

Einführung in die Physik der Nanostrukturen

Matthias Kuntz



Kompetenzzentrum NanOp

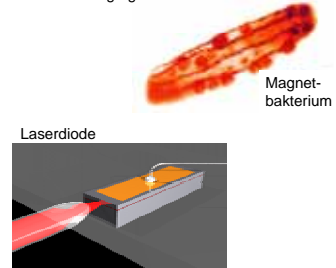


Alles nm?

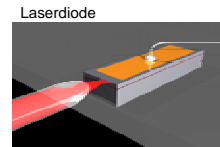
Was haben diese drei Dinge gemeinsam?



Kirchenfenster



Magnetbakterium



Laserdiode



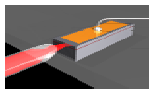
Kompetenzzentrum NanOp



Alles Nanometer (nm)!



- In alten Kirchenfenstern sorgen im Glas eingeschlossene Goldpartikel von ca. **200 nm** Durchmesser für einen satten roten Farbton.



- In modernen Diodenlasern wird in winzigen Halbleiter-Pyramiden von nur **15 nm** Kantenlänge Strom in Licht verwandelt.



- Magnetbakterien mit **20 nm** kleinen Magnetit-Partikeln richten sich entlang der Magnetfeldlinien der Erde aus und finden damit (in mittleren Breiten) den Schlamm zum Überleben.



Kompetenzzentrum NanOp

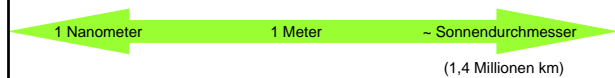


Wieviel ist Nano-?

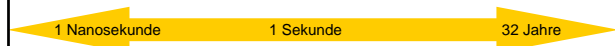
Wie wenig ist Nano!

$$\text{nano} = 10^{-9}$$

Im Raum:



In der Zeit:



Kompetenzzentrum NanOp



Fahrplan in die Nanowelt

- Wie sehen wir die Nanowelt?
Vom Lichtmikroskop zum Rastertunnel-Mikroskop
- Wie gestalten wir die Nanowelt?
Der Molekül-Baukasten – Kohlenstoff-Nanoröhrchen in der Technik
Vom Nanokosmos ins Weltall – Fullereine in der Astrophysik
Nano für den Menschen – Nanopartikel in der Medizin
Nano fürs Internet – Laserdioden mit Nanopyramiden
- Ausblick in eine winzige Zukunft...



Kompetenzzentrum NanOp



Wie sehen wir die Nanowelt?

Frei nach Gary Larson:



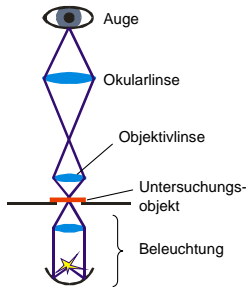
„Frühe Nanotechnologen“



Kompetenzzentrum NanOp



Licht-Mikroskop



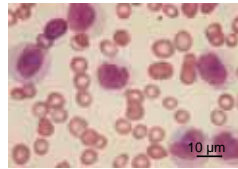
- Praktisch: Objekt direkt dem menschlichen Sinn „Sehen“ zugänglich
- Einfacher Aufbau
- Einfache Probenvorbereitung
- Durchleuchtung der Probe oder Beleuchtung von oben



Kompetenzzentrum NanOp



Licht-Bilder



Rote Blutkörperchen und Fettzellen

- Vorteil: farbiges Bild, einfache Präparation des Objektes
- Nachteile: Je höher die Auflösung des Bildes, desto geringere Tiefenschärfe - Aufnahme wirkt „platt“, Höheninformationen fehlen

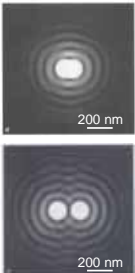


Kompetenzzentrum NanOp



Grenze des Lichtmikroskops

Beugungsbilder



- Strukturen die kleiner sind als die halbe Wellenlänge des Lichts können nicht aufgelöst werden:

$$x \geq \frac{\lambda}{2}$$

- Spektralbereiche:

Sichtbares Licht	400 – 800 nm
UV	10 – 400 nm
Röntgenstrahlen	0.1 – 10 nm

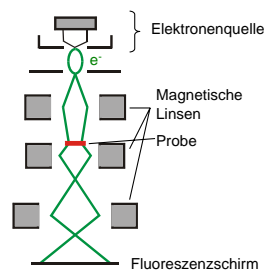
- Spezielle Optiken für $\lambda < 100 \text{ nm}$



Kompetenzzentrum NanOp



Transmissions-Elektronenmikroskop



- Welle-Teilchen-Dualität: Elektronen haben auch eine Wellenlänge, die von ihrer kinetischen Energie abhängt.

