Stefan Thalhammer und Michael Funke

Nano techno logie in der Schule

Aus der Forschung
in die Schule

ijf initiative junge forscherinnen und forscher e. v.

Impressum

© / Copyright: 2017
Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF)
Josef-Martin-Weg 52 | Campus Hubland Nord | 97074 Würzburg
www.initiative-junge-forscher.de

1. Auflage
Umschlaggestaltung: Natalie Dees, IJF
[Großes Bild: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme eines menschlichen Metaphase-Chromosoms.]

Herausgeber: Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF) | 97074 Würzburg
Druck: Vogel Business Media GmbH & Co. KG | Max-Planck-Str. 7/9 | 97082 Würzburg

ISBN 978-3-00-058613-2 (gebundene Ausgabe)
ISBN 978-3-00-058614-9 (E-Book)

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlages und der Autoren unzulässig. Dies gilt insbesondere für die elektronische oder sonstige Vervielfältigung, Übersetzung, Verbreitung und öffentliche Zugänglichmachung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Nanotechnologie in der Schule

von PD Dr. Stefan Thalhammer und StD Michael Funke

Mit Beiträgen von:

M.Sc. Jan Attig, Dr. Waldemar Baron, Prof. Dr. Wilhelm Barthlott, Luca Banszerus, StR Tobias Busche, Prof. Dr. Alfred Forchel, StD Michael Funke, Dr. Peter Grambow, Prof. Dr. Andreas Greiner, Prof. Dr. Wolfgang Heckl, Prof. Dr. Hubert Jäger, Dr. Lorenz Kamschulte, Sebastian Klick, Benedikt Lorbach, Prof. Dr. Axel Lorke, Moritz Plötzing, Christoph Petschenka, StD Ludger Remus, StD Dr. Ralf Ricken, PD Dr. Johannes Russer, Prof. Dr. Giuseppe Scarpa, Prof. Dr. Michael Schillmeier, Dr. Otmar Schmid, Meike Spiess, StD a.D. Walter Stein, Dr. Tobias Stöger, PD Dr. Stefan Thalhammer, PD Dr. Marc-Denis Weitze, OStR´ Dr. Vera Wethkamp, Prof. Dr. Achim Wixforth, Prof. Dr. Dr. Axel Zweck.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Vorwort von PD Dr. Stefan Thalhammer und StD Michael Funke 7

Vorwort des Herausgebers von Prof. Dr. Alfred Forchel 8

„Ois is Nano“ von Prof. Dr. W. Heckl 9

1. Werkzeuge im Nanokosmos 13

Kapiteleinleitung von PD Dr. Marc-Denis Weitze 14

Versuch 01: Black-Box-Experiment zur Funktion eines Rastertunnelmikroskops 19

Versuch 02: Rasterkraftmikroskop-Bastel-Modell 20

Versuch 03: Das DVD-Spektroskop 24

2. Nanotechnologie und Physik 31

Kapiteleinleitung von Prof. Dr. Axel Lorke 32

Versuch 04: Erhöhte Reaktivität kleiner Teilchen 40

Versuch 05: Modellexperiment zur Oberflächenvergrößerung 45

Versuch 06: Bärlappsporenexplosion 46

Versuch 07: Mehlstaubexplosion 47

Versuch 08: Farben durch Lichtbrechung an Nanostrukturen 49

Versuch 09: Kolloidnachweis durch den Tyndall-Effekt 52

Versuch 10: Herstellung photonischer Kristalle 53

3. Nanotechnologie und Chemie 59

Kapiteleinleitung von Prof. Dr. Andreas Greiner 60

Versuch 11: Gold-Nanopartikel in wässriger Lösung 62

Versuch 12: Herstellung von Titandioxid-Nanopartikeln 63

Versuch 13: Entfärbung einer Permanganat-Lösung 65

Versuch 14: Zersetzung einer Wasserstoffperoxid-Lösung 66

Versuch 15: Entfärbung einer Kristallviolett-Lösung 67

Versuch 16: Bildung antibakterieller Silbernanopartikel mit Zitronensaft 69

Versuch 17: Goldsole als farbige Dispersionskolloide 72

Versuch 18: Opale durch Elektrospinnen von Nanofaservliesen 76

Versuch 19: Vergleich der katalytischen Aktivität von Rutil und Anatas 82

4. Nanotechnologie und Biologie 85

Kapiteleinleitung von Prof. Dr. Wilhelm Barthlott 86

Versuch 20: Kontaktwinkelbestimmung verschiedener Pflanzenarten 89

Versuch 21: Demonstration zum Lotuseffekt 93

Inhaltsverzeichnis (Fortsetzung)

Versuch 22: Demonstration zum Salvinia-Effekt ... 95
Versuch 23: Warum der Gecko nicht von der Decke fällt ... 98
5. Nanofluidik ... 101
Kapiteleinleitung von Prof. Dr. Achim Wixforth ... 102
6. Nanomedizin ... 113
Kapiteleinleitung von PD Dr. Stefan Thalhammer ... 114
Versuch 24: DNA-Isolierung aus einer Frucht (Variante A) ... 123
Versuch 25: DNA-Isolierung aus einer Frucht (Variante B) ... 126
Versuch 26: Synthese nanoskaliger Goldpartikel ... 127
Versuch 27: Cassius´scher Goldpurpur ... 133
Versuch 28: Herstellung magnetischer Flüssigkeiten ... 135
Versuch 29: Ausbildung der Rosenzweig-Stacheln ... 143
Versuch 30: Schwimmende Münze ... 144
7. Nanoelektronik ... 147
Kapiteleinleitung von PD Dr. Johannes Russer und Prof. Dr. Giuseppe Scarpa ... 148
Versuch 31: Organische Solarzelle ... 155
Versuch 32: Elektrische Kontaktierung von Graphen ... 157
8. Die Nanowelt des Kohlenstoffs ... 161
Kapiteleinleitung von Prof. Dr. A. Hubert Jäger ... 162
Versuch 33: Herstellung von Graphen in der Schule ... 177
Versuch 34: Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen ... 183
9. Nanotechnologie im Alltag ... 191
Kapiteleinleitung von Dr. Lorenz Kampschulte ... 192
Versuch 35: Herstellung einer Easy-to-Clean-Beschichtung ... 197
Versuch 36: Hydrophobisierung einer Glasplatte mit Ruß ... 199
Versuch 37: Textilien mit einer hydrophoben Nano-Beschichtung ... 201
Versuch 38: Pflanzen mit einer hydrophoben Nano-Beschichtung ... 202
10. Gesundheitsrisiken durch Nanopartikel ... 203
Kapiteleinleitung von Dr. Otmar Schmid und Dr. Tobias Stöger ... 204
11. Nanotechnologie in der Wirtschaft ... 213
Kapiteleinleitung von Dr. Ing. Peter Grambow, PD Dr. Stefan Thalhammer, Prof. Dr. Dr. Axel Zweck ... 214

Inhaltsverzeichnis (Fortsetzung)

12. Gesellschaftliche Aspekte der Nanotechnologie 229
Kapiteleinleitung von Prof. Dr. Michael Schillmeier 230
13. Nanotechnologie im Studium 233
Kapiteleinleitung von Dr. Waldemar Baron 234
14. Nanotechnologie im Unterricht und in Schulprojekten 243
Kapiteleinleitung von StD Michael Funke 244
Unterrichtsreihe zur Nanotechnologie in der Sek I 247
Jugend forscht Projekte zur Nanotechnologie 256
Unterstützung in Sachen Nanotechnologie:
Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF) 258
I. Autorenverzeichnis 261
II. Abbildungsnachweise 263

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

das Ihnen vorliegende Buch ist aus einer langjährigen Zusammenarbeit zwischen Michael Funke und Stefan Thalhammer im Rahmen von Kursen für hochbegabte Schülerinnen und Schüler entstanden.

Die Nanotechnologie entwickelt sich weltweit zu einem wichtigen wirtschaftlichen Zugpferd und Schlüsseltechnologie. Als wir 2006 begannen einen Nanotechnologiekurs für Ferienakademien zu etablieren, stellten wir fest, dass dazu wenig altersgerechtes Schulmaterial vorhanden war. Das hat sich bis heute nicht wesentlich verbessert. Daher möchten wir unsere in den Jahren gesammelten Experimente und Erfahrungen weitergeben. Für unsere Idee konnten wir zahlreiche Kolleginnen und Kollegen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Schule begeistern. Aus diesen Akademiekursen haben wir zwischenzeitlich gemeinsam mit Lehrkräften erprobte Unterrichtsreihen und –sequenzen für Wahlpflichtkurse, Projektkurse oder für den regulären Fachunterricht weiterentwickelt.

Das Buch richtet sich vor allem an Naturwissenschaftslehrkräfte und wurde als Brücke zwischen der Fachwissenschaft und dem Schulunterricht konzipiert. Dazu haben Fachwissenschaftler eine kurze verständliche Übersicht zu ihren jeweiligen Fachdisziplinen erstellt und passend dazu haben wir mit Unterstützung einiger Kolleginnen und Kollegen eine Sammlung ausgewählter Experimente zusammengestellt.

Wir erheben mit unserem Buch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern wollen vielmehr den interessierten Fachlehrkräften die Möglichkeit bieten, sich einen schnellen Überblick über die Nanotechnologie und deren Umsetzbarkeit im Unterricht oder in Schulprojekten zu verschaffen. Dabei haben wir neben zahlreichen einfachen Handexperimenten für den Unterricht auch Anregungen für anspruchsvollere Projektarbeiten in unsere Sammlung aufgenommen. Dazu finden Sie bei allen Experimenten ein einfaches Ampelsystem, welches auf einen Blick anzeigt, wie hoch der Aufwand für die Durchführung des jeweiligen Experimentes ist. Jede Beschreibung enthält die Durchführungsschritte sowie die Erklärungen der einzelnen Experimentteile.

Wir bedanken uns herzlichst bei allen Kolleginnen und Kollegen, die zu diesem Buch beigetragen haben. Ebenso danken wir der Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF) ganz herzlich, die die Realisierung dieses Buches ermöglichte.

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre und hoffen Ihnen neue Impulse für Ihren Unterricht geben zu können.

PD Dr. Stefan Thalhammer StD Michael Funke

Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

ich freue mich, Ihnen die vorliegende Publikation „Nanotechnologie in der Schule“ präsentieren zu können. Mit dem speziellen Fokus auf Experimenten, Aufgaben und Unterrichtsbeispielen bildet diese Lektüre ein umfassendes Nachschlagewerk für Lehrkräfte der Naturwissenschaften und verknüpft so die Fachwissenschaften mit der Unterrichtspraxis.

Die Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie, die viele wichtige Branchen wie Halbleiterindustrie, Energiewirtschaft, Automobilindustrie, Biotechnologie, Chemie, Medizintechnik, Sensorik, Umwelttechnologie, Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau und Textilindustrie beeinflusst. Nanotechnologien bieten immer mehr Anwendungsmöglichkeiten für völlig neue Produkte oder Produkteigenschaften wie leitfähige Kunststoffe, ultraleichte Baustoffe oder Lacke mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts ist die Nanotechnologie einer der entscheidendsten Innovationstreiber weltweit und bietet völlig neue Lösungswege, z. B. in der Energiespeicherung oder in der Medizin.

Um dem Fachkräftemangel in diesem Sektor entgegenzuwirken, engagiert sich die Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF) seit 2010 in gezielter Nachwuchsförderung. Gemeinsam mit den Mitgliedern, Partnern und engagierten Mitstreitern sowie dem Europäischen Sozialfonds in Bayern (ESF), dem Bayerischen Staatsministerium für Arbeit und Soziales, Familie und Integration und dem Bayerischen Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst arbeiten wir an einer stärkeren Verzahnung von Schule Forschung und Wirtschaft. Dabei führen wir junge Menschen in vielfältigen Maßnahmen an die Nanotechnologie heran, begeistern sie für naturwissenschaftlich-technische Fächer und steigern somit das Interesse an MINT-Ausbildungsberufen oder Studiengängen.

Das Team der IJF und ich freuen uns, Ihnen mit dem vorliegenden Buch Anregungen und Ideen für einen praxisnahen und interessanten Unterricht zu geben. Wir wünschen Ihnen viel Freude bei der Lektüre.

Prof. Dr. Alfred Forchel

Vorstandsvorsitzender der Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF)
Präsident der Julius-Maximilians-Universität Würzburg

„Ois is Nano“

Liebe Leserinnen und Leser,

Sie können diese Zeilen nur lesen, weil sich kleinste Nanopartikel, genauer Farbpigmente unter den technisch-mechanischen Randbedingungen, die ein Druckvorgang auslöst, zu makroskopisch großen lesbaren Druckbuchstaben selbst organisiert haben. Natürlich besteht auch das Papier dieser Schriftenreihe, das Sie in Händen halten aus Atomen und Molekülen. Dass also alle Materie die uns umgibt aus Nanoteilchen aufgebaut ist, hat schon der große griechische Denker Demokritos vermutet, als er den Begriff des Atoms (griechisch atomos), also des bis zum Zeitalter der Kernspaltung kleinsten bekannten Teilchens eingeführt hat, aus dem sich alle Gegenstände um uns herum aufbauen. Freilich sind es ungeheuer viele, unvorstellbar viele Teilchen, mit der wir in unserer makroskopischen Welt normalerweise umgehen, typischerweise 1 mol, also etwa 6 mal 10 hoch 23 Teilchen.

Erst die Entwicklung des mit dem Nobelpreis für Physik 1986 ausgezeichneten Rastertunnelmikroskops durch Gerd Binnig und Heini Rohrer hat jedermann – wie dem ungläubigen Thomas aus der Legende – durch die erstmalige Möglichkeit Atome und Moleküle direkt in einem Mikroskop zu sehen, vor Augen geführt, ja es gibt Atome, alles ist aus Nanoteilchen aufgebaut, „Ois is Nano“!

Und dies gilt nicht nur für die unbelebte materielle Welt. Natürlich sind auch alle lebenden Systeme aus höchst komplex selbstorganisierten Nanoteilchen aufgebaut. Tatsächlich ist es noch eines der größten Rätsel der Wissenschaft, wie genau das Leben entstand, wie aus „toten“ Molekülen vor ca. 3,6 Milliarden Jahren erstmals auf der Erde lebende Systeme wurden, wie Nanotechnologie am Ursprung des Lebens wirkte. Nun aber, mit Hilfe der modernen physikalischen Untersuchungsinstrumente ist man der Beantwortung diese Frage näher gekommen.

Tatsächlich besteht natürlich alle Materie aus Nanoteilchen, aber eine sinnvolle Definition schließt die neuen Funktionalitäten mit ein, die erst durch die Nanoskaligkeit erreicht werden, wenn etwa besondere Quanteneffekte zum Tragen kommen, wie bei fluoreszierenden Nanopartikeln, oder die schmutzabweisende Wirkung von nanobeschichteten und nanostrukturierten Oberflächen nach dem Lotus-Effekt, oder die spezifische Wirkung von molekularen Nanosystemen im Bereich der Nanomedizin, wohl einem der zukünftig bedeutendsten Anwendungsfelder der Nanotechnologie.

Man könnte also klarer als „Ois is Nano“ definieren: wir sprechen dann von typischen Nanosystemen, wenn bei ihnen die Kleinheit (typischerweise unter 100 Nanometer) neue nanoskopische Effekte und Eigenschaften generiert, die im makroskopischen System keine Rolle spielen. Das makroskopische Mineral Rutil wird beispielsweise dann besonders interessant, wenn es zerlegt in nanopartikuläre Titandioxidpartikel zur Basis des hohen Lichtschutzfaktors von Sonnencremes wird.

Neben den vielfältigen Möglichkeiten des Einsatzes der nanotechnologischen Methoden zur Untersuchung und Entwicklung von neuen maßgeschneiderten Materialien, bietet die Nanotechnologie als Querschnittstechnologie die Basis spannender Erkenntnisse und neuer Entwicklungsmöglichkeiten von der Nanoelektronik, über oberflächenphysikalische Beschichtungsmethoden, bis hin zur Entwicklung neuer Ansätze in Chemie, Pharmazie und Biotechnologie. Sie werden in diesem Buch hervorragend gezeigt, so dass ein recht guter Überblick sowohl über die Grundlagen, als auch über die modernsten und damit zukunftsweisendsten Einsatzfelder der Nanotechnologie vorliegt.

Und darüber hinaus, Nanotechnologie, wie jede andere Technologie auch, wirkt nur dann, wenn sie in der Gesellschaft verankert ist, wenn also möglichst vielen Menschen durch ein naturwissenschaftliches Basiswissen die Teilhabe an der Lösung der Herausforderungen der Zukunft ermöglicht wird. Wenn sie

mitreden können beim gesellschaftlichen Dialog über Chancen und Risiken. Gerade in der Nanotechnologie sind viele neue Produkte für die Verbraucher entstanden, und täglich kommen neue Anwendungen hinzu. Das Deutsche Museum in München zeigt daher in seiner großen Dauerausstellung zur Nano- und Biotechnologie nicht nur die Originalobjekte, die Entwicklung und die Einsatzmöglichkeiten auf, sondern bietet mit seiner Nano-Produktausstellung eine Basis für den gesellschaftlichen Dialog.

Möge dieses Buch weite Verbreitung finden und dazu beitragen, dass viele junge Menschen sich dem Abenteuer der Naturwissenschaft und Technik zuwenden, vielleicht sogar ihr späteres Berufsfeld als Physiker, Chemiker oder Ingenieure finden.

Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl

Oskar von Miller Lehrstuhl für Wissenschaftskommunikation und Physik Department, Technische Universität München. Generaldirektor des Deutschen Museums.

Ampelsystem: Die benötigte Zeit auf einem Blick!

Um den Lehrerinnen und Lehrern einen schnellen Überblick über den Zeitaufwand für die Experimente zu geben, haben wir ein einfaches Ampelsystem eingeführt.

Experimente, die sich sowohl als längerfristiges Projekt, als auch in einer abgeänderten Version innerhalb einer Unterrichtsstunde durchführen lassen, sind mit zwei Ampeln gekennzeichnet.

Handexperimente, die sich in 5 bis 10 Minuten schnell durchführen lassen, werden durch eine grüne Ampel gekennzeichnet.

Etwas aufwändigere Experimente, die sich aber dennoch innerhalb einer Unterrichtsstunde durchführen lassen, werden durch eine gelbe Ampel gekennzeichnet.

Projekte, die über eine Unterrichtsstunde hinausgehen sind mit einer roten Ampel gekennzeichnet.

Zum sicheren Umgang mit Gefahrstoffen

Die in diesem Buch vorgestellten Experimente richten sich an naturwissenschaftliche Fachlehrkräfte! In einigen Experimenten werden potentiell gesundheitsgefährdende Chemikalien verwendet oder können im Rahmen dieser Experimente entstehen. Aus diesem Grund müssen die Experimente unter Beachtung der Gefahrstoffverordnung und unter der vorherigen Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung unter der Aufsicht eines Fachlehrers durchgeführt werden. Zu vielen dieser Experimente gibt es bereits käuflich erhältliche Versuchssets für den schulischen Einsatz, die neben den Sicherheitsdatenblättern oft auch Vorlagen für die Gefährdungsbeurteilungen enthalten. Deren Verwendung möchten wir ausdrücklich empfehlen. Die Herausgeber und Autoren übernehmen keinerlei Haftung für die unsachgemäße Durchführung der Experimente oder den unsachgemäßen Umgang mit den verwendeten oder entstehenden Chemikalien.

1. Kapitel: WERKZEUGE IM NANOKOSMOS

Autoren

Kapiteleinleitung
PD Dr. Marc-Denis Weitze – Technische Universität München, München

Versuchsanleitungen
MSc. Jan Attig – Universität zu Köln, Köln
StR Tobias Busche – Montessori-Gymnasium, Köln
StD Michael Funke – Gymnasium Zum Altenforst, Troisdorf

Werkzeuge im Nanokosmos

von PD Dr. Marc-Denis Weitze

Es ist nicht einfach, mit Strukturen zu arbeiten, die um das 10.000-fache kleiner sind als der Durchmesser eines menschlichen Haares. Genau dies ist aber das Arbeitsgebiet der Nanowissenschaftler, deren typische Maßeinheit der Nanometer ist: ein Millionstel Millimeter.

Viel Spielraum nach unten

Im Jahr 1959 hat der Physiker Richard Feynman (der 1965 für seine Arbeiten zur Quantenelektrodynamik den Nobelpreis erhielt) auf der Jahresversammlung der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft am California Institute of Technology (Caltech) den visionären Vortrag „There's Plenty of Room at the Bottom" gehalten. Feynman zeigte, wie man auf der Basis bekannter Naturgesetze technische Entwicklungen im Nano-Bereich einschätzen kann.

„Ich scheue mich nicht, in letzter Konsequenz über die Frage nachzudenken, ob wir in ferner Zukunft die Atome so anordnen können, wie wir wollen. Die bloßen Atome, bis ins kleinste! Was würde geschehen, wenn wir die Atome einzeln so anordnen könnten, wie wir sie haben möchten (natürlich in gewissen Grenzen, man kann sie z.B. nicht so platzieren, dass sie chemisch instabil sind)?

Was könnten wir überhaupt mit Schichtstrukturen anfangen, die genau die richtigen Schichten aufweisen? Welche Eigenschaften würden Materialien haben, wenn wir die Atome wirklich nach unseren Vorstellungen anordnen könnten? Es wäre sehr interessant, das einmal theoretisch zu untersuchen. Ich kann mir nicht genau vorstellen, was geschehen würde. Aber ich habe keine Zweifel: Bei einer gewissen Kontrolle über die Anordnung sehr kleiner Dinge bekommen wir zweifelsohne eine weitaus größere Palette möglicher Eigenschaften der Stoffe, und damit auch viel mehr Möglichkeiten, was wir tun können.

Denken Sie etwa an ein Stück Material, in dem wir kleine Spulen und Kondensatoren (oder deren Entsprechungen) von 1.000 oder 10.000 Angström (100 oder 1.000 nm) in einem Schaltkreis herstellen können, die alle auf einer großen Fläche nebeneinander angeordnet sind, wobei kleine Antennen aus dem anderen Ende herausragen – eine ganze Reihe von Schaltkreisen also. Ist es z.B. möglich, aus einer ganzen Reihe von Antennen Licht abzustrahlen, wie wir Radiowellen von einer Antennenanlage ausstrahlen, um die Radioprogramme nach Europa zu senden? Das gleiche wäre es, Licht in einer bestimmten Richtung mit sehr hoher Intensität abzustrahlen. (Es könnte allerdings sein, dass ein solcher Strahl technisch oder wirtschaftlich nicht sehr nützlich ist.)

Wenn wir schließlich in der sehr, sehr kleinen Welt ankommen – sagen wir, bei Schaltkreisen aus sieben Atomen – passiert dort einiges, was uns völlig neue Konstruktionsmöglichkeiten bietet. Atome verhalten sich im Kleinen wie sonst nichts im Großen, weil sie den Gesetzen der Quantenmechanik unterliegen. Während wir also den Maßstab verkleinern und mit den Atomen herum fummeln, haben wir es mit gänzlich anderen Gesetzen zu tun. Man kann davon ausgehen, dass wir dann andere Dinge tun werden. Wir können verschiedene andere Fertigungsmöglichkeiten anwenden. Wir können nicht nur Schaltkreise benutzen, sondern ein System mit quantisierten Energieniveaus oder den Wechselwirkungen quantisierter Spins.

Wenn wir nur genügend verkleinern, werden wir ferner feststellen, dass wir alle unsere Vorrichtungen derart in Massenproduktion herstellen können, dass sie absolut perfekte Kopien voneinander sind. Zwei große Maschinen können wir nicht so bauen, dass die Abmessungen ganz genau die gleichen sind. Wenn aber eine Maschine nur 100 Atome hoch ist, muss man sie nur bis zu einem halben Prozent genau bauen, um sicherzustellen, dass die andere Maschine exakt gleich groß ist, nämlich 100 Atome hoch!

Es ist aber interessant, dass es im Prinzip für einen Physiker möglich wäre (glaube ich jedenfalls), jede chemische Substanz, die ein Chemiker aufschreibt, herzustellen. Erteilen Sie die Aufträge, und der Physiker synthetisiert die Substanzen. Wie? Platzieren Sie die Atome dort, wo der Chemiker sie haben will, und stellen Sie so die Substanz her. Die Probleme der Chemie und Biologie könnten stark vereinfacht werden, wenn wir auf atomarer Ebene arbeiten und dabei auch noch zusehen können – eine Entwicklung, die meiner Meinung nach nicht aufzuhalten ist“ (Deutsches Museum München, 2002).

Mikroskope und Nanoskope: Wie Nanostrukturen fassbar werden

Mikroskope eröffnen eine Welt, die unseren Sinnen nicht unmittelbar zugänglich ist. Ohne diese Instrumente könnte es die Mikro- und Nanotechnik nicht geben. Innerhalb der Vielzahl der Mikroskope unterscheidet man Durchstrahlungsmikroskope (oder Transmissionsmikroskope), die mit Licht- oder Elektronenstrahlen arbeiten, von Rastersondenmikroskopen, die die Untersuchungsfläche Punkt für Punkt ansteuern und dabei gebündelte Strahlen oder feinste Nadeln als Sonden verwenden.

Mit einem Lichtmikroskop kann man bestenfalls eine Ansammlung von einigen Millionen Atomen auflösen, aber unter dem Elektronenmikroskop sind bereits größere Moleküle zu erkennen. Das Rastertunnelmikroskop schafft einen weiteren Schritt hin zu kleineren Dimensionen: Es macht einzelne Atome metallischer Oberflächen sichtbar. Das Rasterkraftmikroskop ermöglicht es schließlich, winzige Objekte im Lebendzustand zu beobachten, also auch biologische Moleküle in ihrer natürlichen Umgebung atomar aufzulösen. Rastermikroskope brauchen, anders als optische Mikroskope, keine Linsen. Vielmehr rastert eine sehr scharfe Spitze die Oberfläche ab; die Spitze muss so scharf sein, dass damit einzelne Atome angesteuert werden können. Diese Rastermikroskope sind zur Erforschung von Strukturen im Nanometer-Bereich mittlerweile unverzichtbar. Sie können die Welt der Atome und Moleküle untersuchen und auch manipulieren: Oberflächen und daran adsorbierte Moleküle lassen sich beobachten, sogar Bewegungsvorgänge und chemische Reaktionen.

Das Rastertunnelmikroskop

Das Rastertunnelmikroskop wurde vor rund 40 Jahren von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer (beide vom IBM Forschungslabor Zürich in Rüschlikon) entwickelt. Der Abstand zwischen Spitze und Probenoberfläche ist beim Rastertunnelmikroskop so gering (etwa 1 Nanometer), dass beim Anlegen einer geringen Spannung ein elektrischer Tunnelstrom fließt, der auf einem quantenmechanischen Effekt beruht. Dieser ist desto größer, je näher die Spitze der Oberfläche kommt. So lässt sich die „Hügellandschaft“ durch Messung des Tunnelstroms erfassen, und aus den gerasterten Linien entsteht schließlich ein topographisches Bild. Es ist dabei entscheidend, dass das Instrument vor Erschütterungen geschützt ist, damit die piezoelektrischen Stellelemente die Rasterspitze präzise führen (die Stellelemente bestehen aus keramischem Material und können sich beim Anlegen einer elektrischen

Spannung ausdehnen oder zusammenziehen). Für die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops, mit dem für die Grundlagenforschung und die Oberflächenanalytik völlig neue Möglichkeiten eröffnet wurden, erhielten Binnig und Rohrer 1986 den Nobelpreis für Physik.

Das Rasterkraftmikroskop

Im selben Jahr 1986 stellte Gerd Binnig mit seinen Kollegen Christoph Gerber und Calvin F. Quate das konzeptionell ähnliche Rasterkraftmikroskop vor. Hier wird kein Tunnelstrom gemessen, sondern die Kraft die auftritt, wenn die Spitze über „Berge“ und „Täler“ der Probenoberfläche geführt wird. Das Konzept des Rasterkraftmikroskops ist mithin überraschend anschaulich (Abbildung 1). Die feine Spitze erinnert an die Nadel eines sehr empfindlichen Plattenspielers. Sie hängt an einer etwa 0,2 Millimeter langen, elastischen Blattfeder (dem „Arm“ des Plattenspielers), die sich verbiegt, wenn die Spitze die atomare Topografie einer Probe entlang fährt. Nanostrukturen werden regelrecht erfühlt. So können auch elektrisch nicht leitende Proben, beispielsweise biologische Zellen und Molekülkomplexe, untersucht werden. Wie beim Rastertunnelmikroskop werden mit Computerhilfe die Messdaten schließlich in Bilder umgesetzt.

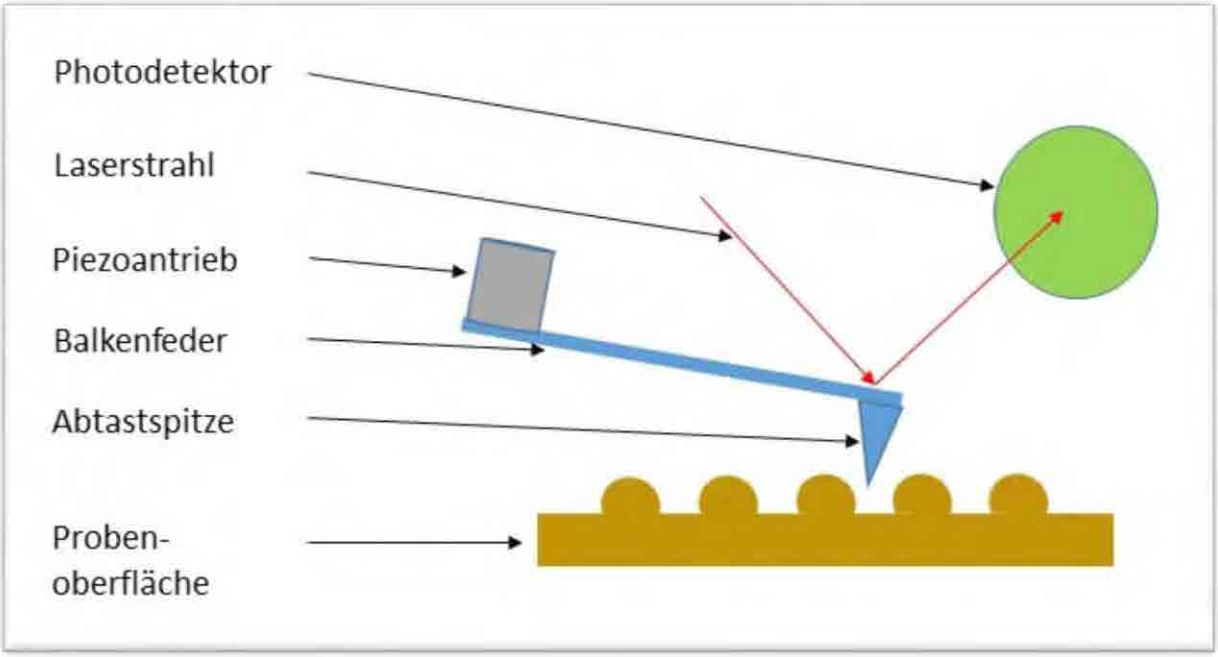


Abbildung 1 Schematischer Aufbau eines Rasterkraftmikroskops

Rasterkraftmikroskope werden in der Industrie beispielsweise zur Qualitätskontrolle von Oberflächen eingesetzt. In der Forschung versucht man, dynamische Vorgänge wie chemische Reaktionen oder die Tätigkeit von Enzymen immer genauer „sichtbar“ zu machen. Dabei wird der Bereich der Nanometer längst unterschritten: Rastertunnelmikroskope können heute bis zu 0,01 Nanometer vertikal auflösen.

Optische Pinzette

Ein weiteres Kraftmessgerät für Moleküle ist die Optische Pinzette. Bei dieser „Pinzette“ hält man die Objekte ohne mechanischen Kontakt fest und macht sich die Tatsache zu Nutze, dass auch Lichtstrahlen Kräfte ausüben: Licht lässt sich nicht nur als Welle, sondern auch als Strom von Teilchen mit einem Impuls beschreiben. Zur Erzeugung einer nennenswerten Kraft ist freilich ein gut gebündelter Laserstrahl erforderlich. Dieser kann dann beispielsweise ein Polystyrol-Kügelchen von einem

Mikrometer Durchmesser festhalten. So lassen sich Molekülfäden, die an das Kügelchen gebunden sind, wie mit einer winzigen Pinzette festhalten oder auf andere Weise manipulieren. Das Verfahren ist denkbar sanft und auch für die Manipulation empfindlicher Zellen geeignet, die von der Spitze eines Rasterkraftmikroskops Schaden nehmen könnten. Mit dieser Methode kann man sogar im Innern einer biologischen Zelle arbeiten, ohne diese zu öffnen: Die Lichtstrahlen durchdringen die Zellmembran, ohne dass diese mechanisch belastet wird.

Experimente mit dem Rasterkraftmikroskop

Enzyme bei der Arbeit

Mit dem Rasterkraftmikroskop kann man sehr gut biologische Systeme untersuchen, z.B. die Wirkungsweise von Schlangengift. Ein Bestandteil des Gifts ist ein Enzym, das Zellmembranen abbaut. Mit dem Rasterkraftmikroskop kann man Bilder aufnehmen, in denen sich die Wirkungsweise dieser tödlichen Moleküle exakt verfolgen lässt. Die Moleküle suchen sich zunächst Defekte in der Membran als Angriffspunkte. Hier lagern sie sich an und fressen sich regelrecht in die Membran hinein. Durch jedes Gift-Molekül entsteht ein kleiner Graben in der Membran. Diese Gräben haben eine Breite von etwa 10 nm, und jeder einzelne davon lässt sich sichtbar machen. Mit dem Rasterkraftmikroskop sieht man in dieser Auflösung zwar nicht die einzelnen Enzyme – diese bewegen sich ja während der Bildentstehung – aber man sieht, was jedes einzelne Enzym anrichtet.

Die Wissenschaftler können auf diese Weise die Wirkungsmechanismen von Enzymen besser verstehen. Und man kann versuchen, solche Moleküle als Pharmazeutika nutzbar zu machen. Das Enzym beispielsweise, dem man bei der Arbeit zugeschaut hat, findet sich nicht nur im Schlangengift, sondern dient im Magensaft auch zur Verdauung.

Das Rasterkraftmikroskop als Kraftspektroskop

Das Rasterkraftmikroskop lässt sich zu einem so genannten Kraftspektroskop umfunktionieren: Wird ein Molekül zwischen Spitze und Unterlage angebracht, kann man daran ziehen und messen, welche Zugkräfte chemische Bindungen aushalten, bevor das Molekül zerreißt. Die dazu erforderlichen Kräfte sind freilich winzig.

Rezeptor-Ligand-Systeme passen wie Schlüssel und Schloss zusammen und spielen in vielen Bereichen der Biologie eine wichtige Rolle. Darauf basieren z.B. die Erkennung von Zellen untereinander, die Signalübertragung und auch die Katalyse. Die Erkennung zwischen Antikörper und Antigen im Immunsystem ist ein weiteres Beispiel. Mit dem Rasterkraftmikroskop lassen sich einzelne dieser Molekülpaare auseinander ziehen und damit direkt die Kräfte messen, die die Bindungen zwischen bestimmten Rezeptoren und Liganden zusammen halten.

Mit dem Rasterkraftmikroskop ist es vor rund 20 Jahren erstmals gelungen, die Bindungskräfte einzelner Moleküle zu messen, (Florin et al, 1994) und zwar die Bindungskraft zwischen Biotin und Streptavidin. Biotinmoleküle wurden chemisch an die Spitze eines Rasterkraftmikroskops gebunden und eine Oberfläche mit Streptavidin-Molekülen belegt. Dann wurde die Spitze mit der Oberfläche in Kontakt gebracht, so dass sich einige Streptavidin-Biotin-Paare bildeten. Beim Zurückziehen der Nadel wurden die Abreißkräfte anhand der Feder-Verbiegung gemessen. Tatsächlich ergaben sich in der Folge sehr viele solcher Versuche immer wieder typische Kräfte von etwa 160 Piconewton (und Vielfachen davon) – das ist die Kraft, die ein einzelnes Molekülpaar zusammen hält.

Moleküle auf der Streckbank

Bringt man ein einzelnes Molekül zwischen Spitze und Unterlage eines Rasterkraftmikroskop und dehnt es, lassen sich die Kräfte messen, die man benötigt, um es zu dehnen, oder auch, um ein „Molekülknäuel“ zu entwirren. Die Mechanik einzelner Moleküle verrät einiges über deren Aufbau, und das Entknäueln spielt bei Proteinen auch in der Natur eine große Rolle.

So wie es mit einem Gummiband geschieht, an dem man zu stark zieht, ergeht es auch Molekülen im Rasterkraftmikroskop: Die schwächste Bindung in der Kette zwischen Spitze und Unterlage reißt zuerst. Heute kann man die Kraft messen, die man benötigt, einzelne chemische Bindungen auf diese Weise auseinander zu reißen. Bindungen zwischen Silizium und Kohlenstoffatomen reißen bei 2 Nanonewton, Bindungen zwischen Schwefel und Gold bereits bei 1,4 Nanonewton (Grandbois et al., 1999; Clausen-Schaumann, 2000).

Diese Darstellung basiert auf Weitze (2003).

Literatur zur Kapiteleinleitung:

Die englische Originalversion wurde in der Zeitschrift „Engineering and Science“ (Februar 1960, S. 20 ff.) des Caltech erstmals abgedruckt. Die vollständige deutsche Übersetzung ist abgedruckt in: Von Quanten und Zwergen – Struktur und Technik des Kleinsten (Deutsches Museum München, Hrsg.), München 2002, S. 72-91.

Weitze, M.-D. (2003): Das Rasterkraftmikroskop. Deutsches Museum.

Florin, E.-L. / Moy, V.T. & Gaub (1994): H.E. Adhesion forces between individual ligand-receptor pairs. Science 264, S. 415-417.

Grandbois, M. / Beyer, M. / Rief, M. / Clausen-Schaumann, H. / Gaub, H.E. (1999): How strong is a covalent bond? Science, 283,S. 1727–1730.

Krautbauer, R. / Clausen-Schaumann H./ Gaub, H. E. (2000): Cisplatin changes the mechanics of single DNA molecules. Angew. Chem. Int. Ed.,S. 39, 3912–3915.

Clausen-Schaumann, Hauke (2000): Adressierung und Strukturierung von Biomolekülen auf der Nanometer-Skala. Dissertation, LMU München: Fakultät für Physik.

Versuch 01: Black Box –Modellexperiment (1 von 1)

Unterrichtliche Voraussetzungen

Aufbau und Funktionsweise eines Rastertunnelmikroskops.
Bau von Atomen (Dalton-Atommodell, Kugelteilchen-Atommodell)

Geeignet ab Klassenstufe

Je nach didaktischer Reduktion bereits schon ab der gymnasialen Mittelstufe möglich.

Ziele

Verdeutlichung der Arbeitsweise eines Rastertunnelmikroskops.

Material, Geräte

- Schuhkarton
- Magnetklebestreifen
- Stabmagnet oder Eisenstab

Vorbereitung

In die Innenseite des Deckels eines Schuhkartons wird ein Magnetstreifen eingeklebt. Die Magnetklebestreifen können z.B. in Form eines Wortes (z.B. „Nano“) eingeklebt werden. Der Schuhkarton wird nun so verschlossen, dass man von außen nichts sieht.

Durchführung

Eine Schülerin bzw. Schüler fährt nun mit einem Eisenstab die Oberfläche des äußeren Schuhkartondeckels ab. Dabei wird der Eisenstab durch die Magnetfelder der Magnetklebestreifen auf der Deckelinnenseite angezogen, so dass man von außen den Schriftzug „ertasten“ kann. Durch Abtasten mit dem Stabmagneten sollen die Schülerinnen bzw. die Schüler nun versuchen, den Schriftzug auf der Deckelinnenseite zu „lesen“.

Erklärung

Dieses einfache Modellexperiment soll verdeutlichen, das ein Rastertunnelmikroskop Nanoteilchen nicht optisch sichtbar machen kann, aber man dennoch eine deutliche Vorstellung erhält.

Zusätzliche Informationen

Im Internet ist ergänzend zu diesem Modellexperiment auch ein Online-AFM-Simulator zugänglich: http://www.cs.unc.edu/~nanowork/cismm/download/microscopesimulator/index.html, abgerufen am 30.10.2016.

Versuch 02: Rasterkraftmikroskop-Bastel-Modell (1von 4)

Zeitbedarf

mehrere Zeitstunden

Unterrichtliche Voraussetzungen

Bohr´sches Atommodell

Ziele

Mit dem Modell soll die Funktionsweise eines Rasterkraftmikroskops verdeutlicht werden

Material

- durchsichtiges Klebeband (1 bis 2 Rollen) Glasobjektträger eines optischen Mikroskops (2 Stück) Laserpointer (stabförmig)
- Verschiedenfarbiges Papier (10 Bögen)
- Flipchart-Papier / Pappe, DIN A1
- Kartonschachteln, davon ein großer Pappkarton (1 m x 0,5 m)
- Pappe oder Karton (einige Bögen)
- 6 Stück leere Plastikflaschen (1 L)
- 2 Stück Flaschendeckel
- Heißklebepistole, Heißkleber, Schere, Klebestift

Durchführung

Vorbemerkung

Alle nachfolgenden Schritte lassen sich entweder schnell mit einfachen Pappe-Resten oder gekaufter Bastel-Pappe durchführen. Man kann zu Illustrationszwecken verschiedene Bauteile des Rasterkraftmikroskop-Modells farbig gestalten, z.B. durch Bekleben mit verschiedenfarbigem Papier. Dies hilft nicht nur zur visuellen Unterscheidbarkeit der einzelnen Komponenten, sondern lässt das Ergebnis auch professioneller aussehen.

Außerdem ist es wichtig zu erwähnen, dass alle benutzten Größen rein zufällig auf Grund der gesammelten Kartons zustande gekommen sind und nur Richtwerte darstellen, es können sich beim Nachbau jederzeit Abweichungen ergeben.

Vorbereitung: Untergrund, Halterung und Probe

Für die Probe und die Halterung des Rasterkraftmikroskop-Modells wird der große Pappkarton mit dem Boden nach oben benutzt. Auf der jetzt oben liegenden Unterseite der Box wird eine dreieckige Führungsschiene aus Papier angebracht. Diese verläuft parallel zur langen Seite der Box, ist etwa 2,5 bis 3 cm vom Rand entfernt, sowie 9 cm breit und 10 cm hoch.

Versuch 02: Rasterkraftmikroskop-Bastel-Modell (2 von 4)

Jetzt müssen auf beiden Seiten der Führungsschiene ca. 3 cm an Freiraum markiert und eingehalten werden. Dort steht später der Pappkarton, der den Rasterkraftmikroskop-Controller simuliert. Für die Probe werden die Plastikflaschen auf die restliche Breite des Kartons gekürzt und senkrecht zur Führungsschiene liegend mit Klebeband auf der Box befestigt. Der Abstand darf unregelmäßig sein, ihr Profil ergibt später das Höhenprofil der Probe. Wichtig ist hier jedoch die Lücke zur Führungsschiene! Nachdem die Plastikflaschen befestigt sind, werden sie gleichmäßig mit Papier überdeckt. Das Papier soll dabei ein wenig in die Zwischenräume hereinreichen, jedoch keine spitzen Ecken bilden, da dort später die Spitze des Cantilevers stecken bleiben könnte. Die so entstehende Papierbahn kann an den Übergängen zwischen den Bögen mit Klebeband eben gemacht werden, sodass die Spitze besser über die Probe gleiten kann.

Hebelarm und Spitzen

Das Herzstück des Rasterkraftmikroskop-Modells ist der Hebelarm mit der angebrachten Spitze. Der Hebelarm selbst sollte ungefähr 4cm x 30cm messen und aus stabiler Pappe bestehen, sodass er selbst nur wenig elastisch ist. Auf der Oberfläche werden ein oder zwei gläserne Mikroskop-Objektträger angebracht (z.B. mit Klebeband), die später eine reflektierende Oberfläche für den Laserpointer bilden. Die Rasterkraftmikroskop-Spitze wird nach den Bastelvorlagen gebaut und oben mit einem Band aus Papier verbunden, was sich eng um den Hebelarm legt. Dies soll zum einen eine austauschbare Spitze garantieren, die zum anderen aber auch noch stabil ist. Beispiele für die Spitzen finden sich in den Bastelvorlagen, ansonsten sind aber auch hier kreative Ideen möglich. Zur Befestigung der Spitzen am Hebelarm finden sich Fotos im Anhang (Abbildung 2 und Abbildung 3).

Controller Karton

Für den Controller wird ein kleinerer Karton hochkant benutzt, der ungefähr 21 cm x 8 cm x 14 cm misst. Von diesem Karton wird zunächst der Boden entfernt und dann der Einschnitt für die Führungsschiene geschnitten, sodass der Karton genau auf die Schiene passt. Dann wird für den späteren Hebelarm ein Einschnitt so angefertigt, dass der Arm gleichmäßig über die Probe fahren kann. Es ist ein Vorschlag in der Bastelvorlage angefertigt. Der Einschnitt sollte genau die Breite des Hebelarms haben, d.h. ca. 4 cm. Weiterhin muss der Laserpointer befestigt werden. Je nach Laserpointer-Modell muss man hier unterschiedlich vorgehen. Im vorliegenden Fall wurde ein langer, stiftförmiger Laserpointer verwendet, der durch zwei Löcher im Controller-Karton (eins auf der Oberseite, eins auf der probenzugewandten Seite) in seiner Position gehalten wurde. Der Laserpointer soll so montiert sein, dass er sowohl an der tiefsten, als auch an der höchsten Stelle auf der Probe die reflektierende Schicht des Hebelarms anleuchtet. Gegebenenfalls muss hier ein wenig getüftelt werden, es liegen jedoch auch hier Vorschläge in den Bastelvorlagen vor.

Zusammenbau

Hat man alle einzelnen Komponenten fertig gestellt, kann das Modell zusammengesetzt werden. Dafür werden zuerst die Cantilever-Spitze und der Hebelarm verbunden. Danach wird der gesamte Arm in den dafür vorgesehenen Schlitz am Controller-Karton gesteckt, wo er alleine durch die Reibung der Pappen gegeneinander fest aber beweglich halten sollte. Zum Schluss wird noch der Laserpointer am Controller-Karton justiert. Anschließend wird der fertige Controller-Karton auf die Schiene gesetzt, sodass er sich frei über diese bewegen kann, während die Spitze dabei über die Probe gleitet.

Versuch 02: Rasterkraftmikroskop-Bastel-Modell (3 von 4)

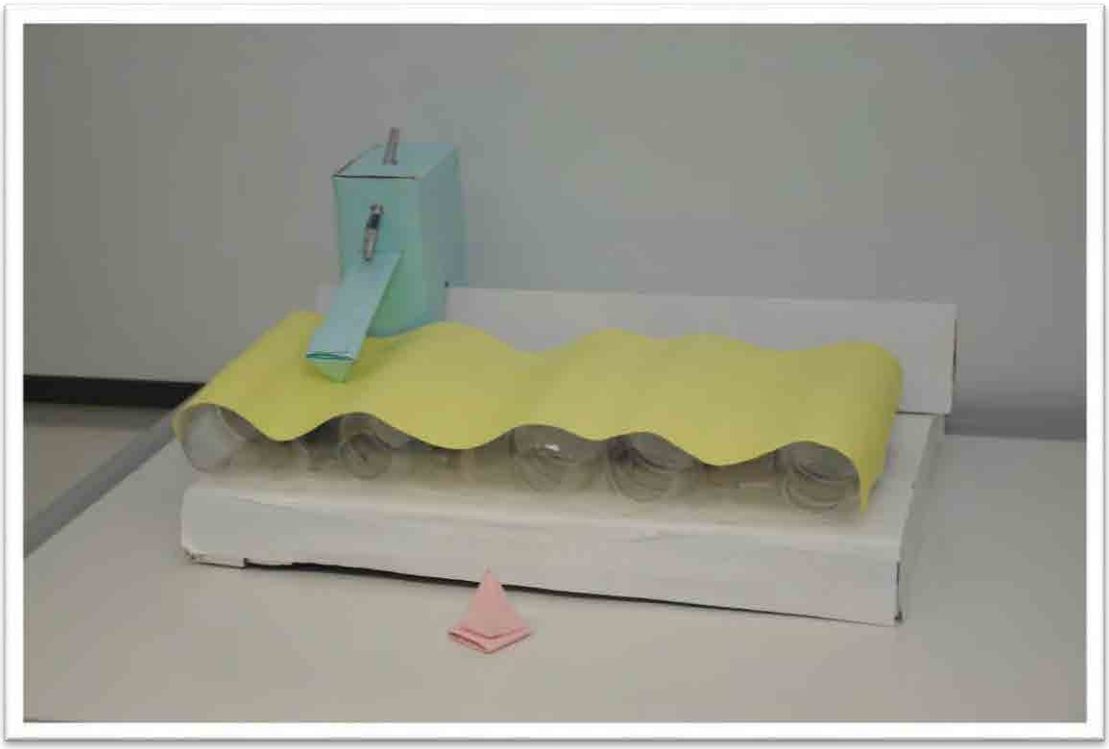


Abbildung 2 Rasterkraftmikroskop-Modell in der Frontansicht

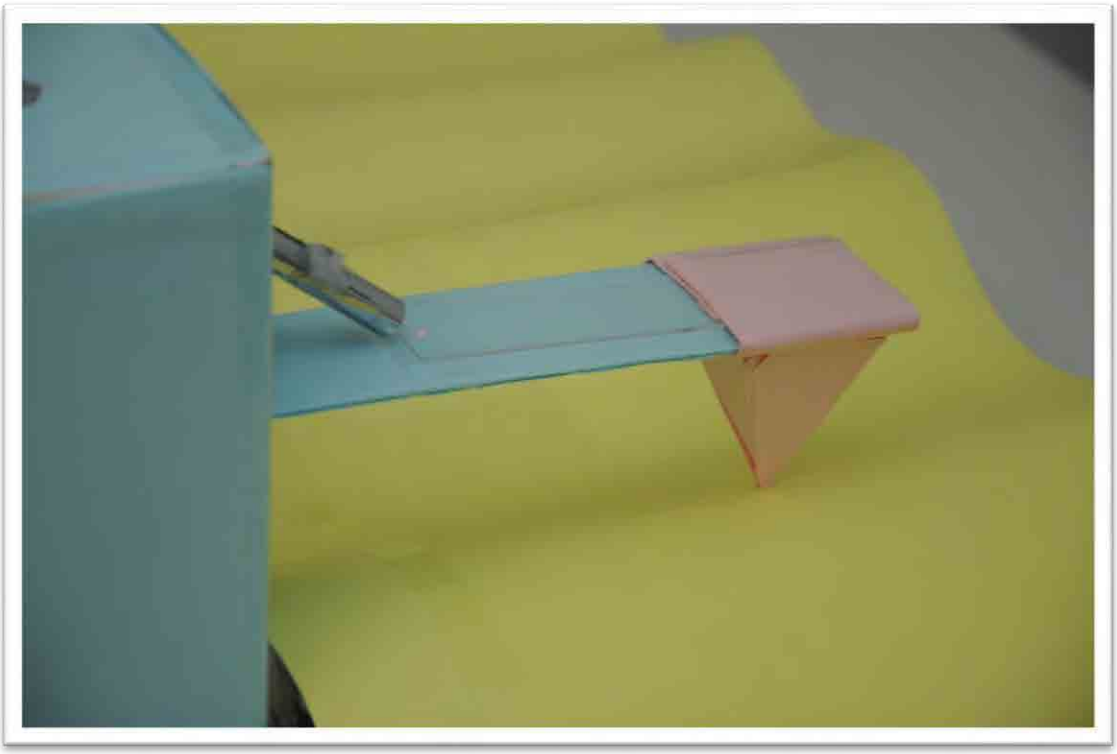


Abbildung 3 Rasterkraftmikroskop-Modell in der Seitenansicht

Versuch 02: Rasterkraftmikroskop-Bastel-Modell (4 von 4)

Tipp

Bei den vorliegenden Maßen ist es möglich mithilfe zweier Flaschendeckel, die im Inneren des Controller-Karton angebracht werden, die unerwünschten Schlenker des Hebelarms zu reduzieren und seine Bewegung auf eine reine Auf- und Ab-Bewegung zu bringen.

