



*Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl,
LMU München und Center for
NanoSciencece,
www.nano.geo.uni-muenchen.de*

Zukunftschancen der Nanotechnologie – Bausteine der Zukunft

Zukunftschancen der Nanotechnologie – Bausteine der Zukunft

Die heute erst in Ansätzen erkennbare Nanotechnologie wird die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts sein. Unter Nanotechnologie versteht man die direkte Sichtbarmachung, die Kontrolle und die Beeinflussung von Materie auf der Nanometerskala, d.h. bis hinein in den Größenbereich von Proteinen, Molekülen und einzelnen Atomen. Was ist so neu an diesem Konzept? Die gegenwärtige Technologie versucht in immer kleinere Dimensionen (Stichwort Mikrochips, Biosensoren, etc.) vorzustoßen, indem von einem großen Werkstück ausgegangen und dieses mit physikalischen Methoden bis zur gewünschten Größe verkleinert wird ("down scaling"). Diese Vorgehensweise findet seine natürlichen Grenzen beispielsweise in der Wellenlänge des Lichts, das zur Strukturierung von integrierten Schaltkreisen benutzt wird. Ein technologisch völlig neuartiger Ansatz besteht darin, von den elementaren Bausteinen wie Atomen und Molekülen auszugehen und durch das Schritt-für-Schritt-Verarbeiten die gewünschten funktionalen Einheiten zusammenzubauen ("up scaling"). Diese Verfahren befinden sich, was die praktische Durchführung anbelangt, jedoch erst ganz am Anfang der Entwicklung. Grundlegende physikalische Prinzipien müssen erforscht werden, die auf der Ebene der Quantenwelt oder im biologischen Bereich auf der einzelner Gene wirken, und ganz neuer Verfahrensweisen bedürfen. Die Erkenntnisse der Nanowissenschaften führen beispielsweise zur Beherrschung von Nanomechanik bzw. Molekülmechanik, Nanoelektronik, usw. und eröffnen damit ein Potential, ganz neue Eigenschaften von Materie für technologische Zwecke auszunutzen (z.B. Einzel-Elektronentransistor, Molekulare Elektronik und Neurocomputer usw.). Damit könnte es im nächsten Jahrhundert zu einer Ablösung der heutigen Siliziumtechnologie durch eine Nanoindustrie kommen. Schlüsselemente auf dem Weg dorthin werden die Rastersondenmethoden sein, da sie zugleich Mikroskop und Werkzeug für die Nanowelt in sich vereinen.

Vorbilder in der Natur:

Das Verfahren, durch schrittweisen molekularen Aufbau aus Einzelbausteinen zur gewünschten Funktion zu gelangen, ist nicht wirklich neu, in der Tat hat die gesamte Natur diese Verfahrensweise über Millionen von Jahren zu höchster Effizienz entwickelt. Beispielsweise bauen molekulare Nanomaschinen in Form der Ribosomen in den Zellen der Lebewesen Proteine aus einzelnen Aminosäuren auf. Der genetische Code der DNA Doppelhelix wird durch eine natürliche molekulare Ablesemaschine in die Sprache der Proteine übertragen. Doch sind diese Maschinen nicht wirklich zielgerichtet mit einem technologischen Plan im Hinterkopf entwickelt worden, sondern ein natürliches Produkt der Evolution, und daher nicht leicht durch unsere heutigen technologischen Verfahrensweisen zu kopieren. Im Übrigen hatte die Natur auch eine Zeitspanne des Trial and Error zur Verfügung, die sich keine Firma mit Ambitionen auf kommerziellen Erfolg leisten könnte. Daher ist einfaches Kopieren natürlicher Vorbilder nicht möglich, wohl aber Lernen von Prinzipien der Natur, wie z.B. das Self-Assembly Verfahren, das weiter unten erläutert wird.

In der Natur der Sache liegt es auch, daß die Nanowissenschaften die Grenzen zwischen den Disziplinen wie Physik, Biochemie und Molekularbiologie verwischen. Der berühmte amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman hat schon 1959 in seiner berühmten Vorlesung "There's is Plenty of Room at the Bottom" davon geträumt, und sogar einen Preis für den ersten Beweis dafür ausgesetzt, daß Dinge Atom für Atom manövriert werden können, da dies seiner Erkenntnis nach keinen grundlegenden physikalischen Gesetzen widersprechen würde.

