

# INF12: Rasterkraftmikroskopie

(KV5: Bildbearbeitung und Datenauswertung)

Alexander Schwarz

aschwarz@physnet.uni-hamburg.de

Gruppe R (Rastersondenmethoden, Prof. Wiesendanger)

[www.nanoscience.de](http://www.nanoscience.de)

Studium an der UHH (1988)

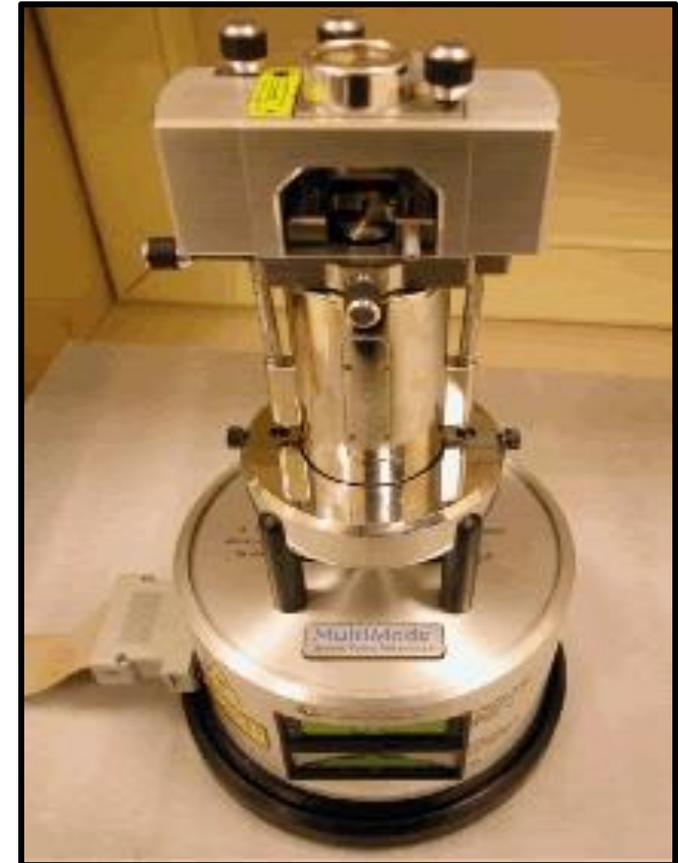
Diplom (1994) und Promotion (1998) an der UHH (Prof. Wiesendanger)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der UHH (Prof. Wiesendanger;

Schwerpunkt Rasterkraftmikroskopie)

## Verwendetes Gerät:

- Nanoscope IV; Erstananschaffung 1993 mit modernen Erweiterungen (die letzte 2021); aber: veralteter Computer notwendig, der nicht mehr am Netz ist → Modernisierung!
- Arbeitspferd: bis ca. 2000 Verwendung für zahlreiche (>20) Diplom- & Doktorarbeiten (hauptsächlich zur Reibung, aber auch EFM & MFM)
- danach: Einsatz in Praktika, sporadisch auch für Kooperationen mit Industrie (Exabyte, Weller, Beiersdorf, ...) & Forschung (UKE zu Prionen, aktuell im EU-Projekt OXiNEMS)



# Ziele, wie ich sie sehe

- Physik begreifen: interessanter und „besser“ als Vorlesungen & Übungen
  - Vorbereitung
  - praktische Durchführung
  - Auswertung
  - Nachbereitung
- Rasterkraftmikroskopie
  - Bedeutung in Wissenschaft & Forschung an Universitäten, MPIs etc.
  - Bedeutung in der Forschung & Entwicklung sowie Qualitätskontrolle in der Industrie
- Wissenschaftliches Arbeiten
  - experimentelles Arbeiten
  - wissenschaftlicher Diskurs (niederschwelliger!)
  - Notizen machen
  - detailliertes Verständnis des Messvorgangs erarbeiten
  - Statistische & systematische Fehler
  - Auswahl der besten Methode zur Messung einer physikalischen Größe aus der Fehlerbetrachtung
  - wissenschaftliche Veröffentlichungen lesen (und dort beschriebene Methoden anwenden)
- Verbindung zu Vorlesungsinhalten und Thematiken, die nicht direkt den Versuch selbst berühren

# Ablauf INF12: Rasterkraftmikroskopie

- Vorbesprechung vor der eigentlichen Versuchswoche (Versuchsablauf, Vorbereitung, Protokoll, Knackpunkte, ...)
- Montag: Einführung
  - Funktionsweise (statischer Modus, Regelkreis, Abbildungsfehler...)
  - Messungen an einer Gitterstruktur (Optimierung der Abbildungsparameter)
  - Datenauswertung (Ebenenausgleich, Linienprofile, ...)
- Dienstag: Graphit & Kräfte
  - Atomare Struktur  $\Leftrightarrow$  Topographie, Messung einatomar hoher Stufen
  - Kraft-Distanz-Kurve (ausführliche Diskussion der relevanten Kräfte)
    - Energielandschaft  $\Leftrightarrow$  Form der Kraft-Distanzkurve (übersprungener Bereich)
    - Bestimmung der Federkonstante und Bestimmung der Adhäsionskraft
- Mittwoch: Dynamischer Modus (Amplitudenmodulationsmodus = Tapping Mode)
  - Funktionsweise (Bewegungsgleichung, Amplituden & Phasenmessung mit Lock-In)
  - Amplitudeneichung auf Graphit
  - Messung im dynamischen Modus an CD (Topogr.  $\Leftrightarrow$  Funktion), Aluminiumfolie (Topogr.  $\Leftrightarrow$  Reflektivität), ...
- Donnerstag: Nachholtag, Restarbeiten, Untersuchung eigener Proben
- Freitag: Seminar