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot E_{kin}}}$$

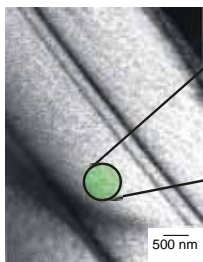
- $U=100 \text{ V} \Rightarrow \lambda = 0.12 \text{ nm}$
- Tatsächliche Auflösung hängt von Strahlführung ab



Kompetenzzentrum NanOp



TEM-Bild



Quantenpunkte in einem Halbleiterkristall

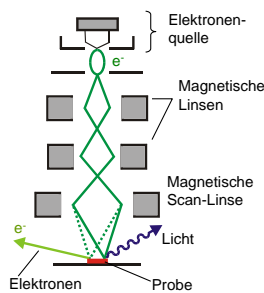
- Bildentstehung ist ähnlich der im Lichtmikroskop
- Vorteile: Bild entsteht wie ein Foto, dadurch kurze Aufnahmezeit
- Nachteile: aufwändige Probenpräparation (Dünnen), nur 2-dimensionales Bild, Probe befindet sich im Vakuum



Kompetenzzentrum NanOp



Raster-Elektronenmikroskop



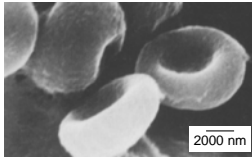
- Elektronenstrahl rastert die Oberfläche der Probe ab
- Elektronen erzeugen am Auftreffort weitere Elektronen bzw. Licht (Photonen)
- Signal („Farbe“) für einen Bildpunkt ergibt sich aus der Zahl / Energie der erzeugten Elektronen / Photonen



Kompetenzzentrum NanOp



REM-Bild



Rote Blutkörperchen (Erythrozyten)

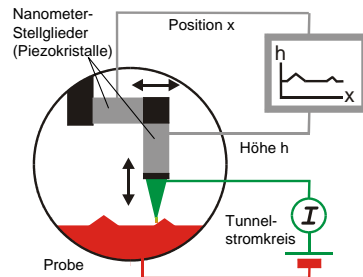
- Bild entsteht „Punkt für Punkt“ – seriell
- Vorteil: viele verschiedene Betriebsmodi – dadurch mehr Information über die Probe
- Nachteil: Probe befindet sich im Vakuum, Probe muss eine gewisse Leitfähigkeit haben (Metalbedampfung nichtleitender Proben)



Kompetenzzentrum NanOp



Raster-Tunnelmikroskop



- Atomar feine Spitze rastert Oberfläche der Probe ab
- Konstanter Tunnelstrom zwischen Spitze und Probe
⇒ konstanter Abstand
⇒ Spitze folgt dem Höhenprofil



Kompetenzzentrum NanOp



RTM-Bild



Quantenpunkte auf einer Halbleiteroberfläche

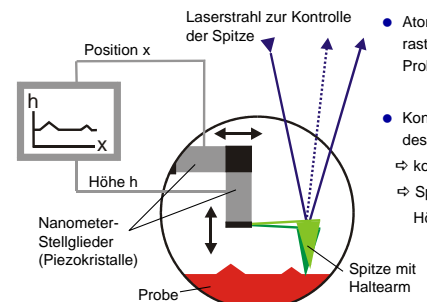
- Bild entsteht „Punkt für Punkt“ – seriell
- echt 3-dimensionales Bild
- Vorteile: Höchste Auflösung (0,01 nm), limitiert durch Schärfe der Meßspitze, kein Vakuum notwendig
- Nachteile: Probe muss leitfähig sein, damit der Tunnelstrom fließen kann



Kompetenzzentrum NanOp



Raster-Kraft-Mikroskop



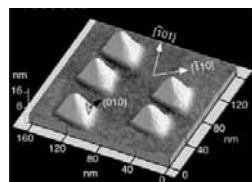
- Atomar feine Spitze rastert Oberfläche der Probe ab
- Konstante Auslenkung des Haltearms
⇒ konstanter Abstand
⇒ Spitze folgt dem Höhenprofil



Kompetenzzentrum NanOp



RKM-Bild



Quantenpunkte auf einer Halbleiteroberfläche

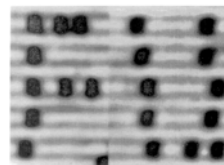
- Bild entsteht „Punkt für Punkt“ – seriell
- echt 3-dimensionales Bild
- Vorteile: Kein Vakuum erforderlich, Probe muss nicht leitfähig sein
- RKM wird auch zum Verschieben von Atomen auf Oberflächen benutzt



