Nanotechnologien

Eine subjektive, unvollständige Einführung

Adrian Keller

Nanotechnologie:

Herstellung von Strukturen mit Dimensionen kleiner 100 nm

“top-down”-Ansatz

Fortsetzung und Erweiterung der Mikrotechnik: Reduzierung der Strukturdimensionen

Methoden

UV-, Röntgen-, und Elektronenstrahllithographie;
Schreiben mit fokussierten Ionenstrahlen;
Raster-Sonden-Lithographie;
…

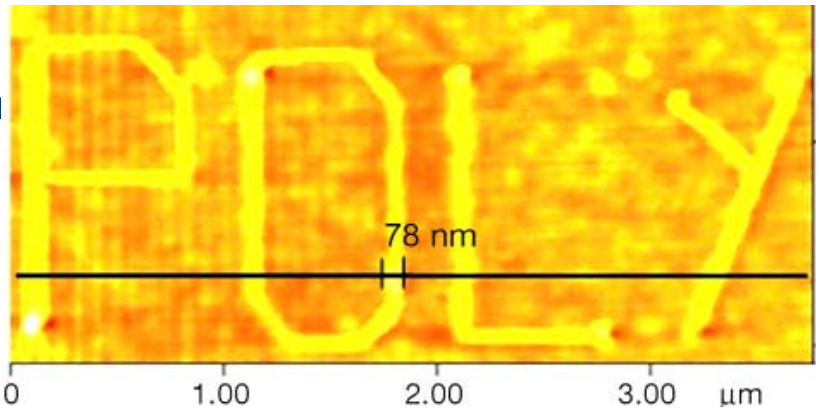
“bottom-up”-Ansatz

Aufbau von größeren Strukturen aus atomaren oder molekularen Einheiten, z.B. durch Nutzung von Selbstorganisationspozessen

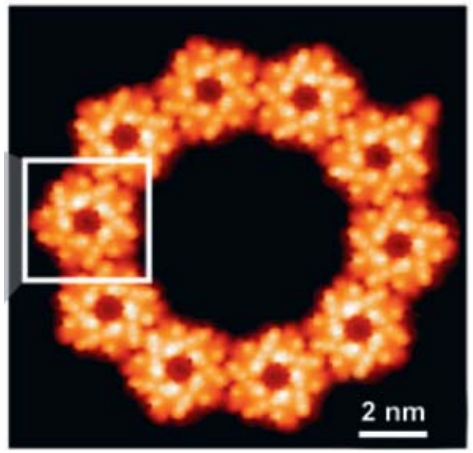
Methoden

chemische Synthese von Makromolekülen;
Molekularstrahl-Epitaxie;
selbstorganisierte Musterbildung;
…

Elektrostatische Nanolithographie a PMAA



Jegadesan *et al.*, Small **2**(4), 481 (2006)



Rubren-Cluster auf Gold

Barth, Annual Review of Physical Chemistry **58**, 357 (2007)

Antike Nanotechnologie: “Nano-Optik”

Lykurgus-Becher (4. Jhdt., British Museum):
Unterschiedliche Farbe bei Betrachtung in Transmission und Reflexion

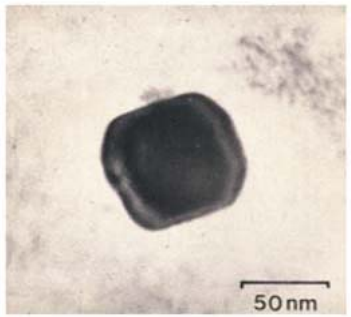


Reflexion

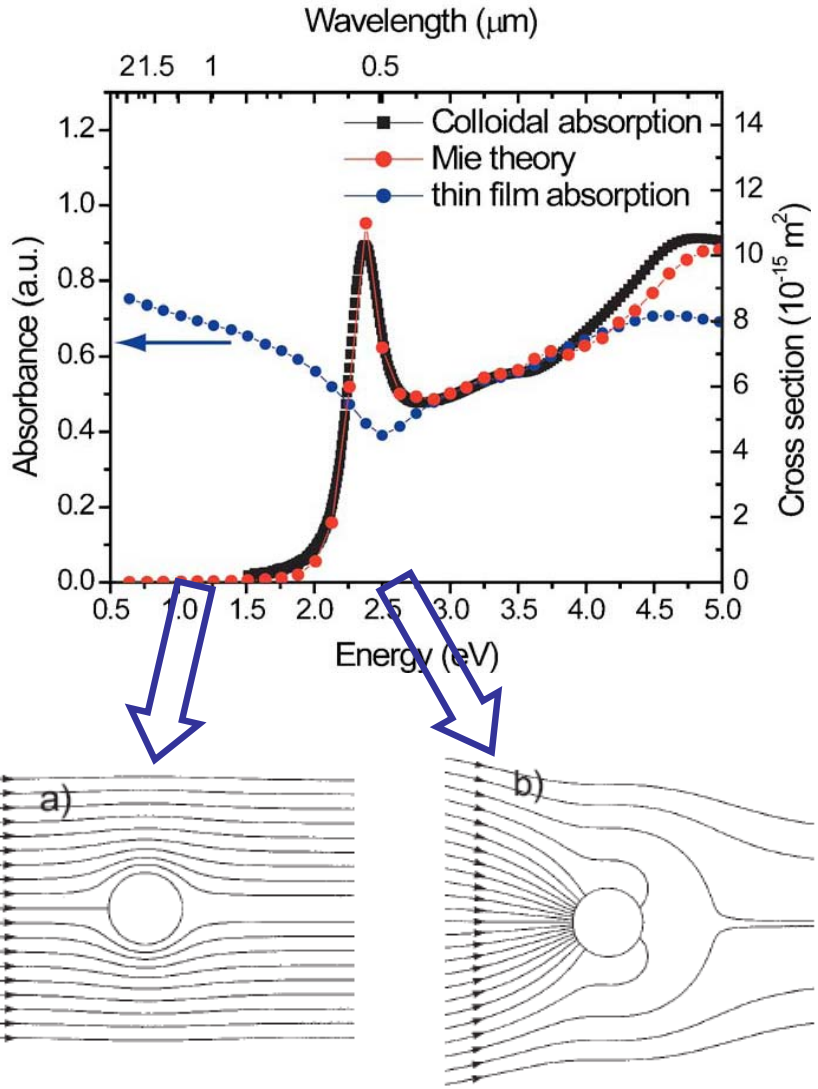


Transmission

Ursache:
Gold-Nanopartikel im Glas
→ *Plasmonenresonanz*



http://www.britishmuseum.org/



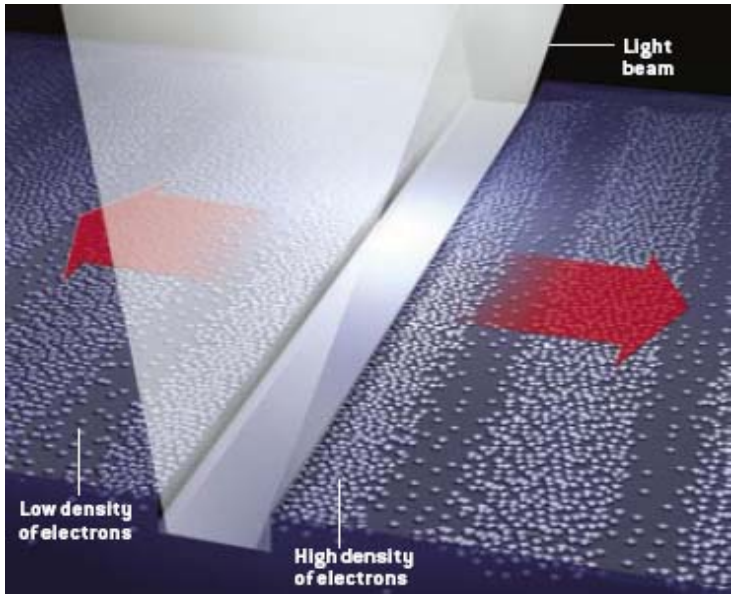
Maier *et al.*, Advanced Materials **13**(19), 1501 (2001)

Maier and Atwater, Journal of Applied Physics **98**, 011101 (2005)