KV5

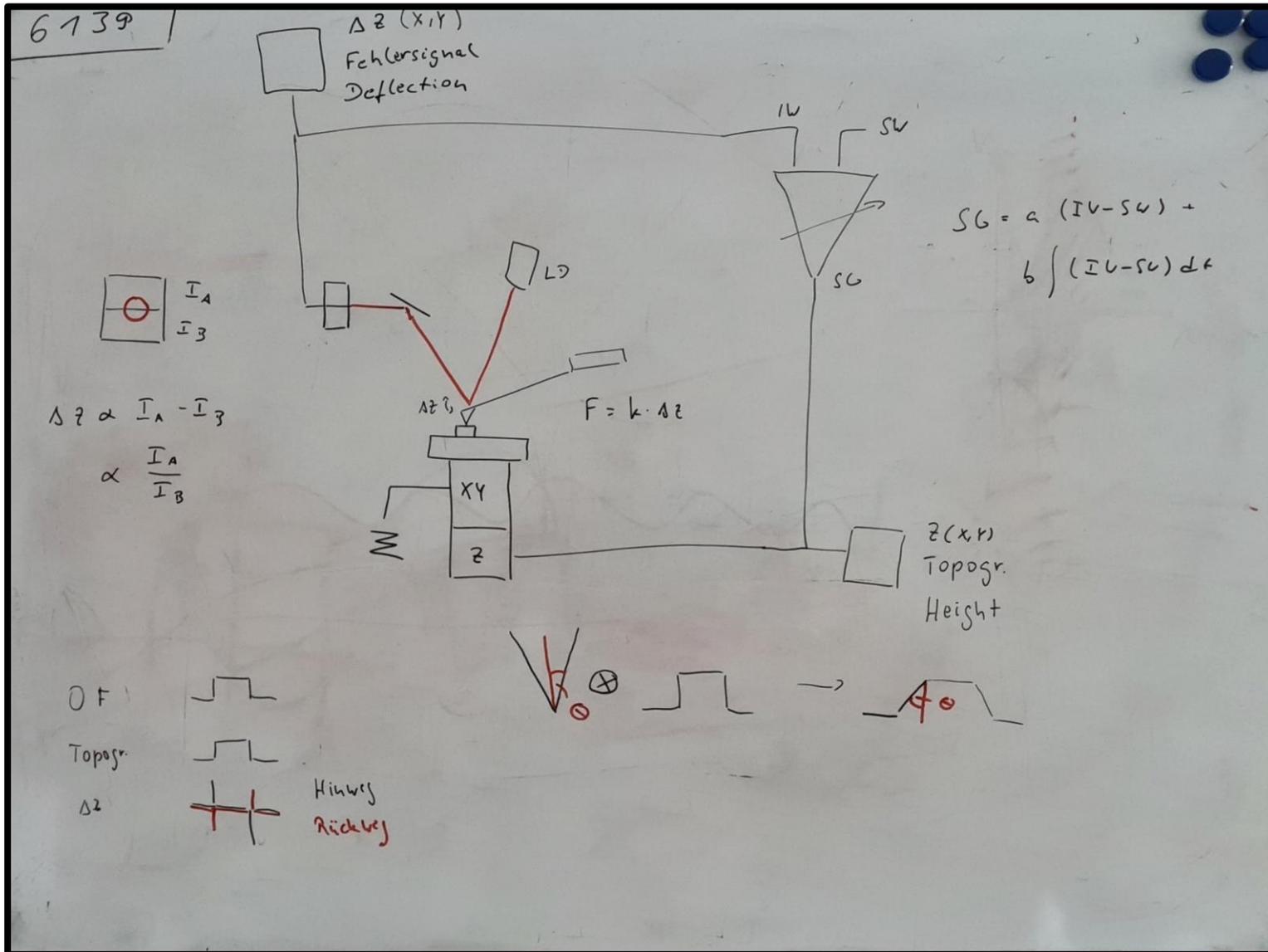
Genauere Datenauswertung kann zuhause erfolgen

# Ablauf KV5: Bildbearbeitung und Datenauswertung:

- Vorbesprechung vor der eigentlichen Versuchswoche (Versuchsablauf, Vorbereitung, Protokoll, Knackpunkte, ...)
- Vormittag: Einführung
  - Funktionsweise der Rasterkraftmikroskope (statischer Modus, Regelkreis, Abbildungsfehler)
  - Messungen eines Eichgitter zur Bestimmung der x- & y-Periodizität sowie der z-Höhe
- Nachmittag: Datenauswertung
  - Ebenenausgleich
  - Linienprofile: Messung der Höhe & Periodizität
  - Histogramm: Messung der Höhe
  - Fourier-Transformation: Messung der Periodizität

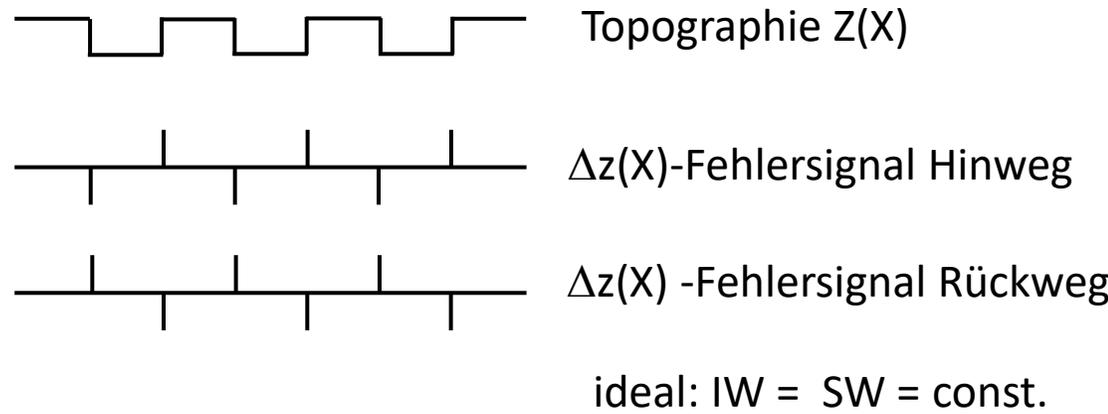
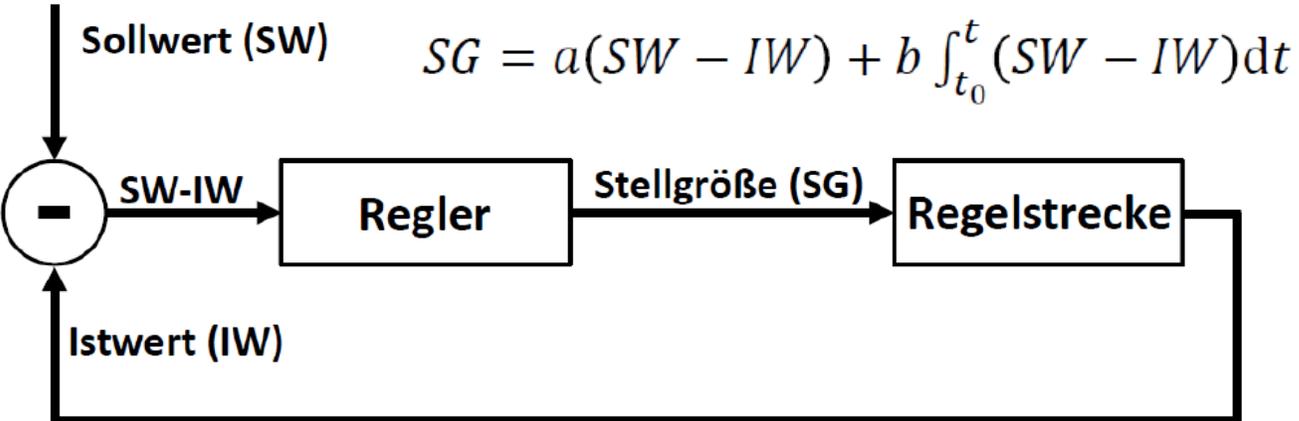
Genauere Datenauswertung kann zuhause erfolgen

# Tafelbild Montag Vormittag

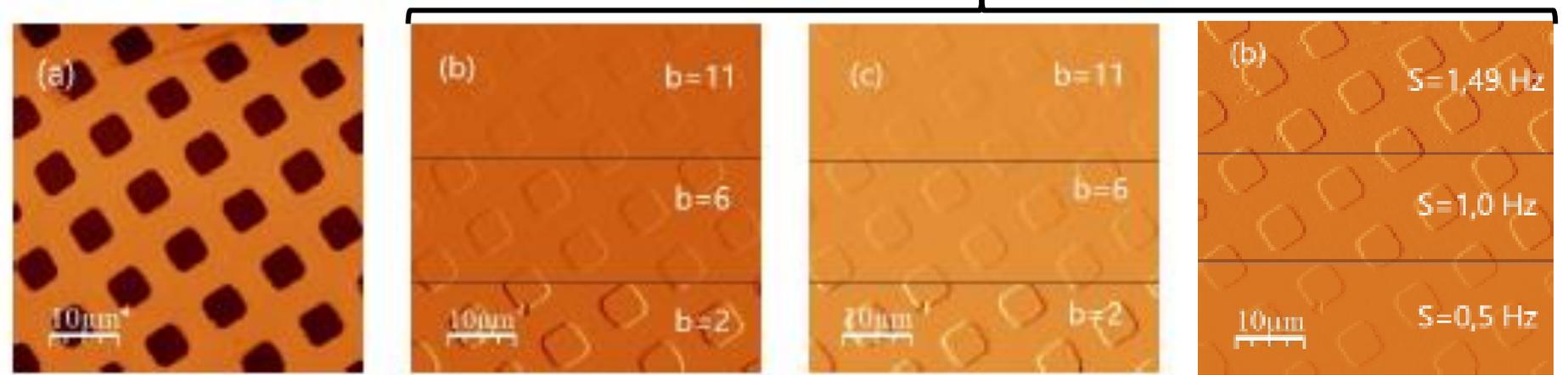


- die Tafelbilder erstellen die Studierenden (ich Sorge dafür, dass sie sachlich richtig sind)
- die Tafelbilder ergeben sich aus unserer Diskussion
- jeden Tag gibt es neue Tafelbilder