Kompetenzzentrum NanOp



RKM als Nano-Manipulator



Schriftzug „FU“ (Berlin) – Kohlenmonoxid-Moleküle auf einer Kupfer-Oberfläche

- Die Spitzen bei Raster-Tunnel- und Raster-Kraft-Mikroskopen können auch zur Manipulation von Atomen und Molekülen benutzt werden
- Atome oder Moleküle können verschoben, aufgenommen und gezielt abgesetzt werden



Kompetenzzentrum NanOp



So sehen wir die Nanowelt!

- Mikroskope mit Elektronenstrahl oder Tastspitzen ermöglichen eine Bildauflösung bis hinunter zu Atomen.
 - Es gibt weitere Mikroskopvarianten:
 - Optische Nahfeld-Mikroskopie,
 - Feld-Elektronen-Mikroskopie,
- sowie Verfahren zur Analyse atomarer Strukturen:
- Röntgenbeugung,
 - Elektronen- und Neutronenstreuung.



Kompetenzzentrum NanOp



Fahrplan in die Nanowelt

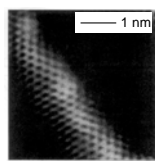
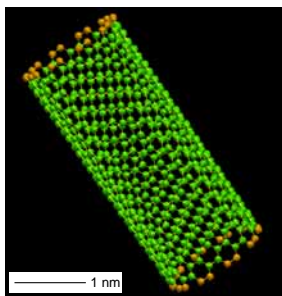
- Wie sehen wir die Nanowelt?
Vom Lichtmikroskop zum Rastertunnel-Mikroskop
- Wie gestalten wir die Nanowelt?
Der Molekül-Baukasten – Kohlenstoff-Nanoröhrchen in der Technik
Vom Nanokosmos ins Weltall – Fullereine in der Astrophysik
Nano für den Menschen – Nanopartikel in der Medizin
Nano fürs Internet – Laserdioden mit Nanopyramiden
- Ausblick in eine winzige Zukunft...



Kompetenzzentrum NanOp



Kohlenstoff-Nano-Röhrchen



Oben: Raster-Tunnelmikroskop-Bild eines Nanoröhrchens

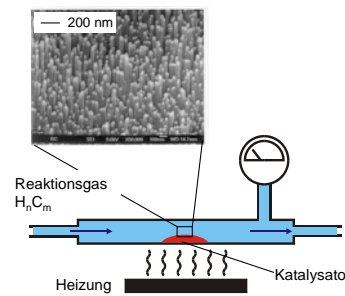
Links: Simulation, ein grünes Kügelchen entspricht einem Kohlenstoff-Atom



Kompetenzzentrum NanOp



Herstellung von C-Nano-Röhrchen



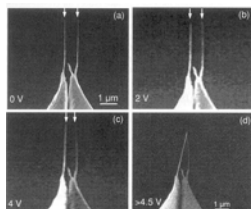
- Kohlenstoff-haltiges Gas wird über einen Katalysator geleitet
- Kohlenstoff kondensiert und bildet (bei richtiger Temperatur und Druck) Nanoröhrchen



Kompetenzzentrum NanOp



Anwendung der Nano-Röhrchen



Zwei Nanoröhrchen werden durch elektrostatische Anziehung zueinander gebogen

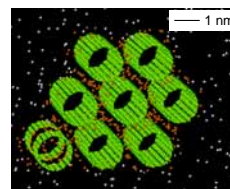
- Links im Bild: Nanopinzette mit superfeiner (~nm) Spitze
- Nanoröhrchen als Spitze für AFM / STM
- Vorteile: lang und spitz, kann sich elastisch verbiegen, leitend
- Röhrchenverstärkte Kunststoffe (statt kohlefaserverstärkte Kunststoffe wie z.B. Airbus-Heckleitwerk)
- noch leichter, weil hohl; fester



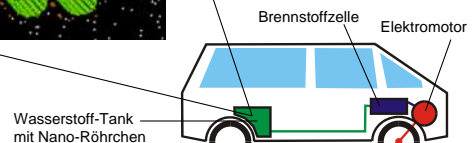
Kompetenzzentrum NanOp



Nanoröhrchen im Wasserstoffauto



- Wasserstoffmoleküle werden zwischen den Nano-Röhrchen gebunden (Schwamm)
- geringerer Druck, kein Tieftemperatur-Tank (???)



