum Ausbilden von Bindungen an der Grenzfläche sinkt

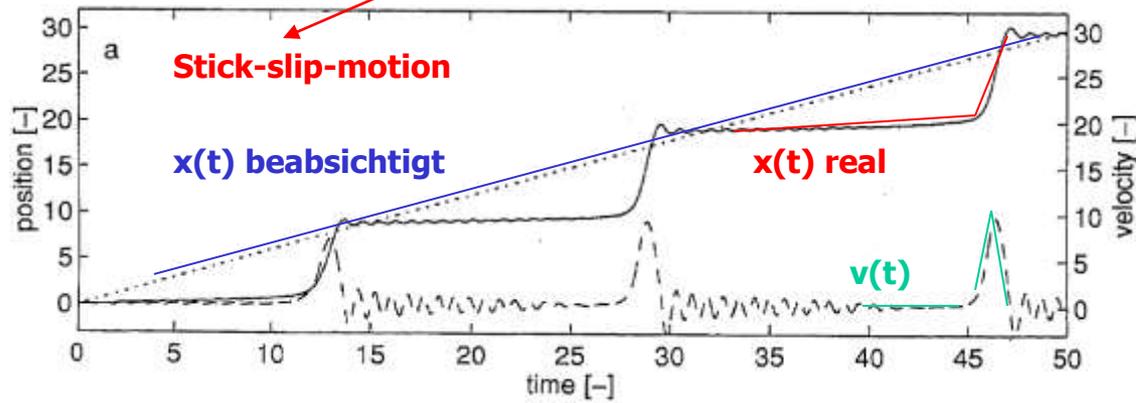
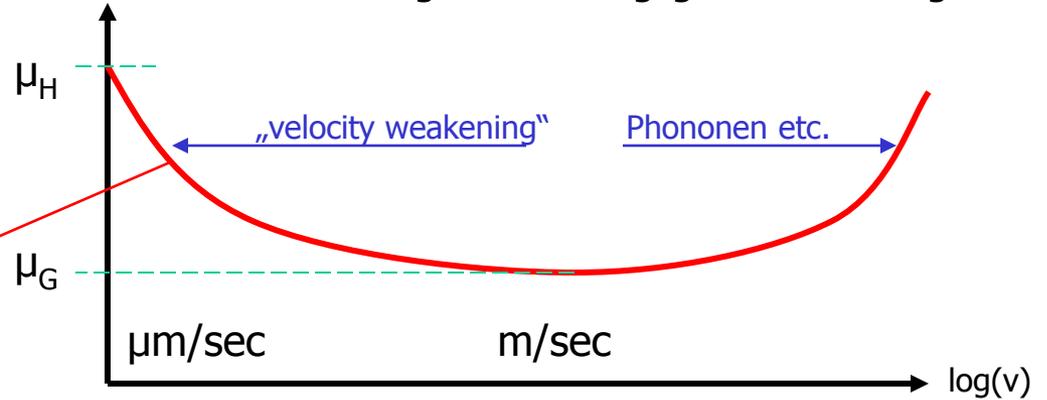


Stick-Slip Effekt über ca. 14 Größenordnungen - nano bis Kilometer (Geologie)

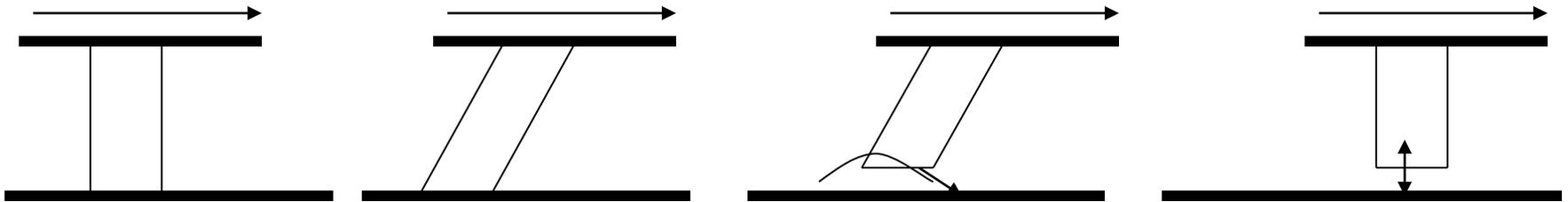
Haftung und Gleitung wechseln ab



SCHEMA: Reibungskoeffizient gegen Geschwindigkeit



Erklärungsversuch: „Stick-Slip“-Mechanismus (Kreischen von Kreide auf Tafel):
Wird eine zurückfedernde Unebenheit währenddessen weiter bewegt wird, kann sie nicht gut atomare Bindungen eingehen, obwohl sie Last trägt („Trampeln“).



Hinweise auf die Richtigkeit des Modells:

Springen von KFZ ohne Stossdämpfer (Kontaktprellen)

Autoreifen-Gummimischungen für hohe Reibung (Winterreifen und „Slicks“ von Rennautos) haben hohe innere Reibung (Dämpfung von Schwingungen).

