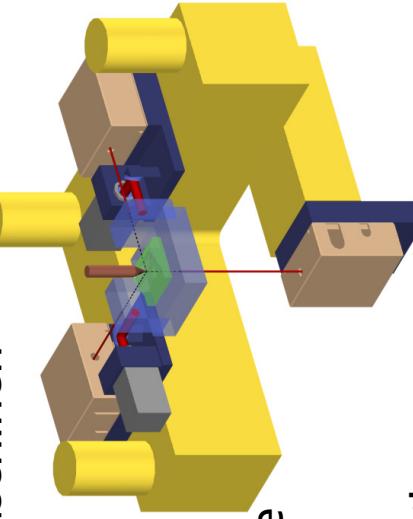


Einsatz der Bildverarbeitung bei der Auswertung von AFM-Daten

Dipl.-Ing. T. Machleidt

PD Dr.-Ing. habil. K.-H. Franke

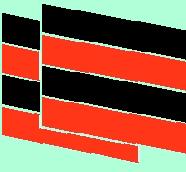
Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung / TU-Ilmenau
SFB 622 „Nanopositionier- und Nanomessmaschinen“



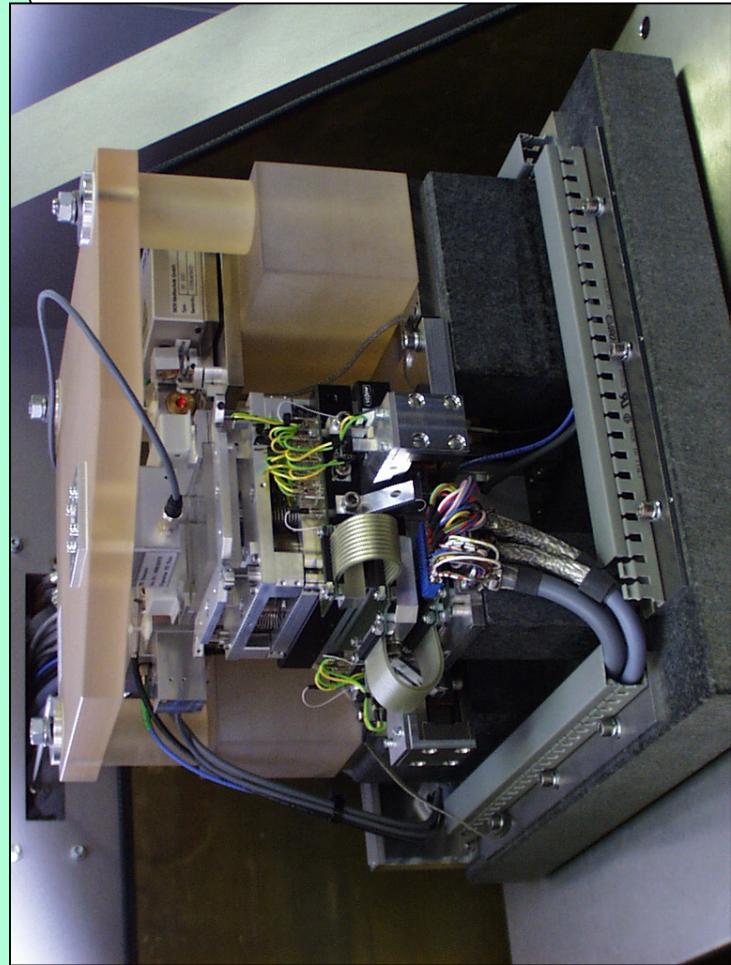
Gliederung:

- Informationen zur Nanomessmaschine
- Erläuterung des Detektionssystems
- Morphologische Tastspitzenrekonstruktion
- Zusammenfassung

TU Ilmenau
Leitung Prof. Jäger
TMWFK

SIOS 
Meßtechnik GmbH

Nanopositionier- und Nanomessmaschine



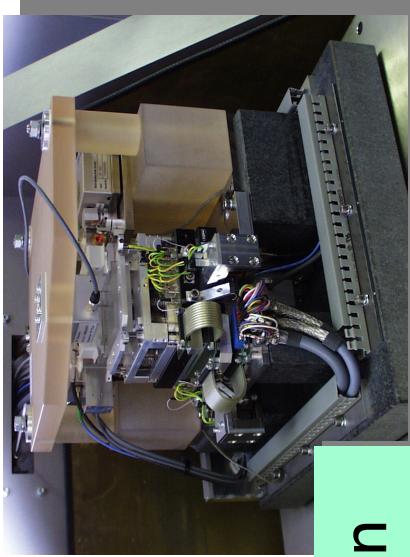
- Seit 1996 durch TMWFK gefördert
- 2000 konnte erste Maschine geliefert werden
- Seit Mitte 2002 SFB an der TUI
- Anfang 2003 Thüringer Forschungspreis 2002 verliehen

25x25x5mm³
Auflösung 0.1nm

Einsatz der Bildverarbeitung bei der Auswertung von AFM-Daten

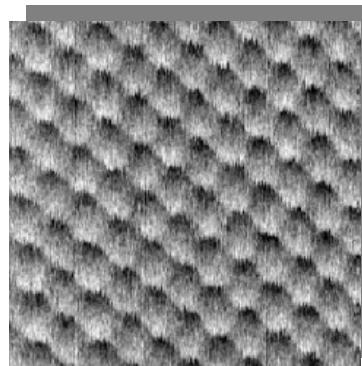
NMM
25x25x5mm³
Auflösung 0.1 nm

Nanomessmaschine



Ziel?
Aufgabe?

