

NANOTECHNOLOGIE

Zwischen Realität und Science Fiction



Jens Gobrecht

Labor für Mikro- und Nanotechnologie

<http://lmn.web.psi.ch>

Nanotechnologie = Nanowissenschaft + Nanotechnik

1 Nanometer (nm) = 10^{-9} Meter = 1 milliardstel Meter

Nanowissenschaft:

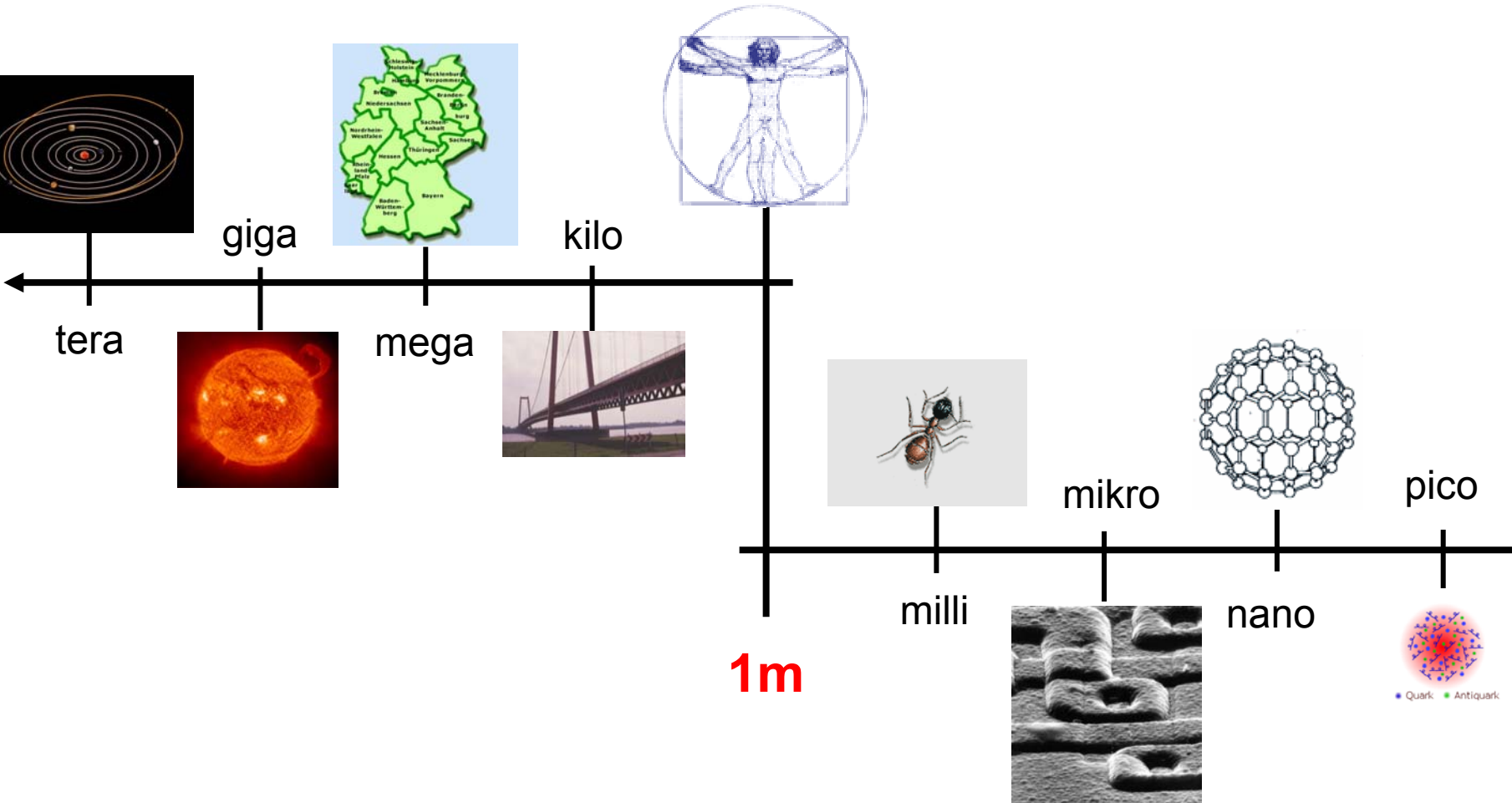
Untersuchung, Interpretation und Verständnis der Eigenschaften und des Verhaltens von Strukturen und Objekten im Nanometer-Massstab

Nanotechnik:

Technische Beherrschung des Nanometers, d.h. Herstellung, Charakterisierung, gezielte Veränderung von Strukturen und Objekten im Nanometer-Massstab



Die Grössenordnungen der Länge in Metern



Besonderheiten und Abgrenzung der Nanotechnologie

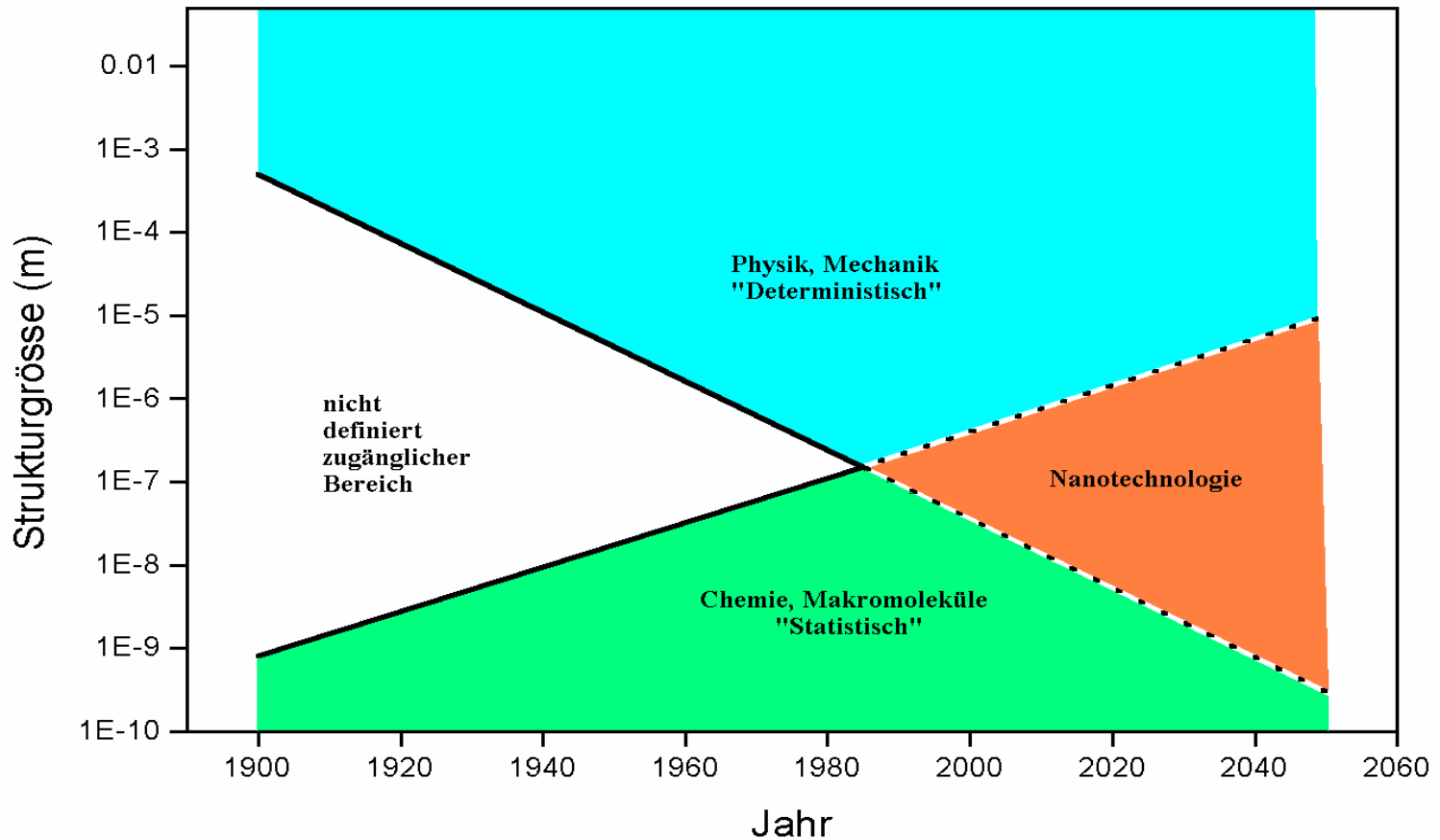
Klassische Technik:

- Materialkonstanten sind bekannt und „konstant“.
- Neue Funktionalität durch Zusammenwirken von grosser Zahl von Komponenten im System Beispiel: Mikroelektronik
- Herstellverfahren: Klassische Techniken der Werkstoffherstellung und der Materialbearbeitung

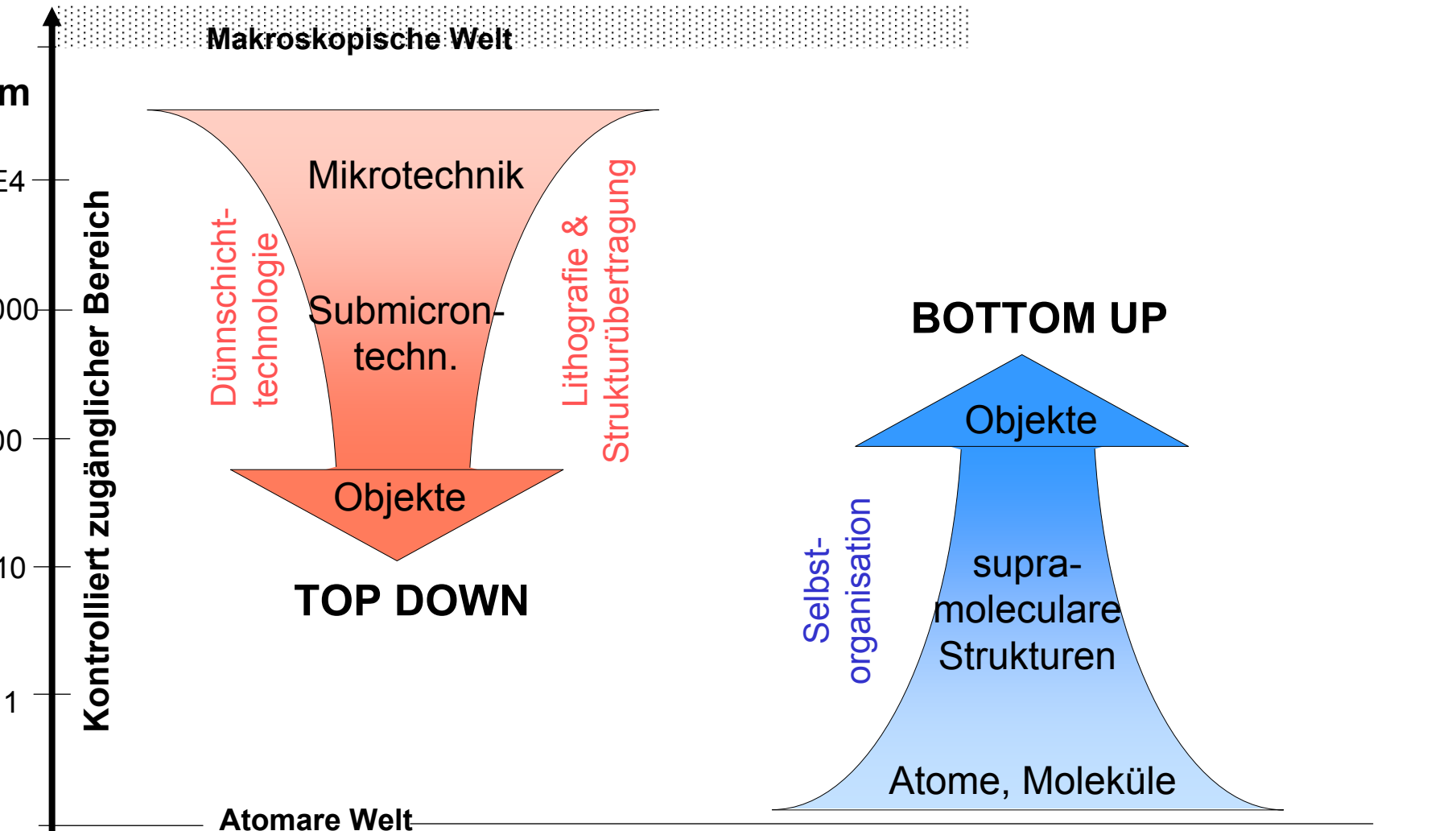
Nanotechnik:

- Material“konstanten“ meistens nicht mehr konstant.
- Neue Funktionalität durch neue Eigenschaften der Materialien und Materialkombinationen.
- Herstellverfahren „top-down“ durch Weiterentwicklung der Mikrotechnik oder „bottom-up“ durch Selbstorganisation.
- Begriffe der alltäglichen Erfahrung, wie z.B. „berühren“ oder „aussehen“ sind in der Nanowelt nicht mehr exakt definiert und verlieren ihre Bedeutung.

Wie entstand Nanotechnologie?



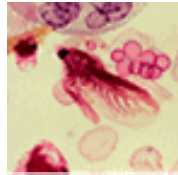
Zugang zur NANOTECHNOLOGIE



Sichtbarkeit im realen Raum öffnet die Tür zu neuen Forschungsgebieten (und vielleicht industriellen Revolutionen)

19. Jahrh.

~1 μm

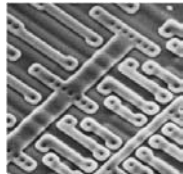


Leistungsfähige optische Mikroskope

Mikrobiologie,
Materialforschung

Nach 1960

~10 nm

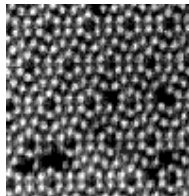


Rasterelektronenmikroskope

Mikroelektronik
moderne Materialentwicklung

Nach 1982

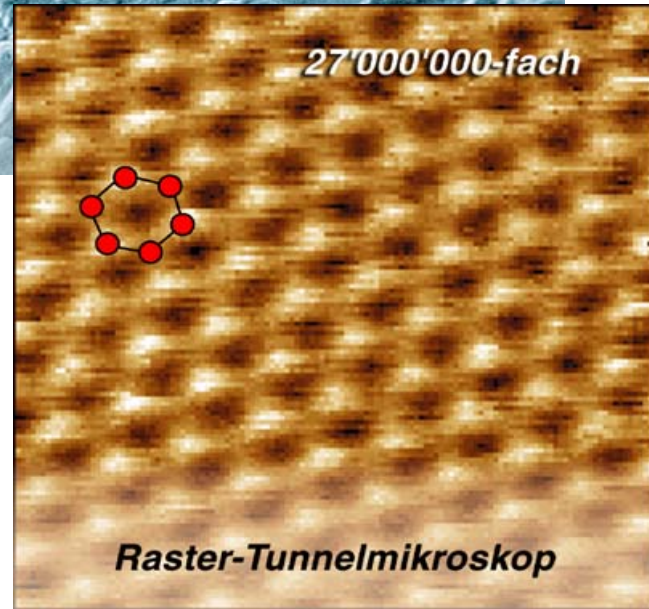
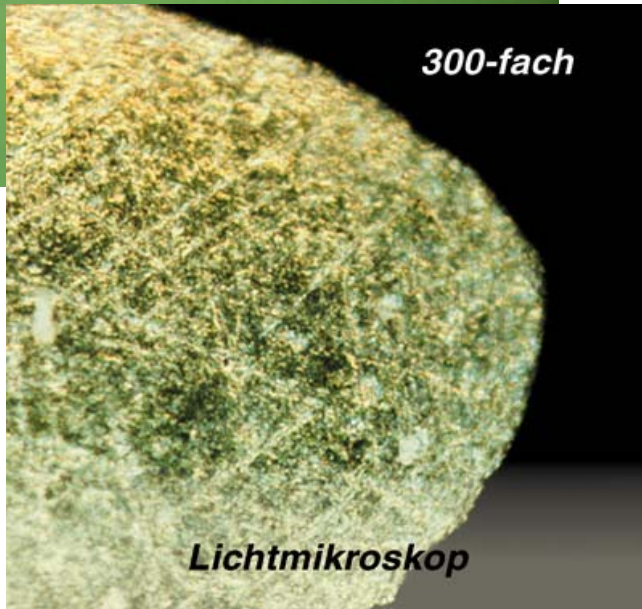
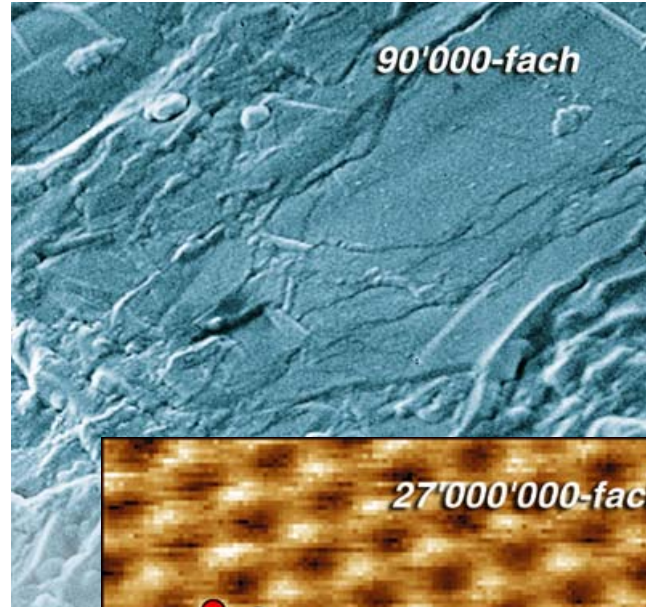
~ 0.1 nm



Rastersondenmikroskope (STM, AFM etc.)