Dazu:

B. N. J. PERSSON, A. I. VOLOKITIN: Dynamical interactions in sliding friction: Surf. Sci. 457 (2000), 345-356

B. N. J. PERSSON, V. L. POPOV: On the origin of the transition from slip to stick: Solid State Comm 114 (2000), 261-266

Messung von Reibungskoeffizienten

makroskopisch : z.B. Rotationstisch und Probekörper

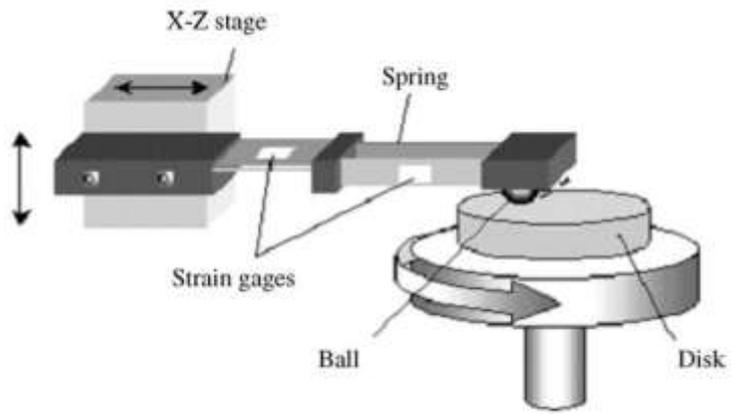
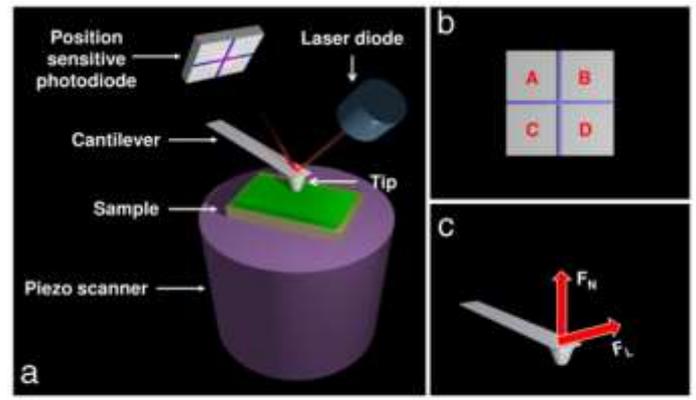
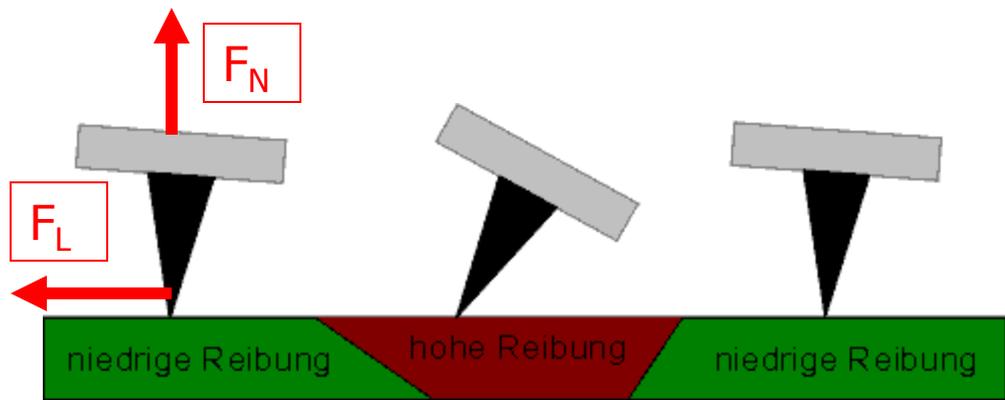


Fig. 1. Schematic diagram of ball-on-disk tester.

mikroskopisch : z.B. AFM – Atomic Force Microscope - Rasterkraftmikroskop



Schematic representation of (a) the static mode AFM operation, (b) a four-quadrant position sensitive photodiode, and (c) forces exerted on the cantilever-tip assembly by the sample surface.

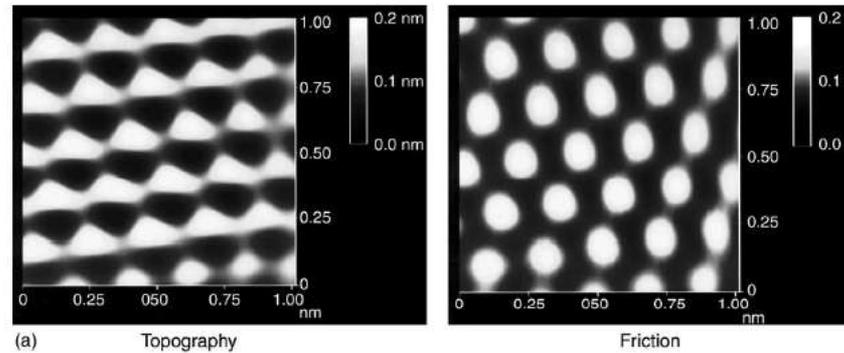
Reibung, mikroskopisch

Bedeutung: zunehmende Verkleinerung mechanischer Systeme (-> MEMS, NEMS etc)