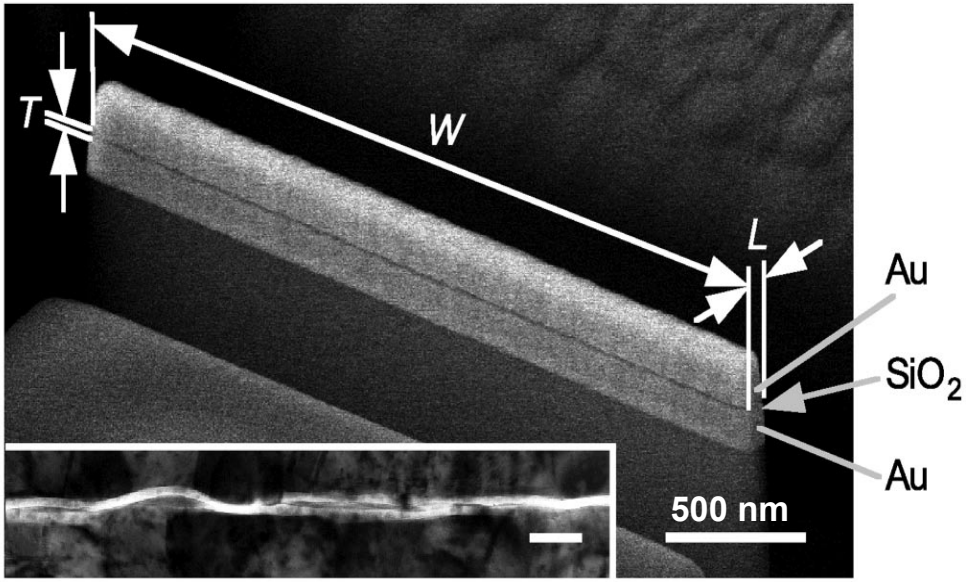
Plasmonische Nanostrukturen: Wellenleiter unterhalb des Beugungslimits

Elektromagnetische Welle auf Metalloberfläche induziert kollektive Schwingungen der freien Elektronen an der Oberfläche

→ Oberflächen-Plasmon
- gleiche Frequenz wie einfallendes Licht
- wandert entlang der Oberfläche
  → planarer Wellenleiter



Atwater, Scientific American **296**(4), 56 (2007)



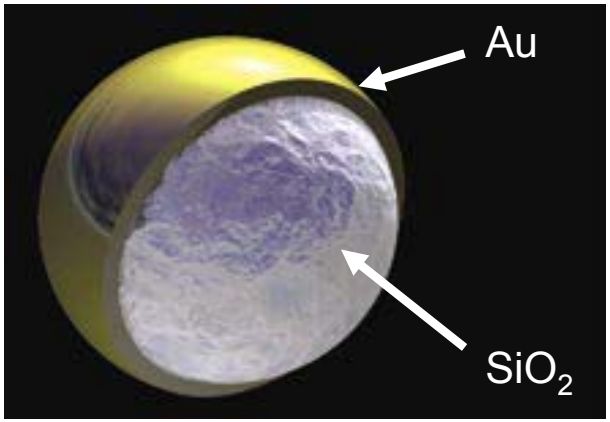
Miyazaki and Kurokawa, Physical Review Letters **96**, 097401 (2006)

Dielektrisches Material umschlossen von Metall

→ Streifen-Wellenleiter
- Reduktion der Wellenlänge um > Faktor 10
  → Strukturen < Wellenlänge einfallenden Lichts
- höhere Datendichte als elektrische Leitungen
- Signalübertragung bis zu 100 µm
  → nur für kurze Strecken

Plasmonische Nanopartikel zur Tumortherapie

SiO_2-Nanopartikel umhüllt mit Au:

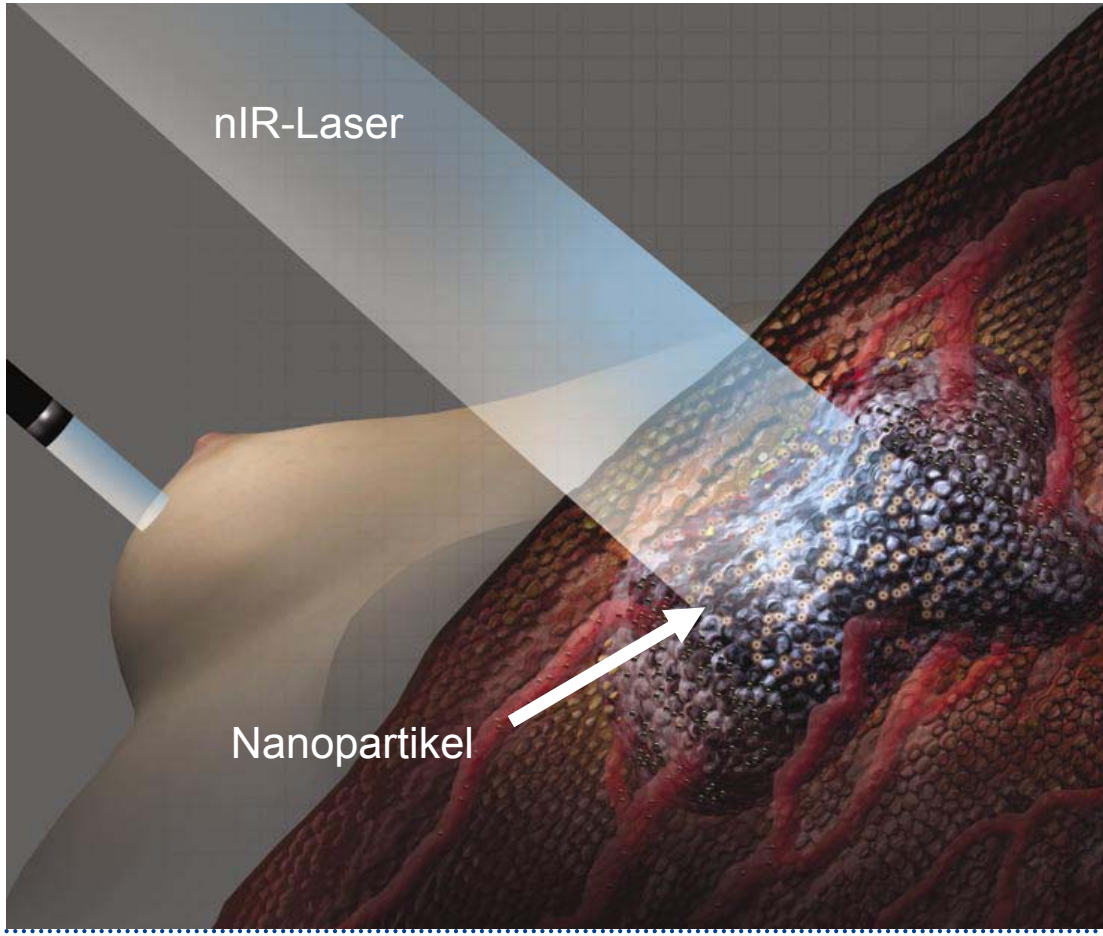


- Plasmonenresonanz einstellbar
  → nahes Infrarot (nIR)
- Injiziert in Blutkreislauf:
  - nicht toxisch
  - bevorzugte Anlagerung in Tumorgewebe
    → durch stärkere Durchblutung

Bestrahlung mit nIR-Laser:

- Gewebe durchsichtig für Licht im nahen IR
- Nanopartikel: Resonante Absorbtion

→ lokale Temperaturerhöhung (bis 45°C)
→ Tumorzellen sterben ab

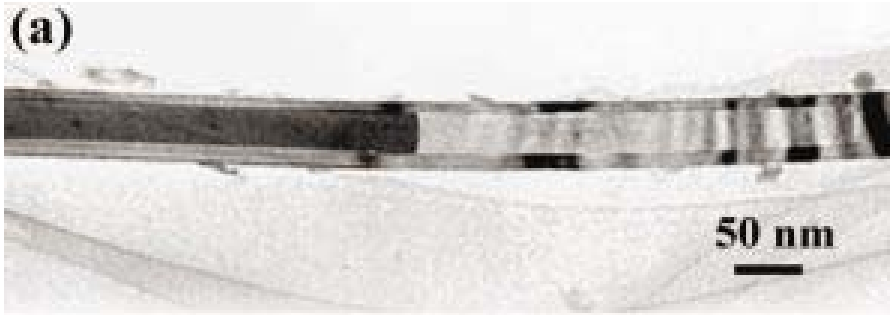


O'Neal *et al.*, Cancer Letters **209**, 171 (2004)
Atwater, Scientific American **296**(4), 56 (2007)

Nanoröhren als Nano-Temperatursensoren

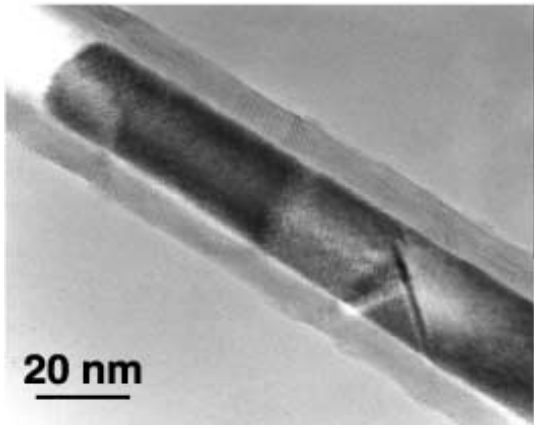
Chemische Synthese von Metall-gefüllten multi-wall Nanoröhren:

Ga-gefüllte MgO-Röhre



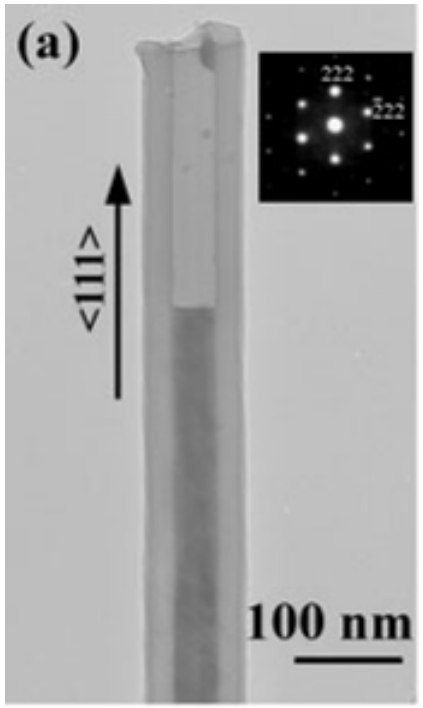
Li *et al.*, Applied Physics Letters **83**(5), 999 (2003)

Invar-gefüllte BN-Röhre



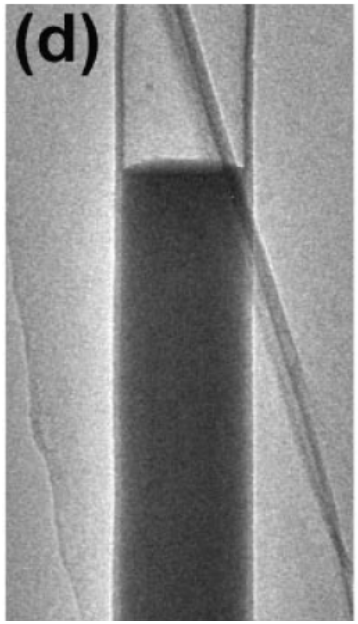
Golberg *et al.*, Applied Physics A **76**, 479 (2003)

In-gefüllte In_2O_3-Röhre



Liu *et al.*, Advanced Materials **15**(7-8), 581 (2003)

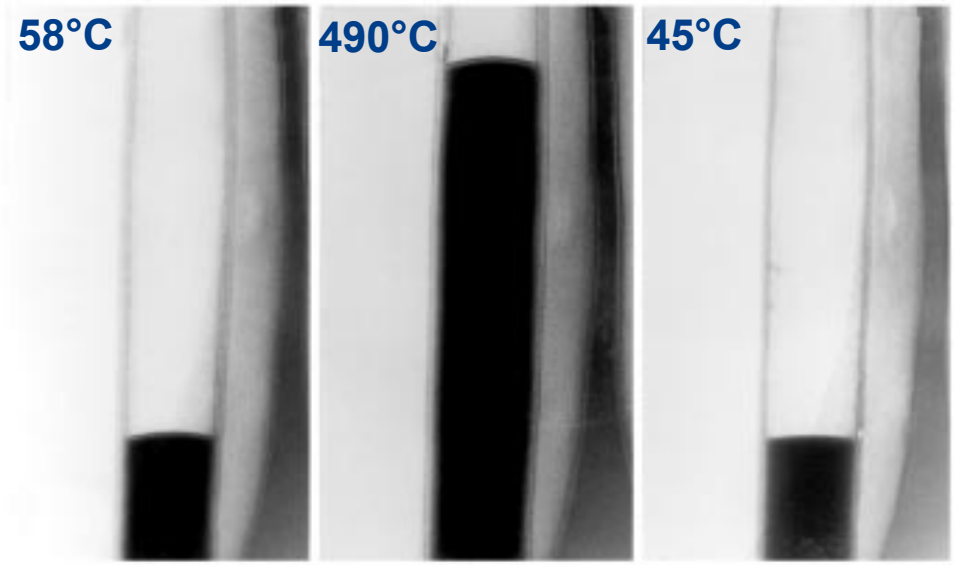
Ga-gefüllte C-Röhre

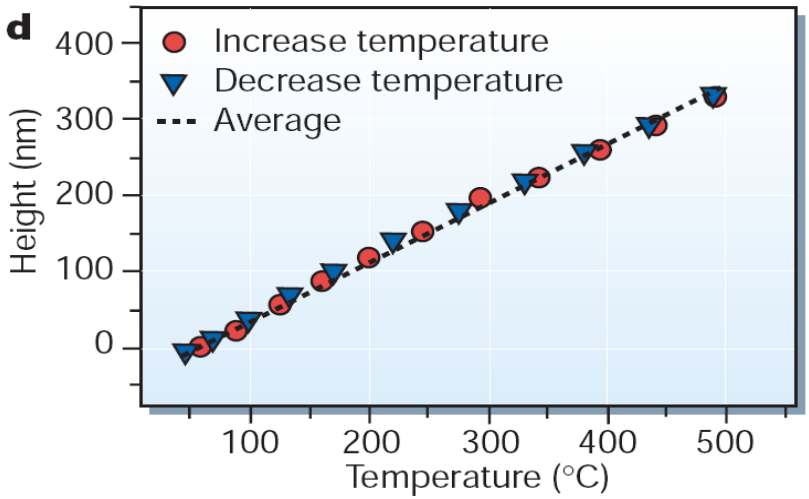


Liu *et al.*, Physical Review Letters **93**(9), 095504 (2004)

→ Nutzung als integrierte Nanothermometer

Temperaturausdehnung der Ga-Füllung

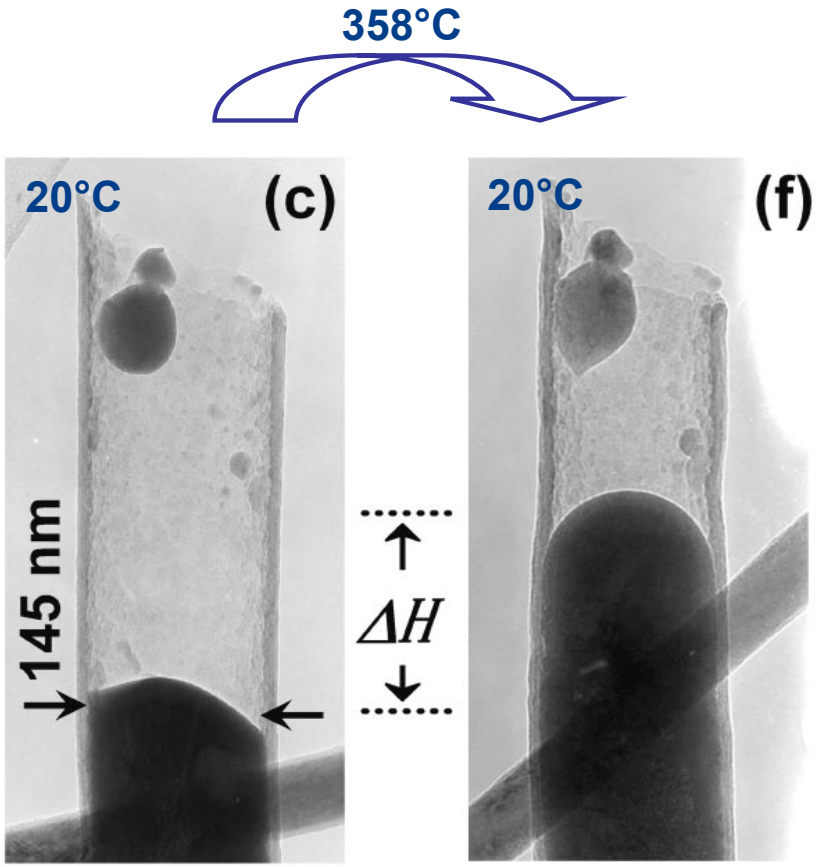




Gao and Bando, Nature **415**, 599 (2002)

Erwärmung an Luft:

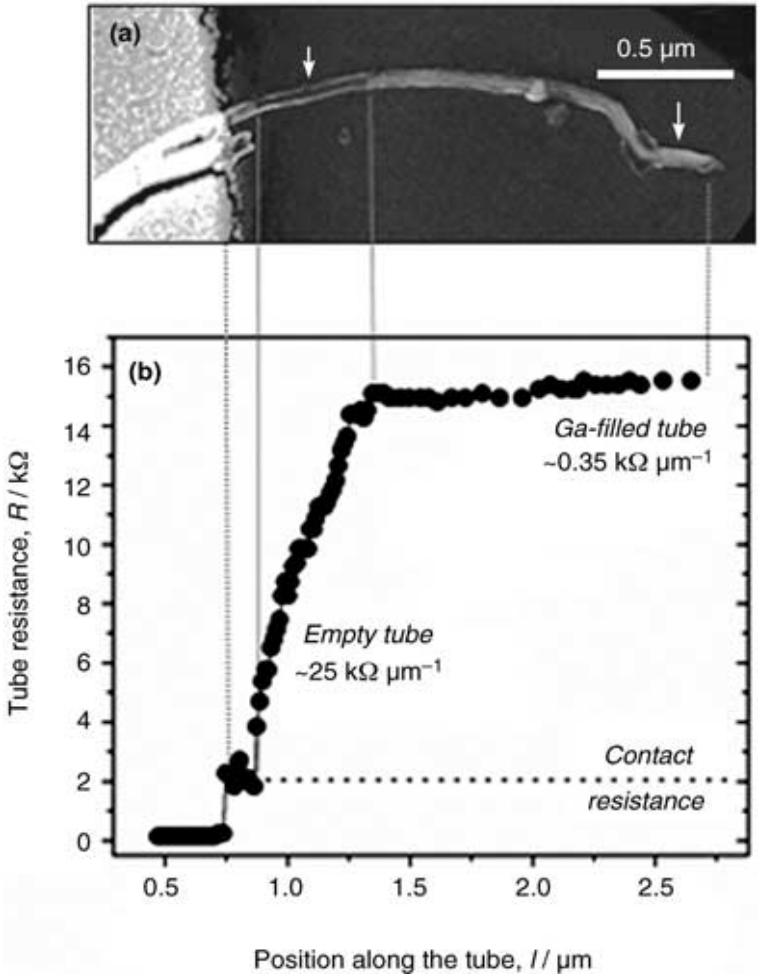
- Ga oxidiert
- Oxidkappe wird bei Ausdehnung verschoben
- Oxidkappe bleibt bei Abkühlung an Position



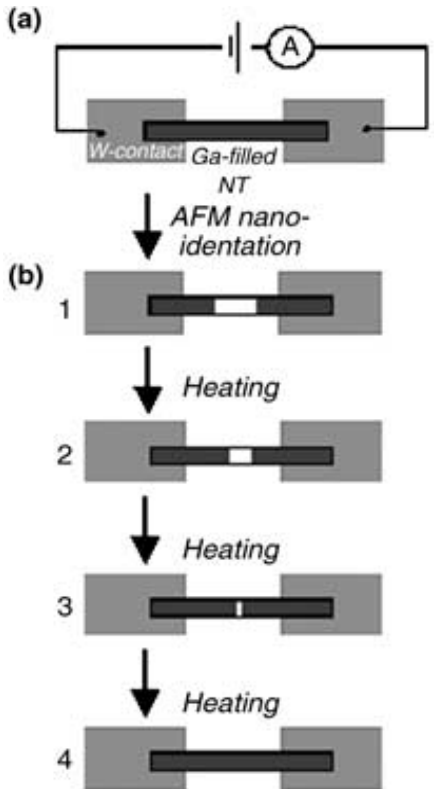
Gao *et al.*, Applied Physics Letters **83**(14), 2913 (2003)

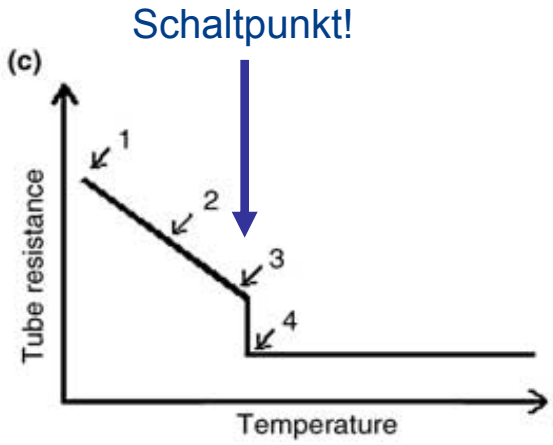
Vom Thermometer zum Temperatursensor

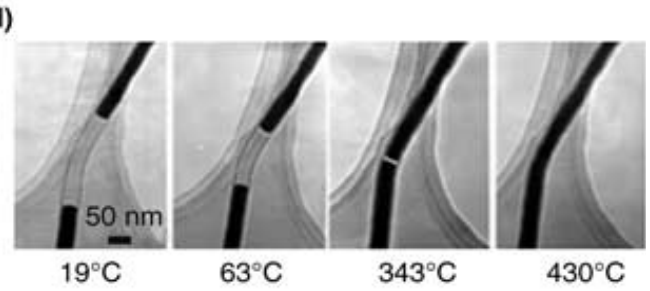
Elektrischer Widerstand von C-Nanoröhren abhängig von Ga-Füllung:



Widerstandsmessung in Abhängigkeit der Temperatur:







Dorozhkin *et al.*, Small **1**(11), 1088 (2005)

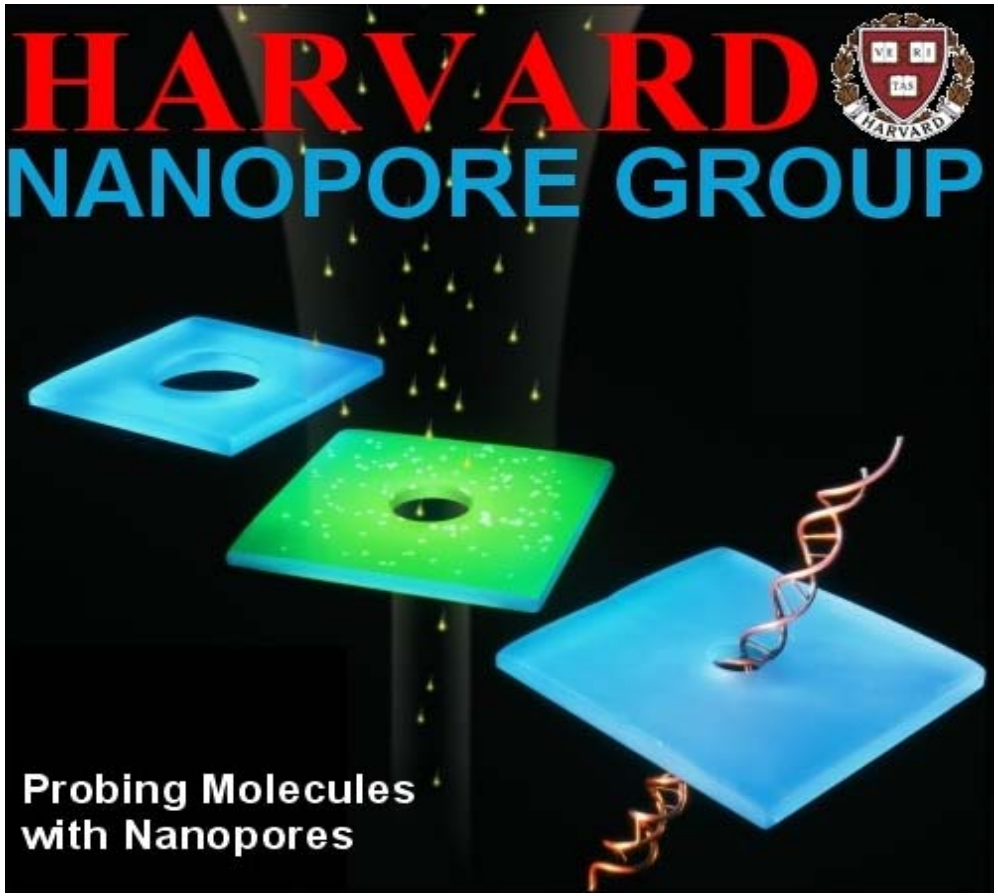
Detektion einzelner Moleküle mit Nanoporen

- Herstellung einzelner Nanoporen in dünnen Membranen
- Porendurchmesser

  ~ Moleküldurchmesser
- Transport einzelner Moleküle durch Pore mittels Elektrophorese
- Detektion und Analyse der einzelnen Moleküle mittels elektrischer Messungen

→ Nachweis einzelner Moleküle

→ Integrierte Biosensoren („lab on chip“)