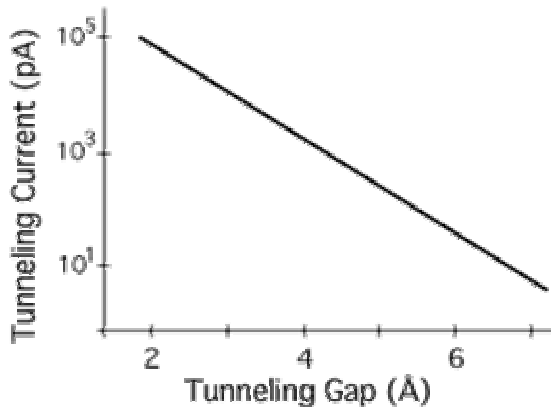
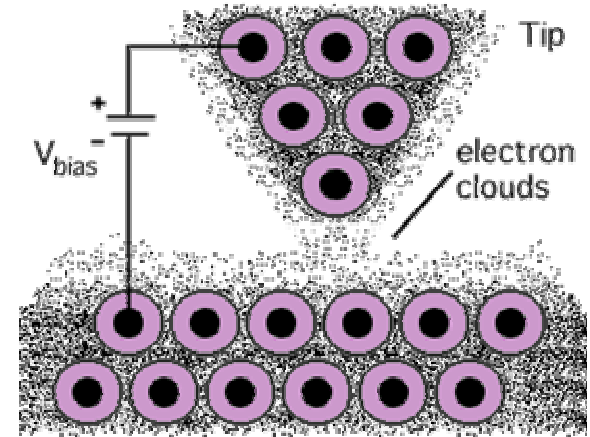
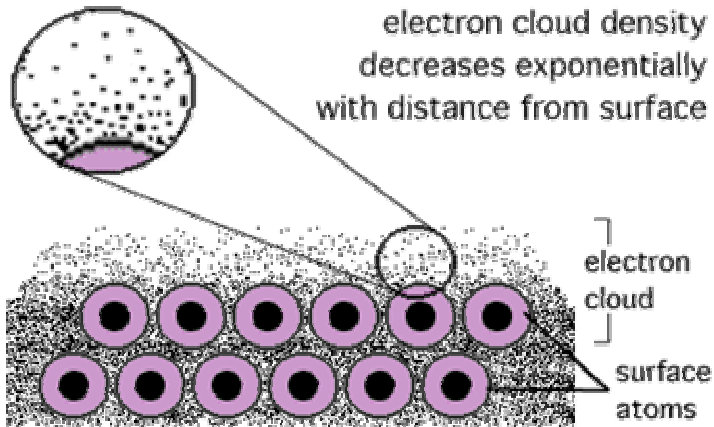
Molekulares Engineering
Nanotechnologie

Der Traum, Atome sichtbar zu machen

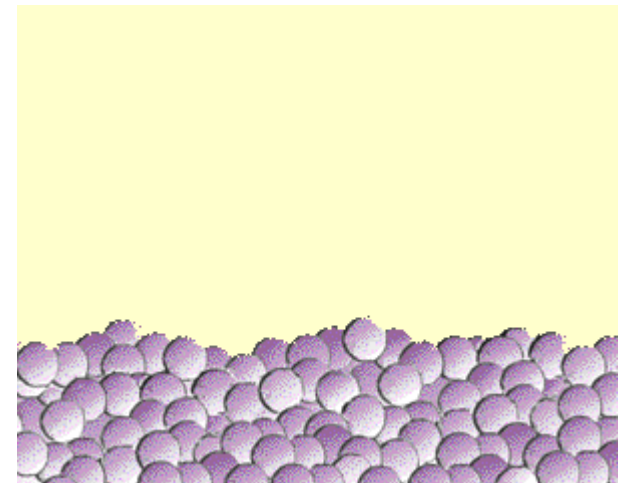


Das Raster-Tunnelmikroskop (STM)

H. Rohrer, G. Binnig 1982, Nobelpreis 1986



source:
KTH Stockholm

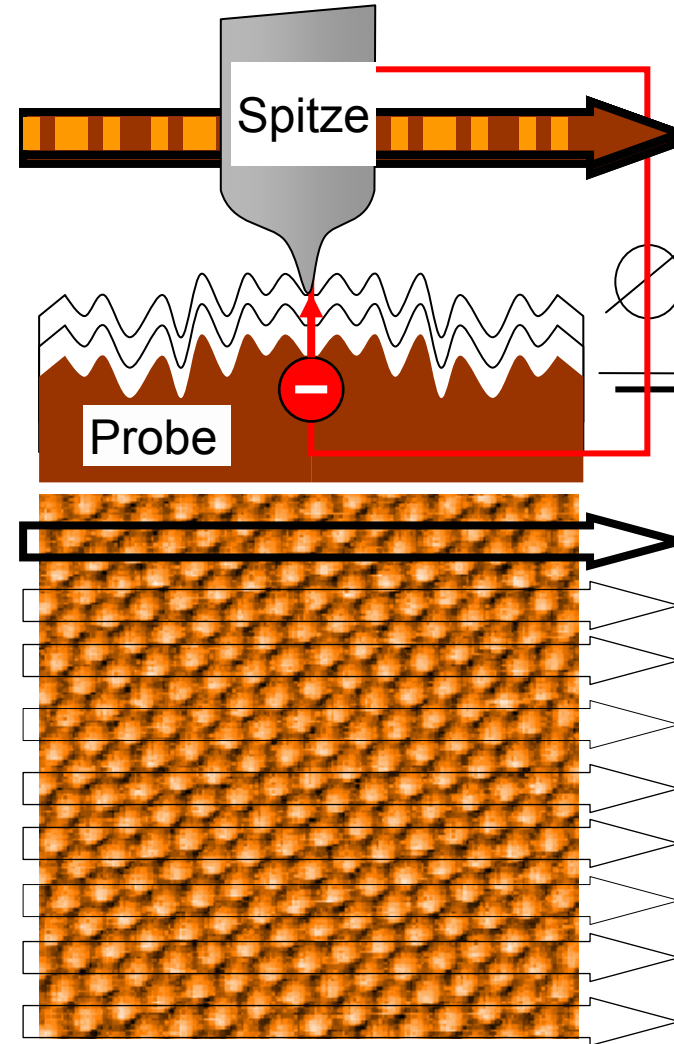


STM von Nanosurf



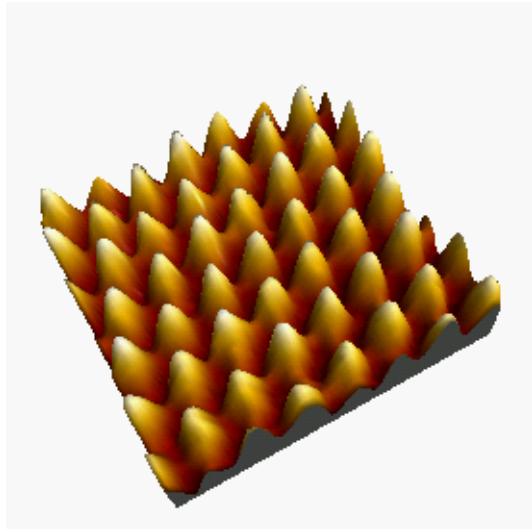
Rastertunnelmikroskop
für Schulen

easyScan STM



Graphit – Kohlenstoff Atome

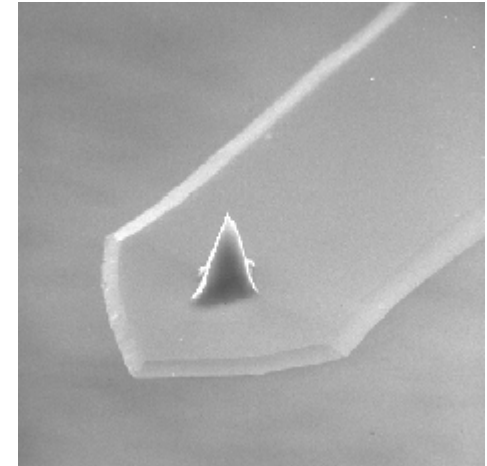
Wie groß ist ein Atom ?



Kohlenstoff-
Atome einer
Graphit-
oberfläche



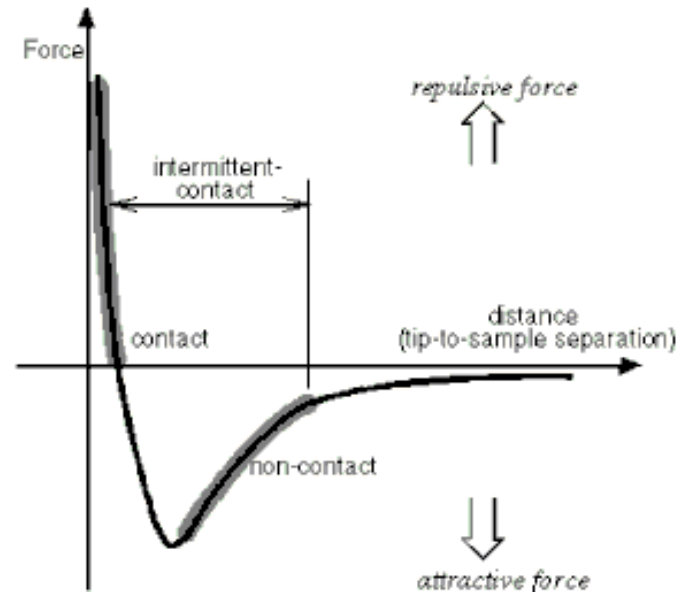
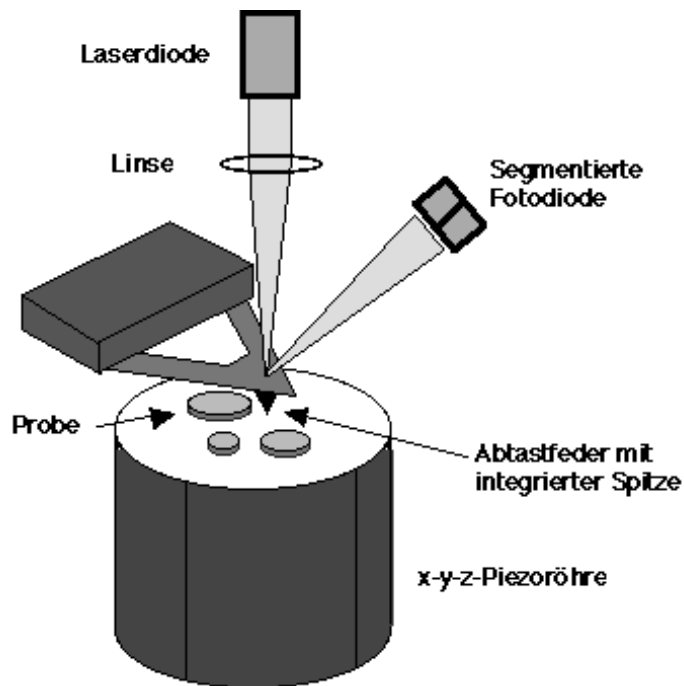
Tischtennis Ball



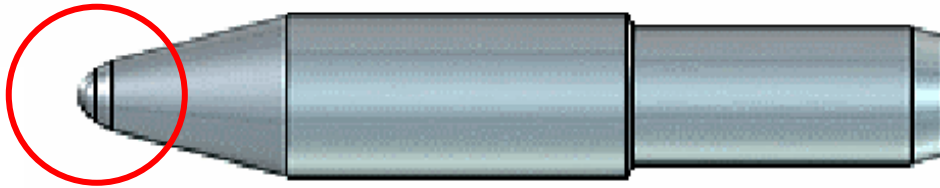
Mikrofederbalken
eines AFM mit
einer $12\ \mu\text{m}$
hohen Spitze

Raster-Kraftmikroskop

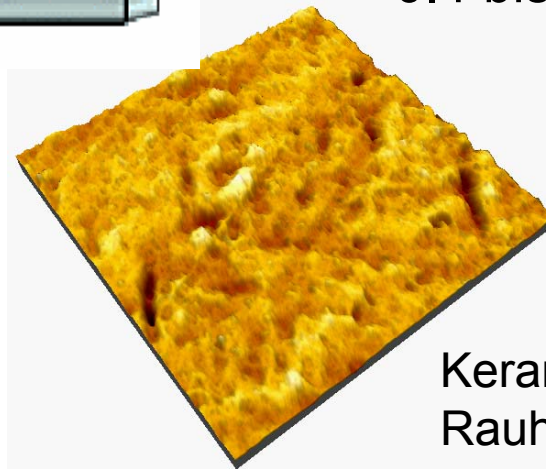
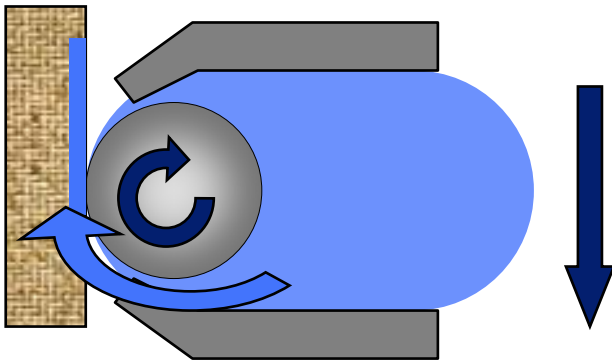
engl. Atomic Force Microscope, AFM



Ist ein Kugelschreiber ein *High-Tech* Instrument?



Kugeldurchmesser :
0.4 bis 1.2 mm



Keramik Kugel
Rauheit: 8.2 nm

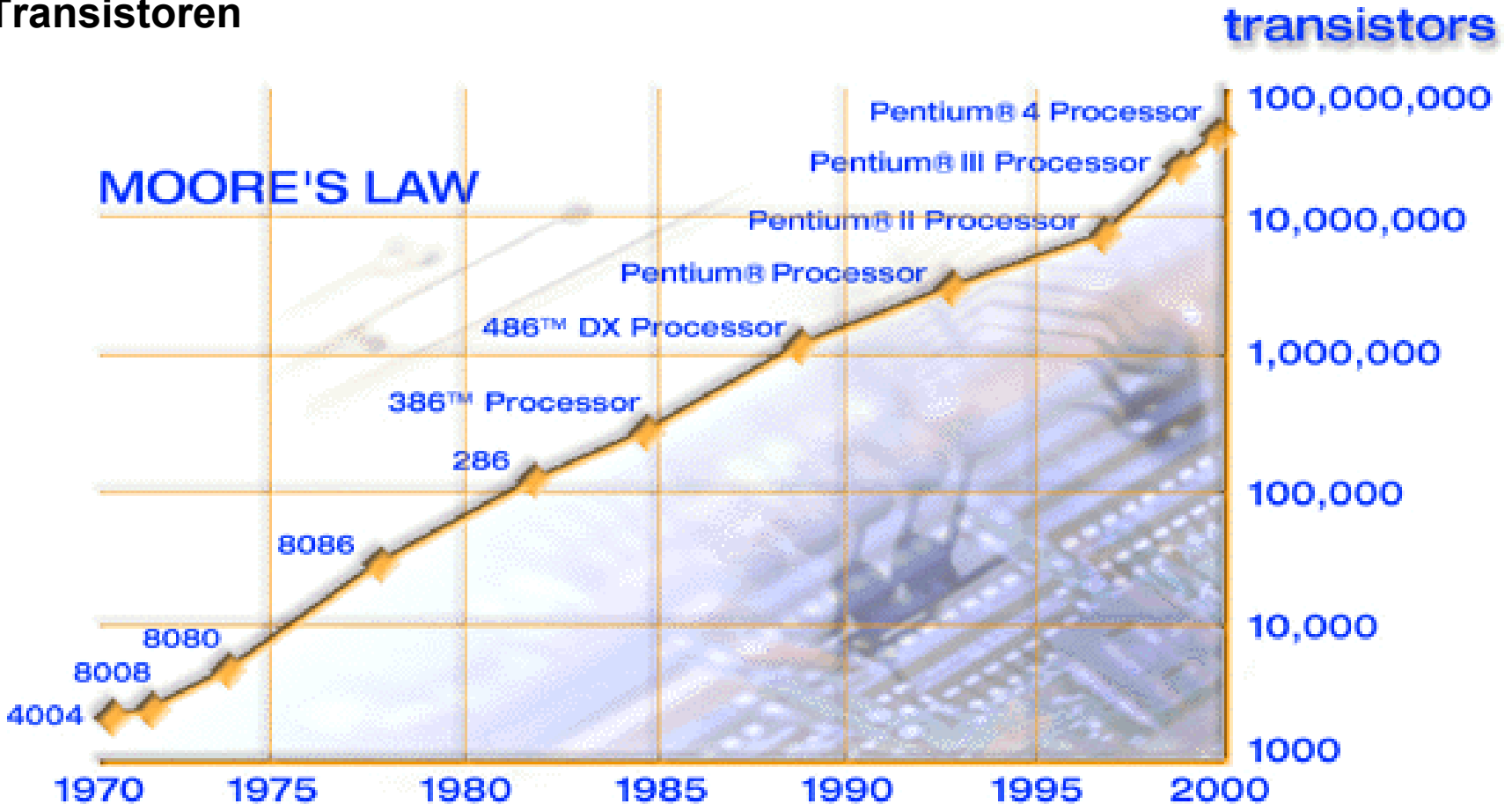
Für einen optimalen Tintenfluss muss die Rauheit zwischen 2 und 10 nm betragen.

Gebiete der Nanotechnologie

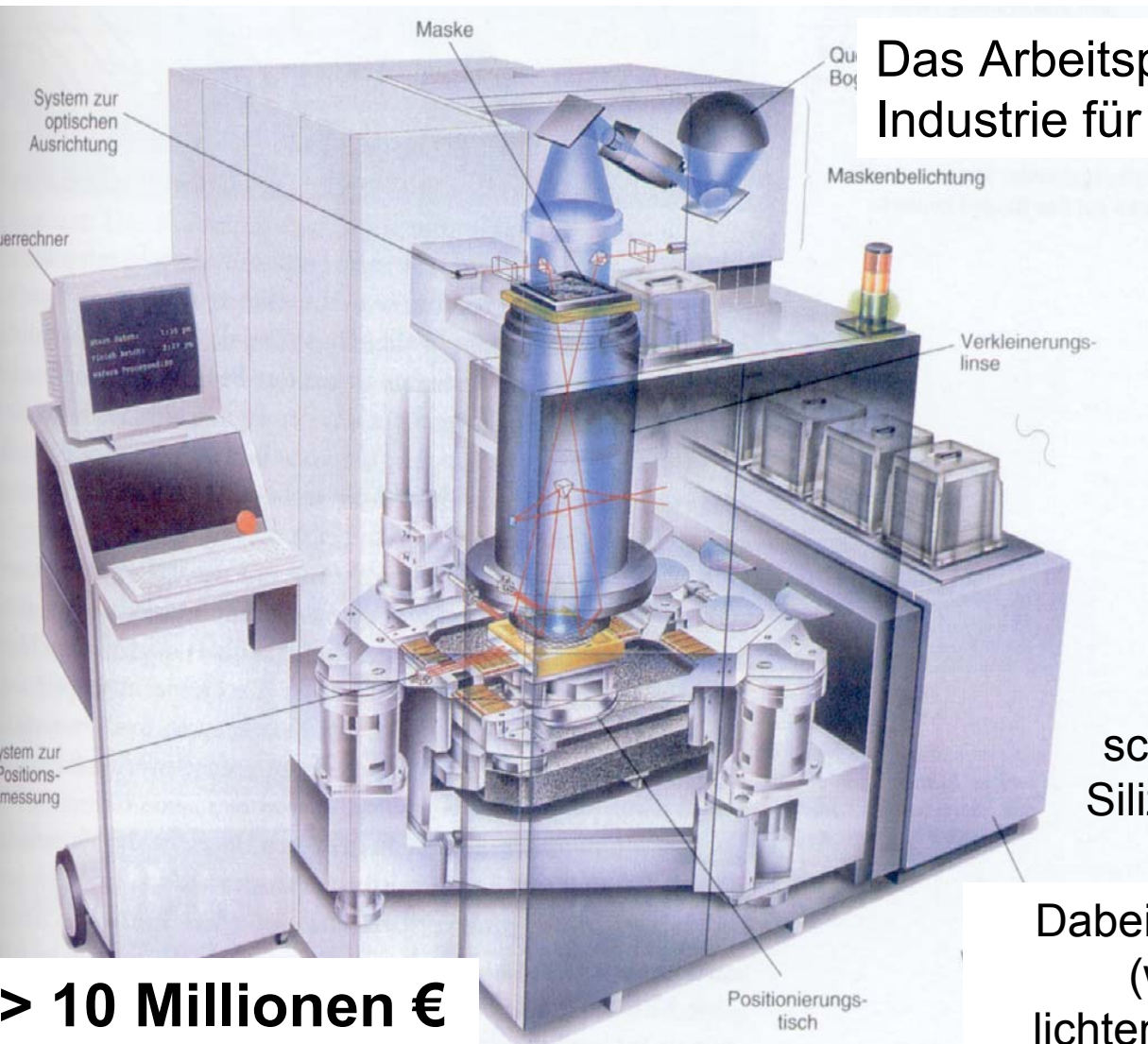
Gebiet	Nano-elektronik	Molekulare Nanotechnologie	Nano-Materialien
Eigenschaften			
Anwendungen, Märkte	Daten-Verarb., Übertragung, Speicherung	Biowissenschaften Bioanalytik Organ. Synthese	„intelligente“ Oberflächen und Werkstoffe
Ergebnisse, Produkte	Elektronische (Quanten-) Bau- Elemente, Sensoren	Funktionale Oberfl. Sensoren, Geräte f. Forschung	Werkzeuge, funktio- nale Oberflächen, Implantate
Technologien	Litografie, Epitaxie, Selbstorganisation C-Nanoröhrchen	Strukturierte Oberfl., Selbstorganisation, Langmuir-Blodgett- Techniken	Abformung, sol-gel Techniken, Kohlen- stoff Nanoröhrchen