Statt Amontons – Gesetzen: **Regeln von Holscher und Schwarz (2002):**

- 1) **Energiedissipation erfolgt durch stick-slip-Bewegung einzelner Atome** (kleiner Gruppen) -> Reibung ohne plastische Verformung und ohne Verschleiss möglich, Energie geht in Phononen.
- 2) **Reibung abhängig von Kontaktfläche, der atomaren Struktur der berührenden Partner, und von Bewegungsrichtung.** Haftkraft = atomare Bindungskraft, hängt von der Zahl der wirklich bindenden Atome, damit vom Gitter (kommensurat – inkommensurat, relative Orientierung), der Atomsorte der Partner (Bindungstyp), und der Bewegungsrichtung (abrupter bond break oder „Weiterreichen“) ab. Adsorbierte Schichten (Wasser!) spielen eine wichtige Rolle.
- 3) **Reibung wenig abhängig von Geschwindigkeit.**
- 4) **„Reibungs“-Kraft nicht notwendig parallel und entgegengesetzt Bewegungsrichtung (seitliche Auslenkung)**

Ad 4): „Reibungs“-Kraft nicht notwendig parallel und entgegengesetzt Bewegungsrichtung
(seitliche Auslenkung)



B. BHUSHAN: Nanotribology and nanomechanics: Wear 259 (2005), 1507-1531

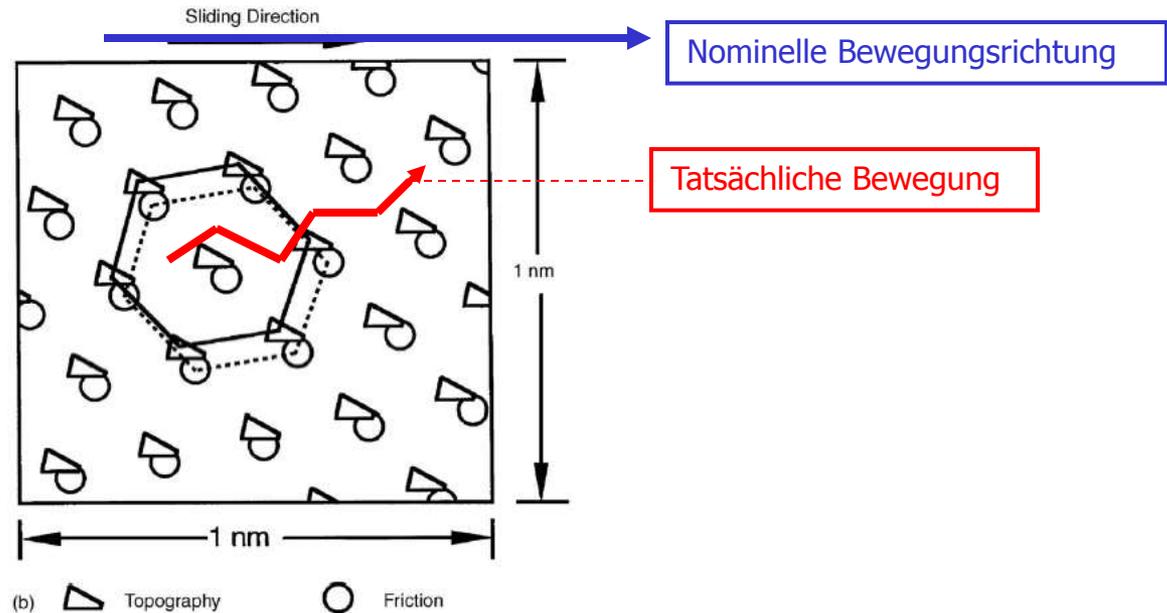
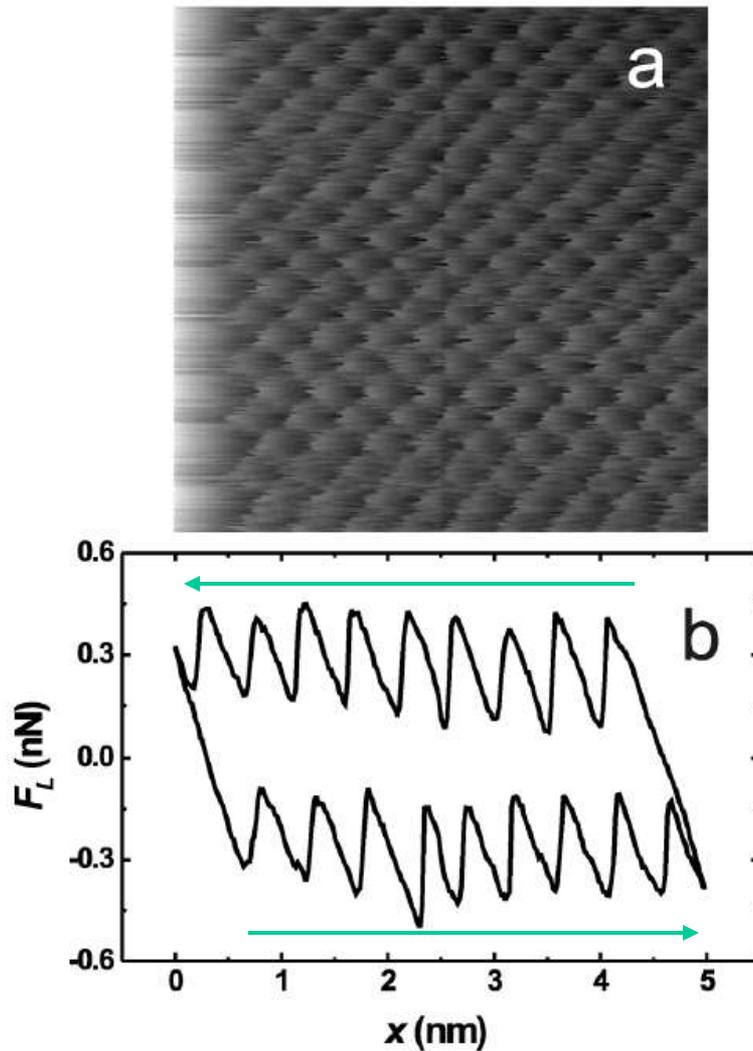