# Optimierung des Regelkreis



$\Delta z$ -Auslenkung = Fehlersignal



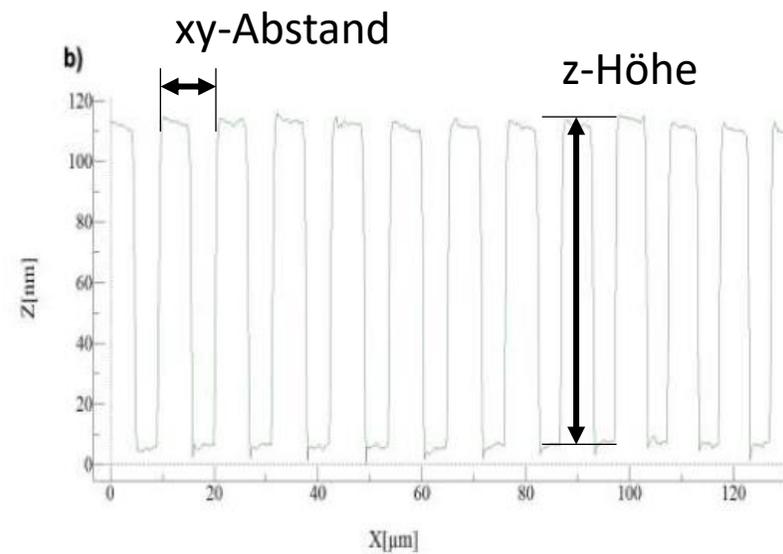
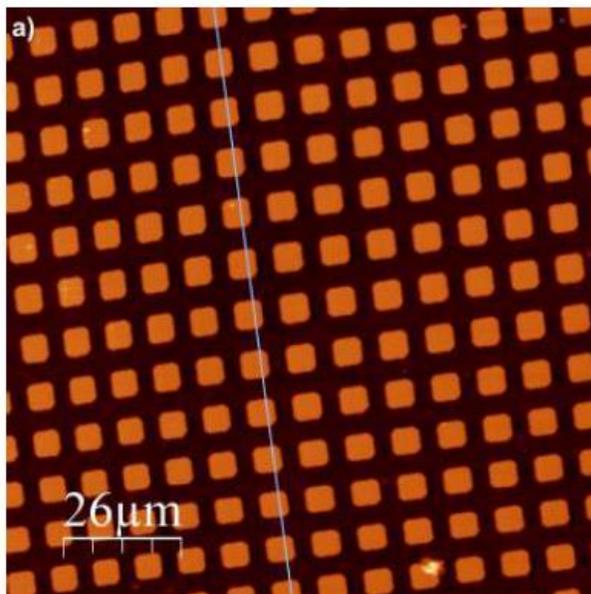
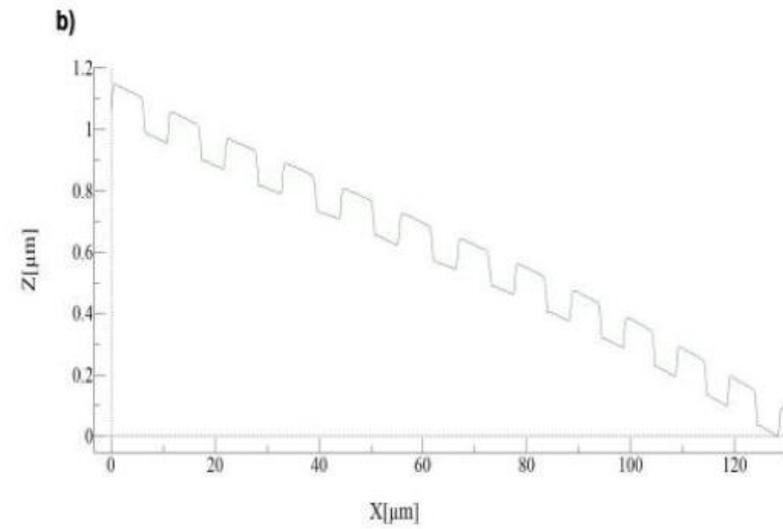
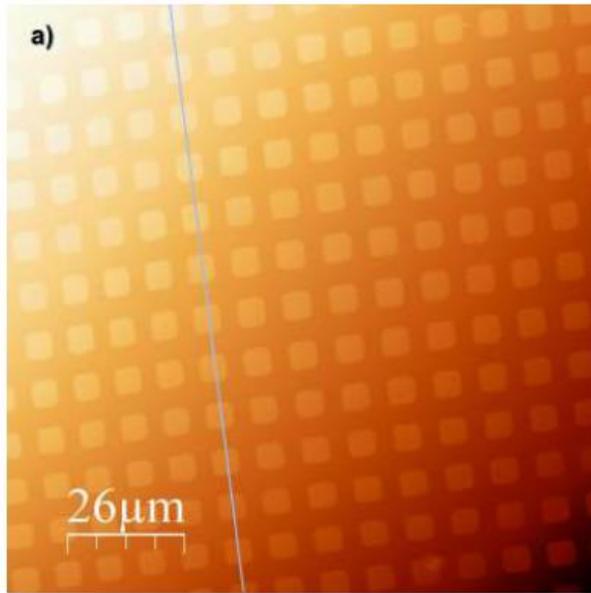
Topographie (Lochgitter)