Daß dies heute möglich ist, dafür sind zwei Voraussetzungen essentiell:

1. Um gezielt zu arbeiten, muß eine Möglichkeit der Beobachtung und der Ergebniskontrolle der einzelnen Arbeitsschritte auf der Nanometerskala zur Verfügung stehen.

2. Werkzeuge müssen verfügbar sein, die auch durch das geschickte Zusammenspiel mit der chemischen Natur der beteiligten funktionalen Einheiten (z.B. durch Ausnutzen der Selbstordnungstendenz elementarer Bausteine) auf der Nanometerskala operieren können.

Mit Hilfe der Rastersondenmikroskopie ist dies in den vergangenen Jahren erstmals möglich geworden. Mit über hundertmillionenfacher Vergrößerung können kleinste Materiebestandteile wie Atome und Moleküle sichtbar gemacht werden.

Auf Grund des Konstruktionsprinzips der Rastersondenmikroskope können diese neben der Abbildung auch zur Manipulation von Materie, von einzelnen Atomen und Molekülen benutzt werden. Um mit solchen Nanowerkzeugen zu operieren, haben wir einen Nanomanipulator konstruiert, der es erst erlaubt die Grobheit unserer Handbewegungen computergesteuert in die Nanobewegungen von Nanowerkzeugen umzusetzen.

Als Beispiel zeigen wir das Schreiben von Strukturen wie z.B. Buchstaben in Molekülbreite. Könnte man diese Technik parallelisieren, wären theoretisch etwa 10^8 bis 10^9 bits pro Quadratmillimeter zu speichern, was etwa 100 Millionen Seiten oder hunderttausend Büchern entsprechen würde. Auch Nanokunst kann man so herstellen, wie wir es anhand von Bildern, die mit etwa 10.000 Molekülen gemalt sind, zeigen.

Weitere Beispiele sind Verfahren, wie mit Hilfe einer Art Nanoschere (tatsächlich eine besonders geformte rasterkraftmikroskopische Spitze) und einer Nanoschaufel kleinste Mengen von DNA-Material gezielt mechanisch aus einem Chromosom entnommen werden, um sie anschließend mit der PCR-Technik zu amplifizieren. Damit hoffen wir von der Cytogenetik und der Medizin erwünschteste genetischer Sonden kreieren zu können.

Um optische Mikroskopie jenseits der Auflösungsgrenze des herkömmlichen Mikroskops zu betreiben, haben wir eine Nanolichtquelle konstruiert, die aus einem leuchtfähigen Partikel am Ende einer winzigen Nadel besteht. Damit kann man beispielsweise fluoreszenzmarkierte Zellkerne mit hoher räumlicher Auflösung mikroskopieren.

Dies alles wäre nicht möglich ohne Gerd Binnigs Erfindung der Rastersondenmikroskopie, die 1986 mit dem Nobelpreis für Physik an ihn und Heini Rohrer ausgezeichnet wurde. Einige grundsätzliche Probleme und Lösungsansätze bei der zielgerichteten Bearbeitung von Materie auf der Nanometerskala seien im folgenden erläutert:

Nanomikroskope

Das Prinzip aller Rastersondenmikroskope ist sehr einfach: Ein hochauflösendes Bild einer Festkörperoberfläche (im besten Fall bis ca. 0.1 Angström lateral und etwa 1/100 Angström vertikal, abhängig von der Probe und der Wechselwirkung) erhält man durch das zeilenweise Abrastern der Topologie mittels einer scharfen Spitze, wobei die genaue Art der Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe (tunnelnde Elektronen beim Rastertunnelmikroskop, Austauschkräfte wie van-der Waals oder elektrostatische Kräfte beim Rasterkraftmikroskop oder Photonen beim nahfeldoptischen Mikroskop) durch eine ausgeklügelte Rückkopplungselektronik in einen Kontrast auf ein Computerbild übersetzt wird.