Inbetriebnahme

Nachdem das Modell gemäß der Bauanleitung aufgebaut wurde, wird der Laserpointer eingeschaltet. Weil der Laserpointer im Dauerbetrieb leuchten soll, muss der Einschaltknopf ggf. mit einem Klebestreifen fixiert werden. Damit man Messergebnisse aufzeichnen kann, wird eine möglichst große (ca. DIN A1), beschreibbare Fläche benötigt (in der Materialliste ist dies der große Bogen DIN A1 Papier oder Pappe) und so vor das Modell platziert, dass dort der Punkt des Laserpointers zu sehen ist, egal wo gerade der Cantilever-Arm platziert ist. Anschließend bewegt man den Karton mit dem Laserpointer, der den Controller des Rasterkraftmikroskops darstellt, entlang der Schiene. Dabei wird regelmäßig auf der beschreibbaren Fläche die Position des Laserpunktes markiert und später zu einem Graphen des Höhenprofils verbunden.

Die Papierspitze im Modell entspricht bei dem Rasterkraftmikroskop der Messspitze, der Hebelarm, an dem die Papierspitze befestigt ist, in Wirklichkeit dem Cantilever. Die beschreibbare Fläche, auf der die Messpunkte markiert werden, entspricht dem Photodetektor.

Die Oberfläche der Probe wird hier durch die Flaschen und das aufliegende Papier dargestellt, über das die Spitze geschoben wird. Um Messergebnisse mit unterschiedlich breiten Spitzen zu simulieren, kann man anstelle von der pyramidenförmigen Spitze die würfelförmige Spitze verwenden. In der Realität entspricht diese Änderung der dauernden Abnutzung von Rasterkraftmikroskop-Spitzen durch den Abrieb auf der Oberfläche.

Diese Anleitung wurde von Anne Strobelt & Jan Attig mit Unterstützung von den Schülerinnen und Schülern Melissa Reuter, Nils Pelster, Sabrina Wilkening, Tabea Marx, Anna Kaiser erstellt.

Versuch 03: Das DVD-Spektroskop (1 von 6)

Themengebiet

Optik

Zeitbedarf

Bau des Spektroskops: 30 min; Experimente: variabel 10 bis 30 min

Unterrichtliche Voraussetzungen

Bohr'sches Atommodel.

Energie und Wellenlänge als Eigenschaften von Licht (Interferenz, Beugung am Doppelspalt)

Geeignet ab Klassenstufe

Der Bau des Spektroskops und die Interpretation von Spektren sind bereits in der Mittelstufe möglich.

Die genaue Erklärung der Funktionsweise des DVD-Spektroskops (Beugung am Gitter) ist allerdings erst in der Oberstufe möglich.

5 Minuten Nanotechnologie

Spektroskopie bezeichnet allgemein die Aufspaltung von Energiespektren nach ihren Frequenzen bzw. Wellenlängen. Hierzu werden Spektroskope zur Betrachtung von Spektren und Spektrographen zu deren Aufzeichnung eingesetzt.

Spektroskopie kann in allen Wellenlängenbereichen elektromagnetischer Strahlung betrieben werden und ist in vielen Bereichen der Naturwissenschaft ein wichtiges Analyseinstrument. So können spektroskopische Untersuchungen zur Aufklärung atomarer oder molekularen Strukturen (→*Spektren verschiedener Lampen*) dienen oder bei der Analyse der Zusammensetzung von Sternen helfen (→*Fraunhoferlinien*).

In der optischen Spektroskopie werden neben Prismen hauptsächlich optische Gitter zur Aufspaltung des sichtbaren Lichts genutzt. Ein solches optisches Gitter kann entweder aus einer periodischen Abfolge von Schlitzen in einer Blende (Transmissionsgitter) oder aus einer Abfolge reflektierender und nicht reflektierender Flächen (Reflexionsgitter) bestehen. Der Abstand zwischen den jeweiligen lichtdurchlässigen bzw. lichtreflektierenden Flächen wird als Gitterkonstante g bezeichnet und beträgt normalerweise wenige Mikrometer.

Aufgrund der Wellennatur des Lichts ergeben sich bei Reflexion oder Transmission eines Lichtstrahls an einem Gitter Interferenzerscheinungen. Dabei werden je nach Betrachtungswinkel bestimmte Wellenlängen durch konstruktive Interferenz verstärkt und somit für den Betrachter getrennt abgebildet (→*Funktionsweise des DVD-Spektroskops*).

Beim DVD-Spektroskop handelt es sich um ein optisches Spektroskop, dessen Funktionsweise auf der Beugung an einem (Reflexions-) Gitter beruht.

Versuch 03: Das DVD-Spektroskop (2 von 6)

Ziele

Bau eines DVD-Spektroskops

Untersuchung und Interpretation diverser Spektren

Klärung der Funktionsweise des Spektroskops (Oberstufe)

Material

- Spektroskop
- DVD-Spektroskop-Schablone (Abbildung 7)
- Schere
- Kleber
- schwarzer DIN A4 Fotokarton
- DVD [Es muss eine gepresste DVD (Kauf-DVD oder Beilagen-DVD aus einer Zeitschrift) verwendet werden. Gebrannte DVDs und Rohlinge funktionieren nicht!]

Versuche

Untersuchung verschiedene Lampenspektren (Glühlampe, Leuchtstoffröhre, Energiesparlampe, diverse Spektrallampen)

optional: Spektroskopische Untersuchungen von Flammenfärbungen

Durchführung Bau des Spektroskops

Mit Hilfe der DVD-Spektroskop-Schablone (Abbildung 7) werden die Umrisse des Spektroskops auf den Fotokarton übertragen und ausgeschnitten. Anschließend wird das Spektroskop gefaltet und möglichst lichtdicht verklebt. Die DVD wird mit der reflektierenden Seite in Richtung Lichteinfallsschlitz und Beobachtungsfenster gewendet, schräg durch den DVD-Schlitz in den gefalteten Karton gesteckt und gegebenenfalls mit Hilfe von Pappe und Kleber fixiert (Abbildung 4).

Handhabung des DVD-Spektroskops

Um mit dem DVD-Spektroskop eine Lichtquelle zu untersuchen, muss der Lichteinfallsschlitz direkt auf diese gerichtet sein. Das Spektrum ist dann durch das Beobachtungsfenster zu sehen. Um das Spektrum gut beobachten zu können, sollte man mit einem Auge möglichst nah an das Fenster heran gehen, so dass kein Streulicht eindringen kann.

Versuch 03: Das DVD-Spektroskop (3 von 6)

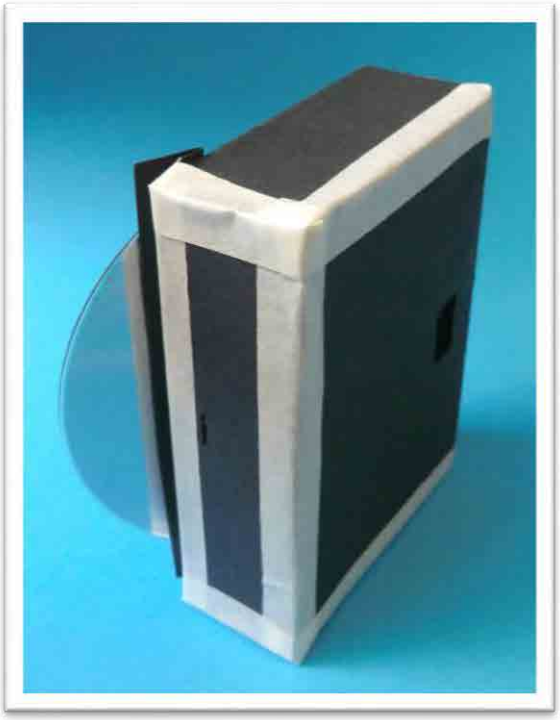


Abbildung 4 Fertig gefaltetes und verklebtes Spektroskop

Arbeit mit dem DVD-Spektroskop

Das DVD-Spektroskop eignet sich zur Untersuchung und Interpretation verschiedener Spektren. Neben den Spektren von Glühlampen, Energiesparlampen, Leuchtstoffröhren und Spektrallampen kann auch das Sonnenspektrum untersucht werden, da das Auflösungsvermögen des DVD-Spektroskops ausreicht, um die Fraunhoferlinien zu beobachten (Abbildung 5).

Auch ein Einsatz des Spektroskops bei Versuchen zur Flammenfärbung oder im Rahmen des Themas „Komplementärfarben“ ist möglich. Bei letzterem kann mit dem DVD-Spektroskop sehr gut beobachtet werden, wie durch einen Farbfilter die jeweilige Komplementärfarbe aus dem kontinuierlichen Spektrum einer Glühlampe absorbiert wird.

Erklärung Spektren verschiedener Lampen

Das Zustandekommen von Linienspektren lässt sich mit Hilfe des Bohr’schen Atommodells erklären: Durch Energiezufuhr in Form von elektrischer Energie bzw. Wärme werden Elektronen aus ihrem Grundzustand in angeregte Zustände gebracht. Bei der Rückkehr in den Grundzustand wird diese für den jeweiligen Übergang (und somit das Element) charakteristische Energie als Photon entsprechender Wellenlänge freigesetzt.

Versuch 03: Das DVD-Spektroskop (4 von 6)

Fraunhoferlinien

Auch die Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum können auf ähnliche Weise interpretiert werden. Hier werden Elektronen, der in der Sonnen- und Erdatmosphäre enthaltenen Elemente, durch Photonen bestimmter Energie und Wellenlänge angeregt. Bei der Rückkehr in den Grundzustand emittieren sie diese Energie zwar wieder als Photons entsprechender Wellenlänge, jedoch erfolgt die Abgabe des Photons isotrop (in beliebige Richtung). Aus diesem Grund erreicht den Betrachter weniger Licht der entsprechenden Wellenlänge und es wird eine dunkle Linie im Spektrum beobachtet.

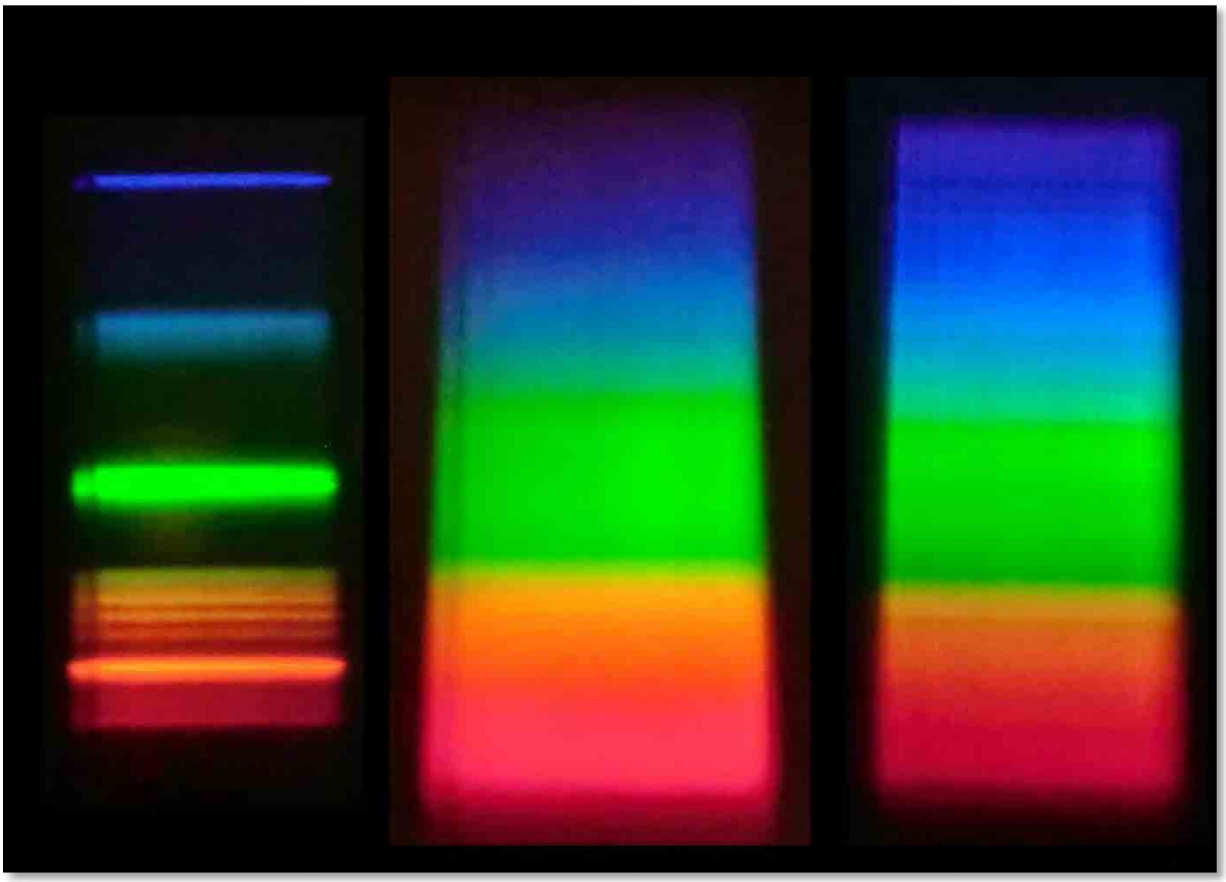


Abbildung 5 Verschiedene mit dem DVD-Spektroskop aufgenommene Spektren.
Von links: Energiesparlampe, Glühlampe, Sonnenlicht mit Frauenhoferlinien.

Funktionsweise des DVD-Spektroskops

Die Funktion des DVD-Spektroskops beruht auf dem Phänomen der Beugung an einem Gitter. Die regelmäßigen Spurrillen in der Oberfläche der DVD, deren Vertiefungen das Licht reflektieren, bilden dabei das Gitter. Eine DVD kann somit als Reflexionsgitter genutzt werden.
Zwischen den Lichtstrahlen, die von zwei benachbarten Vertiefungen reflektiert werden, ergibt sich ein Gangunterschied Δx. Stimmt dieser Gangunterschied mit der Wellenlänge des Lichts λ (oder einem ganzzahligen Vielfachen $n\lambda$) überein, ergibt sich konstruktive Interferenz. Der Reflexionswinkel α, bei dem konstruktive Interferenz auftritt, hängt neben der Wellenlänge λ nur von der Gitterkonstanten g ab (Abbildung 6).

Versuch 03: Das DVD-Spektroskop (5 von 6)

Für verschiedene Wellenlängen λ ergeben sich somit unterschiedliche Reflexionswinkel α für konstruktive Interferenz, so dass diese als getrennte Farben im entsprechenden Spektrum zu beobachten sind.

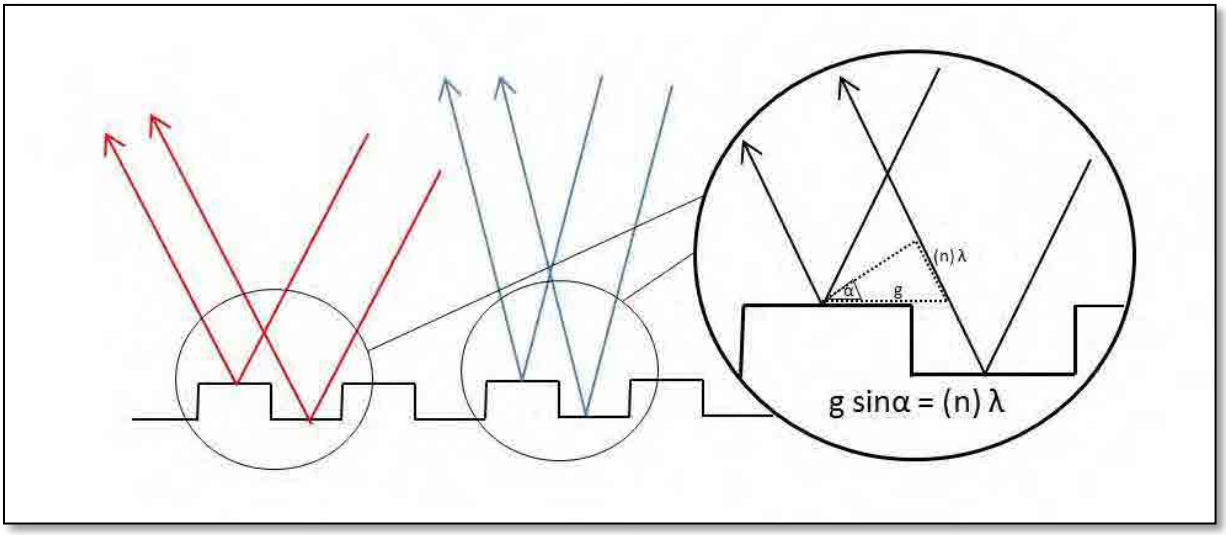


Abbildung 6 DVD als Gitter

Zusätzliche Informationen

Das DVD-Spektroskop wurde von Wakabayashi und Hamada in einem Artikel im Jahr 2006 vorgestellt und später im Rahmen einer Examensarbeit von Tobias Busche als Unterrichtsmaterial aufgearbeitet.

Literatur zum Versuch:

Busche, T. (2011): Möglichkeiten und Grenzen der Förderung von Hochbegabten in außerschulischen Lernorten am Beispiel des Themas Farben und daraus ableitbare Konsequenzen für den Regelunterricht. Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen am Institut für Chemie und ihre Didaktik der Universität zu Köln, S. 30-38.

Wakabayashi, F. / Hamada, K. (2006): A DVD Spectroscope: A Simple, High-Resolution classroom Spectroscope. Journal of Chemical Education 83, Nr.1, S. 56-58.

Versuch 03: Das DVD-Spektroskop (6 von 6)

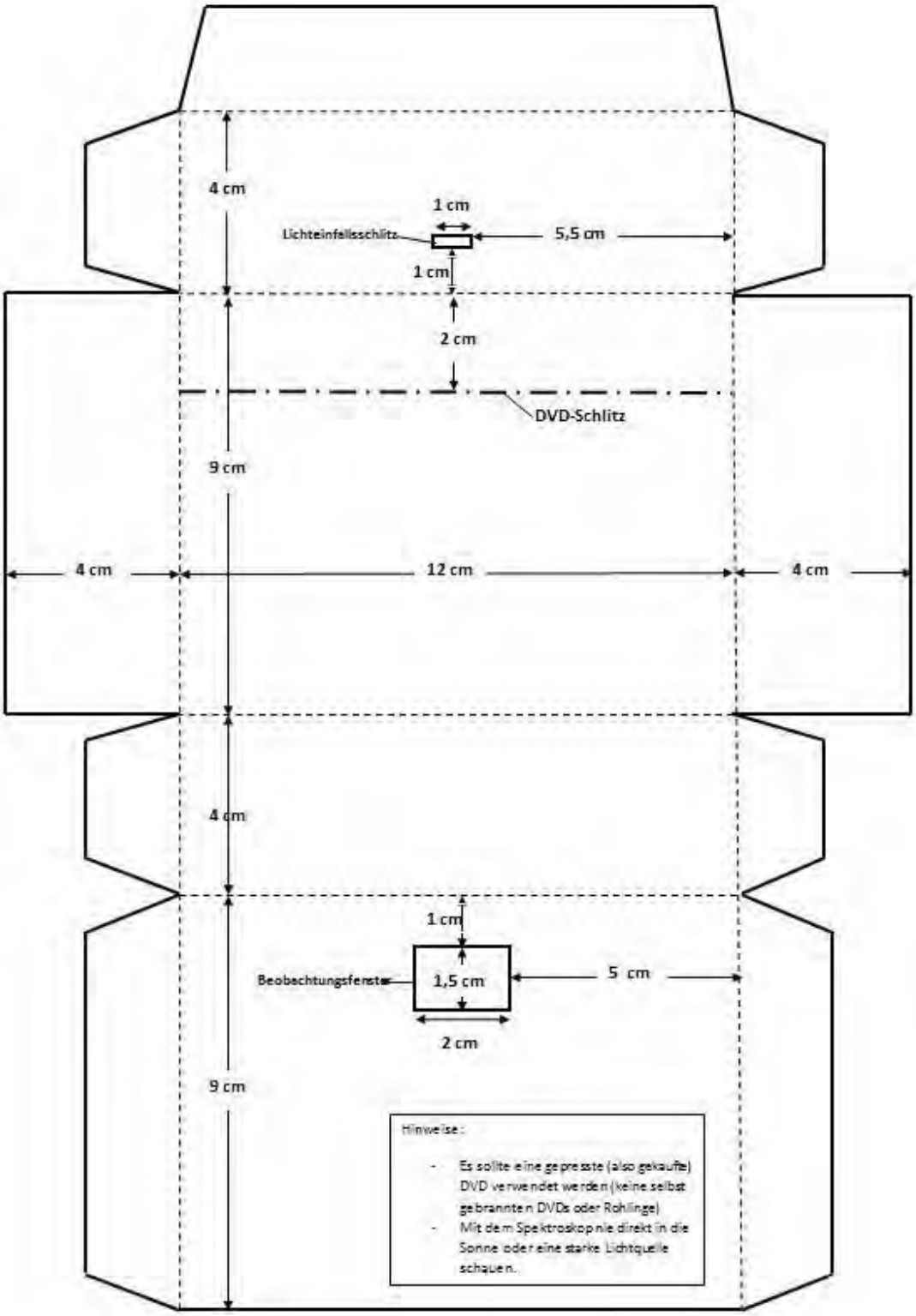


Abbildung 7 DVD-Spektroskop Schablone.

2. Kapitel: NANOTECHNOLOGIE UND PHYSIK

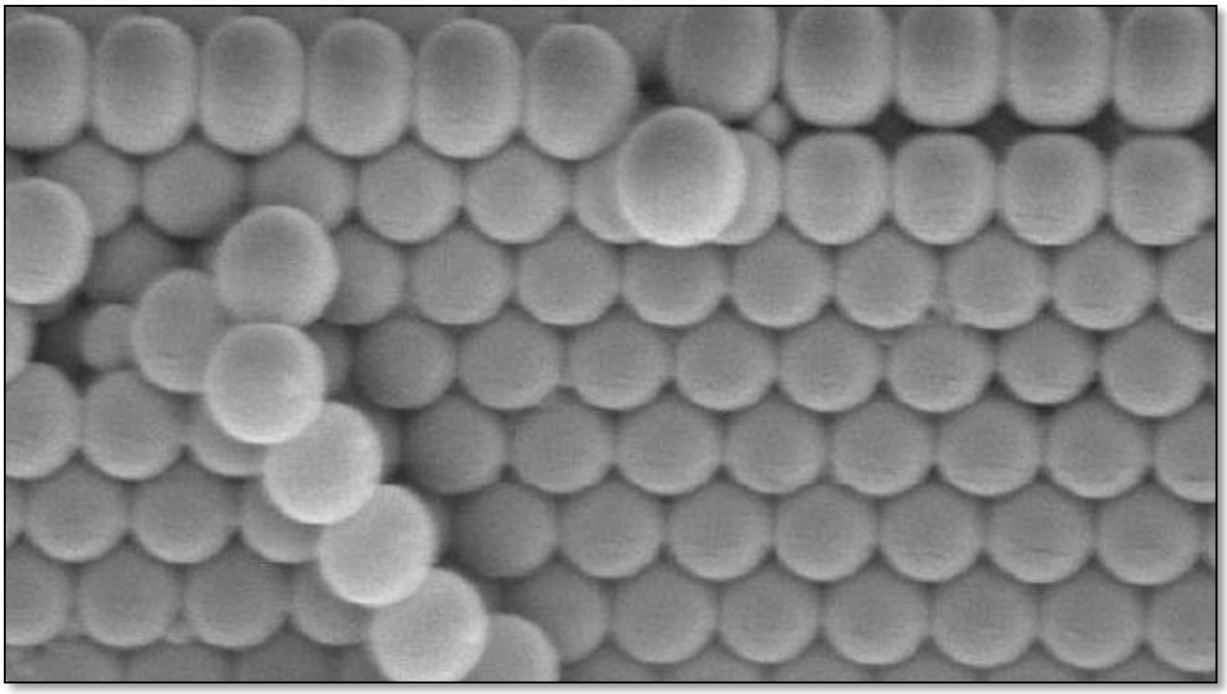
Autoren

Kapiteleinleitung

Prof. Dr. Axel Lorke – Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Experimentalphysik, Duisburg

Versuchsanleitungen

StD Michael Funke – Gymnasium Zum Altenforst, Troisdorf
Sebastian Klick, St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel
PD Dr. Stefan Thalhammer – Universität Augsburg



Nanotechnologie und Physik

von Professor Dr. Axel Lorke

Es gibt mehr als 6.000 verschiedene Lego®-Steine, aus denen sich die unterschiedlichsten Modelle zusammen bauen lassen. Die Natur ist da wesentlich effektiver: Alles, was uns an Materie umgibt und was wir mit unseren Sinnen erfassen können, besteht aus weniger als 100 Bausteinen, den chemischen Elementen. Um zu verstehen, wie die Zusammensetzung dieser Grundbausteine zu den Eigenschaften der Materialien und Dinge führt, die uns alltäglich umgeben, braucht man einen Zweig der Naturwissenschaft, der trotz seiner Alltäglichkeit und seiner immensen technologischen Bedeutung nur wenig bekannt ist: Die Festkörperphysik.

Abbildung 8 Zweimal reiner Kohlenstoff: Diamant (links) und Graphit (rechts). Warum sind sie so unterschiedlich?

Ein einfaches Beispiel soll dies verdeutlichen. Betrachten wir einmal zwei Materialien, Diamant und Graphit (das Material, aus dem z.B. Kerzenruß oder Bleistiftminen bestehen). Chemisch sind beide identisch. Sie bestehen aus reinem Kohlenstoff. Warum sind sie dann so unterschiedlich? Diamant ist eins der härtesten Materialien, die wir kennen. Er ist optisch transparent und ein sehr guter elektrischer Isolator. Graphit ist das genaue Gegenteil: weich, undurchsichtig-schwarz und elektrisch leitfähig. Warum? Oder, um die Frage noch alltäglicher zu machen, warum können wir durch ein (Glas-) Fenster hindurchsehen, durch den (Metall-) Fensterrahmen aber nicht? Es ist sehr erstaunlich, dass zur Beantwortung solch einfacher Fragen eine überhaupt nicht einfache physikalische Theorie notwendig ist, nämlich die Quantenmechanik. Daher ist die Festkörperphysik auch eine recht junge Wissenschaft, die erst entstehen konnte, nachdem die Quantenmechanik und die dazugehörigen mathematisch-physikalischen Werkzeuge voll entwickelt waren. Heute ist man in der Lage, die Eigenschaften von makroskopischen Materialien mit großer Präzision zu berechnen. Dazu erweitert man die Schalenstruktur von einzelnen Atomen zur sogenannten Bandstruktur von Festkörpern. Ein *Band* ist ein Energiebereich, der von Elektronen besetzt werden kann (analog zu den energetisch erlaubten Schalen im Atom), dazwischen gibt es Bereiche, die für Elektronen verboten sind. Und diese Bandstruktur beeinflusst entscheidend die optischen und elektrischen (aber auch viele andere) Eigenschaften von Festkörpern. Der Grund für die Aufweitung der scharfen atomaren Energieniveaus zu Bändern ist die Kopplung der Atome untereinander. Und je nachdem wie die Kopplung ist, ergeben sich unterschiedliche Bandstrukturen.

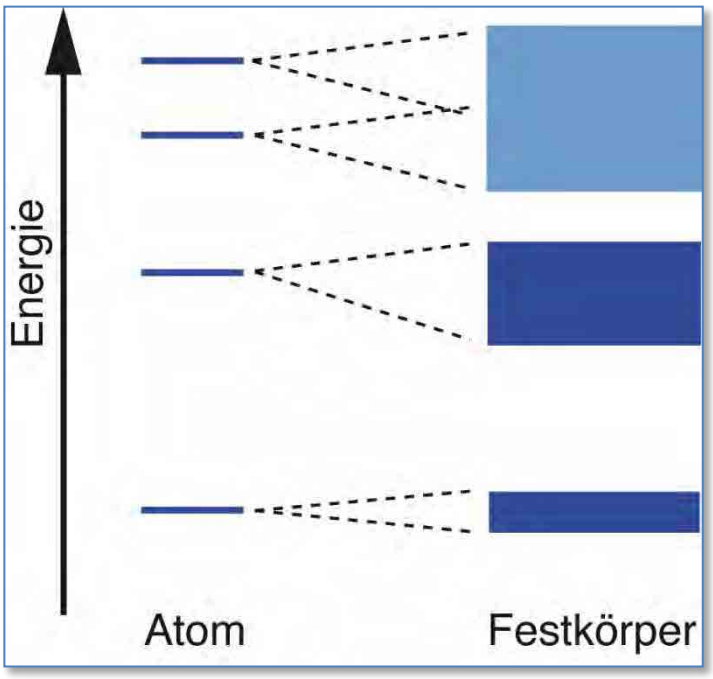


Abbildung 9 Übergang von atomaren Energieniveaus (links) zu Bändern (rechts). Die besetzten Niveaus sind dunkel dargestellt. Da alle Bänder entweder leer oder vollständig gefüllt sind, ist das Material rechts ein Isolator.

Damit lässt sich der Unterschied zwischen Graphit und Diamant erklären. Beide sind aus Kohlenstoff aufgebaut, aber die Anordnung der Atome ist in beiden Materialien unterschiedlich. Graphit besteht aus vielen parallelen Atomlagen, die jeweils ein Bienenwabenmuster bilden, in dem jedes Atom drei Nachbar-Atome hat. Innerhalb jeder Lage sind die atomaren Bindungen sehr stark, die verschiedenen Lagen sind aber nur schwach aneinander gebunden. Deshalb ist Graphit so weich und lässt sich einfach in Schichten abreiben. Im Diamant hingegen hat jedes Atom vier nächste Nachbarn, an die es in alle drei Raumrichtungen mit starken Bindungen gekoppelt ist. Das macht Diamant so hart! Aber kommen wir zurück zur Bandstruktur. Genauso wie im Atom die Schalen von unten (kleine Energie) nach oben (große Energie) aufgefüllt werden, so füllen auch die Elektronen im Festkörper die Bänder nach und nach auf. Kohlenstoff hat 6 Elektronen pro Atom oder etwa 10^{24} pro Kubikzentimeter. Wenn diese auf die Bänder im Diamant verteilt sind, dann ergibt es sich, dass 2 Bänder vollständig gefüllt sind und alle anderen leer, wie in Abbildung 9 gezeigt. In einem vollen Band können sich die Elektronen aber nicht bewegen – es ist einfach kein *Platz* da. Das ist ähnlich wie bei einer vollständig gefüllten Flasche, ohne jede Luftblase, in der sich die Flüssigkeit auch nicht bewegen kann, wenn man die Flasche schüttelt. So lässt sich verstehen, warum Diamant ein so guter Isolator ist. Die Elektronen sind in vollständig gefüllten Bändern *eingesperrt* und können sich nicht bewegen, also auch keinen Strom transportieren. Die Bandstruktur von Graphit ist – wegen der unterschiedlichen Kristallstruktur, anders als die von Diamant. Daher sind dort die Elektronen frei, so dass sie zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen können. Durch ähnliche Ansätze und Überlegungen lassen sich auch die optischen Eigenschaften dieser beiden und unzähliger anderer Materialien erklären.

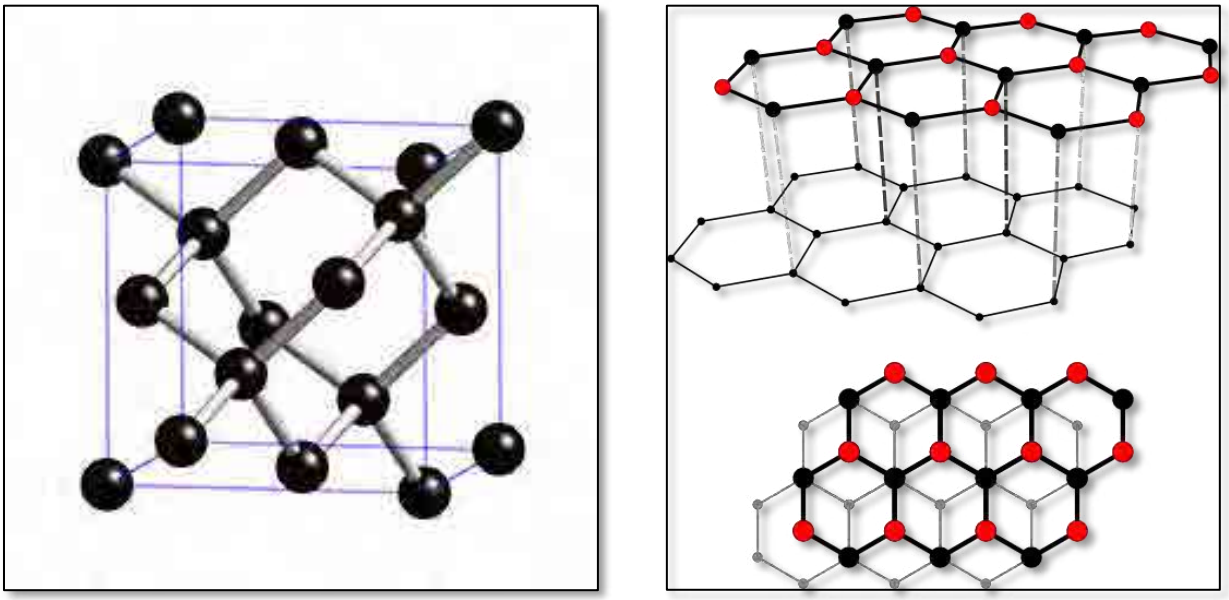


Abbildung 10 Atomare Anordnung in Diamant (links) und Graphit (rechts).

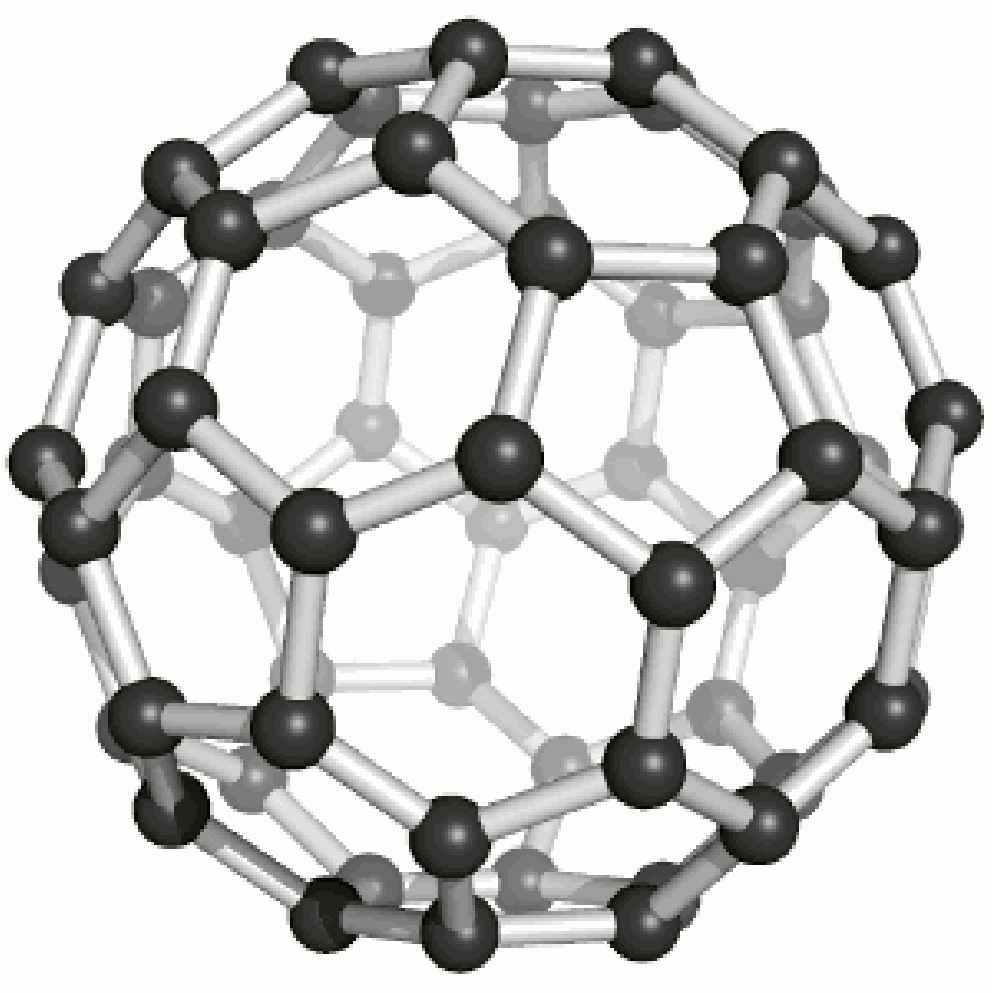


Abbildung 11 Buckminsterfulleren, eine Kugel aus 60 Kohlenstoffatomen.

Nach dieser kurzen Einführung in die Festkörperphysik machen wir nun ein Gedankenexperiment. Wir nehmen Atome und setzen sie, eins nach dem anderen, zu immer größeren Einheiten zusammen. Zunächst werden wir kleine und dann immer größere Moleküle zusammensetzen. Und irgendwann werden wir schließlich einen makroskopischen Festkörper erhalten. Aber wie sieht die Situation aus, wenn wir im Zwischenbereich sind und z.B. 10x10x10 Atome zu einem kleinen Würfel zusammensetzen? Ist das schon ein kleiner Festkörper, ein kleines Stücken Material, oder ist das noch ein großes Molekül? Und mit welchen physikalischen Gesetzen können wir eine solche Struktur beschreiben? Ein besonders interessantes Beispiel aus dieser „Zwischenwelt" zwischen Mikro- und Makrokosmos zeigt die Abbildung 11.

Die dort dargestellte Hohlkugel besteht aus 60 Kohlenstoffatomen, die sich wie bei einem Fußball zu 12 Fünfecken und 20 Sechsecken anordnen. Der Durchmesser dieser C60-Kugel beträgt etwa 1 Nanometer, und hier beginnt genau der Größenbereich, in dem der Übergang von der Molekülphysik zur Festkörperphysik stattfindet. Und dieser Übergangsbereich ist besonders interessant, weil die Zusammenhänge, die wir aus der makroskopischen Welt kennen und die Gesetze, die in der Welt der Atome herrschen sich zum Teil widersprechen.

Dazu ein Beispiel: In der makroskopischen Welt haben die Stoffe bestimmte Eigenschaften (Farbe, Leitfähigkeit, Härte) unabhängig von der Stoffmenge. Ein Stück Gold ist gelb und ein Stück Kupfer ist rot, egal ob man eine Menge von 2 Gramm oder 3 Gramm betrachtet.

Anders in der Welt der Atome: Eine Sauerstoffmolekül O_2, ändert seine Eigenschaften deutlich, wenn ein drittes Sauerstoffatom hinzugefügt wird – es entsteht Ozon O_3, das schon an seinem charakteristischen Geruch einfach von normalem Sauerstoff unterschieden werden kann.

Ein anderes Beispiel: In der makroskopischen Welt sind wir in der Lage, Materialiensteine fast beliebige Form zu geben und die Größe frei zu wählen. In der atomaren Welt geht das natürlich nicht! Ein Sauerstoff-Atom ist ein Sauerstoff-Atom. Man kann es nicht vergrößern oder verkleinern, man kann keine Ecke abfeilen oder ein Loch hineinbohren. Ähnliches gilt für (kleine) Moleküle. Auch sie haben eine naturgegebene Größe und Form, die nicht verändert werden kann.

Was aber, wenn wir den Zwischenbereich betrachten, die Größenskala zwischen 10nm und 100 nm? Hier treffen die atomare Welt und die makroskopische Welt aufeinander. Welche Regeln gelten hier? Die aus der makroskopischen Welt oder die aus der atomaren Welt? Oder beide? Heute sind wir in der Lage, nahezu beliebige Strukturen bis in den Nanometerbereich herzustellen. Die kleinsten Leiterbahnen auf modernen Computerchips sind z.B. nur etwa 20 nm breit – das entspricht etwa 100 Atomen. Auf der anderen Seite macht sich aber auf dieser Skala bereits ein Phänomen bemerkbar, das wir aus der makroskopischen Welt nicht kennen: Die Materialeigenschaften werden größenabhängig.

Abbildung 12 verdeutlicht das am Beispiel „Farbe". In allen dort gezeigten Reagenzgläsern sind Nanopartikel aus demselben Material. Trotzdem ist die Farbe (genauer gesagt: die Wellenlänge des emittierten Lichts) bei den verschiedenen Lösungen unterschiedlich. Und das nur deshalb, weil die Größe der Nanopartikel unterschiedlich ist: Aufsteigend von etwa 3 nm Durchmesser oben links bis hin zu etwa 4 nm ganz rechts (siehe Abbildung 12). Dies ist ein typisches Beispiel dafür, dass sich im Nanometer-Bereich die Eigenschaften von Materialien maßschneidern lassen. Durch geeignete Wahl der Größe lässt sich jede Farbe zwischen Grün und Rot einstellen. Das hat ganz praktische Konsequenzen: Bereits heute werden in der optischen Kommunikation durch Glasfasern (z.B. für ultraschnelle Internetverbindungen) Laser eingesetzt, deren Emissionswellenlänge („Farbe") präzise auf die Eigenschaften der Glasfasern abgestimmt sind. So wird erreicht, dass sich das Licht über lange Strecken nahezu ungedämpft ausbreitet. Das Licht dieser Laser stammt aus Halbleiter-Schichtstrukturen, deren einzelne Lagen nur wenige Nanometer dick sind und die mit einer Genauigkeit von einer einzelnen Atomlage hergestellt werden.

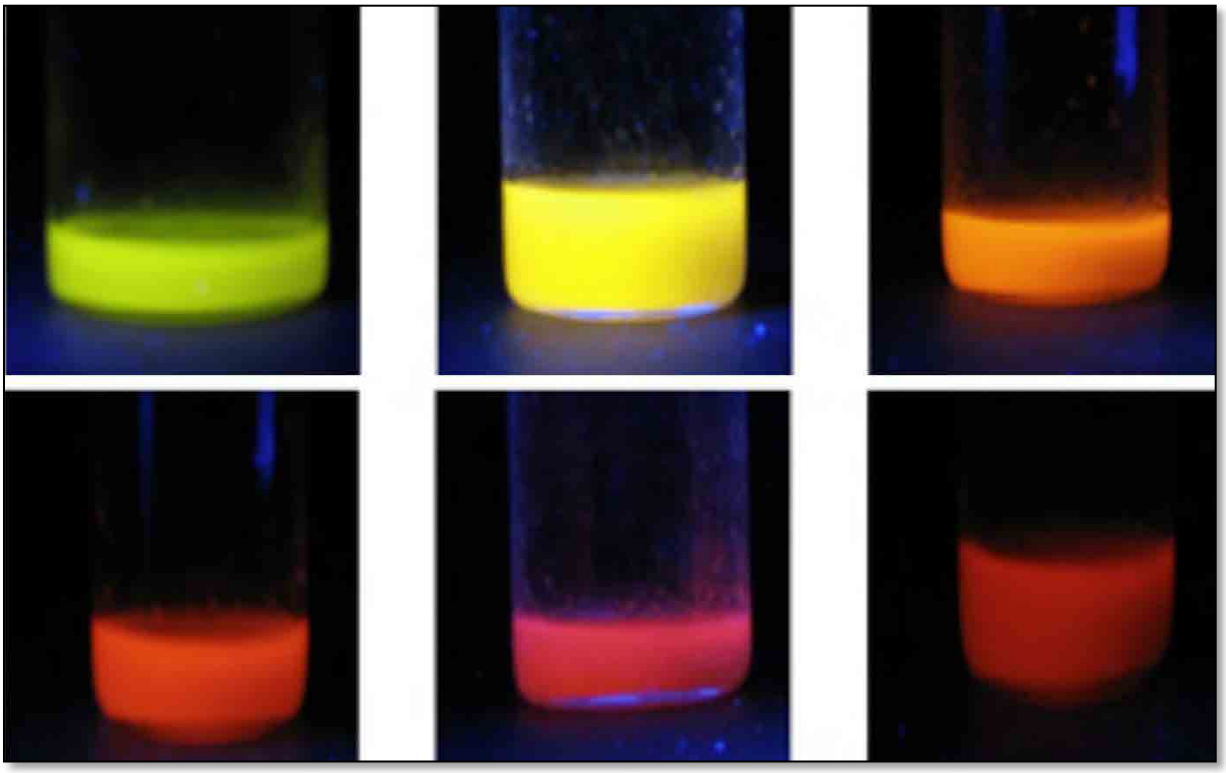


Abbildung 12 Silizium-Nanopartikel. Die Emissionswellenlänge („Farbe“) ist abhängig von der Größe.

Manchmal ändern sich Eigenschaften beim Übergang auf die Nano-Skala nicht nur graduell (unterschiedliche Wellenlängen), sondern fundamental. Das in Abbildung 12 gezeigte Material ist Silizium, das wichtigste Halbleitermaterial für Computerchips, CCD-Kameras und Solarzellen.

Und makroskopisches Silizium emittiert nahezu gar kein Licht! Deshalb werden Leuchtdioden und Halbleiterlaser aus teuren und zum Teil giftigen Verbindungen wie Galliumarsenid hergestellt. Auf der Nanoskala verändert Silizium aber seine optischen Eigenschaften völlig, wie Abbildung 12 zeigt.

Hier bietet die Nanophysik eine technologische Chance: Könnte es vielleicht gelingen, aus demselben billigen und ungiftigen Element Silizium nicht nur Computerchips herzustellen sondern auch noch gleich die Lichtquellen, mit denen die Computer untereinander kommunizieren?

Dies ist eine der Fragen, mit der sich die Nanowissenschaften heute beschäftigen. Eine andere Eigenschaft, die sich auf der Nano-Skala fundamental ändern kann ist die elektrische Leitfähigkeit. In unserer makroskopischen Welt ist der Widerstand eines Drahts proportional zu seiner Länge. Doppelte Länge – doppelter Widerstand. In der Nanowelt ist dieses einfache Gesetz nicht mehr uneingeschränkt gültig. Wenn ein Nano-Draht dünn genug ist, wird sein Widerstand unabhängig von seiner Länge. Mehr noch: Er wird auch unabhängig vom Material, aus dem er besteht und beträgt 12,9 Kilo-Ohm. Woher kommt dieser Wert? Er ergibt sich aus zwei Naturkonstanten: Der elektrischen Ladung der Elektronen und der Planck-Konstanten (h), die fundamental mit der Quantenmechanik verknüpft sind. Dies ist ein Beispiel dafür, warum die Nanowelt so spannend für Physiker ist: Mit den Methoden, die heute in der Halbleitertechnologie Standard sind, lassen sich Strukturen herstellen, die Quantenphänomene aufweisen.

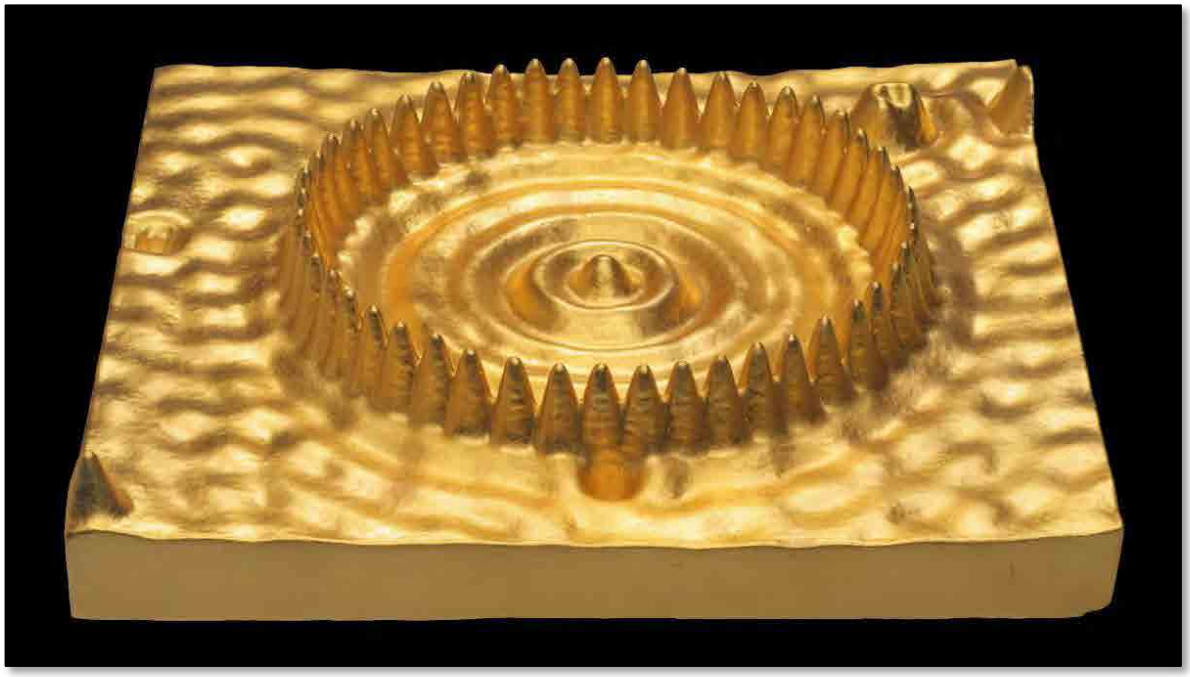


Abbildung 13 Eine Wand aus 48 Eisenatomen auf einer Kupferoberfläche. Die Kupfer-Elektronen, die im Innern des Walls „eingesperrt“ sind, bilden dort ein Wellenmuster aus.

Ein wichtiges Postulat der Quantenmechanik ist der Welle-Teilchen-Dualismus, der besagt, dass Elektronen sich nicht nur wie Teilchen verhalten können, sondern auch Welleneigenschaften aufweisen. Dies ist sehr anschaulich in Abbildung 13 zu erkennen. Das Bild zeigt 48 Eisenatome, die auf einer nahezu perfekten Kupferoberfläche zu einer Perlenschnur aufgereiht wurden. Im Innern des so entstandenen Rings sind deutliche Wellenmuster zu sehen. Kupfer ist ein sehr guter Leiter, mit einer hohen Dichte an Elektronen, die sich im Innern des Metalls wie eine Flüssigkeit verhalten (man spricht von einer *Fermi-Flüssigkeit*). Und ähnlich wie Wellen an einer Wasseroberfläche gibt es auch beim Kupfer Elektronenwellen an der Oberfläche. Wenn diese, wie im Bild gezeigt, eingesperrt werden, werden sie zu stehenden Wellen, deren Knoten und Bäuche sich mit einer atomar scharfen Metallspitze abtasten lassen.

Das Werkzeug, mit dem so die Wellennatur der Elektronen sichtbar gemacht werden kann, ist das sogenannte Rastertunnelmikroskop. Mit ihm wurden auch die Eisenatome auf der Oberfläche angeordnet. Mit der Wellennatur der Elektronen lässt sich auch die Abhängigkeit der Farbe von der Partikelgröße in Abbildung 12 erklären. Ähnlich wie die Länge einer Gitarrensaite die Tonhöhe – sowohl vom Grundton als auch von allen Obertönen– beeinflusst, beeinflusst auch die Größe der Nanopartikel die möglichen Schwingungsformen in den Nanopartikeln. Licht einer charakteristischen Wellenlänge wird ausgesandt, wenn ein Elektron von einem Schwingungszustand mit hoher Energie auf einen Schwingungszustand niedrigerer Energie springt. Das ist ganz ähnlich wie bei Atomen, bei denen Übergänge zwischen unterschiedlichen elektronischen Schwingungszuständen (man spricht auch von Energieniveaus oder Schalen) zur Aussendung von Licht mit einem charakteristischen Spektrum führen. Nur haben wir hier die Quantenphänomene auf eine andere Längenskala gebracht. Die Elektronen in Atomen sind auf einen Bereich von etwa 0,1 nm eingeschränkt. Unsere „künstlichen Atome“ sind 100 bis 1.000-mal größer. Und wir können sie deshalb maßschneidern! Abbildung 12 zeigt also ein Beispiel dafür, wie Quantenphänomene die Eigenschaften von Nanomaterialien beeinflussen können.

