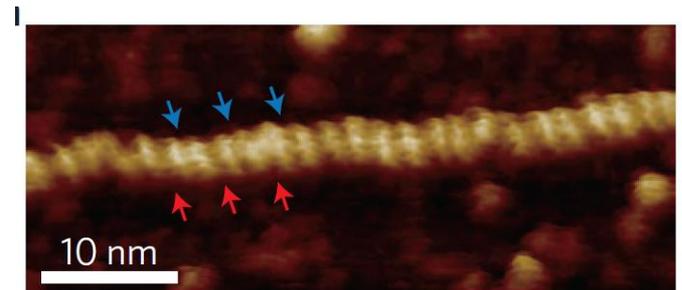
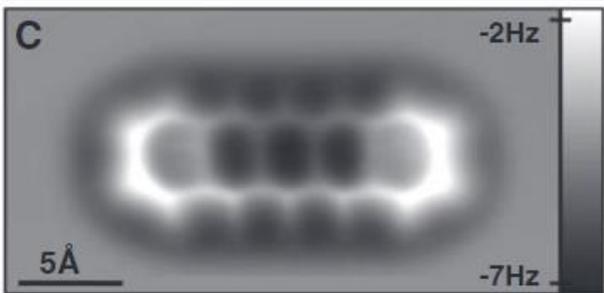


Vorlesung 10

Rasterkraftmikroskopie



Übersicht über Kapitel 3

3. Methoden der Oberflächenphysik

3.1 Kristallpräparation

3.2 Chemische Oberflächenanalyse

3.3 Beugungsmethoden

3.4 Frühe Realraumabbildung

3.5 Transmissionselektronenmikroskopie

3.6 Rasterelektronenmikroskopie

3.7 Rastertunnelmikroskopie

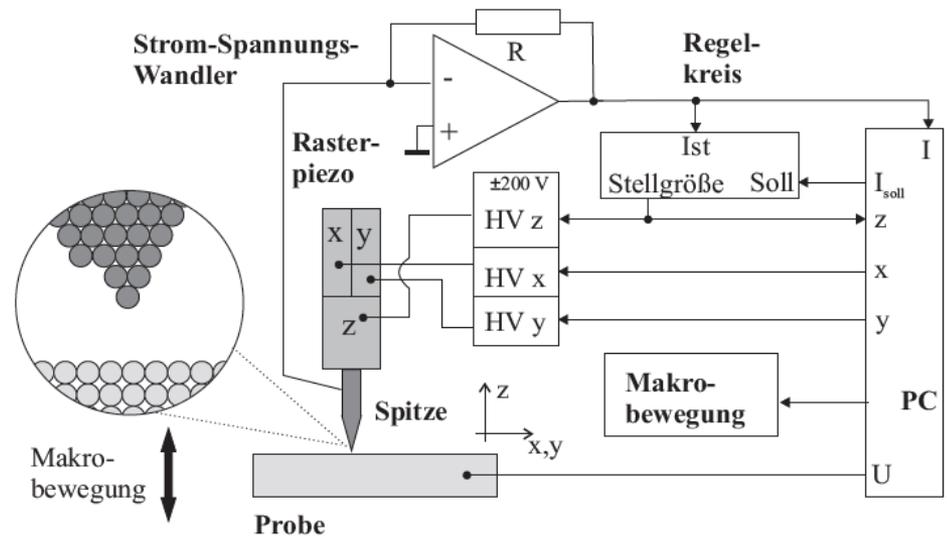
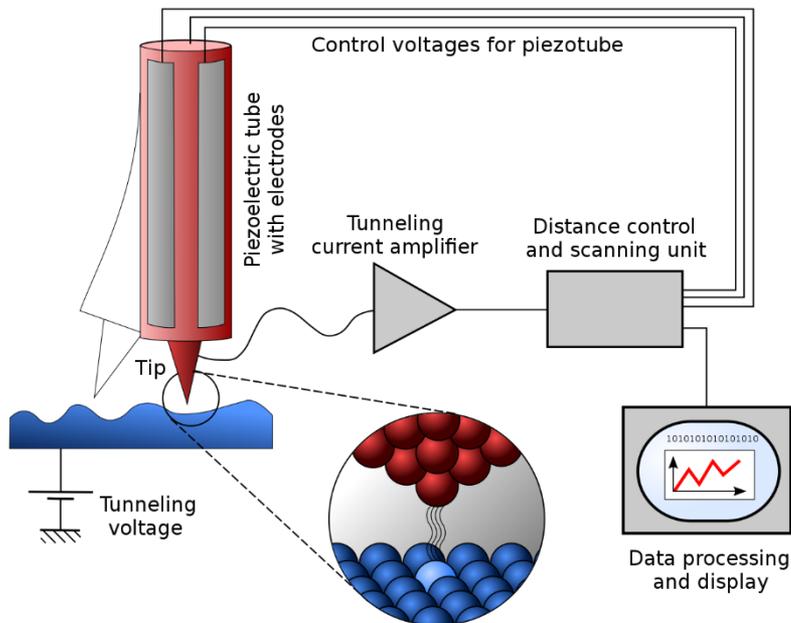
3.8 Rasterkraftmikroskopie

Lernziele

- Funktionsweise eines Rasterkraftmikroskops
- Vertraut werden mit unterschiedlichen Modi und Anwendungen

Wiederholung: Rastertunnelmikroskop

- Spitze wird in die Nähe der Oberfläche einer zu untersuchenden Probe gebracht und „gerastert“
- Die Wechselwirkung zwischen Probe und Spitze wird mit Hilfe eines Regelkreises konstant gehalten (Tunnelstrom oder Kraft)
- Ein RTM (STM) misst den quantenmechanischen Tunnelstrom