Damit wird es möglich einzelne Oberflächentome, die bevorzugt in einem zweidimensionalen Kristallverband angeordnet sein sollten zum ersten Mal in einem direkten Bild zu sehen. Eine solche Art der rastertunnelmikroskopischen Abbildung der 7×7 rekonstruierten Oberflächentome eines Siliziumeinkristalls war entscheidend für die Anerkennung als nobelpreiswürdige Leistung für das Team um Gerd Binnig. Seither wird diese Art Mikroskopie in fast

allen Forschungslabors weltweit betrieben. Das Beispiel in Abb. 1 zeigt die hexagonal koordinierten Schwefelatome an der Oberfläche eines natürlichen Molybdänitminerals in ca. 100 millionfacher Vergrößerung.

Nanowerkzeuge

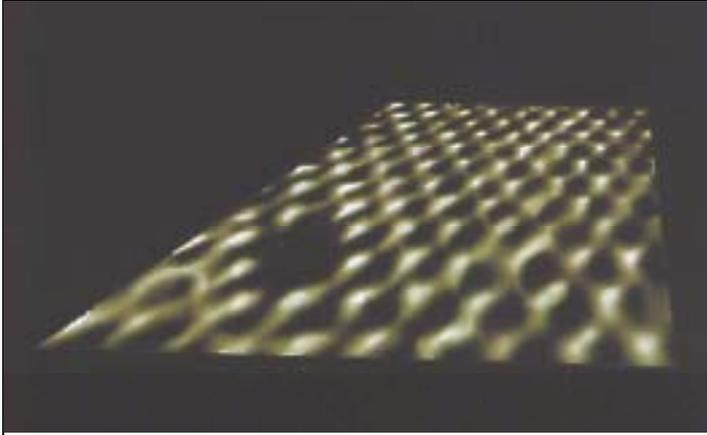


Abb. 1: Rastertunnelmikroskopische Abbildung eines nanomechanisch erzeugten atomaren Punktdefekts auf der Oberfläche eines Molybdänitkristalls mit ca. 100 millionfacher Vergrößerung

verband herausgerissen wird, und so ein atomarer Punktdefekt von ca. 3.16 Angström Durchmesser entsteht. Dieser kann anschließend wieder abgebildet werden, und ist bei einfachsten Bedingungen wie Zimmertemperatur und Umgebungsluft hergestellt und stabil.

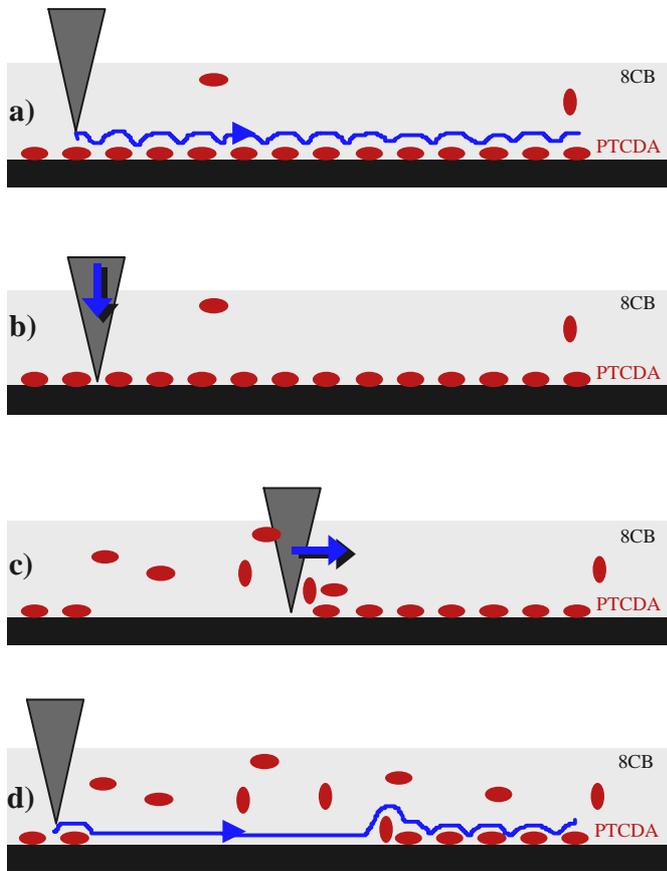


Abb. 2: Rastertunnelmikroskopische Abbildung eines nanomechanisch durch Einzelmolekülablation erzeugten Logos der LMU München mit ca. 2 nm Schriftbreite

