

Vortrag über die Funktionsweise von Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopen

Jens Wächter

Universität Hamburg - Fachbereich Informatik

Historisches zu STM

Das erste STM (Scanning Tunneling Microscope, dt. "Rastertunnelmikroskop") wurden in der Nacht vom 16. März 1981 im IBM-Forschungslabor Zürich in Rüschlikon (Gemeinde nahe der Stadt Zürich) von den beiden Physikern Heinrich Rohrer, Gerd Binnig sowie dem Elektrotechniker Ernst Ruska entwickelt, die dafür 1986 den Nobelpreis für Physik erhielten

(Bilder von
www.nano.gov)

Historisches zu SFM/AFM

Das Surface Force Microscope wurde 1986 von Gerd Binnig, Calvin Quate und Christoph Gerber erfunden.

(Bild(Christoph Gerber) von Zukunft Heute und (Calvin Quate) Stanford University - Quate Group)

Allgemeines

- Ångström wird häufig als Einheit zur Abmessung oder Angabe der Auflösung benutzt. Ein Ångström ist 0,1 nm oder 10^{-10} m groß. Der Grund dafür ist, dass Atome Radien in dieser Größenordnung besitzen (etwa 1 Å)

Mikroskopie

- Mikroskope lassen sich in zwei Klassen einteilen :
abbildende- und Rastersondenmikroskope

Mikroskopie

- Mikroskope lassen sich in zwei Klassen einteilen :
abbildende- und Rastersondenmikroskope
- Rastersondenmikroskope erfassen im Gegensatz zu
abbildenden Mikroskopen nicht das ganze Bild auf
einmal, sondern tasten es zeilenweise ab, um ein
ganzes Bild aufzubauen. Zur Klasse der
Rastersondenmikroskope gehören unter anderem
neben den Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopen
auch die Rasterelektronenmikroskope.

Mikroskopie

- Nur AFMs und STMs haben Auflösungen im Bereich einzelner Atomradien

Der Aufbau von AFMs und STMs

- AFMs und STMs besitzen eine gemeinsame Teilmenge von Bauteilen.

Der Aufbau von AFMs und STMs

- AFMs und STMs besitzen eine gemeinsame Teilmenge von Bauteilen.
- Von großer Bedeutung ist auch die Isolation von Schwingungen. Dafür können verschiedene Maßnahmen getroffen werden.

Der Aufbau von AFMs und STMs

- AFMs und STMs besitzen eine gemeinsame Teilmenge von Bauteilen.
- Von großer Bedeutung ist auch die Isolation von Schwingungen. Dafür können verschiedene Maßnahmen getroffen werden.
- Eine Scannereinheit

Der Aufbau von AFMs und STMs

- AFMs und STMs besitzen eine gemeinsame Teilmenge von Bauteilen.
- Von großer Bedeutung ist auch die Isolation von Schwingungen. Dafür können verschiedene Maßnahmen getroffen werden.
- Eine Scannereinheit
- Positionierungseinheiten von Scanner und Probe.

Der Aufbau von AFMs und STMs

- AFMs und STMs besitzen eine gemeinsame Teilmenge von Bauteilen.
- Von großer Bedeutung ist auch die Isolation von Schwingungen. Dafür können verschiedene Maßnahmen getroffen werden.
- Eine Scannereinheit
- Positionierungseinheiten von Scanner und Probe.
- Eine elektronische Steuerungseinheit des Scanners

Vibrationsisolation

- Um auf hoher Auflösung zu scannen, muss die Distanz zwischen Probe und tip ca. 0,1 pm betragen. Die Vibrationen unter Alltagsbedingungen betragen haben jedoch eine Amplitude von ca. 0,1 - 1 μm

Vibrationsisolation

- Um auf hoher Auflösung zu scannen, muss die Distanz zwischen Probe und tip ca. 0,1 pm betragen. Die Vibrationen unter Alltagsbedingungen betragen haben jedoch eine Amplitude von ca. 0,1 - 1 μm
- Es gibt prinzipiell interne und externe Dämpfungen. Externen Dämpfung kann durch die Platzierung des STMs oder AFMs in einem Keller, in einem schallgedämpften Raum und auf pneumatischen Füßen geschehen.

Vibrationsisolation

- Um auf hoher Auflösung zu scannen, muss die Distanz zwischen Probe und tip ca. 0,1 pm betragen. Die Vibrationen unter Alltagsbedingungen betragen haben jedoch eine Amplitude von ca. 0,1 - 1 μm
- Es gibt prinzipiell interne und externe Dämpfungen. Externen Dämpfung kann durch die Platzierung des STMs oder AFMs in einem Keller, in einem schallgedämpften Raum und auf pneumatischen Füßen geschehen.
- Interne Dämpfung kann durch elastische Materialien wie Gummi oder durch Federn geschehen. Für AFMs und STMs ist eine Kombination notwendig, da ansonsten bestimmte Frequenzbereiche nicht ausreichend gedämpft werden oder Resonanzen entstehen.

Vibrationsisolation

Bild von (Center for Nanoscale Science and Technology)

Exkurs : Piezoelektrizität

- Piezoelektrizität bezeichnet das Phänomen, dass bestimmte Stoffe wie Kristalle im Falle von gerichteter Verformung eine elektrische Spannung aufbauen oder unter Einfluss einer elektrischen Spannung ihre Form ändern.

Exkurs : Piezoelektrizität

- Piezoelektrizität bezeichnet das Phänomen, dass bestimmte Stoffe wie Kristalle im Falle von gerichteter Verformung eine elektrische Spannung aufbauen oder unter Einfluss einer elektrischen Spannung ihre Form ändern.
- Kristalle weisen ein elementares Muster auf. Durch mechanische Verformung entsteht innerhalb eines solchen Musters ein Dipol.