Vermessung von Oberflächen
im Nanometerbereich
(z.B. 25x25x5mm³, Auflösung von ca. 0.1 nm)



Anforderungen

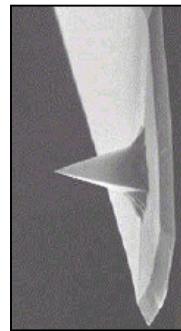
an die eingesetzte
Hardware

an die Messdaten-
erfassung und
-verarbeitung

Welches Detektionssystem soll eingesetzt werden?



Rasterkraftsensor (AFM)

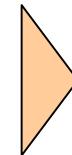
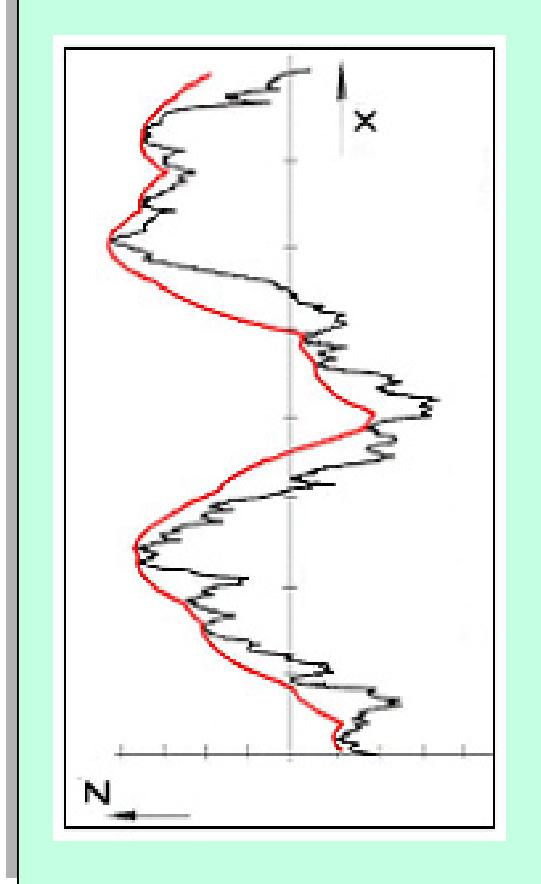
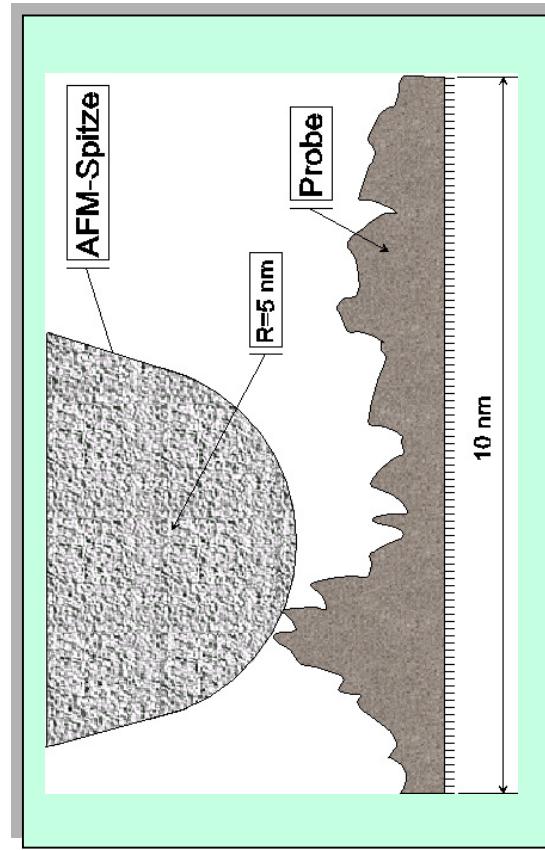


Messprinzip der Rasterkraftmikroskopie

- Taster wird mit Probe in Kontakt gebracht
 - Zentrierung des Lasers am Detektor
 - Probe wird zeilenweise durch Piezomechanik unter dem Taster durchgeführt
 - Konstanthalten der durch Cantilever ausgeübten Kraft (konstante Biegung)
 - Regelung über Laser am Detektor
 - geregelte Z-Größe ergibt Höheninformation der Probe
-
- The diagram illustrates the optical detection principle of an AFM. A red laser beam is directed onto a mirror labeled 'Spiegel'. The beam is reflected and passes through a green rectangular component labeled 'Detektor'. A yellow arrow labeled 'Sonde' points towards a blue cylindrical probe tip labeled 'Probe'. The probe tip is attached to a vertical cylinder labeled 'Piezokeramik'.