Eine unauffällige Besonderheit in Abb. 1 besteht in der minimalsten Bearbeitung der atomaren Oberfläche mittels der rastertunnelmikroskopischen Spitze, die das Prinzip der Nanomanipulation bei der Herstellung des kleinsten menschengemachten Lochs (W.M. Heckl and J. Maddocks, Guinness Buch of Records, 1994ff) bei der atomaren Bearbeitung erläutern soll. Da die Abtastnadel selbst nur ein Atom an der Spitze trägt, ist es möglich, durch Anlegen eines kleinen Spannungspulses (etwa 1 V für 1 Mikrosekunde) bei geeigneter Funktionalisierung der Spitze genügend Energie sehr lokal an ein Atom zu dissipieren, so daß dieses aus dem Kristall-

Könnte man diese Methode schnell und gezielt einsetzen, hätte man die Möglichkeit mit atomaren Bits zu schreiben und damit eine Speicherdichte von etwa 100 Tera-Bits per Quadratzentimeter erreichen. Damit ließe sich theoretisch der gesamte Literaturbestand der Bayerischen Staatsbibliothek auf wenigen Chips speichern. Während bei diesem Experiment zur nanometrischen Beeinflussung von Materie die Methode der feldinduzierten Nanoablation auf atomarer Skala verwendet wurde, kann auch durch direkte Kraftübertragung gearbeitet werden.

Die rastertunnelmikroskopische Spitze wurde in der Abb. 2 zum Herauskratzen von ca 90 Molekülen aus einem zweidimensionalen molekularen Kristallverband benutzt. Es handelt sich hierbei um PTCDA-Farbstoffmoleküle, die sich spontan nach Auftrag auf einen Graphitkristall zu einer geordneten einlagigen Molekülschicht angeordnet haben. Bewegt man nun die abbildende spitze Metallnadel des Rastertunnelmikroskops zu nahe auf die Moleküle zu,



kann man diese durch direkte Übertragung mechanischer Kräfte einzeln abkratzen (Nanoablation). Die genauen Kräfte, die hierbei wirken und ihre zuverlässige Beherrschung sind momentan Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Die präzise Ausführung der Positionierung der nanomechanisch arbeitenden Spitze in allen drei Raumdimensionen erlaubt uns ein Nanomanipulator, den wir dafür konstruiert haben, computergestützt und piezoelektronisch gesteuert, die vergleichsweise groben Handbewegungen übertragen auf einen Computerjoystick beim Schreiben des Logos der Ludwig Maximilians Universität (LMU) auf die molekulare Skala zu übersetzen. Schematisch ist das Prinzip der Verfahrensweise dieser nanoskopischen Bearbeitung von Molekülfilmen, die zum kleinsten Universitätslogo geführt haben, in Abb. 3 und der Nanomanipulator in Abb. 4 wiedergegeben.

Abb. 3: Schematische Verfahrensweise beim molekularen Schreiben

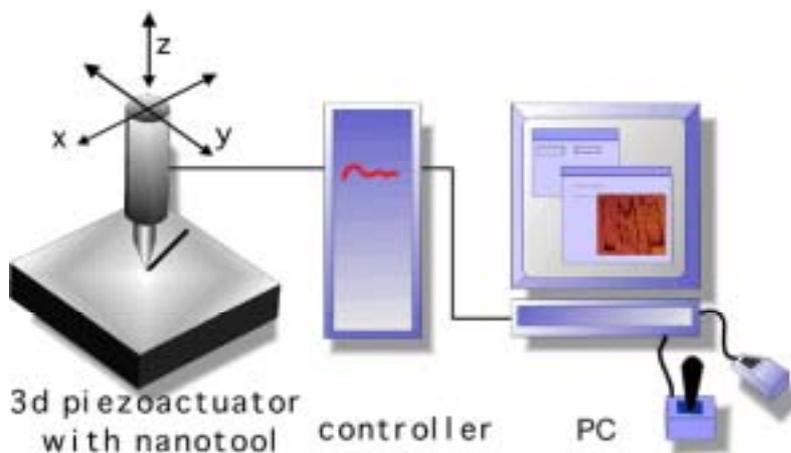


Abb. 4: Nanomanipulator zur Steuerung von Nanowerkzeugen

Molekulares Malen ist in Abb. 5 gezeigt, wo mit dieser Methode ein Bild in einer Art molekularer Pointillismus (Molekularismus) gemalt wurde, das aus ca. 10.000 Molekülen besteht.