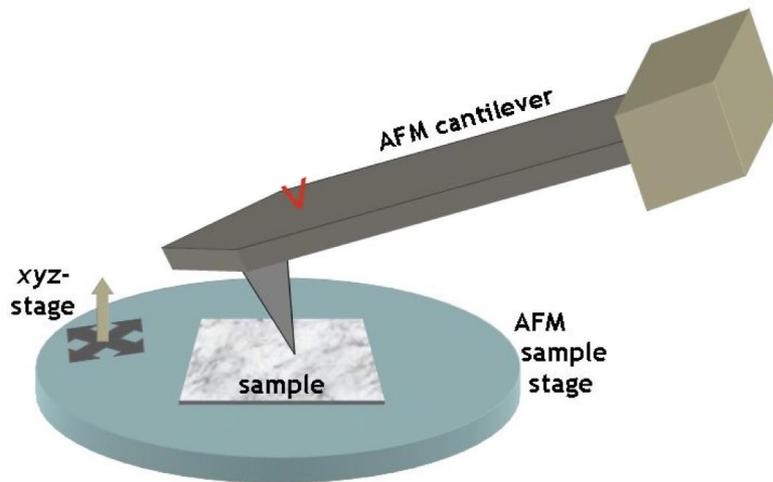


Wiki

Fauster, S. 128

3.8 Rasterkraftmikroskopie

Funktionsprinzip



- Kraft-Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe

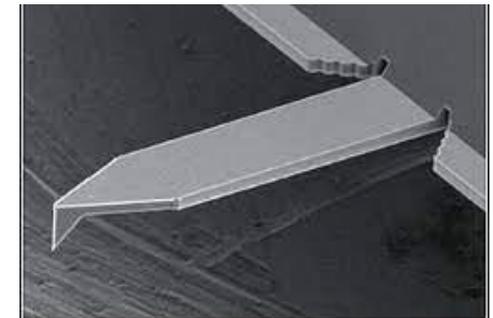
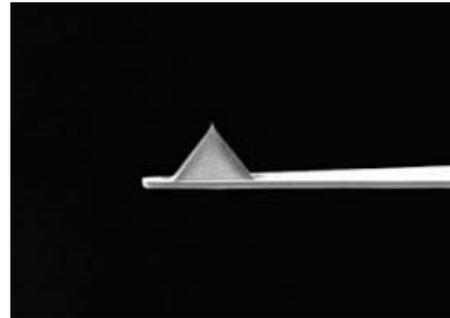
$$q = \frac{F_{ts}}{k}$$

führt zu einer Veränderung der Position der Spitze, der Schwingungsamplitude oder der Frequenz

- **Keine Leitfähigkeit** notwendig; Einfluss der elektronischen Struktur geringer
- Sehr robust

3.8 Rasterkraftmikroskopie

- Die Kraftmessung selbst erfolgt über die Messung der Bewegung eines mikrometergroßen Balkens (engl. *cantilever*)
- Unterschiedliche Materialien und Coatings



The screenshot shows the Bruker website's 'Most Popular' section. It features four product cards, each with a table of specifications:

Product Name	Frequency (Nom.)	Spring Const. (Nom.)	Geometry	Tip Radius	Material	Coating
NCHV	320KHz	40N/m	Rectangular	8nm	0.01 - 0.025 Ω cm Antimony (n) doped Si	
CONTV-A	13KHz	0.2N/m	Rectangular	8nm	0.01 - 0.025 Ω cm Antimony (n) doped Si	Reflective Aluminum
SNL-10	65KHz	0.35N/m	Triangular	2nm	Silicon Nitride	Reflective Gold
SCANASYST-AIR	70KHz	0.4N/m	Triangular	2nm	Silicon Nitride	Reflective Aluminum

Wie lese ich das aus ohne Strom??

3.8 Rasterkraftmikroskopie

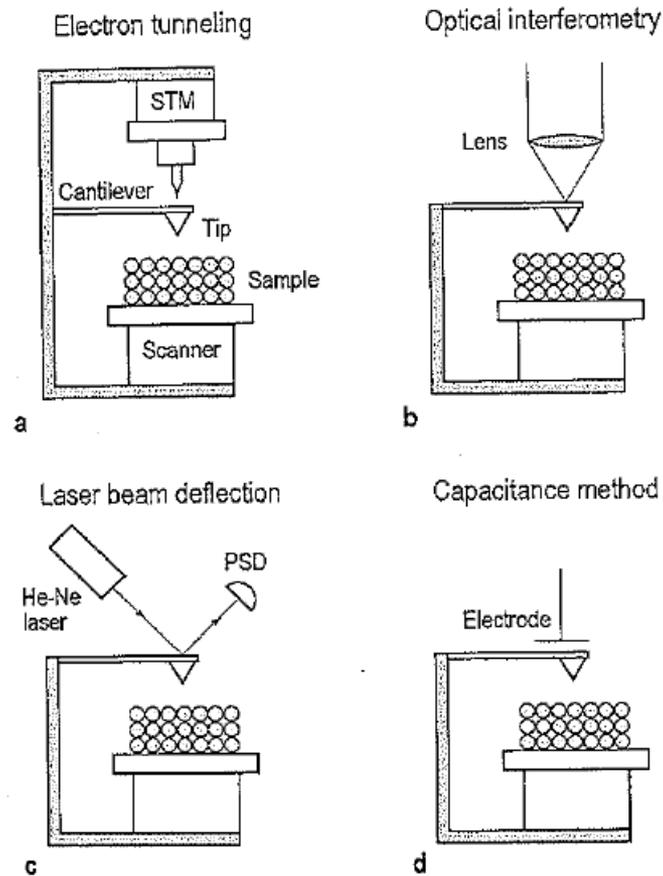
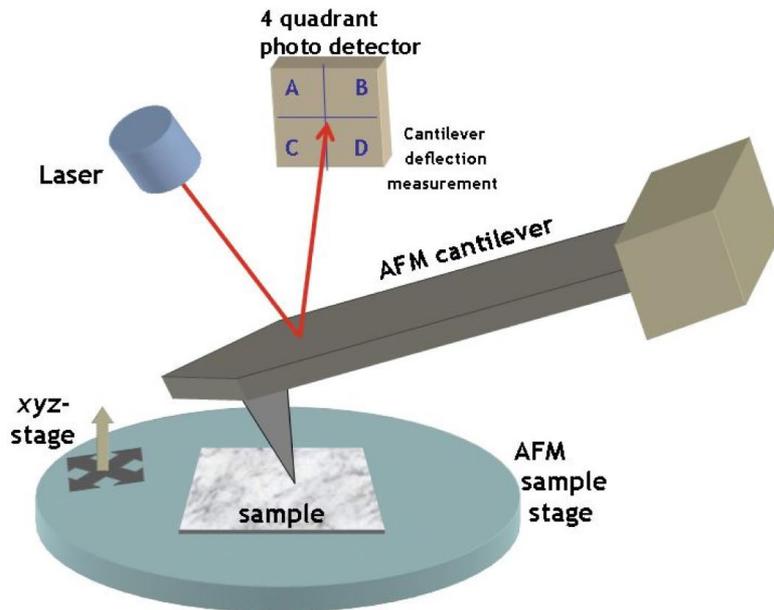


Fig. 7.20. Several techniques used to monitor the deflection of the cantilever in AFM: (a) electron tunneling; (b) optical interferometry; (c) laser-beam deflection, and (d) capacitance method (after Meyer et al. [7.15])