Das Maß dafür, ob eine Struktur klein genug ist, um quantenmechanische Größeneffekte zu zeigen, ist die Wellenlänge der Elektronen. Es gibt aber auch andere Größeneffekte mit dementsprechend anderen relevanten Längenskalen. Ein Beispiel ist der sogenannte *ballistische Transport*. In makroskopischen Proben wird der elektrische Widerstand dadurch verursacht, dass die Elektronen an sogenannten Störstellen gestreut werden. Das sind beispielsweise Verunreinigungen im Material durch Fremdatome. Eine für den Widerstand wichtige Größe ist daher die Strecke, die die Elektronen typischerweise zurücklegen, bevor sie auf die nächste Störstelle treffen. Diese Länge kann – je nach Material und Qualität – einige 10 bis 100 nm betragen. Betrachten wir nun einen Draht, der kürzer ist als diese mittlere freie Weglänge. Durch ihn werden die Elektronen (nun wieder als Teilchen betrachtet) ungestört wie Schrotkugeln durch die Luft hindurch fliegen. Daher die Bezeichnung "ballistischer Transport". Der Gesamtstrom durch einen solchen Draht ist gegeben durch die Zahl der auf der einen Seite des Drahts hineinfliegenden (und auf der anderen Seite ungestört wieder herausfliegenden) Elektronen und deren Geschwindigkeit. Diese ändern sich aber nicht, wenn der Draht, bei gleicher angelegter Spannung, auf die Hälfte verkürzt wird. Das bedeutet: Der elektrische Widerstand ist unabhängig von der Länge! Eine wichtige Voraussetzung für den oben bereits angesprochenen universellen Widerstandswert eines Nanodrahts. Die komplexen quantenmechanischen Zusammenhänge, die zu dem Wert von 12,9 Kilo-Ohm führen, sollen hier aber nicht weiter diskutiert werden.

Abschließend betrachten wir noch einen Größeneffekt, der sich an der Grenze zwischen Mikro- und Nanowelt bemerkbar macht. Hier ist die relevante Längenskala die Wellenlänge des sichtbaren Lichts – also zwischen etwa 400 und 800 nm. Die Frage, welche Farbe ein Objekt hat, das kleiner als die Lichtwellenlänge ist, lässt sich nicht generell beantworten (siehe das Beispiel aus Abbildung 12). Wenn aber Nanoobjekte regelmäßig in einem Gitter angeordnet werden, dann ist deren Wechselwirkung mit Licht immer dann besonders stark, wenn die Abstände zwischen den Bausteinen des Gitters (die *Gitterkonstante*) genau mit der Wellenlänge des Lichts übereinstimmen.

Auf diese Weise lassen sich maßgeschneiderte optische Filter herstellen, wie die Abbildung 14 (links) zeigt. Dort sind drei sogenannte photonische Kristalle zu sehen, die aus regelmäßig angeordneten, transparenten Kügelchen bestehen. Die Größe der Kugeln bestimmt die Gitterkonstante und damit die Wellenlänge, bei der die Wechselwirkung mit dem Licht am stärksten ist. Licht dieser Wellenlänge kann sich im Innern des photonischen Kristalls nicht ausbreiten und wird daher reflektiert. So entstehen die unterschiedlichen Farben in dem Bild, obwohl das Material selbst (z.B. Quarzglas oder transparenter Kunststoff) farblos ist.

Dieser Filter-Effekt lässt sich mathematisch übrigens ganz ähnlich beschreiben, wie die Entstehung der Bandstruktur in Festkörpern, bei der die regelmäßige Anordnung der Atome zu den „erlaubten" und „verbotenen" Energiebereichen für Elektronen(wellen) führt. Photonische Kristalle haben aufgrund der präzisen Kontrolle über Transmission und Reflektion zahlreiche Anwendungen in der Optik gefunden, z.B. für maßgeschneiderte Filter oder nahezu verlustfreie *dielektrische Spiegel*.

Photonische Kristalle sind aber auch ein Beispiel dafür, dass die Natur uns manches Mal mit ihren Lösungsstrategien weit voraus ist. Die kräftigen, grün oder blau schimmernden Farben von Schmetterlingsflügeln entstehen durch die regelmäßige Anordnung von winzigen Strukturen aus Chitin, dem eher farblosen Material, aus dem das Insektenskelett besteht. Blaue Schmetterlinge verdanken ihre Farbe also einem biologischen photonischen Kristall!

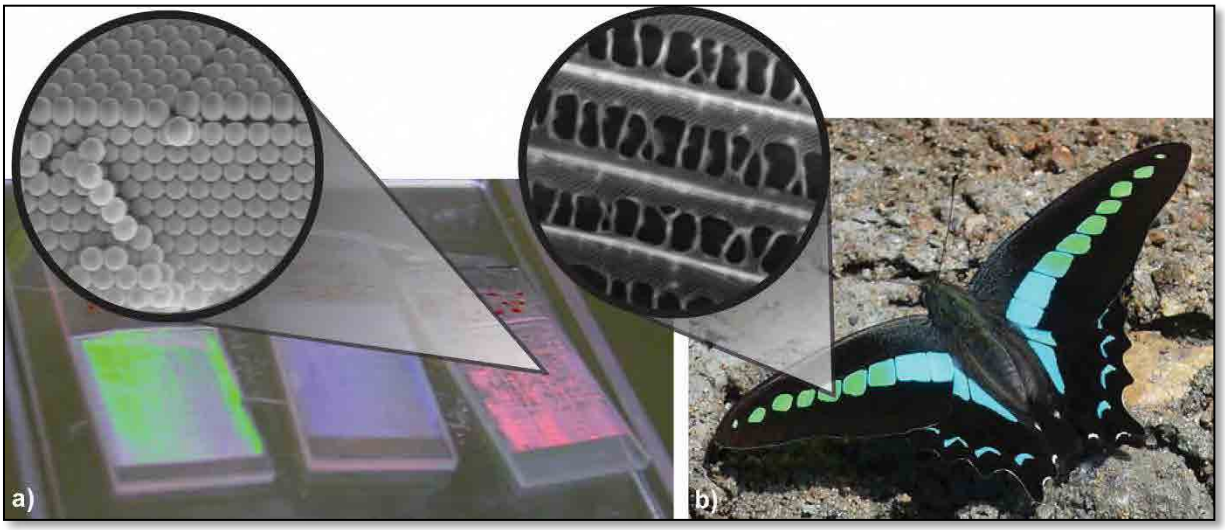


Abbildung 14 (links) Photonische Kristalle aus regelmäßig angeordneten Kügelchen unterschiedlicher Größe. Je nach Größe der Kugeln reflektieren die photonischen Kristalle Licht unterschiedlicher Wellenlänge. (rechts) Photonischer Kristall auf einem Schmetterlingsflügel. Die elektronenmikroskopische Aufnahme (Kreis) zeigt die periodische Anordnung von Balken aus Chitin.

Versuch 04: Erhöhte Reaktivität kleiner Teilchen (1 von 5)

Zeitbedarf

je 5 min

5 Minuten Nanotechnologie

Demonstrationsobjekte für die Zunahme des Oberfläche/Volumen Verhältnisses auf der Nanometerskala.

Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen eines Stoffes beeinflusst dessen Eigenschaften. Je kleiner die einzelnen Teilchen sind, desto oberflächenreicher und reaktiver werden sie. Das gilt z.B. für die Entzündbarkeit von Metallen. Ein Eisennagel brennt nicht, Stahlwolle hingegen kann leicht zum Glimmen gebracht werden. Ähnliches gilt aber auch für das Löseverhalten: je kleiner die Teilchen, desto schneller lassen sie sich lösen.

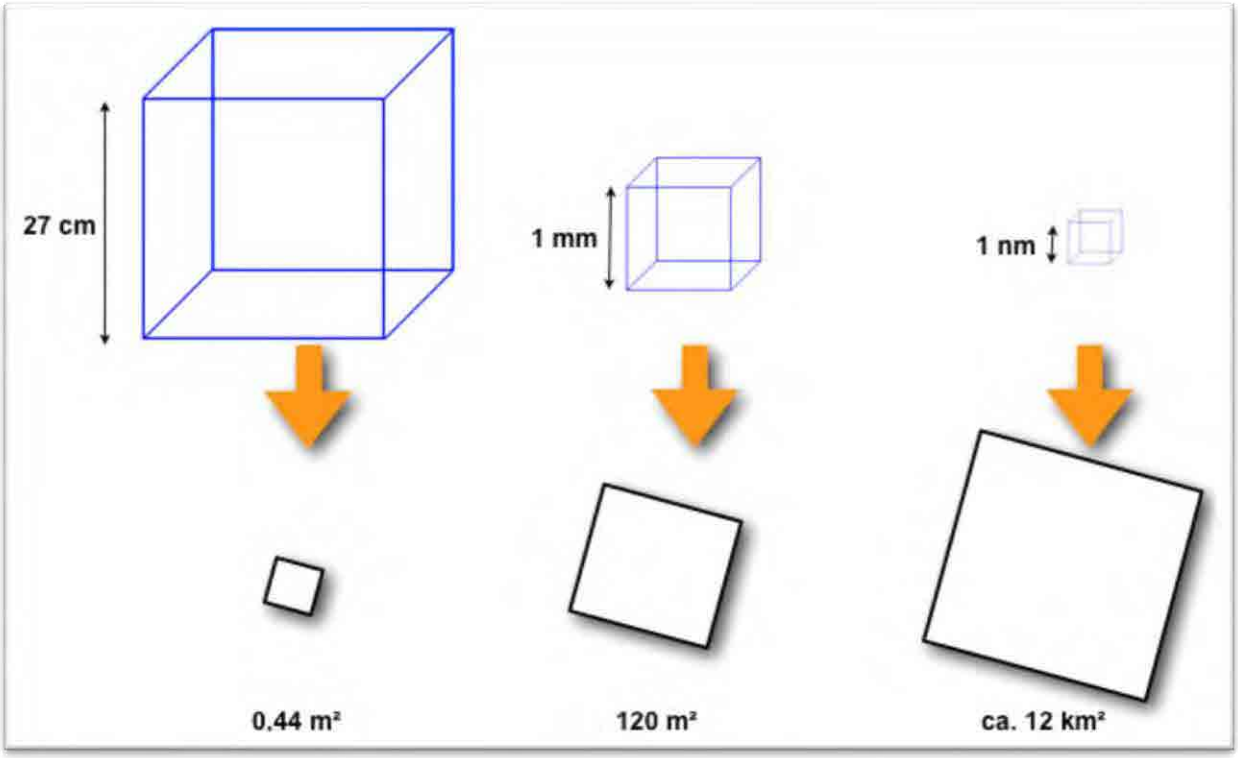


Abbildung 15 Veranschaulichung der Oberflächenvergrößerungseffekte durch kleinere Partikelgrößen.

Ziele

Im Nanokosmos verändern sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften.

Versuch 04: Erhöhte Reaktivität kleiner Teilchen (2 von 5)

Vorbereitung

Demonstrationsexperimente

Material, Geräte

- Waage zum Abmessen gleicher Stoffmengen
- Reagenzgläser
- graduierte Einweg-Plastik-Pasteurpipetten (5 ml)
- Stoppuhr
- 9 V Blockbatterie (beide Kontakte auf einer Seite)
- Aluminiumfolie
- Glaswolle
- Bunsenbrenner
- Papier
- Magnet

Chemikalien

- kleine Mengen Kandiszucker, Kristallzucker und Puderzucker
- Kaffeebohnen, gemahlener Kaffee
- Eisennagel
- Stahlwolle
- Eisenoxalat, $Fe(COO)_2$
- H_2O

Sicherheit

Schutzbrille, feuerfeste Unterlage (z.B. altes Kuchenblech) unterlegen.

Entsorgung

Reste von pyrophorem Eisen nicht achtlos mit brennbaren Resten z.B. Papier zusammenbringen:

Gefahr der Selbstentzündung!

Vorsicht: Feuchte Eisenstaubreste bilden unangenehme Rostflecke.

Versuch 04: Erhöhte Reaktivität kleiner Teilchen (3 von 5)

Durchführung

Experiment A – Oberflächenvergrößerung, das Lösungsverhalten von Zucker

1. Geben Sie jeweils die gleiche Menge der Zuckersorten in ein Reagenzglas (z.B. 1g).

Sofort nach der Zugabe von ca. 5 ml Wasser wird geschüttelt (Daumen auf die Öffnung halten).

2. Messen Sie die Zeit, bis sich der Zucker vollständig gelöst hat.

Erklärung

Puderzucker löst sich dank der kleinen Kristallteilchen sehr schnell. Kristallzucker braucht schon wesentlich länger um in Lösung zu gehen. Kandiszucker löst sich nach einigen Minuten nur unvollständig.

Abbildung 16 Vergleich der Oberflächenverhältnisse in Zuckerstücken

Experiment B – Erhöhte Reaktivität

In jeweils ein Reagenzglas wird eine Kaffeebohne und eine Spatelspitze Kaffeepulver gegeben. Anschließend mit heißem Wasser aufgießen. Es wird verglichen, wie schnell sich Kaffee im heißen Wasser löst.

Experiment C – Erhöhte Reaktivität

Eisenschwamm (Eisenwolle) und 9 Volt Batterie werden aneinander gehalten. Der Eisenschwamm lässt sich durch die 9Volt Batterie entzünden.

Versuch 04: Erhöhte Reaktivität kleiner Teilchen (4 von 5)

Experiment D – Pyrophores Eisen (Reduktion von Eisenoxalat)

1. Vor der Durchführung des Experiments wird ein feuerfestes Blech als Unterlage und mit einem großen Bogen Aluminiumfolie darüber als Schutz verwendet.
2. Ein Reagenzglas wird mit ¼ Eisenoxalat gefüllt und mit Glaswolle verschlossen.
3. Erhitzen Sie gleichmäßig und zügig über der Brennerflamme. Das Produktverfärbt sich über gelb, ocker, braungrün nach schwarz. Das Reagenzglas dabei bewegen und gelegentlich leicht aufklopfen, um alles gut zu vermischen.
4. Das entstehende Kohlenstoffmonoxid kann an der Reagenzglasöffnung entzündet werden.
5. Das Reagenzglas wird an der Luft abgekühlt. Anschließend wird das pyrophore Eisen über dem Blech ausgegossen. Es soll sich ein feiner Feuerregen bilden (siehe Abbildung 17).
6. Den pyrophoren Effekt kann man verstärken, indem man ein Blatt Papier auf das Blech legt, das dann zu brennen beginnt.
7. Nach Durchführung lässt sich durch Zusammenfalten der Aluminiumfolie die Flammen bzw. die Glut löschen und zugleich problemlos entsorgen.

Abbildung 17 Funkenregen durch Ausschütten von pyrophorem Eisen

Versuch 04: Erhöhte Reaktivität kleiner Teilchen (5 von 5)

Erklärung zum Experiment D

Normalerweise gilt Eisen eher als Feuerschutz (Feuerschutztüren, Panzerung). Ist es aber genügend feinverteilt, kann es brennen: wie z.B. Eisenwolle. Fein verteiltes Eisen kann sich ggf. auch selbst entzünden (pyrophor). Derart fein verteiltes Eisen entsteht bei der thermolytischen Zersetzung von Eisenoxalat und anschließender Disproportionierung.

$$\mathbf{Fe(COO)_2 \longrightarrow FeO + CO_2 + CO}$$

$$\mathbf{4FeO \longrightarrow Fe + Fe_3 + O_4}$$

Der Eisenanteil (¼des Gesamteisens) ist einmal wegen der sehr feinen Verteilung, vor allem aufgrund von Gitterfehlstellen derart reaktionsfähig. Bei der Herstellung darf keinerlei Luft hinzutreten. Bei der Thermolyse bilden sich ständig die Gase CO und CO_2. Daher sollte das Oxalat gleichmäßig und zügig erhitzt werden.

Ergänzung zum Experiment 4

Eisenoxalat ist käuflich, kann aber auch einfach selbst hergestellt werden:

- 1. Stöchiometrischen Mengen von Ammoniumoxalat (142 g) und Eisen(II)-sulfat, krist. (278.4 g) werden in geringen Volumen destilliertes Wasser gelöst. (Zuerst das etwas schwerer lösliche Ammoniumoxalat lösen, dann erst das Eisensulfat, das sehr schnell bei Zutritt von Luft oxidiert).
- 2. Beide Lösungen zusammengießen, das gelbe Eisenoxalat absetzen lassen, dekantieren, waschen, im Büchnertrichter abfiltrieren, ggf. auch mit Ethanol waschen, im Trockenschrank trocknen. In Vorratsflasche abfüllen.
- 3. Das Präparat ist gut verschlossen lange haltbar.

Literatur

Haupt, P. / Hahn, M. (1993): Pyrophores Eisen - eine experimentelle Projektaufgabe. Chemie in der Schule 40 (10), S.359-363.

Versuch 05: Modellexperiment zur Oberflächenvergrößerung (1 von 1)

Modellexperiment zur Erklärung des Zusammenhangs zwischen erhöhter Reaktivität durch Vergrößerung der Oberfläche bei geringerer Teilchengröße

Das Phänomen lässt sich z.B. mit Holzwürfeln oder LEGO®-Bausteinen veranschaulichen. Wir nehmen wieder die gleiche Menge (Gewicht). Im Übrigen nehmen wir an dass die Würfel auf einer Fläche „sitzen“, d.h., dass 5 Würfelflächen für chemische Reaktionen zugänglich sind (Gesamtreaktionsfläche). Wenn wir die gleiche Menge 10-mal kleinerer Würfel nehmen, erhalten wir eine um den Faktor 10-mal größere Oberfläche.

	großer Würfel	kleine Würfel
Anzahl Würfel pro Gewichtseinheit	1	1000
Kantenlänge des/ einen Würfels	10 cm	1 cm
Gesamtreaktionsfläche	5 Flächen á 10x10 cm = 5 x 100 cm^2 = 500 cm^2	5000 Flächen á 1x1 cm = 5000 x 1 cm^2 = 5000 cm^2

Abbildung 18 Modell zur Veranschaulichung der Oberflächenvergrößerung

Wenn man die kleinen Würfel in Richtung Nanodimension verkleinert, vergrößert sich die Gesamtreaktionsfläche noch entsprechend weiter. Genau darin liegt das Potential der Nanotechnologie: Man will eine möglichst große Gesamtoberfläche mit möglichst kleinen Volumen erreichen. Die Natur kennt dieses Prinzip der Oberflächenvergrößerung schon lange: So beträgt die Gasaustauschfläche in unserer Lunge (d.h. die Gesamtoberfläche aller Lungenbläschen) 100 m^2 (etwa 50-mal mehr als die gesamte Hautoberfläche)!

Zusätzliche Informationen

- VDI e.V.; VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
- NanoSchoolBox: www.nanobionet.de
- NANO-4-SCHOOLS: www.nanoforschools.ch
- Würfel: www.holzwuerfel.com
- http://www.chemieexperimente.de

Versuch 06: Bärlappsporenexplosion (1 von 1)

Zeitbedarf

ca. 5 min

Ziele

Verdeutlichung der Effekte durch Oberflächenvergrößerung durch Demonstrationsversuche

Material

- Strohhalm
- Bärlappsporen
- Feuerzeug
- Schutzbrille

Durchführung

Ein Strohhalm wird am hinteren Ende nach ca. 4 cm leicht geknickt. Man befüllt das hintere Ende des Strohhalms mit etwa einer Spatelspitze voll Bärlappsporen. Durch das längere Ende des Strohhalms pustet man nun kräftig durch, so dass die Bärlappsporen in einer großen Wolke in der Luft verwirbeln. Dabei hält man knapp hinter der Öffnung des Strohhalms ein Feuerzeug, so dass sich hier die Bärlappsporen entzünden können. Es entsteht ein großer Feuerball.

Abbildung 19 Bärlappsporen werden durch einen Strohhalm verwirbelt und an einem Feuerzeug entzündet.

Erklärung

Durch seine geringe Partikelgröße besitzen die Bärlappsporen eine enorm große Oberfläche, die bewirkt, dass sich die Sporen in Sekundenbruchteilen entzünden.

Zusätzliche Informationen

Bärlappsporen sind u.a. auch in der NanoSchoolbox von Conatex enthalten.

Versuch 07: Mehlstaubexplosion (1 von 2)

Themengebiet

Physikalische Phänomene

Zeitbedarf

Einfaches Demonstrationsexperiment

Ziele

Demonstrationsexperiment zur Mehlstaubexplosion um die Effekte der Oberflächenvergrößerung zu demonstrieren.

Vorbereitung

Der Boden der Spritzwasserflasche wird abgeschnitten. Ein passendes Glasrohr wird anstelle der Plastikspritze in den Deckel der Spritzwasserflasche geschoben, so dass das Glasrohr luftdicht im Deckel abschließt. An das Glasrohr wird der Schlauch befestigt. Ein Stück Draht wird gebogen, so dass man eine kleine Kerze etwa mittig in der Spritzwasserflasche befestigen kann.

Abbildung 20 Einfacher Aufbau zur Erzeugung einer Mehlstaubexplosion

Material für den Versuch

- Mehl
- Schlauch (ca. 1m)
- Kerze
- Draht
- Spritzwasserflasche
- Glasrohr (Ø 8 mm), um 90° gebogen
- Stativ, Stativklammer und Muffe

Versuch 07: Mehlstaubexplosion (2 von 2)

Durchführung

Es wird etwas Mehl (ca. eine Spatelspitze) in das Glasrohreckstück gefüllt, so dass dieses mit Mehl verstopft ist. Nun wird die Kerze angezündet und mit Hilfe des Drahtes in die Mitte des Spritzwasserflaschenbehälters eingehängt. Sobald man nun kräftig in den Schlauch pustet, verwirbelt der Mehlstaub in der umgebauten Spritzwasserflasche und wird dabei sofort durch die brennende Kerze entzündet. Ein explosionsartiger Feuerball ist deutlich zu sehen.

Abbildung 21
Beginnende Verwirbelung des Mehlstaubs kurz vor der Entzündung

Abbildung 22 Mehlstaubexplosion

Erklärung

Vergleiche Bärlappsporenexplosion.

Zusätzliche Informationen

Verwendet man Bärlappsporen anstelle von Mehlstaub, ist der Effekt noch eindrucksvoller (die Partikelgröße der Bärlappsporen ist kleiner).

Versuch 08: Farben durch Lichtbrechung an Nanostrukturen (1 von 3)

Themengebiet

Physikalische Phänomene

Zeitbedarf

ca. 5 min

Unterrichtliche Voraussetzungen

Wellenlängen und Licht, Interferenzen, Beugung am Spalt

Geeignet ab Klassenstufe

Jahrgangsstufe 10

Material/Geräte

CD oder DVD, Tierpräparate von z.B. Schmetterlingen, Prachtlibellen oder ähnliches

Durchführung

Eine DVD oder CD wird in unterschiedlichen Winkeln zu einer Lichtquelle gehalten. Die unterschiedliche Brechung des Lichtes ist deutlich zu beobachten.

Erklärung

Zur Lichtbrechung an einer CD oder DVD siehe auch Funktionsweise eines DVD-Spektroskops (siehe Kapitel: Werkzeuge im Nanokosmos). Auch in der Natur ist dieses Phänomen vielfach zu beobachten. So werden die Farben von Schmetterlingsflügel nicht nur durch Farbpigmente, sondern werden oftmals durch Beugungsinterferenzen an regelmäßigen Feinstrukturen der Oberflächen von Schmetterlingsflügel hervorgerufen. Auch die Oberflächen einiger Käferarten weisen derartige regelmäßige Feinstrukturen an der Oberfläche auf, so dass es zu Beugungsinterferenzen führt.

Versuch 08: Farben durch Lichtbrechung an Nanostrukturen (2 von 3)

Farbige Strukturfarben durch Beugungsinterferenzen bei Insekten:

Abbildung 23
Chrysolina cerulans (Himmelblauer Blattkäfer)

Abbildung 24 *Chrysolina fastuosa*
(Prächtiger Blattkäfer)

Abbildung 25 Die schillernden Farben der Flügel dieses Tropischen Schmetterlings beruhen auf Beugungsinterferenzen.

Versuch 08: Farben durch Lichtbrechung an Nanostrukturen (3 von 3)

Abbildung 26 An der Oberfläche einer DVD lassen sich die Beugungsinterferenzen besonders gut beobachten.

Zusätzliche Informationen

Diese kurzen Demonstrationsexperimente eignen sich sehr gut als Vorbereitung zum Bau des DVD-Spektroskops.

Versuch 09: Kolloidnachweis durch Tyndall-Effekt (1 von 1)

Chemikalien:

NaCl, Tensid-lösung, Goldnanopartikellösung (z.B. aus Versuch 11)

Geräte:

Laserpointer, Erlemeyerkolben

Durchführung:

1. In einem Schnappdeckelglas wird etwas NaCl in Wasser gelöst.
2. In einem abgedunkelten Raum mit einem Laserpointer in die Lösung leuchten. Da das Kochsalz sich vollständig gelöst hat, ist keine Effekt zu erkennen.
3. Gibt man nun zusätzlich einige Spritzer Tensid-Lösung oder Geschirrspülmittel hinzu und mische die Flüssigkeit, wird ein Lichtgang sichtbar, obwohl die Lösung weiter hin durchsichtig ist.
4. Wiederhole den Versuch mit der selbst hergestellten kolloidalen Goldpartikel-Lösung.

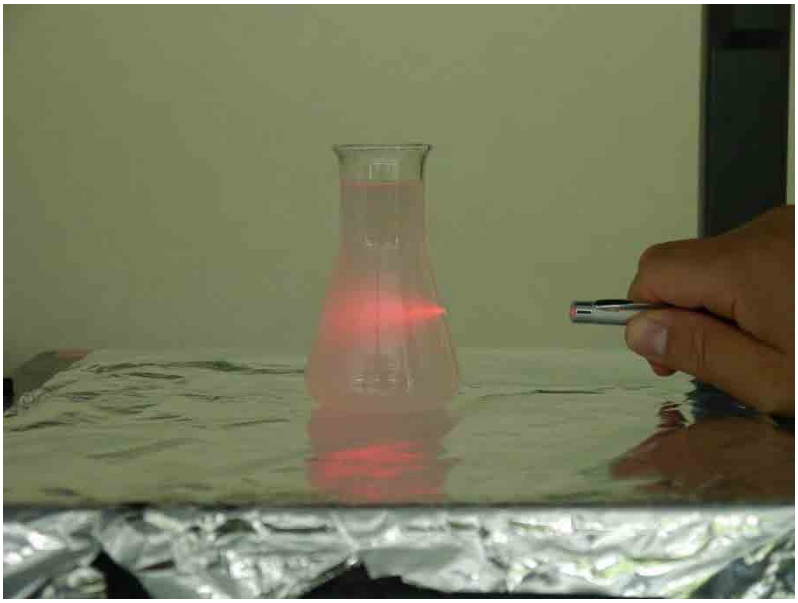


Abbildung 27 Demonstration des Tyndall-Effekts.

Beobachtung:

5. Richtet man einen Lichtstrahl seitlich auf ein Becherglas mit Kochsalzlösung, so ist er nicht zu erkennen. Wird der Lichtstrahl dagegen durch eine kolloidale Lösung (z.B. Gold-partikel oder Tensidlösung) geleitet, so ist er sichtbar, da das Licht an den gelösten Teilchen gestreut wird.

Versuch 10: Herstellung photonischer Kristalle (1 von 5)

Hinweis: Der zeitaufwändigste Teil der Herstellung photonischer Kristalle ist die Trocknung der Kristalle. Diese kann je nach Umgebungsbedingungen unterschiedlich lange dauern (ca. 60 Minuten bei Raumtemperatur). Die Kristalle in einem Ofen schneller zu trocknen kann allerdings die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigen. Während die Kristalle trocknen, kann der Unterricht selbstverständlich normal fortgesetzt werden.

Photonische Kristalle sind geordnete Nanostrukturen, die hoch interessante und faszinierende optische Effekte zeigen. Die hier beschriebenen photonischen Kristalle sind aus kleinen farblosen Nanokugeln aufgebaut. Sie ordnen sich wie gestapelte Orangen an. Aufgrund dieses Aufbaus reflektieren sie nur einen bestimmten eng begrenzten Wellenlängenbereich des Lichts. Außerdem kann durch den Einbau von Defekten im Kristall Licht auf kleinstem Raum geleitet werden. Diese Möglichkeit macht photonische Kristalle so interessant für die aktuelle Forschung. Nur mit photonischen Kristallen können zukünftige optische Computer auf kleinem Raum realisiert werden. Da die jetzigen Schüler unsere Zukunft sind, müssen sie auch in der Schule auf die Zukunft vorbereitet werden. Daher sollten photonische Kristalle auch im experimentellen Physik- oder Chemieunterricht eingesetzt werden. Dass dies verblüffend einfach und insbesondere preiswert möglich ist, zeigt die folgende Anleitung.

Benötigtes Material:

- Objektträger (je Kristall einer)
- 5-10 ml Polystyren Latex Kugel Suspension (ca. 20€-30€) reichen für ca. 60-120 Kristalle (0,3µm für rote und 0,2µm für blaue photonische Kristalle) Bezugsquelle: www.plano-em.de
- Deckgläser (je Kristall eins)

Die hier vorgestellte Deckglasmethode nutzt die Kräfte der Nanowelt um sicher, schnell und preiswert photonische Kristalle herzustellen.
In der Nanowelt haben alle Partikel eine deutlich größere Oberfläche in Relation zu ihrem Volumen als in der uns vertrauten Welt. Dadurch spielt die Schwerkraft kaum noch eine Rolle, wohingegen elektrostatische Kräfte eine entscheidende Bedeutung bekommen.
Auf diesen Oberflächenkräften beruht die Deckglasmethode. Dabei wird ein Tropfen der Kugelsuspension auf einen Objektträger gegeben. Auf diesen Tropfen wird dann ein Deckglas gelegt. Nun kann das Wasser, welches an den Rand des Deckglases gedrückt wird, langsam verdunsten. Die Nanokugeln bleiben dort zurück und ordnen sich aufgrund der Oberflächenkräfte zu einem photonischen Kristall an (Abbildung 29). Nachdem das Wasser vollständig verdunstet ist, kann das photonische Kristall unter einem Auflichtmikroskop betrachtet werden (Abbildung 30). Es ist auch möglich, den Kristall unter einem normalen Durchlichtmikroskop mithilfe einer Schreibtischlampe im Auflicht zu betrachten (Abbildung 31). Dazu sollte der Kristall etwas schräg gestellt werden. Außerdem führt ein schwarzer Hintergrund (z.B. schwarze Pappe) zu einer besseren Sichtbarkeit des Kristalls.
Eine weitere Methode mit der photonische Kristalle hergestellt werden können, ist die Tröpfchenmethode. Sie funktioniert genauso wie die Deckglasmethode, allerdings wird auf den Tropfen kein Deckglas gelegt. Diese Kristalle zeigen nicht so kräftige Farben wie die nach der Deckglasmethode hergestellten Kristalle (Abbildung 32). Allerdings sind sie mit bloßem Auge gut erkennbar. Daher sind sie gut geeignet, wenn nicht genügend Mikroskope vorhanden sind. Zur Beobachtung dieser Kristalle können natürlich auch Lupen verwendet werden.

Versuch 10: Herstellung photonischer Kristalle (2 von 5)

Versuche mit den Kristallen

Mit den Kristallen können Versuche zu Transmission und Reflexion durchgeführt werden. Dazu betrachtet man die Kristalle im Auflicht und im Durchlicht. Im Auflicht sieht man die durch Interferenzreflexion entstandene Farbe (links in Abbildung 33). Im Durchlicht fehlt diese Farbe im Spektrum (rechts in Abbildung 33).

Außerdem kann man anhand der photonischen Kristalle eine Vielzahl optischer Effekte untersuchen. So gilt für die Kristalle zunächst die allgemeine Formel der Braggreflexion. Durch die Verkleinerung der Wellenlänge in der Materie ergibt sich jedoch eine etwas andere Formel [1]. All diese Formeln können über photonische Kristalle eingeführt werden.

Hinweis: Da es sich bei photonischen Kristallen um dreidimensionale Strukturen handelt, kann die Winkelabhängigkeit der Braggreflexion leider nicht gezeigt werden. Hinzu kommt noch, dass photonische Kristalle nicht nur ein spannendes Forschungsgebiet sind, sondern auch noch schön aussehen. So lassen sich auch Schüler/innen, die kein großes Interesse an Naturwissenschaften haben, einbinden.
Darüber hinaus wurde in einer Arbeit [2] der Bau eines schaltbaren Kristalls beschrieben, der zwischen zwei Farben hin und her schalten kann. Dieser Versuch ist allerdings recht zeitaufwendig und daher für ein mehrwöchiges Projekt geeignet.

Photonische Kristalle können auch mit SiO2-Nanokugeln hergestellt werden. Diese sind jedoch wesentlich teurer als die in dieser Arbeit verwendeten Latex-Kugeln. Mittels dem Stöber-Fink-Bohn-Verfahren können SiO2-Nanokugeln in der Schule zwar selbst hergestellt werden [3], jedoch ist dieses Verfahren sehr aufwendig und es ist schwierig Kugeln nahezu einheitlicher Größe anzufertigen (Abbildung 28). Dies wirkt sich nachteilig auf die Qualität der photonischen Kristalle aus.

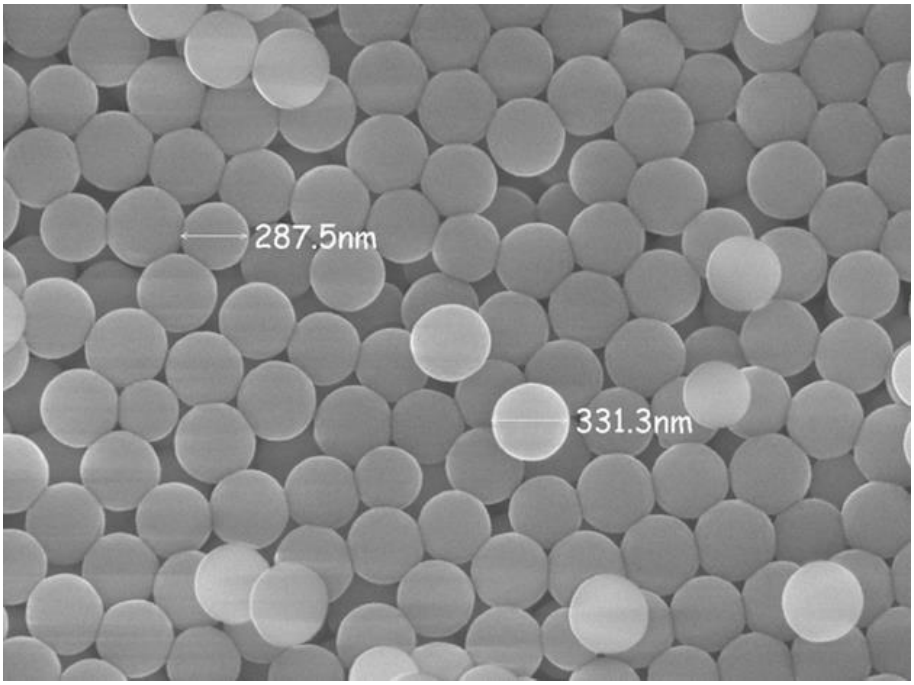


Abbildung 28 Mittels Stöber-Fink-Bohn-Verfahren am St. Michael-Gymnasium hergestellte SiO_2-Nanokugeln.

Versuch 10: Herstellung photonischer Kristalle (3 von 5)

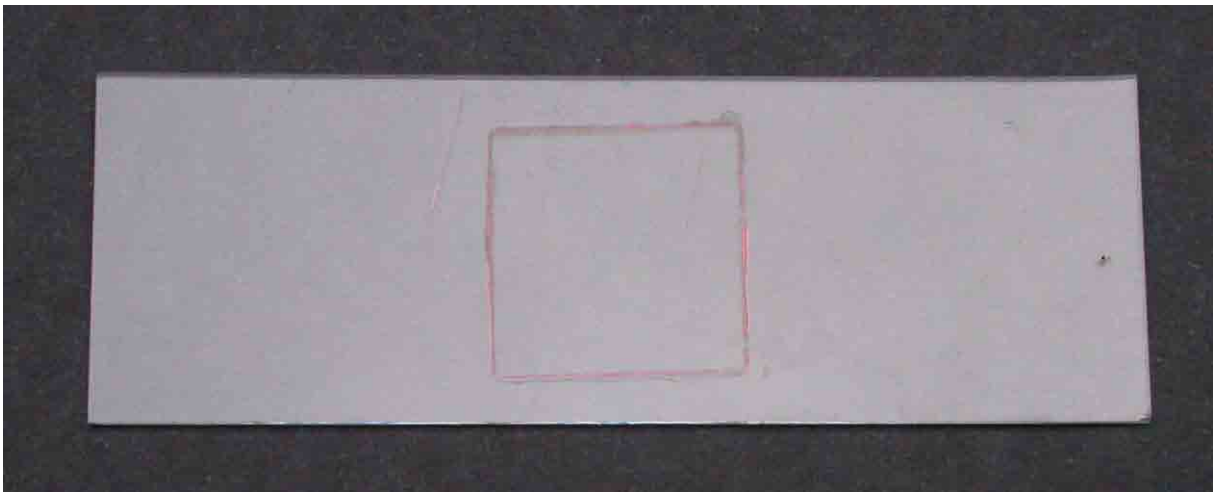


Abbildung 29 Photonischer Kristall aus 303 nm großen Latex-Kugeln auf einem Objektträger.

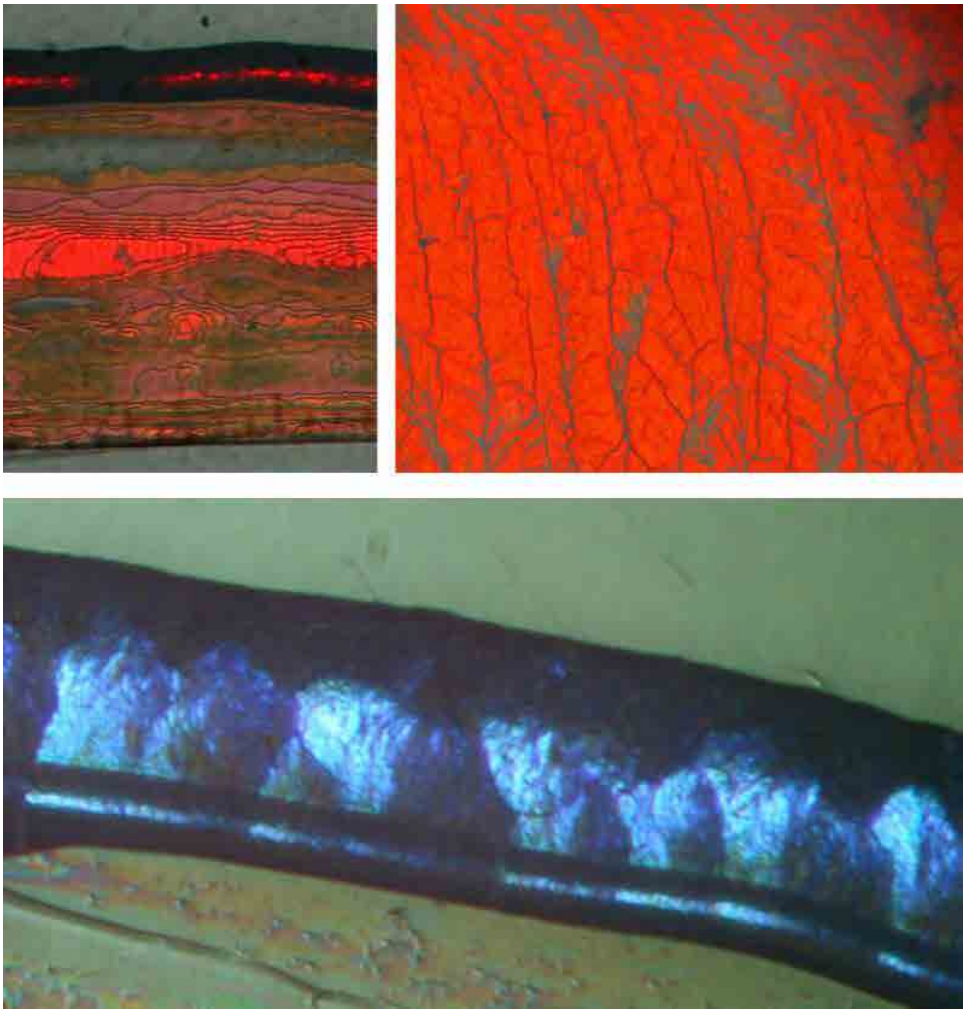


Abbildung 30 Photonischer Kristall aus 303 nm (oben) und 204 nm (unten) großen Latex-Kugeln unter einem Auflichtmikroskop.

Versuch 10: Herstellung photonischer Kristalle (4 von 5)

Abbildung 31 Verwendung eines einfachen Durchlichtmikroskops zur Betrachtung eines photonischen Kristalls

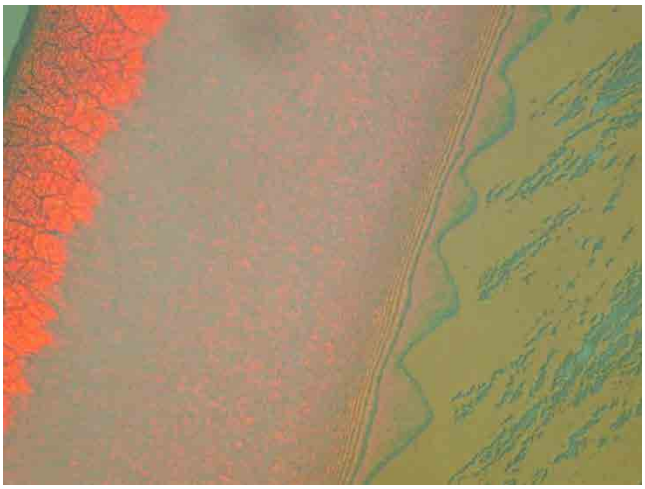


Abbildung 32 Photonischer Kristall – hergestellt mittels Tröpfchenmethode

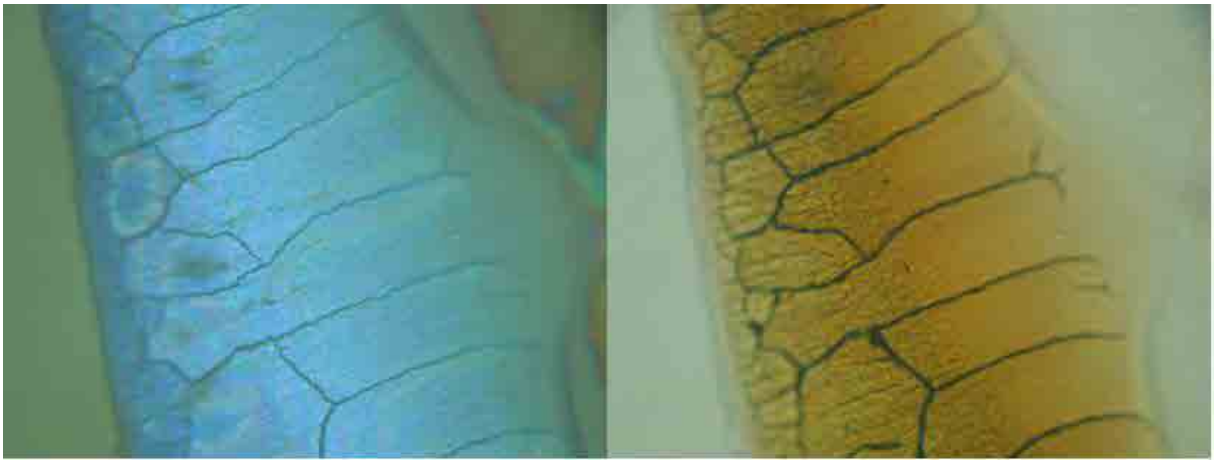


Abbildung 33 Photonischer Kristall aus 204 nm großen Latex-Kugeln links im Auflicht, rechts im Durchlicht

Versuch 10: Herstellung photonischer Kristalle (5 von 5)

Literatur

[1] http://www.jufo.stmg.de/2008/Kugeln/Kugeln.pdf
[2] http://www.jufo.stmg.de/2010/Fluessigkristalle/Fluessigkristalle.pdf
[3] http://www.jufo.stmg.de/2005/Kristalle/Kristalle.pdf

Sicherheit

Nanopartikel sollten weder durch Inhalation noch durch Hautkontakt in den Körper gelangen. Aus diesem Grund dürfen die hier genannten Experimente nur in Absprache mit dem Sicherheitsbeauftragten der Schule und unter Beachtung der aktuellen Gefahrstoffverordnung durchgeführt werden. Der Autor bzw. die Autoren übernehmen keine Haftung für den unsachgemäßen Umgang mit Nanomaterialien und deren Folgen.

Hinweis

Diese Versuchsanleitung ist aus einer Jugend forscht Arbeit am St. Michael-Gymnasium in Bad Münstereifel entstanden. Weitere Informationen finden Sie unter Kapitel 14.

3. Kapitel: NANOTECHNOLOGIE UND CHEMIE

Autoren

Kapiteleinleitung

Prof. Dr. Andreas Greiner – Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie, Bayreuth

Versuchsanleitungen

StD Michael Funke – Gymnasium Zum Altenforst, Troisdorf
Prof. Dr. Andreas Greiner, Universität Bayreuth, Bayreuth
StD Ludger Remus – Albertus-Magnus-Gymnasium, Köln

Hocheffektive Katalyse durch Nanostrukturierung

von Professor Dr. Andreas Greiner

Sei es die Herstellung von Kunststoffen, Kraftstoffen, Kosmetika, Medikamenten, Lacken, Lebensmittel, in allen Fällen liegen chemische Prozesse zugrunde, durchgeführt in großen Industrieanlagen oder durchaus auch einmal z.B. in der Forschung in kleinen Laboreinrichtungen. Ein wesentliches Ziel ist dabei, die Prozesse schnell und mit hoher Ausbeute ablaufen zu lassen. Es gibt eine Vielzahl von chemischen Reaktionen, die spontan ablaufen sollten und dadurch z.B. Wärme abgeben könnten, wie es im Fall einer Verbrennung (z.B. von Wasserstoff in Gegenwart von Sauerstoff) stattfindet. Setzt man aber bei Zimmertemperatur eine Gasmischung der beiden Stoffe an, so beobachtet man keine Reaktion. Der Grund dafür ist, dass eine große Anzahl von chemischen Reaktionen, und dazu zählt auch die oben erwähnte, zunächst einen Mindestbetrag an Energiezufuhr brauchen, damit sie ablaufen können (Abbildung 34).
Dieser Mindestbetrag an Energie wird Aktivierungsenergie genannt. Viele mögliche Reaktionen sind dadurch gehemmt, d.h. sie laufen nicht mit merklicher Geschwindigkeit ab. Derartige Reaktionen werden beschleunigt, wenn man durch Zusatz eines geeigneten Katalysators einen Reaktionsweg mit geringerer Aktivierungsenergie eröffnet.

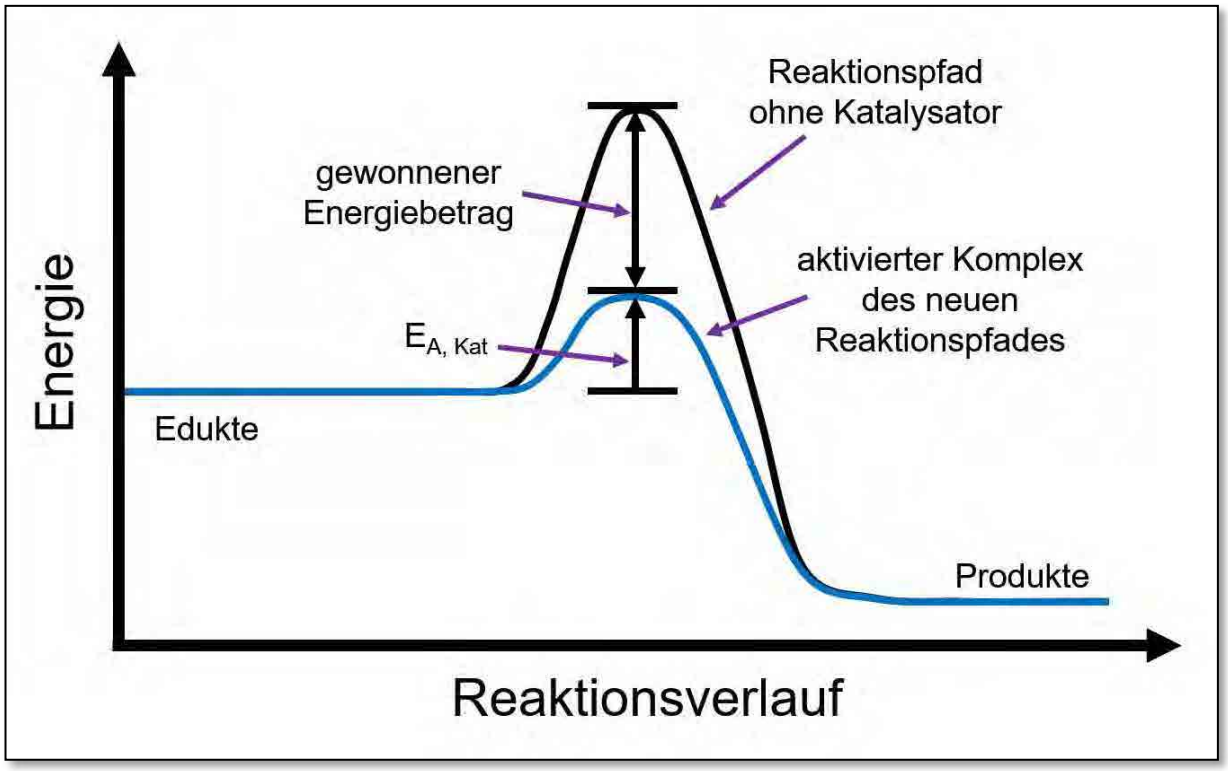


Abbildung 34 Wirkungsweise eines Katalysators.

Ein Katalysator beschleunigt eine chemische Reaktion, ohne jedoch die Lage des Gleichgewichts zu verändern. Der Katalysator taucht in der Reaktionsgleichung nicht auf. Z.B. gilt für die Ammoniaksynthese, die in merklichem Umfang nur in Gegenwart von Katalysatoren stattfindet, folgende Reaktionsgleichung:

$$N_2 + 3\,H_2 \xrightarrow{Eisenoxid-Mischkatalysator} 2\,NH_3$$

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz von Katalysatoren sind die Auspuff-Anlagen von Kraftfahrzeugen (in denen sie eingebaut werden, um die Luftverschmutzung zu reduzieren). Auch in Brennstoffzellen, in denen chemische Prozesse ablaufen, die elektrische Energie erzeugen, sind Katalysatoren erforderlich. Katalytisch aktive Enzyme (Biokatalysatoren) treten in der belebten Natur auf und sind z.B. für die Körperchemie von entscheidender Bedeutung. Ihre Rolle als Katalysator besteht darin, den Ablauf chemischer Reaktionen schneller zu gestalten oder gar sie in Gang zu setzen.

In dem Bereich der Katalyse unterscheidet man zwischen der homogenen und der heterogenen Katalyse. Im ersten Fall ist der Katalysator homogen auf molekularer Ebene im Reaktionsgemisch dispergiert (verteilt); im zweiten Fall liegt er als getrennter Phasenbereich vor. Typisch sind Feststoff-Katalysatoren bei Gasreaktionen. Dies trifft z.B. für den Fall des PKW-Katalysators zu, bei dem die Abgase über feste Oberflächen, gebildet durch den Katalysator, strömen. Es ist insbesondere die heterogene Katalyse, die von der Nanotechnologie in vielen Fällen profitiert. Die heterogene Katalyse beruht darauf, dass die Reaktionspartner in Kontakt mit der Oberfläche treten, wo sie chemische oder physikalische Bindungen knüpfen, um dann Reaktionen einzugehen. Je kleiner die Feststoffpartikel sind, desto größer ist die Oberfläche pro Masseneinheit Katalysator. Typisch ist, dass bei der Reduktion der Abmessungen um eine Größenordnung die relative Oberfläche um eine Größenordnung ansteigt. Die Nanostrukturierung von Katalysatoren hat nicht nur mit der Erhöhung der Oberfläche zu tun. Gold ist ein typisches Beispiel. Gold ist eigentlich als inert bekannt. Werden die Abmessungen jedoch bis in den Nanometerbereich herab reduziert, also Goldnanopartikel gebildet, dann ändert sich seine innere elektronische Struktur und es wird katalytisch hoch aktiv. Gleiches gilt für eine ganze Reihe anderer Stoffe. Ein weiterer vielversprechender Weg besteht in der Herstellung von Nanopartikeln, aufgebaut aus verschiedenen Stoffen, wie z.B. Palladium/Rhodium oder auch Palladium/Platin. Da es sich bei heterogenen Katalysatoren oft um Edelmetalle oder Edelmetalllegierungen handelt – typisch sind Platin, Palladium, Rhodium aber auch Gold und Legierungen zwischen diesen Metallen – sind Gewichtsersparungen bares Geld. Immerhin gilt für das oben genannte Beispiel, dass die reinen Metallkosten bei einem Übergang von Katalysatorpartikeln von 1 Mikrometer auf 10 Nanometer im Idealfall um einen Faktor 100 reduziert werden.