Exkurs : Piezoelektrizität

- Piezoelektrizität bezeichnet das Phänomen, dass bestimmte Stoffe wie Kristalle im Falle von gerichteter Verformung eine elektrische Spannung aufbauen oder unter Einfluss einer elektrischen Spannung ihre Form ändern.
- Kristalle weisen ein elementares Muster auf. Durch mechanische Verformung entsteht innerhalb eines solchen Musters ein Dipol.
- Piezoelektrizität lässt sich auf viele Arten nutzen. Für den Einsatz in Rastertunnel- oder Rasterkraftmikroskopen sind piezoelektrische Aktuatoren von Bedeutung.

Exkurs : Piezoelektrizität

- Piezoelektrische Aktuatoren können die Form von Röhren oder Stangen haben. Stangen werden auf zwei Seiten von einem Metall umschlossen.
- Röhren werden auf der Längsseite von einem Mantel umschlossen.

Exkurs : Piezoelektrizität

- Piezoelektrische Aktuatoren können die Form von Röhren oder Stangen haben. Stangen werden auf zwei Seiten von einem Metall umschlossen.
- Röhren werden auf der Längsseite von einem Mantel umschlossen.

Die Scannereinheit

- AFMs und STMs unterscheiden sich in erster Linie in der Scannereinheit

Die Scannereinheit

- AFMs und STMs unterscheiden sich in erster Linie in der Scannereinheit
- Gemeinsame Komponenten : Neben den Maßnahmen zur Vibrationsisolation sind die Positionierungseinheiten gleich aufgebaut.

Die Scannereinheit

- AFMs und STMs unterscheiden sich in erster Linie in der Scannereinheit
- Gemeinsame Komponenten : Neben den Maßnahmen zur Vibrationsisolation sind die Positionierungseinheiten gleich aufgebaut.
- Es gibt zwei mögliche Entwürfe der Positionierungseinheit : Dreifußscanner und Röhrenscanner.

Die Scannereinheit

- AFMs und STMs unterscheiden sich in erster Linie in der Scannereinheit
- Gemeinsame Komponenten : Neben den Maßnahmen zur Vibrationsisolation sind die Positionierungseinheiten gleich aufgebaut.
- Es gibt zwei mögliche Entwürfe der Positionierungseinheit : Dreifußscanner und Röhrenscanner.
- Dreifußscanner bestehen aus orthogonal zueinander montierten piezoelektrischen Balken oder Röhren. Röhrenscanner bestehen aus einer einzelnen piezoelektrischen Röhre.

Positionierungseinheit und Bildgebung

- Die Bewegungen des Scanner verursachen Vibrationen.

Positionierungseinheit und Bildgebung

- Die Bewegungen des Scanner verursachen Vibrationen.
- Wenn große Bereiche gescannt werden, so kann es zu nichtlinearem Verhalten der Positionierungseinheit kommen

Positionierungseinheit und Bildgebung

- Die Bewegungen des Scanner verursachen Vibrationen.
- Wenn große Bereiche gescannt werden, so kann es zu nichtlinearem Verhalten der Positionierungseinheit kommen
- Die piezoelektrischen Einheiten können cross-talk verursachen, der zu Verzerrungen im Bild führt

Positionierungseinheit und Bildgebung

- Die Bewegungen des Scanner verursachen Vibrationen.
- Wenn große Bereiche gescannt werden, so kann es zu nichtlinearem Verhalten der Positionierungseinheit kommen
- Die piezoelektrischen Einheiten können cross-talk verursachen, der zu Verzerrungen im Bild führt
- Es kann zu Hysterese(nicht rückgängig machbare Magnetisierung) kommen

Positionierungseinheit und Bildgebung 2

- Eine besondere Form der Nichtlinearität ist der piezoelektrische creep (zeitliche Verzögerungen bei der Ausdehnung der Kristalle)

Positionierungseinheit und Bildgebung 2

- Eine besondere Form der Nichtlinearität ist der piezoelektrische creep (zeitliche Verzögerungen bei der Ausdehnung der Kristalle)
- “thermalic drift“ - Wenn Stoffe in der Positionierungseinheit verwendet werden, die sich unterschiedlich stark ausdehnen, so können Temperaturveränderungen zu Verzerrungen führen.

Quantenmechanischer Tunneleffekt

- Nach klassischer Physik gibt es Barrieren, die für (Elementar) Teilchen nicht überwindbar sind.

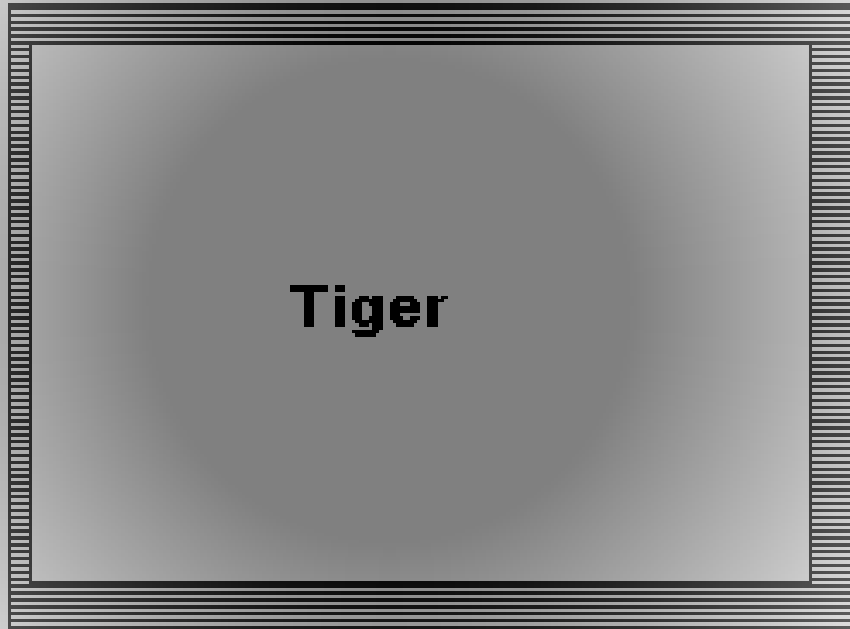
Quantenmechanischer Tunneleffekt

- Nach klassischer Physik gibt es Barrieren, die für (Elementar) Teilchen nicht überwindbar sind.
- Betrachtet man die Teilchen jedoch aus der Sicht der Quantenmechanik, so gibt es auf Basis der heisenbergschen Unschärferelation eine Wellenfunktion, die die Wahrscheinlichkeit angibt, dass sich ein Elementarteilchen an einem Ort befindet.