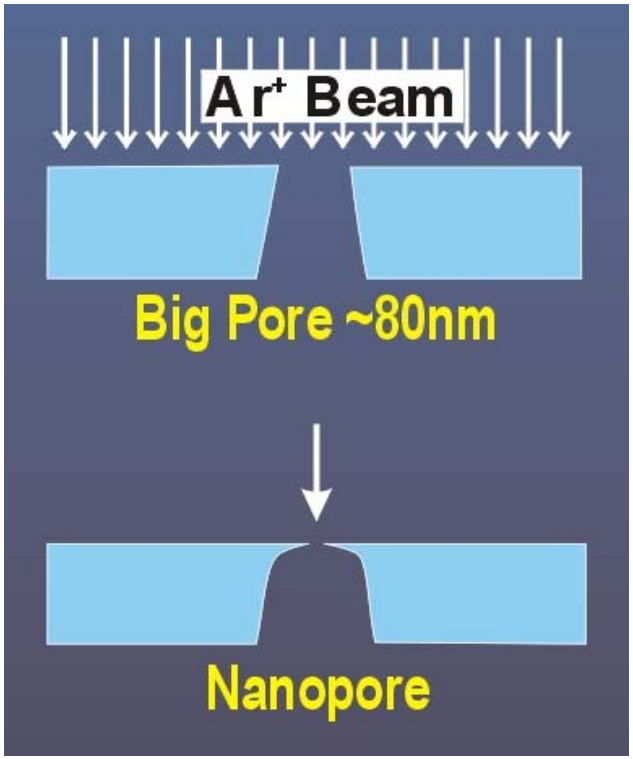
http://www.mcb.harvard.edu/branton/

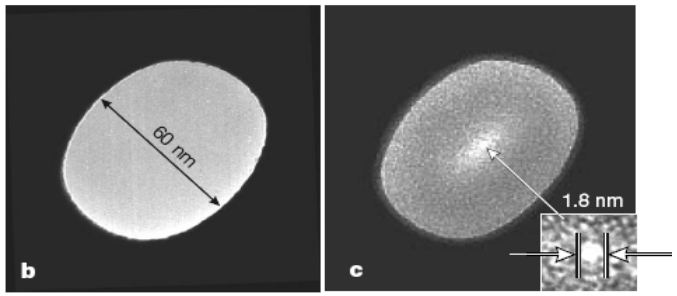
Herstellung einzelner Nanoporen

- Si_3N_4-Membran (Isolator)
- “Bohren” großer Pore mit fokussiertem Ionenstrahl
- Bestrahlung der Membran mit breitem Ionenstrahl
- Ionenstrahl induziert Massentransport entlang Membranoberfläche

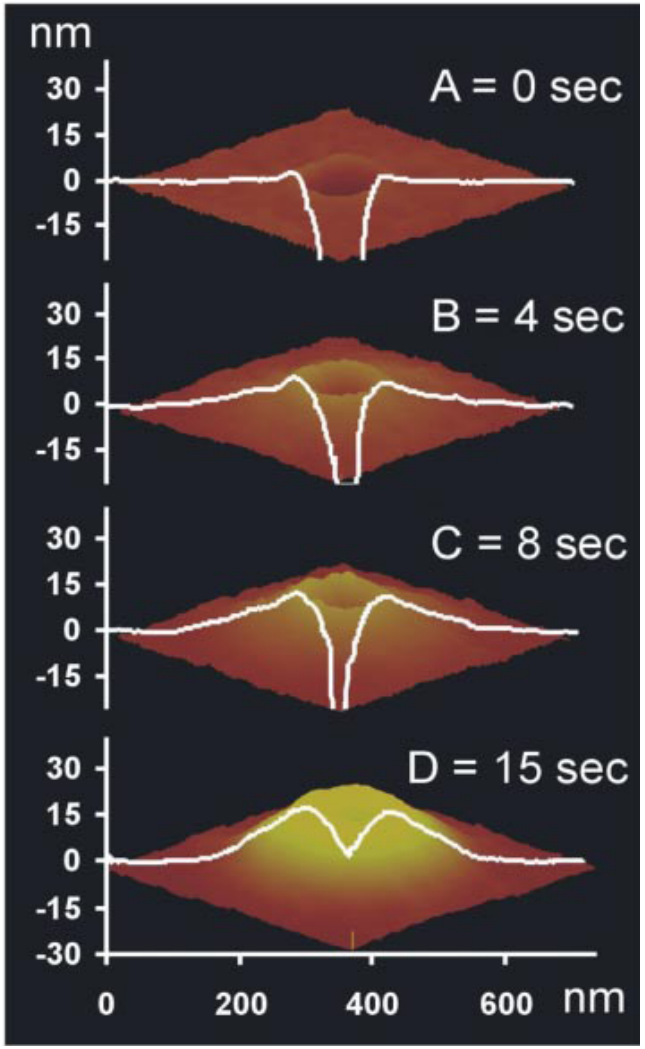
→ Pore schließt sich langsam

→ Überwachung des Porendurchmessers: Messung des transmittierten Ionenstroms





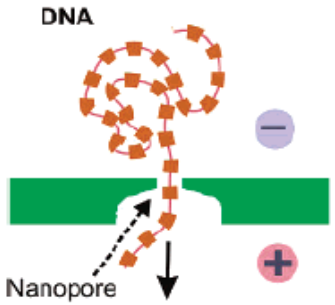
Li *et al.*, Nature **412**, 166 (2001)

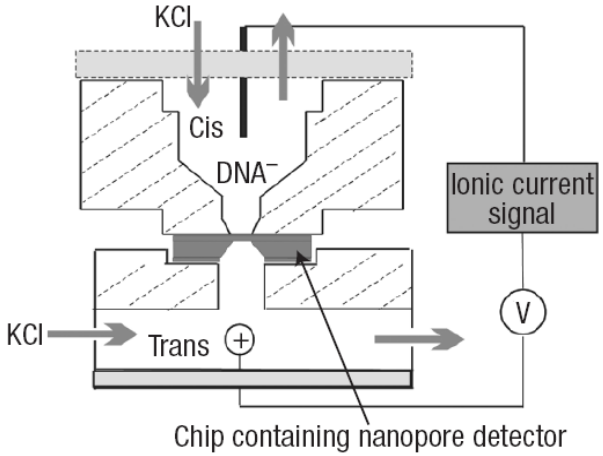


Mitsui *et al.*, Physical Review Letters **96**, 036102 (2006)

Detektion von DNA-Molekülen:

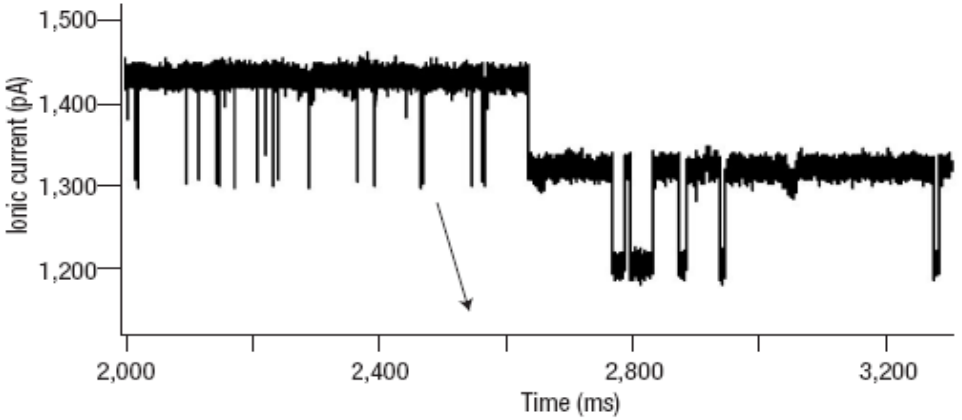
- Elektrophorese durch Pore in isolierender Membran
- Messung Ionenstrom durch Pore
- Molekül in Pore: Blockierung des Stromflusses

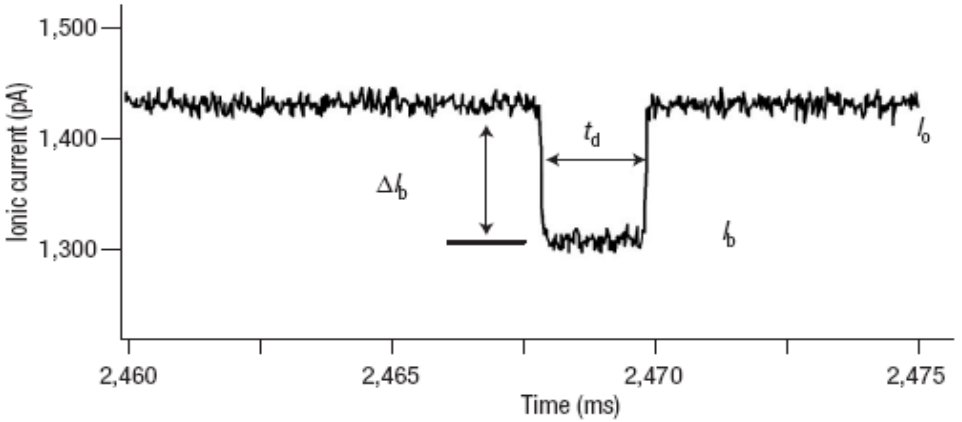




Signalverlauf:

Stromabfall → Molekül in Pore

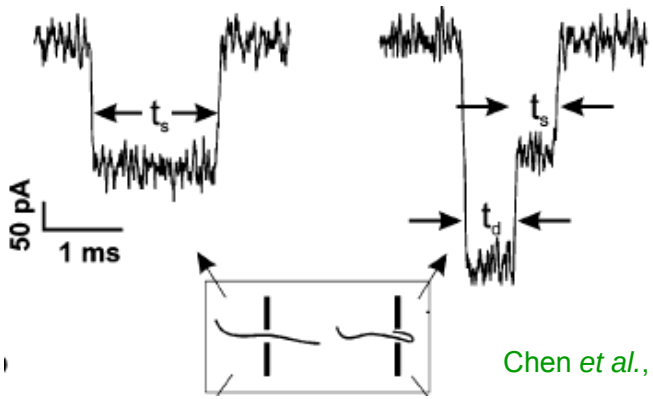




Li *et al.*, Nature Materials **2**, 611 (2003)

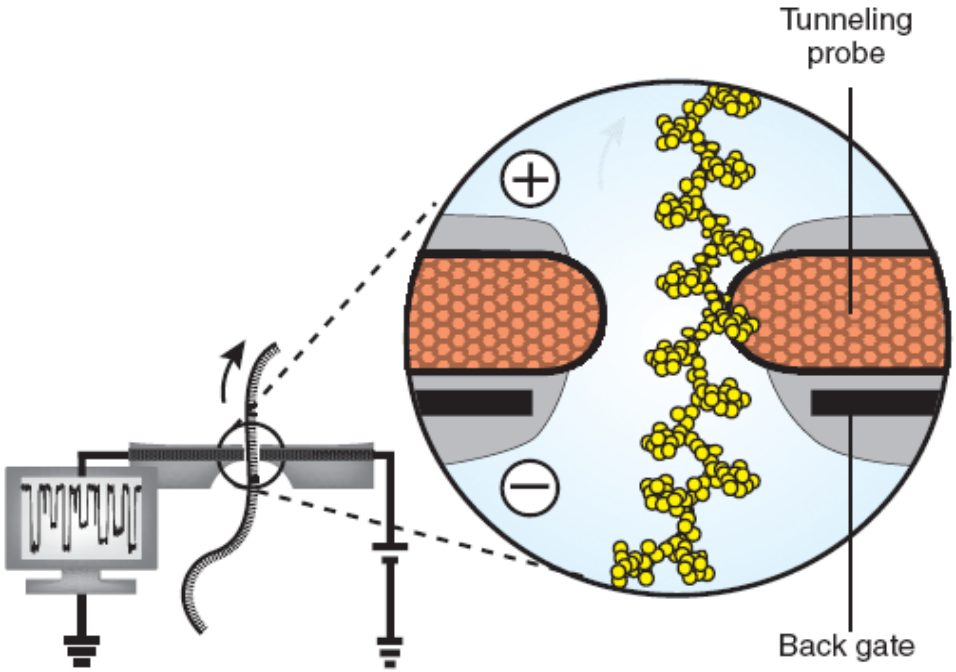
Signalform:

Molekül-Konfiguration bei Durchgang



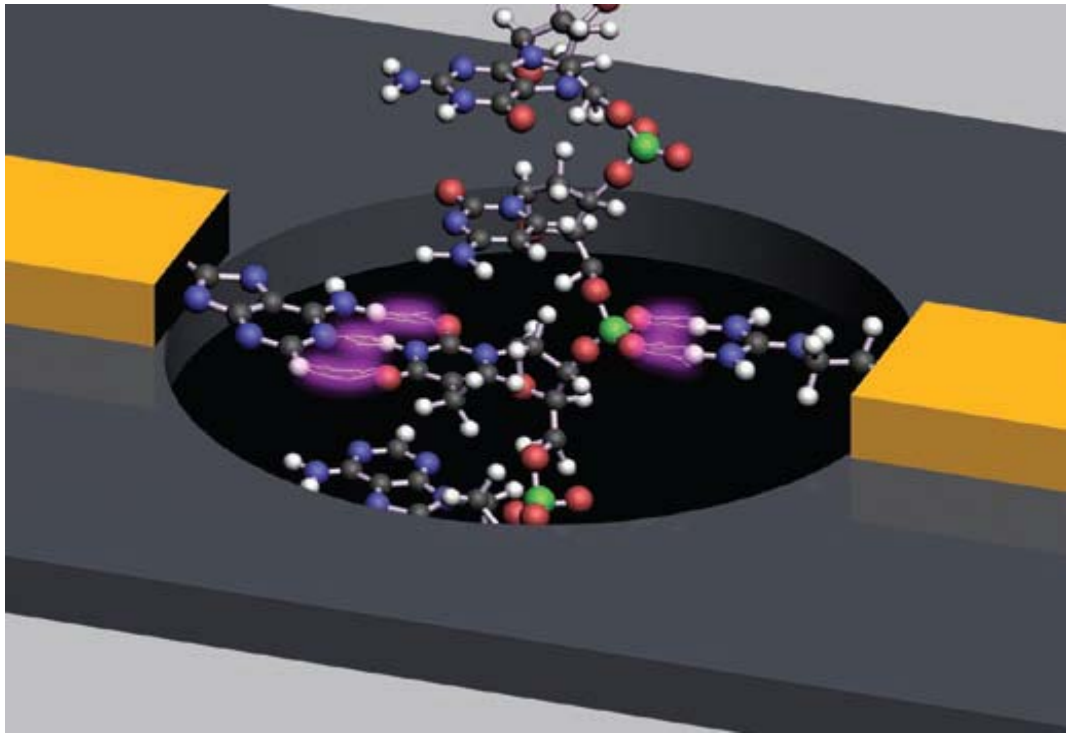
Chen *et al.*, Nano Letters **4**(11), 2293 (2004)

Langfristiges Ziel: Sequenzierung von DNA-Molekülen “on chip”



Messung des lateralen Tunnelstroms über einzelne Basenpaare

→ Herstellung von Nanoporen in isolierenden Membranen mit Tunnelelektroden



Chemische Funktionalisierung der Elektroden :

“Phosphatgreifer” an einer Elektrode und “Basenleser” an anderer binden über Wasserstoffbrückenbindungen und schließen elektrischen Kreis

Branton *et al.*, Nature Biotechnology **26**(10), 1146 (2008)

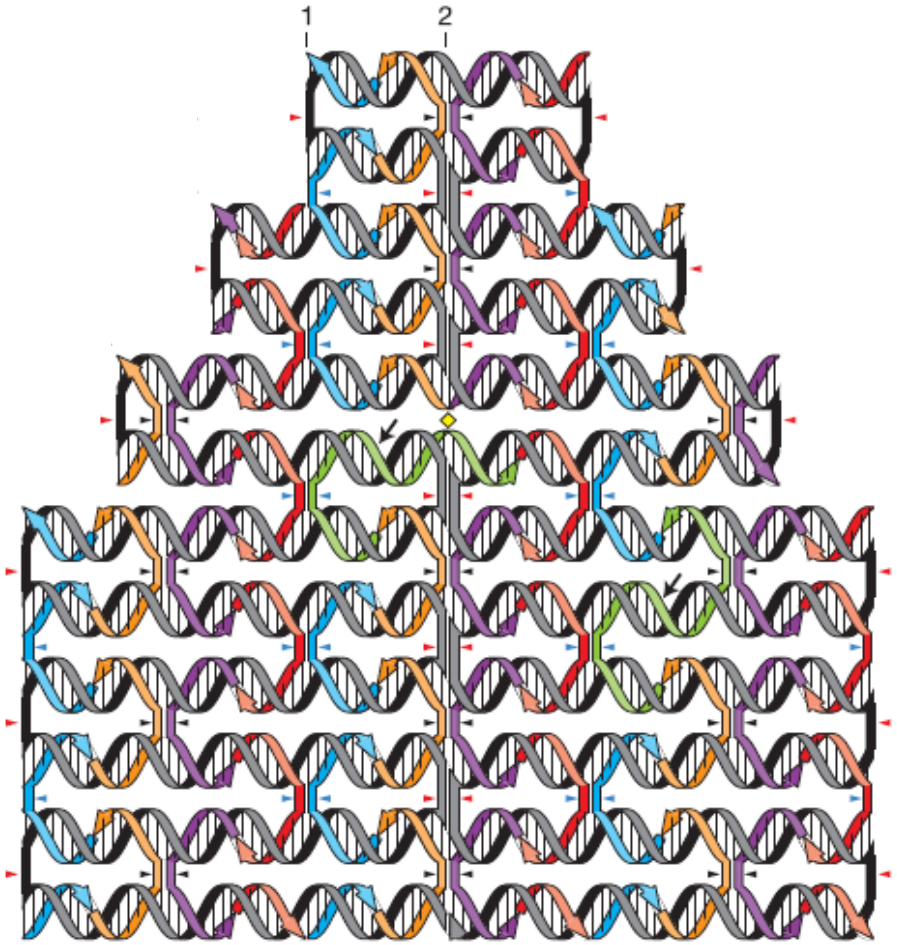
Makromolekulare Nanostrukturen: DNA-Origami