Herstellungsverfahren für metallische und metalloxidische Nanopartikel

Versuchsbeschreibung

Es werden nanoskalige katalytisch aktive Substanzen hergestellt und ihre katalytische Wirkung experimentell verfolgt.

Die Versuche umfassen die Herstellung von

- Goldnanopartikeln
- Titandioxidpartikeln

sowie Experimente zu ihrer katalytischen Aktivität. Hier wird eine Reihe von unterschiedlichen Reaktionen vorgeschlagen, so dass je nach Ausrüstung und Umfang der geplanten Unterrichtseinheit ausgewählt werden kann.

Versuch 11: Gold-Nanopartikel in wässriger Lösung (1 von 1)

Zeitbedarf

Versuchsvorbereitung: 0 min

Dauer des Versuches: 40 min

Chemikalien

160 mg Tetrachlorgoldsäure

1 ml Natriumcitrat 0,5% (in destilliertes Wasser)

Entsorgung

Entsorgung von genutzten Chemikalien.

Rückstände werden in den Schwermetallabfall entsorgt.

Die Citratlösung kann in den Abguss entsorgt werden.

Durchführung und Beobachtungen

160 mg Tetrachlorgoldsäure in 19 ml destilliertes Wasser lösen.

Unter Rühren fast bis zum Sieden erhitzen.

Zugabe von 1 ml Citrat-Lösung. Man rührt etwa eine halbe Stunde weiter, die Lösung färbt sich dabei langsam über Zwischenstufen rot.

Tipps und Tricks

Nur Gefäße verwenden, die zuvor nicht mit Nanopartikeln in Kontakt getreten sind!

Die entstandene Nanopartikellösung ist nicht langzeitstabil (ca. 2 bis 3 Tage)

Ergebnis

Die Nanopartikel haben eine durchschnittliche Größe von 17 bis 25 nm (rot gefärbte Nanopartikeldispersion).

Versuch 12: Herstellung von Titandixoid – Nanopartikeln (1 von 2)

Zeitbedarf

Versuchsvorbereitung: 10 min

Dauer des Versuches: 4 bis 6 h

Chemikalien

5 ml Ti(IV)isopropylat

Etwa 1 Liter Ethanol

Entsorgung und Sicherheitshinweise

Entsorgung von genutzten Chemikalien: Rückstände werden als organischer Lösungsmittelabfall gesammelt. Der Muffelofen ist noch sehr lange nach der Abschaltung heiß!

Geräte

- Tropftrichter 50 ml
- Magnetrührer + Rührfisch
- Bechergläser 500 ml
- Muffelofen
- Schliffstopfen
- Objektträger
- Optional: Zentrifuge, Zentrifugengläser

Durchführung und Beobachtungen

5 ml Titanisopropylat in 45 ml Ethanol lösen und in den Tropftrichter füllen.

50 ml destilliertes Wasser und 250 ml Ethanol in ein Becherglas geben.

Unter Rühren tropfenweise die Ti(IV)isopropylatlösung hinzugeben. Nach Abschluss etwa 2 h rühren.

Den Niederschlag abzentrifugieren und in Ethanol aufschlämmen. 2 bis 3-mal wiederholen (Wenn keine Zentrifuge vorhanden ist, wartet man auf das Absetzen des Niederschlages).

Etwas Niederschlag auf einen Objektträger streichen und im Muffelofen für etwa 2 bis 4 h auf 400 bis 500 °C erhitzen.

Versuch 12: Herstellung von Titandixoid – Nanopartikeln (2 von 2)

Tipps und Tricks

Nur Gefäße verwenden, die zuvor nicht mit Nanopartikeln in Kontakt getreten sind!

Das Titan(IV)isopropylat ist extrem wasserempfindlich! Deshalb die Behältnisse nur kurz öffnen. Ist das vorhandene Titan(IV)isopropylat zu nass, funktioniert die Reaktion nicht mehr. Man kann noch kleinere Partikelgröße durch vorherige Trocknung des Ethanols in der Titanisopropylatlösung erreichen.

Steigt die Temperatur im Muffelofen während des Ausheizens über 600 °C, so bildet sich Titandioxid in der Rutil Modifikation mit großen Korngrößen (>100 nm).

Zur Reinigung von mit Titandioxid verschmutzten Geräten kann eine Mischung aus konzentrierte Schwefelsäure und 30% H_2O_2 verwendet werden (etwa 5:1).

Die entstandenen Nanopartikel sind nicht langzeitstabil. (Etwa eine Woche)

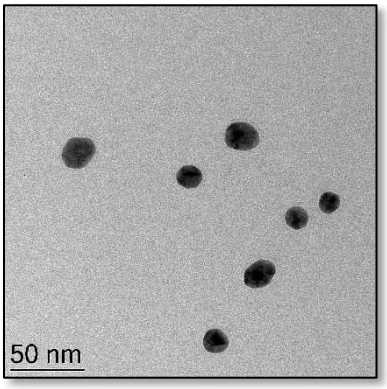


Abbildung 35 Elektronenmikroskopische Aufnahme von Titandioxidnanopartikeln

Ergebnis

Die Nanopartikel haben eine durchschnittliche Größe von 20 bis 27 nm.

Literatur:

Griebler, W.-D. (2005): Nano-Titandioxid. PdN-Chis 3/54. S. 7-12.

Versuch 13: Entfärbung einer Permanganatlösung (1 von 1)

Demonstration der katalytischen Wirkung von Nanopartikeln:

Katalyse einer Redoxreaktion: Entfärbung einer Permanganat-Lösung

Zeitbedarf

Versuchsvorbereitung: 2 min

Dauer des Versuches 15 min

Chemikalien

- 10 ml Kaliumpermanganat-Lösung (1 Spatelspitze festes Kaliumpermanganat auf 10 ml
  - destilliertem Wasser)
- 10 ml 0.5% Natriumoxalat-Lösung (in destilliertem Wasser gelöst)
- 4 ml HCl, 2 molar
- Gold- bzw. Titandioxid-Nanopartikel

Entsorgung von genutzten Chemikalien

Die Vergleichslösung kann in den Abfluss entsorgt werden, Nanopartikel werden in den Schwermetallabfall entsorgt.

Geräte

- 2 Reagenzgläser
- Reagenzglasständer
- Pasteurpipetten + Pipettenhütchen
- Gefäße zum Ansetzen der Lösungen
- Waage
- Spatel

Durchführung

1. Ansetzen der Lösungen.
2. 3 ml Natriumoxalatlsg. in beide Reagenzgläser füllen.
3. ½ Pipette Permanganatlsg. (ca. 1 ml) in beide Reagenzgläser zugeben.
4. In eines der beiden Reagenzgläser kleine Menge Nanopartikel zugeben, schütteln.
5. ½ Pipette (etwa 0,5 ml) HCl zu beiden RG hinzugeben.

Beobachtung und Ergebnis

Nach 3 bis 4 min beginnt sich die Lösung mit den Nanopartikeln zu entfärben, nach 8 min ist diese Entfärbung vollständig. Nach 7 bis 10 min beginnt sich die Lösung im anderen Reagenzglas ebenfalls zu entfärben, nach etwa 16 min ist sie farblos.

Versuch 14: Zersetzung einer Wasserstoffperoxid–Lösung (1 von 1)

Demonstration der katalytischen Wirkung von Nanopartikeln:

Photokatalytische Wirkung von Titandioxid-Partikeln

Zeitbedarf

Versuchsvorbereitung: 2 min; Dauer des Versuches: 5 min

Chemikalien

- 20 ml H_2O_2-Lösung, 30%
- Gold-Nanopartikel

Entsorgung von genutzten Chemikalien

Sobald die Lösungen abreagiert haben, kann die Vergleichslösung in den Abfluss entsorgt werden. Nanopartikel gehören in den Schwermetallabfall.

Geräte

- 2 Reagenzgläser
- Reagenzglasständer
- Pasteurpipetten + Pipettenhütchen

Durchführung

- In die Reagenzgläser je 10 ml der Wasserstoffperoxid-Lösung einfüllen.
- In ein Reagenzglas die Nanopartikel zugeben (falls Gold-Nanopartikel in wässriger Lösung verwendet werden, das andere ebenfalls mit destilliertem Wasser auffüllen.), schütteln.

Tipps und Tricks

Aufsteigende Blasen können hinter einem dunklen Hintergrund besser erkannt werden.

Ergebnis, Beobachtung

In dem einen Reagenzglas mit Nanopartikeln fangen Bläschen an sich an den Wänden zu bilden, die langsam aufsteigen.

Hinweis

Ist einem dieser Effekt nicht stark genug, so kann man auch nach Zugabe von je 10 ml destilliertes Wasser in jedes Reagenzglas noch zusätzlich 1 ml Kupersulfat-Lösung (0,01 molar) zugeben. Eine ganz leichte Bläschenbildung kann man dann aber auch in den Vergleichsreagenzglas beobachten. In dem anderen kommt es jedoch zu wesentlich stärkerer Bläschenbildung.

Versuch 15: Entfärbung einer Kristallviolett-Lösung (1 von 2)

Demonstration der katalytischen Wirkung von Nanopartikeln:

Photokatalytische Wirkung von Titandioxid-Partikeln

Zeitbedarf

Versuchsvorbereitung: 5 min

Dauer des Versuches: etwa 2 h

Chemikalien

Kristallviolett-Lösung (1 Spatelspitze auf 10 bis 20 ml Ethanol)

Titandioxid-Nanopartikel (1 bis 2 Spatelspitzen Titandioxid in Rutil Modifikation)

10 bis 20 ml Ethanol

Entsorgung und Sicherheitshinweise

- Sicherheitshinweise: Nicht direkt in das UV Licht blicken.
- Entsorgung von genutzten Chemikalien: Die beschichteten Objektträger werden in den Feststoffabfall entsorgt, die übrige Kristallviolett-lösung wird in die organischen Lösungsmittelabfälle entsorgt.

Geräte

- 2 Objektträger
- Spatel
- Pipetten + Pipettenhütchen
- UV-Lampe < 380 nm

Durchführung

- Auf die Objektträger werden jeweils eine bis zwei Spatelspitzen Rutil bzw. die Nanopartikel aufgebracht.
- Mit einer Pipette wird die Kristallviolett-Lösung aufgebracht. Ein paar Tropfen genügen, um eine deutliche Färbung zu erreichen; falls sie doch nicht intensiv genug ist, antrocknen lassen, und nochmals ein paar Tropfen aufbringen.
- Beide Objektträger unter die UV-Lampe legen.

Versuch 15: Entfärbung einer Kristallviolett-Lösung (2 von 2)

Tipps und Tricks

Die Nanopartikel können direkt so hergestellt werden, dass sie den Objektträger bedecken (z.B. durch aufbringen auf diese vor dem Ausheizen im Muffelofen oder durch trocknen darauf bei in der Mikrowelle hergestellten Partikeln). Die UV-Lampe sollte die Wellenlänge 366 nm haben. Reines Sonnenlicht funktioniert auch, dauert aber zu lange (etwa 1 Tag).

Vorsicht mit der Kristallviolettlösung, diese färbt extrem stark!

Ergebnis, Beobachtungen

Nach ungefähr 1 bis 2 h sollte auf dem Objektträger mit den Nanopartikeln eine deutliche Entfärbung sichtbar sein. Eine vollständige Entfärbung ist durch längerdauernde Bestrahlung möglich.

Versuch 16: Antibakterielle Silbernanopartikel mit Zitronensaft (1 v. 3)

Zeitbedarf für die Versuchsvorbereitung

10 min

Dauer des Versuches

30 min (Achtung: Vorbereitung der Nanopartikellösungen und die antibakteriellen Test benötigen Verweildauern von ca. 4 h).

5 Minuten Nanotechnologie

Schon seit der Antike ist die reinigende Wirkung von Silber bekannt. Heute weiß man, dass Silberkationen die Zellmembran von Bakterien zerstören können und so antibakteriell wirken. Besonders wirksam gegen zahlreiche Bakterienarten sind Silbernanopartikel. Die Wirkung ist, wieso häufig bei nanoskaligen Objekten, auf das große Verhältnis von Oberfläche zu Volumen zurückzuführen.

Werden Oberflächen von Textilien, Gebrauchsgegenständen oder Wundverbände mit Silbernanopartikel ausgerüstet, dann bleiben sie weitgehend keimfrei, da abgeschiedene Bakterien abgetötet werden. Die Herstellung von Silbernanopartikeln kann durch Reduktion von Silbersalzen in Anwesenheit geeigneter Ligandensysteme, die die Silbernanopartikel stabilisieren, erfolgen. Ohne derartige Liganden erfolgt zwar auch die Reduktion der Silberkationen zu elementarem Silber aber es werden keine Silbernanopartikel gebildet (vergleiche Silberspiegelreaktion).

Die erfolgreiche Bildung von Silbernanopartikeln mit Durchmessern von ca. 20 nm kann man sehr leicht an der Bildung einer bräunlichen Lösung (genaugenommen muss man von einer Dispersion sprechen) erkennen (siehe Abbildung 36). Wird ein Textilstück mit einer derartigen Dispersion getränkt und anschließend auf einer Bakterienkolonie abgelegt, beobachtet man nach einigen Stunden um das Textilstück herum das Absterben der Bakterien (vergleiche Abbildung 37).

Abbildung 36
Bildung von Silbernanopartikeln

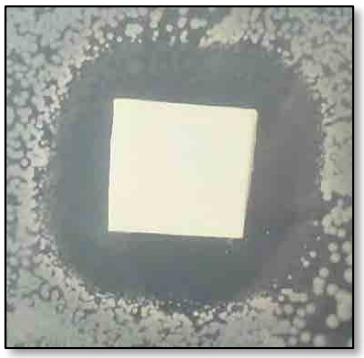


Abbildung 37
Textilstück mit Silbernanopartikellösung benetzt (siehe Quadrat) – die antibakterielle Wirkung auf Bakterienkolonien ist deutlich um das Textilstück zu sehen.

Versuch 16: Antibakterielle Silbernanopartikel mit Zitronensaft (2 v. 3)

Zielsetzung des Versuchs

Der Saft von Zitronen oder Zitronensaftkonzentrat wird für die Reduktion von Silbernitrat in wässriger Lösung zu Silbernanopartikeln genutzt. Mit der gebildeten Silbernanopartikeldispersion getränkte Baumwollstücke werden auf ihre antibakterielle Wirkung geprüft.

Chemikalien

Saft von 5 frischen Zitronen

50 ml 10^{-1} molarer, wässriger Sibernitratlösung

Entsorgung und Sicherheitshinweise

- Sicherheitshinweise
  Chemikalien siehe Chemikalienliste
- Entsorgung von genutzten Chemikalien

Silbernitratreste nicht in den Abguss gießen – Silbernitrat ist stark wassergefährdend! Silbernitratreste werden eingetrocknet und in den Schwermetallabfall oder mit dem Sonderabfall entsorgt. Der reine Zitronensaft kann in den Abguss entsorgt werden.

Geräte

- Standzylinder 100 ml
- Becherglas 250 ml
- Filter oder Zentrifuge
- Magnetrührer + Rührfisch oder Schüttler

Versuch 16: Antibakterielle Silbernanopartikel mit Zitronensaft (3 v. 3)

Durchführung

Herstellung der Silbernanopartikel

Durch Pressen von 3 frischen Zitronen erhält man ca. 30 ml Saft der von Schwebstoffen durch Zentrifugation oder Filtration weitgehend befreit wird. 20 ml dieses Saft wird unter Rühren bei Raumtemperatur vorsichtig mit ca. 50 ml 10-1 molarer Silbernitratlösung versetzt. Nach ca. 4 Stunden bildet sich eine braungefärbte Dispersion. Noch besser geht es mit Zitronensaftkonzentrat (20 ml) + 20 ml 10-1 molarer Silbernitratlösung.

Überprüfung der antibakteriellen Wirkung

Kleine Baumwollstückchen werden mit der Silbernanopartikeldispersion getränkt und anschließend über Nacht getrocknet. Mit ungewaschenen Fingern wird in ca. 50 ml Wasser gerührt (je schmutziger die Finger desto besser, noch besser geht natürlich eine eigens hergestellte Bakteriensuspension). Von diesem Wasser werden einige Tropfen mit einem gebogenen Metalldraht (z. B. Büroklammer, auf einer Agarplatte verteilt und mit dem Silbernanopartikelgetränkten Baumwolltuch abgedeckt und bei ca. 37°C über Nacht erwärmt, bis sich Bakterienkolonien gebildet haben. Nun werden die mit Silbernanopartikeln getränkten Baumwollproben auf die Bakterienkolonien gelegt. Zur Kontrolle sollte auch eine unbehandelte Baumwollprobe eingesetzt werden.

Tipps und Tricks

Die entstandene Silbernanopartikellösung ist nicht langzeitstabil (ca. 1 Woche). Durch Verwendung von mehr oder weniger Silbernitratlösung kann man die Silberanopartikelgröße variieren.

Ergebnis

Nach einigen Stunden erkennt man das Absterben der Bakterien an einer klaren bakterienfreien Zone um die behandelten Baumwollproben (durch sogenanntes Leaching der Silberionen). Dagegen beobachtet man um die unbehandelte Probe herum weiterhin Bakterien.

Versuch 17: Goldsole als farbige Dispersionskolloide (1 von 4)

Themengebiet

Dispersionskolloide

Zeitbedarf

In Abhängigkeit vom unterrichtlichen Einsatz; für die Experimente ca. 20 min

Unterrichtliche Voraussetzungen

Stoffgemische, d.h. grobdisperse Systeme, ggfs. Farbtheorie (Q2), Oxidationszahlen, Redoxbegriff

Hier werden die Versuche im Rahmen der Erkundung und Beschreibung der optischen Eigenschaften kolloider Systeme eingesetzt. Allerdings lassen sich die Experimente auch bei der Erarbeitung wesentlicher Aspekte der Redoxchemie sinnvoll einbinden.

Geeignet ab Klassenstufe

Je nach Grad der didaktischen Reduktion ab Klassenstufe 9.

5 Minuten Nanotechnologie

Das vorgestellte Experiment fokussiert auf Vorgänge in Kolloiden. Unter Kolloiden oder auch Solen versteht man Stoffe, die in einem Dispergiermittel verteilt sind und eine Dimension von ca. 10 bis 100 nm besitzen. Diese Teilchen sind auch unter dem Mikroskop dem menschlichen Auge nicht zugänglich, da sie kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes (ca. 400 – 800 nm), sodass solche kolloiddispersen Systeme für den menschlichen Betrachter als Lösungen erscheinen.

Kolloide wurden schon seit der Mitte des 19. Jahrhunderts beschrieben, bahnbrechend von *Thomas Graham* (1805-1869), der auch als Namensgeber der Kolloide (aus dem Griechischen, *leimartig*) fungierte. In Bezug auf die Partikeldurchmesser des dispergierten Stoffes stehen die Kolloide zwischen den echten Lösungen und den grobdispersen Systemen, die Schülerinnen und Schüler im Rahmen des Anfangsunterrichts als homogene und heterogene Stoffgemische kennenlernen und mit Hilfe einfacher Teilchenmodelle beschreiben können.

Ziele

Die Schülerinnen und Schüler stellen einen Zusammenhang zwischen der Farbe und damit der Wellenlänge des absorbierten Lichtes und der Teilchengröße von Goldaggregaten her.

Vorbereitung

Gruppengröße: max. 4 Schülerinnen und Schüler, wenn eine 2er-Gruppe das blaue und die benachbarte 2er-Gruppe das rote Goldsol herstellt.

Bei allen Arbeiten müssen Kittel, Handschuhe und Schutzbrille getragen werden!

Versuch 17: Goldsole als farbige Dispersionskolloide (2 von 4)

Material, Geräte

- Blaues Goldsol:
  Reagenzglas
  Pipette
- Rotes Goldsol:
  Magnetrührer
  Becherglas (200 ml)
  Messpipette (10 ml)
  2 Pipetten
  pH-Papier
  Glasstab
  Rührfisch (2 cm)

Chemikalien

- Blaues Goldsol:
  wässrige Lösung von Tetrachloridogoldsäure (0,2%ig)
  Hydrazinhydrat (ca. 80%ig)
  Wasser
- Rotes Goldsol:
  wässrige Lösung von Tetrachloridogoldsäure (0,2%ig)
  wässrige Sodalösung (1%ig)
  wässrige Tanninlösung (1%ig)
  Wasser

Durchführung

- Blaues Goldsol:

  1 ml der Tetrachloridogoldsäure wird in 250 ml Wasser gegeben. Davon wird etwas in das Reagenzglas gefüllt und vorsichtig tropfenweise Hydrazin hinzugefügt. Das blaue Goldsol (schwache blau/violette Farbe) entsteht sofort.

- Rotes Goldsol:

  100 ml Wasser werden mit 5 ml der Tetrachloridogoldsäure versetzt, mit der Sodalösung sorgfältig neutralisiert und das Gemisch im Becherglas vorsichtig bis zum Sieden erhitzt. Man fügt in Zeitabständen von je dreißig Sekunden tropfenweise frisch zubereitete Tanninlösung hinzu. Es entsteht langsam innerhalb von wenigen Minuten ein leuchtend tiefrotes Goldsol.

Versuch 17: Goldsole als farbige Dispersionskolloide (3 von 4)

Erklärung

Bei diesem Versuch macht man sich die Tatsache zunutze, dass der ursprünglich in der wässrigen Phase aufgrund des gelösten Zustands homogen verteilte Tetrachloridogold-Komplex durch Reduktion in die elementare wasserunlösliche Form überführt wird, aber weiterhin fein verteilt im Wasser vorliegt. Im Fall des blauen Goldsols bilden sich unmittelbar nach der Reduktion Goldaggregate, die eine Größe von ca. 45 nm besitzen. Die Keimbildung wird nicht durch Schutzkolloide erschwert, da weder Hydrazin noch der bei der Redox-Reaktion entstehende molekulare Stickstoff in der Lage ist, diese Schutzfunktion auszuüben.

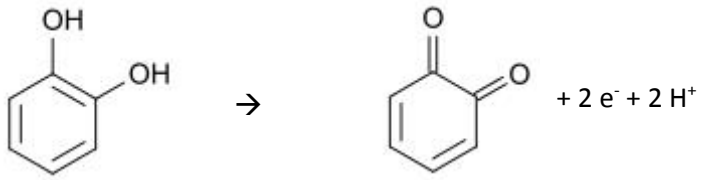
Beim blauen Goldsol wird Hydrazin als Reduktionsmittel verwendet. Die Redoxgleichung für die Bildung des blauen Goldsols lautet:

$$4\ AuCl_4^- + H_3O^+ + 3\ N_2H_5^+ + 15\ H_2O \rightarrow 4\ Au + 3\ N_2\uparrow + 16\ H_3O^+ + 16\ Cl^-$$

$$[Au_x] + n\ Cl^- + n\ H_3O^+ \rightarrow [Au_x](Cl^-)_n + n\ H_3O^+$$

Beim roten Goldsol wird als Reduktionsmittel eine Tannin-Lösung verwendet, was eine Teilchengröße der Goldaggregate von ca. 0,2 bis 15 nm verursacht. Die geringere Größe der Aggregate im roten Goldsol lässt sich mit dem Reduktionsmittel erklären, das als so genanntes Schutzkolloid im Moment der Keimbildung die Bildung größerer Teilchen verhindert. Tannin ist ein Oberbegriff für eine ganze Reihe von Verbindungen, deren Gemeinsamkeit darin besteht, dass sie zu den Polyhydroxiphenolen gehören, also aromatische Verbindungen mit zahlreichen Hydroxy-Gruppen sind. Aus diesem Grund besitzen sie sowohl hydrophile Hydroxy-Gruppen als auch hydrophobe Phenyl- und Alkyl-Gruppen und sind in der Lage, Wechselwirkungen mit dem Lösungsmittel und dem dispergierten Stoff einzugehen und damit eine weitere Agglomeration der Goldteilchen zu verhindern.

Tannine finden sich unter anderem in Wein, grünem und schwarzem Tee. Die Tannine lassen sich recht leicht oxidieren, sind also Reduktionsmittel. Da die Molekülmasse aufgrund der Molekülgröße der Tannine teilweise sehr deutlich über 500 u liegt, wird hier auf Strukturformeln verzichtet. Bei der Aufstellung der Redoxgleichungen kann vereinfachend davon ausgegangen werden, dass die Gold(IV)-Ionen wie im Fall des blauen Goldsols zu elementarem Gold reduziert und die Tannine als Brenzkatechin-Derivate zu Ortho-Chinonderivaten oxidiert werden.



Versuch 17: Goldsole als farbige Dispersionskolloide (4 von 4)

Zusätzliche Informationen

Gold und Kupfer sind die bekanntesten Beispiele für Metalle, die neben dem Metallglanz auch eine charakteristische Farbe aufweisen. Während alle Metalle große Bereiche der auf sie treffenden elektromagnetischen Strahlung reflektieren und dadurch ihren typischen Glanz erhalten, absorbieren Kupfer und Gold auch Anteile des sichtbaren Lichtes und erscheinen dadurch farbig. Allerdings wird auch bei Gold und Kupfer der allergrößte Anteil der eintreffenden elektromagnetischen Strahlung reflektiert. Anders verhält es sich bei Goldagglomeraten im Nano-Bereich. Wie die Experimente zeigen, absorbieren Goldteilchen – in Abhängigkeit von der Teilchengröße – bevorzugt elektromagnetische Strahlung, wohingegen die Reflexion insbesondere bei sehr kleinen Agglomeraten zu vernachlässigen ist.

In der folgenden Tabelle ist die beobachtete Farbe in Abhängigkeit von der Teilchengröße dargestellt:

Tabelle 1 Zusammenhang zwischen Teilchengröße und Farbe wässriger kolloidaler Goldsole.

Teilchengröße (nm)	beobachtete Farbe
4	gelbrot
8	rot
22-30	tiefrot
55	violett
100	blau

Weiterführende Literatur

Unter www.lehrer-online.de (K. Prete, 2010) findet man einen sehr interessanten Beitrag, in dem zahlreiche Unterrichtsmaterialien zu den beiden Versuchen zur Verfügung gestellt werden und zudem Vorschläge gemacht werden, wie man beide Versuche in eine vollständige Unterrichtsreihe mit Realexperiment und Computereinsatz einbetten kann.

Katrin Prete (2010), Herstellung und Untersuchung von Nano-Goldpartikel, online unter: https://www.lehreronline.de/unterricht/sekundarstufen/naturwissenschaften/chemie/unterrichtseinheit/ue/herstellung-und-untersuchung-von-nano-goldpartikeln/, abgerufen am 14.10.2016.

Versuch 18: Opale durch Elektrospinnen von Nanofaservliesen (1 von 6)

Zeitbedarf – Versuchsvorbereitung (pro Vlies)

10 bis 15 min (Achtung: Das Auflösen des Polymers benötigt ca. 1 Tag).

Dauer des Versuchs

ca. 1 h

5 Minuten Nanotechnologie

Die Natur begeistert immer wieder durch ihre Farbenpracht. Diese Farbenpracht kann die Folge von Pigmenten bzw. Farbgebern sein, die in diesen natürlichen Objekten eingelagert sind. In vielen anderen Fällen beruht die Farberscheinung aber auf der Beugung von Licht; die Farbe ist dann z. B. abhängig von dem Beobachtungswinkel, dem Einfallwinkel des Lichts auf das Objekt. Männliche Pfauenfedern mit ihren Schattierungen zwischen Blau, Grün, Gelb und Braun, die schimmernden Flügel bestimmter Schmetterlinge, farbenprächtige Kieselalgen aber auch natürliche Opale (Opallios, griech. Farbwechsel sehen) mit ihrem herrlichen Farbenspiel sind Beispiele hierfür. Die Farbe ist in diesen Fällen die Folge einer sehr regelmäßigen Anordnung von optischen Objekten mit Abmessungen in der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichts, also mit Abmessungen im Bereich von 380 bis 780 nm. Opale sind z. B. aus einer periodischen Anordnung von Silikatkugeln aufgebaut, die in eine wasserhaltige Silikatmatrix eingebettet sind; die Farberscheinungen werden über den Wassergehalt moduliert. Bei der Pfauenfeder lassen sich die Farberscheinungen auf eine zweidimensionale regelmäßige Anordnung von Stäbchen des Farbstoffs Melamin, eingebettet in eine Keratinmatrix, zurückführen. Die Farbe wird hier über die Anzahl und Abstände der Stäbchen moduliert. Für solche periodischen Strukturen, seien sie dreidimensional, zweidimensional (z. B. Pfauenfeder) oder eindimensional (z. B. cholesterische Flüssigkristalle) wurde der Begriff *photonische Kristalle* geprägt. Synthetische photonische Kristalle bestehen aus nanostrukturierten Polymeren, Gläsern, Metalloxiden oder auch Halbleitern. Dieser Aufbau führt zu einer Struktur mit einer periodisch modulierten Dielektrizitätskonstante (Brechungsindex). Licht verhält sich nun beim Durchgang durch einen solchen photonischen Kristall in vieler Hinsicht ähnlich wie Elektronen im Halbleiterkristall; es existiert für die Lichtausbreitung eine Bandstruktur analog zu der für die Elektronenausbreitung. Eine Eigenschaft photonischer Kristalle ist daher die Existenz eines Frequenzbandes, in dem der Lichtaustritt in allen Raumrichtungen verboten ist; von außen einfallendes Licht wird ideal reflektiert. Photonische Kristalle lassen sich auf sehr vielfältige Arten herstellen. So werden z. B. künstliche Opale durch eine Selbstorganisation von Kugeln aus einer kolloidalen Suspension von identischen Kugeln hergestellt. Diese kugelförmigen Partikel bestehen sehr häufig aus Siliziumdioxid oder Polymeren. Andere Wege zu 1d, 2d und auch 3d photonischer Kristalle bestehen in dem Bohren von Kanälen in sonst optisch homogenen Materialien. Die Erzeugung von Nanoporen in Aluminium oder Silizium mittels elektrochemischer Prozesse – oft unterstützt durch lithographische Verfahren, ist ein Beispiel. Eindimensionale photonische Kristalle können durch Schichtanordnungen von $\lambda/4$-Schichten aus Stoffen mit unterschiedlichem Brechungsindex hergestellt werden. Dieser Ansatz wird z. B. auch bei Halbleitern verfolgt, wobei die Abscheidung typisch aus der Gasphase erfolgt.

Versuch 18: Opale durch Elektrospinnen von Nanofaservliesen (2 von 6)

Bei den sogenannten cholesterischen Phasen bildet sich dank des besonderen chemischen Aufbaus der Moleküle, die insbesondere eine optisch aktive Gruppen tragen, bei der für flüssige Kristalle auftretenden Selbstorganisation in flüssiger Phase eine helikale Schichtstruktur heraus, mit einer Periodizität, die im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt.

Elektrospinnen von Polymernanofaservliesen

Elektrospinnen ist eine bestens etablierte Methode zur Herstellung von kontinuierlichen Polymerfasern mit sehr unterschiedlichen Durchmessern meist im Bereich kleiner als 1.000 nm (1 µm). Beim Elektrospinnen werden Tropfen einer viskosen Polymerlösung elektrostatisch aufgeladen, zur Gegenelektrode hin beschleunigt und dabei so verstreckt, dass dort nach Verdampfen des Lösungsmittels Gewebe aus unorientierten Polymernanofasern (Nanofaservliese) abgelegt werden.

Die Durchmesser der langen Polymernanofasern hängen von vielen Parametern ab, z. B. von der Art des Polymers (Glaspunkt, Molekulargewicht, Molekulargewichtsverteilung), dem Lösungsmittel (Dampfdruck, Polarität), der Lösung (Viskosität, Oberflächenspannung, elektrische Leitfähigkeit), den Elektroden (Abstand, Form, Feldstärke), der Atmosphäre (Luftfeuchtigkeit), dem Substrat (Leitfähigkeit) etc. Ein besonderer Vorteil des Elektrospinnens ist, das relativ einfach zusätzliche Materialien in die Polymerfasern eingelagert werden können, z. B. Nanopartikel, Medikamente, Farbstoffe, Katalysatoren, Viren, Bakterien etc. Derartige Polymernanofaservliese finden bereits zahlreiche Anwendungen in der Filtertechnik.

Wird beim Elektrospinnen als Gegenelektrode eine schnell rotierende Walze oder Metallrahmen eingesetzt (Abbildung 39), dann werden Polymernanofasern gebildet, die bei geeignetem Durchmesser im sichtbaren Licht Reflektionsfarben zeigen, wie man dies von Opalen kennt.

Abbildung 38 Polymernanofasern.

Versuch 18: Opale durch Elektrospinnen von Nanofaservliesen (3 von 6)

Einführung zum Versuch

Es sollen orientierte elektrogesponnene Nanofasergewebe mit unterschiedlichen Faserdurch-messern und Schichtdicken (Flächengewichten) als photonische Kristalle hergestellt werden und deren Reflexionsfarben in Abhängigkeit von der Orientierung des Faserdurchmessers untersucht werden. Mittels eines Polarisators soll die Anwendbarkeit der Gewebe als Polarisationsfilter demonstriert werden.

Vorbereitung

Elektrospinnanlage

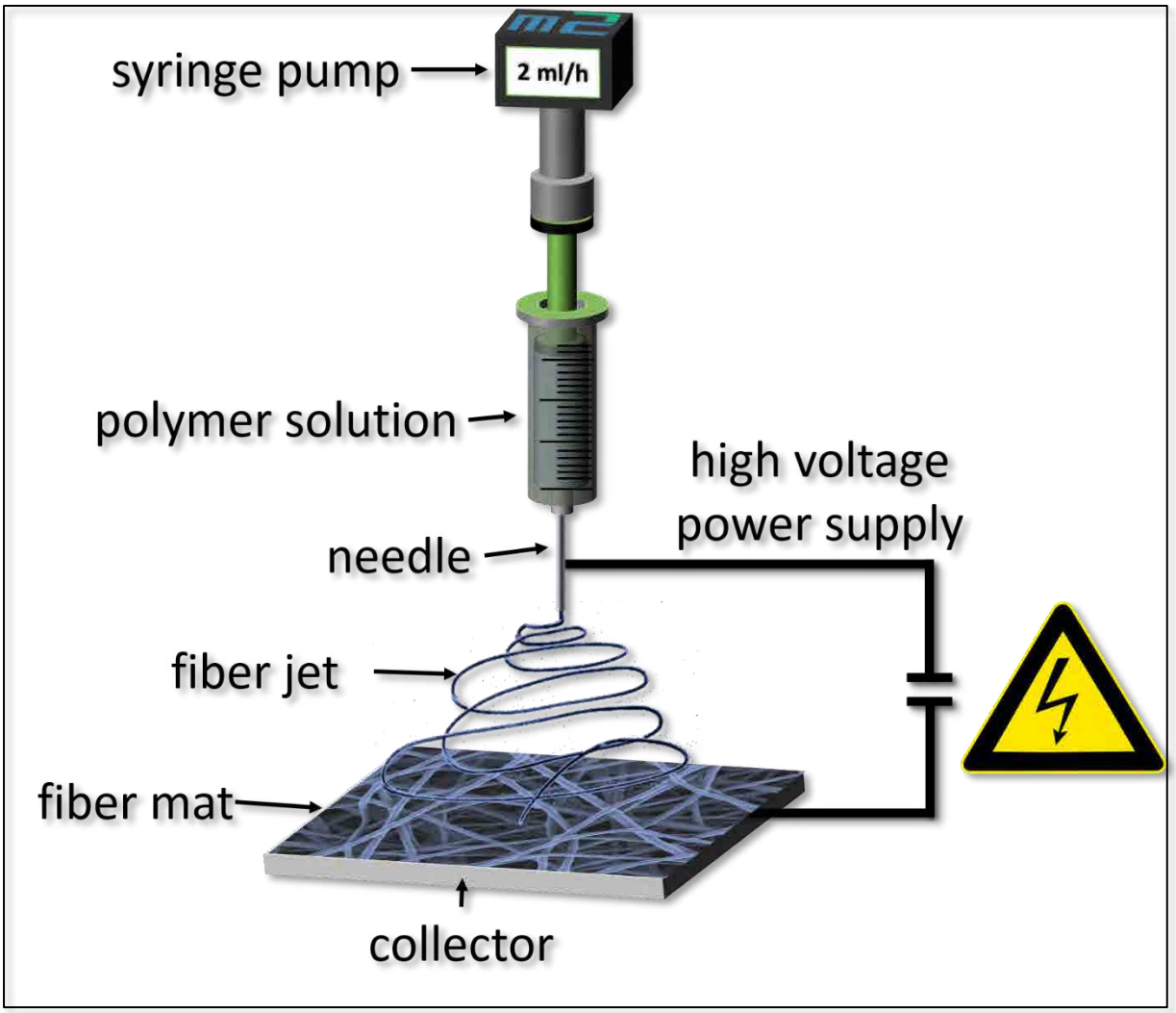


Abbildung 39 schematischer Aufbau einer Elektrospinanlage (Achtung: Der Aufbau und Betrieb der Anlage sollte von einem in Elektrotechnik Fachkundigen ausgeführt werden.)

Versuch 18: Opale durch Elektrospinnen von Nanofaservliesen (4 von 6)

Eine Elektrospinnanlage kann leicht nach dem Schema in Abbildung 39 selbst gebaut werden. Man benötigt eine Spritze mit Metallkanüle und einen Rahmen aus Metalldraht (ca. 2 cm x 5 cm), der auf eine Metallplatte als Gegenelektrode, die gut geerdet sein muss, gelegt wird. Die Spritze wird mit der Spinnlösung gefüllt und ca. 10 bis 20 cm über der Gegenelektrode an einem isolierten Stativ aufgehängt. Es wird ein Tropfen der Lösung aus der Kanüle gedrückt. Nun wird die Spannungsquelle mit der Kanüle der Spritze und der Gegenelektrode (Polung ist beliebig) verbunden und Hochspannung von 20 bis 30 kV angelegt. Keinesfalls darf die Anlage, insbesondere die Spritze oder die Gegenelektrode jetzt berührt werden.

Bei ausreichender Spannung wird die Bildung von Nanofasern beobachtet (Abbildung 40), die sich als Vlies auf der Gegenelektrode ablegen. Kontinuierlichen Lösungsvorschub aus der Spritze erreicht man mit einer Spritzenpumpe, die von dem Kolben der Spritze mit einem 5 cm langen Teflonblock isoliert wird. Sollte die Lösung durch Druck auf den Spritzenkolben manuell gefördert werden, **muss erst die Spannungsquelle abgeschaltet, die Elektroden entfernt und anschließend die Kanüle der Spritze mit einem geerdeten Metallstab berührt werden**. Wird diese Anweisung nicht befolgt besteht die Gefahr eines heftigen Stromschlages.

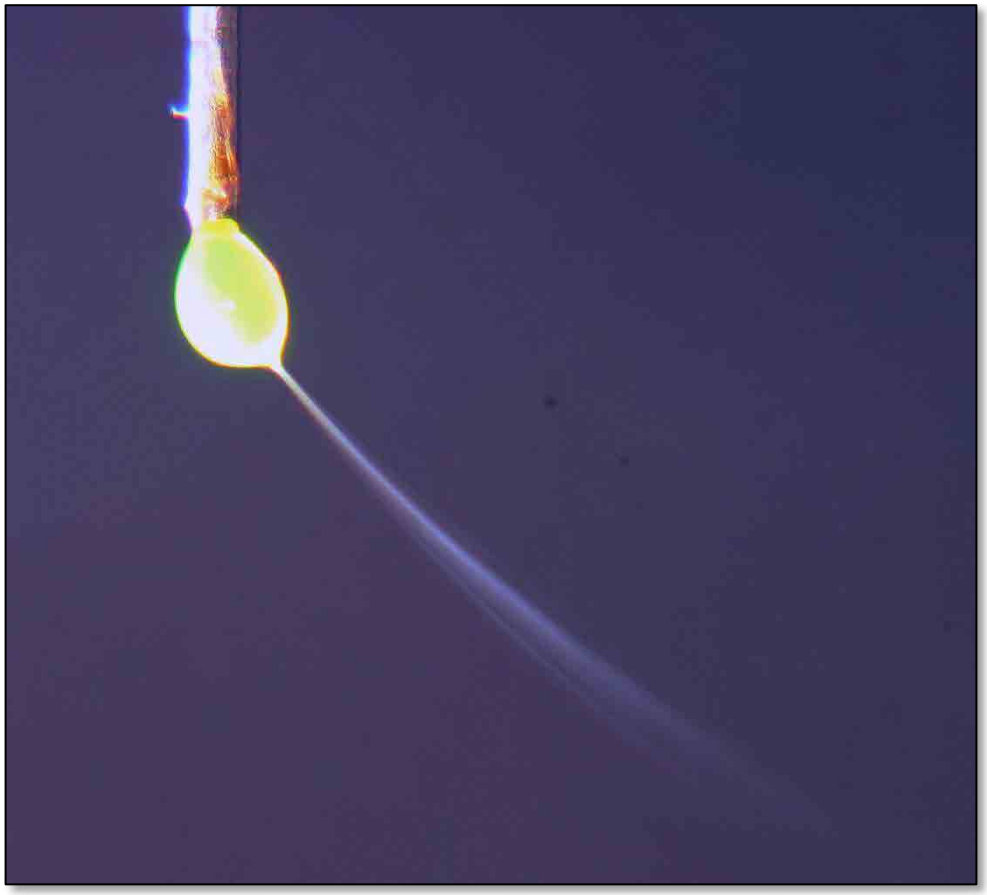


Abbildung 40 Austretende Spinnlösung.

Versuch 18: Opale durch Elektrospinnen von Nanofaservliesen (5 von 6)

Chemikalien

Polyamid 6

Ameisensäure

Entsorgung und Sicherheitshinweis

- *Sicherheitshinweise*
  Berührung von Anlagenteilen während des Elektrospinnens strikt vermeiden. Vor deren Berührung muss die Hochspannungsquelle abgeschaltet, der Netzstecker gezogen, alle Anlagenteile mit einem geerdeten Metallstab berührt werden. Dies gilt auch für die elektrogesponnenen Proben.
- *Entsorgung*
  Die verwendeten Elektrospinnspritzen werden mit Kanüle separat entsorgt. Restliche Polyamidlösung wird vorsichtig in 10fache Menge Wasser gegeben, das ausgefallene Polyamid abfiltiert und über den Hausmüll entsorgt. Das Filtrat kann in den Abguss gegeben werden.

Geräte

- Hochspannungsquelle
- 2 Anschlusskabel mit Krokodilklemmen
- 10 ml Plastikspritze mit Kanüle mit gerade Spitze und Kanülendurchmesser 0.3 mm
- Eventuell Spritzenpumpe
- Erlenmeyerkolben mit Verschluss zum Herstellen der Polyamidlösungen
- Magnetrührer mit Rührfisch

Durchführung

Durch Auflösen von Polyamid 6 in Ameisensäure werden Elektrospinnlösungen unterschiedlicher Konzentrationen hergestellt und daraus Fasern mit der bereitgestellten Elektrospinnanlage bei 30 bis 50 kV auf den Metallrahmen abgeschieden (ca. 0,5 h). Wichtig ist, dass zylindrische hochorientierte Fasern gebildet werden, die frei von Verdickungen sind (Kontrolle am digitalen Mikroskop). Es sollen Proben unterschiedlicher, aber möglichst einheitlicher Faserdurchmesser im Bereich von 300 bis 1.000 nm (mittlerer Durchmesser) hergestellt werden (Prüfen mittels optischer Mikroskopie). Durch Variation der Konzentration der Polyamidlösung kann der Durchmesser der Nanofasern verändert werden. Mittels visueller Kontrolle bei verschiedenen Winkeln wird das Reflektionsverhalten der Nanofasern charakterisiert und gegebenenfalls mit einer Digitalkamera (Video) dokumentiert.

Versuch 18: Opale durch Elektrospinnen von Nanofaservliesen (6 von 6)

Tipps und Tricks

Das Auflösen des Polyamids kann 1 Tag dauern und sollte im verschlossenen Gefäß bei guter Belüftung vorgenommen werden, da Ameisensäure stark ätzend riecht. Je nach Typ des Polyamids 6 benötigt man eine Konzentration von 10 bis 25 Gewichtsprozent Polyamid zum Elektrospinnen. Die Konsistenz der Lösung sollte wie dünnflüssiger Honig sein. Die Bildung der Nanofasern während des Elektrospinnens kann man gut im Gegenlicht beobachten. Achtung: Hochspannung – ausreichend Abstand halten.

Beobachtung

In Abhängigkeit von der Nanofaserdicke bilden sich Nanofaservliese mit orientierten Fasern, die je nach Faserdurchmesser Reflexionsfarben bei Lichteinfall zeigen.

Literatur

Dersch et al. (2003): J. Polym. Sci. A Polym. Chem. S. 41, 545.

Versuch 19: Photokatalytische Aktivität von Rutil und Anatas (1 von 2)

Zeitbedarf

Die Zeitdauer ist von der Intensität der UV-Strahlung abhängig. Bei ausreichender Intensität sind erste Effekte bereits nach weniger als einer Stunde beobachtbar. Meist dauert es aber länger.

5 Minuten Nanotechnologie

Titandixid kommt in der Natur in den drei verschiedenen Modifikationen Rutil, Anatas und Brookit vor. Industriell haben vor allem die Rutil- und die Anatasmodifikation eine großtechnische Bedeutung, während die Brookitmodifikation technisch keine größere Rolle spielt. Die Rutilmodifikation weist ein besonders hohes Deckungsvermögen (Brechungsindex von Rutil: 2,75; Brechungsindex von Anatas: 2,55) auf und wird daher vor allem als Weißpigment (oft auch Rutilweiß genannt) eingesetzt. Auch als UV-Licht-Blocker in Sonnenmilch wird Rutil zunehmend genutzt. Titandixid hat aber auch noch Halbleitereigenschaften und lässt sich vielfältig einsetzen.

Neben der Anwendung für den Bau einer Grätzelzelle (siehe Band 2) ist vor allem die photokatalytische Wirkung für die Herstellung von selbstreinigenden Oberflächen von technischer Bedeutung. Für die Photokatalyse eignet sich insbesondere Anatas, dessen Bandlücke bei 3,2 eV (Rutil 3,0 eV) liegt. Photonen deren Energie größer als die der Bandlücke ist, erzeugen durch den photoelektrischen Effekt *Elektronen-Loch-Paare*. Bei Anatas reicht bereits die Lichtenergie von UV-Licht einer Wellenlänge von 390 nm dafür aus. Mit Hilfe der Elektronen-Loch-Paare werden auf der Oberfläche des Titandioxids in wässriger Lösung unter Beteiligung von Sauerstoff Hydroxyl-Radikale gebildet, die zur Zersetzung von organischen Substanzen führen. Im Optimalfall zerfallen diese organischen Materialien dann bis zum CO_2 und H_2O.

Auf mit Nanopartikeln aus Titandioxid beschichteten Oberflächen, die Regen und Sonne ausgesetzt sind, werden daher organische Schmutzreste wie auch Bakterien zersetzt. Dieser selbstreinigende Effekt wird zwischenzeitlich z.B. in Wandfarben oder in Betonflächen eingesetzt. Entsprechend beschichtete Pflastersteine sollen außerdem zur Luftreinhaltung beitragen, da an ihrer Oberfläche Autoabgase, etc. katalytisch zersetzt werden.

Material

- Titandioxidpulver in der Rutilmodifikation
- Titandioxidpulver in der Anatasmodifikation
- Schuhkarton oder ähnliches zum Abdecken
- vier kleine Petrischalen
- Spatel
- Wasser
- Organischer Farbstoff (z.B. Methylenblau)

Versuch 19: Photokatalytische Aktivität von Rutil und Anatas (2 von 2)

Durchführung

Jeweils eine Spatelspitze Titandioxidpulver in der Rutil- bzw. Anatasmodifikation werden in einer kleinen Petrischale mit Wasser und etwas Farbstoff vermischt, so dass eine dünnflüssige Paste entsteht. Jeweils eine Petrischale mit der Rutil- bzw. der Anatasmodifikation werden unter eine UV-Lampe oder wahlweise ins Tageslicht (nur bei starker Lichtintensität) gestellt. Die verbleibenden Petrischalen mit dem Rutil- bzw. Anataspulver werden für den späteren Vergleich unter einen lichtdichten Karton gestellt.

Je nach Lichtintensität lässt sich nach einiger Zeit eine Entfärbung des Farbstoffes im Schälchen mit der Anatasmodifikation beobachten. Die Entfärbung der Rutilmodifikation ist erst deutlich später zu beobachten. Die beiden Kontrollproben unter dem Schuhkarton haben sich hingegen nicht entfärbt.

Abbildung 41 Links wurde der Farbstoff durch die photokatalytische Aktivität der Anatasmodifikation im Vergleich zur Kontrolle rechts deutlich entfärbt.

4. Kapitel: NANOTECHNOLOGIE UND BIOLOGIE

Autoren

Kapiteleinleitung
Prof. Dr. Wilhelm Barthlott – Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Versuchsanleitungen
StD Michael Funke – Gymnasium Zum Altenforst, Troisdorf

Biologische Oberflächen

von Professor em. Dr. Wilhelm Barthlott

Der Lotuseffekt

Mit die interessantesten Dinge in der belebten und unbelebten Natur spielen sich an Grenzflächen ab: von den feinsten Membranen in jeder unserer Körperzellen bis hin zu unserem Lebensraum, der Biosphäre, als Grenzfläche der Erde zur Unendlichkeit des Weltalls.

Alle Festköper haben eine Oberfläche, die sich im Bereich einiger Atomlagen merklich vom Volumen der Festkörper unterscheidet. Tatsächlich führt die Existenz von Oberflächen zu neuen physikalischen Eigenschaften des Festkörpers: Effekte, die man in der Nanotechnologie nutzen kann. Gerade in der Kombination von nanoskopischen und mikroskopischen Veränderungen der Oberfläche kann man Materialien veränderte, zum Teil völlig unerwartete neue Eigenschaften verleihen. Der wohlverstandenen Welt der Festkörper ist an ihrer Oberfläche im wahrsten Sinn des Wortes eine Grenze gesetzt. *Festkörper hat Gott geschaffen – ihre Oberfläche hat der Teufel gemacht* – das treffende Zitat wird dem Physiker und Nobelpreisträger Wolfgang Pauli zugeschrieben. Die Analyse war schwierig und gelang erst in jüngster Zeit, vor allem der Fortschritt in der *Elektronen-Mikroskopie* bis zur *Atomic Force Microscope* spielte die entscheidende Rolle.

Deshalb spielte Nanotechnologie in der Schule in meinem Physik-Unterricht überhaupt keine Rolle: Nicht einmal das Wort existierte damals. Einige Jahre nach dem Abitur untersuchte ich als junger Biologe an der Universität Heidelberg mit einem der ersten auf den Markt gekommenen Raster-Elektronenmikroskope systematisch die Oberflächen von Pflanzen. Am Ende meiner Doktorarbeit 1973 begann mir etwas Merkwürdiges aufzufallen: Die meisten Blätter aus dem Botanischen Garten waren unter der hohen Vergrößerung des Mikroskops mit feinen Staubpartikeln, Gießwasserrückständen oder Pilzsporen kontaminiert. Aber bestimmte Pflanzen, wie die Kapuzinerkresse oder Lotusblumen, waren immer makellos sauber, obwohl sie im Garten neben den *Schmutzfinken* kultiviert waren. Sie waren alle extrem wasserabstoßend (über 20 Jahre später schufen wir dafür den Begriff *superhydrophob*) und wir konnten 1976 ein neues biologisches Phänomen beschreiben: die *Selbstreinigung ultra- und mikrostrukturierter hydrophober Oberflächen*. Es dauerte, in einer Zeit ohne Internet-Suchmaschinen, ein Dutzend Jahre bis ich zu meinem Erstaunen bemerkte, dass dieses Phänomen Technikern, Materialwissenschaftlern und Physikern gänzlich unbekannt war. Ab 1990 gelang an der Universität Bonn mit den Mitarbeitern eine *biomimetische* Umsetzung des Prinzips auf technische Oberflächen, ich erfand 1992 die Kurzbezeichnung *Lotus-Effekt*, der zu einem weltweiten Paradigmenwechsel in der Oberflächentechnologie führte.

Im Nachhinein scheint das ganze beinahe unglaubwürdig. Wie konnte eine weltweit operierende Industrie auf der Suche nach anti-adhäsiver Oberfläche übersehen, dass klebriger Honig spurlos von vielen Pflanzenblättern in kugelrunden Tropfen abrollt? Gerade Lotus ist in asiatischen Religionen seit Jahrtausenden ein Symbol der Reinheit, weil er seine Blätter sauber aus dem Schlamm entfaltet und Schmutz mit dem Wasser abrollt. Das kann man in 2.000 Jahre alten indischen und chinesischen Texten nachlesen aber die etablierte Naturwissenschaft nahm so etwas nicht ernst. Den Lotus-Effekt hätten vielleicht auch Schülerinnen und Schüler einer Oberstufe entdecken und aufklären können. Dass grundlegend neue und bedeutende wissenschaftliche Ergebnisse an Schulen erarbeitet werden, zeigen die jährlichen Wettbewerbe von Jugend Forscht.