Quantenmechanischer Tunneleffekt

- Nach klassischer Physik gibt es Barrieren, die für (Elementar) Teilchen nicht überwindbar sind.
- Betrachtet man die Teilchen jedoch aus der Sicht der Quantenmechanik, so gibt es auf Basis der heisenbergschen Unschärferelation eine Wellenfunktion, die die Wahrscheinlichkeit angibt, dass sich ein Elementarteilchen an einem Ort befindet.
- Diese Wahrscheinlichkeit fällt exponentiell nach außen hin ab. gibt es eine Barriere, so kann jenseits davon noch eine Restwahrscheinlichkeit bestehen, dass ein Teilchen dort auftauchen kann.

Quantenmechanischer Tunneleffekt



Quantenmechanischer Tunneleffekt



Tiger



Besucher

Das Prinzip des Tunnelstroms

Tunnel Tip

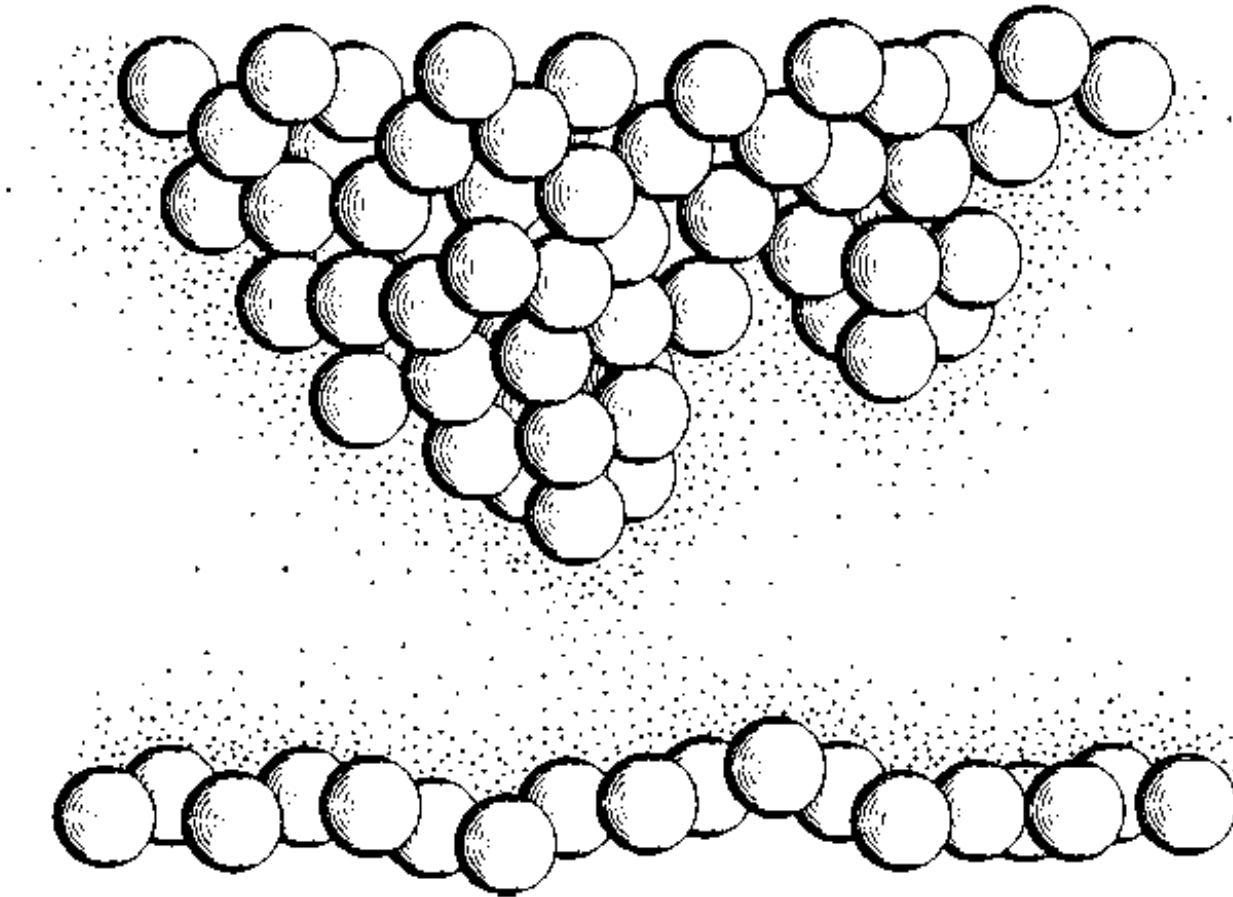


Fig. 2. The principle. The tunneling transmittivity decreases exponentially with the tunneling