Einsatz der Bildverarbeitung bei der Auswertung von AFM-Daten

Abtastung der Oberfläche mit einem Rasterkraftsensor (AFM)

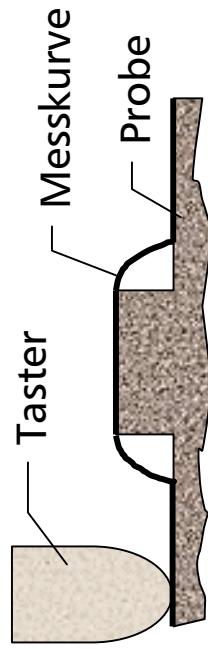


Analyse der Wechselwirkungen zwischen
Probe und Rasterkraftsensor

Analyse der Wechselwirkungen zwischen Probe und RKS

Filterwirkung des Tasters

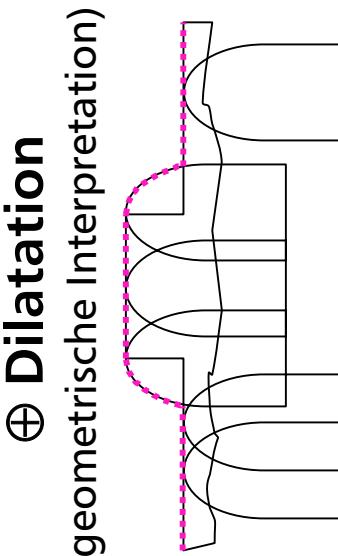
Abbildungsprozess kann durch
mathematische Morphologie
beschrieben werden



Abbildungsfunktion = Dilatation
(Vereinigungsmenge $\hat{\wedge}$ Max Operator)

$$I = S \oplus P$$

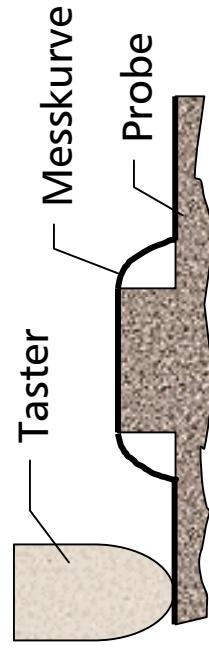
I – Bild (Messwerte)
S – Probenoberfläche
P – gespiegelte Tastspitze



Analyse der Wechselwirkungen zwischen Probe und RKS

Filterwirkung des Tasters

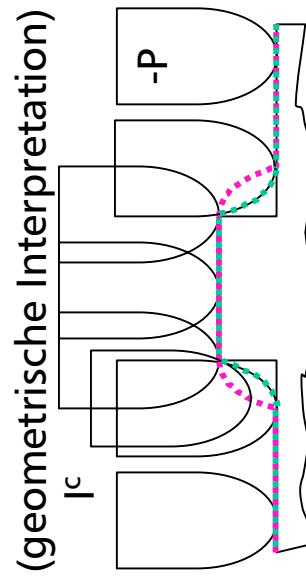
Abbildungsprozess kann durch mathematische Morphologie beschrieben werden



Abbildungsfunktion = Dilatation
(Vereinigungsmenge $\hat{\cup}$ Max Operator)

$$I = S \oplus P$$

I – Bild (Messwerte)
S – Probenoberfläche
P – gespiegelte Tastspitze



Oberflächenrekonstruktion = Erosion
(Schnittmenge $\hat{\cap}$ Min Operator)

$$S_r = I \ominus P = [I^c \oplus (-P)]^c$$

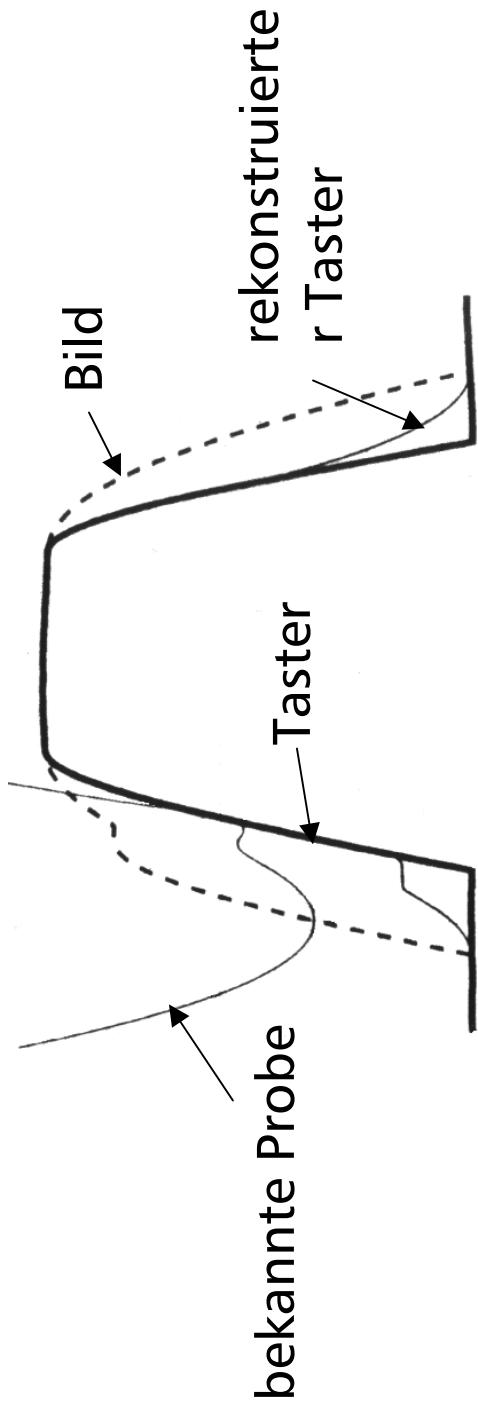
S_r – rekonstruierte Probenoberfläche
 I^c – Bereich oberhalb des Bildes