Funktionsprinzip



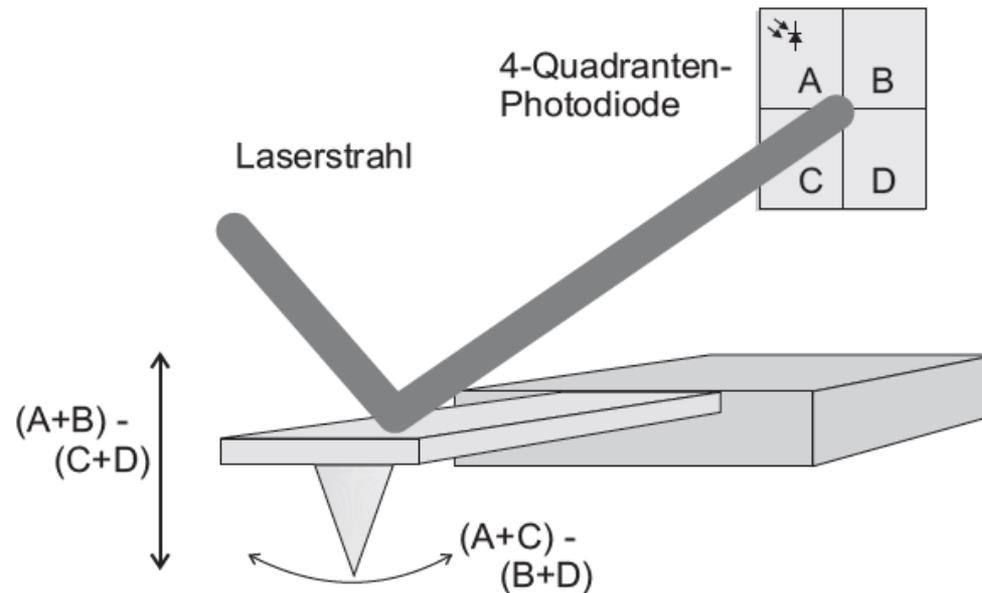
Kontakt-Modus

- Spitze berührt Probe
- Abrieb der Spitze und Probe
- Reibungskräfte
- Feedback: Auslenkung d.h. Kraft

3.8 Rasterkraftmikroskopie

Detektion (Raum-Temperatur AFMs an Luft)

- *Lichtzeigerdetektion der Bewegung eines AFM-Cantilevers.*
- *Normalkräfte und laterale Kräfte können durch die Quadranten A, B, C und D unterschieden werden*



3.8 Rasterkraftmikroskopie

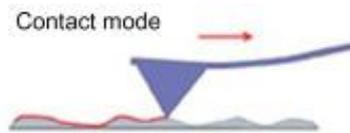
Kontakt-AFM

- Auflösung durch Kontaktfläche limitiert
- möglichst kleine Kraft F , um die Kontaktfläche und die Gefahr plastischer Verformung von Probe und Spitze zu minimieren. Dies bedingt weiche Cantilever.
- Federkonstante eher weich, $D = 5 - 500$ mN/m

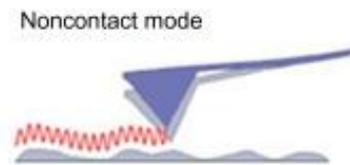
Dynamisches AFM / non-contact AFM

- Cantilever führt eine erzwungene Schwingung aus. Dazu wird er auf einem Piezo montiert
- Erzwungene Schwingungen mit einer Frequenz nahe seiner Resonanzfrequenz
- Durch Nähe zur Oberfläche wirken Kräfte und es ändern sich die Eigenfrequenz
- $D = 1 - 50$ N/m Non-Contact mode AFM

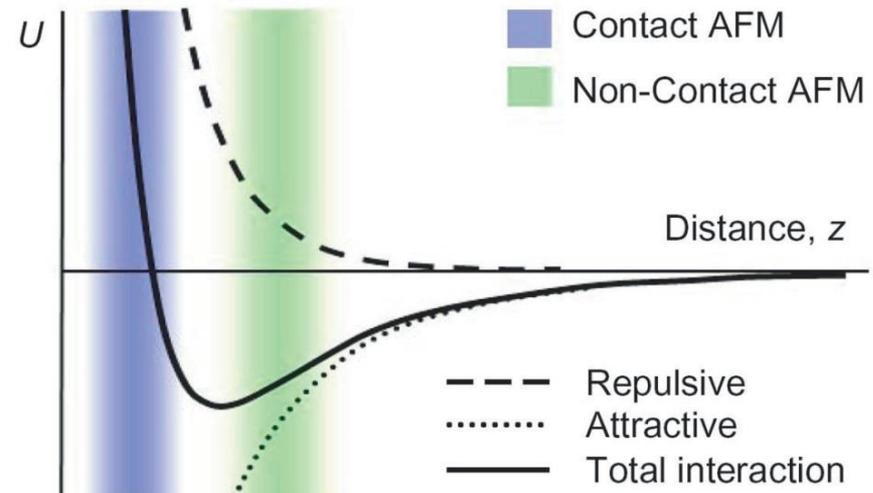
Contact mode



Noncontact mode

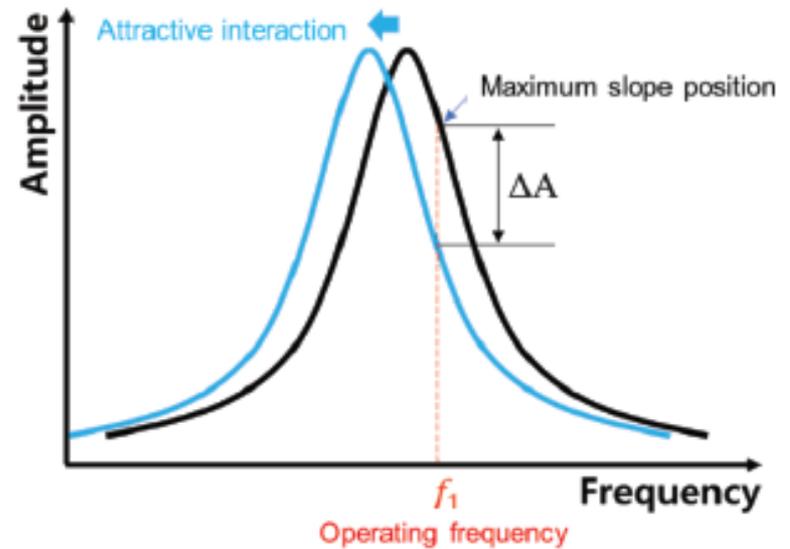
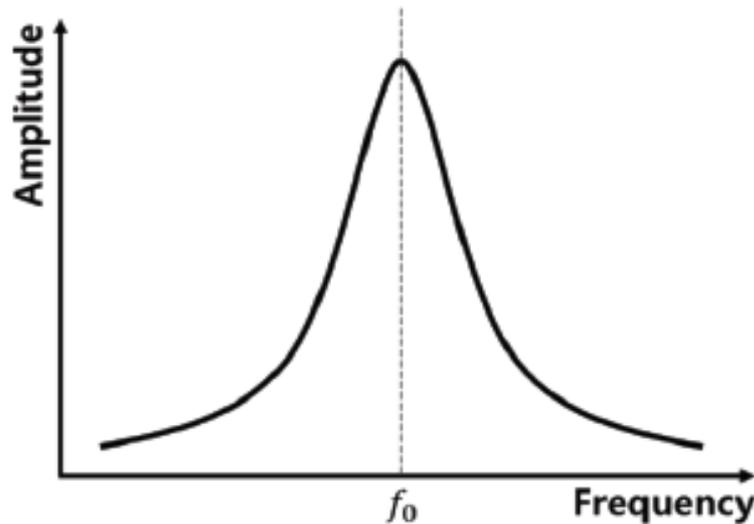
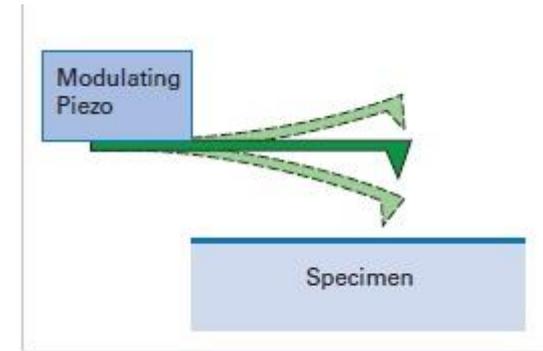