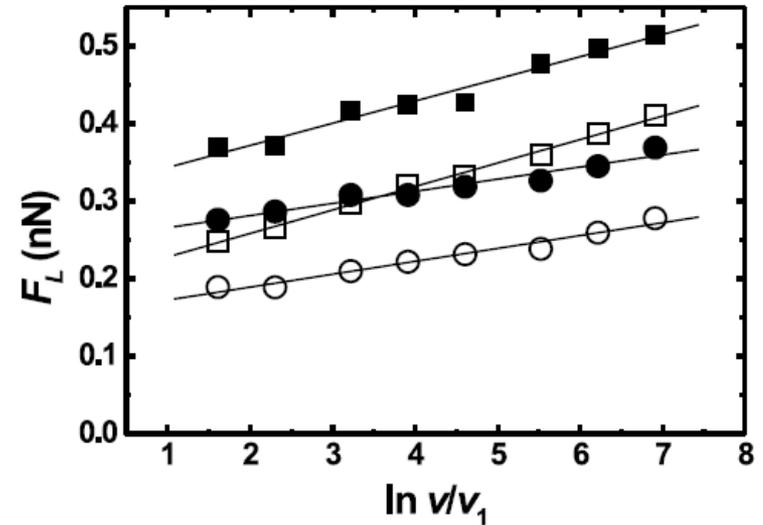
Fig. 2. (a) Gray-scale plots of surface topography and friction force maps of a $1\text{ nm} \times 1\text{ nm}$ area of freshly cleaved HOPG, showing the atomic-scale variation of topography and friction, and (b) schematic of superimposed topography and friction maps from (a); the symbols correspond to maxima (note the spatial shift between the two plots [16]).

Stick-Slip Effekt mit AFM gemessen

Gnecco, E et al, PRL 102(2009), 136102



(a) Lateral force map of NaCl(100) at $F_N = 0.65$ nN and $v = 25$ nm/s. (b) Friction loop formed by two scan lines measured forward and backward, respectively.



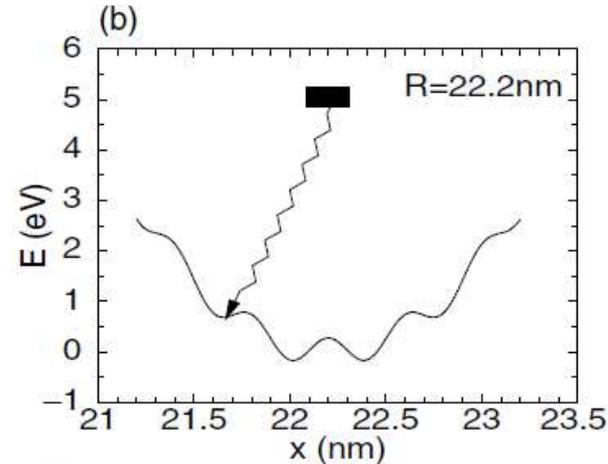
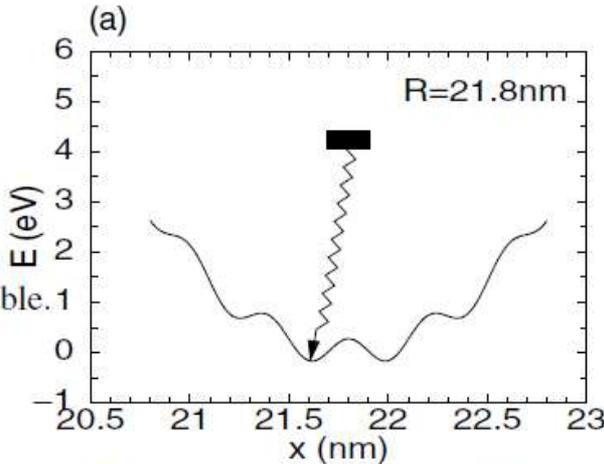
Friction as a function of the scanning velocity at $F_N = 0.44$ nN (circles) and $F_N = 0.65$ nN (squares) loads. Open and solid symbols refer to $\langle F_L \rangle$ and $\langle F_{L,max} \rangle$, respectively.