Voraussetzung für die Rekonstruktion ist die Kenntnis über die reale Spitzenform

Verfahren zur Rekonstruktion

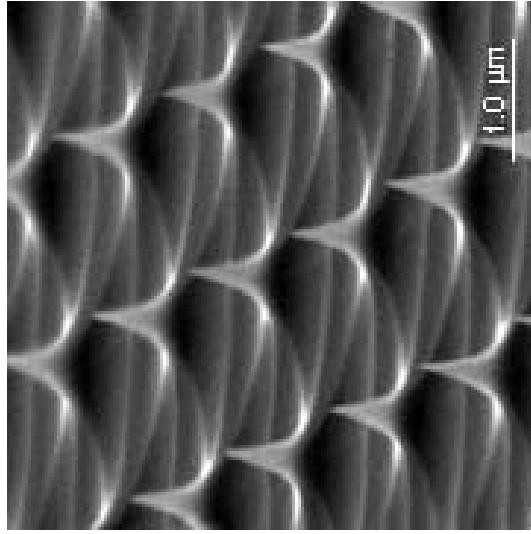
Known Tip Characterizer:

- aus morphologischer Sicht sind Probe und Taster bei der Entstehung des Bildes völlig gleichwertig (Kommutativität der Dilatation)
-> das Problem der Rekonstruktion des Tasters ist gleichwertig dem der Rekonstruktion der Probe
- Ableitung der Form des Tasters aus Geometrie der Probe und Bild der Messung -> Erosion Bild mit der Probe

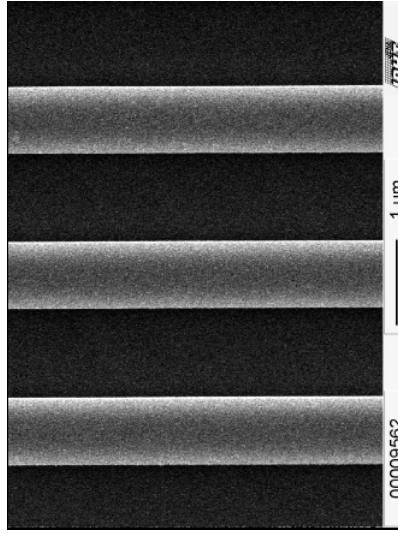


Verfahren zur Rekonstruktion

Known Tip Characterizer:



Kalibriernormal TGT01



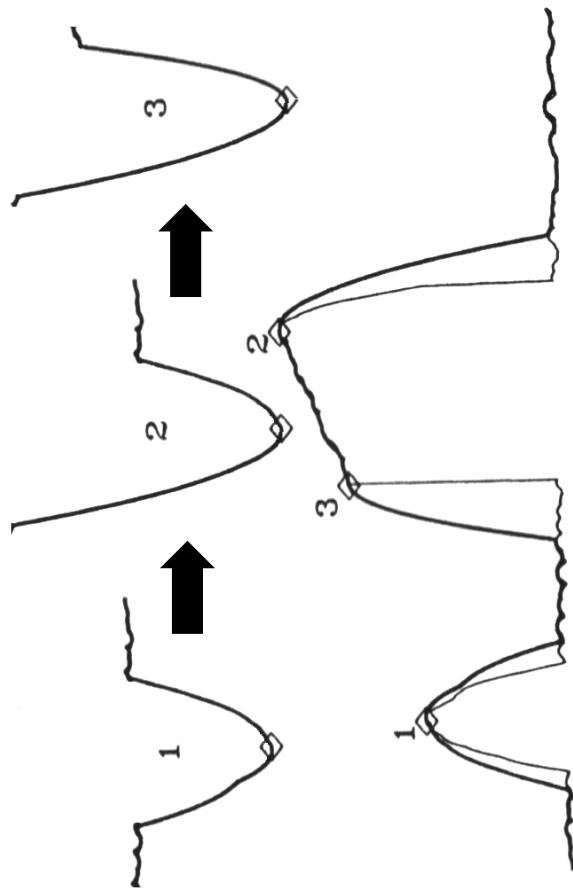
Kalibriernormal vom IPHT

- geforderte Probeneigenschaften
 - hohe steile abgegrenzte Strukturen, um die Geometrie des Tasters möglichst gut abzubilden
 - wechselwirkungsbezogene Eigenschaften sollten bekannt sein
 - gute Reproduzierbarkeit
- Nachteile des Verfahrens
 - finden geeigneter Probengeometrien
 - Materialabhängigkeit der Rekonstruktion
 - Anfälligkeit gegen Rauschen und andere Bildstörungen

Verfahren zur Rekonstruktion

Blind Tip Estimation:

- bestimmt die Tasterform nur aus dem Bild der Messung
- Grundidee:
 - Taster hat gegenüber der Probe geringe Ausmaße
-> voneinander unabhängige Bildbereiche
 - jeder Bildbereich muss von Taster erzeugbar sein
-> Beschränkung der möglichen Tasterform
 - sukzessive Einengung der Tasterform