Abb. 5: Ein molekulares Haigesicht aus ca. 10.000 Molekülen kann durch Nanowerkzeuge geschaffen werden

Auch die ausgeübte Kraft auf Moleküle wird z.B. im Falle des Schneidens von DNA als 4. Dimension auf den Joystick übertragen (Force Feedback). Damit ist die Möglichkeit eröffnet, einem Nanochirurgen bei einer derartigen Operation als Kräftefeedback (molekulare Kräfte werden in händisch spürbare verstärkt) ein Gefühl in die Hand zu geben.

Will man die ablatierten Moleküle nicht verwerfen, kann man versuchen sie für weitere Verarbeitungsverfahren zu gewinnen. Dies führte uns zur Technologie der Nanoextraktion, mit deren Hilfe sich kleinste Probenmengen von einem topologisch identifizierbaren Probengebiet gewinnen lassen, und das vielfältigen Einsatz in den Bereichen des Nanosampling (beispielsweise von Gewebeproben, und überall dort, wo z.B. auf Grund des Wertes nur geringe Probenmengen zur Verfügung gestellt werden können, wie z.B. bei der Identifizierung von wertvollen Kunstgegenständen oder in der Archäologie usw., oder wo von vornherein nur geringste Probenmengen existieren) finden könnte. Wir selbst arbeiten an der genauen Bestimmung des Wirkortes von Medikamenten durch Entnahme an verschiedenen Gewebestellen und anschließender Identifikation durch chemische, biochemische oder massenspektroskopische Verfahren (TOF-SIMS). Auch die Probennahme von winzigsten Mengen an extraterrestrischem Material mit der Zielsetzung der Identifizierung von relevanten Molekülen im Zusammenhang mit der Suche nach außerirdischen Lebensspuren ist ein Einsatzgebiet. Leider waren unsere bisherigen Messungen hinsichtlich des berühmten Marsmeteoriten ALH84001 bisher nicht erfolgreich. Auf dem Gebiet der Generierung von Sonden für die Cytogenetik jedoch sind wir mit der nanoskopischen Probenentnahme in bislang nicht handhabbare kleinste Dimensionen vorangestoßen. Während rasterkraftmikroskopische Schnitte an Plasmid-DNA, wie in Abb. 5 gezeigt, bisher nicht genügend Material geliefert haben, waren wir bei der Entnahme von DNA-Proben aus ganzen menschlichen Chromosomen mit der anschließenden Amplifizierung durch die Polymerasekettenreaktionstechnik erfolgreich.