Nobelprice lecture - Gerd Binnig, Heinrich Rohrer, 1986

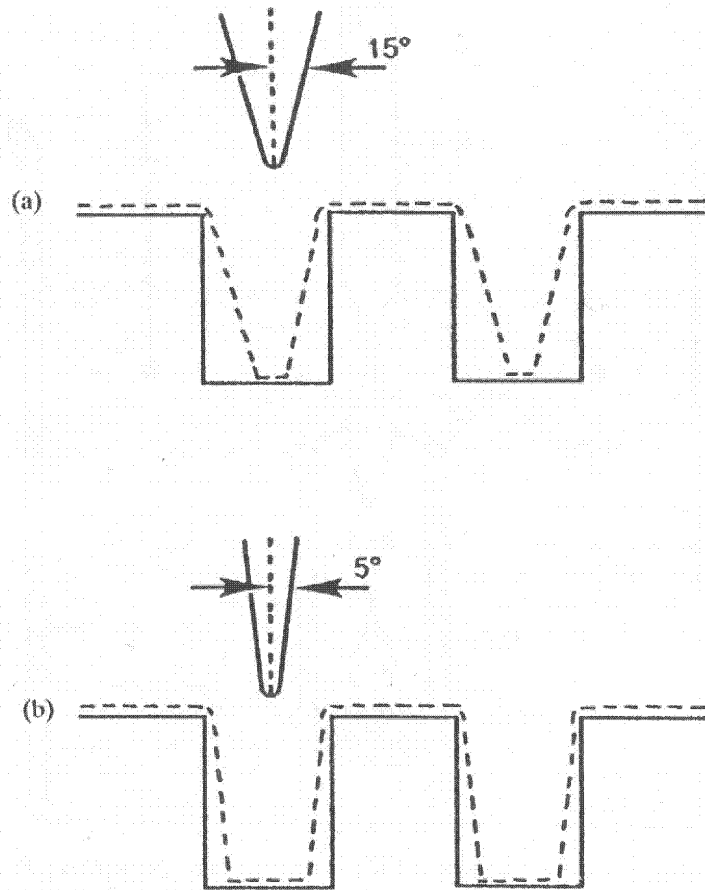
Sensor tip und Bildgebung

- Es kann sein, dass mehrere Atome der Spitze des tip den gleichen Abstand zur Probe haben \Rightarrow Artefakte

Sensor tip und Bildgebung

- Es kann sein, dass mehrere Atome der Spitze des tip den gleichen Abstand zur Probe haben \Rightarrow Artefakte
- Auf rauhen Oberflächen kann ein wenig steil zulaufender tip nicht alle Ausbeulungen komplett erfassen

Sensor tip und Bildgebung



(aus Wiesendanger)

Sensor tip und Bildgebung

- Es kann sich um die Spitze herum eine Schicht von Oxiden oder sonstigen Ablagerungen bilden. Dies führt dazu, dass die Probe direkten Kontakt mit dem Scanner bekommt.

Betriebsmodi - STM - CCI/CHI

- Constant Current Imaging - Klasse von Verfahren, bei denen ein Feedback Mechanismus dafür sorgt, dass der Stromfluss bei lateralen Bewegungen konstant bleibt.

Betriebsmodi - STM - CCI/CHI

- Constant Current Imaging - Klasse von Verfahren, bei denen ein Feedback Mechanismus dafür sorgt, dass der Stromfluss bei lateralen Bewegungen konstant bleibt.
- Alternativ dazu läßt sich der Tip in konstanter Höhe betreiben

Betriebsmodi - STM - CCI/CHI

- Constant Current Imaging - Klasse von Verfahren, bei denen ein Feedback Mechanismus dafür sorgt, dass der Stromfluss bei lateralen Bewegungen konstant bleibt.
- Alternativ dazu lässt sich der Tip in konstanter Höhe betreiben
- CCI Verfahren sind unter anderem abhängig von der Wellenfunktion der Probe und des tips \Rightarrow kompliziertes Matching der Wellenfunktionen.

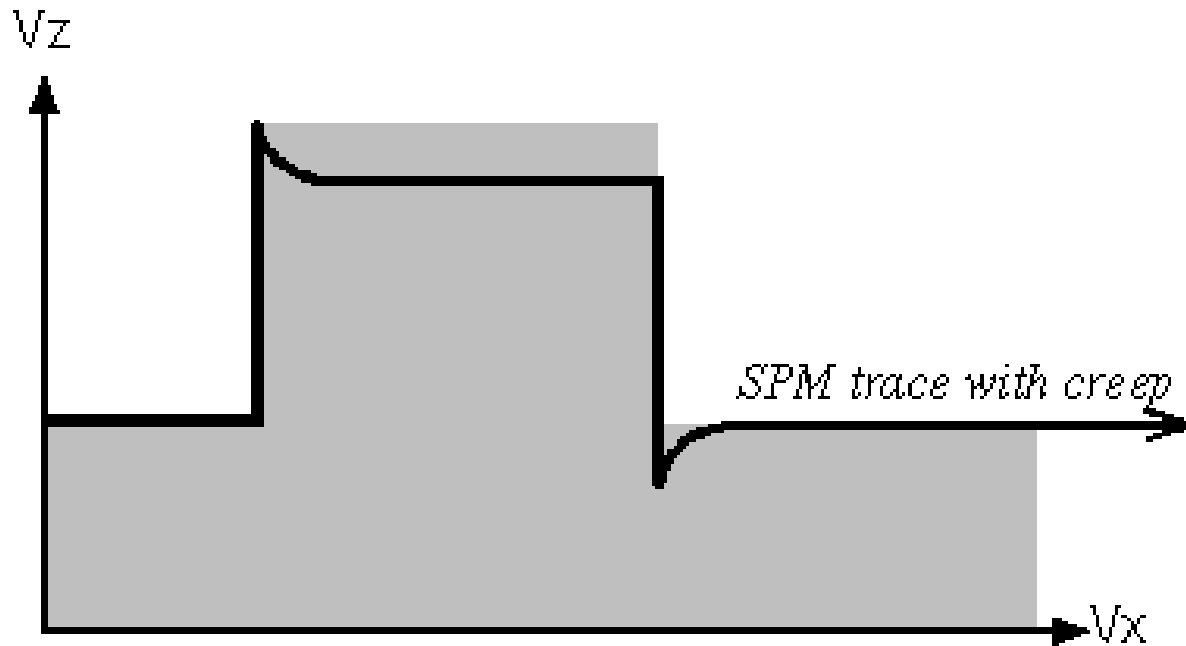
$$I = \frac{2\pi e}{\hbar} \sum_{\mu, \nu} \left\{ f(E_{\mu}) [1 - f(E_{\nu} + eU)] - f(E_{\nu} + eU) [1 - f(E_{\mu})] \right\}$$

$$\cdot |M_{\mu\nu}|^2 \delta(E_{\nu} - E_{\mu})$$

(aus Wiesendanger)