Kompetenzzentrum NanOp



Fahrplan in die Nanowelt

- Wie sehen wir die Nanowelt?
Vom Lichtmikroskop zum Rastertunnel-Mikroskop
- Wie gestalten wir die Nanowelt?
Der Molekül-Baukasten – Kohlenstoff-Nanoröhrchen in der Technik
Vom Nanokosmos ins Weltall – Fullerene in der Astrophysik
Nano für den Menschen – Nanopartikel in der Medizin
Nano fürs Internet – Laserdioden mit Nanopyramiden
- Ausblick in eine winzige Zukunft...

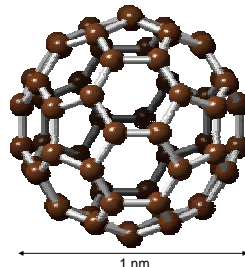


Kompetenzzentrum NanOp



Fullerene

C_{60} aus 60 Kohlenstoffatomen



1 nm

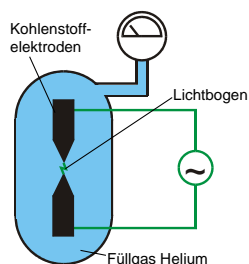
- Fullerene bestehen aus kugelförmig angeordneten Kohlenstoff-Atomen
- Benannt nach dem Architekten R. Buckminster Fuller, Erbauer von geodatischen Kuppeln
- Findet man (vielleicht?) im Weltall, wichtig bei der Entstehung des Lebens



Kompetenzzentrum NanOp



Herstellung von Fullerenen



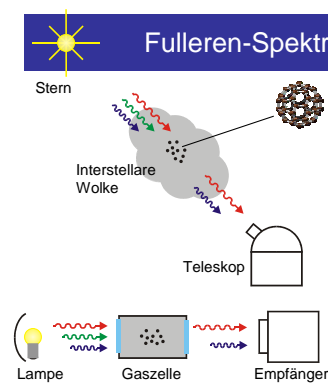
- Bei korrektem Gasdruck und Stärke des Lichtbogens entsteht Russ, der Fullerene enthält



Kompetenzzentrum NanOp



Fulleren-Spektroskopie



- Astrophysik: Gibt es Fullerene im Weltall?
- Vergleich:
A: Im Labor absorbieren Fullerene bestimmte Wellenlängen des Lampenlichts
B: Werden die gleichen Wellenlängen des Sternenlichts absorbiert?



Kompetenzzentrum NanOp



Fahrplan in die Nanowelt

- Wie sehen wir die Nanowelt?
Vom Lichtmikroskop zum Rastertunnel-Mikroskop
- Wie gestalten wir die Nanowelt?
Der Molekül-Baukasten – Kohlenstoff-Nanoröhrchen in der Technik
Vom Nanokosmos ins Weltall – Fullerene in der Astrophysik
Nano für den Menschen – Nanopartikel in der Medizin
Nano fürs Internet – Laserdioden mit Nanopyramiden
- Ausblick in eine winzige Zukunft...

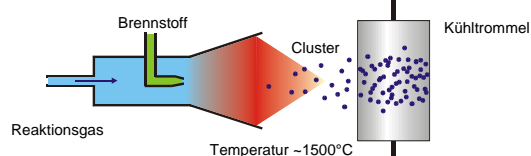


Kompetenzzentrum NanOp



Herstellung von Nanopartikeln

- Herstellung z.B. in einem Flammen-Reaktor: Gas, welches bereits die Partikelelemente (z.B. Metall Titan) enthält, wird durch eine Brennkammer geleitet (z.B. $TiCl_4$)
- Bei geeignetem Druck und Brenner-Temperatur entstehen winzige ($<1\mu m$) Partikel (z.B. Titanoxid), auch Cluster genannt

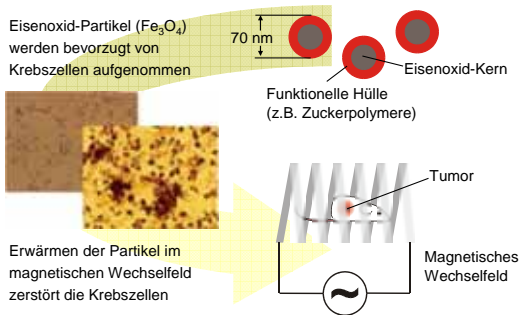


Kompetenzzentrum NanOp



Nanopartikel in der Krebstherapie

- Eisenoxid-Partikel (Fe_3O_4) werden bevorzugt von Krebszellen aufgenommen
- Erwärmen der Partikel im magnetischen Wechselfeld zerstört die Krebszellen