Stick-slip-motion

Log Abhängigkeit der Kraft von der Geschwindigkeit - thermally assisted bond breaking

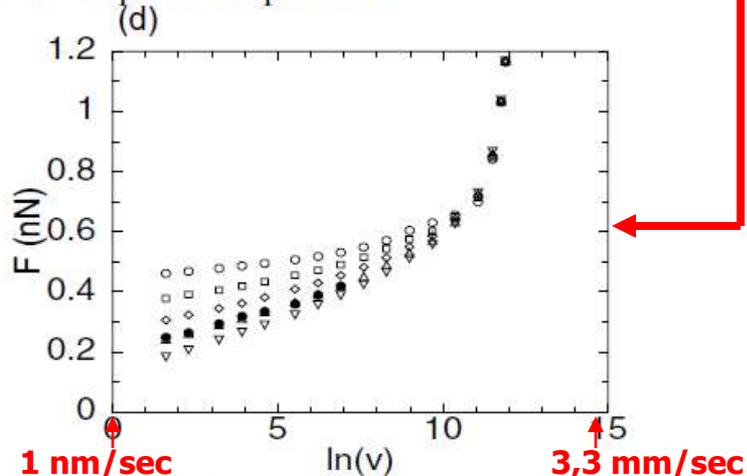
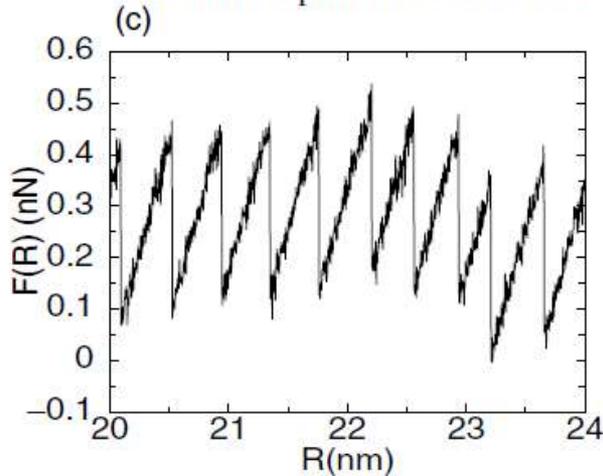
Thermally assisted bond breaking, aber Abweichungen von log-Abhängigkeit !

At this point, the energy barrier is high and thermally activated transitions improbable.



As the support is moved, the energy barrier diminishes and transitions become more likely.

Schematic representation of the combined tip-surface potential



(c) shows typical stick-slip behavior of the instantaneous friction force as the support is moved
 (d) shows the average friction force for different temperatures. $T = 53, 133, 213, 293, \text{ and } 373 \text{ K}$;

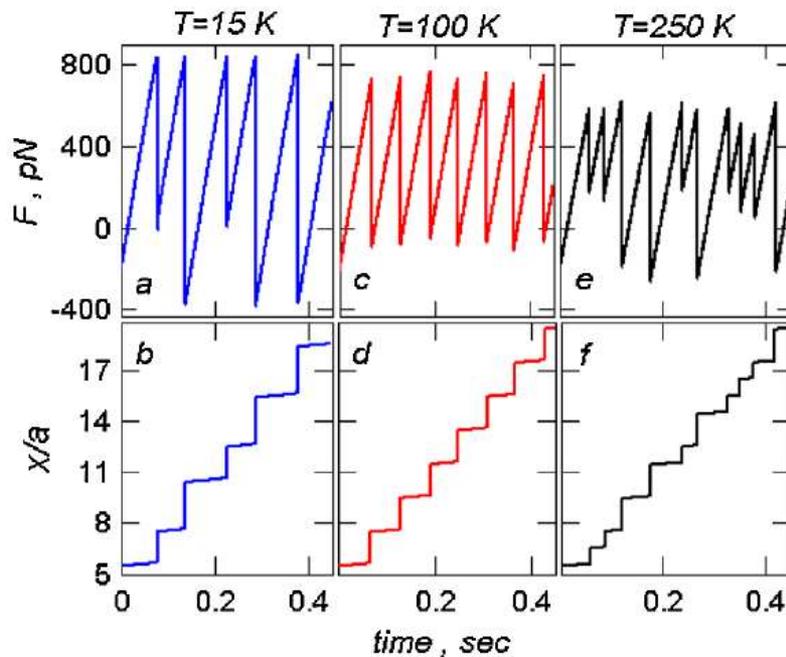
Tshiprut Z. et al, PRL 102 (2009), 136102
Simulation

Variation der Sprungdistanz pro slip-event abhängig von T:

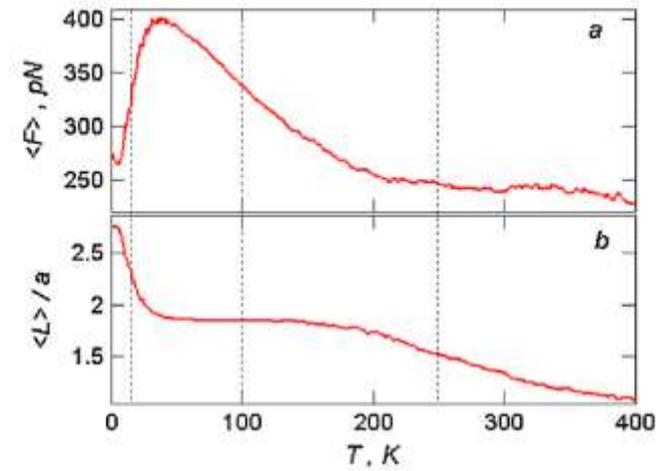
2-3

2

1-2



Force traces and the corresponding tip trajectories calculated for three temperatures: $T = 15$ K (a, b), $T = 100$ K (c, d), and $T = 250$ K (e, f), wherein the system exhibits the mixed triple-double-, the double-, and the mixed double-single-slip regimes of motion, respectively.