Tapping mode



3.8 Rasterkraftmikroskopie

- Kraft-Wechselwirkung mit der Probe verschiebt Resonanzfrequenz und Amplitude der angeregten Schwingung



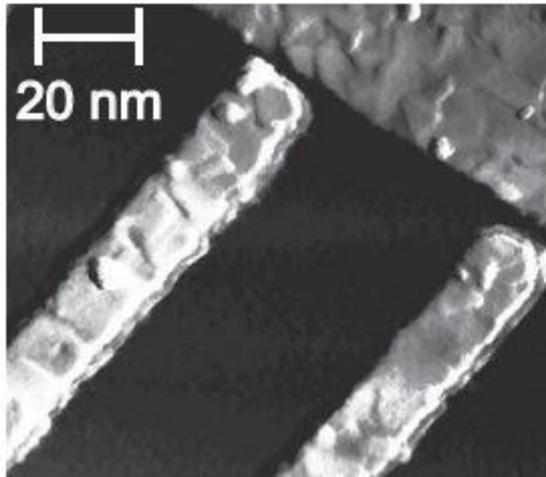
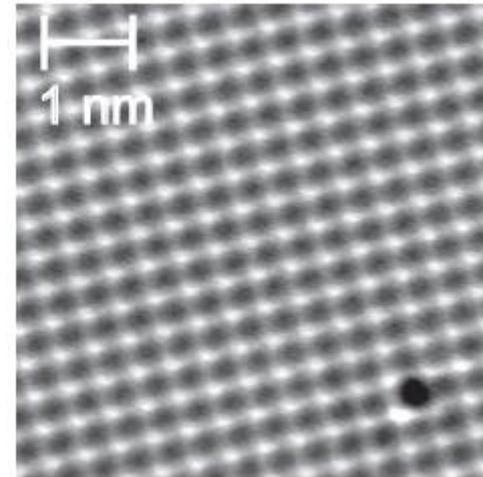


Abb. 6.9: (a) Kontakt-AFM-Aufnahme einer Nanostruktur aus einem 25 nm dicken Bismutfilm



UHV-AFM bei 5 K von NaCl(100). Es werden nur die Cl-Ionen abgebildet (nc-AFM)

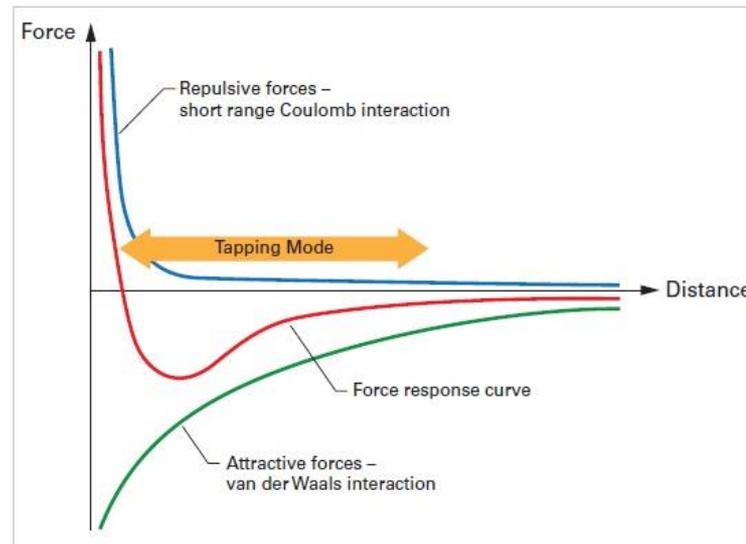
Signal: Δz

Signal: Δf

Fälle von Dynamischem AFM

1. Anklopfmodus: *tappingmode*

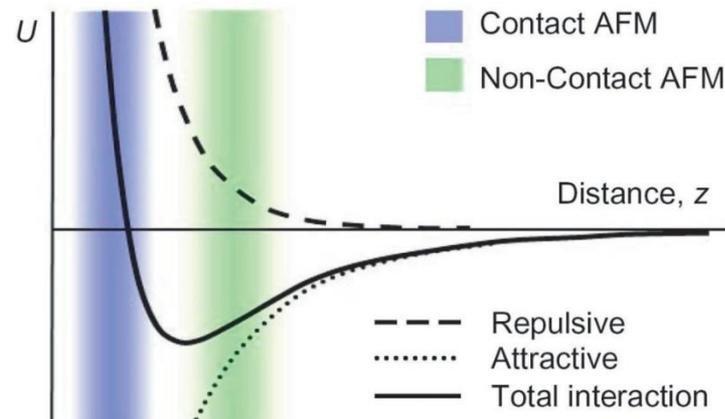
- (keine atomare Auflösung, sehr oft bei ambient AFMs verwendet)
- repulsive Kraft zwischen Probe und Spitze wirken nur kurzzeitig
- Konstante Frequenz nahe der Resonanz-Frequenz f_0 mit Schwingungen von bis zu 10 nm Amplitude werden angeregt
- Die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe verändert die Oszillations-Amplitude, und diese Änderung wird als Rückkopplungssignal verwendet
- Regelkreis hat daher die Aufgabe, die Schwingungsamplitude während des Scannens durch Einstellen des Proben-Spitzen-Abstands konstant zu halten: **AM-AFM**



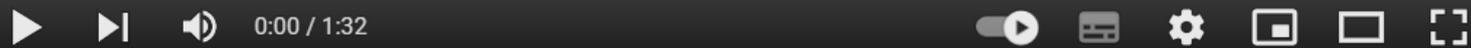
Fälle von Dynamischem AFM

2. *non-contact-AFM* oder auch *FM-AFM*

- (frequenzmoduliertes AFM) UHV-Bedingungen
 - auch atomare Auflösung wird erreicht
 - Durch eine attraktive Kraft zwischen Oberfläche und Spitze reduziert sich die Resonanzfrequenz der Cantiler-Schwingung.
 - Regelgröße für die Abstandsregelung in z-Richtung ist eine fest vorgegebene Verschiebung $\Delta f \approx f_0 / 100$ der freien Resonanz
- Spitze fährt auf Flächen gleicher Ablenkung der Kraft.