Technische Produkte nach dem Vorbild biologischer Vorbilder spielen eine immer bedeutendere Rolle: Die *Bionik* oder *Biomimikry* hat sich in den letzten drei Jahrzehnten zu einem eigenen Forschungszweig entwickelt. Etwa 1,8 Millionen verschiedene Arten von Lebewesen sind bekannt. Aber alle Hochrechnungen zeigen, dass es mindestens 9, vielleicht sogar über 15 Millionen Spezies auf der Erde gibt, also ¾ aller Mitbewohner unseres Planeten kennen wir nicht. Und alle sind im Verlaufe von Millionen Jahren der Evolution, also Mutation und Selektion (Versuch und Irrtum könnte ein Ingenieur sagen) optimiert – ohne zu rechnen und zu modellieren, ohne Formeln und ohne Elektronenmikroskope. Millionen Jahre Entwicklungsarbeit stehen kostenlos zur Verfügung – man muss nur genau hinschauen. Neben altbekannten Beispielen wie dem Klettverschluss (nach den Früchten der Klette) sind es vor allem auch Oberflächeneffekte in mikroskopischen bis nanoskopischen Dimensionen. Es gibt eine *Nanotechnologie* der Natur von den irisierenden Blaufarben der Schillerfalter über den *Lotus-Effekt* bis hin zum *Salvinia-Effekt* als reibungsreduzierende und damit energiesparende Schiffsbeschichtung, der heute im Fokus der eigenen Forschung steht.

Michael Phelps, der erfolgreichste Schwimmer der Gegenwart, gewann allein acht seiner 18 Goldmedaillen bei den Olympischen Spielen in Peking 2008. In den Folgejahren wurden alle Schwimm-Weltrekorde gebrochen. Es war aber nicht die bessere Leistung der Schwimmer, sondern die neuartige Oberflächentechnologie bionischer Schwimmanzüge nach dem Vorbild der Haifischhaut. Die Grundlagenforschung dazu wurde ab 1974 an der Technischen Universität Berlin von D. W. Bechert und Mitarbeitern durchgeführt.

In weiten Bereichen der Bionik und Nanotechnologie gehört Deutschland zu den weltweit führenden Nationen. Und das soll so bleiben. Bildung und Ausbildung bedeutet beinahe alles. Den Lotus-Effekt hätte man beinahe auch an einer Schule entdecken können, aber noch vieles ist unbekannt. Welch eine Herausforderung im Zeitalter von *Jugend Forscht*!

Widmung:

Dieses Kapitel ist Herrn Dr. Jürgen Nieder, dem langjährigen Mitarbeiter von Herrn Professor Barthlott, gewidmet, der vor Fertigstellung dieses Buches nach schwerer Krankheit verstarb.

Einführung: Benetzungsvermögen pflanzlicher Oberflächen (1 von 1)

Die Benetzbarkeit pflanzlicher Oberflächen spielt eine wesentliche Rolle in der Interaktion der Pflanzen mit ihrer Umwelt. Eine wichtige Bedingung für Wasserpflanzen ist ihre Hydrophilie. Bei Landpflanzen gibt es hingegen eine große Bandbreite zwischen superhydrophilen und superhydrophoben Oberflächen.

Grundsätzlich lassen sich die pflanzlichen Oberflächen nach ihrem Benetzungsvermögen in vier große Gruppen einteilen:

- Superhydrophile Oberflächen
- Hydrophile Oberflächen
- Hydrophobe Oberflächen
- Superhydrophobe Oberflächen

Diese Benetzungseigenschaften basieren auf unterschiedliche strukturelle Eigenschaften der pflanzlichen Oberflächen. Sie werden durch die chemische Zusammensetzung der Oberflächenmoleküle sowie durch die Strukturierung dieser Oberflächen bestimmt. Diese Strukturen bewegen sich zwischen mikroskopische bis runter auf nanoskopische Dimensionen.

Hydrophile und superhydrophile Pflanzenoberflächen findet man bei allen Wasserpflanzen und einigen Landpflanzen. Sie dienen z.B. beim Kaktus *Copiapoa cinerea*, aus der Atacama Wüste, dem Einsammeln von Nebelwasser.

Superhydrophobizität findet sich nur bei Landpflanzen – aber auch bei zahlreichen Tieren (z.B. einige Insektenflügel). Der bekannte Lotuseffekt basiert auf Superhydrophobizität. Voraussetzung für diese Eigenschaft ist die chemische Hydrophobizität der Oberfläche und eine hierarchische Strukturierung der Oberfläche auf zwei und mehr Ebenen. In Pflanzen wird dies durch dreidimensionale Wachskristalloide auf der Blattoberfläche verwirklicht. Die Struktur dieser Wachskristalloide ist bei den unterschiedlichen Pflanzen sehr unterschiedlich beschaffen.

Ebenso gibt es zahlreiche Landpflanzen, die den gleichen Effekt durch haarartigen Strukturen auf ihrer Blattoberfläche realisieren, ohne dass die Oberfläche auf molekularer Ebene weiter strukturiert wird. Ein bekanntes Beispiel ist hierfür der Frauenmantel, *Allchemilla vulgaris*. Seine Oberfläche zeigt deutliche superhydrophe Eigenschaften, die durch die mehrzelligen Haare an seiner Blattoberfläche hervorgerufen werden. Den gleichen Effekt zeigen auch einige Vogelfedern.

Weiterführende Übersichtsartikel (open-access-publication):

Barthlott, W., Mail, M., Bhushan, B. & K. Koch (2017), Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations. – Nano-Micro Letters,9:23, Springer
https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-016-0125-1

Atlas of Science:
http://atlasofscience.org/repelling-water-and-dirt-superhydrophobic-biological-surfaces-and-biomimetic-innovations/

Versuch 20: Kontaktwinkelbestimmung (1 von 4)

Einführung

Eine wichtige Voraussetzung für die Selbstreinigung von Oberflächen ist es, dass sie superhydrophob sind. Superhydrophobe Oberflächen sind besonders wasserabstoßend. Ein wichtiges Indiz dafür ist der Kontaktwinkel, der sich zwischen der Oberfläche und einem darauf liegendem Wassertropfen ausbildet.

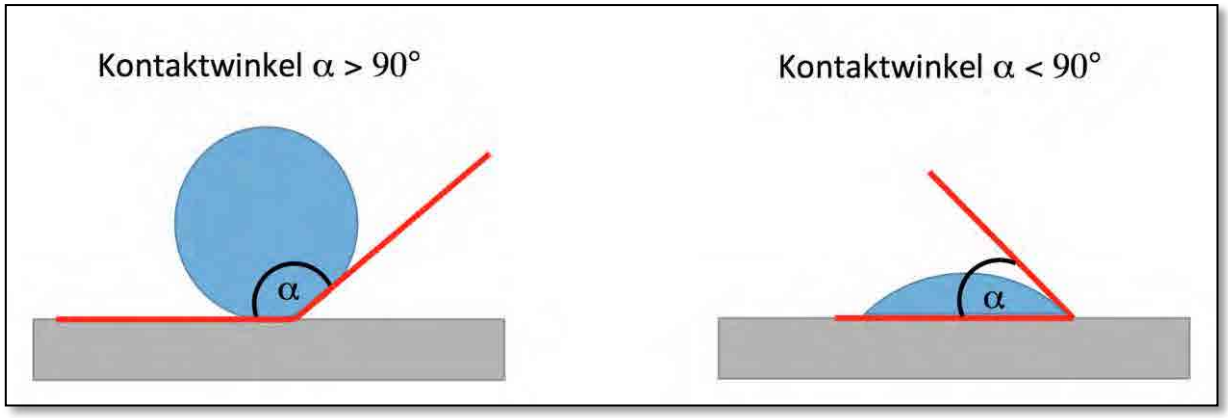


Abbildung 42 Je nach Oberflächenbeschaffenheit bildet ein Wassertropfen einen unterschiedlichen Kontaktwinkel aus.

Der Kontaktwinkel an der Oberfläche eines Festkörpers wird durch das Verhältnis der Grenzflächenspannungen zwischen Wasser/Luft, Festkörper/Wasser und Festkörper/Luft bestimmt. Je nach ihrer Benetzbarkeit (siehe Kontaktwinkel) werden Festkörperoberflächen unterschiedlich eingeteilt:

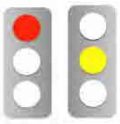
- Superhydrophil: 0° > α < 10° (z.B. dünne Filme aus Titandioxid)
- Hydrophile Oberflächen: 10° > α < 90°
- Hydrophobe Oberflächen: 90° > α < 150° (z.B. Teflon 100°)
- Superhydrophob: α > 150°

Oberflächen mit einem Kontaktwinkel von 0° bezeichnet man als **Superhydrophil**. Solch eine Oberfläche erhält man z.B. durch dünne Filme aus Titandioxid. Eine technische Anwendung finden superhydrophile Oberflächen dort, wo z.B. die diffuse Reflexion von Licht an Wassertropfen die Sicht behindert. So führen z.B. kleine Wassertropfen auf dem Visier eines Motorradhelms dazu, dass die Sicht des Fahrers durch Lichtreflexion behindert wird. Eine superhydrophile Oberfläche verhindert die Tröpfchenbildung und erleichtert damit auch die Sicht durch das Visier.

Auf einer superhydrophilen Oberfläche würde sich ein gleichmäßiger Wasserfilm auf der Oberfläche verteilen, der diese diffusen Lichtreflexionen nicht aufweist. Oberflächen, die einen Kontaktwinkel von weniger als 90° ausbilden, bezeichnet man als **Hydrophil**.

Von einer **hydrophoben** Oberfläche spricht man, wenn der Kontaktwinkel größer als 90° ist. Teflon weist z.B. einen Kontaktwinkel zwischen 100 und 120° auf, was seine besonderen Eigenschaften erklärt. Erst

Versuch 20: Kontaktwinkelbestimmung (2 von 4)



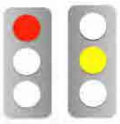
ab einem Kontaktwinkel von größer als 150° spricht man von einer **superhydrophoben** Oberfläche. Viele Pflanzen, aber auch einige Tiere besitzen superhydrophobe Oberflächen, wie z.B. bei der Lotuspflanze, die in schlammigen Gewässern Südostasiens vorkommt. Da die Blätter und Blüten der Lotusblume nie verschmutzen, gilt diese Pflanze auch als Symbol der Reinheit. Der theoretisch denkbare Kontaktwinkel von 180° wird in der Natur nie erreicht.

Die Hydrophobizität ist eine wichtige Voraussetzung für eine selbstreinigende Oberfläche, aber nicht jede hydrophobe Oberfläche ist gleichzeitig auch eine selbstreinigende Oberfläche. Für eine selbstreinigende Oberfläche ist neben der Hydrophobizität auch noch eine spezielle Nanostrukturierung der Oberfläche notwendig, die die Kontaktfläche zwischen Verunreinigung und Oberfläche minimiert.

Zusätzliche Informationen

Für weitere Informationen siehe auch: www.lotus-salvinia.de

Versuch 20: Kontaktwinkelbestimmung (3 von 4)



Zeitbedarf

Schülerversuch mit ausgewählten Pflanzen: ca. 20 min

als Miniforschungsprojekt: ca. 2 bis 3 Schulstunden

Ziele

Experimentelle Bestimmung von Kontaktwinkeln verschiedener Pflanzenarten mit einfachen schulischen Mitteln.

Vorbereitung

Gruppengröße: jeweils ca. 2 bis 4 Schülerinnen und Schüler

Material

Zur Demonstration sollte man passende Pflanzen zur Auswahl geben:

- Pflanzen mit hydrophilen Oberflächen: Grünlilie, submerge Pflanzen wie z.B.: Anubias barteri, …
- Pflanzen mit superhydrophoben Oberflächen: z.B. Lotus, Tulpe, Gräser, Kapuzinerkresse, Innenseite eines Rotkohlblattes, Schilfrohr, Akelei, Frauenmantel,…

Für das Miniforschungsprojekt (je Gruppe)

- Blätter von verschiedenen Zimmer- und Gartenpflanzen
- Binokular mit Mikroskop-Kamera oder digitale Kamera

Durchführung

Die zu testenden Pflanzenblätter werden zur besseren Betrachtung horizontal auf einem kleinen Holzklotz (ca. 10x10x10 cm) positioniert. Das Pflanzenblatt wird unter Umständen so zugeschnitten, dass es flach auf der Oberfläche aufliegt. Mit einer Pipette wird vorsichtig ein Wassertropfen auf pipettiert. Der Wassertropfen auf der Blattoberfläche wird seitlich mit einer digitalen Fotokamera (oder auch Handykamera) fotographiert.

Aus den Fotos mit dem Kontaktwinkel zwischen dem Wassertropfen und der Blattoberfläche werden später am Computerbildschirm (oder im Ausdruck) die Kontaktwinkel mit Hilfe eines einfachen Schulgeodreiecks gemessen.

Versuch 20: Kontaktwinkelbestimmung (4 von 4)

Abbildung 43 Wassertropfen auf einem Kapuzinerkresseblatt. Der Tropfen berührt dabei kaum die Blattoberfläche.

Anmerkungen

a). Dieser Versuch lässt sich leicht zu einem Miniforschungsprojekt ausweiten, in dem die Schülerinnen und Schüler selbst verschiedene Pflanzen aus verschiedenen Lebensräumen mitbringen und diese auf die Kontaktwinkel untersuchen.

b). Zur Demonstration der Funktionsweise eines Horizontalmikroskops kann man auch ein Binokular horizontal auf den Tisch legen und an eine digitale Mikroskop-Kamera anschließen. Das Pflanzenblatt wird auf einem kleinen Holzklötzchen so positioniert, dass es mittig im Sichtfeld des Binokulars positioniert ist.

Erklärung

Einige Pflanzen besitzen Blätter mit selbstreinigenden Oberflächen. Der Lotuseffekt verhindert, dass sich Pathogene (Pilzsporen oder Bakterien) auf der Oberfläche der Blätter ansiedeln können. Diese werden mit dem nächsten Regen einfach von der Blattoberfläche abgespült, bevor sie sich festsetzen können. Voraussetzung für die Wirksamkeit des Lotuseffektes ist aber, dass die Pflanzen in Gebieten wachsen, in denen es regelmäßig regnet. Bei submergen Pflanzen (z.B. Anubias barteri) macht der Lotus-Effekt keinen Sinn. Ihre Blattoberflächen sind hydrophil, so dass die Blätter leichter unter der Wasseroberfläche bleiben.

Versuch 21: Demonstration zum Lotuseffekt (1 von 2)

Zeitbedarf

Schnell durchführbare Handexperimente

Vorbereitung

Gruppengröße: jeweils ca. 2 bis 4 Schülerinnen und Schüler

Material (je Gruppe)

- Blätter von verschiedenen Pflanzenarten mit Lotuseffekt (z.B. Lotus, Rotkohlblätter, Kapuzinerkresse, Tulpe, …)
- Im Vergleich dazu Pflanzen ohne Lotuseffekt (z.B. Kopfsalat, …)
- Lehmstaub oder Mehl
- Lösungsmittelfreier Klebstoff
- Honig
- Wasser
- Pipette

Durchführung

Auf die Oberfläche von verschiedenen Pflanzen wird Honig, Lehmpulver oder lösungsmittelfreier Klebstoff aufgetragen. Dabei sollen Pflanzen mit einem Lotuseffekt und mit Pflanzen ohne Lotuseffekt miteinander verglichen werden.

Beobachtung

Klebstoff und Honig fließen von der Oberfläche eines Lotusblattes ab, ohne dabei am Blatt kleben zu bleiben. Ebenso lässt sich Lehmpulver mit Wasser rückstandslos von der Blattoberfläche abspülen.

Versuch 21: Demonstration zum Lotuseffekt (2 von 2)

Abbildung 44

Lotusblumenblatt.

Abbildung 45

Lehmpulver lässt sich rückstandslos mit Wasser vom Blatt der Lotusblume abspülen.

Erklärung

Pflanzen, die einen Lotuseffekt aufweisen haben gegenüber Pflanzen, die keinen Lotuseffekt besitzen einen wesentlichen Vorteil. Dadurch werden Pathogene wie z.B. Pilzsporen und Bakterien bei Regen schnell wieder abgespült.

Zusätzliche Informationen

Geeignete Pflanzen, **um den Lotuseffekt** zu demonstrieren:

- Lotusblume, Rotkohl, Tulpe, Kapuzinerkresse, Akelei,…
- Pflanzen, die für den Vergleich **ohne Lotuseffekt** geeignet sind: Kopfsalat, Grünlilie, Seerose, …

Für weitere Informationen siehe auch: www.lotus-salvinia.de

Versuch 22: Demonstration zum Salvinia-Effekt (1 von 3)

Zeitbedarf

ca. 5 min (Einfaches *Handexperiment*)

5 Minuten Nanotechnologie

Der Schwimmfarn besitzt die Eigenschaft ein dünnes Luftpolster an seiner Oberfläche zu halten, wenn er unter Wasser gedrückt wird. Kommt das Blatt des Schwimmfarns dann wieder an die Oberfläche, sind die Blätter sofort vollkommen trocken, denn das Wasser perlt von der Oberfläche vollständig ab. Dieser Effekt wird durch die spezielle Struktur und Eigenschaft der Oberfläche der Blätter des Schwimmfarns hervorgerufen und wurde nach dem Schwimmfarn (*Salvinia natans*) Salvinia-Effekt genannt.

Abbildung 46 Blätter des Schwimmfarns (Salvinia natans).

Die Blattoberfläche des Schwimmfarns ist mit kleinen superhydrophoben Härchen überzogen. Durch die superhydrophoben Eigenschaften dieser Haare erhalten Wassertropfen keinen Kontakt zur Blattoberfläche. Die Spitzen dieser Härchen sind jedoch hydrophil. Auf diese Weise wird das Wasser an die hydrophilen Spitzen angezogen, so dass ein Luftpolster oberhalb der Blattoberfläche eingeschlossen wird.

Ähnlich ist auch die Oberfläche des Rückenschwimmers (*Notonecta glauca*) aufgebaut. Der Rückenschwimmer nutzt das Luftpolster auf seiner Oberfläche, um unter Wasser atmen zu können.

Versuch 22: Demonstration zum Salvinia-Effekt (2 von 3)

Ziele

Verdeutlichung des Salvina-Effektes durch Schülerdemonstrationsexperimente.

Vorbereitung

Gruppengröße: jeweils ca. 2 bis 4 Schülerinnen und Schüler

Material (je Gruppe)

- Schwimmfarn (Aquarienhandel oder Gartenteichzubehör)
- 500 ml Becherglas mit Wasser gefüllt
- Pinzette

Durchführung

Ein Schwimmfarn (oder eine andere Pflanze mit dem Salvinia-Effekt) wird mit einer Pinzette unter Wasser gedrückt. An der silbrig spiegelnden Oberfläche kann man deutlich beobachten, dass die Blattoberfläche mit einem Luftfilm überzogen ist.

Abbildung 47 Die feinen Haare auf der Oberfläche von Salvinia sind mit bloßem Auge zu erkennen.

Versuch 22: Demonstration zum Salvinia-Effekt (3 von 3)

Abbildung 48 Wird eine Schwimmfarnpflanze unter Wasser gedrückt, kann man deutlich am silbrigen Glanz die eingeschlossene Luftschicht erkennen.

Zusätzliche Informationen/Bezugsquellen

Schwimmfarn erhält man häufig im Gartenhandel als Teichpflanze oder im Aquarienhandel.

Literatur

Balmert, A. / Bohn, HF / Ditsche-Kuru, P. / Barthlott, W. (2011): Dry under Water: Comparative Morphology and Functional Aspects of Air-Retaining Insect Surfaces. Journal of Morphology.

Barthlott, W. / Schimmel, T. / Wiersch, S. / Koch, K. / Brede, M. / Barczewski,M. / Walheim, S. / Weis, A. / Kaltenmaier, A. / Leder, A. / Bohn HF (2010): The Salvinia Paradox: Superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air-retention under water. Adv. Mater. , S. 22: 2325-2328.

Barthlott, W. / Mail, M./ Neinhuis, C. (2016): Superhydrophobic hierarchically structured surfaces in biology: evolution, structural principles and biomimetic applications. Phil. Trans. R. Soc. A 374.

Versuch 23: Warum der Gecko nicht von der Decke fällt (1 von 3)

Zeitbedarf

je 5 min

5 Minuten Nanotechnologie

Die meisten Geckos sind in der Lage sogar kopfüber an glatten Oberflächen, wie z.B. Glasscheiben, zu laufen, ohne dabei herunterzufallen. Eine besondere Mikrostruktur der Oberfläche der Zehen ermöglicht ihnen diese Fähigkeit.

An der Unterseite der Zehen befinden sich Lamellen, die wiederum mit unzähligen winziger Härchen, den Setae, besetzt sind. Die Enden der Setae spalten sich noch mal vielfach in kleinere, an der Spitze schaufelförmige, Hafthärchen auf, den sogenannten Spatulae. Durch diese Mikrostruktur wird die Oberfläche der Zehen enorm vergrößert und es wird ein optimaler Kontakt zwischen dem Geckofuß und der Glasoberfläche erreicht.

Lange Zeit glaubte man, dass zwischen den Spatulae und der Oberfläche nur die enorm schwachen Van-der-Waals-Kräfte wirksam sind und die große Haftkraft auf der Akkumulation der Van-der-Waals-Kräfte über die Oberflächenvergrößerung der Zehen durch die Mikrostruktur beruhe. Zwischenzeitlich wurde aber nachgewiesen, dass für diesen Hafteffekt vor allem die sehr viel stärkeren elektrostatischer Kräfte verantwortlich sind.

Experiment A – Beobachtung eines Geckos beim Laufen auf einer Glasscheibe

Die Schülerinnen und Schüler sollen die Bewegung der Geckozehen beim Laufen auf der Glasoberfläche (z.B. an der Glasscheibe im Terrarium) beobachten.

Dabei sollten die Schülerinnen und Schüler verschiedene Phasen erkennen: Haftet der Fuß an der Oberfläche, sind die Zehen glatt an die Oberfläche gedrückt. Durch die Mikrostruktur des Geckofußes ist der bestmögliche Kontakt zwischen dem Fuß und der Glasoberfläche hergestellt und die maximale Kraftwirkung wird entfaltet.

Damit sich der Geckofuß beim Vorwärtslaufen wieder von der Glasoberfläche lösen kann, muss diese Kontaktoberfläche nun minimiert werden. Dies erreicht der Gecko dadurch, dass er die Zehen im vorderen Bereich hochrollt. Dies ist vergleichbar mit dem Abziehen eines Tesafilmstreifens, wie es in Experiment 2 demonstriert werden soll.

Zusätzliche Informationen

Sofern kein lebender Gecko für die Beobachtung in Experiment 1 zur Verfügung steht, eignet sich auch ein kurzer Film, z.B. von der Deutschen Welle. Man findet den Film unter folgendem Link:

http://www.dw.com/de/ohne-klebstoff-haften-nach-dem-gecko-prinzip-01012012-projekt-zukunft/av-6690619, abgerufen am 31.10.2016.

Versuch 23: Warum der Gecko nicht von der Decke fällt (2 von 3)

Experiment B – Abrollen von doppelseitigem Klebeband

Zur Demonstration der Abrolltechnik des Geckos wird die Funktion des Aufrollens des Geckofußes an einem doppelseitigen Klebeband verdeutlicht. Dafür sollen die Schülerinnen und Schüler auf zwei Arten einen Klebestreifen (Doppelseitiges Klebeband) von einer Oberfläche lösen.

Ein 3 cm langes Stück des doppelseitigen Klebebands wird auf einen Gegenstand (z.B. Trinkbecher) geklebt. Mit Hilfe des Klebebands wird der Becher flach auf eine Tischoberfläche gedrückt. Die Schülerinnen und Schüler sollen nun den Gegenstand durch senkrechtes Anheben von der Tischoberfläche lösen.

Im zweiten Versuch wird der Trinkbecher nun durch langsames Abrollen von der Tischoberfläche gelöst.

Die Schülerinnen und Schüler werden schnell feststellen, dass sich das Klebeband durch Abrollen besonders leicht lösen lässt.

Experiment C – Demonstration der elektrostatischen Kraft mit einem Luftballon

Ein Luftballon wird, z.B. durch Reibung mit einem Schafsfell oder Baumwolllappen, elektrostatisch aufgeladen. Anschließend lässt man an einem Wasserhahn Wasser in einem sehr dünnen Strahl aus dem Hahn laufen. Wichtig für das Demonstrationsexperiment ist, dass dieser Wasserstrahl möglichst dünn ist. Dabei wird der Wasserstrahl so eingestellt, dass die einzelnen Wassertropfen gerade eben in einen dünnen Strahl übergehen. Besonders gut geeignet sind für dieses Demonstrationsexperiment die Waschbecken in Schullaboren, da diese in der Regel ausreichend Platz bieten. Hat man nicht genügend Platz zur Verfügung, reicht auch ein Plastikstab aus, der entsprechend elektrostatisch aufgeladen wird.

Hält man nun den aufgeladenen Luftballon nahe an den Wasserstrahl, so wird dieser durch das elektrostatische Feld des Luftballons abgelenkt. Auf diese Weise lässt sich die Wirkung der elektrostatischen Kraft gut visualisieren. Ebenso lässt sich die Wirkung der elektrostatischen Kraft durch Anziehung verschiedener Gegenstände gut verdeutlichen. Den Schülerinnen und Schülern ist z.B. die Anziehung von langen Haaren durch die elektrostatische Aufladung des Luftballons meist bereits als Alltagsbeobachtung bekannt und kann an dieser Stelle nun auch gedeutet werden.

Versuch 23: Warum der Gecko nicht von der Decke fällt (3 von 3)

Abbildung 49 Lässt man einen Gecko über eine Glasplatte klettern, kann man die makroskopische Strukturierung der Unterseite des Geckofußes besonders gut erkennen.

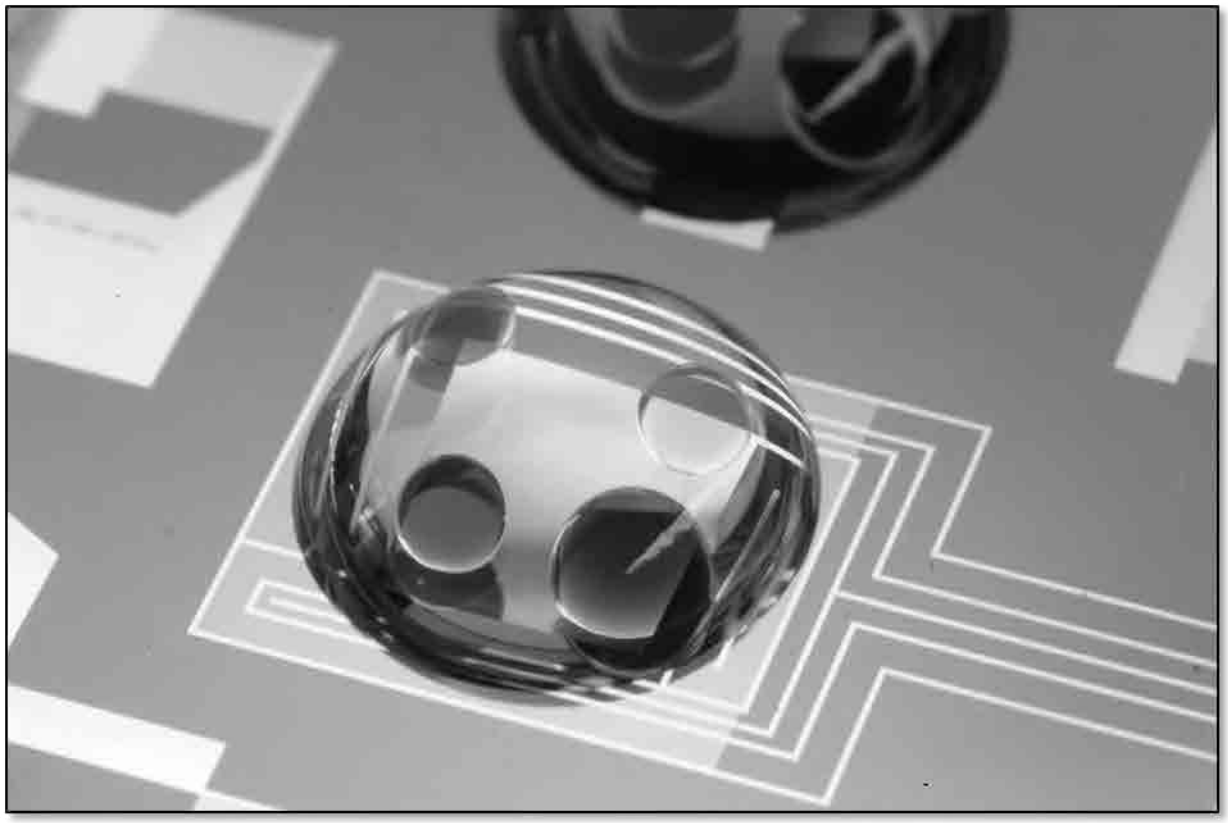
Literatur

Izadi, Hadi /Stewart,Katherine M. E. /Penlidis, Alexander (2014): Role of contact electrification and electrostatic interactions in gecko adhesion. J R Soc Interface, S.11(98).

5.Kapitel: NANOFLUIDIK

Autor

Prof. Dr. Achim Wixforth – Universität Augsburg, Lehrstuhl für Experimentalphysik, Augsburg



Nanofluidik: Gerührt nicht geschüttelt

von Professor Dr. Achim Wixforth

Der Umgang mit Flüssigkeiten ist uns seit Anbeginn der Menschheit wohl vertraut. Schon bald nachdem der Mensch sesshaft geworden war und Felder bestellen musste, hat homo sapiens schnell die unterschiedlichsten Techniken und Technologien entwickelt, Flüssigkeiten (in den allermeisten Fällen Wasser) seinem Willen untertan zu machen. Von Flüssen ausgehend wurden Kanalsysteme errichtet, die mit *Ventilen* versehen das begehrte Nass zu den kultivierten Pflanzen transportieren konnten. Schwierigkeiten bereiteten dabei insbesondere topologische Hürden wir Berge oder Täler, die es zu überwinden galt. Sowohl Tunnel als auch ‚aquaeducte' schafften hier jedoch bald Abhilfe.

Viele Erfahrungen aus dem frühen Umgang mit Flüssigkeiten haben zu einem gewaltigen Erkenntnisgewinn geführt. So verstanden die frühen Wasserbauer schnell das Prinzip der korrespondierenden Röhren und das der artesischen Brunnen, bei denen die potentielle Energie höher gelegener Wasserspeicher dazu genutzt wurde, das Wasser auch über weite Strecken *pumpen* zu können. Später wurden dann mechanische Pumpen zum Einsatz gebracht mit denen zunächst mittels (menschlicher oder tierischer) Muskelkraft große oder kleine Wassermengen bewegt oder aber *bergauf* gepumpt werden konnten. Hier hat die menschliche Erfindungskraft Außergewöhnliches geleistet. Neben Ziehbrunnen und Wasserrädern sei hier insbesondere die Archimedes'sche Schraube erwähnt, bei der eine Rotationsbewegung in eine lineare Bewegung und das Pumpen von Wasser übersetzt werden.

Bald wurden zur Bewegung von Wasser auch *natürliche* Energiequellen heran gezogen. Windräder zur Förderung von Tiefenwasser trifft man gelegentlich heute noch an, und von Flüssen angetriebene Wasserräder, die durch Umlenkung der Rotation auch zum Pumpen von Wasser verwendet werden, sieht man ebenfalls noch hier und dort. Modernere Maschinen sollen hier nur der Vollständigkeit erwähnt werden. Das Prinzip der Wasserförderung ist auch hier dasselbe.

Flüssigkeiten als Transportmittel

Nicht nur der Transport und die Förderung von Wasser als solches stellte eine große technische Leistung dar. Sehr schnell wurde der Menschheit auch bewusst, dass sich Wasserläufe ausgesprochen gut zum Transport von Materialien oder auch Personen eignen. Wahrscheinlich liegt diese *Erfindung* zeitlich sogar vor der Wasserwirtschaft. Das Wasser in Flüssen strebt dem Gefälle des Terrains nach und fließt in einem oft selbst gegrabenen Bett. Wie bequem ließen sich auf diese Weise z.B. Baumstämme, Baumaterialien, Lebensmittel oder Güter stromab transportieren! Auch wurden Flüsse als Verkehrswege genutzt. Ein wunderbares Beispiel für die fantastischen Eigenschaften von Wasser als Transportweg ist die Stadt Venedig. Hier wurden (allerdings wohl auch aus mit der Örtlichkeit verbundenen Gründen) die Straßen durch Wasserkanäle ersetzt. Boote aller Art und Couleur transportieren die Menschen und deren Güter von Stadtteil zu Stadtteil und von Haus zu Haus. Stehende Gewässer bringen hier zwar eine gewisse Arbeit für die Fortbewegung mit sich, dafür geht es aber auch nirgendwo gegen die Strömung *bergauf*.

Die Verwendung von Flüssigkeitskanälen als Transportweg kann man in gewisser Weise auch auf die Prozessierung flüssiger Güter verstanden wissen. Gelöst in Wasser oder als ein Gemisch von Wasser und diversen anderen Produkten haben sich der Flüssigkeitstransport und die Weiterverarbeitung in der

Lebensmittelverarbeitung, der Chemie und natürlich auch der Biologie einen festen Platz erobert. Jedes Lebewesen benutzt Flüssigkeitstransport und *Fluidik* zur Aufrechterhaltung des Metabolismus.
Unsere Organe sind ausgeklügelte fluidische Systeme im weitesten Sinne. Nehmen wir einmal das Herz: Hiermit wird eine hoch komplexe, stets wieder *aufbereitete* Flüssigkeit in die entlegensten Winkel des Körpers gepumpt, um dorthin lebensnotwendige und lebenserhaltende Stoffe zu transportieren. In der Lunge mit Sauerstoff und im Darm mit Nährstoffen versehen, in Leber und Niere von Giftstoffen befreit wird unser Blut vom Herzen durch unterschiedliche Adern und Kapillaren gepumpt. Hierbei ist bereits jetzt zu bemerken, dass sich die Durchmesser unserer Blutgefäße erheblich voneinander unterscheiden. Wir finden im menschlichen Körper bei der Aorta Durchmesser zwischen 2,5 und 3,5 cm und bei den feinsten Kapillaren winzige Durchmesser bis hinab zu einigen zehn Mikrometern vor! Dass das Blut in allen Blutgefäßen gleichermaßen gut bewegt und transportiert werden kann, ist eine hoch komplexe Aufgabe! Die besondere Form, Zusammensetzung und der Aufbau unserer Blutplättchen und Blutkörperchen zollt diesem *Problem* Tribut! Die Leistung des Herzens ist von der Natur so angepasst worden, dass es diese Aufgaben im Normalfall gut bewältigen kann. Dass der Strömungswiderstand einer Flüssigkeit (genauer genommen einer so genannten *Newtonschen Flüssigkeit* – Blut ist keine solche!) mit der vierten Potenz des Radius einer runden Röhre zunimmt (also proportional zu r^4 ist), hat der eine oder andere schon schmerzlich erfahren müssen. Ablagerungen in den Blutgefäßen (*Arterienverkalkung*) führen zu einer Verringerung des effektiven Radius und damit zu einer dramatischen Erhöhung des Strömungswiderstandes.
Die Folge ist, dass das Herz solche Gefäße nicht mehr ausreichend versorgen und es zu schweren Komplikationen führen kann, bis hin zum Herzinfarkt. Abhilfe schafft hier entweder eine (operative) Vergrößerung des Radius oder ein so genannter *Bypass*, mit Hilfe dessen die Verengung umgangen wird. Eine andere (meist präventiv eingesetzte) Methode ist die so genannte medikamentöse *Blutverdünnung*. Hier stellen wir bereits fest, dass offenbar der Durchmesser und/oder die Länge eines Gefäßes und auch die *Flüssigkeit* des Blutes einen Einfluss auf die Pumpleistung haben. Später werden wir die *Flüssigkeit* mit der so genannten *Viskosität* eines Fluids identifizieren.
Aber auch im technischen Bereich wird Fluidik eingesetzt, um Flüssigkeiten zu prozessieren und zu transportieren. Ein einfaches Beispiel ist unsere Sanitärinstallation im Haus. Vom Wasserwerk bekommen wir Trinkwasser zur Verfügung gestellt. Meist schließt der Klempner eine Stadtleitung, die unter hohem Druck ($p_0 \approx 6$ bar) an unser Haus an. Dieser Druck, bzw. das Druckgefälle zwischen Stadtleitung und dem Ende des Wasserhahns (Luftdruck im Haus) sorgt dafür, dass das Wasser nach Öffnen des Ventils in die Wanne gelangen kann. Jeder weiß, dass Verengungen in den Wasserleitungen oder im Abfluss den Betrieb nachteilig beeinflussen, bis hin zur Verstopfung. Ganz analog unserer bereits besprochenen Arterienverkalkung!
Kompliziertere fluidische Systeme sind zum Beispiel Raffinerien, in denen aus Rohöl Benzin und andere petrochemische Produkte gewonnen werden. Hier kommt neben der unterschiedlichen Viskosität der verwendeten Flüssigkeiten auch noch deren unterschiedlicher Siedepunkt ins Spiel. Das Prinzip der Destillation, also das *Abkochen* eines Flüssigkeitsbestandteils unter Zurücklassung eines anderen ist uns auch aus der Herstellung von Spirituosen gut bekannt: Vergorener Traubensaft (Wein) besteht neben Wasser, Farbstoff und Geschmacksstoffen auch aus dem Alkohol Ethanol. Manchmal gibt es allerdings schändlicher Weise auch noch andere Inhaltsstoffe zu beklagen. Erhitzen des Weins führt neben einigen anderen Prozessen zunächst vereinfacht zu einem Verdampfen des Ethanols (C_2H_6O, T_S=78°C), bevor bei T=100 °C das Wasser verdampft. Man fängt den Ethanoldampf bei der niedrigen Temperatur auf und lässt ihn an einem Kühler wieder zu Flüssigkeit kondensieren. Auf diese Weise gelingt es, alkoholisch hochprozentigere Flüssigkeiten aus Wein herzustellen. All dies sind nur einige illustrative Beispiele dafür, wie wir Menschen uns Flüssigkeiten und deren Transport mittels teilweise komplizierter Maschinerien und Apparaturen zu Nutze machen.

Small is beautiful – but sometimes different!

In dieser Schrift soll der Fokus des Flüssigkeits-*handlings* auf der so genannten *Mikrofluidik* liegen. Was ist darunter zu verstehen?

Viele mechanische oder auch elektronische Entwicklungen konnten durch Verkleinerung nachweislich zu einer enormen Effizienzsteigerung oder einfach dazu führen, dass auch komplexe Systeme besser handhabbar wurden. Nehmen wir das Beispiel der Kirchturmuhr. Die Erfindung einer mechanisch (durch Umwandlung potentieller Energie von Gewichten oder gespannten Federn) war zwar praktisch, konnte doch jedermann und jederfrau stets (freien Blick auf einen Kirchturm vorausgesetzt) die aktuelle Uhrzeit ablesen. Für Seefahrer jedoch war das nicht sonderlich praktisch. Zur genauen Bestimmung der Position war eben der Kenntnis des Breitengrades auch die des Längengrades notwendig, und das geht nur, wenn man die genaue Uhrzeit ‚an Bord' hat. Also mussten die (zunächst) mechanischen Uhren soweit verkleinert werden, dass sie an Bord eines Schiffes Platz hatten (vom Problem der Genauigkeit sei hier einmal geschwiegen...). Noch besser war es, wenn man seine ganz persönliche Uhr stets bei sich tragen konnte! Hier hat die Ingenieurkunst in den vergangenen Jahrhunderten Unglaubliches geleistet! Winzige Zahnräder, Federn und Lager wurden hergestellt, die zusammengesetzt eine wirklich funktionsfähige und hinreichend genau gehende Uhr ergaben.

Heutzutage verkleinert man immer noch bereits bekannte mechanische Systeme: Ein sehr gutes Beispiel hierfür ist ein Airbagsensor oder der uns allen bekannte Bewegungssensor in so genannten Smartphones. Klassische mechanische Systeme werden *auf Chipgröße* verkleinert, funktionieren aber im Wesentlichen immer noch so wie ihre *großen* counterparts.

Beim Stichwort *smartphone* kommen wir nun auf die unglaublichen Entwicklungen im Bereich der Elektronik zu sprechen: Vor knapp 60 Jahren erst wurde der Transistor erfunden. Damals noch ein Bauteil von der Größe eines Reiskorns konnte mittels Transistoren die Elektronik revolutioniert werden. Vom Einzeltransistor, der mit Einzelwiderständen und Einzelkondensatoren zu elektronischen Schaltungen kombiniert wurde zur ersten *integrierten Schaltung* war es dann nur noch ein (allerdings komplizierter) Schritt: Ganze elektronische Schaltungen wurden auf einem einzigen *Chip* integriert, der dann ganz spezielle Aufgaben erfüllen konnte.

Heutzutage finden auf den komplexesten Chips (Mikroprozessoren) bis zu 2,3 Milliarden (!) Transistoren (Intel Core i7 3930K) Platz! Dabei hat man die Gesamtgröße des *Chips* in den vergangenen Jahren stets ungefähr konstant halten können. Jeder einzelne Transistor jedoch hat mittlerweile Dimensionen im Nanometermaßstab). Auch hier gilt jedoch, ganz ähnlich zu dem Beispiel der mechanischen Mikrostrukturen (Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme), dass die Funktionsweise dieser winzigen Transistoren sich immer noch nur unwesentlich von der eines *großen* Transistors unterscheidet.

Der Grund liegt in den typischen Längenskalen, die für den Betrieb verantwortlich sind. Bei Elektronen in einem elektronischen Chip ist dies die so genannte de Broglie Wellenlänge, die sich aus dem Welle-Teilchen-Charakter von Materie errechnen lässt. Für *typische Elektronen* in den Siliziumchips ist diese in der Gegend von 10 nm. Solange einzelne Bauteile noch größer sind, als die Wellenlänge der Elektronen (und die Temperatur nicht zu tief), verhalten sich die Ladungsträger immer noch mehr oder weniger *klassisch*. Dies ändert sich jedoch, wie auch in dieser Schriftenreihe beschrieben wird, bei kleineren Abmessungen. Hier werden die klassischen Gesetze der Elektrostatik und -dynamik durch quantenmechanische Phänomene abgelöst.

Kleine Tropfen, großer Effekt

Bei Flüssigkeiten und in gewissen Grenzen auch bei Gasen findet der Übergang zwischen ‚gewohntem' Verhalten und uns Menschen eher ungewöhnlich erscheinenden Effekten bereits deutlich früher statt: Jeder hat schon einmal festgestellt, dass eine Tasse Wasser, welche auf dem Tisch umfällt, ihren Inhalt über das Tischtuch ergießt. Betrachtet man jedoch den Löffel, mit dem man soeben (ungeschickt) umgerührt hat, so beobachtet man, dass möglicherweise an ihm befindliche kleine Tropfen offenbar nicht dem Gesetz der Schwerkraft gehorchen und an dem Löffel *kleben* bleiben. Ein einfaches Experiment würde ergeben, dass es eine kritische Tropfengröße zu geben scheint, oberhalb derer der Tropfen runterfällt und unterhalb derer er am Löffel verbleibt. Unmittelbar drängt sich einem der Vergleich mit einem tropfenden Wasserhahn auf. Ein Tropfen an dessen Ende wächst zunächst am Hahn verbleibend an um dann beim Überschreiten eines kritischen Volumens runterzufallen. Kleine Tröpfchen, die sich selbst stabilisierend im Morgennebel auf einem Spinnennetz finden, sind ein ähnlich gutes Beispiel für dieses Phänomen. Betrachtet man ein solches Spinnennetz einmal genauer, so stellt man fest, dass entlang eines Fadens die Größenverteilung der Tröpfchen erstaunlich homogen ist. Fast alle Tropfen haben näherungsweise denselben Durchmesser. Auf dickeren Fäden sind die Tropfen dann wieder alle ungefähr gleich groß, jedoch größer, als auf den dünnen Fäden. Offenbar hat hier die Wechselwirkung des Tropfens (in beiden Fällen handelt es sich um Wasser) mit den Fäden ihre Hand im Spiel! Die Geometrie der Unterlage und deren Beschaffenheit scheint die Wechselwirkung nachhaltig zu beeinflussen!

Betrachten wir diese Wechselwirkung einmal genauer: Wasser besteht aus polaren Molekülen, die also ein so genanntes elektrisches Dipolmoment haben. Elektrisch betrachtet verhalten sich Wassermoleküle also so ähnlich wie (magnetische) Kompassnadeln. Drei verschiedene Wechselwirkungen mit einer Unterlage oder einem Gefäß sind denkbar: Anziehend, abstoßend oder gar keine Wechselwirkung. Besteht gar keine Wechselwirkung zwischen der Flüssigkeit und der Unterlage (ein sehr unwahrscheinlicher, weil singulärer Fall), so ist die Sache ‚langweilig'.

Besteht eine anziehende Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Unterlage, so kommt es zum so genannten Kapillareffekt. Jeder hat diesen bereits einmal beobachtet, wenn man Flüssigkeiten mit einem Stück Papiertaschentuch *aufsaugt*. Das Wasser wird offenbar von den Zellulosefasern *angezogen*, was zu einem gewissen Pumpeffekt führen kann. In diesem Fall nennt man die Unterlage flüssigkeitsliebend oder *hydrophil*. Der umgekehrte Fall einer abstoßenden Wechselwirkung ist uns ebenfalls bekannt. Es gibt Materialien, die wasserabstoßend scheinen. Die Bekleidungsindustrie, die Hersteller von Sanitärgegenständen wie Duschkabinen, aber auch die Beschichtungs- und Reinigungsindustrie macht sich diesen Effekt zu Nutze. Wasser, auf eine solche Unterlage gebracht, *perlt* ab. Die Unterlage, respektive der Anorak, werden nicht durchnässt. Das Wasser läuft von der Duschkabine ab und nach Beschichtung mit einem Wundermittel (in deren Namen übrigens oft *Nano* vorkommt) wird die Windschutzscheibe ebenfalls wasserabweisend. Solche Unterlagen nennt man flüssigkeits-fürchtend oder *hydrophob*.

Aber auch die Wechselwirkungen der Flüssigkeitsmoleküle untereinander müssen genauer betrachtet werden, um mikrofluidische Phänomene zu verstehen. Zunächst können wir uns wieder nach den drei Möglichkeiten fragen: Abstoßend scheint die Wechselwirkung ja nicht zu sein, denn Flüssigkeitsmengen, ob groß oder klein haben ja die Tendenz, zusammenzubleiben und nicht zu *explodieren*. Diese Beobachtung spricht auch gegen den (sowieso unwahrscheinlichen) Fall, dass es überhaupt keine Wechselwirkung gibt. Bei Gasen kommen wir diesem Fall schon näher....

Also existiert offenbar eine anziehende Wechselwirkung zwischen den Molekülen einer Flüssigkeit wie Wasser. Ein schöner ‚Beweis' für diese unsere These ist die Existenz der so genannten Oberflächenspannung. Die Tatsache, dass die Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche nur eine (offenbar anziehende) Wechselwirkung mit denen im unteren Halbraum haben können, führt zu einer resultierenden Kraft in die unter der Oberfläche liegende Flüssigkeit hinein.

Die führt u.a. zu einem leicht erhöhten Druck in dieser Flüssigkeit. Besonders schön kann man den Effekt der Oberflächenspannung bei kleinen Tropfen beobachten: Hier ist im Vergleich zum Volumen sehr viel Oberfläche vorhanden und demnach kann es vorkommen, dass die Oberflächenspannung (eine Kraft!) sogar größer wird, als die Gewichtskraft, die den Tropfen nach unten *plattdrücken* würde. Wenn dann auch noch die Wechselwirkung mit der Unterlage (ebenfalls eine Kraft!) klein oder gar abstoßend ist, wird der Tropfen eine Kugelgestalt annehmen und auf der Oberfläche liegen bleiben, ohne zu zerfließen! Hydrophobe Oberflächen zeigen diesen Effekt besonders schön. Hier sei en ein frisch gewachstes Auto, eine Orangenschale oder das beinahe schon legendäre Blatt der Lotuspflanze (es geht übrigens auch sehr gut mit Wirsingkohl oder Kapuzinerkresse, klingt bloß nicht so gut...) verweisen. Viele Pflanzen und Autobesitzer machen sich diesen hydrophoben Effekt zur Reinhaltung zu Nutze. Ein ganz anderes Thema ist, wie man eine solche (super-) hydrophobe Oberfläche herstellt. In den allermeisten Fällen geschieht das über eine *Funktionalisierung* der Oberfläche. Man muss dafür sorgen, dass die Oberfläche abstoßende Kräfte auf die Flüssigkeit ausübt. Das geschieht meist über eine chemische Beschichtung, aber auch eine Kombination aus Beschichtung und Topologie bzw. Textur der Oberfläche wird oft gefunden (siehe Lotuseffekt).

Viele Kräfte, balanciert

Unsere Überlegungen zusammenfassend stellen wir fest, dass offenbar die vielen Kräfte, die auf Flüssigkeiten wirken können, in einem komplizierten Wechselspiel für das Verhalten der Flüssigkeiten insbesondere bei kleinen Volumina (und demnach relativ gesehen großen Oberflächen) sehr wichtig sind. Eine wichtige Größe haben wir noch unterschlagen: Im letzten Kapitel stellten wir fest, dass Wassermoleküle untereinander offenbar eine anziehende Wechselwirkung aufweisen. Mit anderen Worten, zwei Wassermoleküle lassen sich nur unter Einsatz von Arbeit voneinander trennen. Nun ist eine der wohl augenscheinlichsten Eigenschaften von Flüssigkeiten die, das sie *fließen* können. Flüssigkeiten können nämlich ohne allzu großen Kraftaufwand (Kraft mal Weg gleich Arbeit!) ihre Form ändern. Dies ist bei festen Körpern ganz anders: Um ein Stück Metall zu verformen, braucht man u.U. sehr viel Kraft! Dies bedeutet, dass zur Verformung eines Flüssigkeitsvolumens zwar wenig, aber dennoch endlich viel Arbeit aufgewendet werden muss. Je kleiner diese Arbeit, desto *flüssiger* das Fluid, je größer der Aufwand (die Arbeit), die Flüssigkeit zu verformen, desto *zäher* oder *viskoser* das Fluid. Man vergleiche hier einmal das Fließverhalten von Wasser im Vergleich zu z.B. Honig! Die *Reibung* der Moleküle untereinander ist dem Fließen entgegengerichtet, verlangsamt dieses also.
Folgende Wechselwirkungen bzw. Kräfte, die auf Flüssigkeiten wirken können, haben wir bis jetzt identifiziert: Wechselwirkung der Flüssigkeitsmoleküle untereinander (Kohäsion). Eine Folge davon ist die Oberflächenspannung, die einer Kraft senkrecht ins Volumen hinein entspricht. Wechselwirkung der Flüssigkeitsmoleküle mit einem Gefäß oder einer Unterlage (Adhäsion, kann hydrophil oder hydrophob sein) Reibungskräfte oder viskose Phänomene, die der Bewegung entgegengerichtet sind Gewichtskraft, die auf jeden Körper wirkt. Sie ist proportional zur Masse des Körpers.
Mit Hilfe dieser einfachen Überlegungen können wir immerhin schon einige verblüffende Phänomene ganz zwanglos erklären. Auch einige Übergänge von der *Makrofluidik* (Kaffeetassen, Flüsse, Seen, Ozeane) zur *Mikrofluidik* (Tautropfen, Kapillareffekte, Lotuseffekt etc.) können wir bis hierher schon verstehen. Betrachten wir nun einmal ganz einfach, wie die verschiedenen Kräfte auf die Größe einer Flüssigkeitsmenge reagieren.