Moore's Law oder die rasante Entwicklung der Chip-Leistung

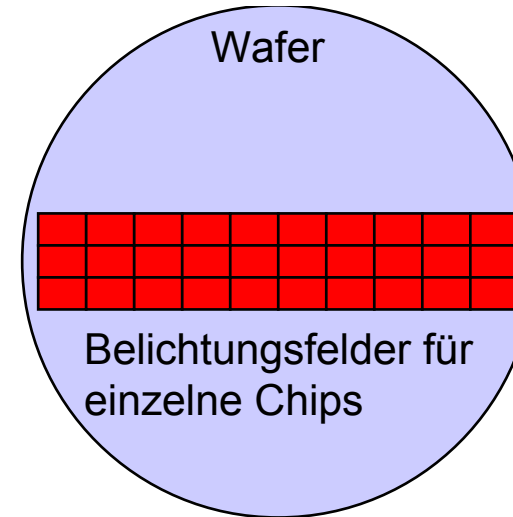
Der Stand der Technik bei Mikroprozessoren:
Alle 18 Monate verdoppelt sich die Anzahl der
Transistoren



Waferstepper für Step&Repeat Lithographie



Das Arbeitspferd der Mikrochip-Industrie für in der Chip-Herstellung



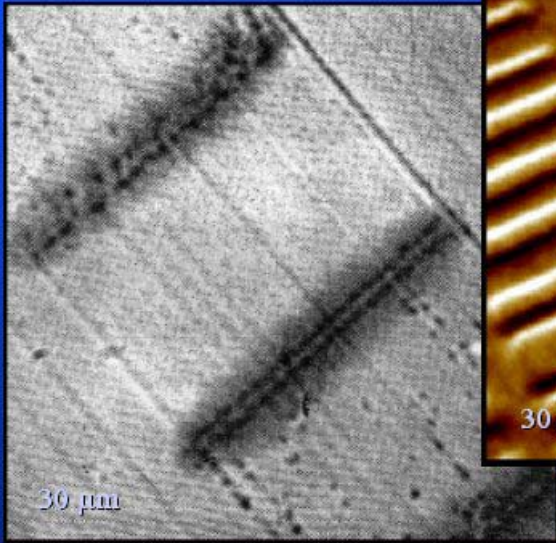
Ein Waferstepper beleuchtet schrittweise („step by step“) die Siliziumwafer mit einer leistungsstarken Verkleinerungslinse.

Dabei wird das Muster einer Maske (wie beim Negativfilm) in einen lichtempfindlichen Lack übertragen.

> 10 Millionen €

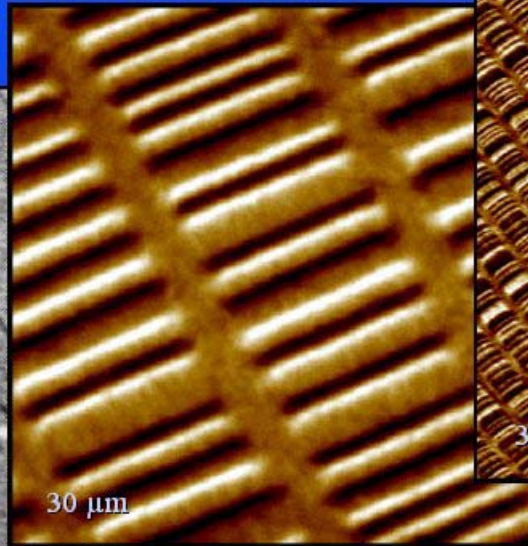
Entwicklung der Speicherdichte

Ferrofluid Decoration



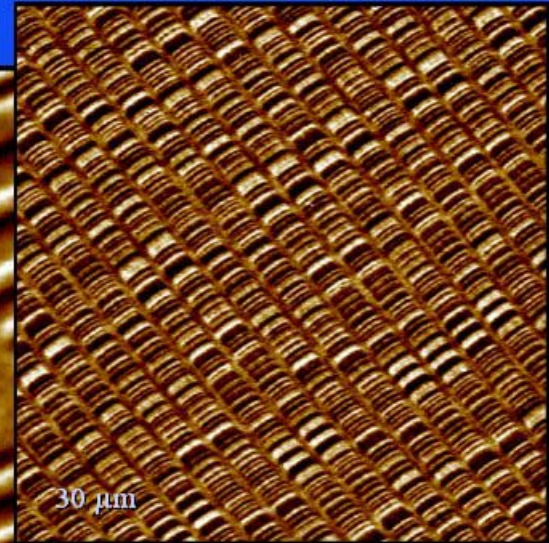
1984
0.04 GB/in²

Magnetic Force Micrograph



1990
0.1 GB/in²

Magnetic Force Micrograph



1998
3 GB/in²

Methode:
Magnetic force microscopy

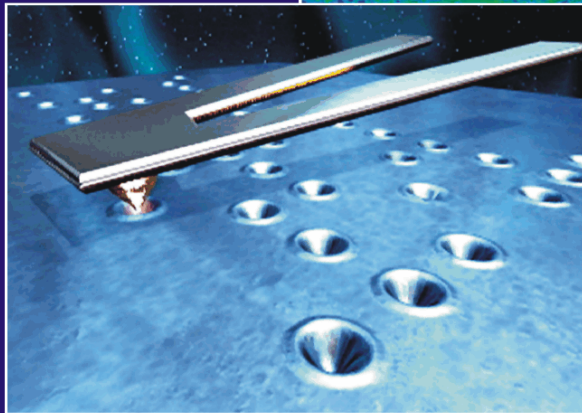
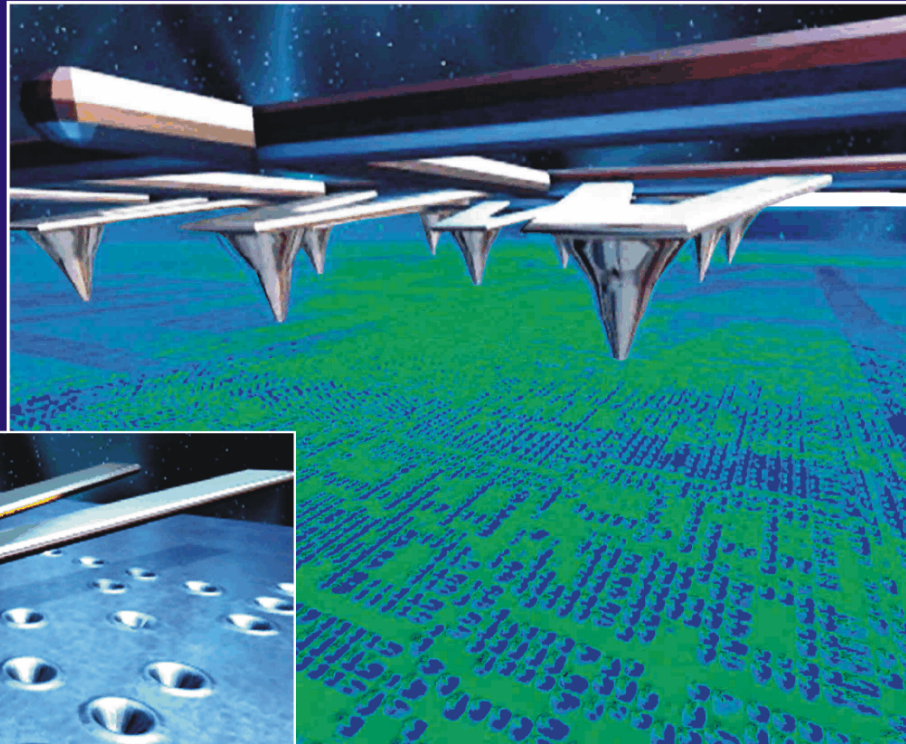


A. Wiens, G. Persch-Schuy
IBM Speichersysteme, KST 4044
55131 Mainz
awiens@de.ibm.com

Nanotechnischer Datenspeicher „Millipede“

Millipede - Animated View

> 40 GB/in²

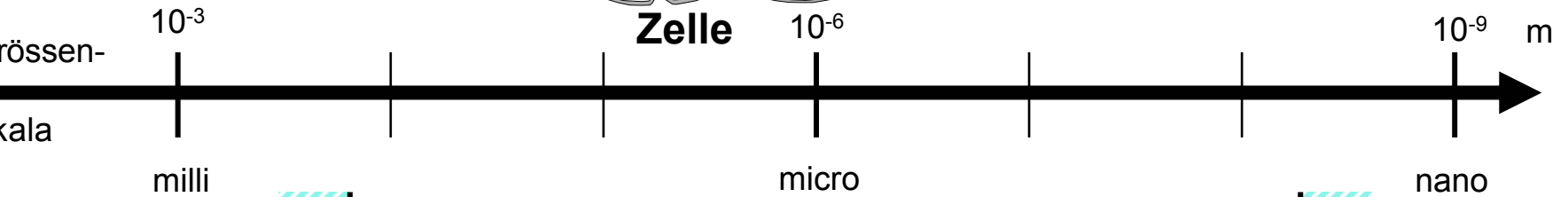
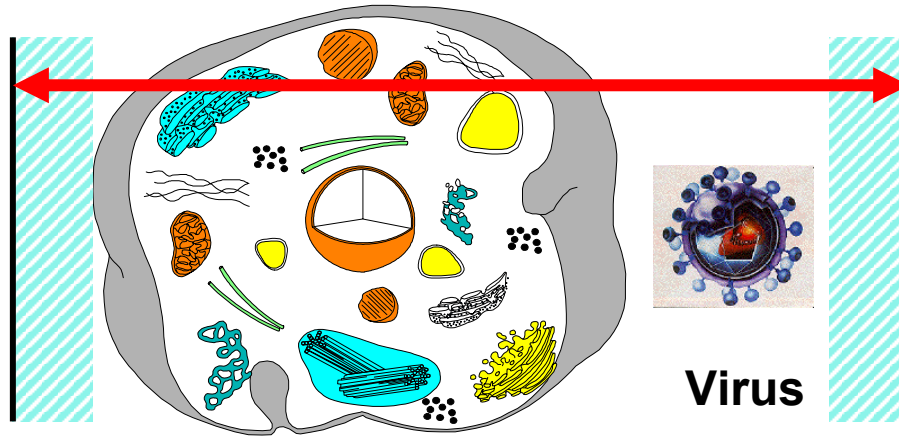


Zurich Research Laboratory
Micro- and Nanomechanics Group

Quelle: P. Vettiger, IBM

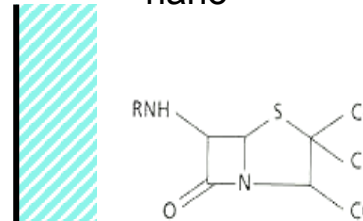
Nanotechnik in der Medizin

Eingriff und Wirkungsmechanismen vieler Krankheiten



chirurgische Instrumente

Heutige Eingriffsmöglichkeiten der Mediziner in der Therapie



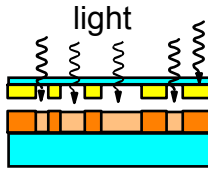
Medikament

Herstellungsverfahren für kleine Strukturen

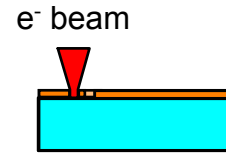
Technologien für
Strukturherzeugung



mechanische
Bearbeitung



Optische Lithografie



Teilchenstrahl-
lithografie

Rastersonden-
Lithografie,
Selbstorganisation

Replikation

10^{-3}

10^{-6}

10^{-9} m

Auflösung

milli

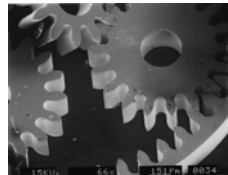
mikro

nano

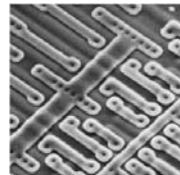
Typische
Objekte



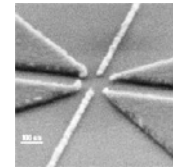
Uhren-
Komponenten



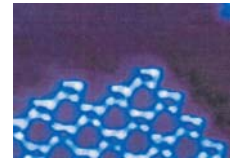
LIGA-
Getriebe



Mikrochip

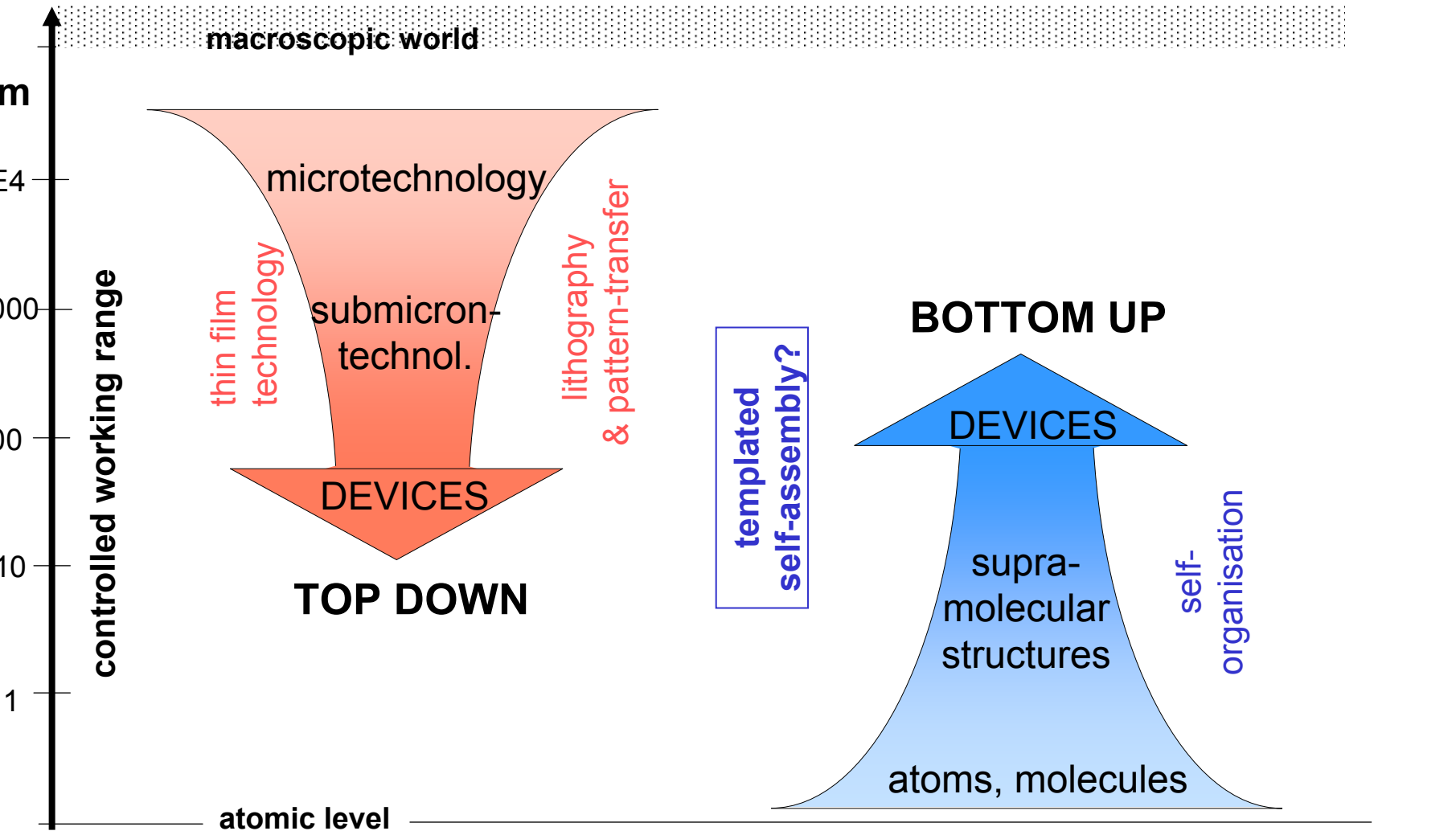


Nanoelektronik



Moleküle

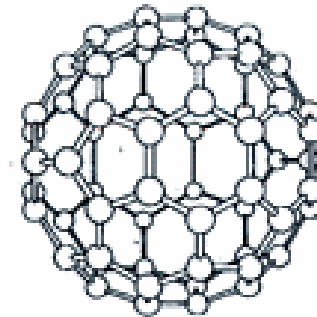
Approaches to NANOTECHNOLOGY



C₆₀ Moleküle: „Bucky Balls“

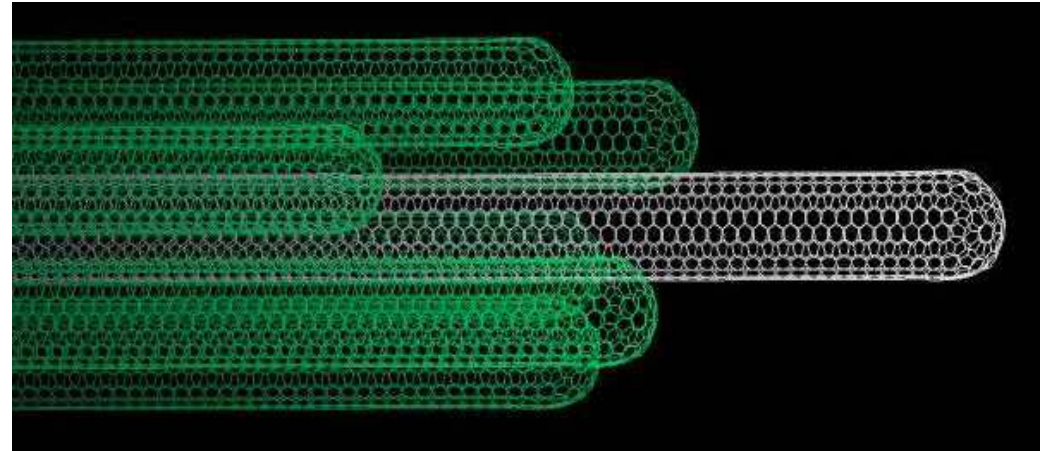
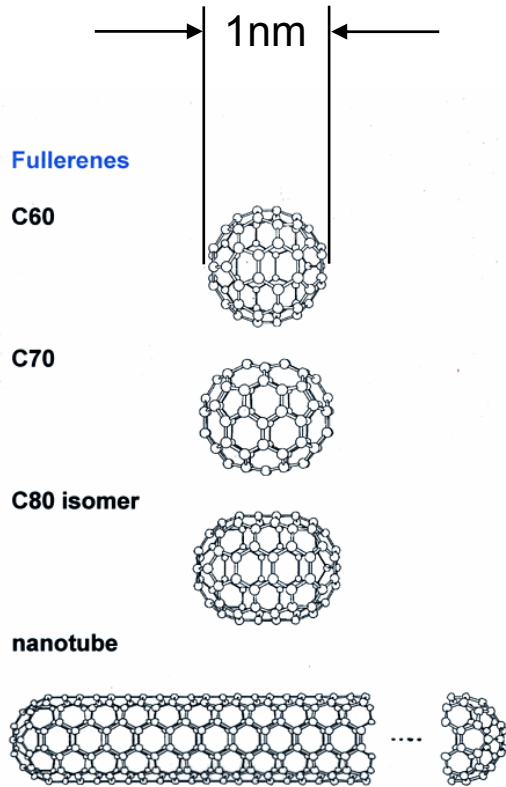