Hinweg Rückweg

Einfluss der Rastergeschwindigkeit

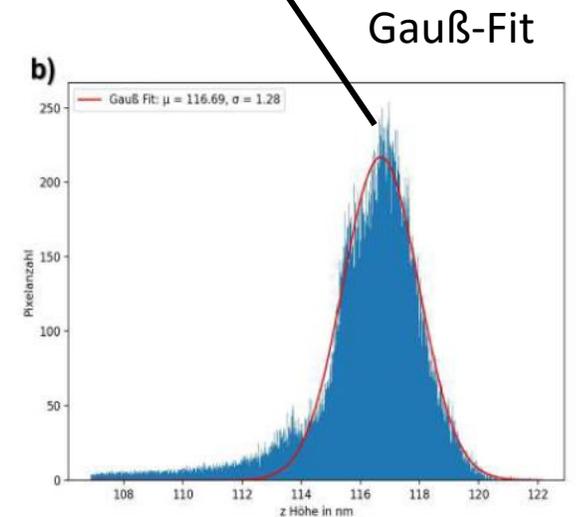
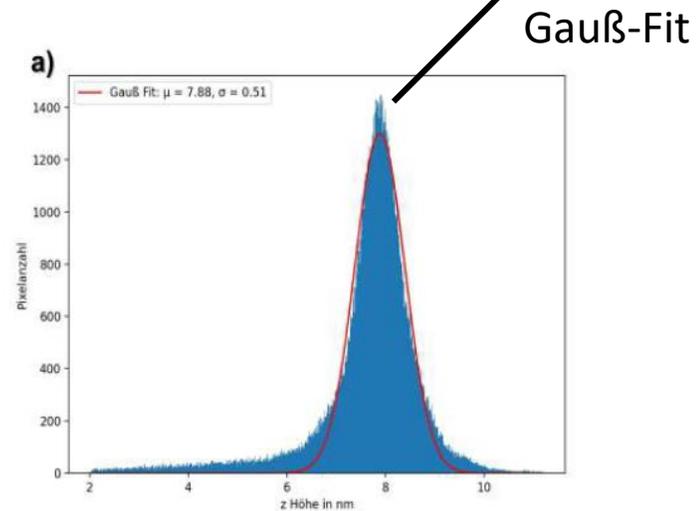
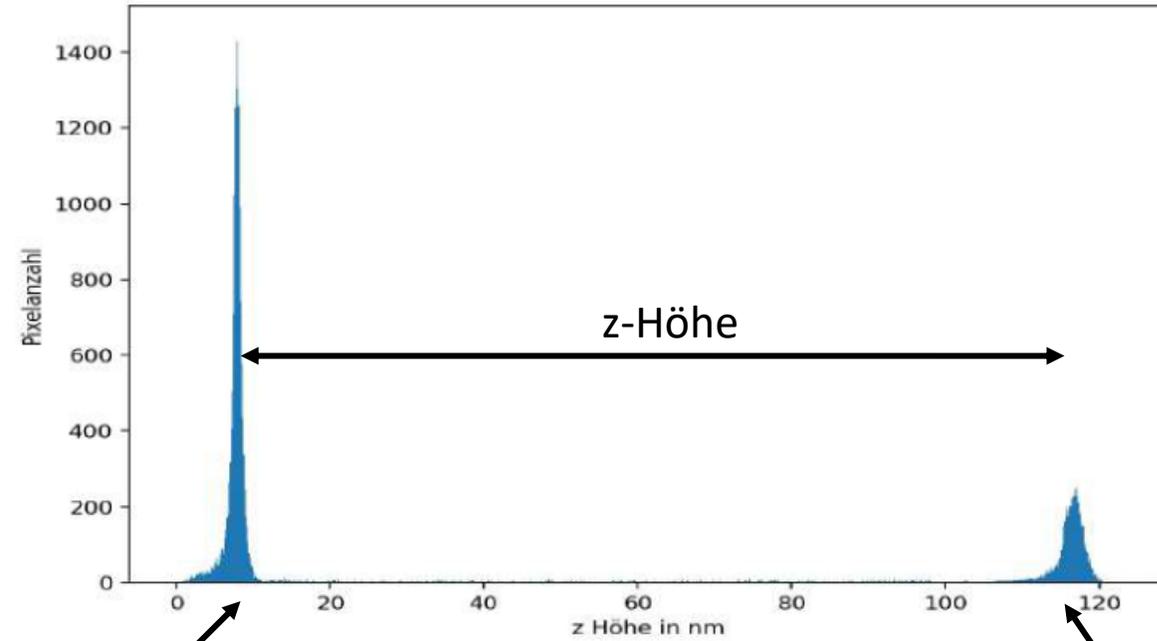
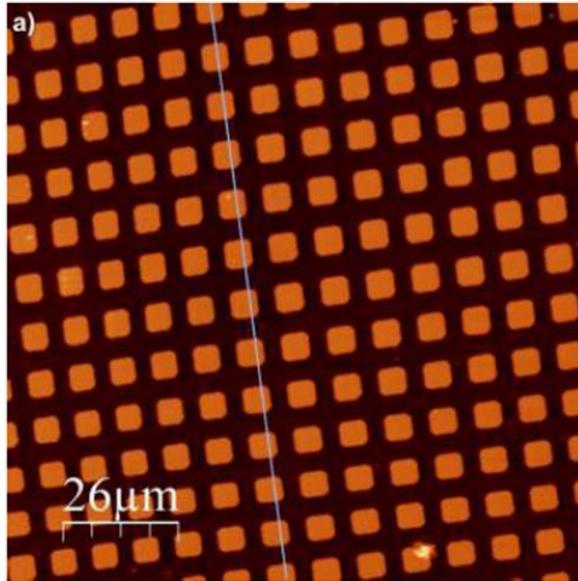
Einfluss der Regelkreisverstärkung

# Ebenenausgleich & Linienprofil

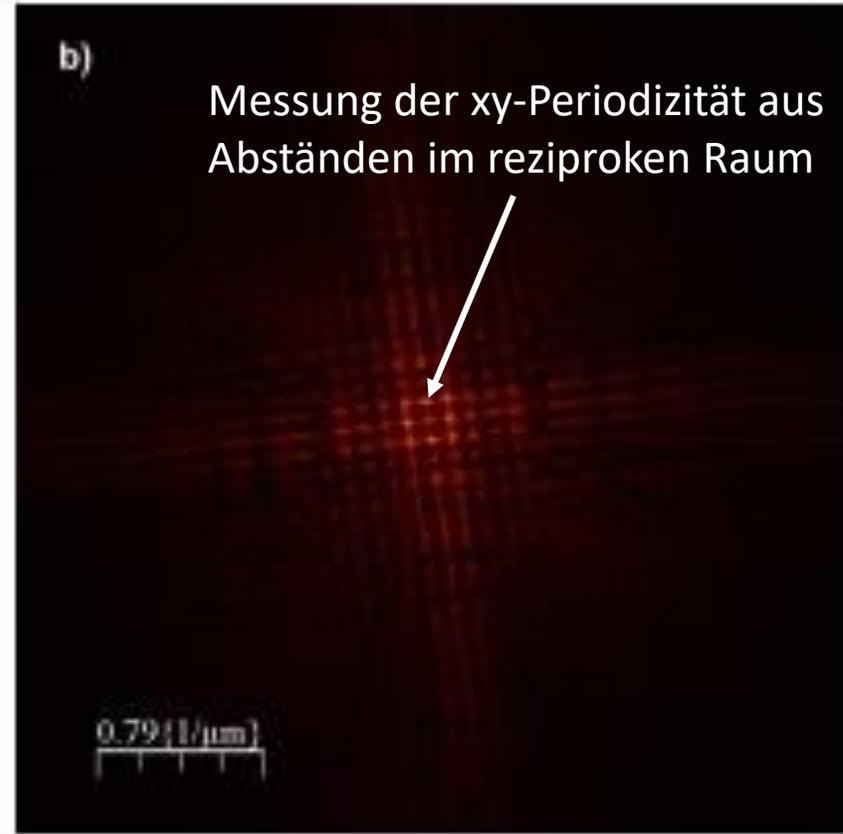
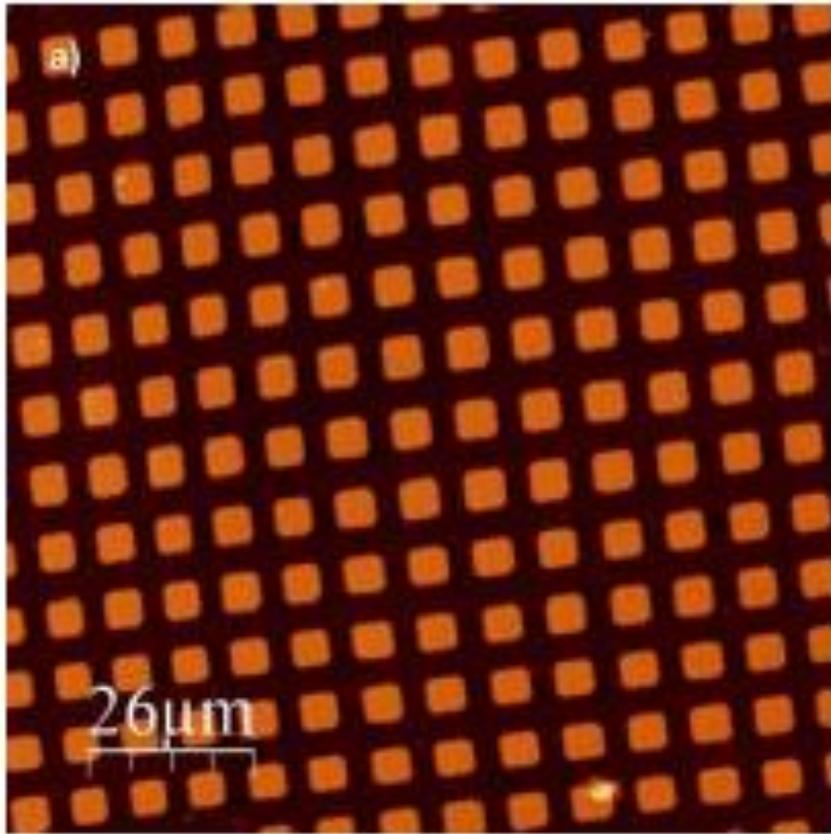