Gezielte Faltung von DNA-Strängen:

- Vollständig sequenzierte Einzelstrang-DNA
- Ergänzung mit passenden Strang-Fragmenten
- Faltung durch periodische Kreuzung der ergänzten Stränge

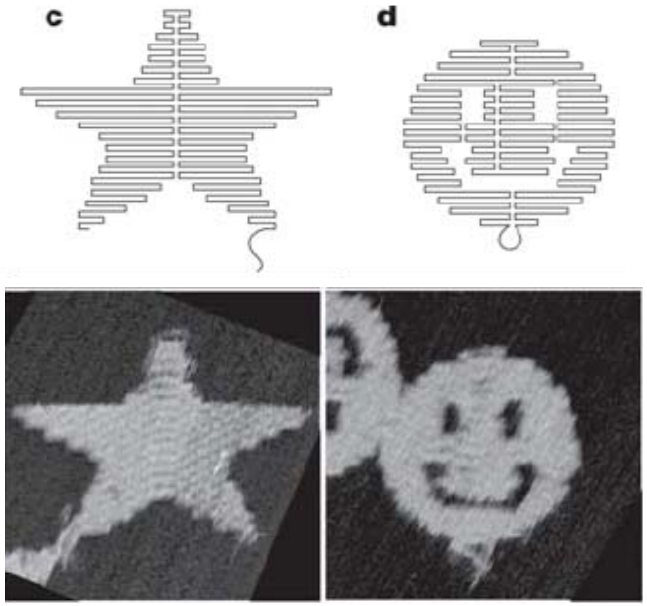
→ parallele Herstellung in Lösung
→ beliebige Form
→ laterale Auflösung 6 nm

Nachweis:
Adsorption auf festen Oberflächen und Analyse mittels Rasterkraftmikroskopie



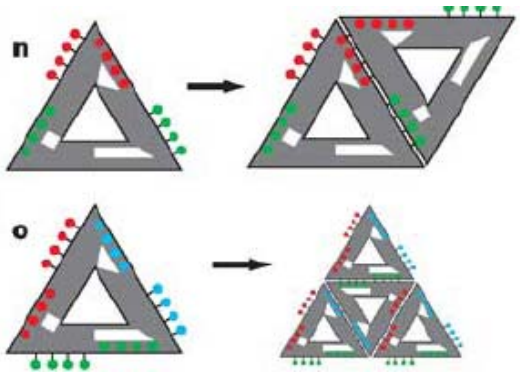
Rothemund, Nature **440**, 297 (2006)

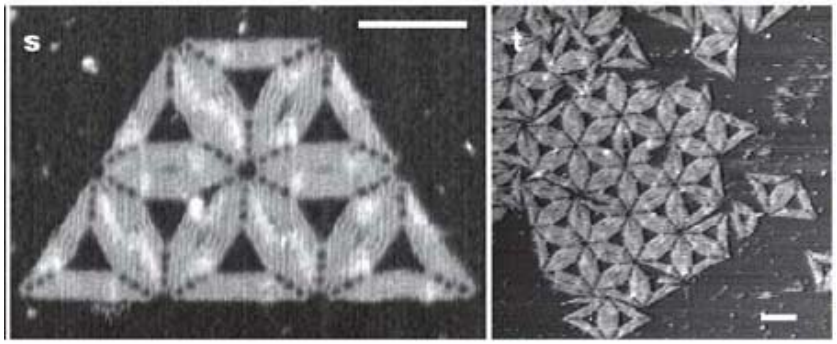
Falten beliebiger Formen:



Austattung der Origami-Strukturen mit funktionalen Gruppen:

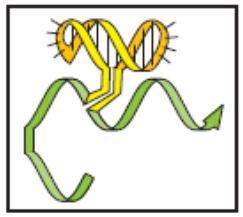
Wachstum molekularer “Kristalle” durch selektive Bindung der Einzelstrukturen

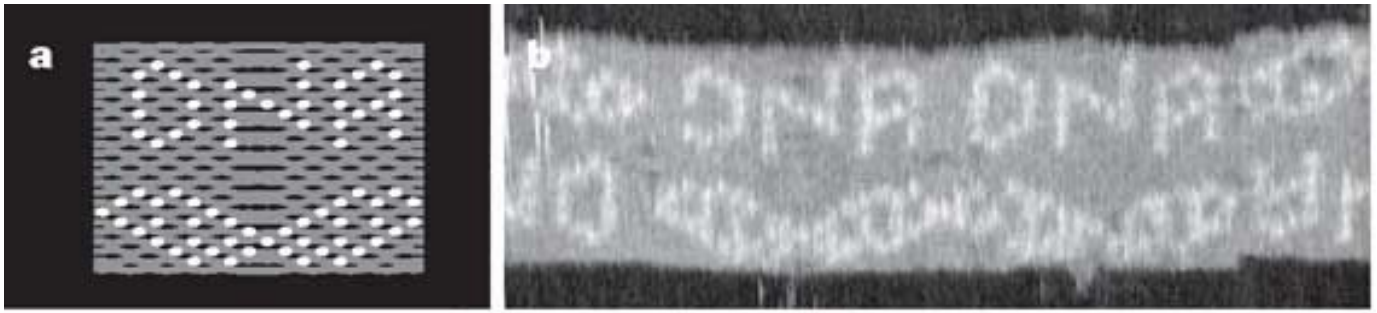




Dekorieren von Origami-Strukturen:

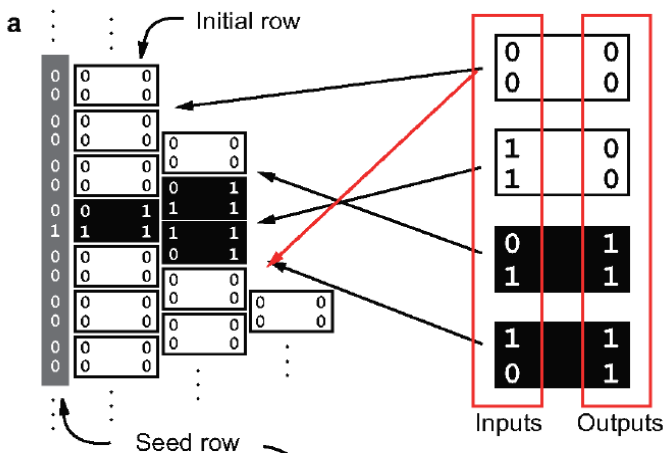
Schreiben auf “DNA-Displays” durch gezielte Markierung einzelner Strangabschnitte