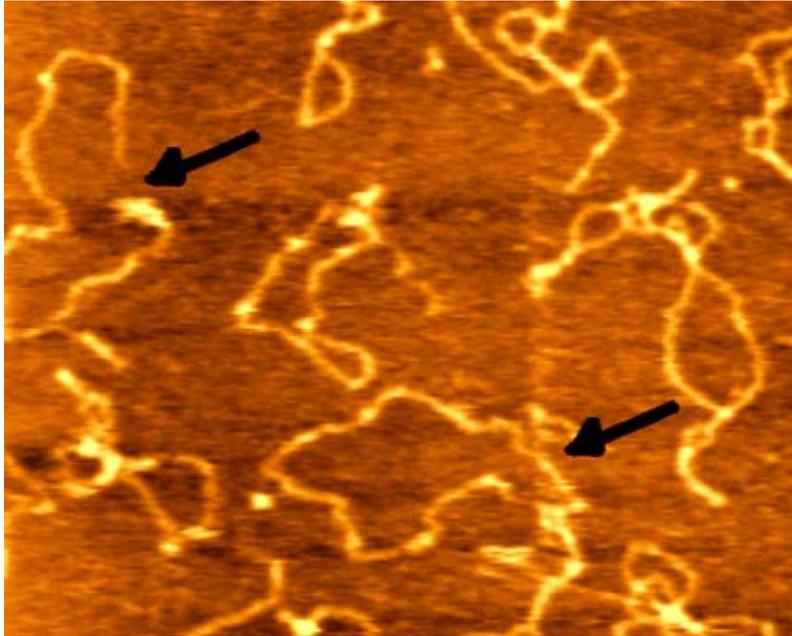


Abb. 6: Rasterkraftmikroskopische Dissektion eines Plasmids zur DNA-Extraktion

Problem seriell/parallel

Ein inherentes Problem der gezeigten rastersondenmikroskopischen Vorgehensweise zur nanometrischen Bearbeitung von Materie stellt die maximale erreichbare Prozeßgeschwindigkeit auf Grund der seriellen Vorgehensweise dar. Lösungsansätze kommen hier beispielsweise aus der Arbeitsgruppe um Gerd Binnig in Zürich, oder von der Gruppe Cal Quate von der Stanford University, wo es geglückt ist, viele rastersondenmikroskopische Abtastspitzen auf einem einzigen Arbeitsschip zu integrieren, und parallel einzusetzen. Jedoch gibt es für verschiedene Fälle alternative Möglichkeiten, die uns die Natur selbst zur Verfügung stellt, bzw. die wir durch geschickte Verfahren der Prozeßsteuerung erreichen können.

Die Ausnutzung des Prinzips der Selbstorganisation auf molekularer Ebene (Self Assembly) ist eine der Möglichkeiten, von Einzelereignissen zu einer technologisch relevanten Verfahrensweise zu gelangen. Natürlich wäre es niemals möglich, Schritt für Schritt einzelne Moleküle so zu positionieren, daß mit einem vertretbaren Zeitaufwand ein großer Molekülkristall zustande käme. Kristallwachstum unter dem Einfluß der physikalisch-chemisch wirkenden Kräfte bei geschickter Wahl der Bindungspartner (directed Self Assembly) ist hier der Königsweg. Will man das gleiche Problem beim Strukturieren lösen, kann man z.B. versuchen, mit dem seriellen langsamen Strukturierungsvorgang einen "Master" zu schaffen, der dann im Prinzip ähnlich wie bei einer elektronenlithographisch seriell geschriebenen Maske zur Strukturierung weiterer Muster verwendet wird. Allerdings funktioniert bei der Kleinheit der Dimensionen, um die es bei der Nanotechnologie geht, die herkömmliche photolithographische Belichtungs/ätztechnik auf Grund der beugungslimitierten spatialen Einschränkung des Lichtes nicht mehr, sondern es müssen andere Verfahren zum Einsatz kommen.

Hier bietet sich eine Weiterentwicklung des von Whitesides und Mitarbeitern entwickelten mikromechanischen Kontakt-Printing Verfahrens zu einem Nano-Kontakt-Printing an, bei dem nach nanomechanischer Strukturierung der Molekülschicht, diese Anordnung als ein Stempel benutzt wird, der beliebig viele Reprints molekularer Strukturen zuläßt. Natürlich müssen dafür erst geeignete Materialien gefunden werden, die auf dieser Skala etwa über die Wechselwirkung hydrophob/hydrophil oder über die unterschiedliche Adsorptionsenergie ein gezieltes Benetzen der gewünschten Strukturen (und nur dieser) mittels der "Molekültinte" ermöglichen.

Die Lösung des parallel/seriell Problems im Rahmen unserer Experimente zur Nanoextraktion von genetischem Material ist natürlich durch die besonderen Eigenschaften dieser Moleküle für die PCR-Amplifizierung gegeben und damit ein Glücksfall.

Interfacing

Nanoskopische Strukturen und Ereignisse geschehen auf der Nanometerskala. Auf Grund unserer menschlicher Dimensionen, die uns das Arbeiten, oder auch nur das Erkennen von Dingen höchstens auf der mm-Skala erlauben, müssen alle nanoskopischen Verfahren eine Brücke zur Makrowelt haben. Auf dem Gebiet der Strukturierung kann das, wie oben gezeigt, ein Nanomanipulator betriebenen Rastersondenwerkzeug übernehmen, beim Betrachten ein Rastersondenmikroskop mit seiner 100 millionfachen Vergrößerungskapazität.