Nachbearbeitung  
der Rohdaten

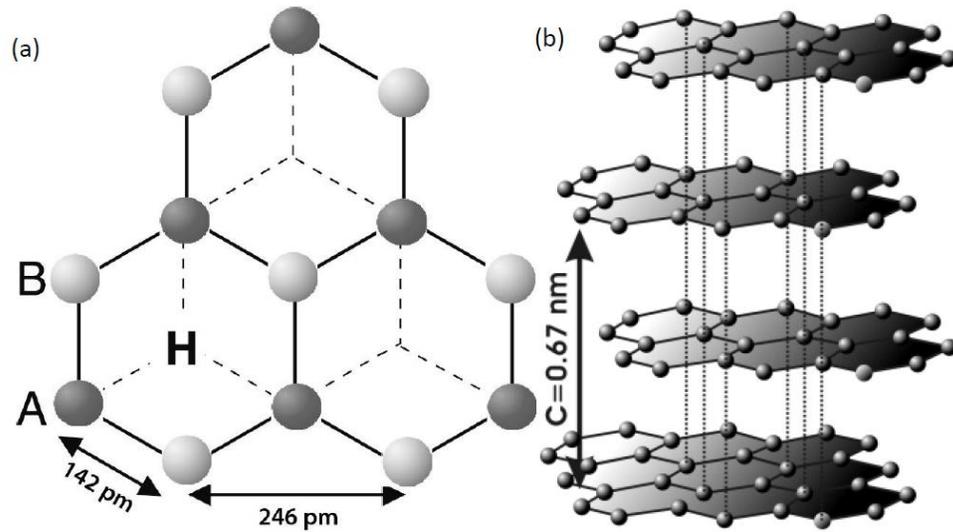
# Histogramm (INF12 & KV5)



# Fourier-Transformation (KV5)

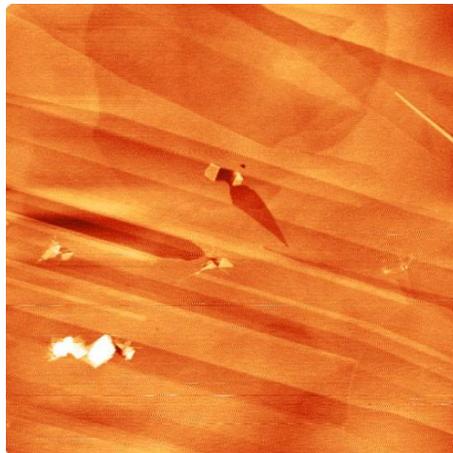


# 2. Tag: Graphit (HOPG)

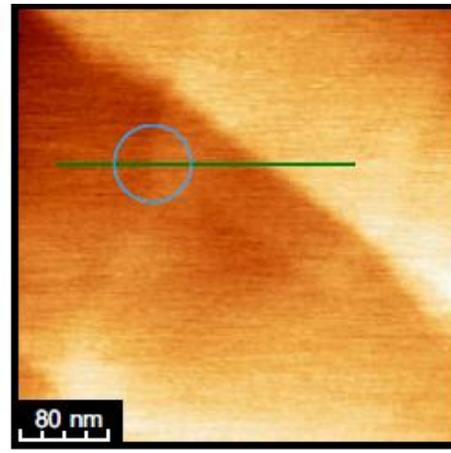


Van der Waals Bindung & kovalente Bindung  
Besetzung der Energieniveaus von elementarem Kohlenstoff  
Unterschied Diamant  $\Leftrightarrow$  Graphit  
Hybridisierung beim Kohlenstoff

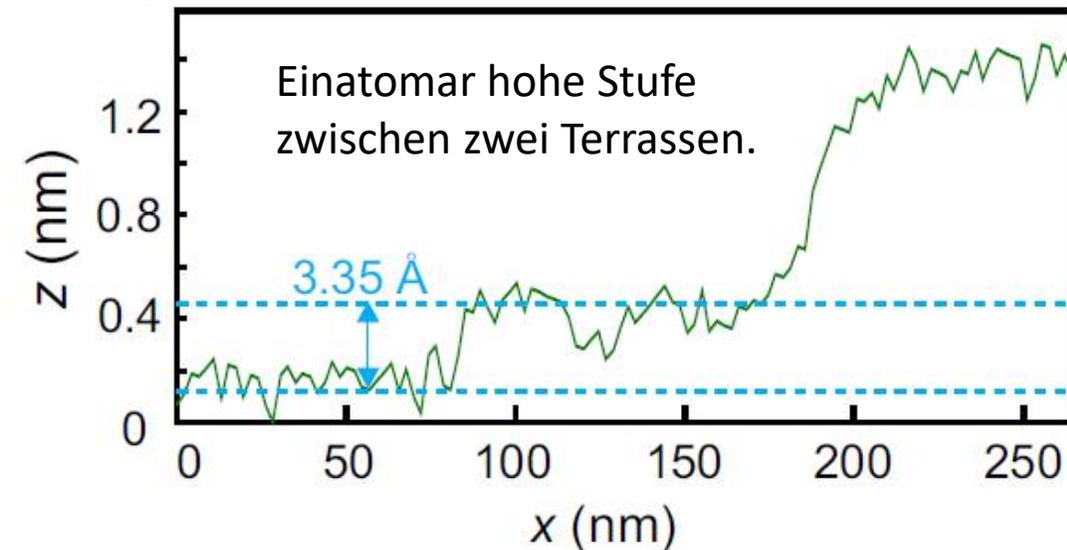
**Stoff aus P III & PIV: steht nicht explizit in der Versuchsmappe**