Kugelförmiges, aus 60 Kohlenstoffatomen fussballförmig aufgebautes Molekül mit 1nm Durchmesser



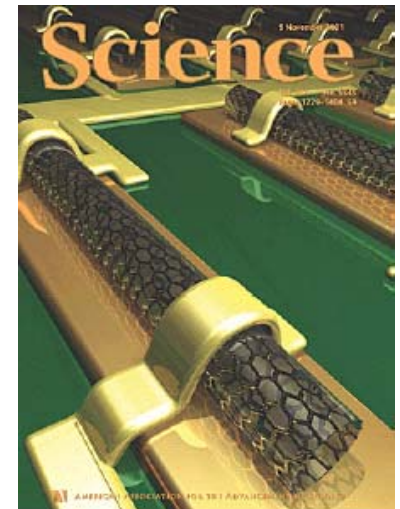
R. Smalley et al, 1985

Kohlenstoff "Nanoröhrchen"



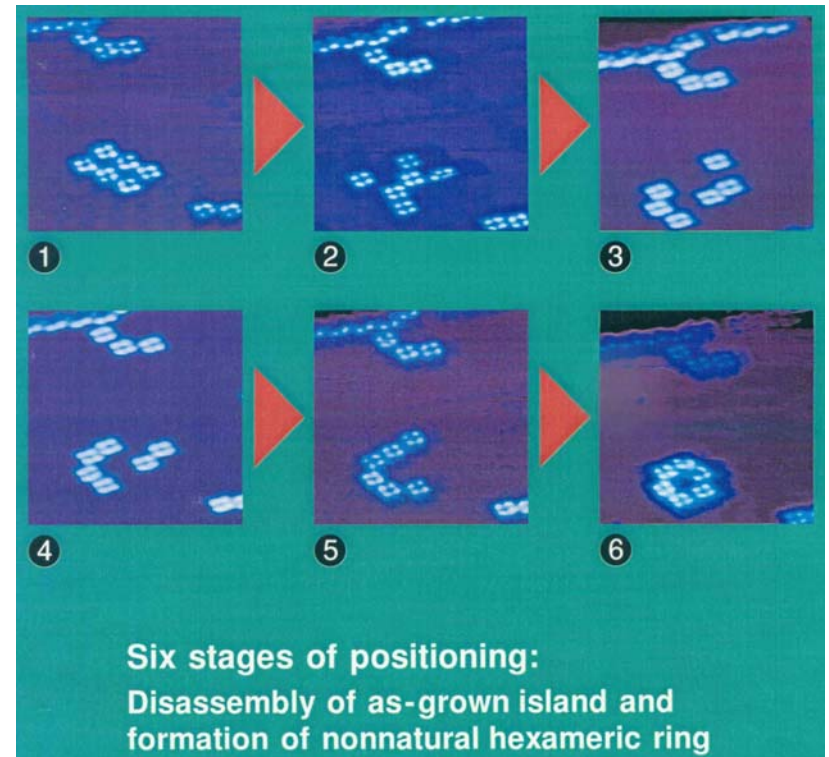
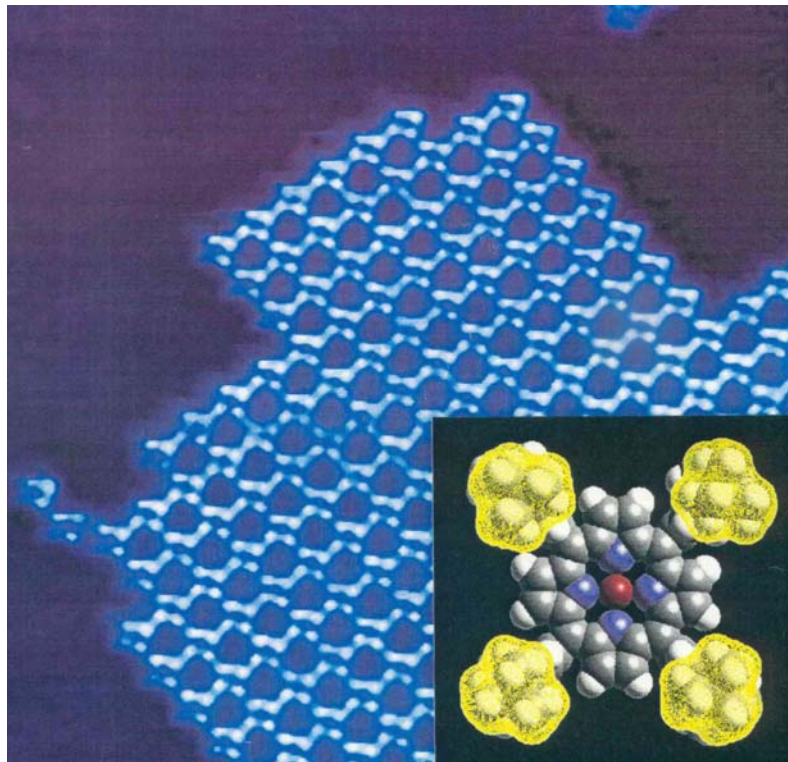
Zugfestigkeit (single-wall): $>50\text{GPa}$

Aussergewöhnliche
Elektronische Eigenschaften:
**Nanoelektronik basierend
auf C-Nanoröhren?**



Hantieren mit einzelnen Molekülen „per Mausklick“

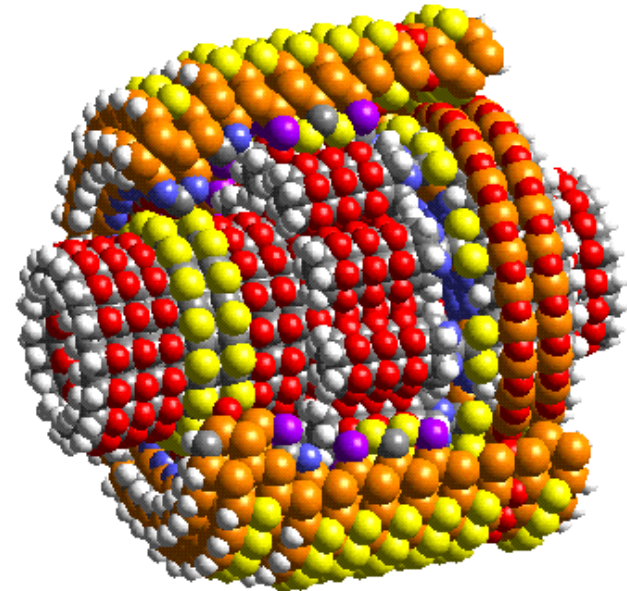
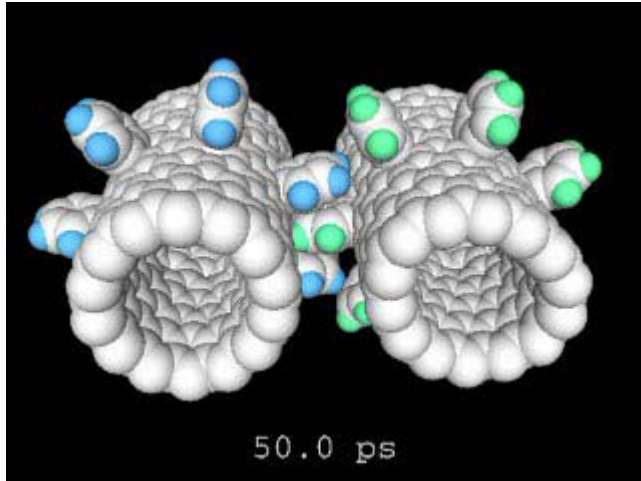
Cu-TPOB-porphyrin Moleküle auf einer Kupfer-Oberfläche bei Raumtemperatur.
Die Positionierung wird mit der Spitze eines Tunnelmikroskopes erreicht.



Source: Th. Jung et al. IBM/PSI

Nano-Visionen....

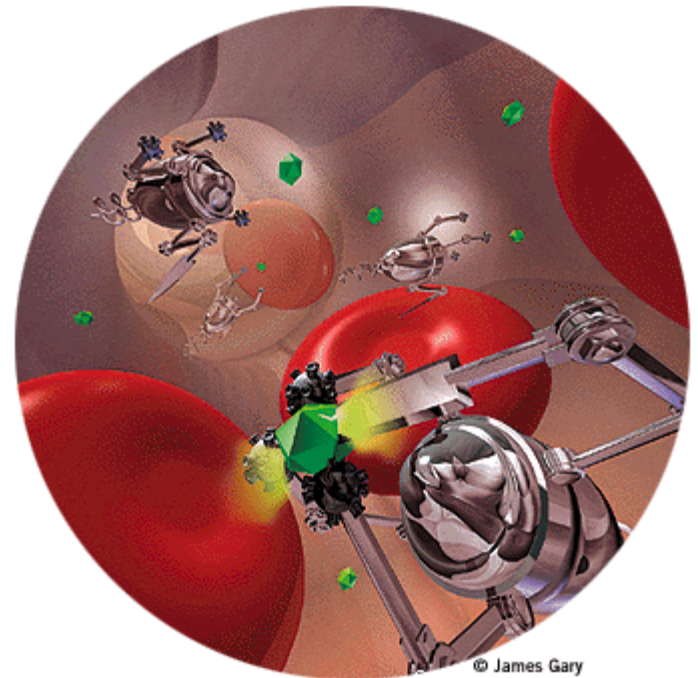
Molekulare Maschinen: Getriebe als Komponenten für Nanoroboter

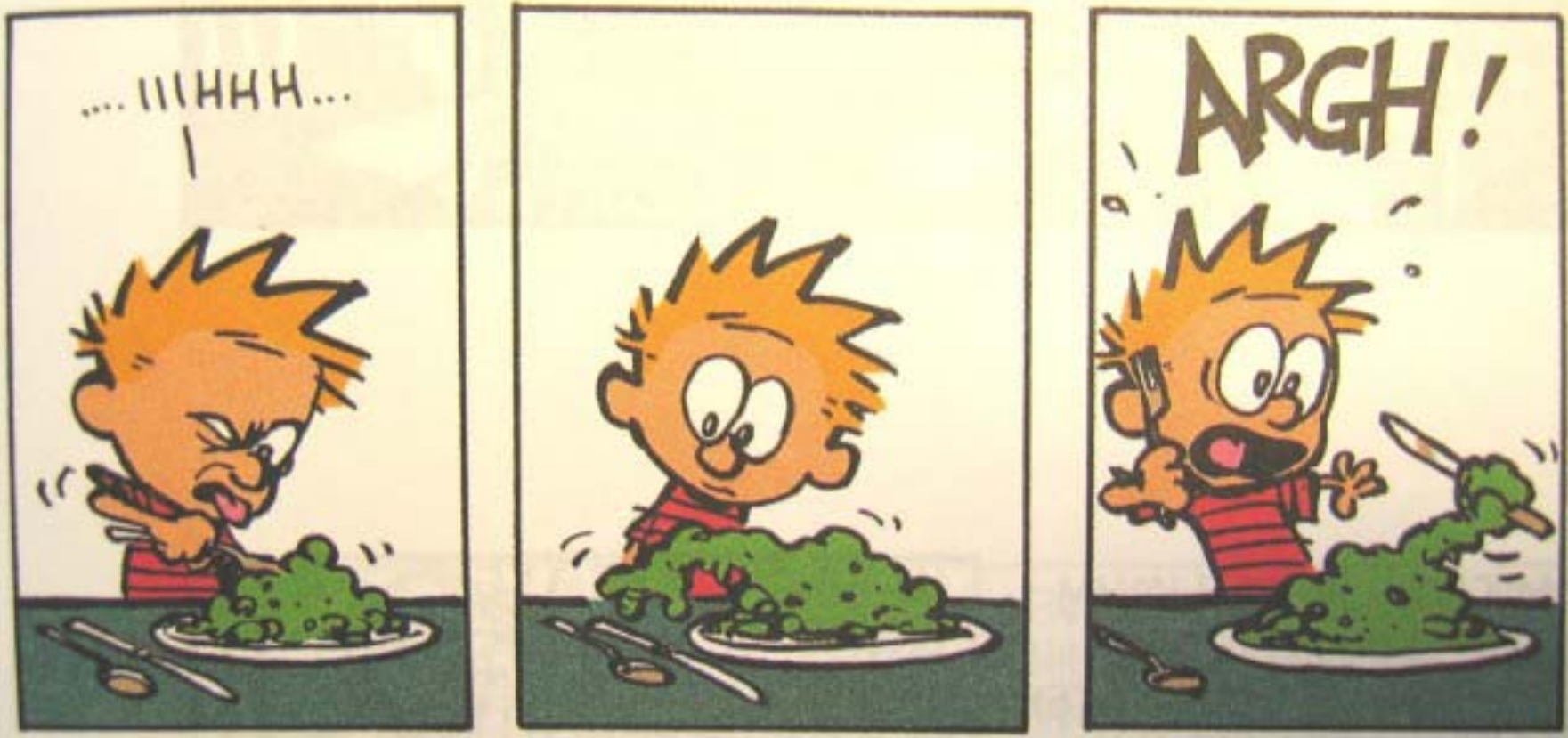


Copyright 1995 IMM and Herox.
Do not reproduce without permission.

Nano-Visionen

Nano-Roboter im Körper: lokales Reparieren oder Beseitigen von Fremdkörpern: Vielleicht möglich, aber sicher nicht so!





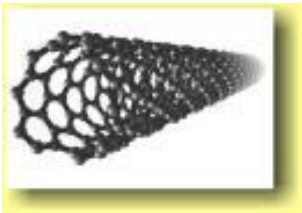
Calvin im Kampf mit dem grauen Schleim des Alltags (Bill Watterson):

Merke: Eine zu stark ausgeprägte Phantasie ist nicht immer eine gute Voraussetzung für ein glückliches Leben (gilt auch für Forscher)!

Was wird von der Nanotechnologie erwartet?

- Omnipräsente Verfügbarkeit aller gewünschter Information
- Energie-effiziente Herstellung von Gütern ohne Abfälle oder problematische Emissionen
- Verfügbarkeit von Materialien, deren Eigenschaften sich gezielt und nach Bedarf verändern lassen
- Rasche Heilung von Krankheiten und Reparaturen im Körper ohne Nebenwirkungen und zu vertretbaren Kosten
- Verlustarme Umwandlung und Speicherung von Energie
- U. v. a. m.

Nanotechnologie- tatsächliche und vermeintliche Risiken



Objekte im Nanometer-Massstab sind (wie alle kleinen Partikel) Schwebstoffe, die vom Körper aufgenommen werden und Krankheiten oder Vergiftungen auslösen können.



Künstlich veränderte, sich selbst vermehrende Nano-Organismen können ein Risiko darstellen. Dies ist jedoch kein Problem nur der Nanotechnik, da sich solche Strukturen auch mit klassischen Methoden der Molekularbiologie realisieren lassen.



Sich selbst vermehrende Nano-Roboter, die alles und zum Schluss sich selbst fressen, gehören aus heutiger Sicht in den Bereich „Science Fiction“.

Schlussfolgerungen (Teil I)

Die Nanotechnologie hat enormes Anwendungspotential

- In der Informationstechnologie
- In den Biowissenschaften und der Medizin
- Für neue, „intelligente“ Materialien und Oberflächen.

Auch die Nanotechnologie birgt Risiken. Diese sind aus heutiger Sicht nicht spezieller Natur bzw. sie erscheinen beherrschbar.

Und hier vielleicht das wichtigste:

Es braucht Geduld!

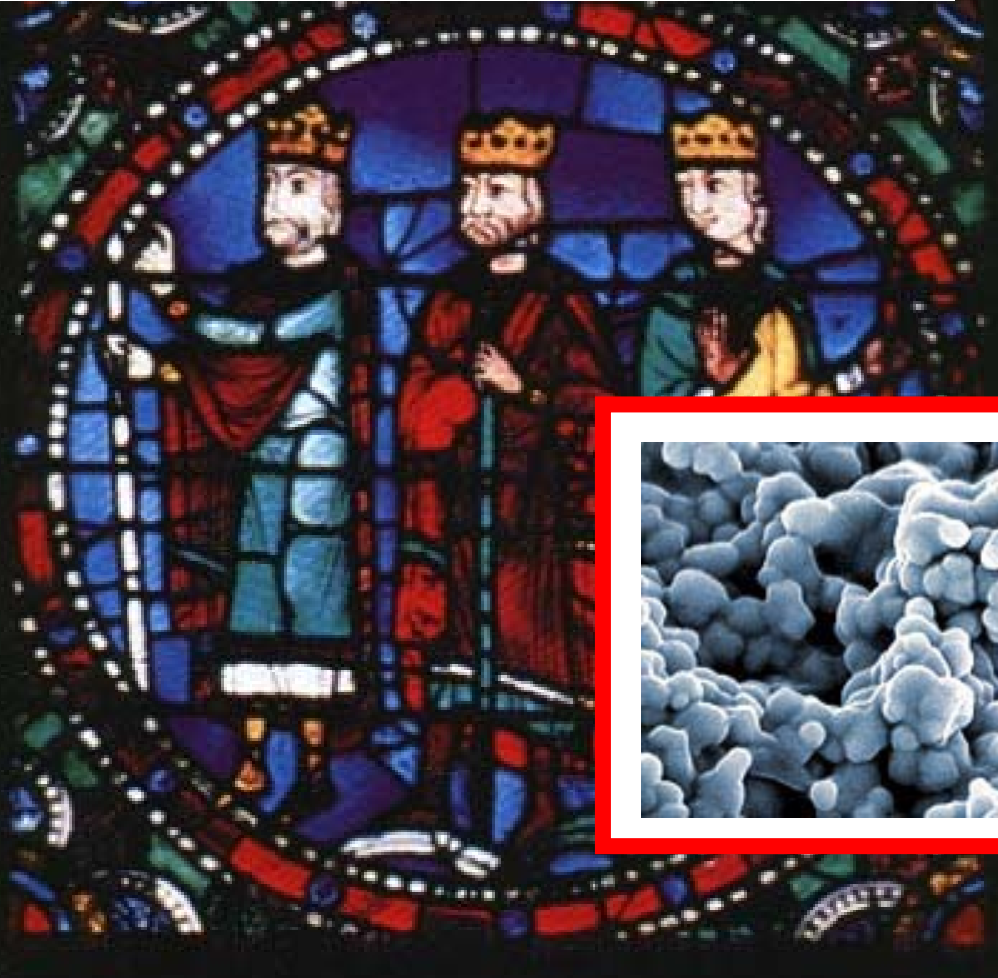
NANOTECHNOLOGIE

Teil II: Kurz- und mittelfristige Anwendungen

Aktualisierte und ergänzte Fassung eines Vortrages
"Nanotechnologie und Alltag"
von Helmut Schiff und Jens Gobrecht
Paul Scherrer Institut, Villigen

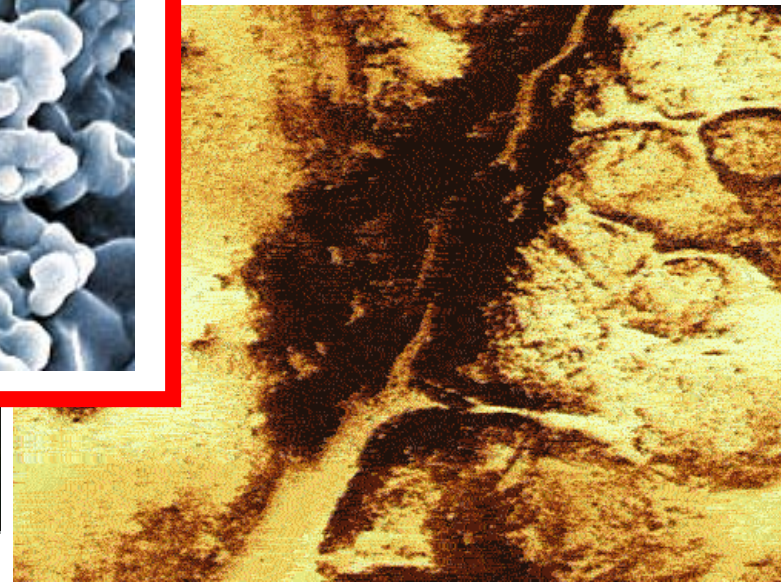
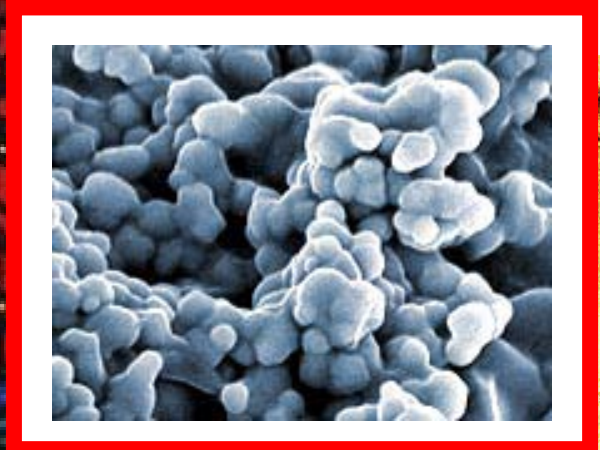
Was hat die Sonnencreme mit gotischen Fenstern zu tun?