Aber beim Ankopplern der Makrowelt an die Nanowelt besteht nach wie vor besonderer Forschungsbedarf. Beispielsweise stellt sich die Frage, wie kann man mittels eines Elektronenstroms Moleküle adressieren kann, oder wie man mittels einer für unser Auge sichtbaren Kraftmessung Einzelmolekülkräfte detektieren kann, wie sie etwa beim Schloss/Schlüssel Prinzip von Antigen/Antikörper Erkennung wichtig sind. In Bezug auf den ersten Fall könnte man einfach so vorgehen, daß man Moleküle an Elektroden durch einfachen Kontakt koppelt, wie dies in der Arbeitsgruppe Dekker in Delft für wenige Nanometer dicke und bis zu Mikrometer lange Nanoröhrchen geschieht, die über Siliziumkontakt-Pads gelegt werden. Über Kontaktwiderstände von ca. 0.5 MegaOhm konnte so beispielsweise ein einmolekularer Feldeffekttransistor gebaut werden. Der Arbeitsgruppe H. Gaub in München ist es gelungen, mittels geschickter Befestigung an der rasterkraftmikroskopischen Spitze die Bindungskräfte eines einzigen Biotin-Avidin Paares zu messen. Die mit dem Nobelpreis an Sakmann und Neher ausgezeichnete Patch-Clamp Technik, die vielfach zur Ableitung von Einzelmolekülpotentialen eingesetzt wird ist ein ähnliches Instrument zur Überwindung der Kluft zwischen Nano- und Makrowelt. Einige weitere Methoden können hier nicht erwähnt werden, und noch mehr werden zukünftig erfunden werden.

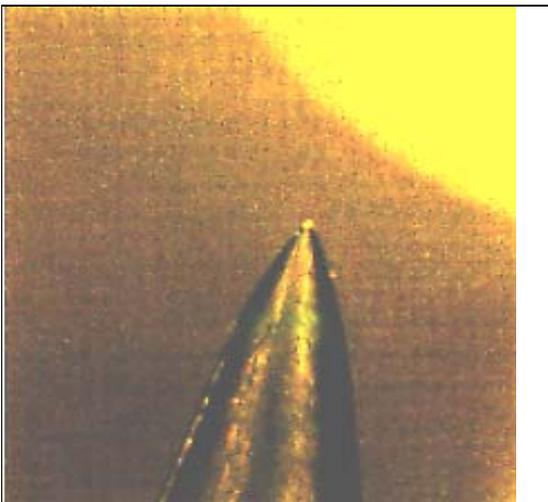


Abb. 7 Nanolichtspitze aus porösem Silizium für die nahfeldoptische Mikroskopie

Beim Ein- und Auslesen von Ereignissen kann man sich beispielsweise natürlich wieder die metallischen Rastersondenspitzen zu Hilfe nehmen, wenn es um Ströme geht. Wenn es um Licht geht, kann man z.B. eine von uns patentierte Nanolichtspitze verwenden, wie sie in Abb. 7 gezeigt ist. Sie besteht aus einem Si-Kristall der auf Grund seiner Quantenporosität photo- bzw. elektrolumineszent ist, und prinzipiell bis in Nanometerdimensionen klein hergestellt werden kann. Die geringe Lichtmenge ist hier kein prinzipielles Problem, da sie mit der Dimension des zu kontaktierenden Materials wie z.B. einzelne Farbstoffmoleküle skaliert.

Ein einziges Beispiel mag hier genügen um einige Anforderungen an nanometrisches Baumaterial zur illustrieren.

Es soll dies das biologische Beispiel der DNA sein, die von der Natur entwickelt und optimiert wurde, und uns ganz billig zur Verfügung gestellt wird. Sie ist ein molekulares Bauelement das eine ganze Reihe von entscheidenden Vorteilen auf sich vereint und mit großer Wahrscheinlichkeit ein hohes Anwendungspotential in der Nanotechnologie haben wird. Dazu

zählen neben dem Aspekt der Preisgünstigkeit und ubiquitären leichten Verfügbarkeit, ihre mechanischen Eigenschaften, die sie als molekulares Seil mit extremer Elastizität Verwendung finden lassen, ihre elektrischen Eigenschaften (nach entsprechender chemischer Modifizierung am Rückgrat), die sie als molekularen Draht Verwendung finden lassen und ihre Sensoreigenschaften, die sie auf Grund der komplementären Basenerkennungstechnologie (Stichwort Cytochip, OligoChip) inhärent besitzen.