Verfahren zur Rekonstruktion

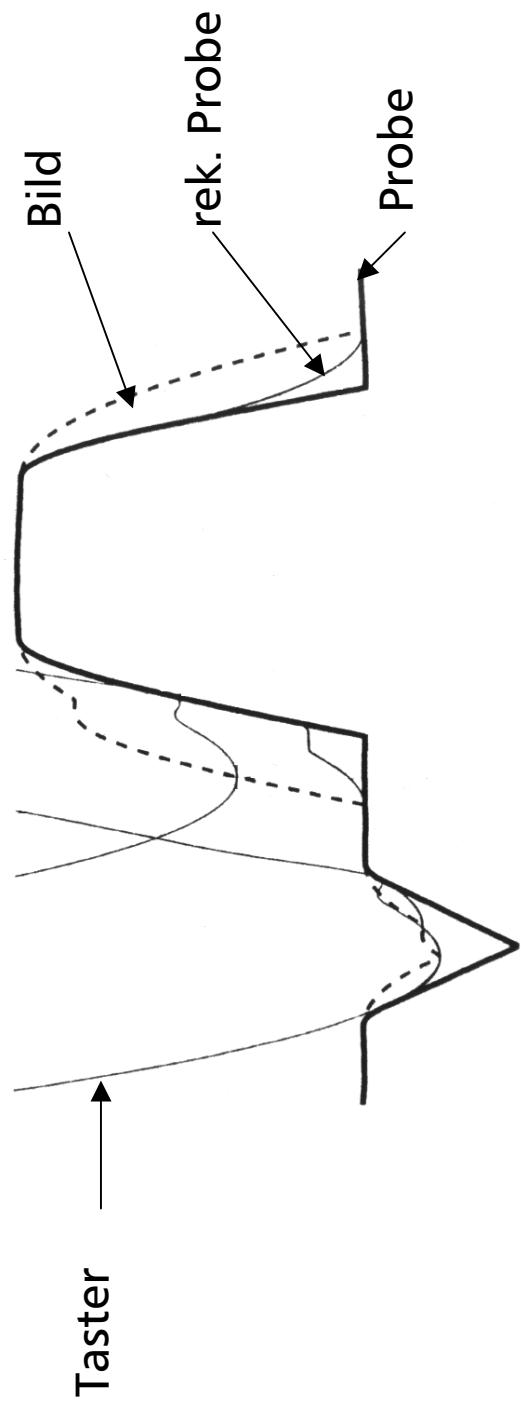
Blind Tip Estimation:

- Forderungen
 - hohe steile abgegrenzte Strukturen in der Probe
 - die lateralen Abmessungen des Tasters P_0 ist so zu wählen, dass Bereiche die auch mit der Oberfläche in Kontakt waren, nicht ausgeschlossen werden
 - die lateralen Abmessungen des Tasters P_0 müssen im Verhältnis zum Bild klein gewählt werden (Rechenzeit)
- Nachteile
 - die gemessene Probe verfügt oft nicht über günstige Oberflächenkonturen
 - Anfälligkeit gegen Rauschen und andere Bildstörungen

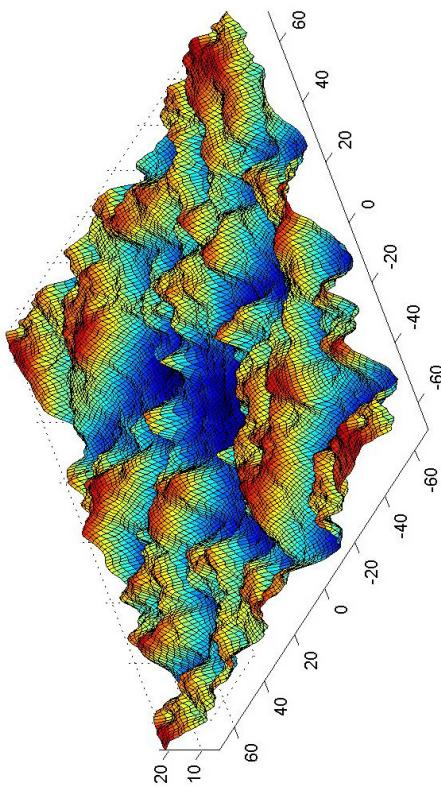
Verfahren zur Rekonstruktion

Rekonstruktion der Probe:

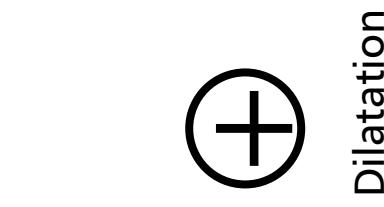
- Rekonstruktion durch Erosion Bild mit Tasterschätzung
- Ergebnis der Tasterrekonstruktion ist eine obere Abschätzung des realen Tasters -> Rekonstruktion der Probe ist eine Untere Abschätzung der eigentlichen Oberfläche
- Bereiche in denen der Taster mehr als einen Kontaktpunkt hatte, können nicht rekonstruiert werden



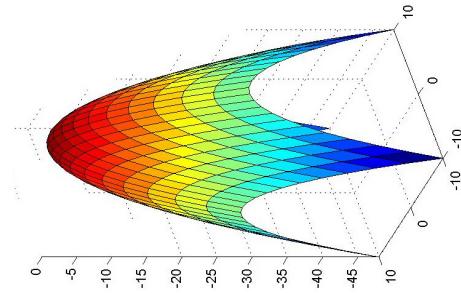
Realisierung der Abbildungsfunktion / Blind Tip Estimation