Atomic Force Microscope

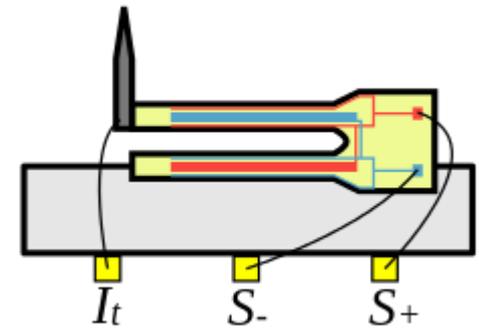
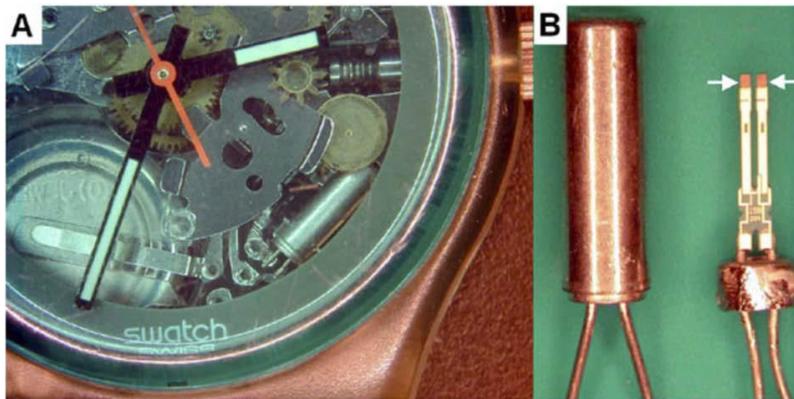


<https://www.youtube.com/watch?v=8gCf1sEn0UU>

3.8 Rasterkraftmikroskopie

***non-contact-AFM* oder auch **FM-AFM**: “tuning-fork“ AFM**

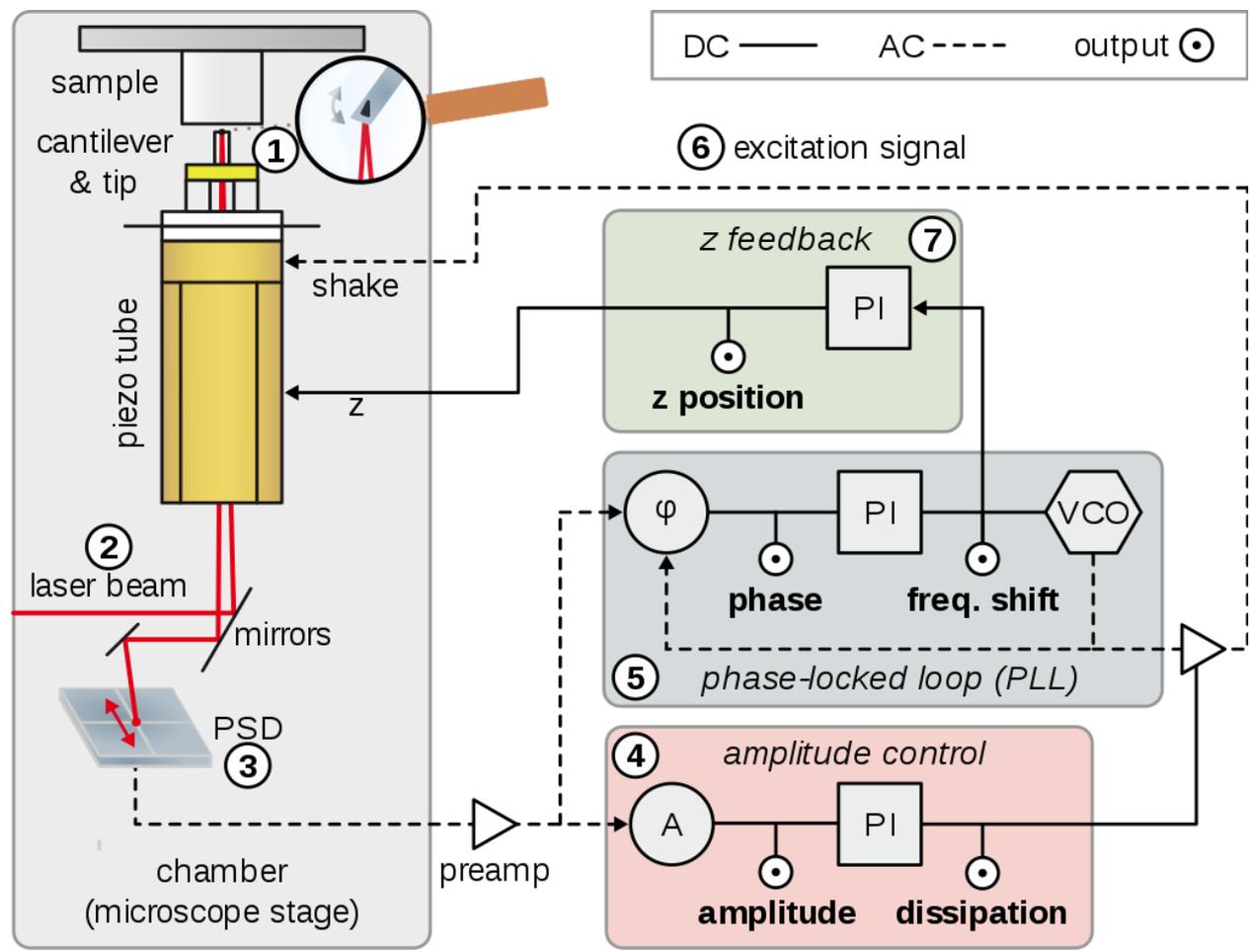
- Federkonstanten von einigen 1000 N/m. Diese können auch mit sehr kleinen Amplituden ($< 0,1$ nm) messen



F. Giessibl, The qPlus sensor, a powerful core for the atomic force microscope, Rev. Sci. Instrum. 90, 011101 (2019); doi: 10.1063/1.5052264