Betriebsmodi - STM - CCI/CHI

- Effekte des Creeping beim CCI :



aus (caltech.edu)

Aufbau der Scannereinheit bei SFMs

- Der Tip von Scannereinheiten eines SFMs ist auf dem sog. Cantilever befestigt. Der Cantilever wird von den Kräften, die zwischen Tip und der Probe wechselwirken, gebogen

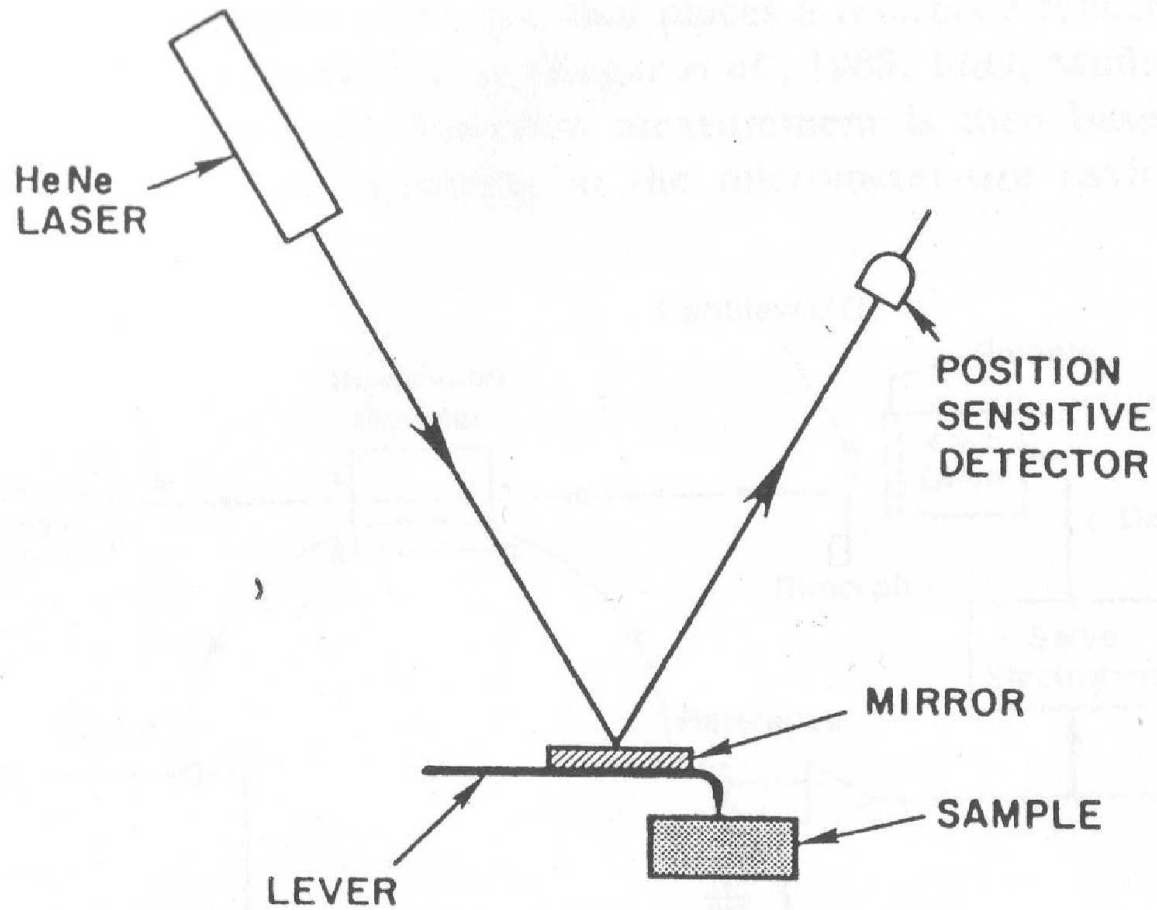
Aufbau der Scannereinheit bei SFMs

- Der Tip von Scannereinheiten eines SFMs ist auf dem sog. Cantilever befestigt. Der Cantilever wird von den Kräften, die zwischen Tip und der Probe wechselwirken, gebogen
- Welche Kräfte (qualitativ) auf den Tip wirken, hängt vom Betriebsmodus ab.

Aufbau der Scannereinheit bei SFMs

- Der Tip von Scannereinheiten eines SFMs ist auf dem sog. Cantilever befestigt. Der Cantilever wird von den Kräften, die zwischen Tip und der Probe wechselwirken, gebogen
- Welche Kräfte (qualitativ) auf den Tip wirken, hängt vom Betriebsmodus ab.
- Die Auslenkung des Cantilever wird durch einen nachgelagerten Mechanismus gemessen. Im Normalfall ist dies ein optischer Mechanismus.

Aufbau der Scannereinheit bei SFMs



(aus Wiesendanger)

Aufbau der Scannereinheit bei SFMs

Der Laser kann den Cantilever aufheizen. Dies führt zu “thermalic drift“

Betriebsmodi - mit Kontakt

- Ein SFM läßt sich mit mechanischem Kontakt von Probe und Tip betreiben. Bei allen Betriebsmodi, die darauf beruhen, sind die gemessenen Kräfte diejenigen, die durch die mechanische Auslenkung des Cantilevers entstehen.

Betriebsmodi - mit Kontakt

- Ein SFM läßt sich mit mechanischem Kontakt von Probe und Tip betreiben. Bei allen Betriebsmodi, die darauf beruhen, sind die gemessenen Kräfte diejenigen, die durch die mechanische Auslenkung des Cantilevers entstehen.
- Der wichtigste Vertreter der auf Kontakt beruhenden Betriebsmodi ist das constant force imaging (CFI), das Analogon zum CCI der STMs. Bei diesem Verfahren wird die Auslenkung des Cantilevers konstant gehalten.