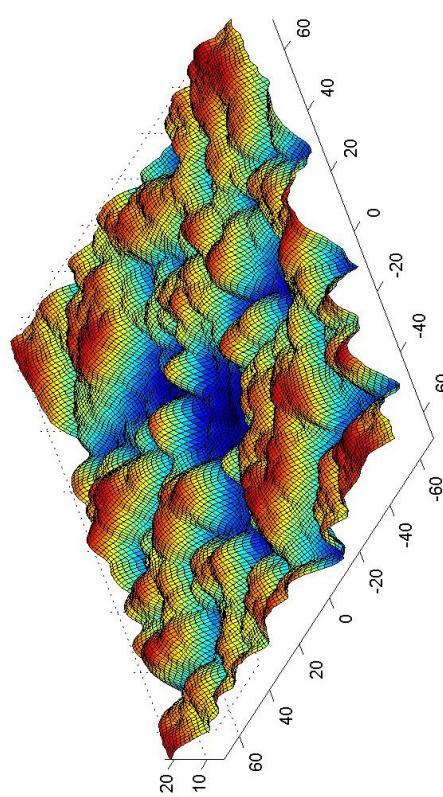
Original Oberfläche (Probe)



Dilatation



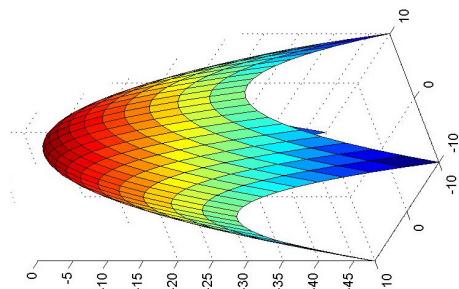
Vorgegebener Taster



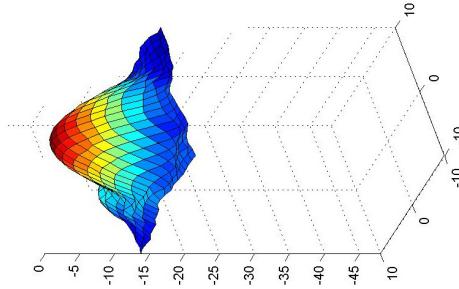
Ergebnis der Dilatation (Messergebnis)

Alle Koordinatenangaben sind in Pixel

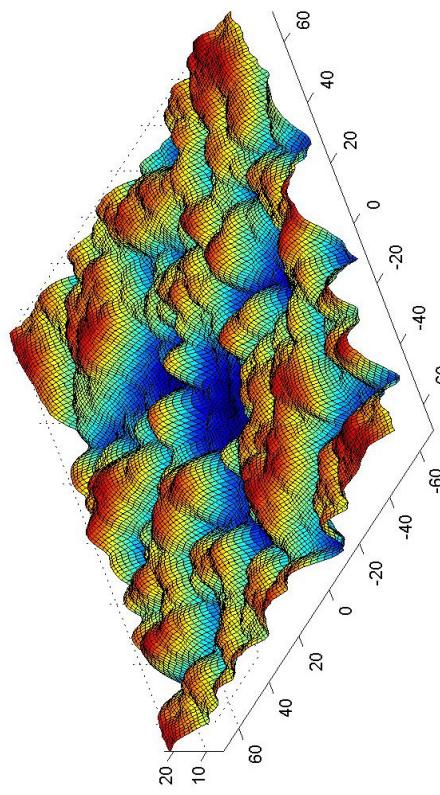
Realisierung der Abbildungsfunktion / Blind Tip Estimation



Vorgegebener Taster



Blind rekonstruierter Taster
(1. Näherung)

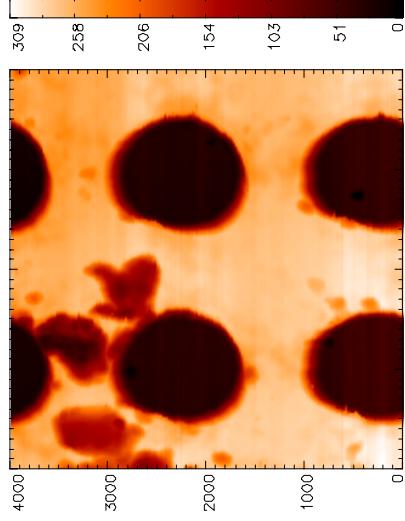


Ergebnis der Dilatation (Messergebnis)
Alle Koordinatenangaben sind in Pixel

Einsatz der Bildverarbeitung bei der Auswertung von AFM-Daten

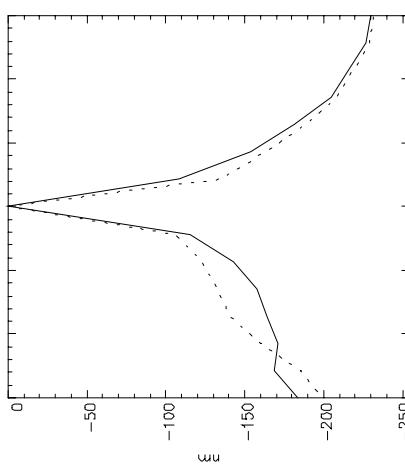
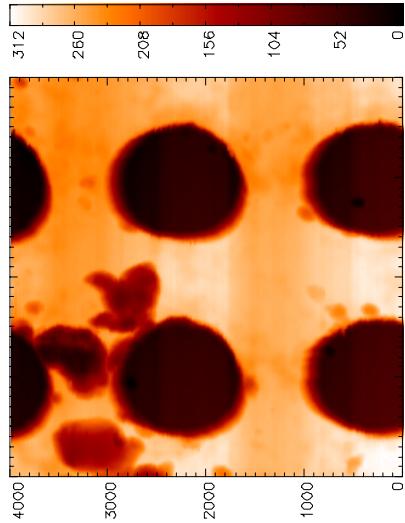