3.8 Rasterkraftmikroskopie

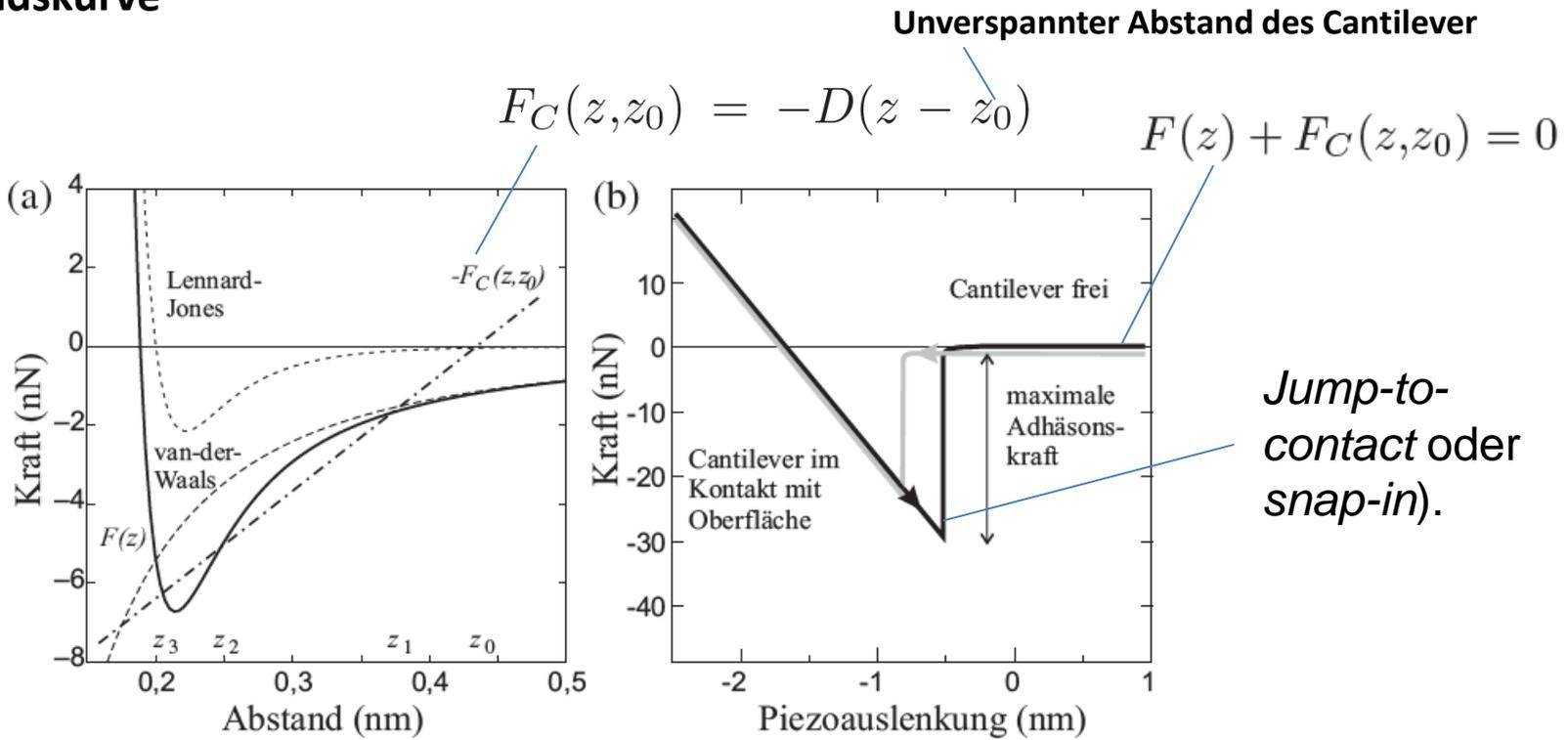
Regel-Schaltkreis eines AFMs



Welche Kräfte kann ich messen??

3.8 Rasterkraftmikroskopie

Kraftabstandskurve

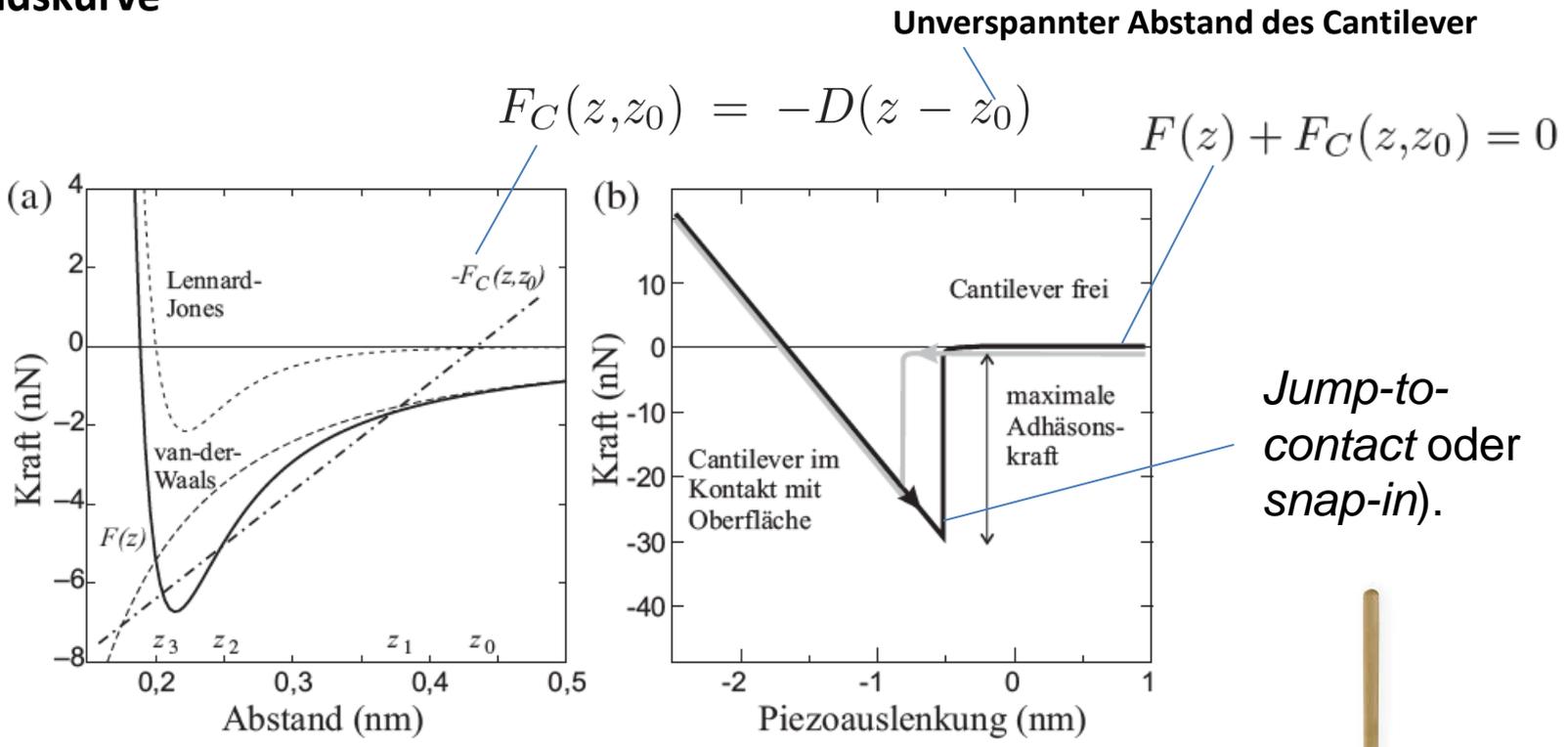


Jump-to-contact oder snap-in).

- abstoßende Kraft aufgrund des Pauli-Prinzips ($d < 1 \text{ \AA}$)
- Kraft aufgrund der Bindung zwischen Atomen ($d = 1 - 4 \text{ \AA}$)
- anziehende Van-der-Waals-Kraft (langreichweitig, dominiert für $d \gg 5 \text{ \AA}$)
- elektrostatische Kräfte (langreichweitig, dominieren für $d \gg 5 \text{ \AA}$)
- in normaler Umgebung (nicht Vakuum): anziehende Kapillarkräfte (langreichweitig, größer als Van-der-Waals-Kräfte)

3.8 Rasterkraftmikroskopie

Kraftabstandskurve



Jump-to-contact oder snap-in).