Beginnen wir mit der Gewichtskraft G: Sie ist proportional zur Masse des Flüssigkeitsvolumens und stets nach *unten* gerichtet.

$$\vec{G} = m\,\vec{g}$$

Die Masse der Flüssigkeitsmenge ist (bei konstanter Dichte) wiederum proportional zu deren Volumen.

$$m = \rho V = \rho \frac{4\pi}{3} r^3 \propto r^3$$

Das Volumen eines hier der Einfachheit halber kugelförmig angenommenen Tropfens ist proportional zur dritten Potenz des Radius, wohingegen seine Oberfläche proportional zum Quadrat des Radius ist:

$$A = 4\pi r^2$$

Die Oberflächenspannung bewirkt eine Kraft auf jedes Oberflächenelement, ist also proportional zur Oberfläche der Flüssigkeitsmenge. Genauso verhält es sich mit der Wechselwirkung einer Flüssigkeit mit einem Gefäß oder einer Unterlage. Die hier auftretenden Kräfte sind proportional zur Kontaktfläche zwischen Flüssigkeit und Unterlage.

Eine rasche Abschätzung zeigt sofort, dass das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen wie 1/r skaliert, für kleine Tropfen also sehr groß werden kann. Daraus folgern wir, dass sämtliche Effekte, die mit der Oberfläche skalieren, für kleine Systeme wesentlich wichtiger werden, als Effekte, die mit dem Volumen oder der Masse skalieren, wie z.B. die Gewichtskraft oder die Trägheit der Bewegung.

Ein ganz wichtiger Punkt bei mikrofluidischen Systemen ist die ‚Reibung'. Hier unterscheiden wir zweierlei Phänomene: Zum ersten die Viskosität einer Flüssigkeit, die angibt, wie stark die einzelnen Moleküle untereinander wechselwirken. Außerdem gilt es noch die Reibung der Flüssigkeit mit den Gefäßwänden (z.B. einer Röhre) zu berücksichtigen. In erster Näherung wird diese als sehr groß gegenüber der internen Reibung angenommen, so dass man für die Strömungsgeschwindigkeit einer fließenden Flüssigkeit direkt am Rohr oft als v = 0 annimmt. Beides zusammen genommen führt direkt auf das berühmte parabolisches Strömungsprofil in Röhren:

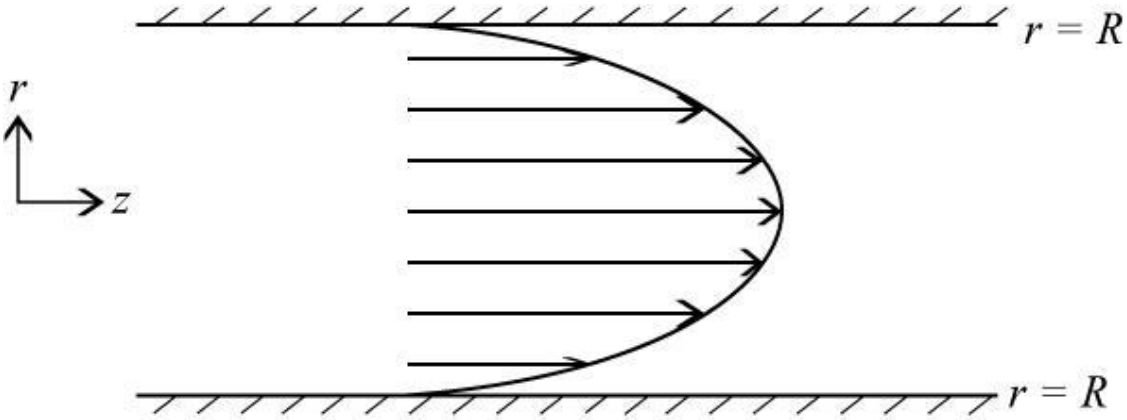


Abbildung 50 Parabolisches Strömungsprofil in Röhren

Makro – Mikro

Nachdem wir uns nun mit den Grundlagen vertraut gemacht haben, die *große* von *kleinen* Volumina physikalisch unterschiedlich erscheinen lassen, wenden wir uns der Frage zu, ab wann denn nun von Mikrofluidik gesprochen werden muss. Gibt es ein einfaches und klares Unterscheidungskriterium?

Dazu rekapitulieren wir nochmals die Betrachtungen zu den auftretenden Kräften im letzten Abschnitt.

Der Übergang *Makro – Mikro* findet offenbar statt, sobald Oberflächeneffekte die Volumeneffekte dominieren. Auf der anderen Seite müssen wir jetzt noch einen Volumeneffekt berücksichtigen, der mit der Viskosität (Reibungseffekt, der Geschwindigkeit entgegen gerichtet) und Trägheitseffekten verknüpft sind.

Die Newton's Bewegungsgleichung,

$$\vec{F} = m\vec{a} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

sagt aus, dass sich der Bewegungszustand eines Körpers (bzw. Volumenelements einer Flüssigkeit) nicht ändert, solange keine Kraft auf ihn wirkt, bzw. dass der Bewegungszustand eines Körpers eben genau und nur durch eine solche Kraft geändert werden kann.

Da Kräfte mit Impulsänderungen und bei konstanter Masse mit Geschwindigkeitsänderungen identifiziert werden können, ist also auch die absolute Geschwindigkeit für das Strömungsverhalten maßgeblich.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m\,\frac{d\vec{V}}{dt} + \vec{v}\,\frac{dm}{dt}$$

Bei kleinen Geschwindigkeiten ist die Reibung nicht so wichtig und in erster Näherung proportional zur Geschwindigkeit. Bei großen Geschwindigkeiten wird die Reibung allerdings wichtiger und bekommt v^2 Anteile.

Auf der anderen Seite nimmt die kinetische Energie $E = \frac{m}{2}v^2$ aber ebenfalls mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu.

Wir sollten deswegen also das *Verhältnis* von viskosen Kräften zu Trägheitskräften in unserem Gesamtsystem betrachten, um eine Aussage über den Übergang *makro-mikro* charakterisieren zu können. Dies genau geschieht durch die Einführung der so genannten *Reynold'schen Zahl*

$$Re := \frac{Trägheitseffekte}{Viskositätseffekte} = \frac{\rho\, v\, \ell}{\eta}$$

Hier bedeuten ρ die Dichte der Flüssigkeit (proportional zur Masse), v die typische Geschwindigkeit des betrachteten Volumenelements und ℓ eine typische Längenskala des Systems. η ist die bereits mehrfach erwähnte Viskosität der Flüssigkeit. Wir sehen also sofort, dass viskose Effekte die Trägheitseffekte zu dominieren beginnen, sobald in dieser einfachen Abschätzung Re < 1 wird. Eine genauere Betrachtung ergibt, dass der Übergang *makro-mikro* jedoch schon deutlich vorher einsetzt, nämlich bereits bei ungefähr Re < 2.000.

Schauen wir uns die Reynoldszahl *Re* einmal genauer an und versuchen wir, heraus zu finden, unter welchen Bedingungen Re klein werden wird.

Kleine Dichten (ρ) bevorzugen kleine Reynoldszahlen. Systeme mit kleinen Dichten verhalten sich also oft schneller *mikrofluidisch*, als solche mit großer Dichte.

Kleine Geschwindigkeiten (v) begünstigen ebenfalls kleine Re. Je langsamer eine Strömung, desto mehr ‚mikrofluidische' Eigenschaften hat sie.

Kleine Systeme (ℓ) neigen ebenfalls zur Mikrofluidik (daher kommt ja auch der Name). Wir haben das oben schon mehrfach diskutiert.

Flüssigkeiten mit großer Viskosität (η) führen ebenfalls bei sonst gleichen Bedingungen zu eher *mikrofluidischem Verhalten*.

Machen wir also ein einfaches Experiment, um diesen Übergang einmal wirklich zu sehen! Dazu betrachten wir den Rauch einer Zigarette.

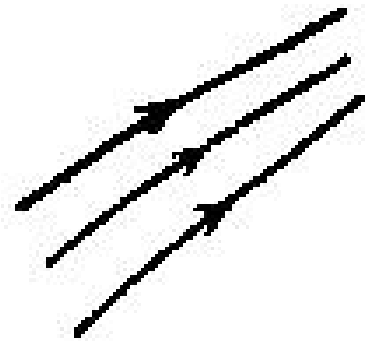
Abbildung 51 Rauch einer Zigarette

Obwohl es sich bei diesem Strömungsexperiment nicht um eine Flüssigkeit handelt, sondern um Zigarettenrauch, und die Strömung aufgrund des Auftriebs des heißen Rauchs von unten nach oben bewegt, kann man an diesem Foto doch sehr eindrucksvoll erkennen, dass bei einer Höhe von ca. 15 cm oberhalb der Zigarettenspitze etwas Erstaunliches mit der Strömung geschieht! Eine wohl definierte Stromlinie ‚schlägt' plötzlich um in eine chaotisch aussehende, verwirbelte bzw. ‚turbulente' Strömung. Wie erklären wir dieses Phänomen?

Offenbar steigt der Zigarettenrauch wegen seines Auftriebs nach oben. In erster Näherung sei die Temperatur des Rauchs (und damit auch seine Dichte) während des (kurzen) Aufstiegs konstant. Die Auftriebskraft ist also ebenfalls näherungsweise konstant und die Geschwindigkeit nimmt (wie beim freien Fall) deshalb quadratisch mit der Zeit zu, wird also größer. Damit wird auch die Reynoldszahl größer, wenn wir die anderen Parameter mal als konstant betrachten. Die geringe Dichte des Rauchs kommt uns bei diesem Experiment sehr entgegen! Etwa eine Hand breit oberhalb der Zigarette scheint der Übergang *Mikro – Makro* statt zu finden, d.h. Re > 2.000. Er ist hier offenbar durch einen Übergang in den Strömungseigenschaften charakterisiert (‚laminar' – ‚turbulent'). Wenn wir also die Strömung im mikro- und makrofluidischen Bereich einmal einfach charakterisieren sollen, so können wir ansetzen:

Mikrofluidik (laminare Strömung)

Das Geschwindigkeitsfeld der Strömung ist gleich seinem zeitlichen Mittelwert. Stromlinien kreuzen sich nicht

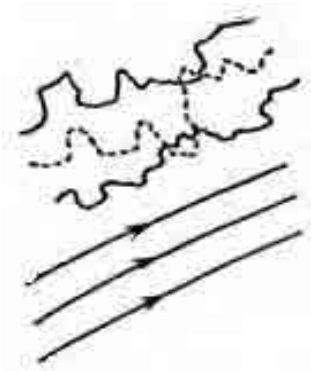


$$\vec{V}(\vec{r},t) = \vec{V}\langle(\vec{r},t)\rangle_t + \vec{V}^t(\vec{r},t)$$

Abbildung 52 Laminare Strömung

Makrofluidik (turbulente Strömung):

Das Geschwindigkeitsfeld der Strömung ist gleich seinem zeitlichen Mittelwert plus einen komplizierten, turbulenten Feldterm, der i.A. nicht analytisch zu berechnen ist.



$$\vec{V}(\vec{r},t) = \langle\vec{V}(\vec{r},t)\rangle_t + \vec{V}^t(\vec{r},t)$$

Abbildung 53 Turbulente Strömung

In mikrofluidischen Systemen treten also fast ausschließlich laminare Strömungen auf, wobei *Mikro* nicht unbedingt nur auf die Größe des Systems bezogen sein muss! Auch Gletscher zeigen typische laminare Strömungsmuster. Hier ist es die hohe Viskosität des Eises, die die Reynoldszahl klein macht. Typische laminare Strömungsmuster ergeben sich aber auch manchmal bei Flussläufen, wo ein Fluss in einen anderen mündet und die beiden Ströme manchmal kilometerlang *nebeneinander herfließen*, bevor es zur Durchmischung kommt. Ein besonders schönes Beispiel dafür sind Mosel und Rhein! Beim Backen eines Marmorkuchens, beim Mischen von Farbe und bei vielen anderen alltäglichen Systemen kann man ebenfalls typische laminare Muster erkennen.

Technische Relevanz

Die oben abgeleiteten erstaunlichen Eigenschaften mikrofluidischer Systeme machen sich natürlich ganz besonders bei *kleinen* Systemen bemerkbar. Das wohl technisch bedeutsamste Phänomen mikrofluidischer Systeme ist die praktisch ungestört auftretende laminiare Strömung. Die Bedingung, dass Flusslinien sich dabei nicht kreuzen, führt u.a. dazu, dass ein einfaches Mischen zweier Flüssigkeiten technisch sehr erschwert wird. Unterhalb einer bestimmten Systemgröße (für wässrige Lösungen etwa unterhalb 100 Mikrometer) nützt *Schütteln* der Gefäße nichts mehr. Die Flüssigkeiten können sich nur noch diffusiv durchmischen.

Dies gelingt allerdings mit weiterer Verkleinerung des Systems immer besser, da die relevanten Diffusionslängen immer vergleichbarer mit der Systemgröße werden. Aus genau diesem Grunde werden in mikrofluidischen Systemen auch chemische und biologische Reaktionen sehr verlangsamt. Diese können nämlich nur ablaufen, wenn die zwei Reaktanden auch in Kontakt miteinander kommen können.

Bei sich nicht kreuzenden Flusslinien ist dies jedoch nur an der (flüssigen) Grenzfläche möglich, die sich dann diffusiv in die Lösungen hinein ausbreitet. Man muss also ‚rühren'!

Auch das Pumpen von Flüssigkeiten auf der mikrofluidischen Skala ist ein schwieriges Unterfangen. Wegen der Kleinheit der Reynoldszahl erscheinen selbst ziemlich flüssige Stoffe wie Wasser scheinbar hoch viskos. Wasser durch einen 10 Mikrometer dünnen Kanal zu pumpen, erweist sich ähnlich schwierig, wie Honig durch einen Strohhalm zu saugen!

Technische Anwendung – Das Labor auf dem Chip

Die ausgesprochen erfolgreiche Miniaturisierung elektronischer Baugruppen in den vergangenen Jahrzehnten hat viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in den vergangenen Jahren davon träumen lassen, auch chemische und biologische Prozesse *auf einem Chip* ablaufen zu lassen. Der Grund dafür liegt nahe: Für viele Anwendungen in der Sensorik, der Analytik oder auch dem so genannten *high troughputscreening* werden winzige Stoffmengen entweder benötigt, oder sie liegen nur in winzigen Mengen vor. Nun gilt es, auch diese winzigen Stoffmengen überhaupt handhaben zu können und sie zur Reaktion zu bringen. Mit *normaler* Laborausstattung (Reagenzgläser, Pipetten, Erlenmeyerkolben, Rührfischchen etc.) hat selbst ein erfahrener Laborant kaum eine Chance.

Nehmen wir doch einmal das allseits bekannte (und gottlob nur selten vorkommende) Beispiel der Überführung eines Missetäters per DNS Analyse: Hier wird am Tatort z.B. eine Zigarettenkippe gefunden, an der sich genetisches Material des Bösewichts befindet. Zunächst muss dieses genetische Material isoliert werden, wenn die Kriminalpolizei Glück hat, wird sie ein paar DNS Moleküle vorfinden. Im Allgemeinen sind diese jedoch viel zu wenig, um sie eindeutig identifizieren zu können. Man setzt deshalb eine moderne Technik ein, bei der das genetische Material vervielfältigt wird, die so genannte *Polymerase Kettenreaktion*. Mit diesem Verfahren ist es möglich, das vorgefundene Material tausendfach zu kopieren und einer Analyse zugänglich zu machen. Dennoch ist es immer noch eine winzige Stoffmenge, die mit *normalen* Verfahren nur schwer zu prozessieren ist.

Das so erhaltene genetische Material vom Tatort wird nun mit dem genetischen Material der Verdächtigen verglichen. Dazu *schmilzt* man die Doppelstränge der DNS vom Tatort in Einzelstränge und bietet der Probe die Einzelstränge der DNS der Verdächtigen an. Sollte sich die DNS des Verdächtigen mit der vom Tatort *treffen*, so ergibt sich eine hoch spezifische Bindung, die man über z.B. Farbstoffmarkierung sichtbar machen kann. Das hier in aller Kürze beschriebene Verfahren nennt man,

Mikroarray-Technologie. Sie ist in den vergangenen Jahren so verfeinert und erschwinglich gemacht worden, dass heutzutage sogar Lebensmittelkontrolle, Wasserqualität und viele wesentlich bedeutendere Anwendungen als die Verbrecherjagd mittel Mikroarrays durchgeführt werden können.

Ein ganz wichtiges Anwendungsfeld ist die medizinische Diagnostik, möglichst die so genannte *point of care* Diagnostik, bei der eine medizinische Probe (z.B. Blut) direkt in der Arztpraxis den üblichen Tests unterworfen werden kann, für die sie man heute meist noch in ein Großlabor einschicken muss.

Wichtig auch hierfür ist ein Labor, welches in der Lage ist, winzige Stoffmengen gezielt zu verarbeiten, zu durchmischen, zu heizen und zu kühlen, zu färben und zu analysieren und dies möglichst absolut reproduzierbar, schnell und kostengünstig. Dies ist die Idee des Labors auf einem Chip.

Ähnlich wie ihre elektronischen Vettern, sollten diese Chips frei programmierbar sein und alle notwendigen Komponenten wie Mischer, Pumpen, Ventile, Heizer, Thermometer etc. enthalten. Über die Jahre haben sich in vielen Forschungslaboren der Welt die unterschiedlichsten Methoden zur Herstellung und Realisierung von Laboren auf dem Chip herauskristallisiert. Sie unterscheiden sich vor allem in der Art und Weise, wie Flüssigkeiten gepumpt und gemischt sowie welche Art von Kanalsystemen verwendet wird. Diese so einfach erscheinenden Technologien der Flüssigkeitsbehandlung, mit denen wir diese Einführung begonnen haben, erweisen sich auch heute noch, viele tausend Jahre nachdem Menschen erstmals das Wasser *gezähmt* haben, als technisch hoch komplex!

Literatur

Franke, T. / Wixforth, A. (2007): Mikrofluidik-Das Labor auf dem Chip, Physik in unserer Zeit.S. 38.

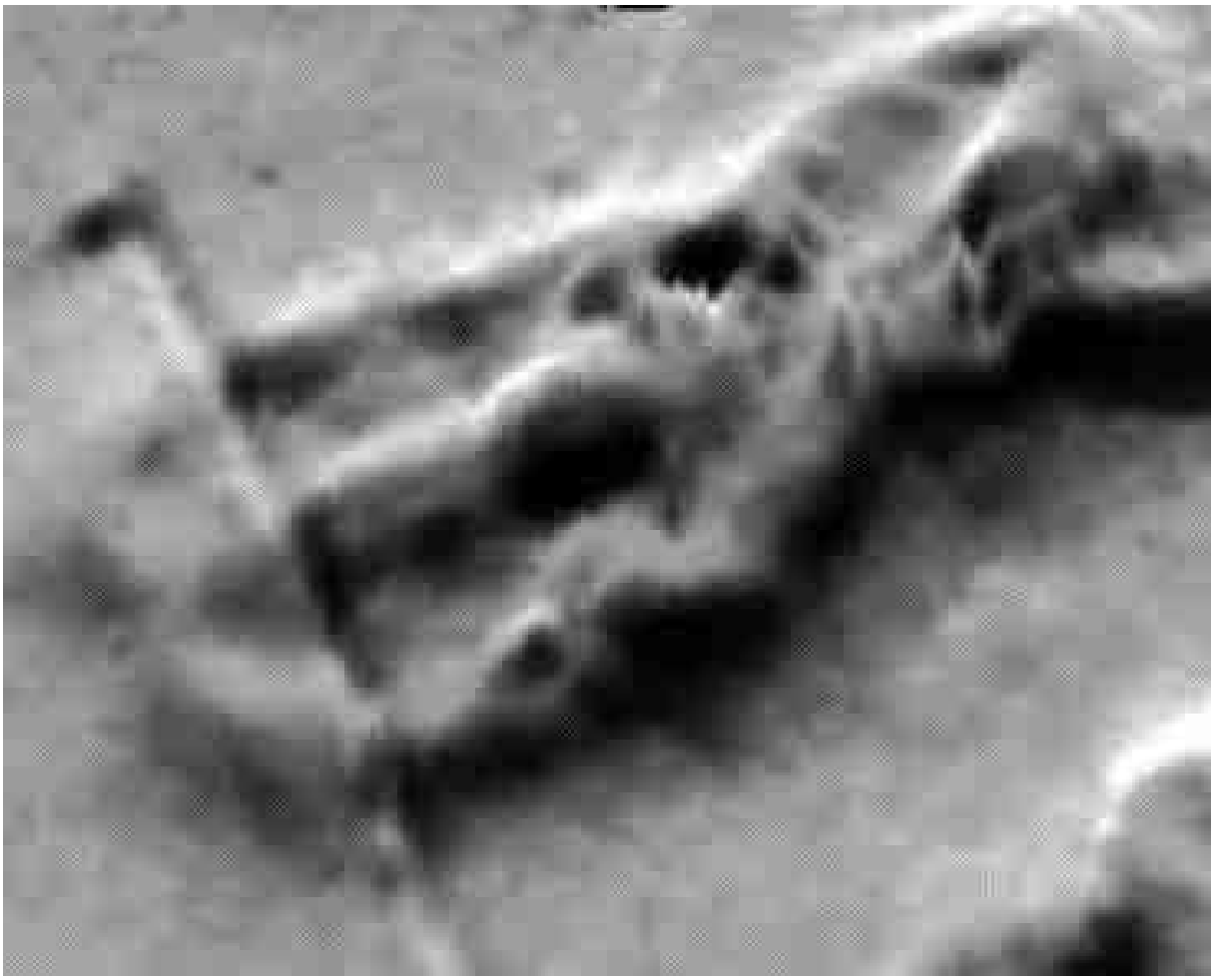
Franke, T. / Wixforth, A. (2008): Microfluidics for miniaturized laboratories on a Chip, ChemPhysChem 9, S. 2140-2156.

6. Kapitel: Nanomedizin

Autoren

Kapiteleinleitung
PD Dr. Stefan Thalhammer, Universität Augsburg

Versuchsanleitungen
StD Michael Funke, Gymnasium Zum Altenforst, Troisdorf
PD Dr. Stefan Thalhammer, Universität Augsburg



Nanomedizin

von PD Dr. Stefan Thalhammer

Warum benötigen wir die Nanotechnologie in der Medizin? Alle Lebensprozesse spielen sich auf der Nanometerebene ab – von den Zellen und den darin befindlichen Organellen und über die Biomoleküle. Aber auch Krankheitsprozesse bewegen sich in diesen Größenskalen.

Im medizinischen Bereich wird seit rund 15 Jahren Nanoforschung betrieben. Einige Produkte sind bereits so weit entwickelt, dass sie in den Handel gehen können, andere befinden sich noch in der klinischen Testphase. Mit den alptraumhaften, futuristischen Visionen von chirurgischen Nanorobotern, die in unserem Körper operieren, wie sie in Science-Fiction-Filmen und -romanen dargestellt werden, hat die neue Technik jedoch wenig zu tun. Große Hoffnungen setzt man hingegen in neue Diagnose-Systeme, deren Präzision und einfache Anwendung eine gezieltere und genauere medizinische Untersuchung ermöglicht. Auch die Behandlung von Krebs- sowie Herz- und Gefäßerkrankungen kann über die Nanotechnologie effektiver gestaltet werden, weil ausschließlich nur kranke Zellen therapiert werden.

Allerdings konfrontieren uns diese hoffnungsvollen Vorstöße in Medizin und Wissenschaft mit neuen Situationen und werfen neue Fragen auf. Die Nanodimension ist der Schlüssel zum Ursprung biologischer Funktionen. Hier agieren zu können, bringt radikal neue Möglichkeiten mit sich, beispielsweise abgestorbene oder beschädigte Gewebe zur Neubildung anzuregen. Es gibt auch Behauptungen, die Nanotechnologie könne sogar neue, "leistungsfähigere" Menschen schaffen: Cyborgs mit direkt an das Nervensystem gekoppelten elektronischen Implantaten. Doch das ist wohl noch Fantasie.

Die Anwendung von nanotechnologischen Verfahren ist dabei eng mit den Fortschritten in der Biotechnologie und Pharmazie verbunden. Insbesondere durch die Fortschritte in den sogenannten „–omik“ Disziplinen wie Proteomik oder Genomik gewinnen wir immer tiefere Einblicke in die molekularen Ursachen von Krankheiten und entwickeln daraus neue Strategien zur Heilung von Krankheiten. Die Nanomedizin ist die Anwendung der Nanotechnologie für die Gesundheit.

Dabei beschreibt die Nanomedizin Verfahren und Methoden in der Wissenschaft und Technik für die Diagnose, Behandlung und Vorbeugung von Krankheiten und traumatischen Verletzungen, der Schmerzlinderung, der Erhaltung und Verbesserung der menschlichen Gesundheit durch Einsatz von molekularen Werkzeugen und dem molekularen Wissen der menschlichen Anatomie. Hierfür werden neuartige physikalische, chemische und biologische Eigenschaften von Werkstoffen auf der Nanometerskala ausgenutzt.

Die Nanomedizin hat dabei auch potentiell Auswirkungen auf die Prävention, frühzeitige und zuverlässige Diagnose und Behandlung von Krankheiten. Techniken mit hoher räumlicher und molekularer Auflösung kombiniert mit extrem hoher Empfindlichkeit werden für ein besseres Verständnis der menschlichen Zelle als komplexe "Maschine" in der Grundlagenforschung dienen. Der daraus resultierende Fortschritt wird wiederrum den Weg ebnen für innovative und leistungsstarke in-vivo-Diagnose Werkzeuge auch im Hinblick auf eine personalisierte Medizin. So können als Ziele der Nanomedizin die umfassende Überwachung, Instandhaltung und Verbesserung aller menschlichen biologischen Systeme festgehalten werden. Dieses interdisziplinäre Gebiet steckt allerdings noch in den

Kinderschuhen, hat aber durchaus die Möglichkeit die medizinische Forschung im 21. Jahrhundert entscheidend zu beeinflussen.

Fünf wichtige Teildisziplinen können definiert werden, wobei sie sich in vielen Fällen überlappen können:

- analytische Werkzeuge
- Nano-Bildgebung
- Nanomaterialien und Nanowerkzeuge
- neue Therapieansätze und Medikamententransport-Systeme
- klinische, regulatorische und toxikologische Ansätze

1. Gezielter Medikamententransport

Nanomaterialien können auf verschiedene Weise im menschlichen Körper eingesetzt werden. Besonders vielversprechend sind Anwendungen als Nano-Transportsysteme (nano delivery systems), die die zielgerichtete Abgabe und Verteilung von Wirkstoffen im Körper ermöglichen. Der Wunsch, einen Wirkstoff gezielt zum kranken Gewebe zu transportieren, ist so alt wie die Herstellung moderner Medikamente und rührt daher, dass viele Wirkstoffe starke Nebenwirkungen haben. Solche Nebenwirkungen werden häufig durch eine unspezifische Verteilung der Wirkstoffe im Körper verursacht. Ein lang gestecktes Ziel der Pharmaforschung ist es daher, Transportsysteme zu entwickeln, die es ermöglichen, einen Wirkstoff gezielt zum kranken Gewebe zu transportieren. Bereits in den 60er Jahren war mit den Liposomen ein System gefunden, das für das beschriebene Problem eine erfolgversprechende Lösung bot. Liposomen sind mikroskopisch kleine Bläschen aus Phospholipiden, die intravenös verabreicht werden. Da Blutgefäße in Tumoren eine größere Durchlässigkeit haben als gesundes Gewebe, reichern sich liposomal formulierte Wirkstoffe in Tumoren an. Jedoch bedurfte es etwa zwei Jahrzehnte an Forschungsarbeit, bis die ersten Produkte auf den Markt kamen. Anfängliche Schwierigkeiten bestanden darin, dass Liposomen vom Immunsystem erkannt und aus der Blutbahn entfernt wurden. Erst nachdem es gelungen war spezielle Moleküle an die Liposomen zu heften und sie so für das Immunsystem unsichtbar zu machen (stealth liposome), waren die Voraussetzungen für ihren medizinischen Einsatz geschaffen.

Je nach Zielsetzung und gewünschtem Einsatzort erfüllen die Nano-Transportsysteme unterschiedliche Aufgaben. Sie umhüllen z.B. schwer wasserlösliche oder fettlösliche Vitamine und Wirkstoffe und machen sie so für den Körper leichter verfügbar. Andere erlauben die Freisetzung der Wirkstoffe zeitlich gezielt vorzunehmen oder Substanzen, welche im Körper zu schnell zersetzt würden, erst am Einsatzort oder einem kontinuierlich freizusetzen. Dabei umschließen Nanomaterialien den Wirkstoff mit winzig kleinen Schutzhüllen, die dann als verkapselte Systeme oder Mizellen bezeichnet werden. Sie ermöglichen es die Wirkstoffe zu schützen oder durch biologische Mimikry so zu verkleiden, dass sie gezielt an bestimmte Stellen im Körper transportiert werden können. Dazu zählen Polymer-Nanopartikel, Polymer-Wirkstoff-Konjugate oder anorganische Nanopartikel.

Transportsysteme sind auch von großer Bedeutung für Proteintherapeutika, deren Wirksamkeit oftmals eingeschränkt ist, da sie eine geringe Verweildauer im Blut aufweisen, chemisch labil sind und Immunreaktionen auslösen können. Mit nano-skaligen Transportsystemen wird daher versucht, die Applikationseigenschaften von Proteintherapeutika zu verbessern. So kann durch Anheften von Polymerketten an die Proteine nicht nur ihre Halbwertszeit im Blut erhöht werden, sondern auch insgesamt ihre Wirksamkeit. Zwei Polymer-Protein Konjugate mit Umsätzen jenseits der Milliardengrenze sind PEGA-SYS (pegyliertes Interferon alpha-2a) zur Behandlung von Hepatitis C und

Neulasta (pegyliertes hG-CSF) zur Behandlung von Neuropenie, einer Blutkrankheit, die zur Immunschwäche führt.

Es gibt darüber hinaus eine ganze Reihe von Verkapselungssystemen z.B. für die Kosmetik, neue pharmazeutische Produkte oder Kontrastmittel. Viele Systeme verwenden natürliche Materialien, die sich gut vom Körper abbauen lassen, aber durch ihre Nanoform mehr Stabilität erhalten oder vom Körper leichter aufgenommen werden. Hierzu gehören kleinste Fetttröpfchen (Nano-Lipidstrukturen), natürliche Eiweiß-Verbindungen, wie sie aus den Extrakten von Schalentieren gewonnen werden können (Chitosan) oder Gelatine. Viele Systeme kopieren die Natur, wie zum Beispiel abbaubare Polylaktogluconate (Eiweiß-Zucker-Verbindungen) oder Dendrimere (baumartige Polymerstrukturen), die bei Krebstherapien, Herpes und schwierig zu behandelnden Pilzkrankheiten eingesetzt werden sollen.

Andere Systeme arbeiten mit Materialien wie Kohlenstoff. Diese bilden nicht abbaubare, nanometerkleine Fußball-ähnliche Strukturen (Fullerene) oder winzige Kohlenstoff-Nanoröhrchen (carbon nanotubes), in denen die Wirkstoffe transportiert werden können. Ein weiterer Entwicklungsschritt, an dem die Forscher arbeiten, sind gezielte Transportsysteme (targeted delivery), die mit bestimmten Rezeptoren für Zelltypen, Viren oder andere Krankheitserreger ausgestattet werden können, um ihren Zielort zu „erkennen“. So ließe sich gewährleisten, dass Wirkstoffe am vorgesehenen Einsatzort, z.B. an bestimmten Organen wie der Leber oder an spezifischen Tumorzellen, wirken, nicht aber in anderen Körperregionen. Gearbeitet wird meist mit monoklonalen Antikörpern, die sich an die Tumorzellen anhängen. Es wird zurzeit auch an alternativen Methoden geforscht, die die gezielte Freisetzung von Wirkstoffen ermöglichen: Steuerung über Änderungen des pH-Wertes oder photochemischen Reaktionen von Nanopartikeln bei Bestrahlung mit Infrarotlicht. Den verschiedenen Typen von Transportsystemen ist gemeinsam, dass sich durch die verbesserte oder gezieltere Aufnahme die Wirkstoffmenge und unerwünschte Nebenwirkungen deutlich reduzieren ließen.

Baumartig verzweigte Makromoleküle Dendrimere in der Größe eines kleinen Proteins, stellen eine weitere interessante Molekülklasse für therapeutische Ansätze dar. Im Vergleich zu klassischen Polymermolekülen weisen sie den Vorteil auf, dass sie kontrolliert mit spezifischen Eigenschaften synthetisiert werden können und sich somit für die medizinische Anwendung maßschneidern lassen. Darüber hinaus hinaus können funktionelle Gruppen spezifisch auf der Oberfläche angeordnet werden, so dass sie besonders effizient mit Viren und Zellen wechselwirken. Ein Beispiel für einen Wirkstoffkandidaten auf Dendrimer-Basis ist Vivagel, ein Gel, das vor HIV-Infektionen schützt. HIV-Viren besitzen bestimmte Proteine, die sich an Zellrezeptoren anlagern und den Virus so in Zellen einschleusen. Die Dendrimermoleküle in Vivagel reagieren genau mit diesen Proteinfragmenten auf der Oberfläche des Virus, so dass der Virus nicht mehr in Zellen eindringen kann. Damit ist die Infektionskette wirksam unterbrochen. Vivagel wird von Starpharma in Australien entwickelt und befindet sich zurzeit in der klinischen Phase-II.

2. Hyperthermieverfahren

Ein anderes Konzept wird in der Thermotherapie mit Nanopartikeln verfolgt. Bei dieser Therapiemethode für Tumore werden Partikel im Tumorgewebe angereichert und dann entweder durch ein externes Magnetfeld oder Laserlicht erwärmt, um so die Tumorzellen abzutöten. Ab Temperaturen von 42°C wird dabei ein zellschädigender (zytotoxischer) Effekt beobachtet, der mit höheren Temperaturen schnell ansteigt. Da Tumorgewebe empfindlicher auf erhöhte Temperaturen reagiert als gesundes Gewebe, setzt die Krebsforschung hier an. Problematisch ist, dass auch gesundes

Gewebe durch eine Erwärmung in Mitleidenschaft gezogen werden kann, wenn sich die Behandlung nicht auf das Tumorgewebe begrenzen lässt.

Durch den Einsatz von Nanomaterialien kann die Erhitzung des Gewebes lokal begrenzt werden. Dazu werden wenige-Nanometer-große Metalloxide in das Tumorgewebe eingebracht. International arbeiten verschiedene Forschergruppen derzeit mit Eisenoxid, Kupfer, Magnetit und Goldpartikeln, die mit einer Nano-Schutzhülle (coating) umgeben werden. Die Hülle wird so aufgebaut, dass die Metalloxide sich entweder an die Zellwände des Tumors anlagern oder dass sie von den Tumorzellen als vermeintliche „Nahrung“ (durch z.B. Zuckermoleküle) aufgenommen werden. Durch das Anlegen elektromagnetischer Wechselfelder erzeugen die Metallpartikel Wärme, die die Tumorzellen angreift oder zerstört. Je nach Erhitzungsgrad wird in Hyperthermieverfahren oder Thermoablationsverfahren unterschieden. Beim Hyperthermieverfahren werden die Tumorzellen auf 44-46°C erhitzt, das die Zellen schwächt, am weiteren Wachstum hindert und sie sensibler für Chemotherapien oder Bestrahlungen macht. Bei der Thermoablation der Nano-Krebs®-Therapie (MagForce AG) können lokal begrenzt bis zu 70° C erreicht werden, wobei die Tumorzellen absterben. Hyperthermie- und Thermoablationsverfahren wurden u.a. an dem Bundeswehrkrankenhaus Berlin und der Charité Berlin mit Eisenoxidpartikeln bei schwer- oder inoperablen Hirntumoren erfolgreich angewendet. Die Forscher arbeiten mit einer minimal invasiven Methode und injizieren die in einem Fluid enthaltenen Eisenoxidpartikel direkt in den Tumor. Jetzige Forschungen richten sich auf Prostata-, Speiseröhren-, Brustkrebs, Bauchspeicheldrüsen- und verschiedene Unterleibskrebsarten. Die Studien zu Gehirntumoren und zu den Prostatakarzinomen sind bereits in der klinischen Phase-II. Sie belegen durchweg eine gute Verträglichkeit sowohl der Verfahren als auch der verwendeten Nano-Eisenoxidpartikel. Diese neuartigen Nanotechnologie-basierten Methoden der Thermotherapie sind hoch innovativ und haben das Potenzial für eine deutlich nebenwirkungsärmere und kostengünstigere Therapie von Tumoren, als dies derzeit mit reinen Chemotherapien möglich ist.

„Im Jahre 2015 werden alle Krebsarten mit Nanopartikeln behandelt werden“, vermutet Mauro Ferrari vom amerikanischen National Cancer Institute.

Geht man die Frage nach neuen Anwendungen weiter, so eröffnet sich die Möglichkeit, Systeme zu entwickeln, die Therapie und Diagnose miteinander verbinden (Theranostics) und entstehende Krankheiten im Idealfall frühzeitig selbstständig bekämpfen. Die Forschungen in diesem Bereich sind jedoch noch in einem frühen Stadium der Grundlagenforschung (ETP 2006). Der International Risk Governance Council, Genf, spricht in diesem Zusammenhang von der 3. oder 4. Generation von „integrierten Nanosystemen“ (IRGC 2006), die solche hierarchischen Strukturen aufweisen könnten und später je nach Bedarf ihre Zusammensetzung und Wirkungsweise verändern könnten (heterogene molekulare Strukturen). Gegenwärtig befinden wir uns allerdings noch in der Erprobungsphase der passiven Nanostrukturen (1. Generation), die für einfache Oberflächenbeschichtungen eingesetzt werden und haben erst angefangen, aktive Nanostrukturen (2. Generation) in die Praxis umzusetzen, die wie z.B. beim Drug Delivery ihre Strukturen verändern, sobald das System ein bestimmtes Ziel erreicht hat.

Eine generelle Risikobewertung von Nano-Transport-Systemen vorzunehmen, ist angesichts der gezeigten Breite an Anwendungen und verwendeten Materialien nicht seriös möglich. Aussagen zur Gefährlichkeit oder Ungefährlichkeit von Nanomaterialien in diesem Einsatzgebiet sollten immer auf den Einzelfall bezogen werden. Dabei sind nicht nur die eingesetzten Formen der Nanomaterialien, sondern auch ihre möglichen Verbindungs- oder Zersetzungsprozesse (Agglomeration und Deagglomeration) mit in Betracht zu ziehen. Beim Einsatz im medizinischen Bereich gelten spezifische

Sicherheitsprüfungen bevor das Produkt zugelassen wird. Dies gilt selbstverständlich auch für Produkte, in denen Nanomaterialien als Wirkstoffe oder als Hilfsstoffe enthalten sind, oder für Medizinprodukte.

3. Diagnostik

Je früher eine Krankheit erkannt wird, desto größer sind die Heilungschancen. Es werden die verschiedenen Anwendungen von Nanotechnologien für Diagnosesysteme vorgestellt werden. Dabei wird zwischen in vitro-Verfahren, also Verfahren außerhalb des Körpers, und in vivo-Verfahren im Körper unterschieden, zu denen unter anderem die bildgebenden Verfahren mit Kontrastmitteln zählen.

Lab-on-a-chip-Technologie

Die gegenwärtigen Untersuchungslabore kosten derzeit viel Raum, Zeit und Mittel. Stellen wir uns vor, wir bräuchten die Proben nicht länger ins Labor einzusenden, sondern könnten die Reaktionen und Untersuchungen schnell und automatisch durchführen, wobei nur winzige Probenmengen notwendig sind. Dies ist die Idee der Scheckkartenlabore, lab-on-a-chip, einem vollständigen Labor auf die Größe eines Computerchips oder Glasobjektträger reduziert. Der Schlüssel zur Miniaturisierung und Dezentralisierung ist die Möglichkeit, Körperflüssigkeiten, Chemikalien oder andere gelöste Proben über nanoskalige Pumpsysteme zu Bioreaktoren und Biodetektoren zu leiten.

In-vitro-Diagnostik

Folgt man der Expertenmeinung so hat die Nanotechnologie der Biosensorik zu einer Renaissance verholfen. Es befinden sich derzeit eine Vielzahl von Nanotechnologie-basierten Sensoren und Diagnosesystemen in der Entwicklung oder bereits schon auf dem Markt. Das Ziel dieser Entwicklungen ist es zum einen bestehende diagnostische Tests effizienter durchführen zu können und zum anderen neue diagnostische Tests auf Protein- oder DNA-Basis für eine verbesserte Diagnostik von Krankheiten z.B. Krebs, kardiovaskuläre Erkrankungen oder Infektionserkrankungen (Abbildung 54) zu entwickeln. Dabei werden Nanopartikel als Marker für biologische Moleküle verwendet. In dem aus meiner Arbeitsgruppe gezeigten Beispiel werden Nanopartikel auf Kohlenstoff-Basis als Signalverstärker zum spezifischen, auf Antikörpern basierenden Nachweis des Erregerproteins NS-1 verwendet. Damit ist ein um einige 100% verbesserter Nachweis und somit eine frühzeitige Erkennung einer Dengue-Infektion möglich.

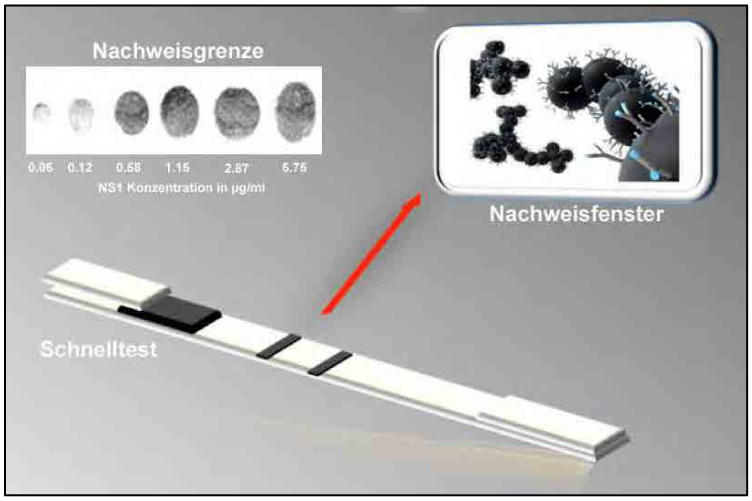


Abbildung 54 Diagnosetest für die Dengue-Infektion, einer Tropenkrankheit, basierend auf einem Löschpapier-Schnelltest; der spezifische Signal-Nachweis erfolgt mit Verstärkung durch Kohlenstoff-Nanopartikel. Die Konzentration des Markermoleküls NS1 im Blut beträgt 0.15-0.25 µg/ml am 2ten Tag nach der Infektion.

Zu den neuen Sensorplattformen zählen z.B. Federbalken (cantilever)- und SPR-Sensoren (SPR: surface plasmon resonance: Oberflächen-Plasmonen-Resonanz). Das Herzstück der Cantilever-Sensoren besteht aus mikromaschinell gefertigten Federbalken mit einer Länge von 10 bis 100µm und einer Dicke im nm bis µm-Bereich. Die Federbalken werden mit DNA-, Protein- oder Biomolekülen beschichtet, die spezifisch mit den gesuchten Biomolekülen in der zu untersuchenden Probe reagieren. Diese Bindungsereignisse führen zur Auslenkung eines Federbalkens, die mit einem Laser detektiert werden kann. Das Prinzip ist sehr ähnlich dem der Bildentstehung mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops. Im Vergleich zu vielen optischen Nachweismethoden weisen Cantilever-Sensoren den Vorteil auf, dass die Probenmoleküle nicht markiert werden müssen und somit die Nachweisschritte deutlich minimiert und vereinfacht werden.

Mit SPR-Sensoren können Bindungsereignisse zwischen Proteinen oder Protein-DNA in Echtzeit gemessen werden. Dabei wird ausgenutzt, dass sich bei einer entsprechenden Anordnung von nanometerdünnen Schichten, die Intensität des reflektierten Lichtes von der Masse der Biomoleküle abhängt, die an der Schicht haften. SPR-Sensoren finden bereits vermehrt Einsatz in der Wirkstoffforschung.

In-vivo-Bildgebende Verfahren

Im vergangenen Jahrhundert wurden in der diagnostischen Bildgebung große Fortschritte erzielt mit der Einführung und der Perfektion der Röntgen, Ultraschall, Magnetresonanz- und den nuklearen Verfahren. Hauptstärke dieser Verfahren ist der Nachweis morphologischer und physiologischer Veränderungen, allerdings sind sie kaum geeignet, spezifische Informationen über das Stadium und die Ursachen einer Krankheit zu geben. Jedoch die revolutionären Fortschritte in der Genomforschung und der molekularen Biotechnologie haben in jüngster Zeit zu einem deutlich verbesserten Verständnis der molekularen Prozesse geführt, die den Krankheiten zu Grunde liegen. Dies bedeutet, heute besteht die Möglichkeit, die Entstehung und den Verlauf von Krankheiten, z.B. Krebs oder Arteriosklerose, anhand von Protein und DNA-Molekülen, sogenannten Marker-Molekülen, die in den Zellen des erkrankten Gewebes gebildet werden, nachzuweisen. Das Ziel dieser molekularen Bildgebung ist es, diese Marker zu nutzen, um Krankheiten bereits vor Ausbruch der Symptome zu erkennen, Informationen über die spezifische Ausprägung der Krankheit zu erhalten und die Wirkung von Medikamenten zeitnah zu überprüfen.

Die molekulare Bildgebung basiert dabei auf den gleichen Verfahren wie die traditionelle medizinische Bildgebung; erfordert aber neue Kontrastmittel. Darüber hinaus müssen die technischen Apparate und die Datenverarbeitung angepasst werden. Typischerweise besteht ein Kontrastmittel für die molekulare Diagnostik aus einer bildgebenden Komponente, die mit einem Antikörper oder einem anderen Zielfindungsmolekül verbunden ist. In die Blutbahn injiziert, reagieren diese mit der Zielstruktur auf der Oberfläche der kranken Zellen nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip und reichern das Kontrastmittel so im kranken Gewebe an. Es zeichnet sich ab, dass innerhalb der in-vivo Diagnostik Nanotechnologie die größte Bedeutung für die Entwicklung molekularer Kontrastmittel erlangen wird. Das Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie entwickelte 10-Nanometer-kleine Quantum Dots, die 1.000-fach heller leuchten als herkömmliche Kontrastmittel und von Nano-Transportsystemen gezielt in Zellen eingeschleust werden können. Es sind wieder Transportsysteme, die unerkannt wie ein „Trojanisches Pferd“ die Kontrastmittel umhüllen und in die Zellen einschleusen. Die Forscher versprechen sich einen Durchbruch in der Krebsdiagnostik, indem Zellaktivitäten in Echtzeit sichtbar gemacht werden können.

In der Magnetresonanztomographie besteht das Problem, dass die Konzentration der molekularen Marker für Krankheiten zu klein ist, um nach Anreicherung des Kontrastmittels ein ausreichend starkes

Signal zu erhalten. Dabei wird auf Verfahren basierend auf Kohlenstoff-Nanoröhrchen oder Fullerene gesetzt, die mit sehr viel weniger Kontrastmittel (Gadolinium) auskommen, um die herkömmliche Bildqualität zu erreichen. Forscher von der Universität Virginia beschreiben eine 40-fache Effizienzsteigerung des Kontrastmittels für Kernspintomographen. Die eingebetteten Gadolinium-Partikel lagern sich zielgerichtet an die erkrankten Zellen an und erzeugen ein hochauflösendes, dreidimensionales Bild, das eine präzisere Diagnose erlaubt.

Molekulare Kontrastmittel auf Basis von Nanotechnologie befinden sich noch nicht auf dem Markt. Jedoch gibt es bereits Kontrastmittel, die aus Eisenoxid-Nanopartikeln bestehen, die einen besonders starken Kontrast erzeugen und sich selektiv in der Leber anreichern. Ein solches Kontrastmittel wurde von Schering jetzt Bayer Schering Pharma AG entwickelt und ist erfolgreich unter dem Namen Resovist® auf dem Markt eingeführt worden. Langfristig wird die molekulare Bildgebung zu einem Paradigmenwechsel in der Medizin führen: Der Fokus der medizinischen Versorgung soll zunehmend von der Diagnose und Behandlung später Symptome hin zur Prävention und Heilung von Krankheiten verschoben werden.

4. Biomaterialien und Implantate

Durch die sich stetig verbessernde medizinische Versorgung nimmt die Lebenserwartung der Menschen zu und degenerative Erkrankungen gewinnen an Bedeutung, insbesondere in der alternden Bevölkerung. Gelenke verlieren mit zunehmendem Alter ihre Funktionsfähigkeit und müssen daher oftmals ersetzt werden. Während bei älteren Patienten ab dem 65. Lebensjahr die Lockerungsraten mit zunehmender Zeit nur langsam ansteigen, liegt die Notwendigkeit, die Implantate schon innerhalb der ersten 10 Jahre zu ersetzen, bei jüngeren Patienten bei bis zu 30 %. Nanostrukturierte Oberflächenbeschichtungen für Implantate können z.B. aus Diamant-Kohlenstoff-Verbindungen, Hydroxylapatit oder nanoporösen Schichten bestehen. Verschiedene wissenschaftliche Studien zu den Nano-Beschichtungen weisen eine hohe Haftung an den Titanlegierungen des Implantats nach, zeigen verbesserte Härte und Stabilitätseigenschaften und belegen eine gute Haftung an Geweben und Knochen, ohne dass sich Zwischengewebe bildet.

Hydroxylapatit wird vorwiegend für die Beschichtung von Zahnimplantaten erforscht, wobei gezielt der Knochenaufbau rund um das Implantat angeregt werden soll. Hydroxylapatit ist den mineralischen Bestandteilen der Knochen sehr ähnlich und fördert ein besseres Einwachsen. Neuere Studien berichten, dass die Heilungsprozesse bis das Implantat fest eingewachsen ist, auf bis zu zwei Wochen verkürzt werden könnten. Normalerweise werden Heilungszeiten von 2–4 Monaten im Unterkiefer und von 4–6 Monaten im Oberkiefer angenommen.

Nanokristallines, phasenreines Hydroxylapatit wird heute schon in Pastenform zum Knochenaufbau eingespritzt. Seit 2002 gibt es erfolgreich ein Produkt, das z.B. nach chirurgischen Eingriffen als Knochenersatzmaterial angewendet wird. Studien zeigten, dass das Nanomaterial innerhalb von wenigen Monaten vollständig im Körper abgebaut und gut vertragen wird dank seiner Ähnlichkeit zu den natürlichen mineralischen Anteilen im Knochen. In weiterführenden internationalen Forschungen werden die Hydroxylapatite aktuell mit mehrwandigen Kohlenstoff-Nanoröhrchen (MWCNTs) in einer Komposit-Matrix verbunden und sollen zukünftig als Knochenzement eingesetzt werden. Weitere Studien lassen eine hohe Kompatibilität der Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die sich gut in das Knochengewebe integrieren lassen, vermuten. Ein anderer Forschungsschwerpunkt im Bereich der Ersatzgewebe für Unfallopfer oder bei schwerwiegenden operativen Eingriffen ist bioaktive Glas-Kollagen-Komposite in Nanogröße, die als Trägermaterialien für die Bildung von künstlichem Knochen-

und Hautgewebe in der Forschung gute Ergebnisse gezeigt haben. Die verschiedenen Nanomaterialien für Implantate oder Gewebs- und Knochenersatzmaterialien zeigen vielfältige Eigenschaften, je nach genauem Anwendungszusammenhang, und werfen sicher unterschiedliche Fragestellungen hinsichtlich ihrer Risikobetrachtung auf. Eines ist ihnen jedoch gemeinsam: die Zielsetzung der Verbesserung der Lebensqualität der Patienten, geringere Komplikationen im Heilungsverlauf und eine in Aussicht gestellte Kostensenkung im Gesundheitswesen.

5 Ethik

Für die Zukunft skizzieren die Forscher Bilder visionärer Heilungschancen für zerstörtes Gewebe, bei dem Nanomaterialien und adulte Stammzellen zum Aufbau neuer Haut und Knochen, Blutgewebe oder Nerven eingesetzt werden. Was mit der Verbesserung von Hüftimplantaten begann, könnte in Zukunft die Regeneration von zerstörtem Nervengewebe bedeuten, die Blinde wieder sehend und Querschnittsgelähmte wieder zum Laufen bringen könnte. In Australien werden z.B. dreidimensionale, biologisch abbaubare Nanofasern entwickelt, die als Gerüst (nano scaffolds) zum Aufbau von körpereigenen Nervenzellen dienen könnten und zerstörte Nervenbahnen von Parkinson-Patienten oder Querschnittspatienten ersetzen könnten. Das Gerüst selbst wird vom Körper im Zeitverlauf abgebaut. Diese Grundlagenforschung gibt Anlass zu großen Hoffnungen. Andere Konzepte setzen auf leitfähige biokompatible Nanomaterialien, die eine Verbindung zu elektronischen Impulsgebern ermöglichen und die zerstörte Netzhaut im Auge durch einen Chip ersetzen könnten. Nano-Beschichtungen könnten die bisherigen Abstoßungsprozesse verhindern. Weitere zukünftige Anwendungen werden für die Veränderung oder Vorbeugung von chronischen Herz-Kreislauf-Erkrankungen gesehen, wobei hier sowohl die Rekonstruktion von zerstörtem Gewebe wie auch die Schnittstelle zwischen Impulsgebern und Gewebe mit Hilfe von Nanomaterialien verbessert werden könnte (ETP 2006).