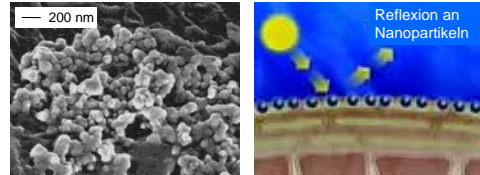


Kompetenzzentrum NanOp



Nanopartikel in Sonnencreme

- Viele Sonnencremes enthalten zum Schutz vor den ultravioletten Strahlen der Sonne Nanopartikel
- Die nur ca. 100 nm grossen Partikel aus Titandioxid und einer Hülle streuen das UV-Licht und verhindern ein Eindringen in die Haut



Kompetenzzentrum NanOp



Fahrplan in die Nanowelt

- Wie sehen wir die Nanowelt?
Vom Lichtmikroskop zum Rastertunnel-Mikroskop
- Wie gestalten wir die Nanowelt?
Der Molekül-Baukasten – Kohlenstoff-Nanoröhrchen in der Technik
Vom Nanokosmos ins Weltall – Fullerene in der Astrophysik
Nano für den Menschen – Nanopartikel in der Medizin
Nano fürs Internet – Laserdioden mit Nanopyramiden
- Ausblick in eine winzige Zukunft...

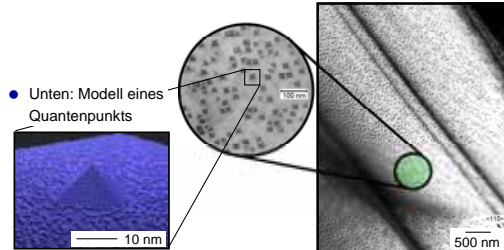


Kompetenzzentrum NanOp



Nanopyramiden in Halbleitern

- Rechts: TEM-Bild eines Feldes von Nano-Kristallen aus Gallium-Arsenid; die Kristalle sind etwa pyramidenförmig
- Unten: Modell eines Quantenpunkts

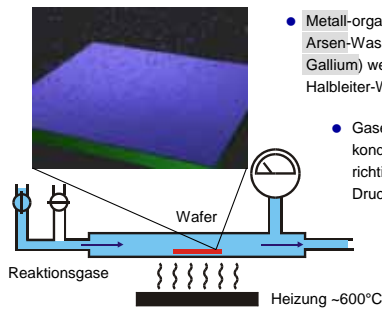


Kompetenzzentrum NanOp



Herstellung von Quantenpunkten

- Metall-organische Gase (z.B. Arsen-Wasserstoff, Tri-Methyl-Gallium) werden über einen Halbleiter-Wafer geleitet
- Gase zerfallen, Metallatome kondensieren und bilden (bei richtiger Temperatur und Druck) Nano-Kristalle: Quantenpunkte durch Selbstorganisation

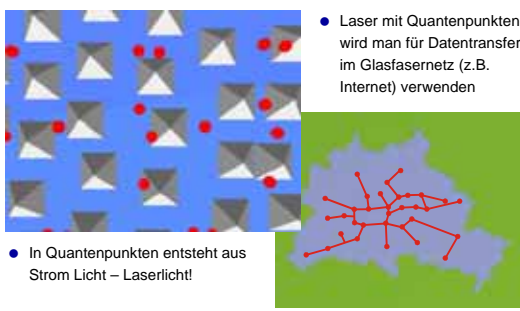


Kompetenzzentrum NanOp



Laser mit Quantenpunkten

- Laser mit Quantenpunkten wird man für Datentransfer im Glasfasernetz (z.B. Internet) verwenden



- In Quantenpunkten entsteht aus Strom Licht – Laserlicht!



Kompetenzzentrum NanOp



Fahrplan in die Nanowelt

- Wie sehen wir die Nanowelt?
Vom Lichtmikroskop zum Rastertunnel-Mikroskop
- Wie gestalten wir die Nanowelt?
Der Molekül-Baukasten – Kohlenstoff-Nanoröhrchen in der Technik
Vom Nanokosmos ins Weltall – Fullerene in der Astrophysik
Nano für den Menschen – Nanopartikel in der Medizin
Nano fürs Internet – Laserdioden mit Nanopyramiden
- Ausblick in eine winzige Zukunft...



Kompetenzzentrum NanOp



Ausblick in eine winzige Zukunft...



Kompetenzzentrum NanOp