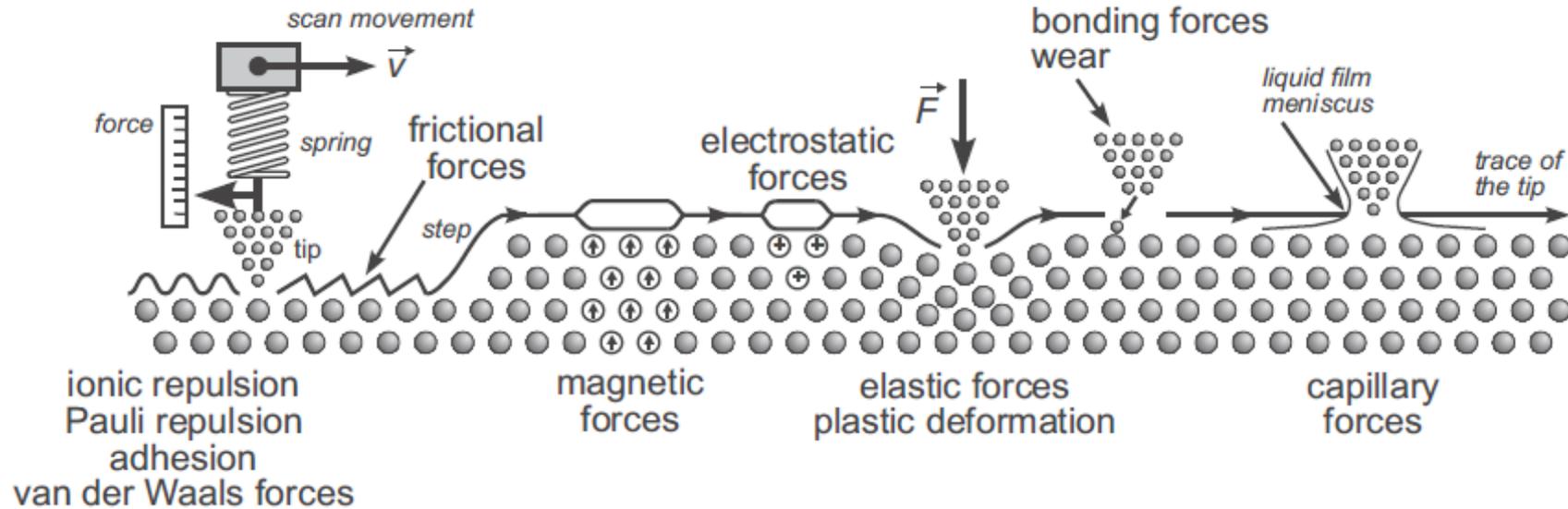
Stufen und Terrassen auf Graphit:  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$



Atomare hohe Stufen auf Graphit:  $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$



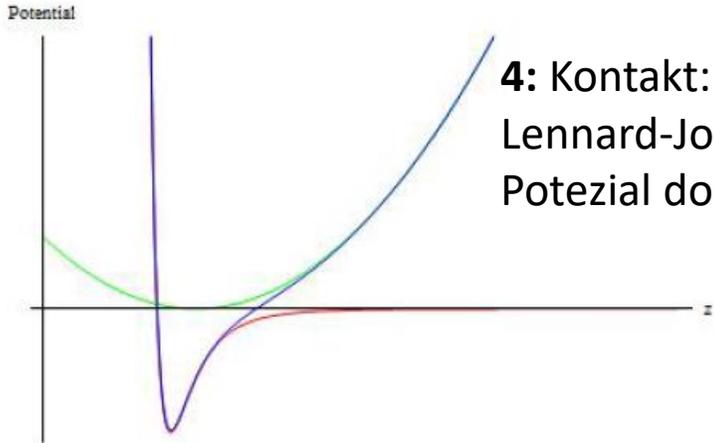
## 2. Tag: Kräfte



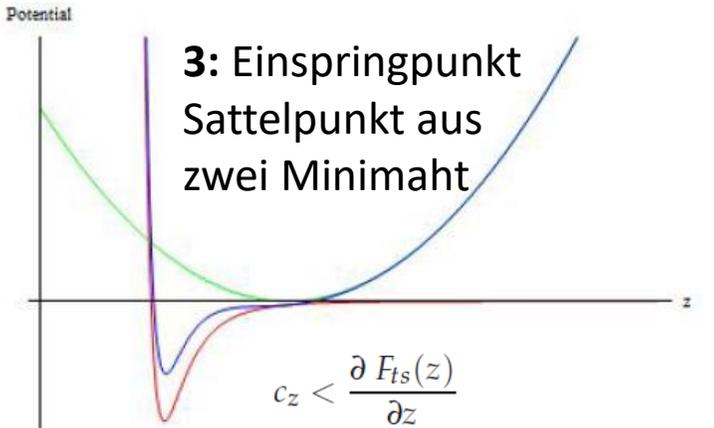
- nicht nur Aufzählung, sondern auch Ursprung, z.B. der van der Waals Kraft
- alles elektromagnetische Kräfte
- minimal detektierbare Kraft (thermisches Limit):  $\frac{1}{2}k_B T = \frac{1}{2}k(\Delta z)^2 \Rightarrow \Delta z_{th} = (k_B T/k)^{1/2} \Rightarrow F_{min} = k \cdot \Delta z_{th} = (k \cdot k_B T)^{1/2}$

**Diskussion geht über das hinaus, was in der Versuchsmappe steht**

# Kraft-Distanz-Kurve

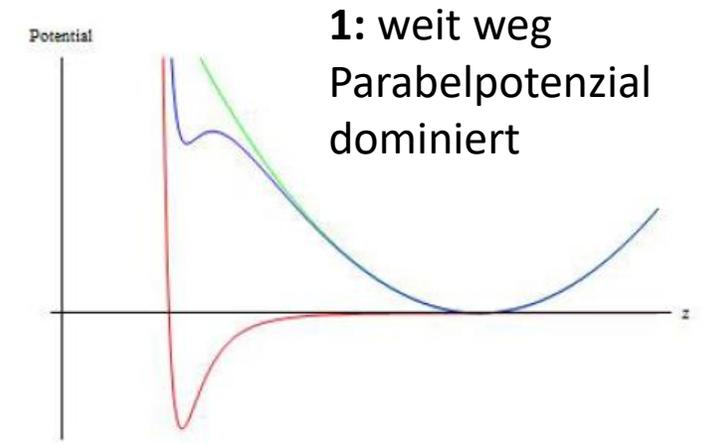
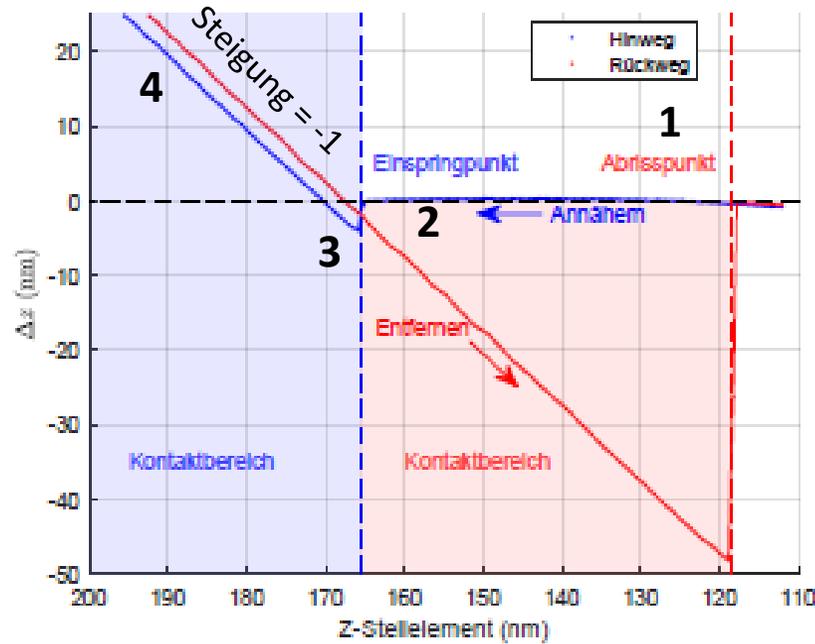