Anwendungsbeispiel: Nanopartikel



Manche Kirchenfenster verdanken ihrer rubinroten Farbe nanometergroßen Goldpartikeln, die mit dem Glas einschmolzen wurden.

Mittels kleinster Nanopartikel aus Titanoxid in der Sonnencreme kann die schädliche UV-Strahlung, effektiv aus dem Sonnenlicht herausgefiltert werden, das auf die Haut trifft.

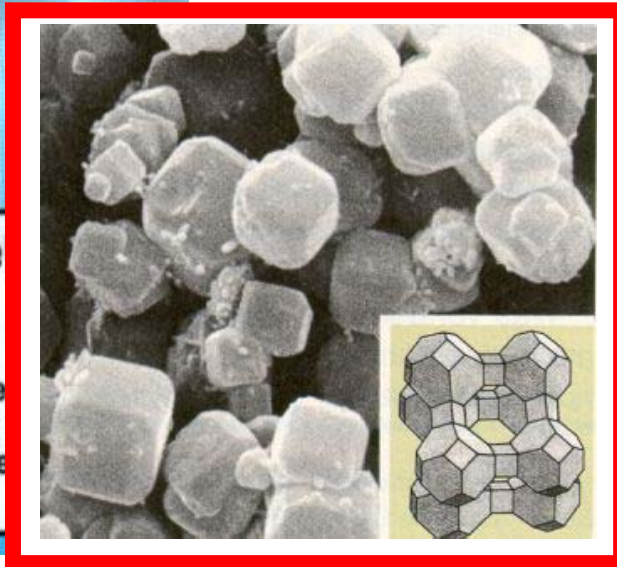


Was hat Waschmittel mit einem Molekularsieb zu tun?

Vollwaschmittel
ULTRA PLUS
30% 40% 60% 95%

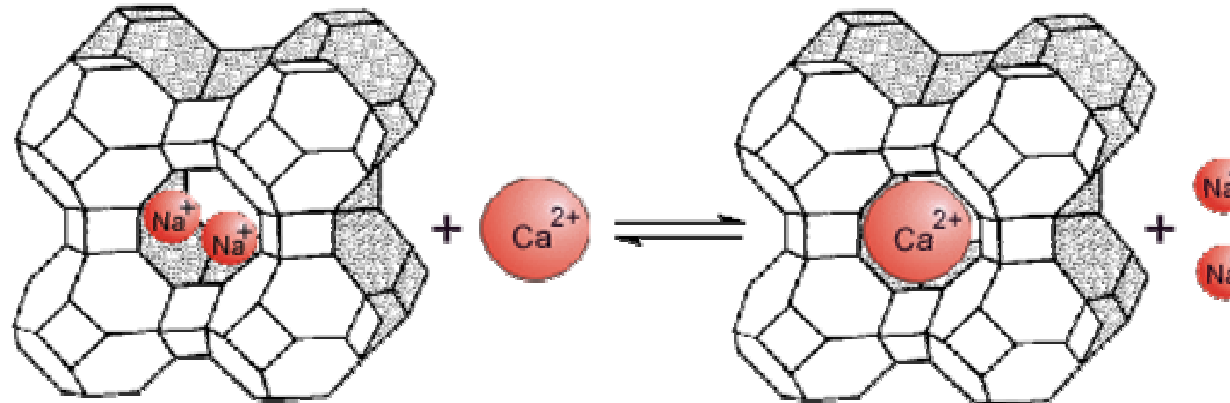
Inhaltsstoffangaben (gemäß EU-Empfehlung)

über 30%	Zeolithe
15-30%	Bleichmittel auf Sauerstoffbasis
5-15%	anionische und nichtionische Tenside
unter 5%	Phosphonate, Seife, Polycarboxylate
enthält	Enzyme (Protease), optische Aufheller

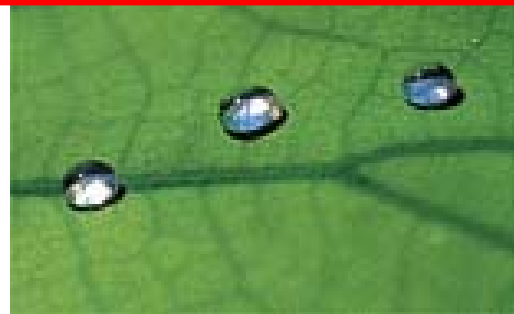
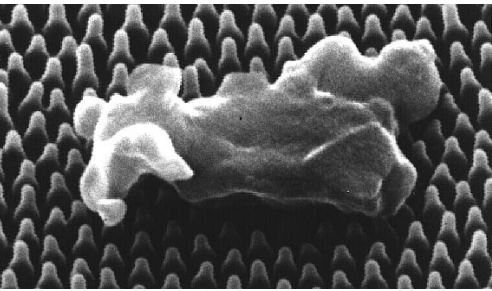


Mengenmäßig der größten Anwendungsbereich für Zeolithe findet man im Bereich der Wasserenthärtung, z. B. für Waschmittel. Hier wird Ca^{2+} gegen Na^{+} ausgetauscht.

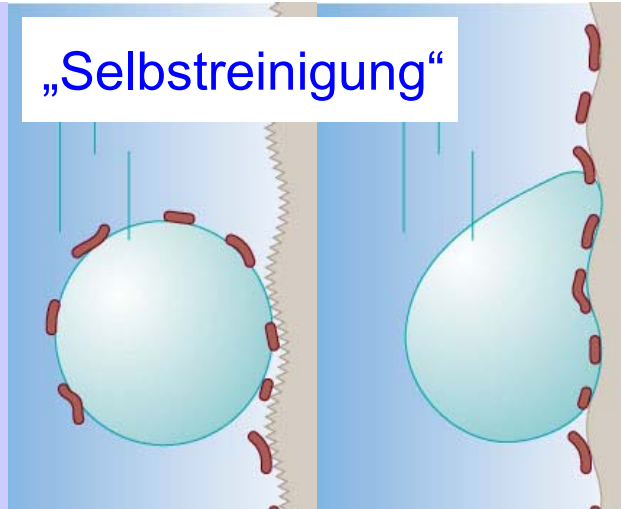
Anwendungsbeispiel:
Zeolithe als Ionentauscher
in Zeolithen kann seine eigenen Kationen - z. B. Natrium - gegen solche aus dem umgebenden Medium austauschen.



Was hat ein selbstreinigender Anstrich mit der Lotusblume zu tun?

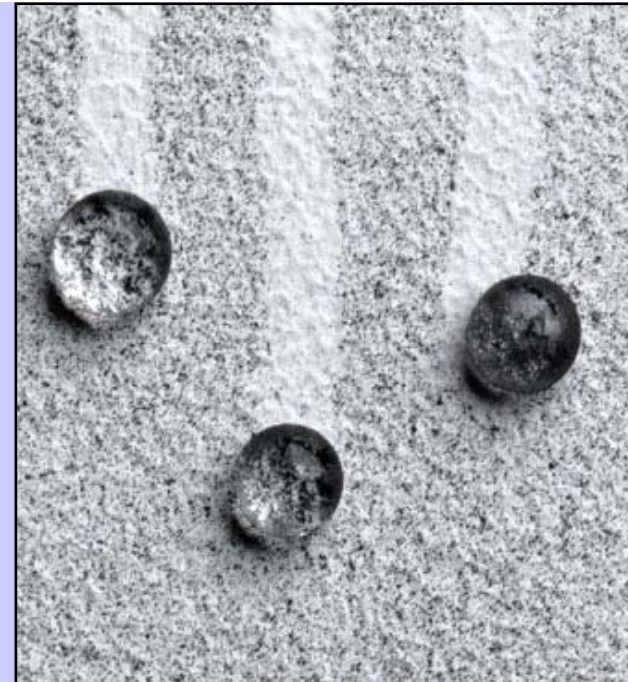


„Selbstreinigung“



The leaves of the Lotus plant cannot be wetted due to micro- and nanostructures at the surface

- reduction of contact area
- hydrophobic surface
- reduction of surface energy
- dirt is taken away by water drops



® Lotusan: Die Silicon Fassadenfarbe mit Lotus-Effekt
Schmutz perlt mit dem Regen ab.

<http://www.lotusan.de/islotus.htm>

Anwendungen des Lotus-Effekts

Leistungsmerkmale

- selbstreinigend, unbenetzbar
- kostenreduzierend, umweltschonend

Einsatzgebiete

- Verkehrsschilder, Leitpfosten (-> Lesbarkeit)
- Wintergärten
- Gartenmöbel, Sonnenschirme und Markisen
- Oberflächen im Bad (Duschvorhang, Zwischenwände)
- Solarzellen (-> Wirkungsgrad erhalten)
- Leuchtwerbung (-> Sichtbarkeit)
- völlig entleerbare Gefäße (Chemikalieneimer)
- Kunststofffolien für Kopierer
(-> kein Tonerstaub bleibt haften)



Honiglöffel mit Lotuseffekt

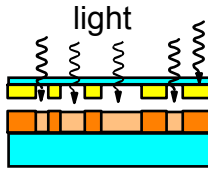
Quelle: Prof. Dr. Wilhelm Barthlott, Universität Bonn

Herstellungsverfahren für kleine Strukturen

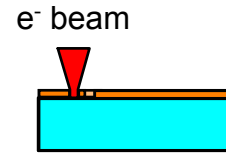
Technologien für
Strukturherzeugung



mechanische
Bearbeitung



Optische Lithografie



Teilchenstrahl-
lithografie

Rastersonden-
Lithografie,
Selbstorganisation

Replikation

10^{-3}

10^{-6}

10^{-9} m

Auflösung

milli

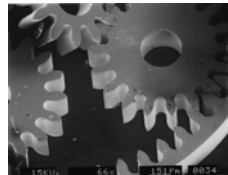
mikro

nano

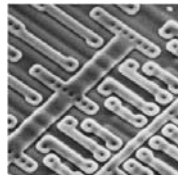
Typische
Objekte



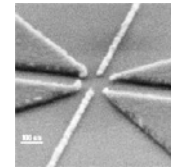
Uhren-
Komponenten



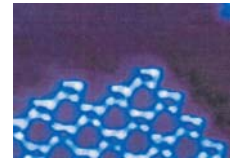
LIGA-
Getriebe



Mikrochip



Nanoelektronik



Moleküle

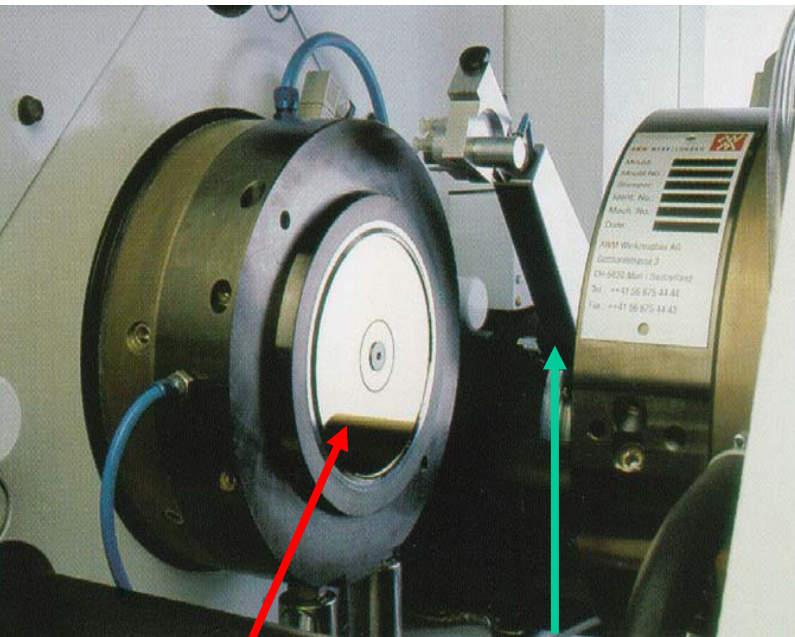
Replikation - So einfach wie Küchentechnologie ?



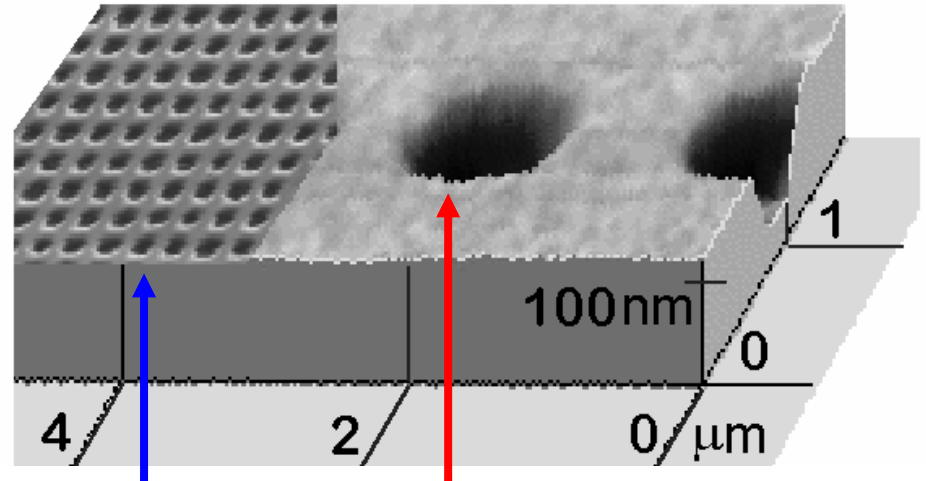
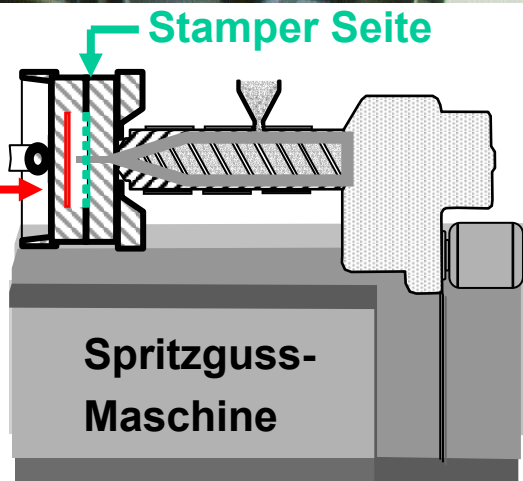
**Heißpräge-
Karussell mit
4 Stationen**

Geräte für Heißprägen von Waffeln
- mit Hilfe von thermisch vernetzbaren
(thermoset) „Polymeren“
- parallele (Kleinserien) Produktion

Spritzguss von nanostrukturierten Compact Discs

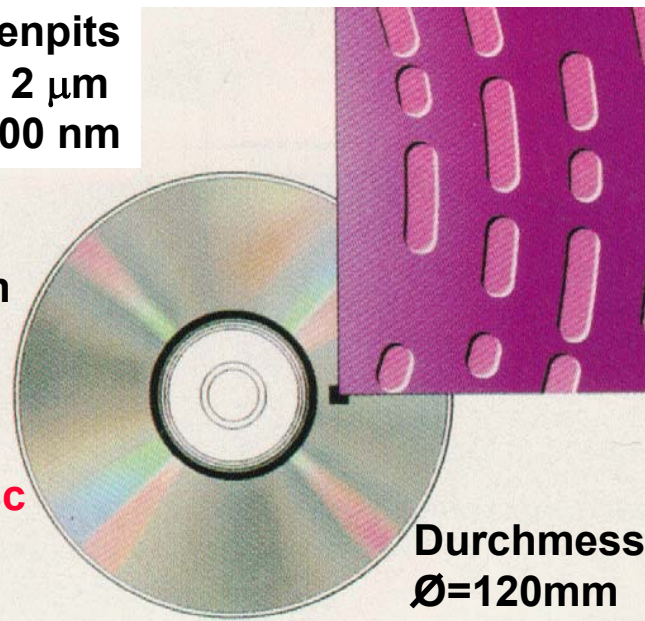


**abform-
werkzeug
(Spiegelseite
und Greifarm)**



CD-Datenpits
Periode 2 μm
Tiefe 200 nm

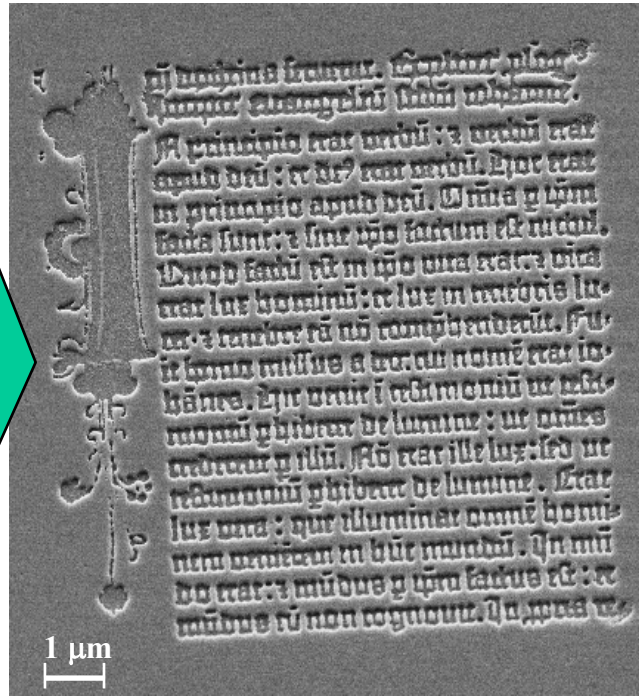
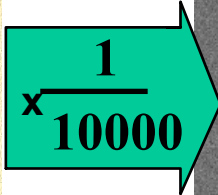
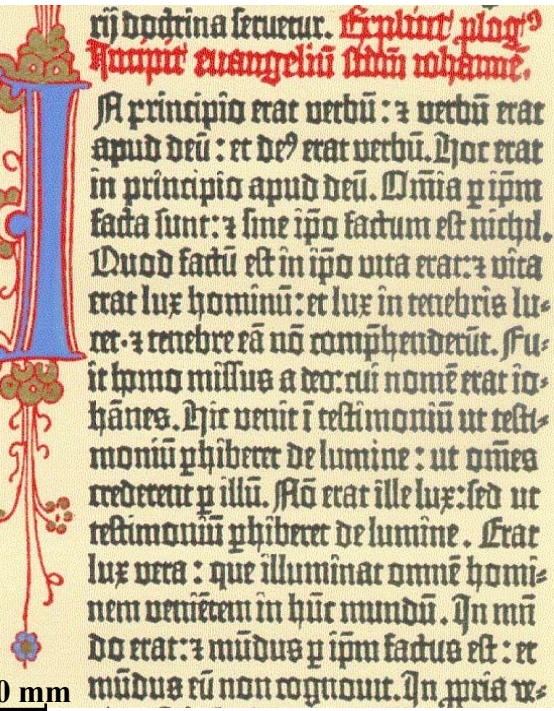
„Nanopits“
Periode 100 nm
Tiefe 70 nm



Compact Disc
650 Mbyte
48 Mbit/cm²

**Durchmess
Ø=120mm**

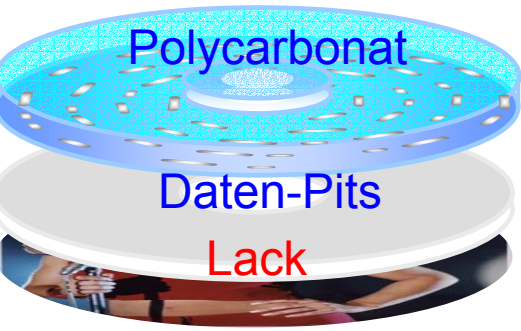
Nanoreplikation durch Polymerspritzguss



Beim Spritzguss wird das Relief eines Stempels in einen Kunststoff abgeformt.