Betriebsmodi - ohne Kontakt

- Wird ein SFM ohne direkten Kontakt zwischen Tip und Probe betrieben, so wirken auf den Tip nicht mehr mechanische, sondern andere Kräfte wie elektrostatische, magnetische- oder Van Der Waals-Kräfte.

Betriebsmodi - ohne Kontakt

- Wird ein SFM ohne direkten Kontakt zwischen Tip und Probe betrieben, so wirken auf den Tip nicht mehr mechanische, sondern andere Kräfte wie elektrostatische, magnetische- oder Van Der Waals-Kräfte.
- Um diese Kräfte zu messen wird der Cantilever durch ein piezoelektrisches Element in Schwingung versetzt. Die oben genannten Kräfte besitzen einen Gradienten; dieser Gradient wirkt auf die Frequenz der Schwingungen des Cantilevers ein (verringert oder vergrößert sie)

Nanomanipulation - Grundlagen

- Prinzipiell sind verschiedene Arten, vom Zerkratzen der Oberfläche bis hin zum Bewegen einzelner Atome, auf Nanostrukturen mit einem SFM/STM einzuwirken möglich.

Nanomanipulation - Grundlagen

- Prinzipiell sind verschiedene Arten, vom Zerkratzen der Oberfläche bis hin zum Bewegen einzelner Atome, auf Nanostrukturen mit einem SFM/STM einzuwirken möglich.
- Der Tip wirkt mit verschiedene Kräften auf die Probe ein. Dazu gehören bei geringen Abständen chemische Bindungskräfte, bei etwas größeren Abständen Van der Waals Kräfte. Falls die Probe aus Atomen mit Dipol besteht, so wirkt auch das elektrische Feld des Tips auf die Atome der Probe ein.

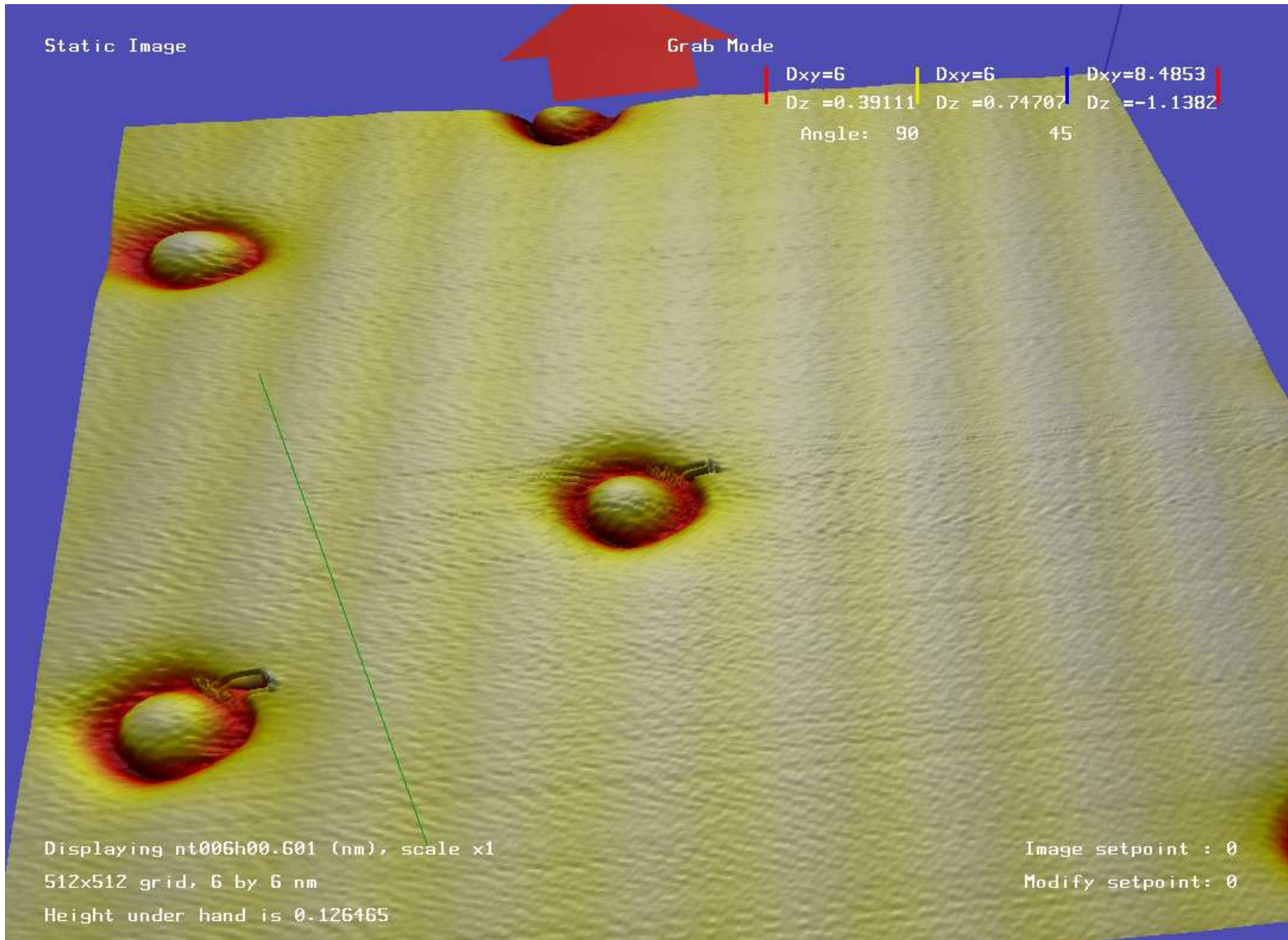
Nanomanipulation - Grundlagen

- Neben den Kräften, die aktiv eine Anziehung/Abstoßung bewirken, gibt es auch Einflüsse, die die "Bereitschaft" eines Atoms, sich zu bewegen erhöhen. Zu diesen Einflüssen zählt der elektrische Strom des Tips, der die Atome der Probe zu erhöhten Schwingungen anregt, sowie das elektrische Feld, was auf die interatomaren Bindungskräfte der Probe einwirkt.
- Die Anforderungen an die Bildgebung und an die Bildmanipulation stehen im Konflikt zueinander.