Beispiele zur Rekonstruktion der Tastspitze (Blind Tip Estimation)

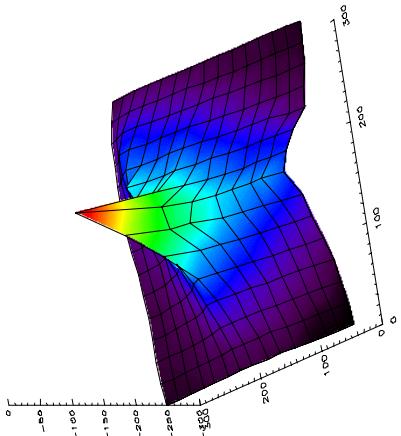
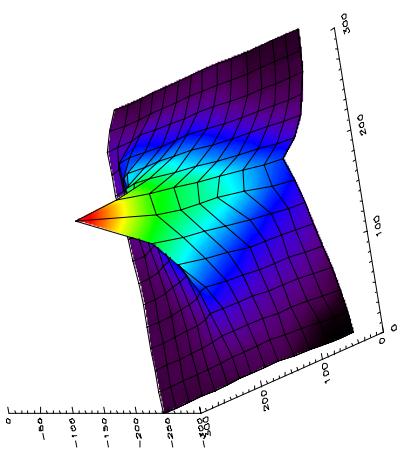


Vorwärtssabtastung

Rückwärtssabtastung



Schnitt von T_{nd} des Vorwärts-
(gurzgehende Linie) und des
Rückwärtsscans (gepunktete Linie)

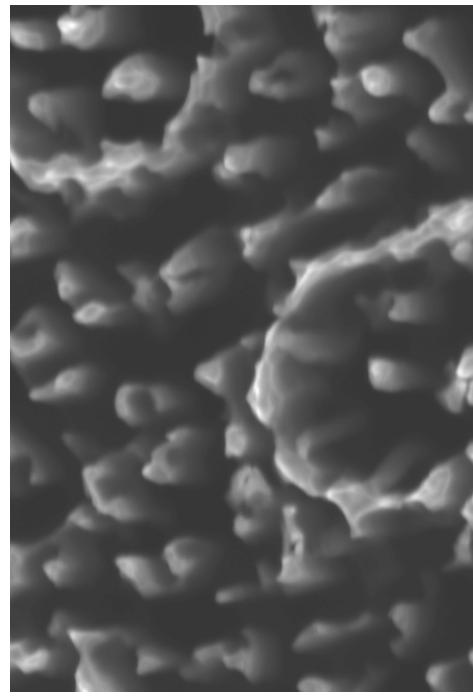


Tasterrekonstruktion
Vorwärtsscan

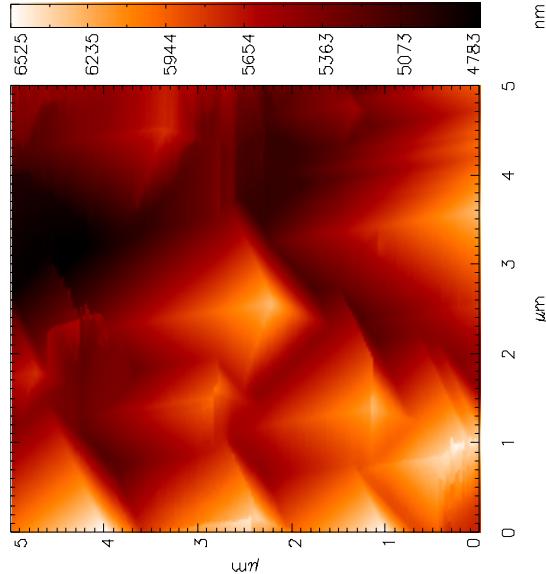
Tasterrekonstruktion
Rückwärtsscan

Rasterelektronenmikroskopaufnahme
der verwendeten Tastertyps

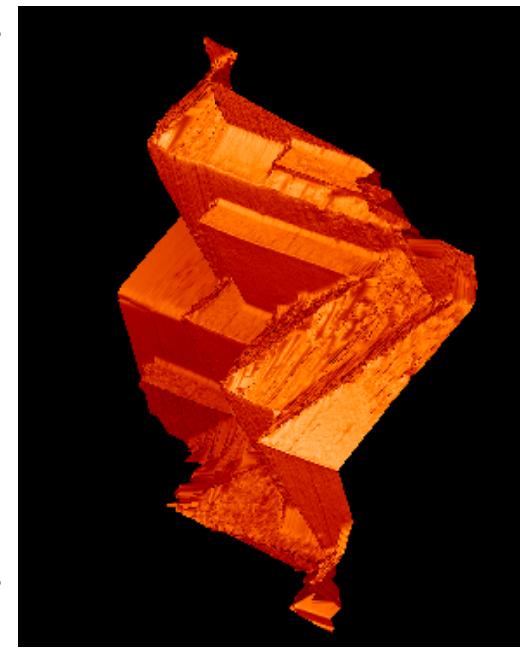
AFM Aufnahme zur Rekonstruktion der Tastspitze