- abstoßende Kraft aufgrund des Pauli-Prinzips ($d < 1 \text{ \AA}$)
- Kraft aufgrund der Bindung zwischen Atomen ($d = 1 - 4 \text{ \AA}$)
- anziehende Van-der-Waals-Kraft (langreichweitig, dominiert für $d \gg 5 \text{ \AA}$)
- elektrostatische Kräfte (langreichweitig, dominieren für $d \gg 5 \text{ \AA}$)
- in normaler Umgebung (nicht Vakuum): anziehende Kapillarkräfte (langreichweitig, größer als Van-der-Waals-Kräfte)

3.8 Rasterkraftmikroskopie

- Viele andere Größen lassen sich auch mit einem AFM messen

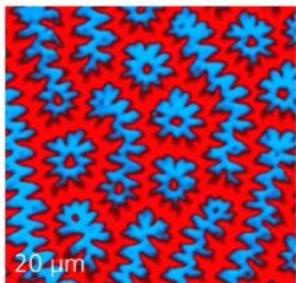
Magnetic Force Microscopy

Mittels einer magnetischen Spitze können auch magnetische Oberflächen vermessen werden. Magnetische Kraft:

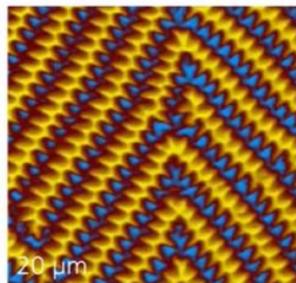
$$\vec{F} = \mu_o (\vec{m} \cdot \nabla) \vec{H}$$

Domain structure
Yttrium Iron Garnet (YIG) film

Phase



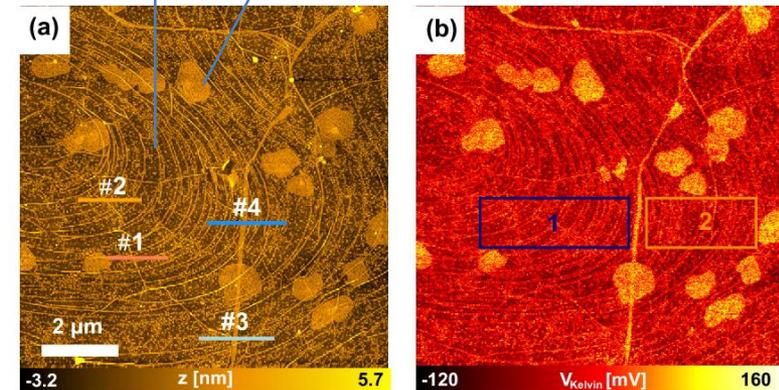
Phase



Images of magnetic structures of Yttrium Iron Garnet film. Magnetic force microscopy.

Kelvin Probe Force Microscopy

Monolage Graphen Bilage Graphen



P. Willke et al.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622316301610?via%3Dihub>

- Viele andere Größen lassen sich auch mit einem AFM messen
 - tribologischen Eigenschaften von Oberflächen
 - Conductive AFM: Spitze mit leitfähigen Material beschichtet → Transportmessungen
 - Kraft-Abstandskurven: Moleküle mit internem, strukturellem Freiheitsgrad: Insbesondere bei großen Molekülen wie Polymere oder DNS
 - Kombination von AFM und STM

3.8 Rasterkraftmikroskopie

Benutzung von CO Spitzen

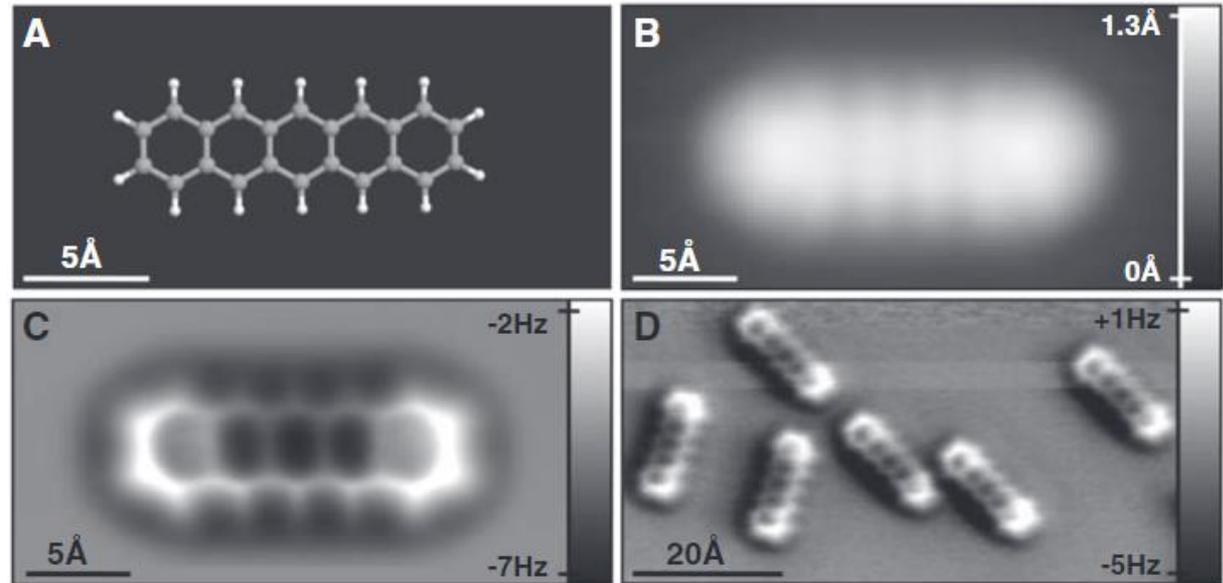
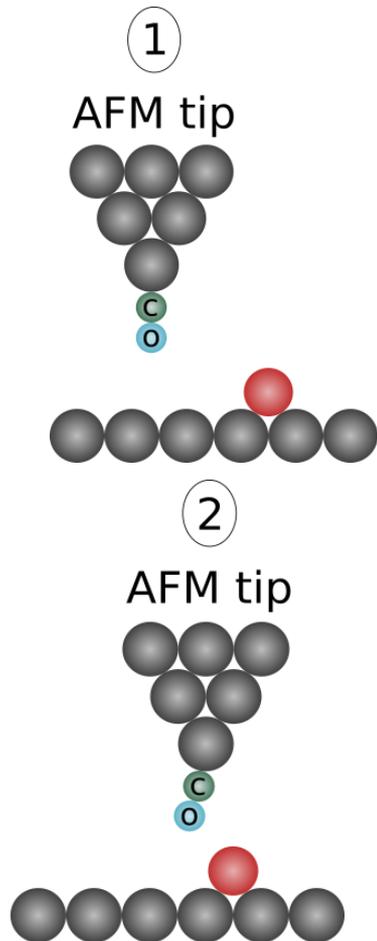
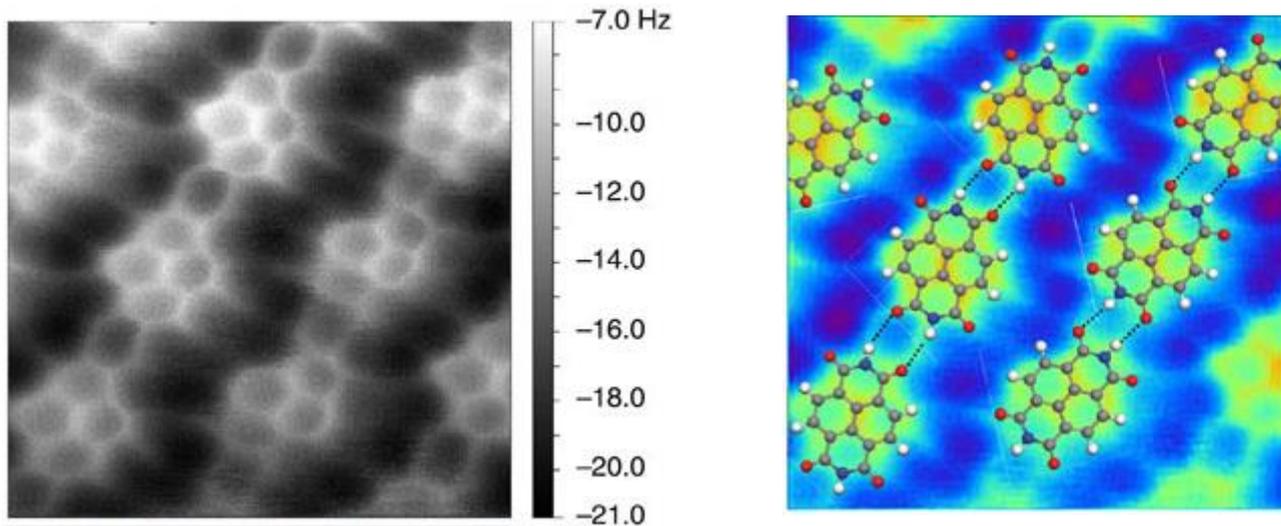