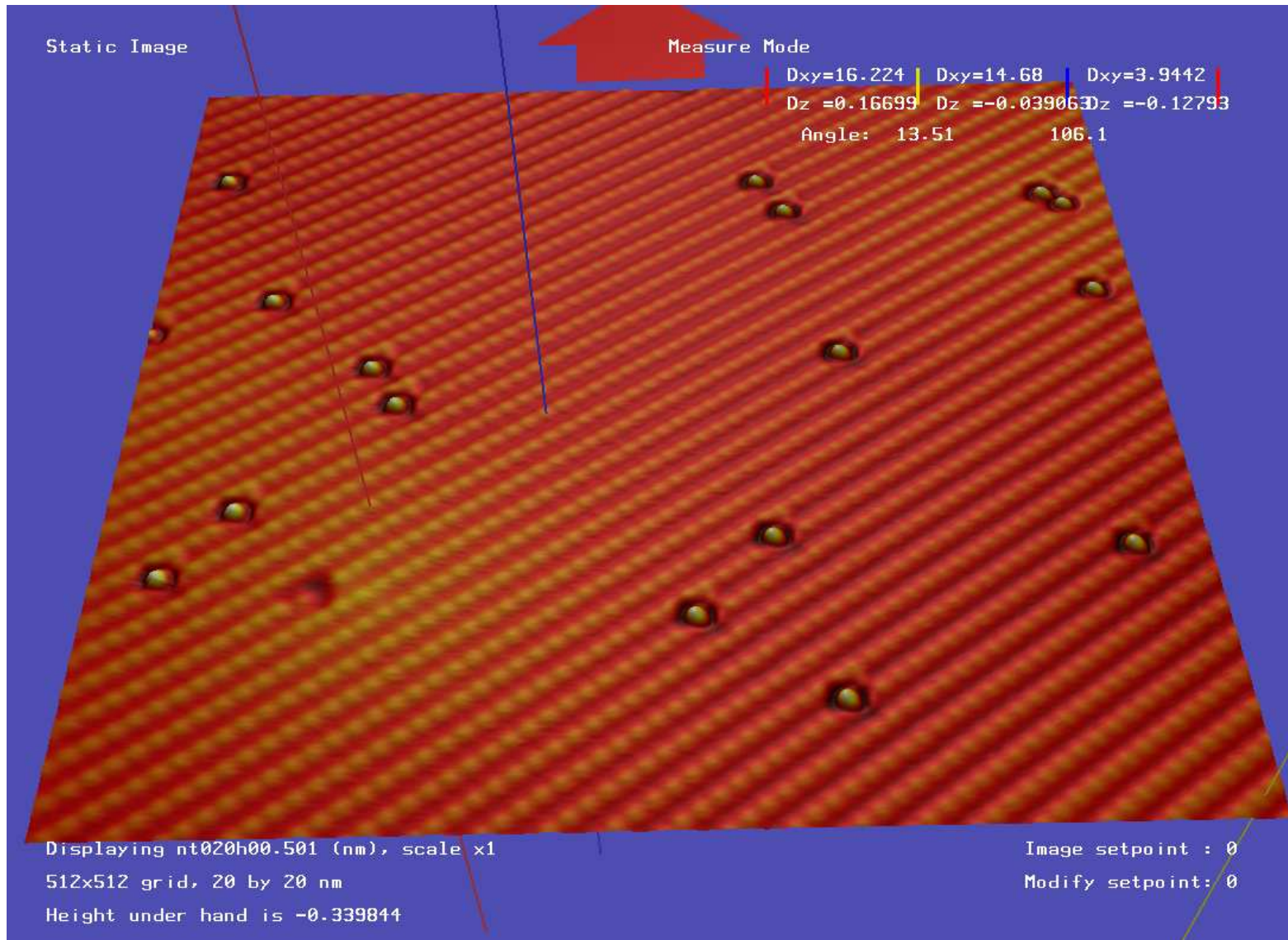
Nanomanipulation - Grundlagen

- Neben den Kräften, die aktiv eine Anziehung/Abstoßung bewirken, gibt es auch Einflüsse, die die "Bereitschaft" eines Atoms, sich zu bewegen erhöhen. Zu diesen Einflüssen zählt der elektrische Strom des Tips, der die Atome der Probe zu erhöhten Schwingungen anregt, sowie das elektrische Feld, was auf die interatomaren Bindungskräfte der Probe einwirkt.
- Die Anforderungen an die Bildgebung und an die Bildmanipulation stehen im Konflikt zueinander.