Rasterlektronenaufnahme der Probe
(Strukturbreiten ca. < 50 nm)

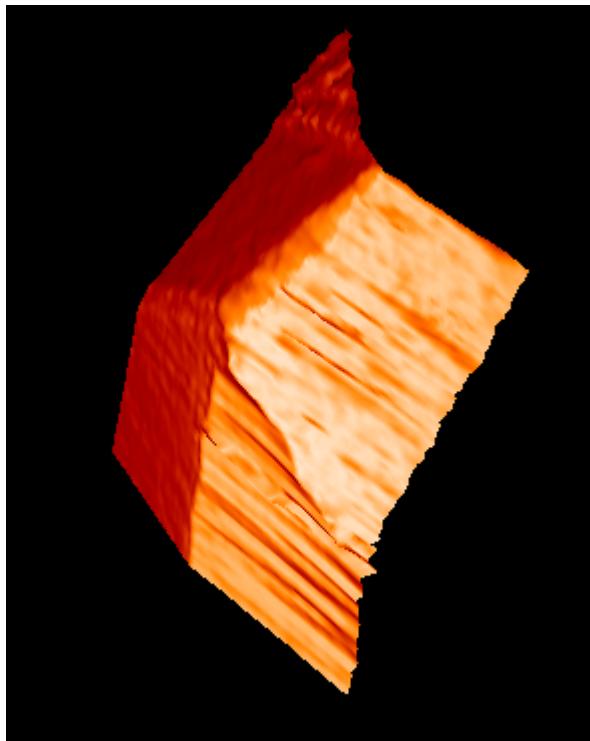


AFM-Aufnahme (Abbildung der Spitzte)

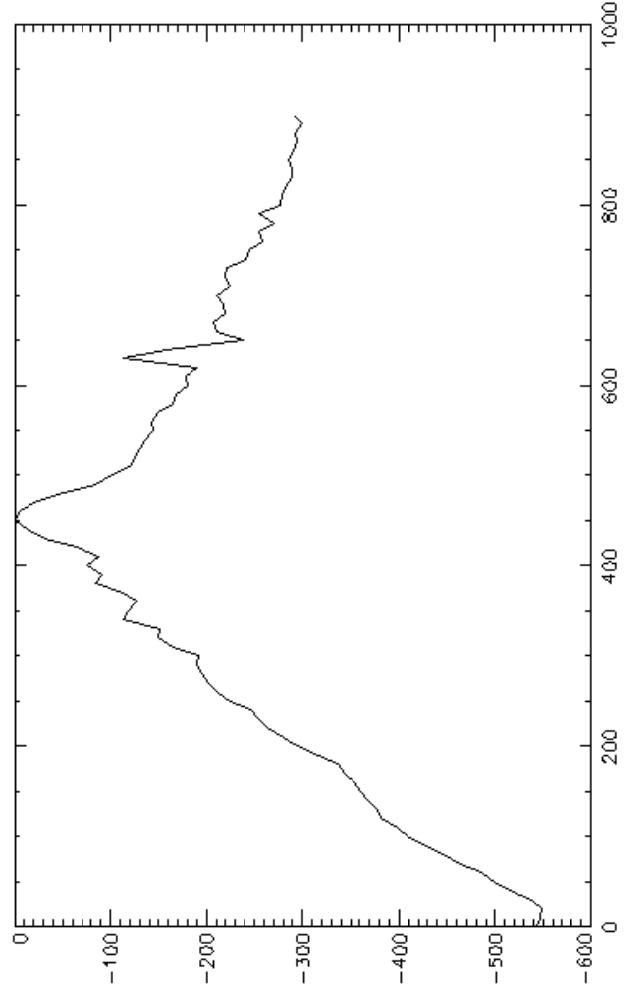


3D-Darstellung der AFM-Aufnahme
(Abbildung der Spitzte)

Rekonstruktionsergebnis



Rekonstruktionsergebnis (Pyramide)



X-Schnitt der Tastspitze (Winkel zw. 90°-100°)

Technische Daten der Spitze vom Hersteller:

- Form einer Pyramide
- Winkel zw. den Seitenflächen ca. 70° (54° zur Grundfläche)
- Winkel zw. den Kanten ca. 90°

Störungen in den Messdaten verhindern eine weitere Verbesserung der Spitze

Zusammenfassung und Ausblick

- Analyse der Wechselwirkungen zwischen Probe und Detektionssystem erforderlich
- Abbildungsprozess kann durch mathematische Morphologie beschrieben werden
- Mittels Tasterrekonstruktionsverfahren lassen sich aus der gemessenen Oberfläche die Tastspitzen rekonstruieren

Der Bild- und Signalverarbeitung wird eine entscheidende Rolle in der Auswertung Nanomesstechnischer Daten zukommen

- Entwicklung von Methoden zur verlustfreien Reduktion der Messdaten unter Berücksichtigung der AFM-Tasterform
- Einfluss der physikalischen Wechselwirkungen noch nicht ausreichend untersucht (Änderung der Aufnahmebedingung)
- Segmentierung von Strukturkomponenten und Oberflächenbereichen
- Erarbeitung von Mess- und Positionierstrategien (Orientierung im Messvolumen)