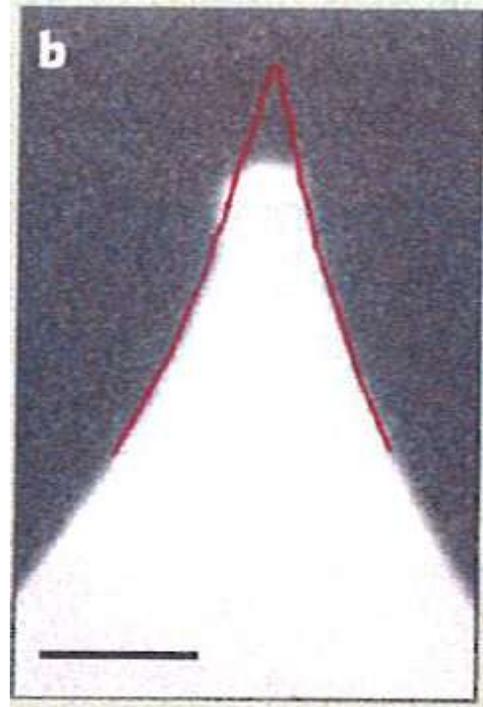
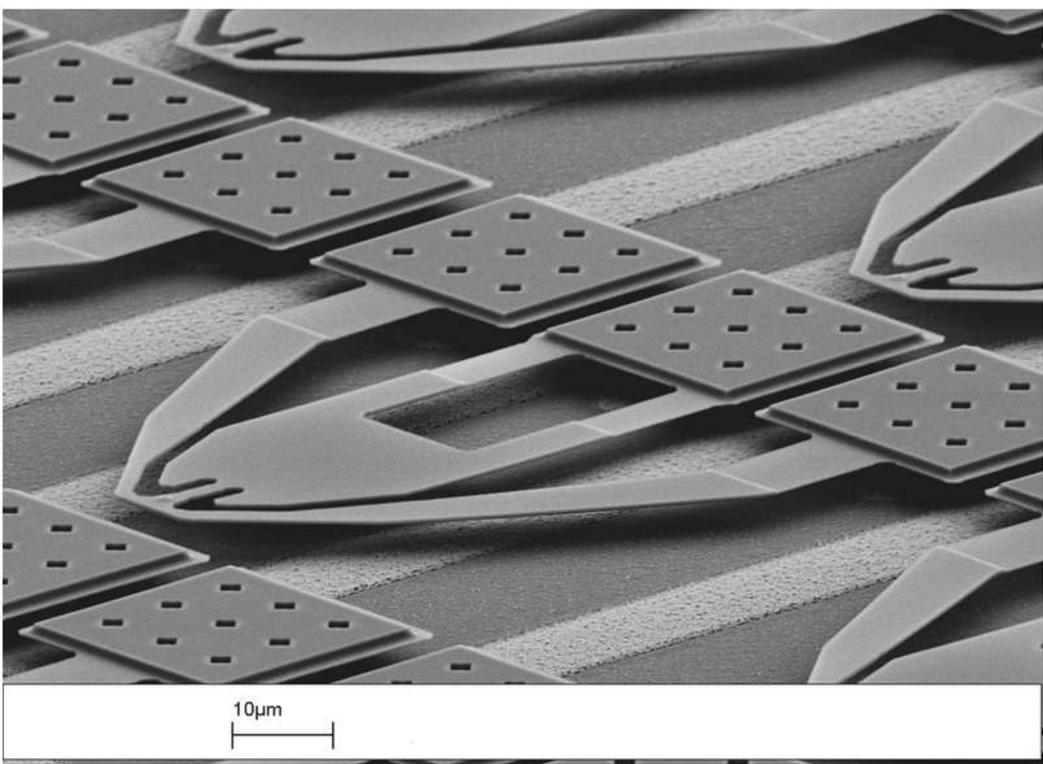
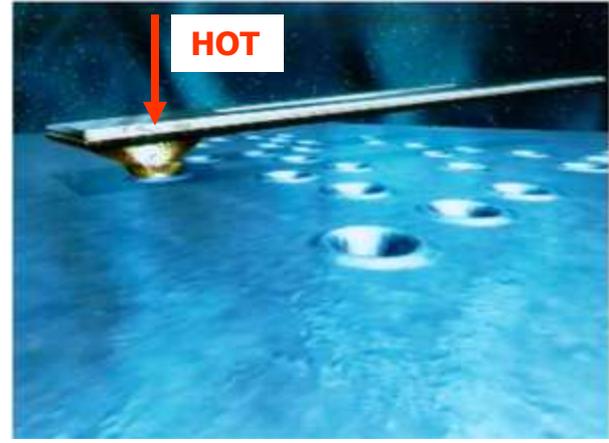
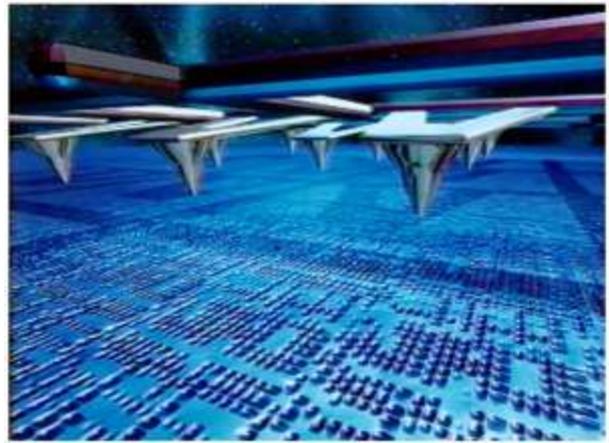
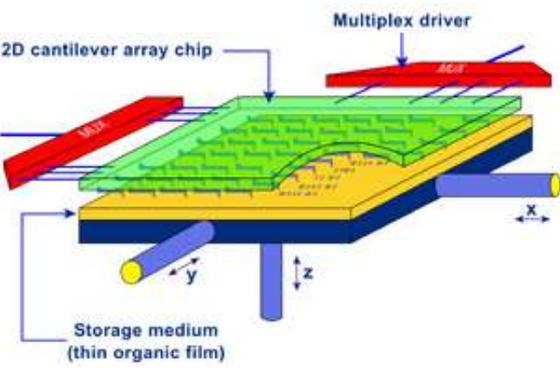