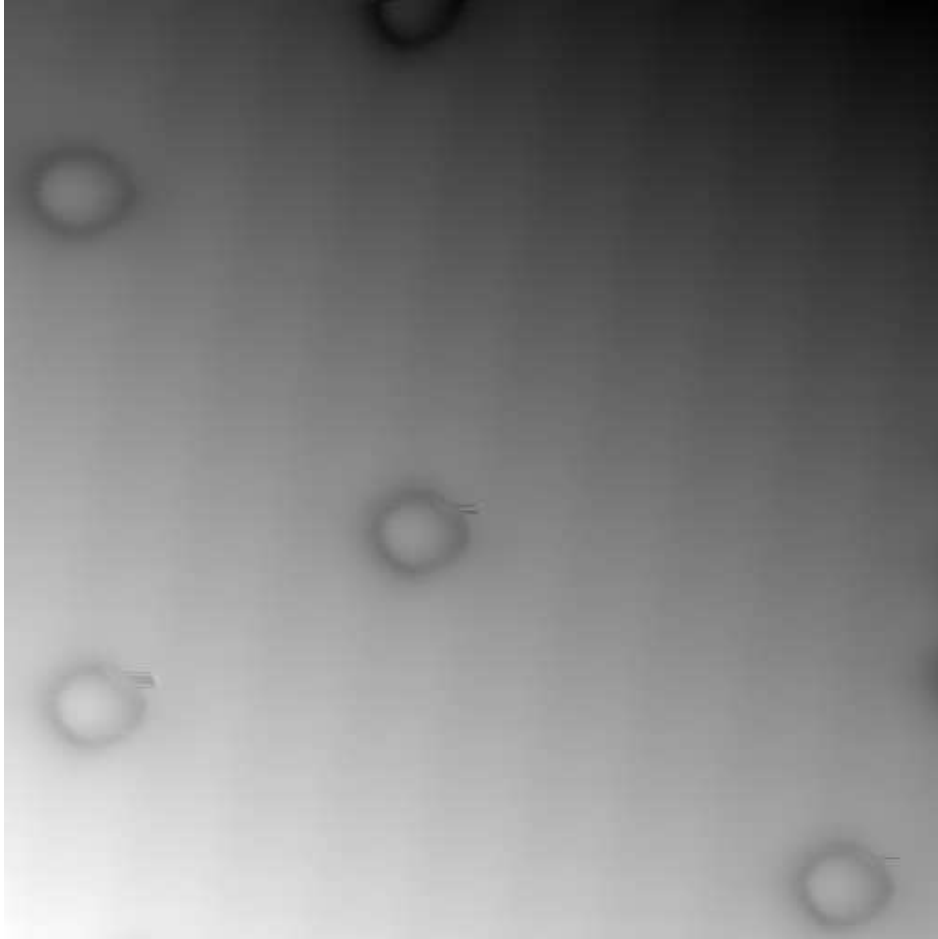
Aufnahmen UHV



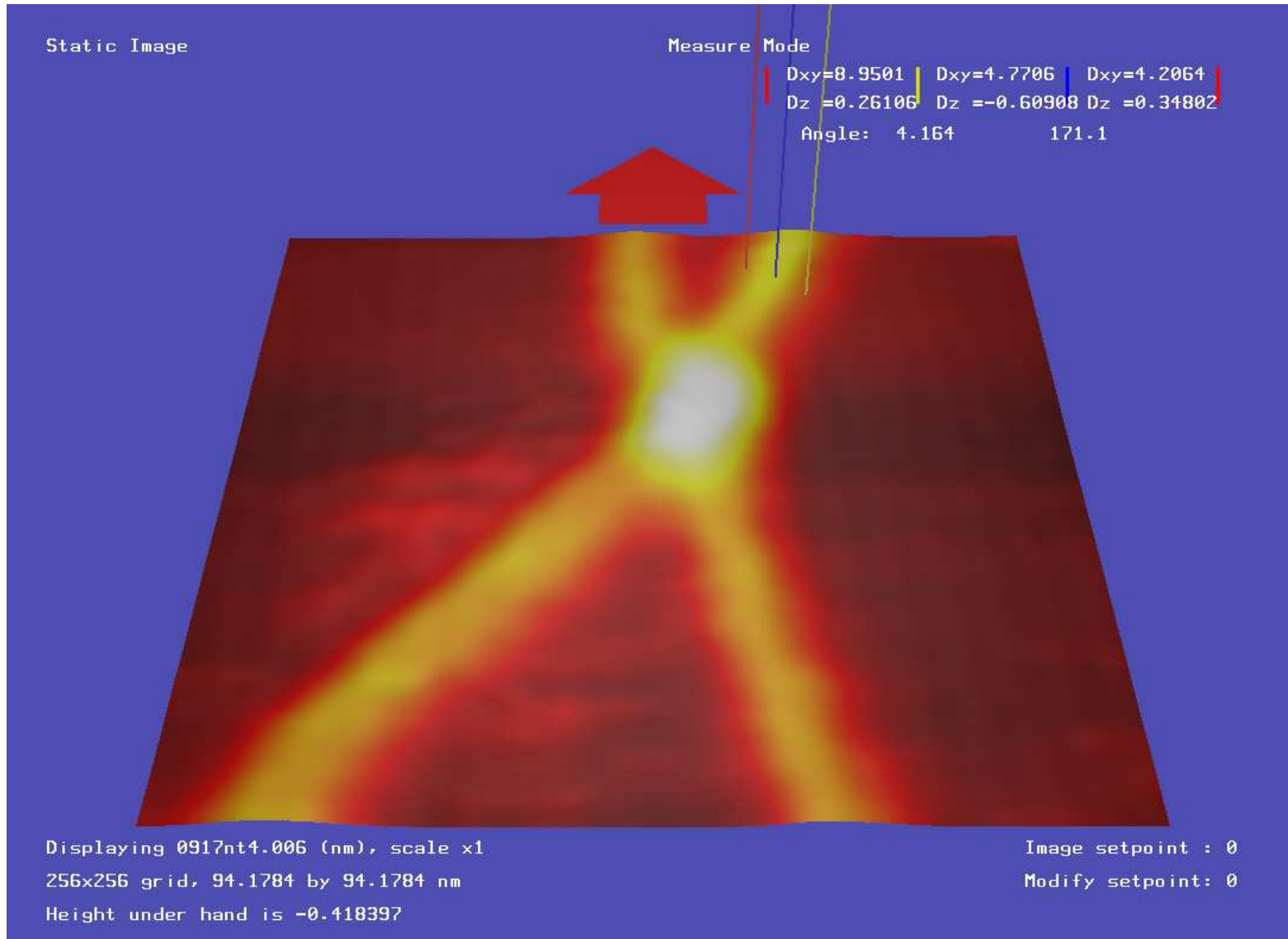
Aufnahmen UHV



Aufnahmen UHV



Carbon Nanotubes



DVD Oberfläche