Maximale der Gutenberg Bibel

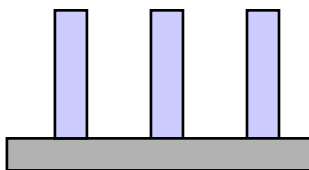
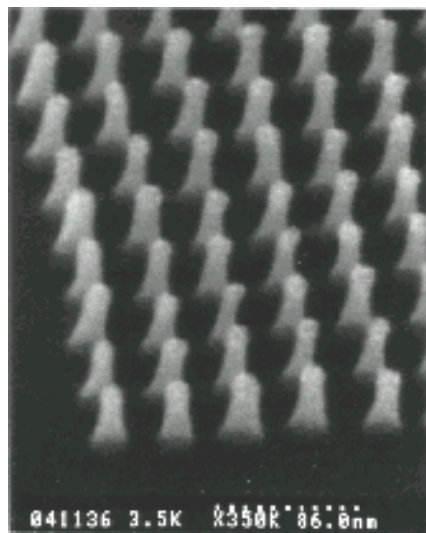


Aufnahme der Oberfläche einer spritzgegossenen Compact Disc mit dem Rasterelektronenmikroskop

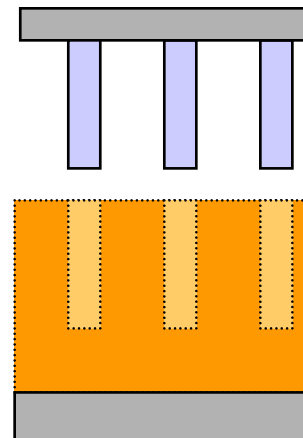
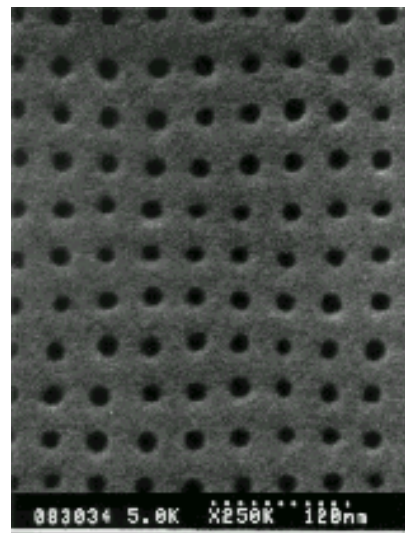
Beschichtung und Bedruckung



Herstellung von Nanopunkten durch Heißprägen

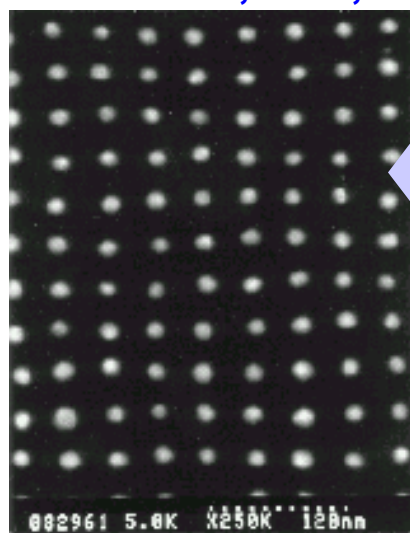


Heißpräge-
Lithographie



Source: S. Chou, NSL, 1998

Master:
Prägestempel
Herstellung mit
Elektronen-
strahlolithographie
Material: Silizium
Größe: bis 10 nm
Periode: 40 nm
Tiefe: 60 nm



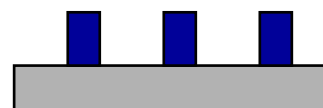
Lift-off

**Abgeformte
Struktur**

- Material: Plexiglas
auf Silizium

Metall Punkte

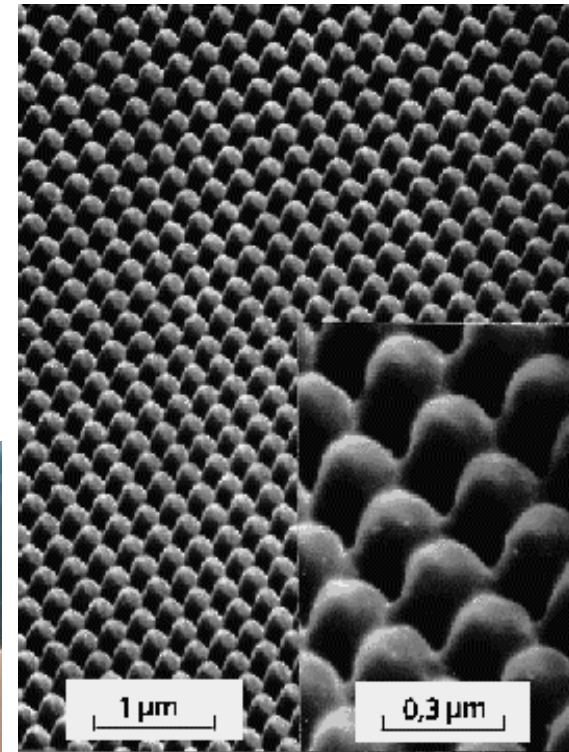
- Material: (nicht angegeben)
- exzellente Uniformität



Entspiegelung durch Nanostrukturen



Schichten mit kleinen Brechungsindizes lassen sich über eine gezielte Mischung von Luft mit Feststoffmaterial erreichen.



In ORMOCER® geprägte Mottenaugenstruktur, die eine Entspiegelung der Oberfläche bewirkt, hergestellt im Stempelprägeverfahren.



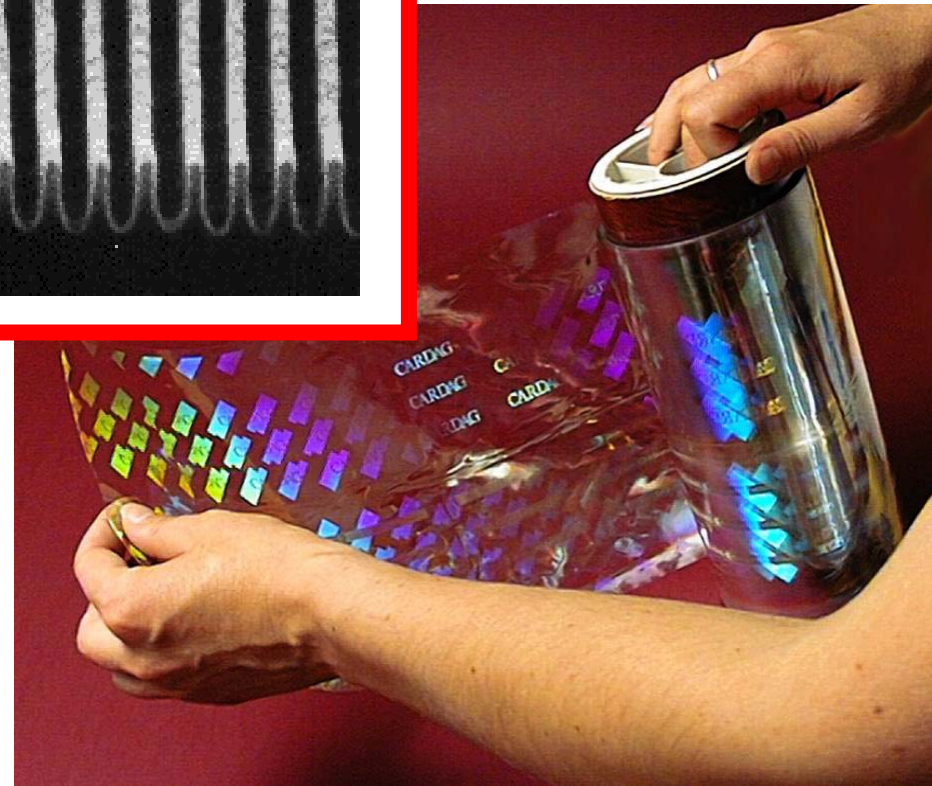
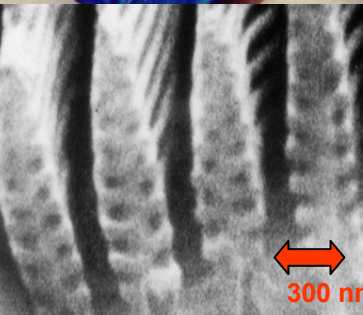
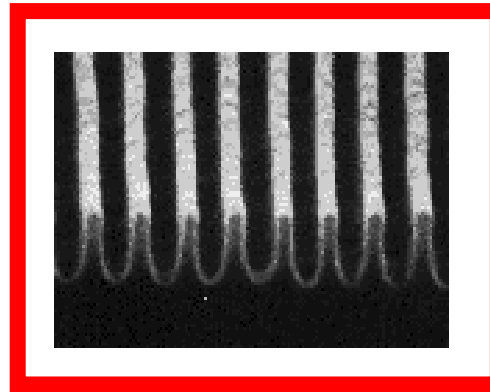
Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme

Handy mit mikro-geprägtem Sichtfenster

Application: Diffractive security elements



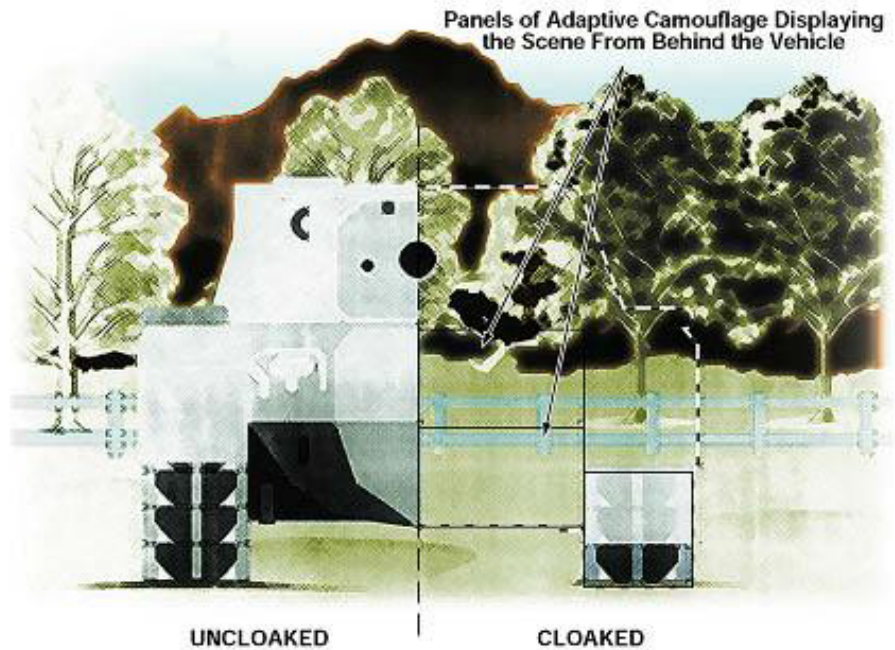
Example for diffractive colours:
Tropical butterflies



Periodic diffractive elements produced by „roll-embossing“ to be laminated into credit cards, bank notes etc.

Nano-Visionen I

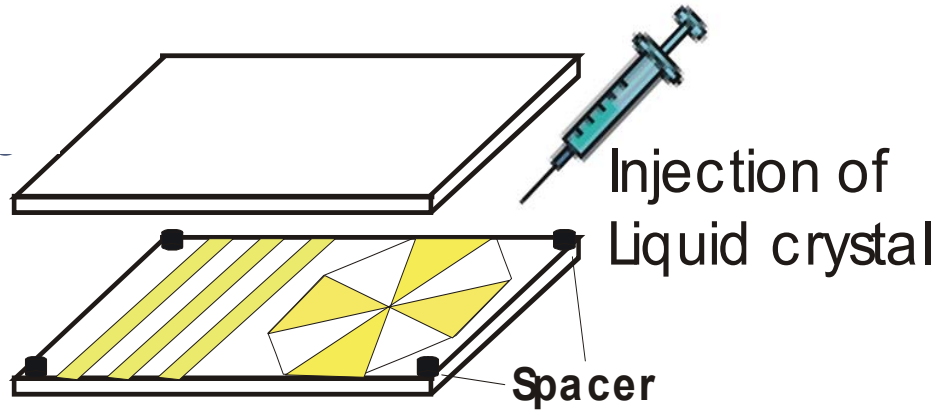
„Intelligente“ Materialien, bei denen sich bestimmte Eigenschaften „schalten“ lassen, z.B. die Farbe bei Textilien oder Anstrichen



Micro Contact Printing:

Nanopatterns for Liquid Crystal Displays

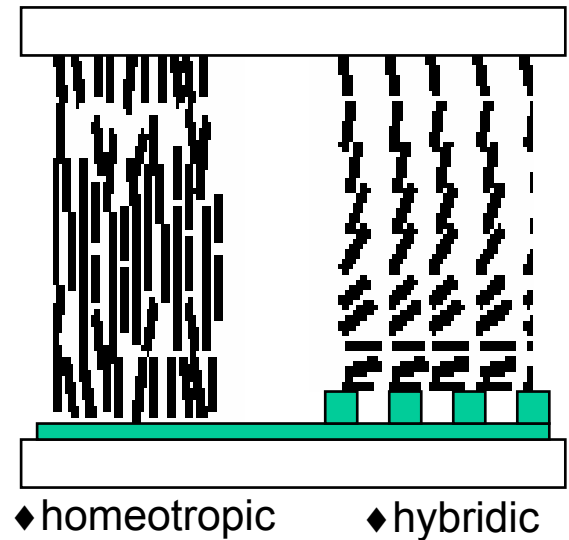
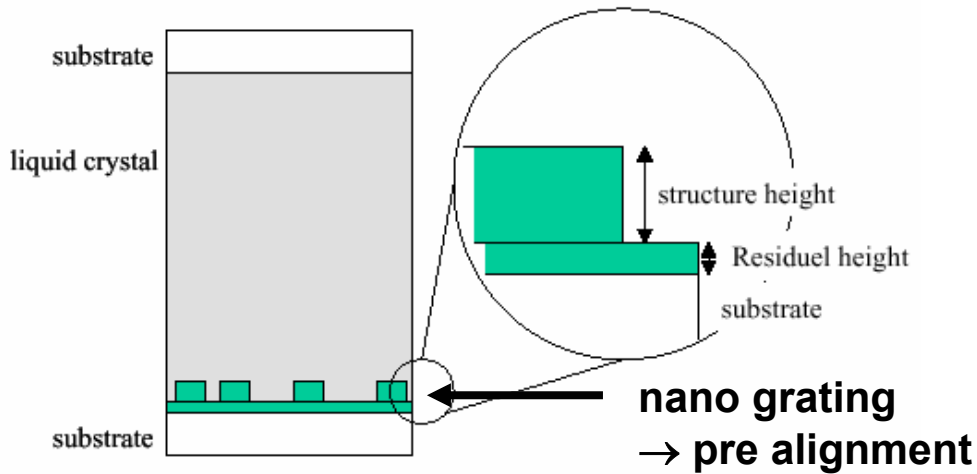
Patterned surface



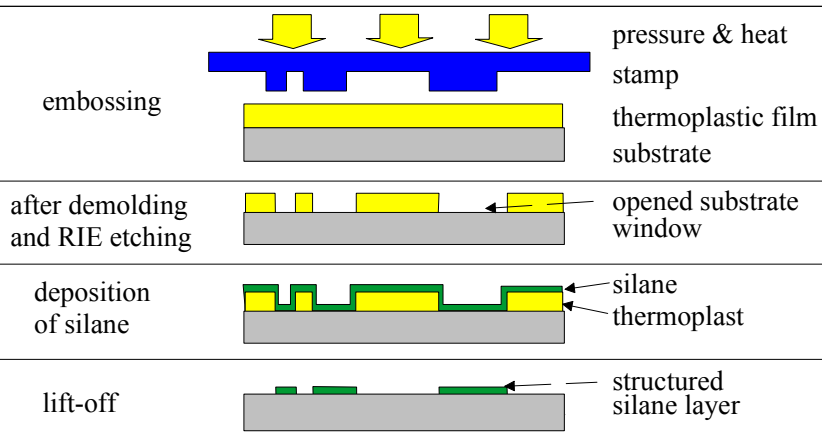
Aim: Achieve liquid crystal alignment by defined topographical or chemical patterning instead of rubbing

Use: Bistable switching (lower power consumption)

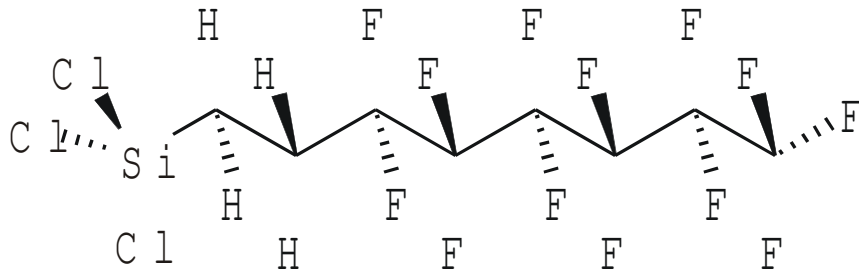
Possible alignment



NanoLiC: Nanopatterns for Liquid Crystal Displays



Molecular structure of silane applied in this study



tridecafluoro-1,1,2,2-tetrahydrooctyl)trichlorosilane (TFS)