**4:** Kontakt:  
Lennard-Jones-  
Potezial dominiert

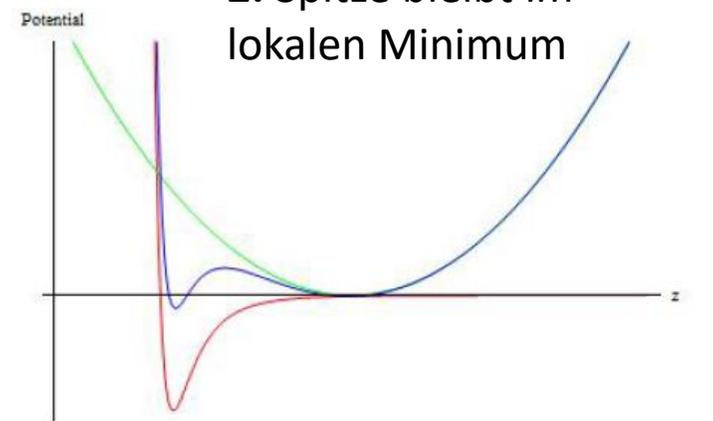


**3:** Einspringpunkt  
Sattelpunkt aus  
zwei Minimaht

$$c_z < \frac{\partial F_{ts}(z)}{\partial z}$$



**1:** weit weg  
Parabelpotenzial  
dominiert



**2:** Spitze bleibt im  
lokalen Minimum

Vorbereitungsaufgabe: Berechnung der Potenziallandschaft

# Bestimmung der Federkonstanten $k$

## Calibration of rectangular atomic force microscope cantilevers

John E. Sader<sup>a)</sup>

*Department of Mathematics and Statistics, University of Melbourne, Parkville, 3052 Victoria, Australia*

James W. M. Chon and Paul Mulvaney

*School of Chemistry, University of Melbourne, Parkville, 3052 Victoria, Australia*

(Received 20 April 1999; accepted for publication 1 July 1999)

A method to determine the spring constant of a rectangular atomic force microscope cantilever is proposed that relies solely on the measurement of the resonant frequency and quality factor of the cantilever in fluid (typically air), and knowledge of its plan view dimensions. This method gives very good accuracy and improves upon the previous formulation by Sader *et al.* [Rev. Sci. Instrum. **66**, 3789 (1995)] which, unlike the present method, requires knowledge of both the cantilever density and thickness. © 1999 American Institute of Physics. [S0034-6748(99)04210-0]

- die Publikation ist nicht Bestandteil der Versuchsmappe
- ausführliche Diskussion des Inhalts im Rahmen des Versuchs

aus Geometrie & Elastizitätsmodul

$$Eh^3 = k \frac{4L^3}{b}$$

(aus Massenträgheitsmoment eines Quaders)

aus der Eigenfrequenz des Federbalkens (Cantilever)

im Vakuum:  $\omega_{vac}^2 = \frac{k}{m}$

in einem viskosen Medium (z.B. Luft):

aus:  $m\ddot{z} + bz\dot{z} + kz = 0 \Rightarrow \ddot{z} + \frac{b}{m}z\dot{z} + \frac{k}{m}z = 0$

$$k = 0.1906\rho_f b^2 L Q_f \Gamma_i(\omega_f) \omega_f^2$$

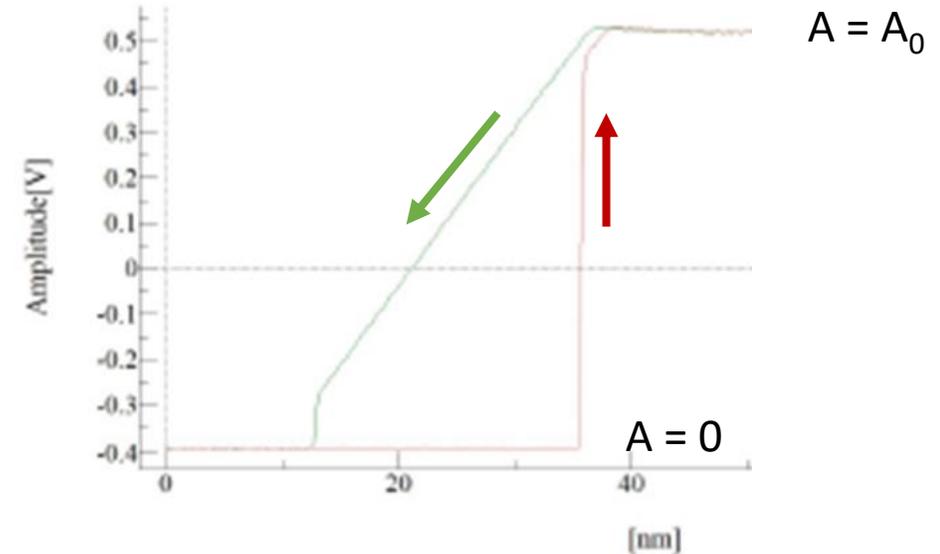
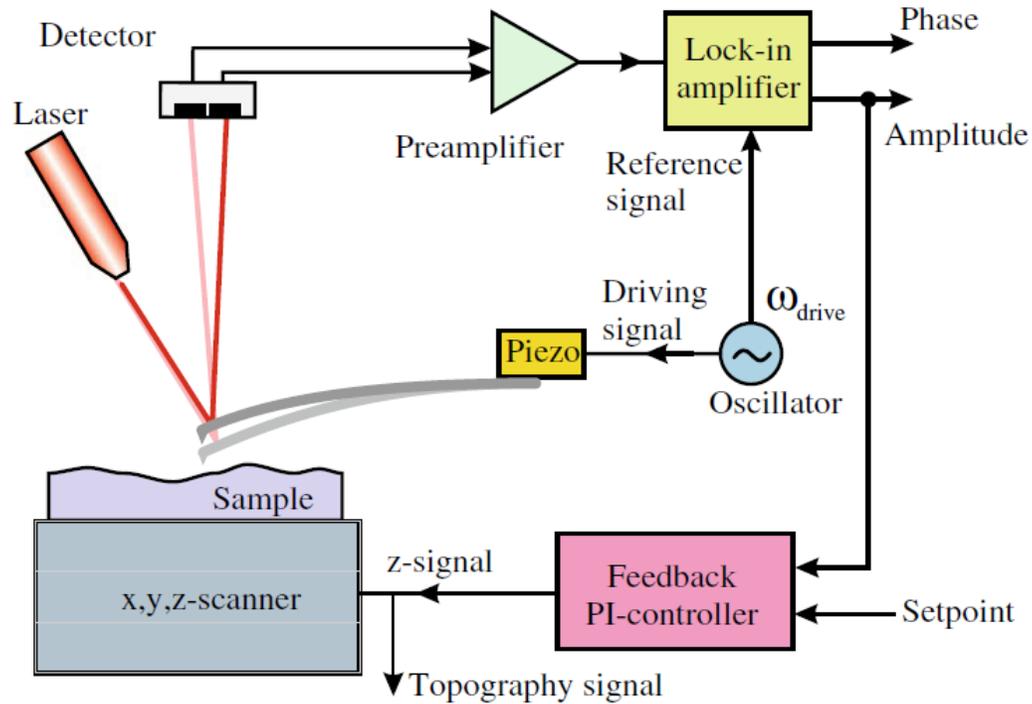
Federbalken ist keine punktförmige Masse  $m$  an masselose Feder!