Eine intelligente Molekularelektronik mit zum Teil natürlichen, zum Teil künstlich hergestellten Komponenten könnte mittelfristig entwickelt werden mit all ihren Vorteilen hinsichtlich Energieverbrauch, Schaltgeschwindigkeit usw. Natürlich darf man auch potentielle Gefahren nicht übersehen, die z.B. in der inhärenten Fragilität solcher biomechanisch/bioelektronischer Hybrid-Devices liegen. Dies reicht bis hin zur Degeneration unter Umwelteinflüssen physikalischer Art wie Licht, elektromagnetische Felder, Feuchtigkeit usw. Aber auch der Einfluß von Mikroorganismen, die als Freßfeinde agieren könnten, wenn es sich um biologische Materie handelt, ist zu berücksichtigen. Eine neue Produktionstechnologie wird erforderlich sein, die nicht mehr die Partikelreinheit als allerhöchsts Ziel hat, sondern darüberhinaus, oder statt dessen, die biologische Reinheit ins Zentrum rückt.

In leichter Abwandlung des Zitats von Feynman könnten man sagen "There is plenty of room for the future of Nanotechnology", die sich sicher einestages (hoffentlich) auch segensreich auf den Gebieten der Nanomedizin (speziell der Altersforschung), der umwelt- und ressourcen- (weil nano) schonenden Arbeitstechnologien etablieren werden.

Literaturverzeichnis

W.M.Heckl, **Nanotechnologie**, in Spektrum der Wissenschaften, Dez. 1999

W.M.Heckl, **Rastersondenwerkzeuge als Schlüsselemente für die Nanowissenschaften**, Bioforum 7-8, 425-430(1999)

Mathias Schulenburg, **Nanotechnologie, die letzte industrielle Revolution**, Insel Verlag 1995

Eric Drexler, **Nanosystems, Molecular Machinery, Manufacturing and Computation**, Wiley Verlag, New York, 1992

W.M. Heckl, **Visualization and Nanomanipulation of Molecules in the Scanning Tunneling Microscope**, in "Pioneering Ideas for the Physical and Chemical Sciences", eds. W. Fleischhacker and T. Schönfeld, Plenum Publishing Corporation, New York, 1997, pp. 179-191

W.M.Heckl,**Scanning the Thread of Life, DNA under the microscope**, in The Diagnostic Challenge, The Human Genome, Eds. E.P.Fischer and S.Klose, Piper Verlag, München,1995

Procedures in Scanning Probe Microscopies", Editoren, Colton et al.,

Verlag John Wiley & Sons Ltd. 1998

W.M. Heckl,**The Combination of AFM Nanodissection with PCR, A new tool for the generation of genetic probes**, BIOforum (1998)

Combined SEM and Atomic Force Microscope Investigation of the carbonate globules in Martian Meteorite ALH84001: preliminary results, F. Westall, P. Gobbi, G. Mazzotti, D. Gerneked, R. Stark, T. Drobek, W.M. Heckl, E. Gibson, D. McKay, C. Alleng, A. Stelle, K Thomas-Keprta, Proceedings of the SPIE conference, San Diego 1998,

Self-assembly at the Prebiotic Solid-liquid Interface: Structures of Self-assembled Monolayers of Adenine and Guanine Bases Formed on Inorganic Surfaces, S.J. Sowerby, M. Edelwirth and W.M. Heckl, J.Phys.Chem., 102(30), 5914-5922, (1998)

The Atomic Force Microscope (AFM) as a new microdissecting tool for the generation of genetic probes, S. Thalhammer, R.W. Stark, S. Müller, J. Wienberg and W.M. Heckl, Journal of Structural Biology, **119** (1997) 232-237

A novel probe for near field optical microscopy based on luminescent silicon, H. Göttlich and W.M. Heckl, Ultramicroscopy, 61(1995) 145-153

Theorien zur Entstehung des Lebens, - Die mögliche Rolle von selbst-organisierten DNA-Basen für die Emergenz von Leben -, W. M. Heckl and S.J. Sowerby, Herausg.: Kunst- und Ausstellungshalle Bonn, in "Genwelten", Du Mont Verlag, Köln, 1998