Stamp:
AFM image



Embossed structure:
AFM image

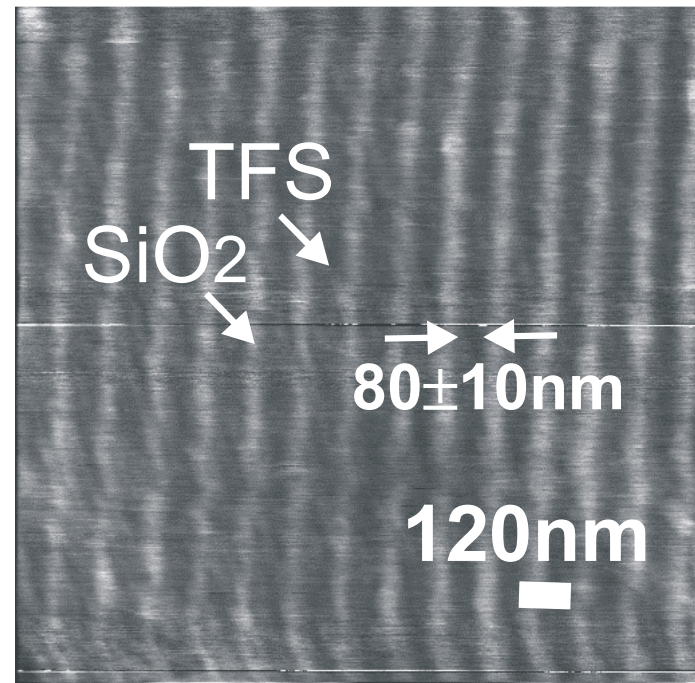
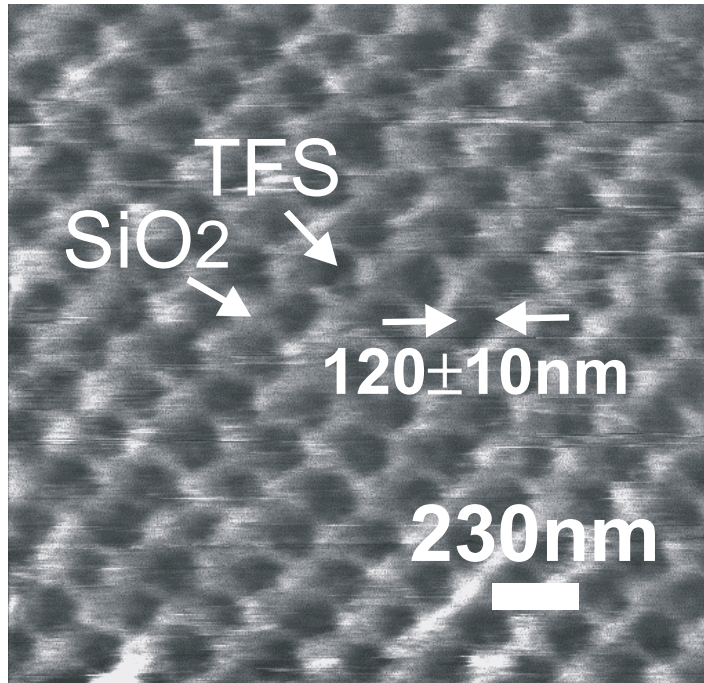


SiO₂: High friction
TFS: low friction

Chemical patterns after lift-off:
LFM image



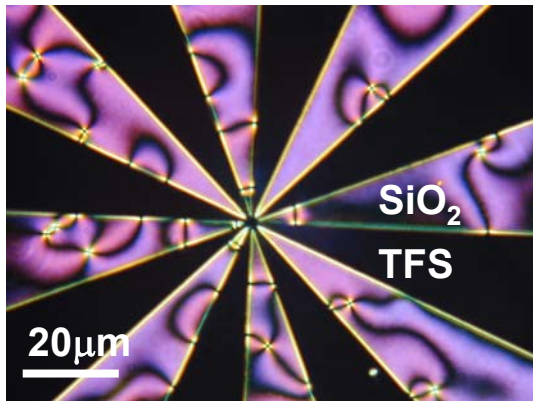
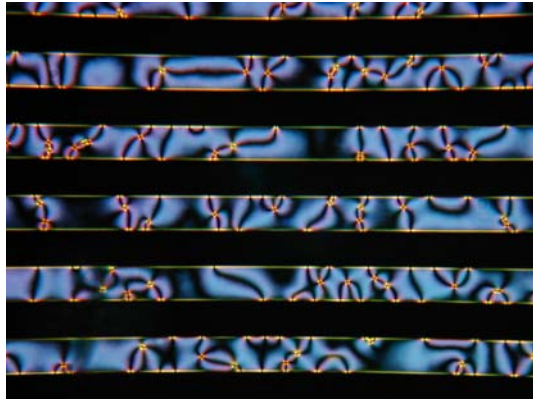
High Resolution Chemical Structures



- Tridecafluoro-1,1,2,2-tetrahydro octyltrichlorosilane (TFS).
- TFS dots of $d=(120 \pm 10) \text{ nm}$ and lines of $W=(80 \pm 10) \text{ nm}$ were achieved without any modification of pattern transfer process.
- States of art chemical structures
 - Dip pen nanolithography: 60 -100nm (Zhang et al., Nanotech. 13(02)2129.)
 - Contact printing < 100nm (Xia and Whitesides, Langmuir 13(97)2056.)

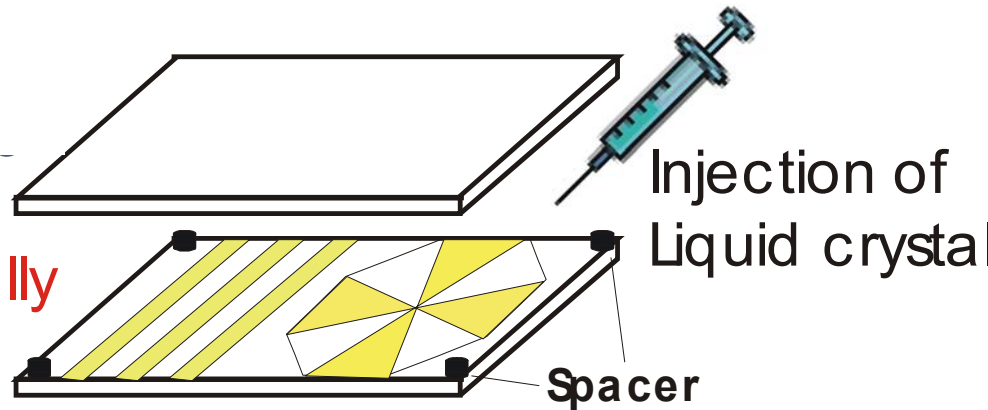
S. Park
C. Padeste

Liquid Crystal Displays on Chemically Patterned Surfaces



LC texture under crossed polarization

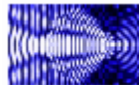
Chemically Patterned Surface



◆ LC textures on TFS: homeotropic (black)

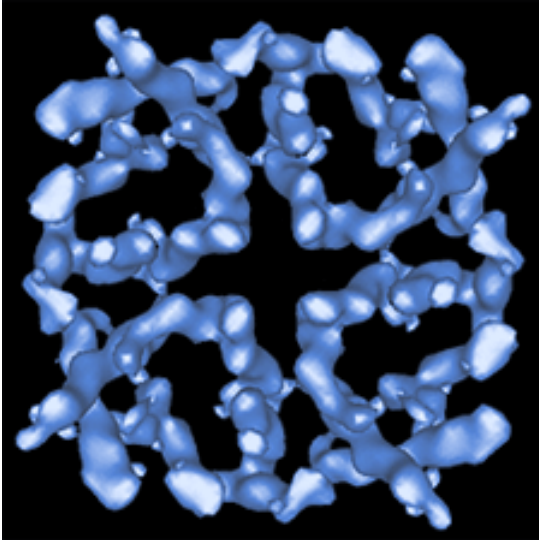


◆ LC textures on SiO₂: hybrid (colored)

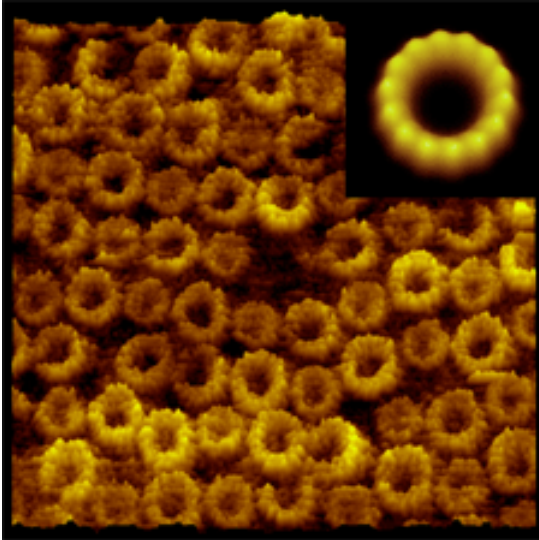


AFM in der Biologie

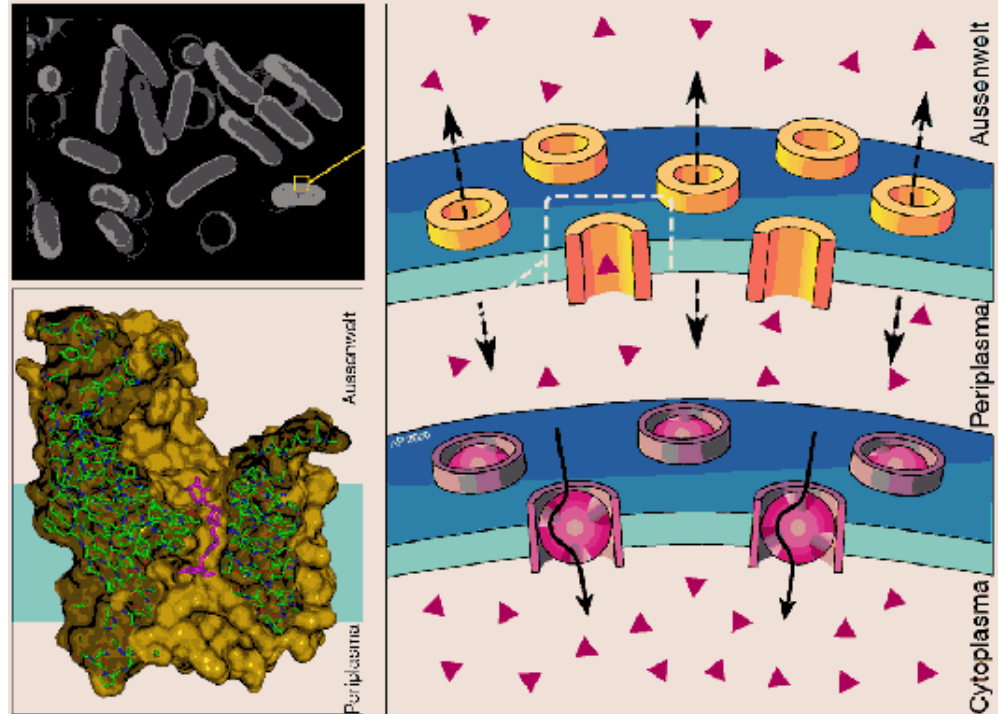
TEM



AFM

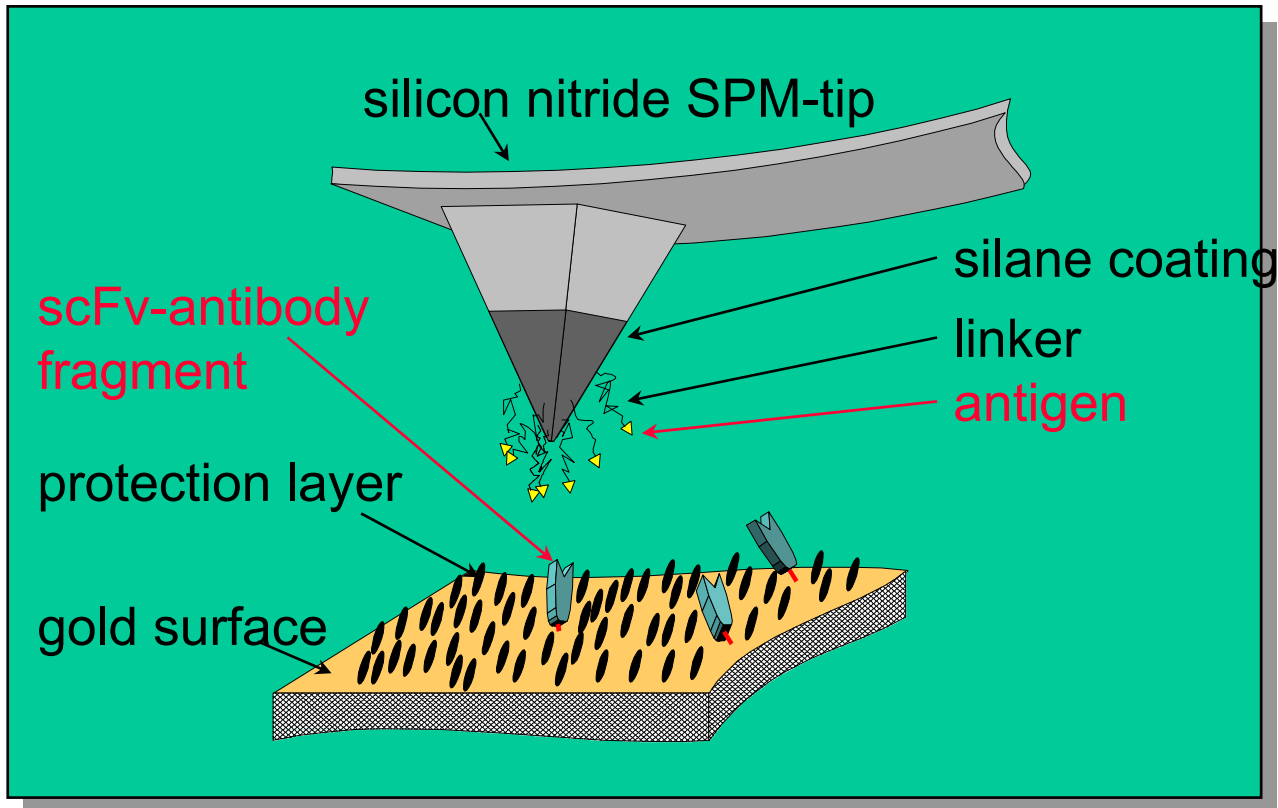


Beispiel:
Forschung an Membranproteinen.
Frage nach dem Zusammenhang
zwischen Funktion und Struktur.



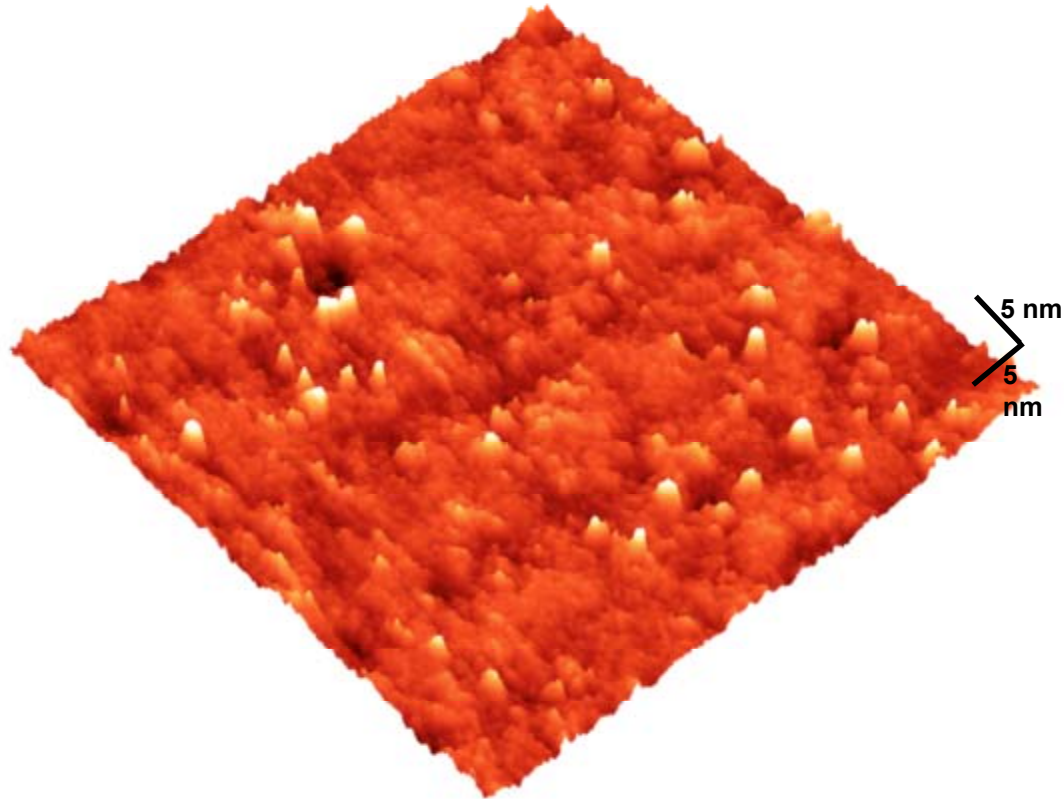
Quelle: Biozentrum Basel

Anwendungsbeispiel: Einzelmolekül-Untersuchungen mit Rasterkraft-Mikroskopie

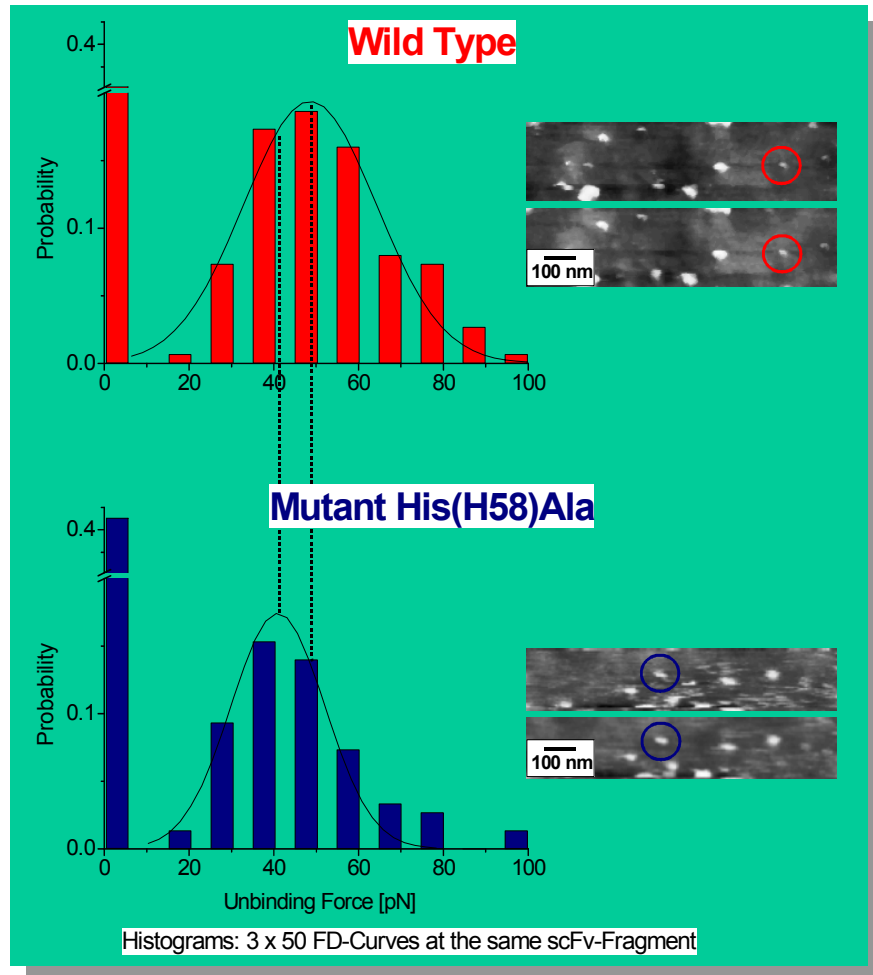


Messprinzip

scFv Molecules on Gold



Messungen der „Entbindung“ an modifizierten Molekülen



$$\frac{F_u[\text{His(H58)Ala}]}{F_u[\text{wild type}]} = 0.80 \pm 0.08$$

R. Ros et al.; *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **95**: 7402-7405 (1998)

Schlussfolgerungen Teil II

- "Historische" Anwendungen von Nanotechnologie bestanden im Einsatz von nanometergrossen Partikeln.
- Heutige Anwendungen bestehen in
 - der Entwicklung von Instrumenten zur Oberflächencharakterisierung in F&E
 - der Forschung in Bio- Festkörper und Materialwissenschaften
 - der Entwicklung von Fertigungstechnologien zur Materialbearbeitung im submikrometer-Bereich.
- Zukünftige Anwendungen dürften einige Überraschungen bereithalten.