Reibungseinfluss modifiziert Eigenfrequenz  $\omega$ !

$$m_{eff} = \frac{1}{4}m = M_e m \text{ \& } m = \rho V$$

$$\Rightarrow k = M_e \rho_c b h L \omega_{vac}^2$$

# 3. Tag: Amplitudenmodulationsmodus (Tapping Mode)

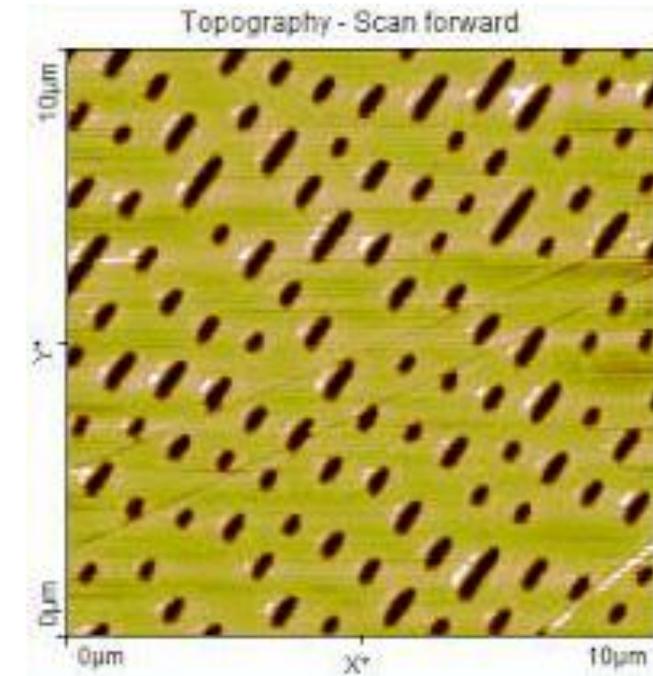
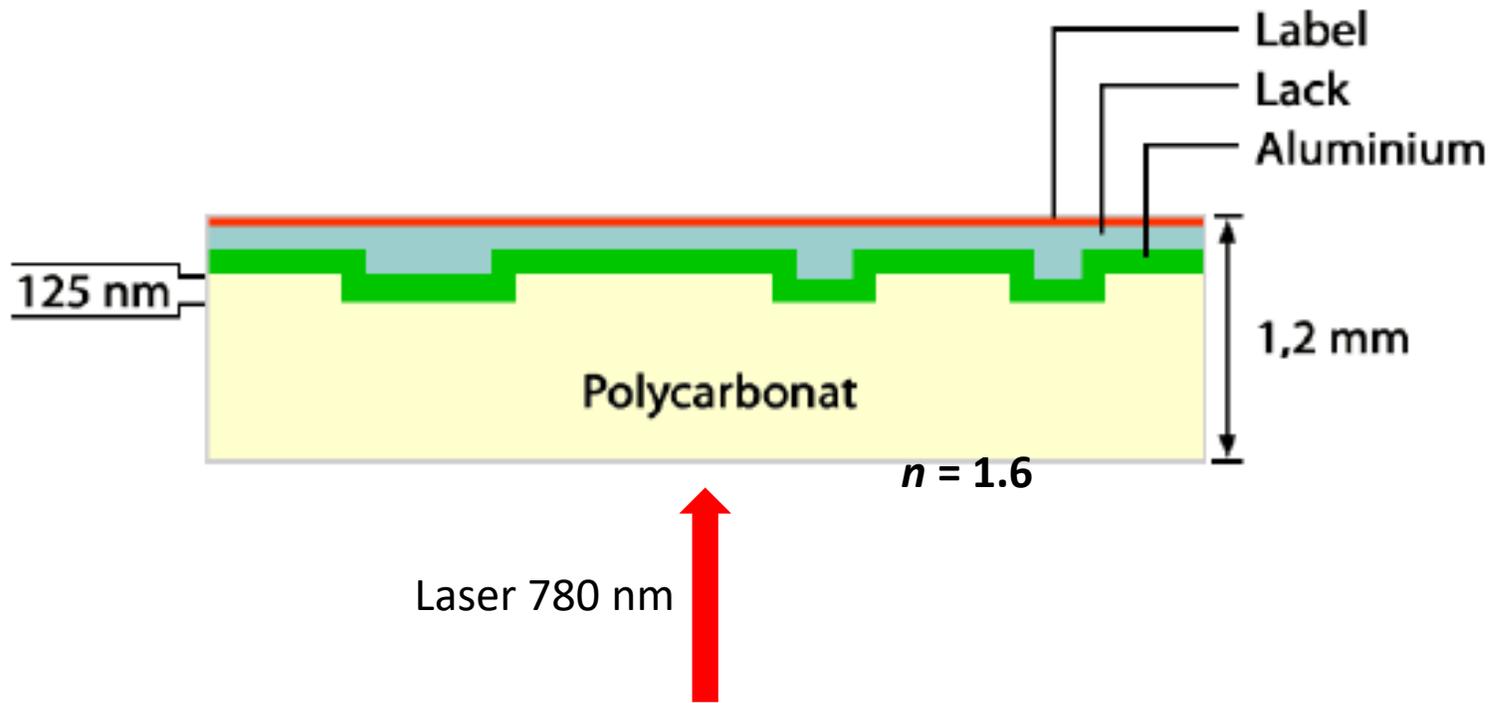


- Hysterese wg. Adhäsionskraft
- Amplitudeneichung aus Steigung und bekannter Z-Eichung

$$m\ddot{z}(t) + \frac{2\pi f_0 m}{Q_0} \dot{z}(t) + c_z (z(t) - d) + = \underbrace{a_d c_z \cos(2\pi f_d t)}_{\text{external driving force}} + \underbrace{F_{ts} [z(t), \dot{z}(t)]}_{\text{tip-sample force}}$$

Unterschiede/Vorteile dynamischer Modus  $\Leftrightarrow$  statischer Modus

# Neue Probe: Z.B. Compact Disk (CD) (oder Aluminiumfolie, Haar, ...)



CD Oberflächenstruktur  $\Leftrightarrow$  digitale Datenspeicherung

# Probleme

## generelle Probleme

- Durcharbeiten vs. Lesen der Versuchsmaterialien
- Notizen machen
- Protokoll
  - Verschriftlichung ohne roten Faden & generische Kapitelüberschriften (Einleitung, Theorie, Durchführung, ...)
  - Abbildungen: Bildunterschriften, Bezug in Haupttext, ...
  - signifikante Stellen bei Fehlerangaben
- Versuch wird während der BSc-Arbeit durchgeführt
- keine „Struktur der Materie“ Vorlesung
- Plagiate (vorgekommen) & KI-generierte Texte (ChatGBT-Verdacht in INF13)

## versuchsspezifische Probleme

- Rechnung der Aufgabe aus der Vorbereitungsmappe wurde nicht durchgeführt ( $\Rightarrow$  Nachbearbeitung notwendig)
- wenig Eigeninitiative (Messung „eigener“ Proben)
- Kräfte werden nur aufgezählt aber wenig darüber hinaus gehendes Wissen
  - vdW: Ursprung = fluktuierender Dipol; warum  $1/r^6$  Abhängigkeit; Einfluss der Spitze-Probe Geometrie
  - elstat. WW zwischen metallischer Spitze und Probe  $\Leftrightarrow$  Bandstruktur, Lage Fermi-Energie
  - ...

## von uns „erzeugte“ Probleme

- zu große Erwartungshaltung meinerseits und von der Praktikumsleitung
- Enttäuschung über schlechte Vorbereitung (schlechte Note reicht - schlechte Stimmung nicht zielführend ...)
- Altersunterschied

# Grade Your Experiment

Theory / preparation	Setup / experimental	Data taking	Analysis	Protokol
PI & PIII	primitiv	Knöpfe drücken	einfach	?

- alle 5 Aspekte sind einfach – die Studierenden können es nur nicht,
  - weil sie genau das Lernen sollen
  - es noch nie gemacht haben
- diese Tabelle sollten die Studierenden ausfüllen ⇒ **wir brauchen eine studentische Evaluation**

**Ende**