Fig. 1. STM and AFM imaging of pentacene on Cu(111). (A) Ball-and-stick model of the pentacene molecule. (B) Constant-current STM and (C and D) constant-height AFM images of pentacene acquired with a CO-modified tip. Imaging parameters are as follows: (B) set point $I = 110$ pA, $V = 170$ mV; (C) tip height $z = -0.1$ Å [with respect to the STM set point above Cu(111)], oscillation amplitude $A = 0.2$ Å; and (D) $z = 0.0$ Å, $A = 0.8$ Å. The asymmetry in the molecular imaging in (D) (showing a “shadow” only on the left side of the molecules) is probably caused by asymmetric adsorption geometry of the CO molecule at the tip apex.

Gross et al., The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy, Science 2009

3.8 Rasterkraftmikroskopie

Benutzung von CO Spitzen

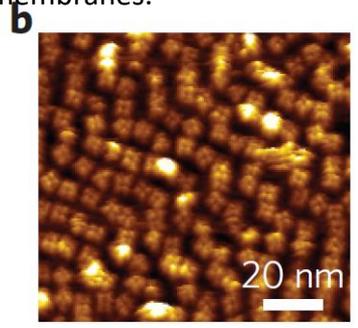


- Jedoch mit etwas Vorsicht zu genießen: Durch die komplexe Wechselwirkung von Probe und Spitze können Artefakte in der Messung entstehen.

3.8 Rasterkraftmikroskopie

- Vielfältige Anwendung in der Biologie

Cyclic nucleotide-regulated potassium channels (MlotiK1) reconstituted into lipid membranes.



Rows of densely packed rhodopsin dimers distributed in the native disc membrane extracted from rod outer segments of the eye.

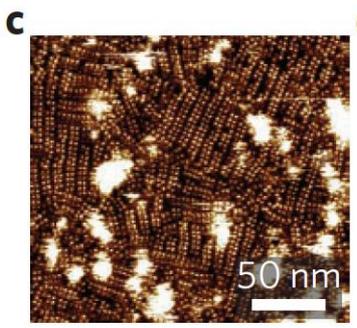
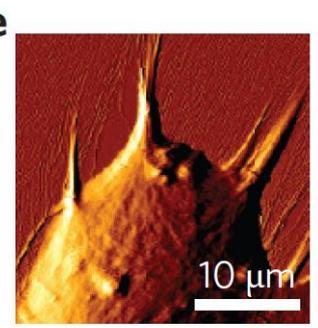
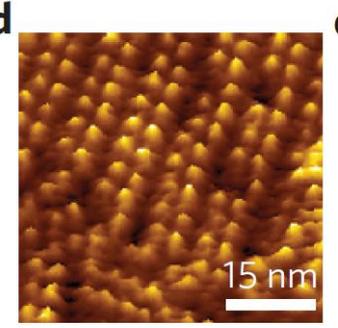
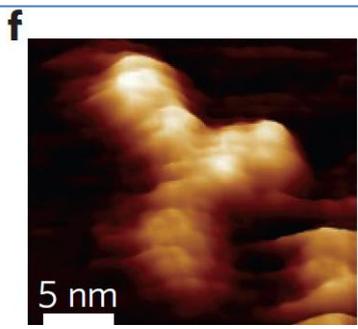


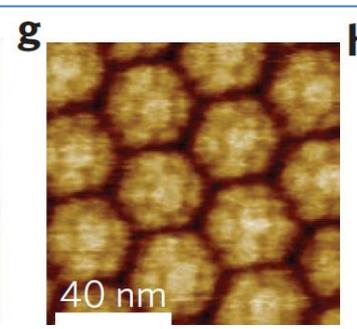
Image of a living SAOS-A2 cell bundling and pulling collagen fibrils coating a substrate.



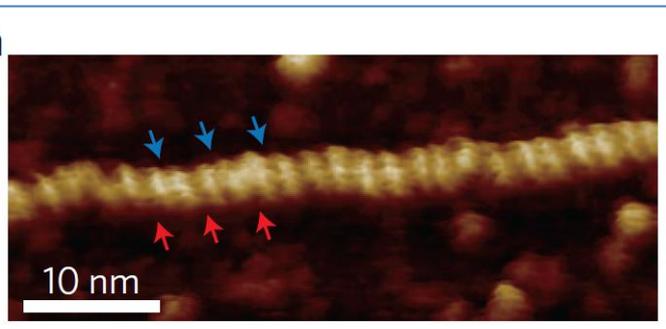
Contact AFM



An IgG antibody absorbed to mica



Single bromo mosaic viruses packed in a crystalline assembly



Circular plasmid DNA imaged in buffer solution

Dynamic AFM

Y. Dufrêne et al., Imaging modes of atomic force microscopy for application in molecular and cell biology, Nature Nanotechnology Review Article, DOI: 10.1038/NNANO.2017.45

AFM

- Fauster S. 138-144
- https://en.wikipedia.org/wiki/Non-contact_atomic_force_microscopy
- https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy
- F. Giessibl, The qPlus sensor, a powerful core for the atomic force microscope, Rev. Sci. Instrum. 90, 011101 (2019); doi: 10.1063/1.5052264