Temperature dependences of (a) the mean friction force, $\langle F \rangle$, and (b) the normalized mean slip length, $\langle L \rangle$. Dotted lines show the temperatures for which the force traces, and tip trajectories are presented in Fig. 2. Parameter values: $U_0 = 0.26$ eV, $a = 0.3$ nm, $K = 1.5$ N/m, $m = 5 \times 10^{-11}$ kg, $\gamma = 5 \times 10^{-6}$ kg/sec, and $V = 10$ nm/sec.

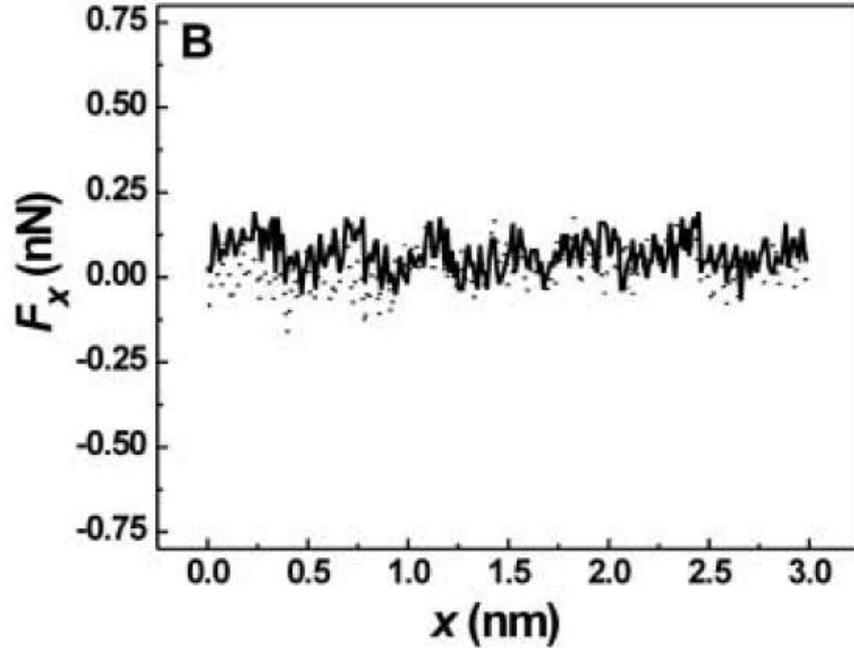
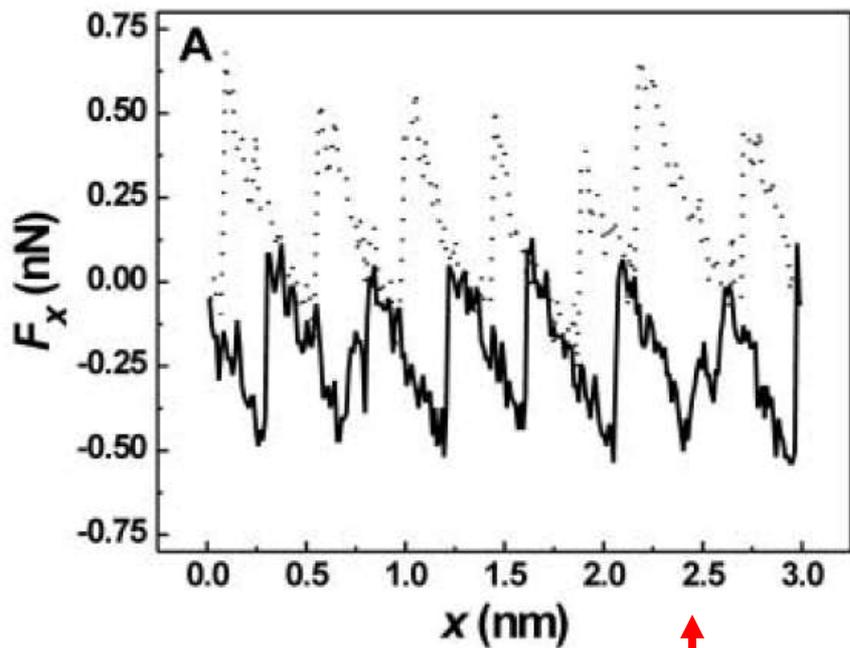
Projekt „Millipede“ .. IBM