Zugabe

Templated self-assembly of block-copolymer layers
using X-ray interference lithography.

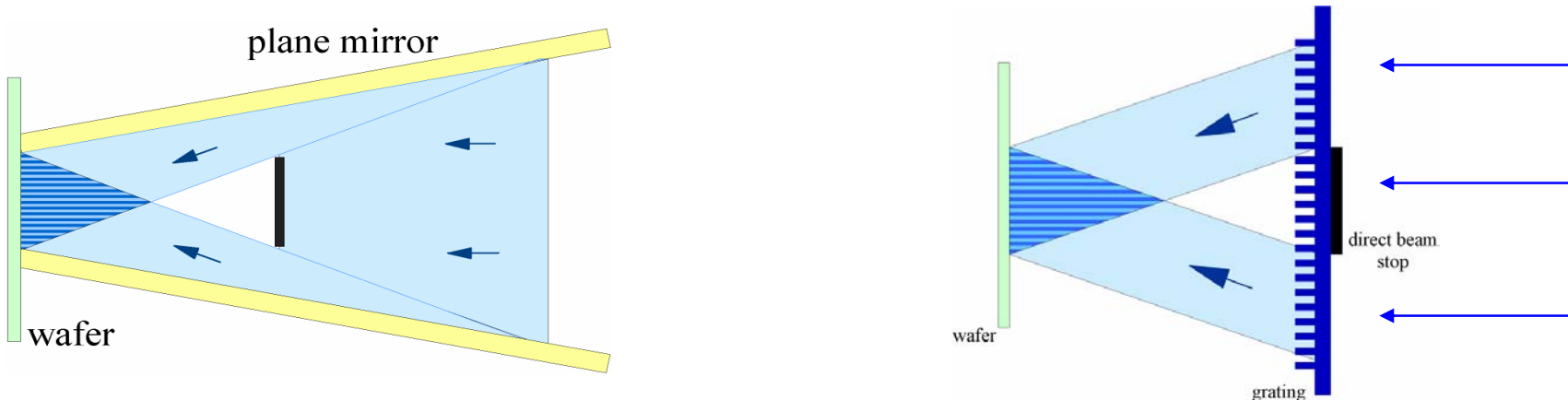
Interference Lithography (IL)

Goal: Creation of periodical structures on surfaces over large areas (cm^2) with periods $< 1 \mu\text{m}$

Method: Exposure of interference patterns originating from lasers or coherent synchrotron x-rays into resist

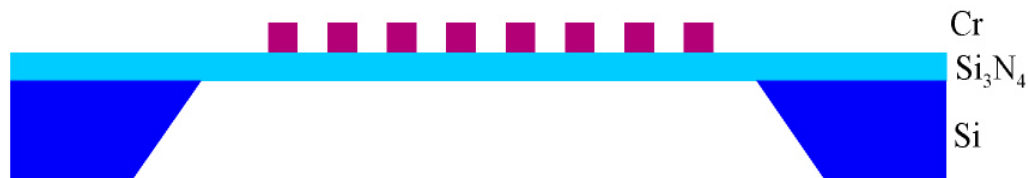
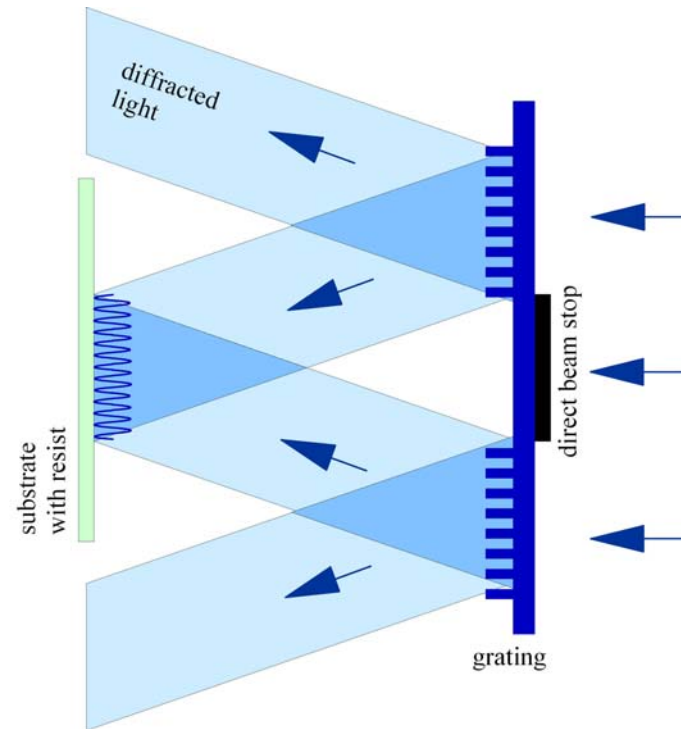
Applications:

Sensors, optics, fundamental research and more...



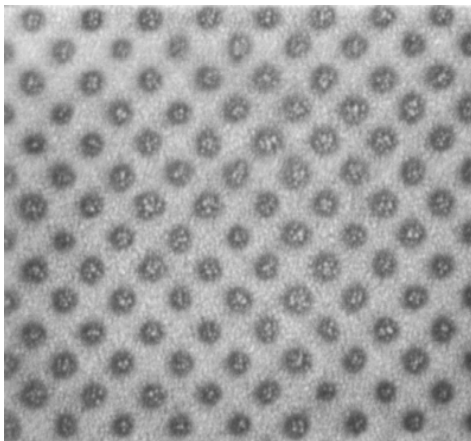
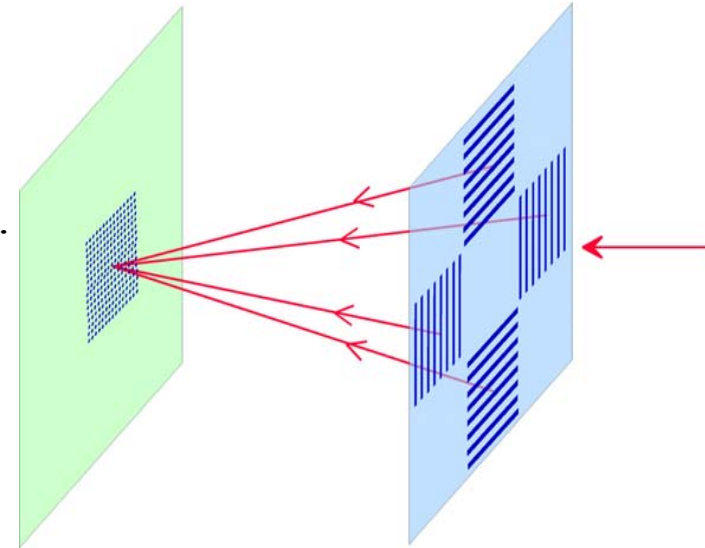
XIL with Diffractive Optics

- Frequency multiplication: Factor depending on the diffraction orders chosen
- Transmission grating patterned with e-beam
- Good match to properties of SLS
 - Achromatic
 - Requires spatial coherence
- Preliminary tests completed at SRC yielded gratings with $<50\text{nm}$ periodicity

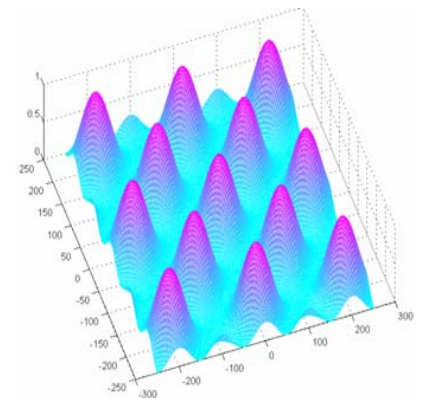


Multi-beam XIL with Diffractive Optics

- Two-dimensional periodic patterns in a single exposure
- Variety of symmetries possible: square, hexagonal etc.
- Demonstrated for the first time with x-rays to print 140 nm period square grid
- Instrumental in many proposed activities e.g. the protein crystal growth and block copolymer assembly



56nm period pattern (20nm holes) recorded in PMMA (exposed at SRC, Wisconsin)
H. Solak, PSI

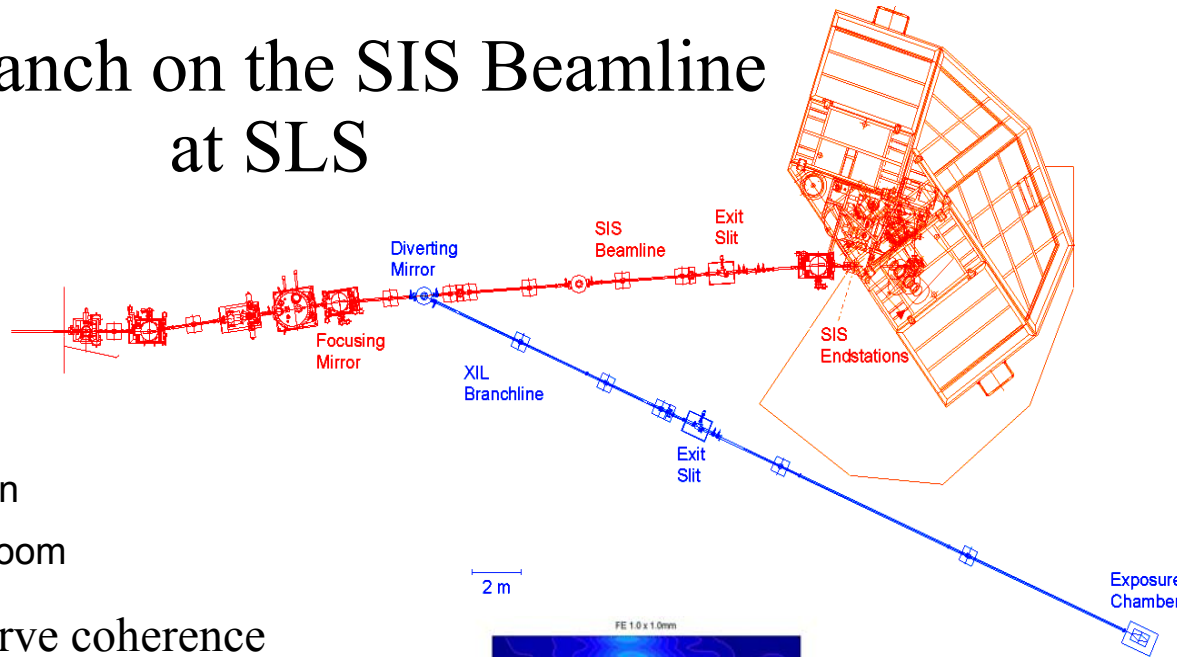


Simulated intensity

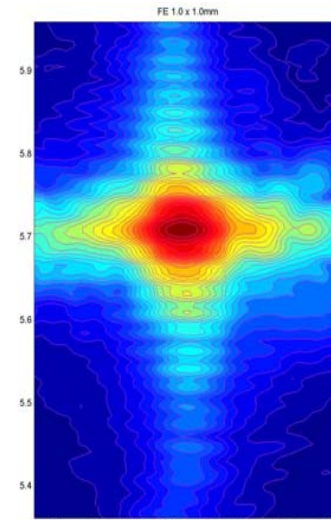
XIL Branch on the SIS Beamline at SLS



Endstation
in clean room



- Beamline designed to conserve coherence (high resolution spectroscopy)
- Calculations indicate a good match to the requirements of several XIL techniques, e.g. flux, coherence, spectrum
- Fast switching between the branchlines with no impact on the SIS users set up, lithography requires frequent, short uses

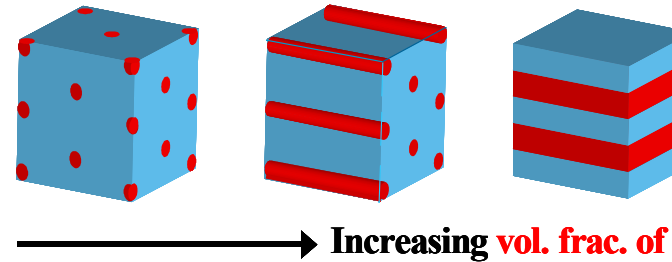


Intensity profile of
focussed beam at
XIL branch, March
03

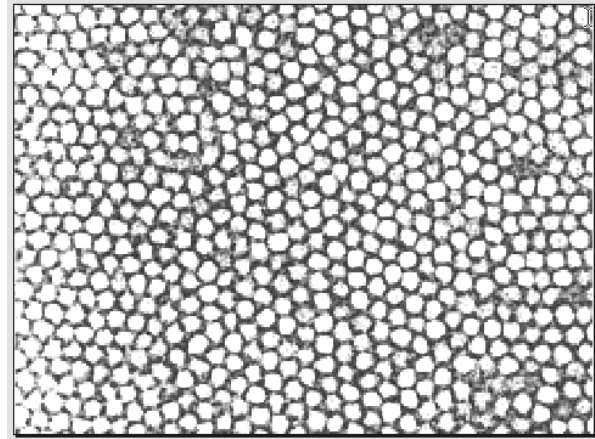
Templated Self-Assembly of Block Copolymers (1)



Diblock Copolymer Systems
Monomer A Monomer B



Polymer chain consists of homogeneous blocks **A** and **B**
Morphology depends on relative length of the blocks
Self-assembles into periodic structures



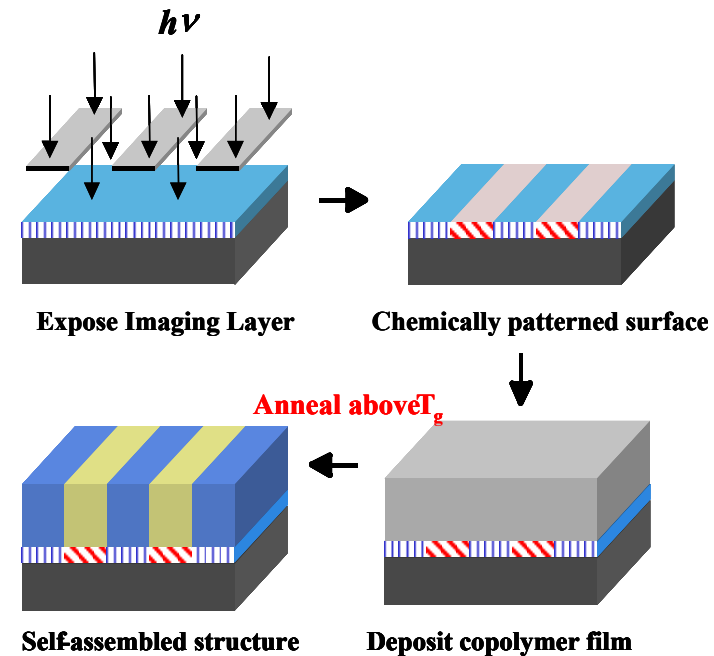
Templated Self-Assembly of Block Copolymers (2)

The surface is patterned with chemical contrast using XIL

The artificial pattern period is made to match natural periodicity

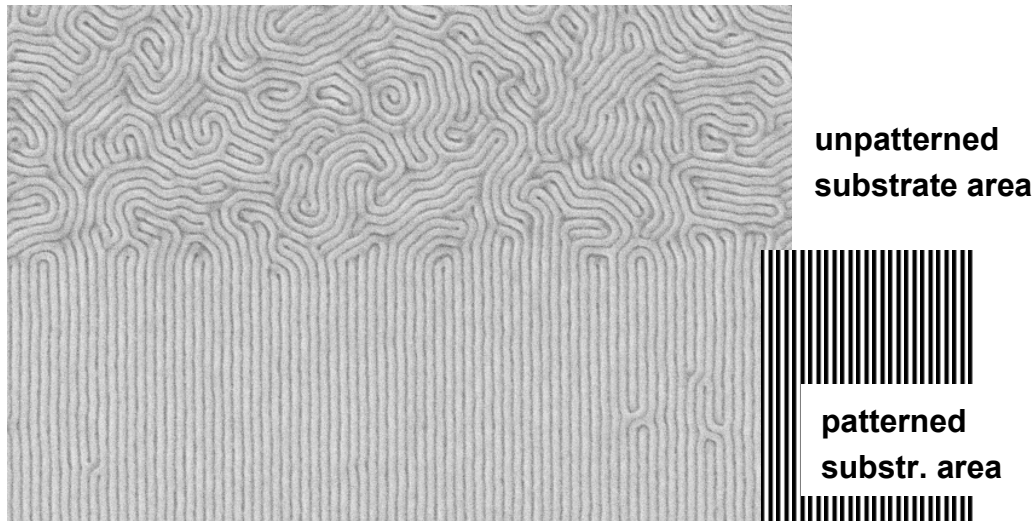
Cylindrical block forming copolymers will be used for arrangement on a *hexagonal lattice*

Copolymers will be synthesized to have functionality or this will be added with subsequent processing, e.g. electron or hole conductivity, loading with nanoclusters etc.

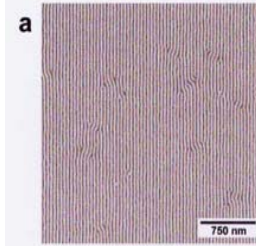


Polymerisation of block-copolymers on chemically prepatterned substrates

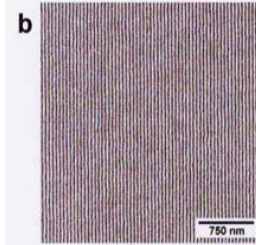
Polystyrene-block-methyl methacrylate (PS-b-PMMA), $L_0 = 48\text{nm}$



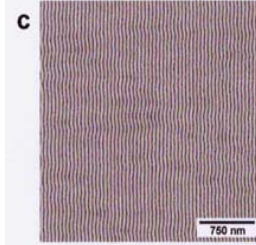
45 nm



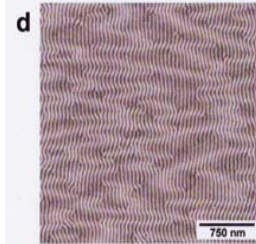
47.5 nm



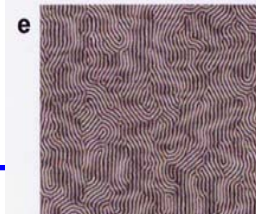
50 nm



52.5 nm



55 nm



Periodicity of chemical line grating on substrate

P. F. Nealey, H. H. Solak et al. Nature **424** (2003)