Problematisch schließt sich der Betrachtung der technischen Möglichkeiten die Frage nach den ethischen Aspekten der neuen Technologie an. Die Möglichkeiten der Nanotechnologie stellen die unproblematische Integration von Körperersatzteilen in Aussicht. Wenngleich in der medizinischen Forschung in erster Linie der funktionale Ersatz beschädigter Körperteile vorangetrieben wird, wird in der ethischen Debatte bereits an Organe und Prothesen gedacht, welche die menschlichen Originalteile zu übertreffen vermögen und Sinnesleistungen massiv steigern könnten (Enhancement). Die Grenzziehung zwischen tolerabler und intolerabler Körperverbesserung ist gesellschaftlich durchaus problematisch. Wie das Beispiel von Schönheitsoperationen zeigt, sind die Kriterien, welche Art von Verbesserung gesellschaftlich akzeptiert oder als notwendig betrachtet werden, von Kulturkreis zu Kulturkreis durchaus unterschiedlich und unterliegen generell dem Wandel. Die Ethiker wenden mit Recht kritisch ein, dass die Debatte um die gesellschaftlichen Normen und Werte, die einer rasanten Entwicklung zum „verbesserten Menschen“ entgegen stehen könnten, derzeit getrennt von der Debatte um die medizinisch-technische Machbarkeit verläuft. Wichtige Initiativen der EU zur Verknüpfung der naturwissenschaftlichen und ethisch-soziologischen Forschung sind aber bereits durch den EU-Kodex für verantwortliche Nanowissenschaften und Nanotechnologie-Forschung auf den Weg gebracht (European Commission 2008). In allen Forschungsprojekten, die die EU bewilligt, müssen in Zukunft ethisch-soziale Aspekte sowie eine fundierte Risikobewertung mit berücksichtigt werden. Eines der wichtigsten Anliegen der Geistes- und Sozialwissenschaften, die Entwicklung der Nanotechnologie bereits in einer Frühphase in die gesellschaftliche Debatte um einen verantwortungsvollen Umgang einzubinden, scheint sich zu erfüllen.

Im Mittelpunkt stehen dabei folgende Fragen. Welches Menschenbild wird zugrunde gelegt und wo sind die Grenzen des Machbaren? Sollten die nanotechnologischen Anwendungen nur bei schweren

Krankheiten zum Einsatz kommen oder dürfen diese auch körperliche Unzulänglichkeiten Behinderungen oder bloßes Unwohlsein „mit Nano-Hilfe repariert oder verbessert“ werden? Wem nützen diese Entwicklungen? Man sollte in diesem Zusammenhang auch die Diskussion führen welche Eigenschaften den Menschen eigentlich charakterisieren. Denn die Möglichkeit, die menschlichen Fähigkeiten zu verändern, kann die Vorstellungen von Menschenwürde und davon, ob jemand krank oder gesund bzw. normal ist, beeinflussen. Es ist zu befürchten, dass es einen erhöhten gesellschaftlichen Optimierungsdruck geben wird, der die Toleranzgrenze für geistige und körperliche Beeinträchtigungen sinken lässt. Ebenso kann der ungleiche Zugang zu solchen Technologien dem Begriff "Zweiklassen-Medizin" eine erhöhte Brisanz verleihen.

Literatur:

IRGC – International Risk Governance Council (2006): White Paper on: Nanotechnology – Risk Governance
http://www.irgc.org/

ETP – European Technology Platform on NanoMedicine (2006): Nanotechnology for Health. Strategic Research Agenda for Nanomedicine
ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nanomedicine_bat_en.pdf
Friedrich Ebert Stiftung: Nanomedizin – Chancen und Risiken; ISBN 978-3-89892-965-3
library.fes.de/pdf-files/stabsabteilung/05709.pdf

nano jugend dialog: Nanomedizin – Anwendungsfelder, mögliche Risiken und ethische Fragen, ein Überblick

www.nano-jugend-dialog.de
www.techportal.de
www.cc-nanobiotech.de
www.hessen.nanotech.de
www.bund.net

Versuch 24: DNA Isolierung aus einer Frucht (Variante A) (1 von 3)

Ziel

Isolierung von DNA aus einer Frucht

Zeitbedarf

Ca. 30 min

Material

je Gruppe (Gruppengröße maximal 4 Schülerinnen und Schüler:

- 1 Becherglas 250ml
- 1 Meßzylinder 10ml
- 1 Meßzylinder 30ml
- 1 Pistill
- 1 Reagenzglas mit Reagenzglasständer und Gummistopfen
- 1 Glastrichter mit Filter
- 1 Holzstab

Chemikalien:

- im Eisschrank gekühlter 100% Ethanol (ersatzweise Brennspiritus)
- ddH_2O
- Waschmittel
- NaCl
- Extraktionspuffer (50ml Spülmittel, 4g NaCl, 22g Natriumcitrat (oder Zitronensaft) auf 0,5l ddH_2O)
- ½ Frucht pro Gruppe

Versuch 24: DNA Isolierung aus einer Frucht (Variante A) (2 von 3)

Durchführung

1. Gib die kleingeschnittene Frucht in ein Becherglas.

2. Füge 20 ml Extraktionspuffer hinzu, den Du zuvor mit einem 30 ml Messzylinder abgemessen hast.

3. Homogenisiere (zerreiben) den Inhalt des Becherglases mit dem Pistill gut und lass ihn 5 Minuten stehen.

Abbildung 55 Frucht in einem Mörser vor der Homogenisierung.

Abbildung 56 Zugabe von Extraktionspuffer

4. Filtriere den Inhalt des Becherglases durch einen Filter, der sich im Glastrichter befindet in ein Reagenzglas das bereits 1,5ml Wasser enthält. Fange nur 1,5ml des Filtrats (das, was unten aus dem Filter heraus läuft) auf.

Abbildung 57 Filtrierung des homogenisierten

5. Gib langsam 5ml 100% Ethanol aus dem Eisschrank hinzu, den Du zuvor mit dem 10 ml Messzylinder abgemessen hast indem du ihn am Rand des schräg gehaltenen Reagenzglases hinunterlaufen lässt. Der Alkohol entzieht der DNS das Wasser und führt zur Ausfällung der DNS (siehe Pfeil).

6. Verschließe das Reagenzglas mit dem Gummistopfen (wenn vorhanden) und stelle es vorsichtig mehrfach auf den Kopf.

7. Versuche die DNS mit dem Stab aufzuwickeln und aus dem Reagenzglas zu ziehen.

Versuch 24: DNA Isolierung aus einer Frucht (Variante A) (3 von 3)

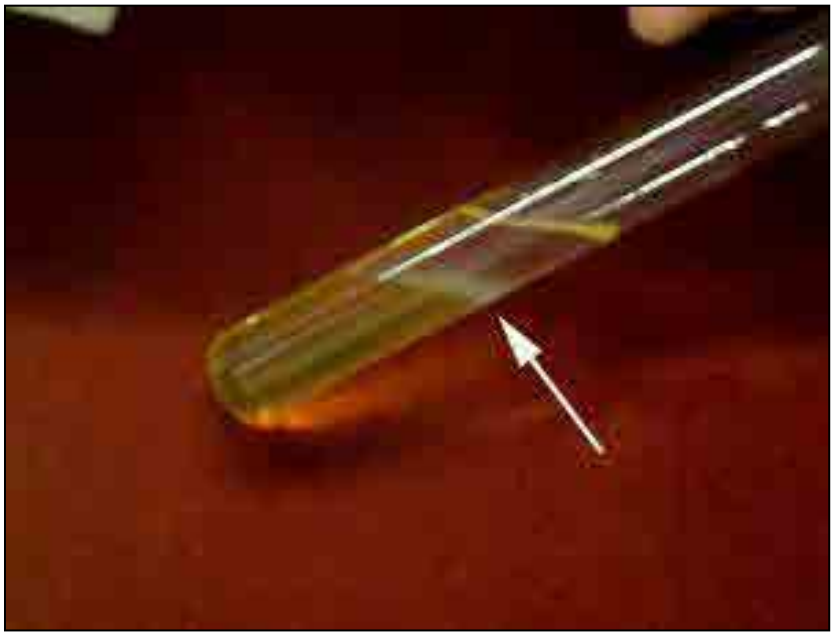


Abbildung 58 Die DNA erscheint milchig trüb an der Phasengrenze zwischen Extrakt und Alkohol

Aufgaben:

1. Führe das Experiment durch und notiere deine Beobachtungen.

2. Sammle Fragen und Erkenntnisse, die sich für dich anhand des Experiments ergeben.

Versuch 25: DNA Isolierung aus einer Frucht (Variante B) (1 von 2)

Chemikalien:

- 10 ml Spülmittel
- 3 g Kochsalz
- 90 ml Wasser
- 1 mittelgroße Tomate oder Zwiebel
- 2-3 Tropfen flüssiges Waschmittel
- Ethanol aus der Apotheke

Durchführung

1. Geben Sie das Kochsalz in das Spülmittel. Füllen Sie mit Wasser auf 100 ml auf. Gut rühren, um das Salz aufzulösen.

2. Geben Sie die geschnittene Tomate oder Zwiebel in die salzige Spülmittellösung. (Das Spülmittel bricht die Zellmembranen auf, so dass die DNA aus den Zellen und den Zellkernen entlassen wird)

3. Stellen Sie das Glas für 15 Minuten in ein etwa 60°C warmes Wasserbad. (Wärme beschleunigt den Prozess und zerstört DNAsen, Enzyme, welche die DNA abbauen könnten)

4. Kühlen Sie die Mischung in einem Eisbad für einige Minuten ab. (Eine längere Wärmebehandlung schädigt die DNA. Durch die Abkühlung auf dem Eisbad wird dieses verhindert)

5. Mixen Sie die Probe kurz durch, aber nicht länger als fünf Sekunden. (Der Mixer hilft die Tomaten- bzw. die Zwiebelzellen aufzuschließen. Nicht zu lange mixen, sonst wird die DNA zerstört)

6. Filtrieren Sie die gemixte Mischung und fangen Sie das Filtrat (das was unten aus dem Filter heraus läuft) am besten in einem hohen, schmalen Glas auf. Zur Filtration genügt ein einfacher Kaffeefilter. (Dieser Schritt trennt die Zellwandbestandteile von der DNA und den Proteinen, die nun im Filtrat gelöst sind)

7. Fügen Sie 2-3 Tropfen flüssiges Waschmittel zu etwa 10 ml Filtrat hinzu. Danach gut schütteln. (Im Waschmittel ist das Enzym Protease enthalten, welches Proteine in der Lösung abbaut. Nur geringe Mengen des Enzyms sind dazu notwendig)

8. Überschichten Sie den Extrakt sehr vorsichtig mit dem gleichen Volumen eiskalten Ethanols. (Ethanol ist der Alkohol, der auch in alkoholischen Getränken enthalten ist. Für den Versuch eignet sich aber am besten reines Ethanol, wie man es in einer Apotheke kaufen kann. Der Ethanol muss für den Versuch eiskalt sein)

Versuch 25: DNA Isolierung aus einer Frucht (Variante B) (2 von 2)

Erklärung:

1. Das Spülmittel bricht die Zellmembranen auf, so dass die DNS aus den Zellen und den Zellkernen entlassen wird.

2. Die Filtration trennt die Zellwandbestandteile von der DNS und den Proteinen, so dass DNS und Proteine nun im Filtrat gelöst sind.

3. Brennspiritus besteht zu 94% aus Ethanol (Ethyl-Alkohol). Ethanol ist der Alkohol, der auch in alkoholischen Getränken enthalten ist. Für den Versuch eignet sich aber am besten reines Ethanol wie man es z.B. in einer Apotheke kaufen kann. Das Ethanol muss für den Versuch eiskalt sein - bewahre ihn deswegen über Nacht im Kühlschrank auf.

4. DNS löst sich nicht in Ethanol und wird dadurch in dieser Schicht sichtbar (nachdem das die DNS umgebende Wasser entfernt ist). Die DNS lässt sich am besten mit einem rauen Holzstäbchen aus dem Glas fischen.

Einführung: Nanoskalige Goldpartikel

Zeit

Ca. 30 min

5-Minuten Nanotechnologie

Bereits im Mittelalter stellten Künstler kolloidales – nanoskaliges – Gold her. Durch Einschmelzen von geringsten Mengen Pulvergold in Glas, wurden Gläser und Kirchenfenster rot gefärbt. Heute werden nanoskalige Goldpartikel z.B. in der Medizin als Marker oder Transporter für DNS und andere Molekularverbindungen eingesetzt.

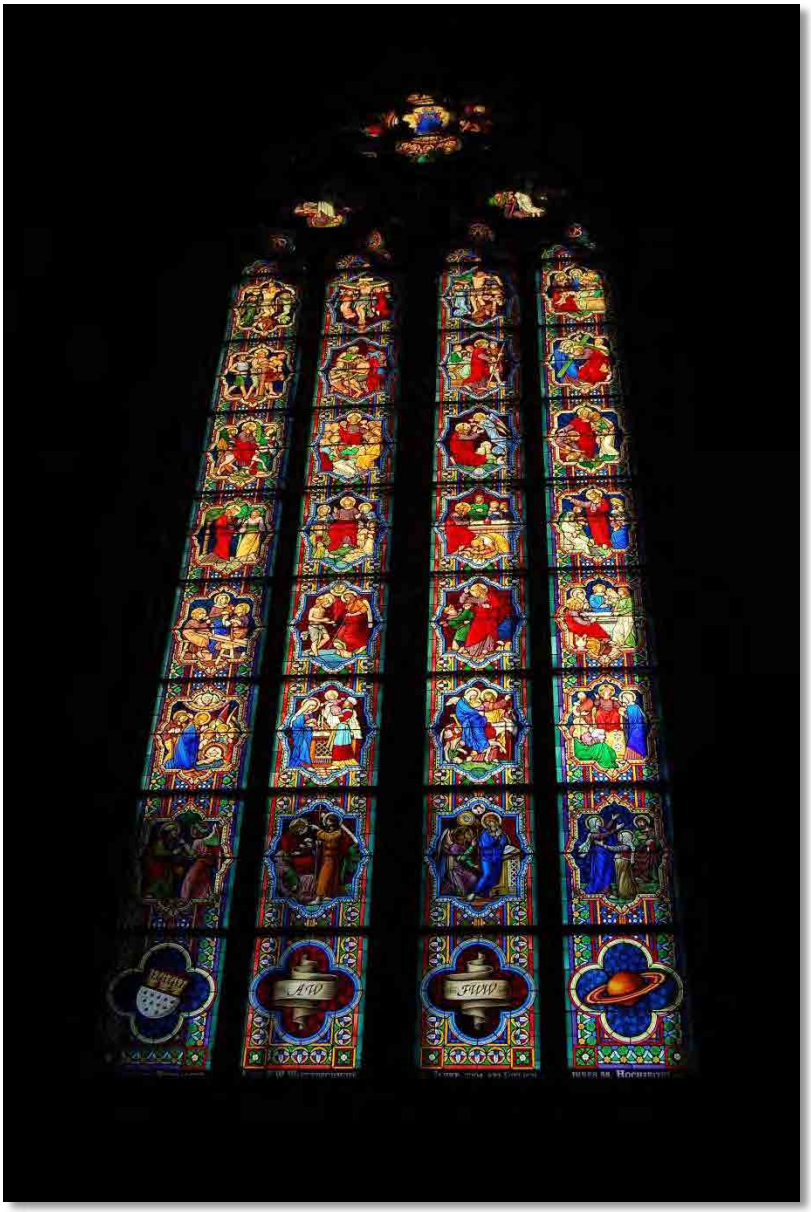


Abbildung 59 Kirchenfenster im Kölner Dom.

Einführung: Nanoskalige Goldpartikel

Schwangerschaftstest

Bei einer bestehenden Schwangerschaft gelingt der Hormonnachweis bereits sechs bis acht Tage nach der Befruchtung. Das heißt, dass etwa zwei Tage seit Einnistung der Eizelle in die Gebärmutter vergangen sind. Bei den Schwangerschaftstests unterscheidet man Urin- und Bluttests. Der häusliche Urin- oder Stäbchenschnelltest ist die am häufigsten angewandte Methode zum Schwangerschaftsnachweis. Sämtliche dieser Tests beruhen auf einem 1980 von Unipath Ltd. in Großbritannien patentierten Prinzip. Heutzutage sind die Urintests schon so empfindlich, dass der Nachweis des Schwangerschaftshormons Choriongonadotropin (hCG) im Morgenurin bereits kurz vor der zu erwartenden Regel gelingt. Prinzipiell ist ein positives Testergebnis, das auch als gesichert einzuschätzen ist, aber erst für den zweiten Tag nach dem Ausbleiben der Periode zu erwarten. Im Blut gelingt der hCG-Nachweis früher als im Urin. Diese Tests liefern im Normalfall bereits zwei Tage vor der Regel ein verlässliches Ergebnis.

In der Forschung macht man sich die lichtabsorbierende Eigenschaft der Goldpartikel zum Nachweis von Biomolekülen zunutze. So können Antikörper durch Ankoppeln der Goldpartikel markiert werden. Strahlt man anschließend weißes Licht ein, so leuchten die Metallpartikel farbig auf. Eine Anwendung davon sind manche Schwangerschaftstests, in denen Nanogoldpartikel im Teststreifen fein verteilt vorliegt. Der an gekoppelte Antikörper erkennt ein Hormon im Urin mit dem sich eine beginnende Schwangerschaft nachweisen lässt. Ein positives Testergebnis zeigt sich durch einen roten Streifen im Testfenster.

Der Schnelltest ist ein immunchromatographischer Test. Wird der Teststreifen mit Urin benetzt, beginnen sich die kolloidalen Goldpartikel in der Flüssigkeit zu lösen. Enthält der Urin das Hormon hCG, so bindet das hCG-Antigen an einen Goldpartikel-markierten hCG-Antikörper. Der Antigen-Antikörper-Goldpartikel-Komplex wandert aufgrund von Kapillarkräften zur Testzone in der ein zweiter anti-hCG-Antikörper fixiert ist. Der immobilisierte Antikörper bindet den wandernden Antigen-Antikörper-Farbstoff-Komplex in dieser Zone und färbt diese an. Überschüssiger Goldpartikel-markierter hCG-Antikörper wandert weiter zur Kontrollzone in der ein anti-Fc-Antikörper fixiert ist. Der immobilisierte anti-Fc-Antikörper bindet den überschüssigen Goldpartikel-markierten hCG-Antikörper in dieser Zone und färbt diese an.

Abbildung 60 Schwangerschaftstest.

Einführung: Nanoskalige Goldpartikel

Literatur:

Heinzerling, P. (2006): Nanochemie in der Schule, eine historische experimentelle Annäherung. PdN-ChiS 1/55: 32-35

Liz-Marzan L.M. / Giersig M. / Mulvaney P. (1996): Synthesis of Nanosized Gold-Silica Core-Shell Particles. Langmuir 12: 4329

Prof. Dr. Axel Lorcke; Universität Duisburg-Essen Campus Duisburg, Fakultät 4 – Experimentalphysik, Lotharstr. 1, 47048 Duisburg

Morrison I.D. / Ross S. (2002): Colloidal Dispersions. Wiley & Sons.

Ostwald W. (1920): Kleines Praktikum der Kolloidchemie. Dresden & Leipzig: Verlag Th. Steinkopf: 2-4

Senft C. / Siemeling U. (2007): Im Reich der bunten Zwerge, Gold-Nanopartikel im Schulversuch. Unterricht Chemie 1/07: 40-42

Versuch 26: Synthese nanoskaliger Goldpartikel (1 von 2)

Material

Chemikalien:

$HAuCl_4$, $C_6H_5Na_3O_7 \cdot 2H_2O$, NaCl, Ethanol (Isopropanol), ddH_2O

Geräte:

Stativ mit Klemme, 3-Halskolben mit Glasstopfen 250 ml, Thermometer, Magnetrührstäbchen, Heizplatte mit integriertem Magnetrührer, Feinwaage, Pipetten und Spritzen.

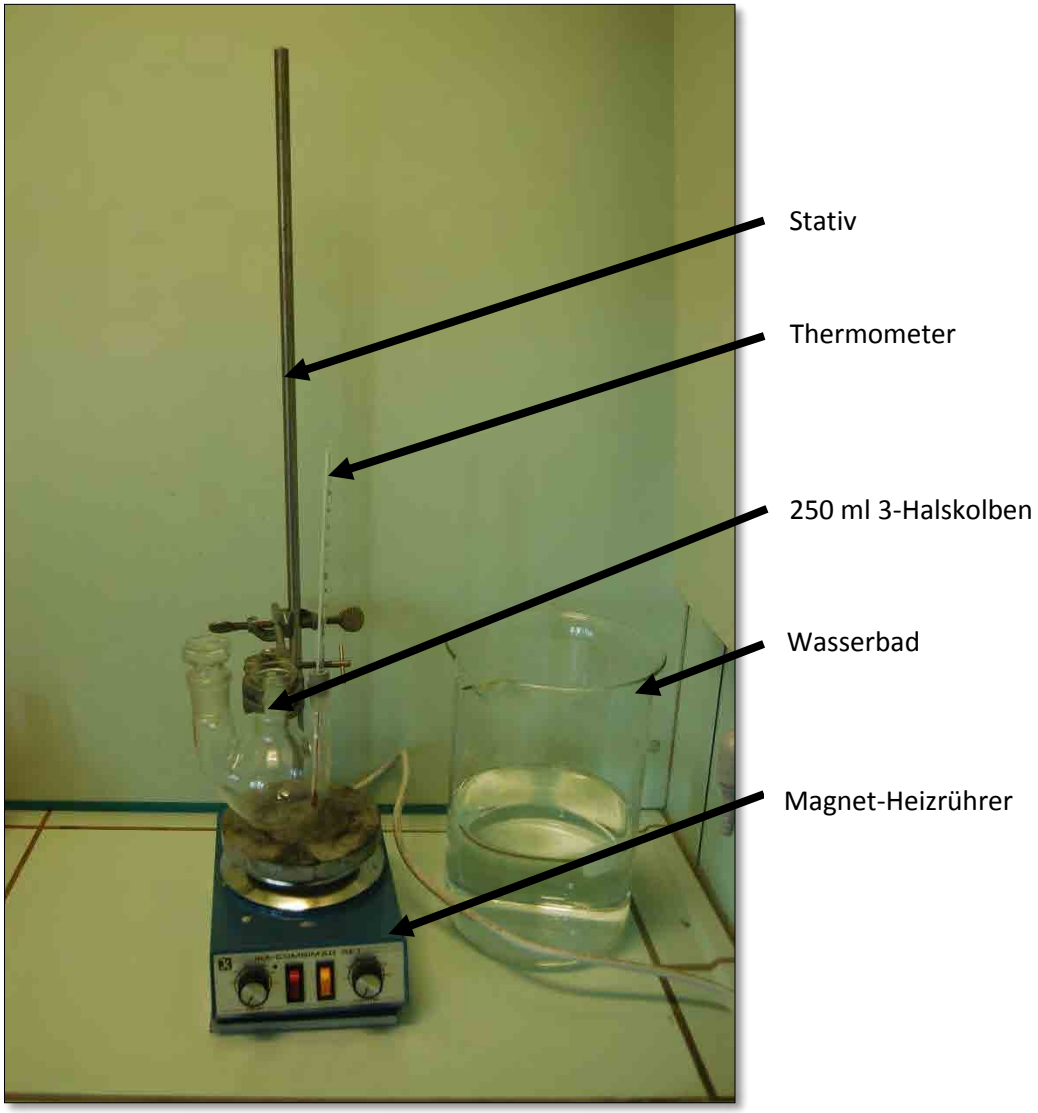


Abbildung 61 Versuchsaufbau für die Synthese nanoskaliger Goldnanopartikel nach dem Kondensationsverfahren.

Versuch 26: Synthese nanoskaliger Goldpartikel (2 von 2)

Durchführung:

1. Versuchsaufbau wie in der Abbildung 61 gezeigt. Stelle den Kolben in ein 500ml Becherglas gefüllt mit Wasser und einem Rührfisch.

2. Bei der Versuchsdurchführung muss man die **Schutzkleidung**, **Schutzbrille** und **Handschuhe** tragen. Die vorgegebene Präparatmenge muss möglichst genau abgewogen/abgefüllt werden.

3. In dem Glaskolben werden je 10 ml $1 \cdot 10^{-3}$ molare Goldchlorid-Lösung ($AuCl_3$ aq) und $1 \cdot 10^{-3}$ molare Salzsäure vermischt und mit 20 ml destilliertem Wasser aufgefüllt. Die Goldchloridlösung wird in dem Becherglas-Wasserbad zum Sieden erhitzt. Berechne (vor dem Versuch) wie viel Gramm von $AuCl_3$ und Salzsäure für die Herstellung dieser Lösungen notwendig sind?

4. Sobald die Lösung siedet, werden 3 ml einer $1{,}7 \cdot 10^{-2}$ molaren Trinatriumcitrat-dihydrat-Lösung ($Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$) zugegeben und unter Rühren weiter erhitzt. Berechne (vor dem Versuch) wie viel Gramm von Trinatriumcitrat-dihydrat für die Herstellung dieser Lösung notwendig ist? Die Lösung sollte vorgewärmt sein, um große Temperaturunterschiede zu vermeiden.

5. Während der Reaktion kann eine Farbänderung beobachtet werden. Die zuvor blassgelbe Farbe der Goldchlorid-Lösung wird zunächst violett. Nachdem die Synthese abgeschlossen ist, erhält man eine rötliche Lösung aus **Au-Nanopartikel.**

Anmerkung:
Durch Zugabe von Natriumchlorid ändert sich die Farbe von rubinrot nach grau-blau.

Versuch 27: Cassius´scher Goldpurpur (1 von 2)

Materialien

Chemikalien:
$HAuCl_4$, $ZnCl_2$, ddH_2O

Geräte:
3 Schnappdeckelgläser

Durchführung:

1. In 3 Schnappdeckelgläser werden je 3, 6 und 9 Tropfen der Goldchlorid-Lösung (z.B. aus NanoSchoolBox) mit 2 ml ddH_2O geben.
2. Dazu werden jeweils 5 Tropfen einer 0,02M $ZnCl_2$-Lösung gegeben.
3. Nach kurzer Zeit bildet sich der Cassiussche Goldpurpur.

Beobachtung:

In Probe 1 (3 Tropfen Goldchlorid-Lösung) bildet sich eine goldbraune klare Lösung. In Probe 2 (6 Tropfen) bildet sich eine purpurrote klare Lösung und in Probe 3 (9 Tropfen) eine purpurviolette klare Lösung.

Versuch 27: Cassius´scher Goldpurpur (1 von 2)

Erklärung zum Cassiusscher Goldpurpur

Im Versuch wird eine Tetrachloraurat(III)-Lösung zu elementaren Goldteilchen reduziert und die Koagulation der Goldteilchen wird in Anwesenheit von Zinnchlorid-Lösung verhindert. Der sich bildende Cassiussche Goldpurpur hat eine deutlich violette Färbung. Dem Hamburger Apotheker Andreas Cassius (1604/05 – 1673) gelang damit 1668 der Nachweis auch kleiner Spuren von Gold. Daneben findet der Goldpurpur Verwendung als rotes Pigment in der Glas- und Porzellanmalerei.

$$3\,Sn^{2+} + 2\,(AuCl_4)^- + 6\,H_2O \rightarrow 2\,Au\downarrow + 3\,SnO_2\downarrow + 12\,H^+ + 8\,Cl^-$$

Die Kolloide können mit dem Laserpointer durch den **Tyndall-Effekt** nachgewiesen werden. Der Tyndall-Effekt beschreibt die Streuung von Licht an submikroskopischen Schwebeteilchen, mit Abmessungen ähnlich der Lichtwellenlänge, die in einer Flüssigkeit oder einem Gas suspendiert sind. Der Effekt ist nach seinem Entdecker John Tyndall benannt, der die Streuung von Licht in kolloidalen Lösungen untersucht hat.

Die in einer „echten“ Lösung gelösten Ionen oder Moleküle haben Teilchengrößen in der Größenordnung von etwa 1 nm. Mit Papierfiltern kann man Teilchen bis herab zu etwa 1000nm niederschlagen. Teilchen, deren Größen zwischen diesen Größenordnungen liegen, können durch Zentrifugation vom Lösungsmittel abgetrennt werden. Solche Lösungen nennt man kolloidale Lösungen. Abgeleitet ist der Begriff vom griechischen Wort für Leim „*kolla*“. Bei kolloidalen Teilchen wird eine Zusammenballung oder Koagulation verhindert, weil an ihrer Oberfläche Lösungsmittelmoleküle (solvatokratische Kolloide) oder elektrische Ladungen (elektrokratische Kolloide) angelagert sind, die eine gegenseitige Abstoßung hervorrufen. Eine solche geladene Oberflächenschicht bezeichnet man nach dem Physiker **Otto Stern** (1888 – 1969) als Sternschicht. Die kolloidiale Lösung wird auch Sol genannt.

Eine Ausflockung der so geschützten Teilchen kann man beispielsweise durch Zugabe von Ionen entgegen gesetzter Ladung erreichen, mit denen die abstoßende Wirkung aufgehoben wird.

Einführung: Ferrofluide -Magnetische Flüssigkeiten

5-Minuten Nanotechnologie

Als Ferrofluid bezeichnet eine Flüssigkeit, die auf ein magnetisches Feld reagiert. Ferrofluide Stoffe bestehen aus wenigen Nanometer großen magnetischen Partikeln, die in einer Trägerflüssigkeit kolloidal suspendiert sind. Die festen Teilchen werden in der Regel mit einer organischen polymeren Oberflächenbeschichtung stabilisiert. Echte Ferrofluide sind stabile Dispersionen, d.h. sich die festen Teilchen nicht mit der Zeit absetzen und selbst in extrem starken Magnetfeldern nicht aneinander anlagern und sich von der Flüssigkeit als andere Phase abscheiden (R. Rosensweig, 1985). Das erste Patent für ein Ferrofluid wurde der NASA 1965 erteilt. In der frühen Entwicklung des Raumfahrtprogramms untersuchte die NASA die Möglichkeit Ferrofluid als flüssigen Raketentreibstoff unter Schwerelosigkeit mittels Magnetfelder zu transportieren. Heute finden Ferrofluide in vielen Anwendungen wie Lautsprecher, CD–ROM, Computer, Halbleiterfertigung oder Materialtrennung Verwendung. Außerdem besteht ein großes Potential in biomedizinischen Anwendungen.

Krebsbekämpfung mit magnetischen Nanopartikeln

Krebs ist nach Herz-Kreislauf-Erkrankungen weltweit die zweithäufigste Todesursache. Es erkranken jedes Jahr mehr als 10 Millionen Menschen an dieser heimtückischen Krankheit, davon rund 420.000 in Deutschland. Im Jahr 2020 werden nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) weltweit rund 15,7 Millionen Menschen neu davon betroffen sein. Hauptgrund für diesen Anstieg ist die steigende Lebenserwartung. Krebs ist zu einem großen Teil auf Fehler in der Erbsubstanz zurückzuführen: Je älter der Mensch wird, desto mehr Fehler häufen sich an und umso wahrscheinlicher wird eine Krebserkrankung. Drei Viertel aller betroffenen Patienten sind älter als 60 Jahre. Diese Entwicklung hat zur Folge dass der Forschungsbedarf und die Nachfrage nach neuen Therapieformen gegen Krebs stetig steigen werden.

Die Nano-Krebstherapie ist ein neues Verfahren zur lokalen Behandlung von Tumoren. Dabei können Temperaturen zwischen 41 °C und 45 °C (Hyperthermie) sowie zwischen 46 °C und 70 °C (Thermoablation, Erwärmung der Tumore auf bis zu 70 °C, um so die Krebszellen irreparabel zu schädigen.) innerhalb des Tumors erzeugt werden. Das Prinzip der Methode ist die direkte, minimal-invasive Einbringung magnetischer Nanopartikel in den Tumor und ihre anschließende Erwärmung in einem magnetischen Wechselfeld. Minimal-invasive medizinische Anwendungen sind welches, bei denen Geräte oder Katheter in geringerem Maße als üblich in den Körper eindringen und somit beim Patienten geringere Schmerzen zur Folge haben. Bei Temperaturen bis 45 °C wird die Wirkung einer gleichzeitig angewandten Strahlen- oder Chemotherapie verstärkt. Die Wirkungsverstärkung gegenüber einer Strahlentherapie erfolgt dabei beispielsweise durch den wärmebedingte Funktionsverlust von Reparatur-enzymen, die normalerweise Strahlenschäden an der DNS reparieren und so das Überleben von Tumorzellen ermöglichen. Werden diese wichtigen Enzyme durch Wärme geschädigt, sterben die Tumorzellen bereits bei kleineren Strahlendosen ab. Wärme beeinträchtigt aber auch andere Proteine, die zum Beispiel dafür verantwortlich sind, dass chemoresistente Tumorzellen die für sie schädlichen Zytostatika, Substanzen, die das Zellwachstum bzw. die Zellteilung hemmen, aus den Zellen wieder herausschleusen können. Fallen diese „Pumpen“ durch Wärmeeinwirkung aus, sterben selbst chemoresistente Tumorzellen, weil die Wirkstoffe weiterhin in den Zellen verbleiben. Bei Temperaturen ab 46 °C werden nahezu alle Biomoleküle der Zellen betroffen und die Zelle stirbt direkt an den Folgen der Überhitzung. Die Zelltrümmer werden anschließend vom Körper selbst auf natürlichem Wege abgebaut. Die freigewordenen Nanopartikel werden entweder von umliegenden, noch intakten Tumorzellen aufgenommen oder ebenfalls von Makrophagen (Fresszellen) abtransportiert. Bei den Nanopartikeln handelt es sich um sehr kleine, in Flüssigkeit gelöste Teilchen aus Eisenoxid mit einem Durchmesser von etwa 20 Nanometern (inklusive der Hülle).

Einführung: Ferrofluide -Magnetische Flüssigkeiten

Die Partikel werden durch ein Magnetfeld, welches bis zu 100.000 Mal in der Sekunde seine Polarität wechselt, in Schwingung versetzt und erzeugen dadurch Wärme. Mit dieser Technik ist der Arzt in der Lage, den Tumor von innen heraus zu bekämpfen. Die Teilchen werden direkt in den Tumor eingebracht (injiziert) und verbleiben aufgrund ihrer Hüllgestaltung dort. Sie werden nicht wieder heraus geschleust, so dass sich die Behandlung nur auf das Tumorgewebe beschränkt. Umgebendes gesundes Gewebe wird geschont (www.magforce.de).

Versuch 28: Herstellung magnetischer Flüssigkeiten (1 von 6)

Vorbemerkung

Dieses Experiment ist zeitaufwändig und lässt sich nicht in einer Unterrichtsstunde durchführen. Wir empfehlen die Durchführung in mehreren Schritten im Rahmen eines mehrtägigen Projektes.

Vorbereitung für das Experiment

Gruppengröße: max. 4 Schülerinnen und Schüler
Bei allen Arbeiten Kittel, Handschuhe und Schutzbrille tragen! Bitte das Ferrofluid als nicht halogenhaltigen organischen Abfall entsorgen und die Vorschriften des kommunalen Abfallentsorgers beachten.

Benötigte Materialien für das gesamte Experiment

je Gruppe:

- Spatel
- 2 Bechergläser 50 ml
- 1 Becherglas 100 ml
- 1 Becherglas 400 ml
- 1 Heizplatte mit Magnetrührer
- 2 kleine Magnetrührfische (ca. 2 cm Länge)
- 1 Magnetrührfisch (ca. 5 cm Länge)
- 1 Thermometer
- pH-Papier
- Trichter
- Papierfilter (möglichst fein)
- Stabmagnet (Neodyn)
- Einmal-Pipette
- Aluminiumschale (Ø 3cm)
- 1 Cent Münze

1 x insgesamt:

- Waage (Genauigkeit min. ± 0,01 g)
- 1 Trockenschrank
- Chemieabzug

Chemikalien:

- $FeCl_3 \cdot 6\ H_2O$ (270.3 g/mol)
- $FeCl_2 \cdot 4\ H_2O$ (198.8 g/mol)
- NaOH (40 g/mol)
- ddH_2O (vollentsalztes Wasser, VE-Wasser)
- Ölsäure
- n-Decan

Versuch 28: Herstellung magnetischer Flüssigkeiten (2 von 6)

Schritt 1: Fällung

Chemikalien:

- $FeCl_3 \cdot 6\ H_2O$
- $FeCl_2 \cdot 4\ H_2O$
- NaOH
- destilliertes Wasser

Geräte:

- 50-ml-Becherglas
- 100-ml-Becherglas
- Heizplatte mit Magnetrührer (5cm)

Durchführung:

1. In das 100-ml-Becherglas werden 5,43 g FeCl3 · 6 H2O (orange) eingewogen und 30 ml ddH2O zugegeben.
2. In das 50-ml-Becherglas werden 2,0 g FeCl2 · 4 H2O (hellgrün) eingewogen und 20 ml ddH2O zugegeben.
3. Unter Rühren lösen sich nach ein paar Minuten die Salze. Danach werden die beiden klaren Lösungen im-100 ml-Becherglas vereinigt und gut vermischt. Das 50-ml-Becherglas wird mit wenig ddH_2O nachgespült.
4. 8 g NaOH werden in das 400-ml-Becherglas eingewogen und 200 ml ddH_2O zugegeben. Unter kräftigem Rühren (großer Magnetrührfisch) wird das NaOH aufgelöst. (**Vorsicht: die Lösung wird warm!**)
5. Die Metallsalzlösung wird unter weiterem starkem Rühren zügig zur Natronlauge-Lösung gegeben wobei sich eine schwarze Suspension von Nano-Magnetit bildet, die magnetisierbar ist. Die Suspension wird 15 Minuten gerührt.

Versuch 28: Herstellung magnetischer Flüssigkeiten (3 von 6)

Schritt 2: Reinigung

Chemikalien:
destilliertes Wasser

Geräte:
pH-Papier

Durchführung:

1. Nach Ablauf der 15 Minuten wird das Becherglas von der Rührplatte genommen und der schwarze Niederschlag zum Sedimentieren gebracht: Dazu wird die Suspension stehen gelassen, bis der Feststoff sich vollständig abgesetzt hat.
2. Die überstehende Flüssigkeit wird dekantiert. Dieser Vorgang dauert etwa 30 Minuten. Anschließend werden zu dem schwarzen Niederschlag 200 ml ddH_2O gegeben, die Suspension aufgeschlämmt und kräftig gerührt.
3. Die Abtrennvorgänge werden so oft wiederholt, bis der pH-Wert der überstehenden Flüssigkeit etwa 10 beträgt (die Zugabe von Wasser sollte mindestens viermal erfolgen).

Abbildung 62 Sedimentation des Niederschlags.

Versuch 28: Herstellung magnetischer Flüssigkeiten (4 von 6)

Schritt 3: Oberflächenbehandlung

Chemikalien:

- destilliertes Wasser
- Ölsäure,

Geräte:

- Thermometer
- Heizplatte mit Magnetrührer (2cm)
- Trockenschrank

Durchführung:

1. Zu dem schwarzen, gewaschenen Niederschlag werden 200 ml ddH_2O gegeben, die Suspension wird kräftig gerührt. Das Thermometer wird nun so befestigt, dass es einige cm in die (immer noch gerührte) Lösung eintaucht. Die Suspension wird auf ca. 80 °C erhitzt.
2. Bei dieser Temperatur werden 2,8 g Ölsäure zugegeben und weitere 15 Minuten gerührt. Es bildet sich eine zähe Paste, die sich vom Wasser trennt.
3. Die überstehende Flüssigkeit (oft dunkelbraun) wird dekantiert. Die verbleibende schwarze Paste wird noch einmal mit ca. ddH_2O gewaschen.
4. Abschließend wird die hergestellte Paste im Trockenschrank (idealerweise unter Vakuum) bei maximal 55 °C getrocknet, um Restwasser zu entfernen. (Falls kein Trockenschrank vorhanden ist, wird das Wasser soweit wie möglich entfernt).

Abbildung 63 Versuchsaufbau für die Herstellung eines Ferrofluids.

Versuch 28: Herstellung magnetischer Flüssigkeiten (5 von 6)

Schritt 4: Dispergierung (unter dem Abzug)

Chemikalien:

- n-Decan
- destilliertes Wasser

Geräte:

- 50 ml Becherglas
- Trichter
- Papierfilter

Durchführung:

1. Die schwarze Paste wird mit 25 ml n-Decan versetzt. Nach 15 Minuten hat sich ein großer Teil der modifizierten Partikel redispergiert.
2. Das Ferrofluid wird durch einen Papierfilter filtriert und in einem 50-ml-Becherglas aufgefangen.

Anmerkung

Falls die Trocknung in Schritt 3 nicht vollständig ist, bilden sich zwei unmischbare Phasen: eine organische Decanphase und darunter ein paar Wassertropfen. Nur das obere organische Ferrofluid wird filtriert!

Versuch 28: Herstellung magnetischer Flüssigkeiten (6 von 6)

Erklärungen:

Schritt 1: Fällung

Die zugrunde liegende chemische Reaktion hat folgende Reaktionsgleichung:

$$8\ NaOH + 2\ FeCl_3 + FeCl_2 \Rightarrow Fe_3O_4 + 8\ NaCl + 4\ H_2O$$

Das Eisenoxid fällt in Form von ca. 10 Nanometer großen Magnetit-Primärpartikeln aus. NaOH liegt im Überschuss vor, während die Eisensalze im stöchiometrischen Verhältnis eingesetzt werden. Der hergestellte Magnetit (Fe_3O_4), besitzt die Struktur des so genannten inversen Spinelltyps, und lässt sich als $Fe(II)(Fe(III))_2O_4$ beschreiben.

Die Fe(II)- und Fe(III)-Ionen besetzen verschiedene Gitterplätze (Tetraeder- oder Oktaeder-Lücken) im Kristall. Die 15 Minuten Reifungszeit nach der Fällung sind erforderlich, um diese Ordnung im Kristall zu erzielen.

Schritt 2: Reinigung

In diesem Syntheseschritt werden das als Nebenprodukt anfallende NaCl sowie überschüssiges NaOH abgetrennt. Dies ist wichtig, damit die Partikeloberflächen frei sind und weiter reagieren können.

Schritt 3: Oberflächenbehandlung

Die reaktiven Eisenoxidteilchenoberflächen werden mit Ölsäure versetzt. Dies ermöglicht nicht nur eine Umpolung (bzw. Hydrophobierung für organische Umgebungen) der Partikel. Viel wichtiger ist die Trennung der Partikel untereinander durch die organische Umhüllung. So wird verhindert, dass die Nanopartikel in größeren Brocken agglomerieren und ihre spezifischen „Nano“-Eigenschaften verlieren. Wenn die überstehende Flüssigkeit nach der Oberflächenbehandlung eine dunkelbraune Farbe besitzt, ist dies ein Zeichen dafür, dass der Waschvorgang nicht hinreichend gründlich war. Das Produkt lässt sich in diesem Fall aber dennoch zum Ferrofluid weiterverarbeiten.

Schritt 4: Dispergierung

Die Oberflächenbehandlung ermöglicht eine Redispergierung in unpolaren Lösungsmitteln, z. B. n-Decan, n-Heptan, Toluol, verschiedenen Ölen etc. Dabei entsteht eine scheinbar homogene, magnetische Flüssigkeit, ein so genanntes Ferrofluid. Diese magnetische Flüssigkeit wird von einem Magnetfeld angezogen, ohne dass die Partikel sich absetzen.

Versuch 29: Ausbildung der Rosenzweig-Stachel (1 von 1)

Geräte:

Stabmagnet

Durchführung:

Nähere einen Permanentmagneten dem Ferrofluid von der Unterseite des Becherglases und bewege den Magneten horizontal und vertikal.

Beobachtung:

Das Ferrofluid bildet im Magnetfeld eine Halbkugel und lässt sich mit dem Magneten bewegen. Bei Verwendung eines starken Neodyn-Magneten bildet das Ferrofluid so genannte „Rosenzweig-Stacheln“ aus.

Abbildung 64 Im Magnetfeld bilden sich die deutlich erkennbaren Rosenzweig-Stacheln.

Erklärung:

Die magnetischen Nanoteilchen ordnen sich entlang der magnetischen Feldlinien an. Nebeneinander liegende Teilchen stoßen sich wie parallel nebeneinander liegende Stabmagneten ab. Die Verteilung der Partikel beeinflusst wiederum das einwirkende Magnetfeld und führt bei starken Magnetfeldern zur Bildung der so genannten „Rosenzweig- Stacheln“.

Versuch 30: Schwimmende Münze (1 von 2)

Chemikalien:

Ferrofluid

Geräte:

- Aluminiumschale
- 1 Cent Münze oder Münze aus nichtmagnetischen Werkstoff
- Magnet
- Pipette

Durchführung:

Dieses Experiment zeigt wie ein Ferrofluid seine "virtuelle Dichte" ändert und dadurch variablen Auftrieb erzeugt.

1. Stelle die Aluminiumschale auf den Ringmagneten und lege eine 1 Cent oder eine nichtmagnetische Münze in die Schale.
2. Fülle mit der Pipette ca. 3 ml Ferrofluid in die Schale. Die Münze schwimmt nun auf der Oberfläche des Ferrofluids. (Nicht vergessen: Bringe den Magneten nicht zu nahe an das Ferrofluid sonst springt es heraus!)
3. Hebe die Schale von dem Ringmagneten ab, so sinkt die Dichte des Ferrofluids auf seinen natürlichen Wert und die Münze versinkt.
4. Wiederhole diesen Versuch mit unterschiedlichen nichtmagnetischen Materialien wie Aluminium, Blei, Gesteine, Zink, Messing etc. Versuche mit anderen verfügbaren Magneten oder anderen Polanordnungen das Schwimmen zu variieren.

Abbildung 65 Ein Cent-Stück schwimmt auf der Oberfläche des Ferrofluids.

Versuch 30: Schwimmende Münze (2 von 2)

Erklärung zum Experiment:

Wenn eine Münze in Wasser gelegt wird sinkt diese. Wenn eine Münze in Ferrofluid gelegt wird sinkt diese ebenso. Der Grund dafür ist, dass die Dichte des Ferrofluids nur geringfügig über der des Wassers liegt, aber deutlich unter der Dichte der Münze. Deswegen sinkt die Münze. Das Ferrofluid hat allerdings einen Vorteil gegenüber Wasser: Die virtuelle Dichte des Ferrofluids kann durch Anlegen eines Magnetfeldes erhöht werden wodurch Objekte, die normalerweise sinken würden, auf der Oberfläche schwimmen. Durch Anlegen des Feldes des Magneten wird eine der Schwerkraft entgegenwirkende Kraft innerhalb des Ferrofluids erzeugt.
Das Schwimmende-Münze-Experiment ist ein Beispiel für eine inzwischen industriell etablierte statische und dynamische Trenntechnik. Im Bergbau und Recycling wird die Dichte des Ferrofluids mittels Magnetfelder so angepasst dass die Dichtetrennung von Mineralien und nichtmagnetischen Metallen möglich ist. Materialien mit hoher Dichte sinken, während Materialien mit niedriger Dichte schwimmen und so von der Oberfläche des Ferrofluids abgeschöpft werden können.

Bezugsquellen von gebrauchsfertigen Ferrofluiden:

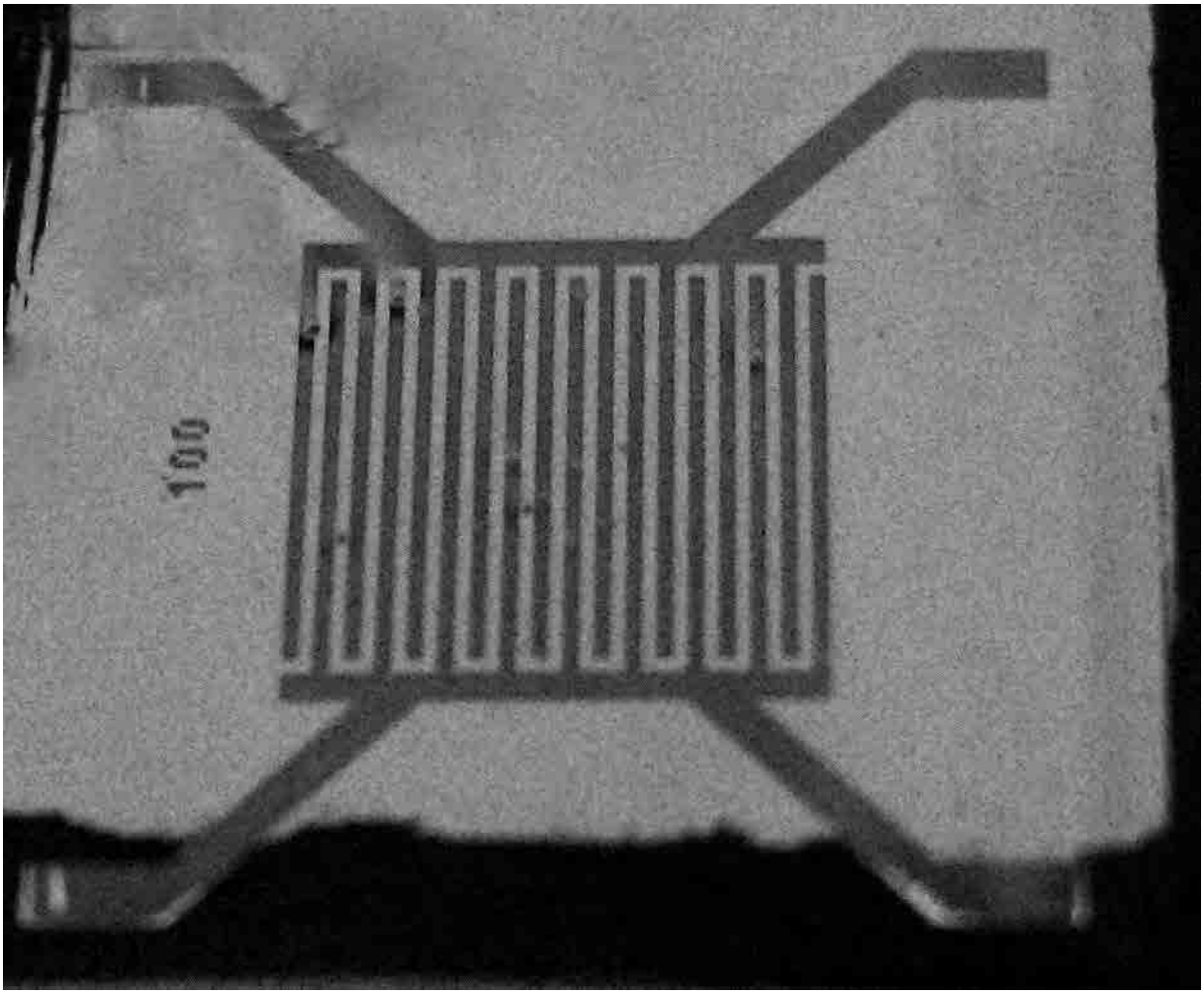
www.ferrotec-europe.de
www.ep5.uni-bayreuth.de/ff.html
www.magforce.de

7. Kapitel: Nanoelektronik

Autoren

Kapiteleinleitung
Prof. Dr. Giuseppe Scarpa, Technische Universität München
PD Dr. Johannes A Russer, Technische Universität München

Versuchsanleitungen
Prof. Dr. Giuseppe Scarpa, Technische Universität München
PD Dr. Johannes A Russer, Technische Universität München
Luca Banszerus, St. Michael Gymnasium, Bad Münstereifel



Einblicke in die Nanoelektronik

von PD Dr. Johannes Russer und Prof. Dr. Giuseppe Scarpa

Im Jahre 1947 wurde von Bardeen, Brattain und Shockley der erste siliziumbasierte Halbleitertransistor realisiert. Der Transistor ist ein elektronisches Bauelement, welches zur Leistungsverstärkung eingesetzt wird. Eine schematische Darstellung eines sogenannten Feldeffekttransistors (FET) zeigt Abbildung 66.