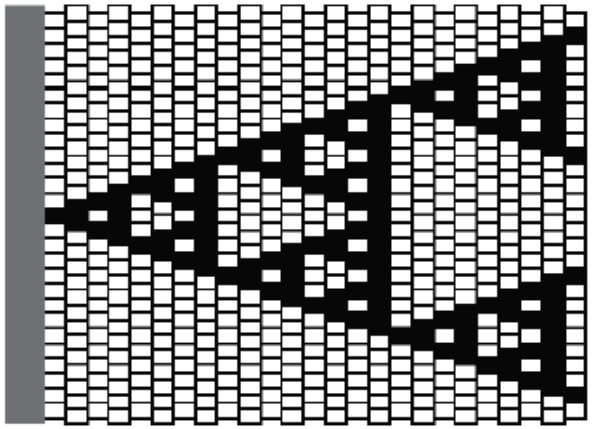




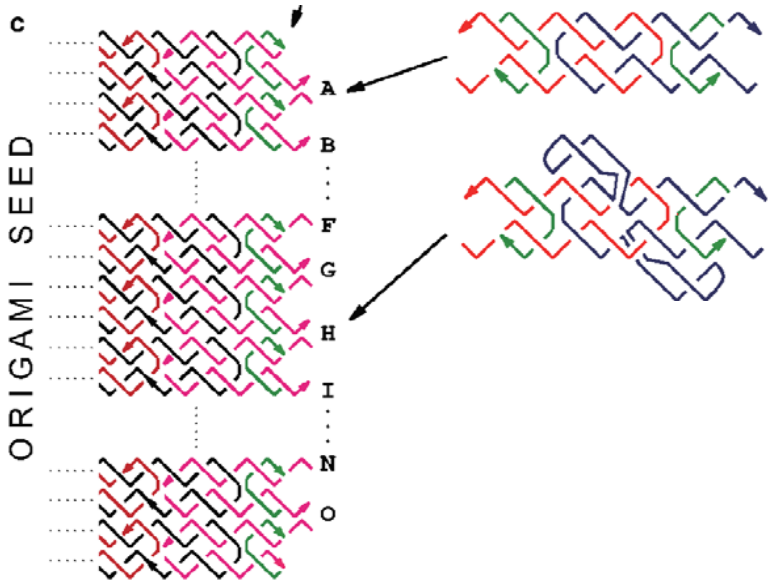
Rothemund, Nature **440**, 297 (2006)

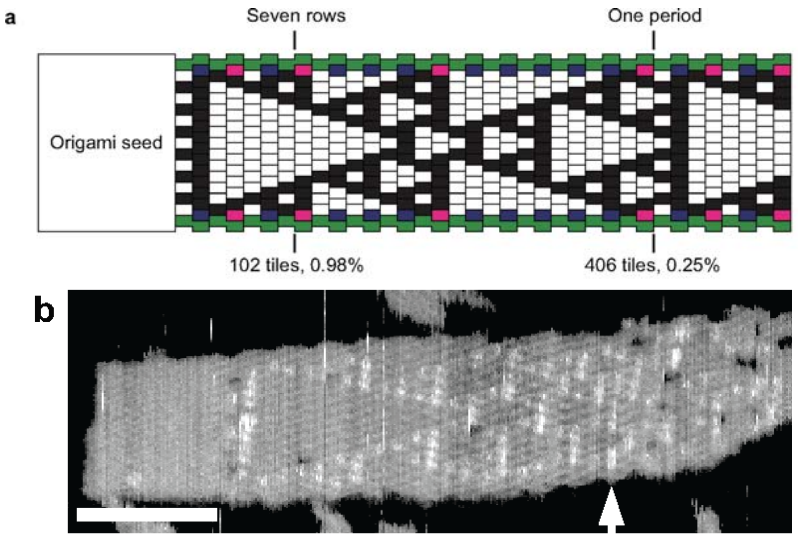
DNA-Origami für algorithmische Berechnungen: Zelluläre Automaten





Realisierung eines zellulären Automaten mittels DNA-Origami:

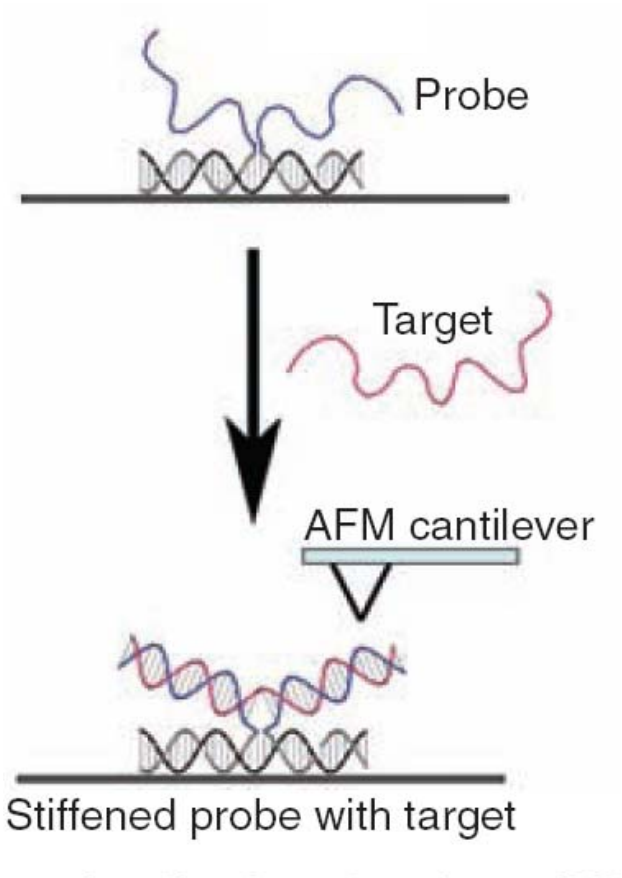




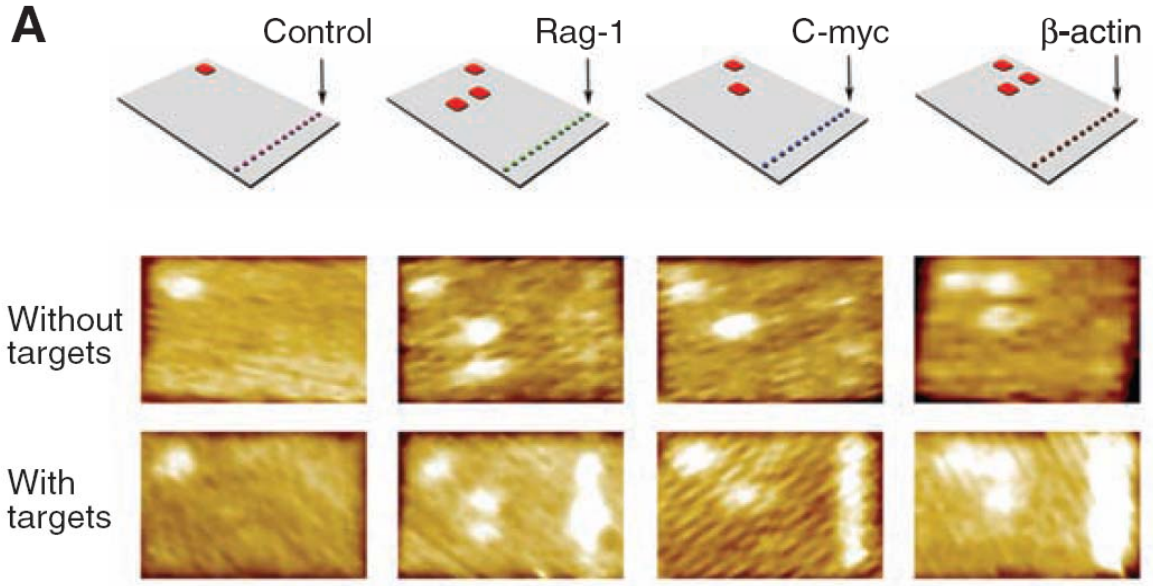
Fujibayashi *et al.*, Nano Letters **8**(7), 1791 (2007)

DNA-Origami-Strukturen zur RNA-Detektion

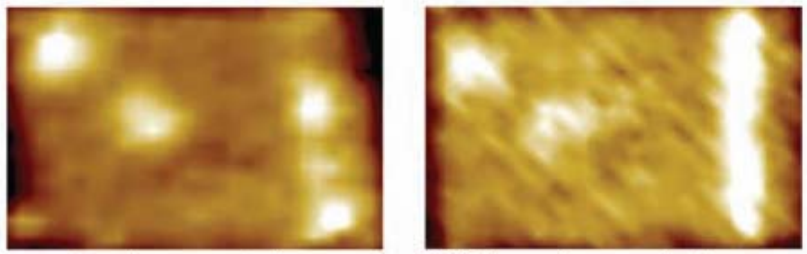
Funtionalisierung der Origami-Strukturen: Selektive Bindung an RNA-Moleküle



Identifikation unterschiedlicher RNA-Moleküle über Strichcode-Design



Einfluss der RNA-Konzentration:



Ke *et al.*, Science **319**, 180 (2008)

Zusammenfassung

- “Nanotechnologie” umfasst ein sehr weites Gebiet:
  von der Mikroelektronik bis zur physikalischen Chemie
- “Nanotechnologie” nutzt sehr unterschiedliche Methoden:
  von der Lithographie bis zur nasschemischen Synthese
- “Nanotechnologie” hat eine Vielzahl potentieller Anwendungen:
  von neuen Prozessorarchitekturen bis zu DNA-Computern