"MILLIPEDE"

Highly parallel, very dense AFM data storage system

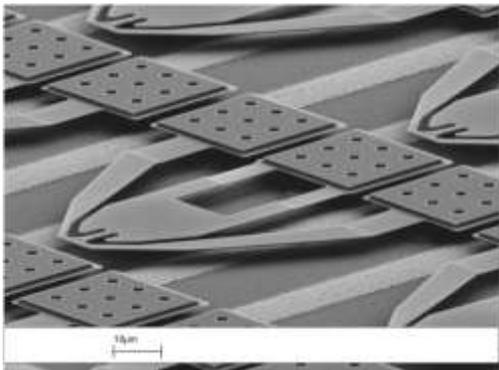
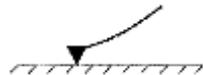


Tip wear



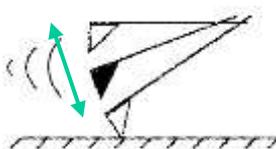
Lateral force AFM tip/NaCl

stick-slip



Lateral force AFM tip/NaCl

Oscillating cantilever, NO stick-slip !



NO TIP WEAR

Gnecco, Nature 461 (2009), 178



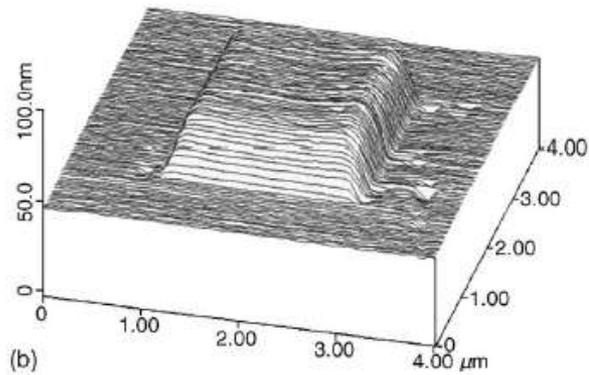
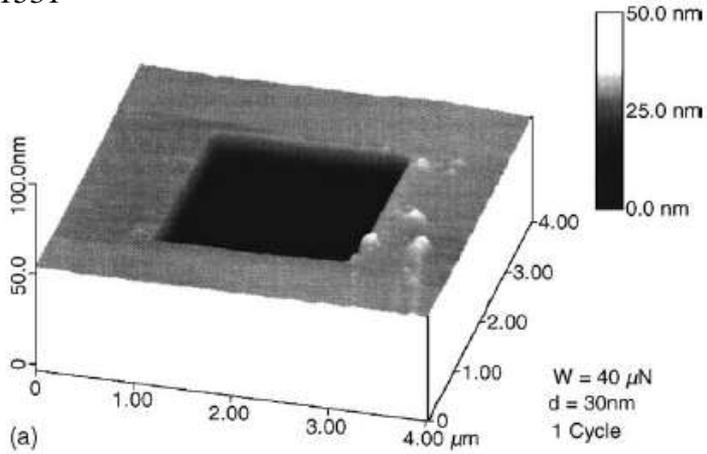
Verschleiss

- 1) adhäsiv: Abgleiten findet offenbar nicht exakt in der Grenzfläche statt -> Materialübertrag (Cu->Fe, aber auch Fe->Cu!)
- 2) abrasiv: z.B. Abscheren von Unebenheiten, „Zerbröseln“ von Oxidschichten .. Letzteres (Oxide meist hart!) führt zu hoher Abnutzung (ÖlfILTER im Automotor!), kann zum „Rollsplitt-Effekt“ führen (abgerundete bzw nadelartige Oxydpartikel wirken wie Rollkörper in Wälzlager)
- 3) sonstige Mechanismen: chemisch, elektrisch (Funkenerosion!) ..

Messung des Verschleisses:

Direkte Messung der Kratztiefe
bzw der Tiefe der
Abnutzungsspur, oder (bei
geschmierten Systemen)
Filterung des Schmierstoffes
und Messung (evtl Analyse)
der Filterrückstände.

B. BHUSHAN: Nanotribology and nanomechanics: Wear 259 (2005), 1507-1531



Negativbild der Verschleissstelle

Cu Einkristall
Griselda Guidoni, ESI