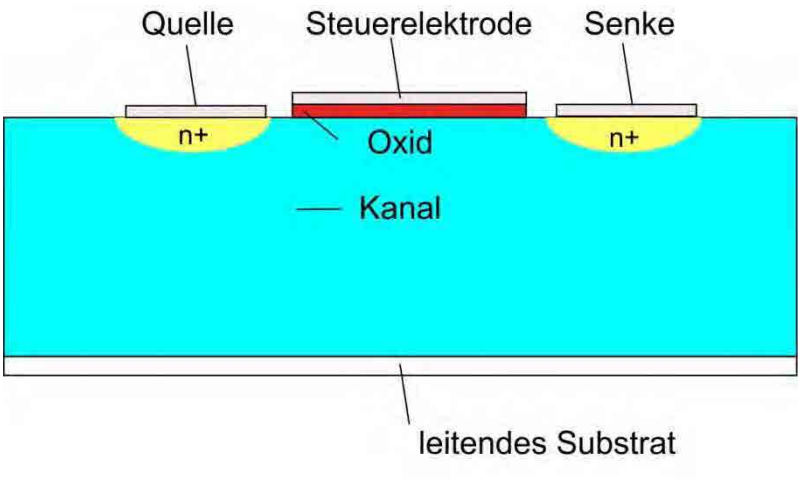


Abbildung 66 Der Feldeffekttransistor

Zwischen zwei Elektroden, einer Quelle und einer Senke, fließt über einen Kanal ein Strom, der durch die Spannung an einer dritten Elektrode, Steuerelektrode oder Gatter genannt, reguliert wird. Der kompakte Festkörpertransistor sollte bald darauf die damals üblichen Vakuumröhren als Verstärkerbauelement in der Elektronik ablösen - alles basierend nun auf einem einzigem Material: Silizium. Bei Silizium handelt sich es um einen sogenannten Halbleiter. Ein Halbleiter ist ein Material dessen Leitfähigkeit sich variieren lässt und zwar in einem Bereich, der zwischen der sehr hohen Leitfähigkeit von Metallen bis hin zur Abwesenheit jeglicher Leitfähigkeit, wie wir sie bei elektrischen Isolatoren finden, liegt: daher also auch „halb"-Leiter. Eine Oxidschicht wird auf dem Kanal aufgewachst und trennt ihn von der Steuerelektrode, sodass kein Stromfluss über diese Elektrode stattfindet. Die Leitfähigkeit des Kanals ist über einen großen Bereich über das Potential an der Steuerelektrode einstellbar. Zudem können auf dem Siliziumsubstrat nicht nur ein einziger, sondern eine Vielzahl von Transistoren untergebracht und miteinander verschaltet werden. Werden auch die leitenden Verbindungen zwischen den Transistoren auf dem Substrat realisiert, dann spricht man von monolithisch integrierten Schaltungen. Mit der Möglichkeit zur monolithischen Integration auf Siliziumsubstrat setzte eine rasante technologische Entwicklung ein, die immer kompaktere, höher integrierte Schaltungen zufolge hatte, welche zunehmend komplexere Aufgaben verrichten konnten und dabei auch immer effizienter wurden. Die so entstandene Mikroelektronik folgte in der Entwicklung dabei dem Moore'schen Gesetz. Dieses Gesetz ist ein empirisches Gesetz, welches 1965 von Gordon Moore formuliert wurde und welches besagt, dass sich die Bauelementedichte und die Leistungsfähigkeit monolithisch integrierter Siliziumschaltkreise alle 18 Monate verdoppeln. Der Transistor ist in seiner Funktion der elementare Baustein in der Mikroelektronik. Durch eine

Verschaltung von Millionen oder Milliarden von Transistoren ist eine Informationsverarbeitung, wie wir sie z.B. in Mobiltelefonen vorfinden, möglich.
Die Mikroelektronik ist heute allgegenwärtig. Sie befindet sich z.B. in Mobiltelefonen, Basisstationen, Computern, in einer Vielzahl von Maschinen – auch z.B. Waschmaschinen verfügen heute über eine elektronische Steuereinheit - und in jedem Fahrzeug. Ein erheblicher Teil der Wertschöpfung bei neuen Automobilen findet durch die Elektroniksysteme statt.
Die Strukturgrößen von Transistoren in integrierten Schaltungen haben sich in den vergangenen vierzig Jahren dabei von 10 Mikrometer (10×10^{-6} m) auf etwa 30 Nanometer (30×10^{-9} m) reduziert. Bezogen auf die Strukturgröße ist damit bereits die Nanoskala erreicht und so gesehen kann auch die Mikroelektronik in ihrer Weiterführung als ein Bestandteil der Nanoelektronik verstanden werden. Zudem werden zu der Nanoelektronik künftige neuartige Bauelemente und Systeme gezählt. Dazu gehören auch nanoelektronisch-mechanische Systeme, organische Halbleiter, kohlenstoffbasierte Materialien, die Spintronik und die molekulare Elektronik. Auch die Forschung zu Quantencomputer und die Quanteninformationstheorie sind der Nanoelektronik zuzuordnen.
Unter Nanoelektronik versteht man also den Bereich der Nanotechnologie, der sich auf elektronische Schaltungen bezieht. Dabei verwendet man den Begriff für Strukturgrößen, die 100 nm unterschreiten. Die Siliziumtechnologie zur Herstellung integrierter Schaltungen hat eine hohe Bedeutung für die technologische und wirtschaftliche Entwicklung der Gesellschaft erlangt. Auch wird die Siliziumtechnologie in der Zukunft eine herausragende Stellung innehaben, allerdings ist es abzusehen, dass die Entwicklungskurve in den nächsten Jahrzehnten abflachen wird. Wenn die Strukturgröße die Größenordnung der Ausdehnung weniger Atome erreicht, ist eine physikalische Grenze für die Architektur der Transistoren erreicht. Auch steigen der technologische Aufwand und die Kosten bei einer Erhöhung der Integrationsdichte überproportional. Dieser Anstieg der Kosten wird eine Sättigung der Entwicklungskurve schon vor Erreichen der physikalischen Grenzen bewirken. Alternative, innovative Bauelemente, Konzepte und Technologien haben im Verbund mit bestehenden Technologien ein großes Potential zu einer Fortführung der technologischen Entwicklung, wie wir Sie in den vergangenen Jahrzenten erlebt haben.
Herausforderungen der Zukunft, die einen technologischen Fortschritt notwendig machen bestehen genug, wie etwa der schonende Umgang mit den Ressourcen, die der Menschheit zur Verfügung stehen. Kostengünstig Sensoren, die Umwelteinflüsse überwachen und drahtlos miteinander kommunizieren und sich über sogenanntes *Energy Harvesting* selbst mit der nötigen elektrischen Energie versorgen und daher keine Batterien benötigen, die ausgewechselt werden müssen, könnten in Zukunft dazu beitragen Energie zu sparen, Bewässerung gezielt und sparsam einzusetzen etc..
Während in den vergangenen Jahrzehnten Silizium, welches in großen Mengen auf der Erde vorhanden ist, als Basis für die Elektronik in seiner Bedeutung prägend war, könnte in Zukunft auch der Kohlenstoff, welcher die Grundlage allen Lebens auf der Erde stellt, eine bedeutende Rolle in der Elektronik spielen. Kohlenstoff tritt in verschiedenen Formen auf: In hochgeordneter Form als Diamant oder in loserer Ordnung als Graphit. Neue Formen des Kohlenstoffes wurden in jüngerer Vergangenheit entdeckt und auch synthetisiert, insbesondere Kohlenstoff in Form von Graphene oder in Form von Kohlenstoffnanoröhren, im Englischen als Carbon Nanotubes bekannt und daher im Folgenden als CNTs bezeichnet. Kohlenstoff kann in verschiedenen Formen halbleitende Eigenschaften haben. Diamant zeichnet sich z.B. durch halbleitende Eigenschaften, eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine hohe elektrische Leitfähigkeit aus. Allerdings ist Diamant schwer zu synthetisieren. Besondere Aufmerksamkeit haben in den letzten Jahren unter den neuen Formen die Nanostrukturen von Kohlenstoff wie CNTs und Graphene erhalten, da sie als potentielle neue Basiskomponenten für die Nanoelektronik gesehen werden, und auf welche wir im Folgenden noch näher eingehen werden. Kohlenstoffbasierte Verbindungen werden auch in Form von leitenden und halbleitenden Polymeren hergestellt, dabei handelt es sich um die sogenannte organische Elektronik.
Wir werden im Folgenden die Besonderheiten der Kohlenstoff-Elektronik und der organischen Elektronik eingehen. Dabei interessieren uns die Eigenschaften von CNTs und Graphene, sowie von halbleitenden Polymeren.

Kohlenstoffnanoröhren - CNTs

In den vergangenen Jahrzehnten wurden neue kristalline Formen des Kohlenstoffs entdeckt. Dazu gehören Kohlenstoffnanoröhren und Graphene. Beide haben eine hexagonale, wabenförmige Gitterstruktur und können als ein- beziehungsweise zweidimensionales Material aufgefasst werden. Kohlenstoffnanoröhren können ein- oder mehrwandig sein. Ein Beispiel für eine einwandige Kohlenstoffnanoröhre ist in Abbildung 67 gegeben.

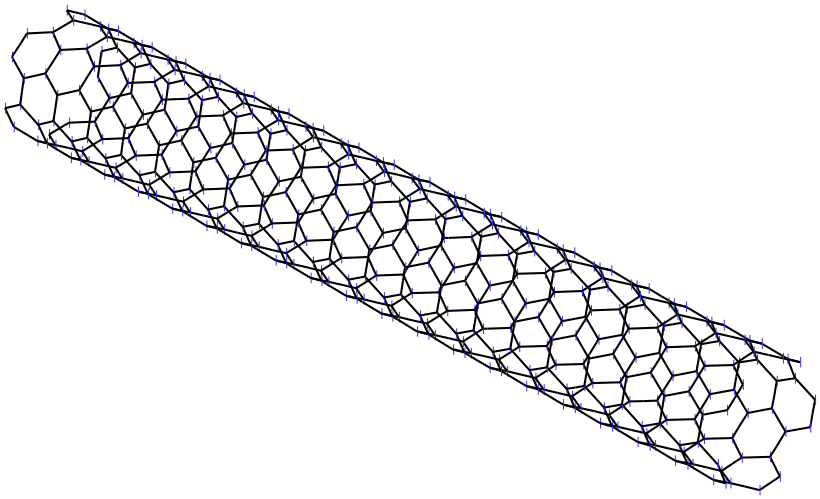


Abbildung 67 Struktur einer einwandigen Kohlenstoffnanoröhre

Der Durchmesser von CNTs reicht von 1 nm bis zu 100 nm. Ein menschliches Haar ist zum Vergleich etwa 0,1 mm dick, also etwa 10.000-mal dicker. Aufgrund dieser Größe und auch ihrer halbleitenden Eigenschaften, können CNTs als nanoelektronische Komponenten dienen. CNTs in einer Länge von bis zu einigen Millimetern wurden bereits realisiert. Aufgrund der Gitterstruktur, in der die Kohlenstoffatome angeordnet sind, ergibt sich für CNTs ein sogenanntes Bändermodell, welches für die Beschreibung insbesondere von Halbleitern sehr nützlich ist. Ein einzelnes Atom besitzt eine Reihe von unterschiedlichen diskreten möglichen Energieniveaus entsprechend der verschiedenen Orbitalen für die Elektronen im semi-klassischen Atombild. Bringt man jedoch zwei Atome mit gleicher Energie nahe zusammen, so spaltet sich das Energieniveau in zwei eng beieinanderliegende Niveaus. Betrachtet man eine periodische Struktur mit einer Vielzahl von Atomen, so entsteht ein Bändermodell mit verschiedenen zulässigen Energieniveaus. Besitzt ein Materialsystem eine Bandlücke oder Sperrband, so gibt es Energiebereiche, die für Elektronen nicht zulässig sind. Bei einem Halbleiter beträgt der Energiebereich der Bandlücke nur wenige Elektronenvolt (ein Elektronenvolt entspricht $1{,}6\times10^{-19}$ J). Elektronen können allerdings in das energetisch höher gelegene Band angehoben werden, etwa durch thermische Anregung, oder wieder in das energetisch niedere Band zurückfallen. Beides geschieht stets unter Energieerhaltung. Bei einem Halbleiter wird das höchste, in Abwesenheit jeglicher thermischer Anregung, mit Elektronen besetzte Energieband als Valenzband bezeichnet. Oberhalb liegen die Bandlücke und dann der nächste Bereich von zulässigen Energieniveaus, das sogenannte Leitungsband. Sowohl ein vollständig mit Elektronen besetztes Valenzband als auch ein völlig unbesetztes Leitungsband können nicht zur Leitfähigkeit des Halbleiters beitragen, da keine Ladung sich bewegen kann. Werden Elektronen angeregt und dadurch aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben, erhöht sich die Leitfähigkeit in beiden Bändern. Die Beweglichkeit der Elektronen in den unterschiedlichen Bändern variiert auch mit dem Grad der Besetzung der Bänder durch Elektronen. Die Leitfähigkeit eines Halbleiters ist unter anderem auch temperaturabhängig. Während Leiter, wie etwa Kupfer, eine steigende Leitfähigkeit mit abnehmender Temperatur aufweisen, verliert der Halbleiter bei extrem niedrigen Temperaturen seine Leitfähigkeit und verhält sich wie ein Isolator.
Entsprechend der Symmetrieeigenschaften und der Orientierung der Gitterstruktur in Bezug auf die Achse der CNT, werden einwandige CNTs als „zigzag“, „armchair“ oder „chiral“ CNTs unterschieden. Diese Orientierung des Kohlenstoffgitters ist dafür verantwortlich, ob eine CNT leitende oder

halbleitende Eigenschaften zeigt. In Abbildung 68 ist die entrollte Kohlenstoffschicht von Kohlenstoffnanoröhren für die unterschiedlichen Orientierungen schematisch dargestellt, dabei stellt der große Pfeil die Orientierung der Achse dar.

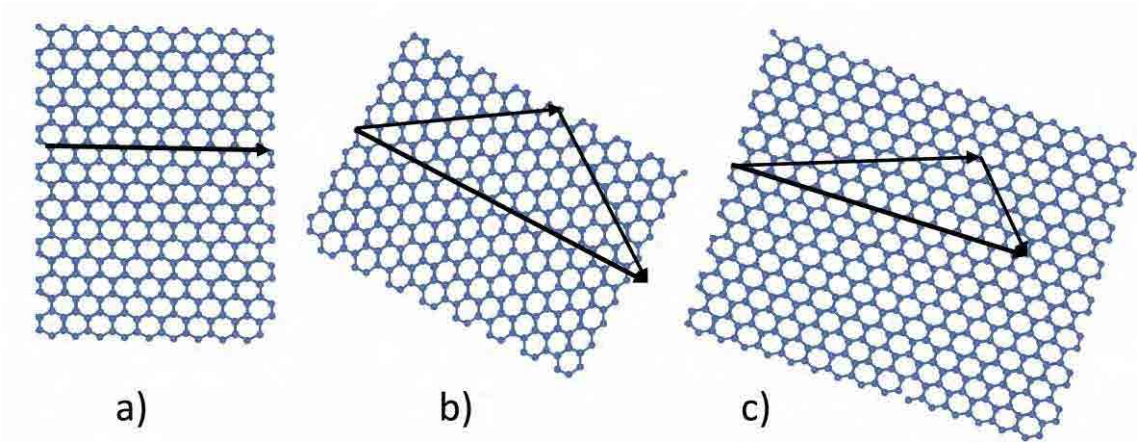


Abbildung 68 Orientierung der Gitterstruktur für
(a) „zigzag“, (b) „armchair“ oder (c) „chirale“ Kohlenstoffnanoröhren

CNTs weisen aufgrund ihrer quasi eindimensionalen Struktur besondere Eigenschaften für den Elektronentransport auf. In CNTs findet ein ballistischer Ladungsträgertransport mit sehr hohen Ladungsträgerbeweglichkeiten von 10.000 Quadratzentimeter pro Voltsekunde oder mehr auf. Ballistischer Transport bedeutet hierbei, dass die Elektronen relativ große Distanzen zurücklegen können bevor sie gestreut werden, bevor also ein Stoßprozess stattfindet, der deren Geschwindigkeit variiert. CNTs verfügen auch über eine hohe thermische Leitfähigkeit. Interessante Anwendungen für den Einsatz von CNTs finden sich in vielen nanoelektrischen und nanoelektromechanischen Bauelementen. Beispiele dafür sind CNT-Feldeffekttransistoren oder Sensoren. Es stellt allerdings eine Schwierigkeit dar, Bauelemente in denen einzelnen CNTs integriert sind kostengünstig und mit verlässlich reproduzierbaren Eigenschaften herzustellen. Für einen industriellen Einsatz müssen eine genaue Ausrichtung und Positionierung einer einzelnen CNT leicht handhabbar sein. Netzwerke, die aus einer Vielzahl von CNTs gebildet werden, stellen eine interessante Einsatzmöglichkeit für CNTs dar. Hierbei werden die CNTs zwar zufällig angeordnet, aufgrund deren großer Anzahl, lassen sich aber Netzwerke mit gut reproduzierbaren Eigenschaften herstellen. Diese Netzwerke können etwa durch Aufsprühen einer wasserbasierten Lösung mit CNTs auf ein Substrat aufgebracht werden. CNTs verfügen, wie bereits erwähnt, über eine hohe elektrische Leitfähigkeit, allerdings ist ihr Durchmesser gering und auch liegt der Kontaktwiderstand im Bereich von einigen Kiloohm, bestimmt durch den sogenannten Quantenleitwert, welcher bei 1/12,9 mS liegt. Bei einer Parallelschaltung vieler CNTs reduziert sich auch der effektive Beitrag des Kontaktwiderstandes zum Gesamtwiderstand. Werden CNTs oder ganze CNT-Netzwerke bestimmten Gasen, zum Beispiel NH_3, CO oder CO_2 ausgesetzt, kommt es zur sogenannten Adsorption. Gasmoleküle lagern sich an den CNT-Wänden an und verändern dadurch deren elektrischen Eigenschaften. Auf diese Weise lassen sich CNTs auch als Gassensoren verwenden. Der Prozess der Adsorption ist reversibel, sodass die Sensoren wiederholt und über einen längeren Zeitraum eingesetzt werden können. Bei Feldeffekttransistoren können einzelne CNTs oder CNT-Netzwerke als Kanalmaterial verwendet werden. Hierbei verspricht man sich, die Dimensionen der Transistoren weiter reduzieren zu können als dies mit der konventionellen Siliziumtechnologie alleine möglich ist. Kurze Kanalstrecken der Transistoren sind dabei auch für Hochfrequenzanwendungen wichtig, da die Elektronen den Kanal in einer Zeit umgekehrt proportional zur Frequenz durchqueren müssen. Ferner, können CNTs aufgrund ihrer mesoporösen Struktur, d.h. einer Struktur mit einem Porendurchmesser im Bereich von 2nm ... 50nm, als Material zur Herstellung sogenannter Superkondensatoren verwendet werden. Superkondensatoren dienen der Energiespeicherung und

erreichen wesentlich höherer Energiedichten als herkömmliche Kondensatoren. Die Erforschung und Weiterentwicklung von Superkondensatoren ist auch in Hinblick auf die angestrebte Elektromobilität ein wichtiges Ziel.

Graphene

Graphene besteht aus einer einzigen Lage von Kohlenstoffatomen, die in einer wabenförmigen Struktur angeordnet sind. Dies entspricht einer Fortsetzung der Gitterstruktur im Zweidimensionalen wie wir es in Abbildung 68 für eine entrollte Kohlenstoffröhre sehen. Graphen wurde von Andre Geim und Konstantin Novoselov 2004 zum ersten Mal hergestellt. Die beiden Wissenschaftler erhielten für ihre Forschung zu Graphene 2010 den Nobelpreis der Physik. Graphene hat die Dicke einer einzigen Atomlage, es weist eine hervorragende Leitfähigkeit (100mal größer als die von Silizium, 10mal größer als gitterangepasste InP state-of-the-art Halbleiter) und eine besonders hohe mechanische Festigkeit auf. Auch hat Graphene halbleitende Eigenschaften. Hohe Sättigungs-Driftgeschwindigkeiten, welche bedeutend höher sind als bei Silizium-MOSFETs, machen Graphene für Hochfrequenzanwendungen sehr interessant. Mit dem Einsatz von Graphene als Material für den Kanal konnten bereits Feldeffekttransistoren realisiert werden, die eine höhere Grenzfrequenz erreichen als Silizium Metall-Oxid-Halbleiter-Transistoren bei gleicher Kanallänge.

Halbleitende Polymere

Die organische Elektronik beschäftigt sich mit kohlenstoffbasierten Materialen in der Elektronik und zwar mit leitenden Polymeren und leitenden Molekülen. Die zuvor behandelten Kohlenstoffnanoröhren und das Graphene bestehen aus reinem Kohlenstoff. Bei leitenden Polymeren und Molekülen handelt es sich hingegen um Kohlenstoffverbindungen. In den 1970er ist es gelungen die Leitfähigkeit von Polymeren, die bis dahin sehr schlechte Leiter waren, um Größenordnungen zu verbessern. Für diese Leistung wurde im Jahr 2000 der Nobelpreis der Chemie an die Wissenschaftler Alan Heeger, Alan MacDiarmid und Hideki Shirakawa verliehen. Seitdem sind weitere Verbesserungen der Leitfähigkeit, entweder durch die Synthese oder durch die Dotierung der Polymere, gelungen. Von leitenden und halbleitenden Polymeren verspricht man sich Schaltungen, die sehr kostengünstig herzustellen sind und neue Anwendungen der Elektronik eröffnen können, etwa in Fällen, in denen der Einsatz der Siliziumtechnologie nicht wirtschaftlich wäre. Einige Polymere sind auch biokompatibel, d.h. sie bieten sich auch zur Verwendung für Implantate im menschlichen Körper an. Von diesen sogenannten bioelektrischen Anwendungen verspricht man sich in Zukunft Lösungen für viele Probleme in der medizinischen Behandlung, etwa durch eine Realisierung einer künstlichen Retina für das Auge oder eines Schrittmachers, welcher in der Behandlung von Alzheimer- oder Epilepsiepatienten eingesetzt werden kann. Aufgrund der Möglichkeit Schaltungen auf flexibler Folie zu realisieren ergeben sich auch neue Anwendungsgebiete, welche für Schaltungen, die auf dem starren Silizium realisiert wurden, verschlossen sind. Schaltungen auf Folie können zum Beispiel in Kleidung integriert werden. Auch biegsame Solarzellen und Bildschirme sind möglich und wurden bereits realisiert. Ein biegsamer Bildschirm für Mobiltelefone wurde bereits für 2013 als marktreif angekündigt. Bildschirme basierend auf organischen lichtemittierenden Dioden, im Englischen *Light Emitting Diodes* (LED) genannt, auf festem Substraten wie Glass finden heute bereits weiten Einsatz. Gegenüber hintergrundbeleuchteten Flüssigkristallanzeigen zeichnen sie sich durch guten Kontrast und niedrigen Energieverbrauch aus. Auch Solarzellen, also Bauelemente die Licht direkt in elektrische Energie umwandeln, können mit halbleitenden Polymeren hergestellt werden. Solarzellen werden in der Zukunft sicherlich einen entscheidenden Beitrag zur Energieversorgung liefern und die Möglichkeit einer kostengünstigen Produktion von organischen Solarzellen im großen Stil begünstigt die Forschung auf diesem Gebiet, um Effizienz und Haltbarkeit von organischen Solarzellen zu steigern.

Ein Beispiel: Die Organische Solarzelle – Strom aus dem Saft

Eine Solarzelle besteht aus einem Verbund von positiv und negativ dotierten Halbleitern, die einen sogenannten pn-Übergang formen. Einfallende Lichtteilchen können absorbiert werden und, falls ihre Energie der Bandlücke entspricht oder diese übertrifft, ein Elektron-Loch-Paar erzeugen, d.h. ein Elektron wird vom energetisch niederen Valenzband in das energetisch höhere Leitungsband gehoben und lässt dabei einen leeren Platz zurück. Das nun fehlende Elektron - also der leere Platz - im Valenzband wird als Loch bezeichnet. Auf der p und n Seite des pn-Übergangs existiert ein Überschuss positiver beziehungsweise negativer Ladung. Daher existiert über den pn-Übergang eine Spannung, welche ein generiertes Elektronen-Loch-Paar separiert. Eine externe Last kann über die Elektroden an der p und n Seite des Übergangs angeschlossen werden und mit dem dann fließenden Photostrom versorgt werden. Die Effizienz der Solarzelle gibt dabei an, welcher Anteil der in die Solarzelle einfallenden Photonenenergie in elektrische Energie umgewandelt wird. Das obere theoretische Limit liegt dabei für einen einfachen pn-Übergang bei etwa 30%. Photovoltaische Zellen basierend auf anorganischen Material werden seit den 1950er Jahren untersucht und ihre Effizienz reicht für einfache pn-Übergange mittlerweile Nahe an das theoretische Limit heran. Anfänglich lag diese Effizienz noch bei etwa 6%. Organische Solarzellen werden seit Ende der 1950er erforscht, ihre Effizienz lag jedoch lange Zeit unter 0,1% und somit waren sie für jegliche Anwendungen unbrauchbar. Dies war der Fall, obwohl die Absorptionsrate von Licht für organische Halbleiter wesentlich besser ist als bei dem anorganischen Silizium. So reichen für ein Polymer schon eine Schichtdicke von einigen hundert Nanometer um das Licht bei der Frequenz des Absorptionsmaximums vollständig zu absorbieren, während für eine Siliziumschicht eine Dicke von mehrere hundert Mikrometern erforderlich ist. Bei Polymeren wird jedoch im Falle der Lichtabsorption ein lokalisiertes Elektronen-Loch-Paar erzeugt, ein sogenanntes Exziton. Die Elektronen-Loch-Paare sind schwerer zu separieren als im anorganischen Halbleiter aufgrund der Lokalisierung. Als Konsequenz haben die Exzitonen im organischen Halleiter nur eine kurze Diffusionslänge von einigen Nanometern. Das bedeutet, dass eine Rekombination des Elektronen-Loch-Paares wahrscheinlich ist bevor das Elektronen-Loch-Paar an den Elektroden separiert werden kann. In diesem Fall wird kein Beitrag zum Photostrom geliefert. Als Kompromiss wird die Dicke der Polymerschicht reduziert. Die Wahrscheinlichkeit für die Absorption eines Lichtquants sinkt damit allerdings auch. Unter Verwendung von Donatoren und Akzeptoren, also Teilchen, die ein Elektron abgeben oder aufnehmen können, kann das interne elektrische Feld erhöht und die Trennung des Elektronen-Loch-Paares begünstigt werden. Mit einer derartigen Heterostruktur wurden 1986 erstmals organische Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von über 1% realisiert. Bei den sogenannten Bulk Heterojunctions wird positiv und negativ dotiertes Material gemischt. Abbildung 69 stellt solch eine organische Solarzelle schematisch dar.

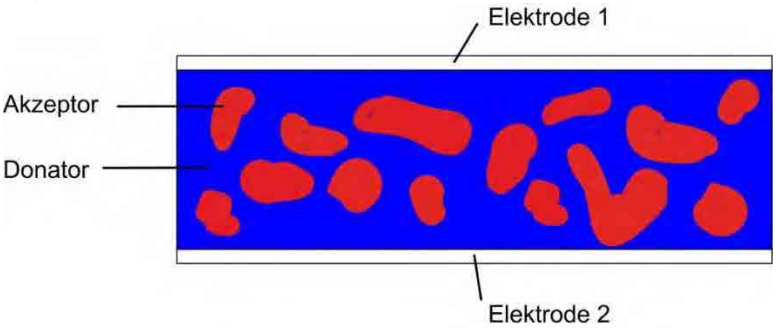


Abbildung 69 Solarzelle mit Bulk Heterojunction.

Regionen mit unterschiedlich dotiertem Material sind dann nur wenige Nanometer voneinander getrennt und somit in eine Entfernung zueinander, die innerhalb der Diffusionslänge der Exzitonen liegt. Der Wirkungsgrad konnte so nochmals deutlich gesteigert werden. Organische Solarzellen sind inzwischen mit einem Wirkungsgrad von über 10% realisiert worden. Die meisten kommerziellen

Solarzellen werden heute auf Siliziumbasis hergestellt. Von Solarzellen auf Polymerbasis verspricht man sich niedrigere Herstellungskosten - Polymerschichten können sogar gedruckt werden - ein geringes Gewicht, gute Umweltverträglichkeit und auch die Möglichkeit, sie auf flexiblem Substrat zu realisieren. Abbildung 70 zeigt die Realisierung einer organischen Solarzelle auf herkömmliches Glassubstrat.

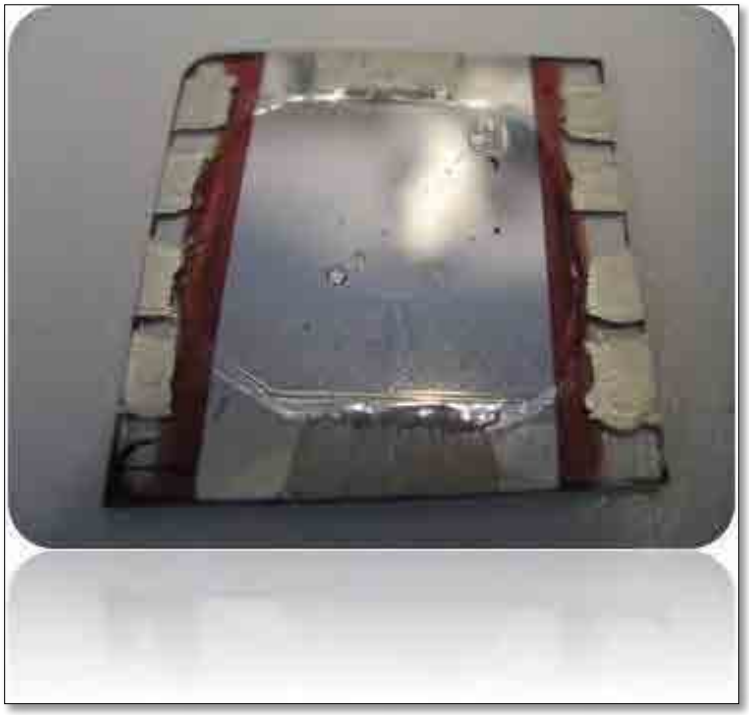


Abbildung 70 Realisierung einer organischen Solarzelle, Insgesamt sind 8 Strukturen auf dem Glassubstrat realisiert worden, die über die 8 seitlichen Kontakte angeschlossen werden können.

Das folgende Experiment führt Sie in wenigen Schritten zu der Herstellung einer eigenen organischen Solarzelle aus Orangen- und Beerensaft!

Referenzen und weiterführende Literatur

P. Lugli / P. Russer / M.-D. Weitze, *Nanoelektronik*, Aufl. Springer, 2013.

V. V. Mitin / V. A. Kochelap / M. A. Stroscio, *Introduction to Nanoelectronics: Science, Nanotechnology, Engineering, and Applications*, 1st ed. Cambridge University Press, 2007.

P. W. M. Blom / V. D. Mihailetchi / L. J. A. Koster / D. E. Markov, “Device Physics of Polymer:Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells,” *Advanced Materials*, vol. 19, no. 12, pp. 1551–1566, 2007.

Versuch 31: Organische Solarzelle (1 von 2)

Material:

Je Gruppe
- 6 leitende Glasplättchen mit Titanoxid
- 6 einfache leitende Glasplättchen
- 7 elektrisch leitende Drähten
- 1 Fruchtsaft (am besten frischer Saft von Brombeeren oder Himbeeren, es funktioniert aber auch mit Saft aus dem Supermarkt)
- 1 Taschenrechner
- ein Bleistift
- Klammern
- eine Schüssel
- 1 Paar Handschuhe
- eine Flasche Elektrolyte (Jod), die Iod, Lithiumiodid, Ethanol enthält

Durchführung

Eintunken der Photo-Anode.

Die negative Elektrode der Solarzelle wird als Photo-Anode bezeichnet. Den Saft (Farbstoff) in die Schüssel gießen (Anmerkung: um das Eintunken und die Effizienz der Zelle zu verbessern, erwärmen Sie den Farbstoff leicht). Setzen Sie die mit Titandioxid (TiO_2) beschichteten Glasplättchen mit der weißen Seite nach oben in die Schüssel. Lassen Sie die Glasplättchen für 15-20 min in dem Farbstoff bis das TiO_2 lila bis dunkelrot aussieht. Wenn die Filmoberfläche nicht einheitlich gefärbt zu werden scheint, platzieren Sie die Gläser erneut für weitere 10 min in den Saft. Spülen Sie die Elektroden vorsichtig mit Wasser und trocknen Sie diese dann an der Luft. Beachten Sie: die Photo-Elektroden müssen vollständig getrocknet sein, bevor Sie diese in den nächsten Schritten verwenden können.

Die Gegenelektrode beschichten.

Die positive Elektrode wird als Gegenelektrode benannt und wird von einem mit transparenten leitfähigen Oxid (*transparent conductive oxide* - TCO) abgedeckten Glas ausgehend realisiert. Ein Testgerät kann verwendet werden, um die leitfähige Seite des Glases zu identifizieren (außerdem kann die leitende Seite auch erkannt werden, da auf ihr das Dyers Logo geschrieben steht, beziehungsweise, wenn Sie mit einem Fingernagel darauf kratzen, ist sie als die raue Seite erkenntlich). Verwenden Sie einen Bleistift, um eine gleichmäßig dünne Graphit-Schicht (katalytische Kohlenstoff) auf der leitenden Seite der Glasoberfläche aufzubringen.

Beifügen des Elektrolyts und Montage der Solarzelle.

Die Jodid-Lösung wird als Elektrolyt im Herstellungsprozess der Solarzelle verwendet, um den elektrochemischen Stromkreis zu schließen und um den Farbstoff zu regenerieren. Legen Sie die Foto-Anode auf einem Tisch mit der gefärbten Seite nach oben. Platzieren Sie die Gegenelektrode auf der Photo-Anode, so dass die leitende Seite der Gegenelektrode auf den TiO_2-Film liegt. Legen sie die Gläser versetzt aneinander, sodass die kurze Seite der Elektroden als Kontaktstellen genutzt werden kann. Sowohl die positive als auch die negative Elektrode werden an diesen Kontaktstellen an zwei elektrisch leitende Klemmen angeschlossen, sodass Strom über diese fliesen und die Solarzelle getestet werden kann.

Versuch 31: Organische Solarzelle (2 von 2)

Verwenden Sie eine Klammer, um die beiden Elektroden zusammen zu halten (Glas-Sandwich), wie in der Abbildung 71 gezeigt.
Positionieren Sie dann die zusammengebaute Zelle vertikal, setzen Sie ein oder zwei Tropfen des Elektrolyts zwischen die Elektroden und belassen Sie die Zelle für zwei Minuten in vertikaler Orientierung, um eine vollständige Durchdringung mit den flüssigen Elektrolyten zu erhalten.

Anschließen der Elektroden

Nachdem sich der Elektrolyt in der Zelle vollständig verteilt hat, verbinden Sie die positive Elektrode einer Zelle mit der negativen Elektrode einer weiteren Zelle, und verbinden Sie so alle weiteren realisierten Zellen miteinander (Reihenschaltung). Schließen Sie die externen Klemmen an die Messspitzen und überprüfen Sie die Energieerzeugung, während Sie die Zellen dem Licht einer Lampe aussetzen.

Sicherheit

Die in dem Versuch verwendeten Chemikalien sind potentiell gesundheitsgefährdend. Aus diesem Grund darf dieses Experiment nur in Absprache mit dem Sicherheitsbeauftragten der Schule und unter Beachtung der aktuellen Gefahrstoffverordnung durchgeführt werden. Der Autor bzw. die Autoren übernehmen keine Haftung für den unsachgemäßen Umgang mit den zu verwendenden Chemikalien /Materialien und den daraus resultierenden Folgen.

Abbildung 71 Eine selbstgebaute Solarzelle im Einsatz.

Anmerkungen zu Bezugsquellen

Das didaktisches Material kann von "Società InGem Srl - l'Ingegneria per l'Emergenza" (www.ingemsrl.com, das komplette Kit unter der Ref. Nr. MC0010, das Elektrolyt unter der Ref. Nr. MC0012, beschichtete Gläser unter der Ref. Nr. MC0014) direkt erworben werden (Mengen-Rabatt berücksichtigen). Ansprechpartner ist hierbei Frau Ing. Monica Coppola (email monica.coppola@ingemsrl.com oder monicacoppola.ing@gmail.com). Weitere Bezugsquellen können vom Sicherheitsbeauftragten der Schule zur Verfügung gestellt werden.

Versuch 32: Elektrische Kontaktierung von Graphen (1 von 4)

Elektrische Kontaktierung von Nanostrukturen in der Schule

Die Mikro- und Nanoelektronik werden in der Schule häufig nicht behandelt, weil es äußerst schwierig ist Nano- oder Mikrostrukturen elektrisch zu kontaktieren. In der Forschung werden solche Strukturen meist mit optischer Lithographie oder Elektronenstrahllithographie gefertigt. Die dazu nötigen Geräte sind allerdings für die wenigsten Schulen bezahlbar. Wenn man jedoch die Fülle an interessanten Experimenten betrachtet und zugleich bedenkt, dass die Nanotechnologie eine der Schlüsseltechnologien für die Zukunft ist, ist klar, dass ein so wichtiges Feld in der Schule abgedeckt werden muss. In dieser Anleitung wird eine Methode detailliert beschrieben, mit der man mit schulischen Mitteln elektrische Kontakte an Sub-15µm-Strukturen anbringen kann. In diesem Beispiel wurde Graphen, eine monolagige Kohlenstoffschicht, mit dem Verfahren kontaktiert.

Das Grundprinzip der hier vorgestellten Kontaktierungsmethode beruht darauf, sehr spitze Nadeln aus geschmolzenem Indium zu ziehen und anschließend über dem zu kontaktierenden Objekt, z.B. einem Graphenflake auszurichten. Danach wird die Nadel auf der beheizten Probe aufgeschmolzen. Sobald die Probe wieder ausgekühlt ist, hat man einen stabilen ohmschen Kontakt auf eine monoatomare Schicht aufgebracht [2]. Zum Anlöten von Graphen benötigt man ein Auflichtmikroskop, damit man das Graphen sehen kann, sowie ein zweites Mikroskop, um mit dem Objekttisch die Indiumspitze ausrichten zu können. Zudem muss man die Probe heizen. Dazu reicht eine einfache Drahtheizung, die um einen Streifen Fliese gewickelt ist völlig aus. Zum Ziehen der Indiumspitze kann man eine feine Spritzennadel benutzen, die in einem Metallröhrchen mit einer Schraube festgeklemmt ist. Das Metallröhrchen kann man mit Heißkleber auf einen Objektträger kleben und so mit dem Objekttisch des zweiten Mikroskops sehr fein in x-, y-, und z-Richtung steuern (Abbildung 72). Die Temperatur, sowie die Zuggeschwindigkeit sind entscheidend für die Qualität der Indiumspitze. Daher macht es Sinn, z.B. mit C-Control und einem PTC Widerstand ein kleines Stück Indium auf ca. 170°C zu heizen. Diese Temperatur liegt ca. 20°C über dem Schmelzpunkt des Indiums und eignet sich gut um Spitzen aus dem flüssigen Tropfen zu ziehen [2]. Beim Herausziehen der Nadel sollte relativ langsam, aber kontinuierlich gezogen werden um eine dünne Spitze zu erhalten. Unter 50-facher Vergrößerung des Auflichtmikroskops sollte die Spitze jetzt immer noch extrem spitz aussehen (Abbildung 73). Um die Nadel auf die beheizte Probe aufschmelzen zu können, sollte sie im richtigen Winkel und an der richtigen Position darüber schweben. Beim Annähern der Spitze kann man den Abstand zum Substrat dadurch abschätzen, dass die Spitze und der Schatten der Spitze genau übereinander liegen, wenn die Spitze das Substrat berührt. Beim Annähern sollte man ggf. noch Korrekturen an der Nadelposition vornehmen, bevor man das letzte Stück ruckartig annähert, damit die Spitze wie gewollt an das Substrat schmilzt. Beim Entfernen der Spitzennadel aus dem Indiumkontakt sollte man die Nadel zuerst genau von der Spitze der Indiumnadel wegbewegen und anschließend nach oben herausziehen. Damit wäre der erste Kontakt am Graphen angebracht. Wiederholt man den Vorgang, so kann man weitere Kontakte am Graphenflake anbringen. Sobald die Probe ausgekühlt ist, kann man von den Enden der Indiumkontakte mit feiner Litze auf eine Platine weiterlöten. Dabei empfiehlt es sich, das Substrat mit Tesafilm auf der Platine zu fixieren, damit die sehr dünnen Indiumkontakte geschont werden. Es ist relativ trivial, sich eine eigene Ätzmaske zu erstellen und Platinen so nach den eigenen Bedürfnissen zu strukturieren. Wir haben z.B. eine Maske entworfen, die an der Rückseite des Wafers über einen Backgate-Kontakt für FET-Anwendungen verfügt. Durch die Platinen werden gleich zwei Probleme gleichzeitig gelöst.

Versuch 32: Elektrische Kontaktierung von Graphen (2 von 4)

Zum einen ist eine Vergrößerung der Kontaktfläche der immer noch relativ kleinen Indiumnadeln gelungen und zum anderen werden die Indiumkontakte vor Krafteinwirkungen geschützt. Es ist durchaus denkbar, mit diesem preiswerten und schnellen Verfahren auch andere Nanopartikel wie z.B. Nanodrähte zu kontaktieren. Voraussetzung dafür ist lediglich, dass das Nanoobjekt in mindestens einer Dimension mehrere Mikrometer lang ist.

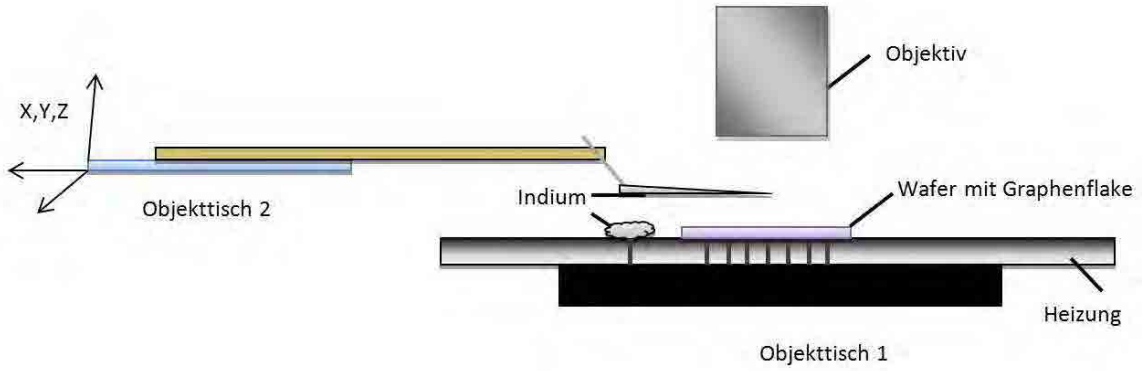


Abbildung 72 Versuchsaufbau.

Abbildung 73 oben: Versuchsaufbau zur Herstellung einer Indiumspitze
Unten: selbsthergestellte Indiumspitze unter dem Mikroskop (50-fach vergrößert)

Versuch 32: Elektrische Kontaktierung von Graphen (3 von 4)

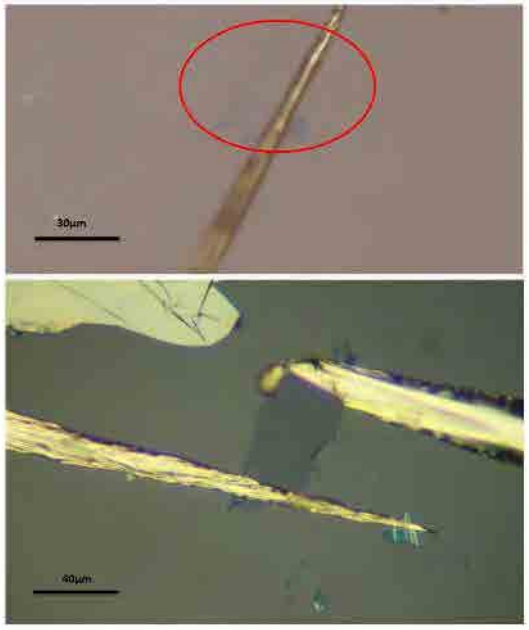


Abbildung 74 Kontaktierung der Indium-Spitze mit dem Graphenflake.

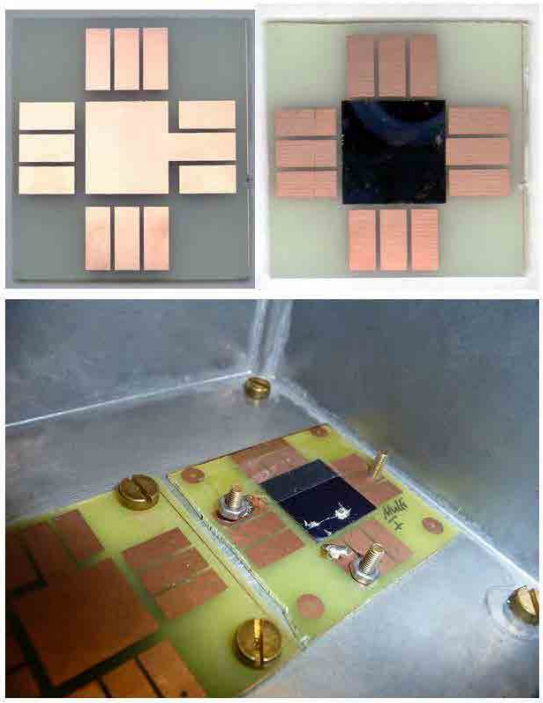


Abbildung 75 Platine mit einem Graphenflake.

Versuch 32: Elektrische Kontaktierung von Graphen (4 von 4)

Tipps und Anregungen

Indium kann man bei vielen Metallhändlern, z.B. AlfaAesar kaufen. Bereits wenige Gramm Indium in Form von Draht oder Barren reichen für viele Kontakte. Es ist sehr nützlich die beiden Mikroskope gemeinsam auf einer Holzplatte zu fixieren, damit sie sich nicht relativ zueinander bewegen können.
Zum Platinenätzen finden sich zahlreiche Anleitungen im Internet.

Sicherheit

Nanopartikel sollten weder durch Inhalation noch durch Hautkontakt in den Körper gelangen. Aus diesem Grund dürfen die hier genannten Experimente nur in Absprache mit dem Sicherheitsbeauftragten der Schule und unter Beachtung der aktuellen Gefahrstoffverordnung durchgeführt werden. Der Autor bzw. die Autoren übernehmen keine Haftung für den unsachgemäßen Umgang mit Nanomaterialien und deren Folgen.

Literatur:

[1] C.O. Girit and A. Zettl, *Appl. Phys. Lett*. 91, 193512, (2007)
[2] http://www.jufo.stmg.de/2008/Graphen/ Graphen.pdf
[3] http://www.jufo.stmg.de/2010/Graphene/ Graphen

Hinweis

Diese Versuchsanleitung ist aus einer Jugend forscht Arbeit am St. Michael-Gymnasium in Bad Münstereifel entstanden. Weitere Informationen finden Sie unter Kapitel 14.

8. Kapitel: Die Nano-Welt des Kohlenstoffs

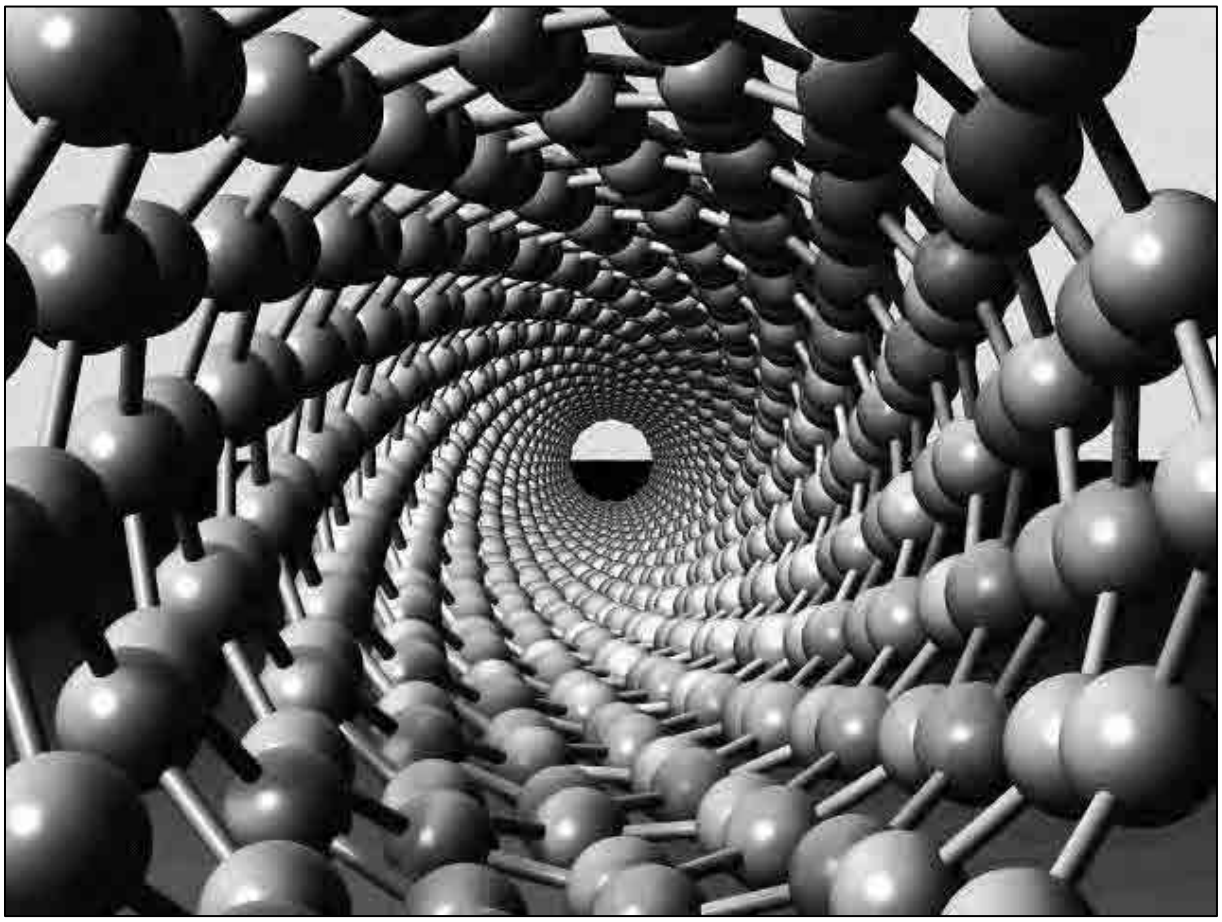
Autoren

Kapiteleinleitung

Professor Dr. Hubert Jäger, Technische Universität Dresden
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik

Versuchsanleitungen

Luca Banszerus, St. Michael Gymnasium, Bad Münstereifel
Benedikt Lorbach, Moritz Plötzing, Meike Spiess, St. Michael Gymnasium, Bad Münstereifel



Die Nano-Welt des Kohlenstoffs

von Professor Dr. Hubert A. Jäger

Das Element Kohlenstoff ist seit Jahrhunderten bekannt – zunächst hauptsächlich in der Form von Graphit und Diamant. Mit den Nanoformen wie Fullerene, Nanotubes und Nanohorns sind weitere allotrope Formen des Elementes Kohlenstoff bekannt geworden.

Ruß ist sicherlich die Form des Kohlenstoffs, welche den Menschen als erste auffiel. Mit Ruß wurden Höhlenzeichnungen hergestellt, welche 40.000 Jahre zurückdatiert werden konnten. Die nächste Form war der Naturgraphit welcher bereits von den Kelten zur Abdichtung von Tonkrügen verwendet wurde. Spätestens seit 1220 wurde Naturgraphit der Lagerstätte Kropfmühl bei Passau abgebaut. Die Anwendung reichte von Wagenschmiere bis zu Geschirr und Metallgusstiegeln. Im Prinzip wurde Naturgraphit also für sehr traditionelle Industrien verwendet – und es verwundert nicht dass die Abbaugebiete in Europa mit der Zeit aufgrund der höheren Kosten eine immer geringere Rolle spielten. Allerdings wurde der Abbau in der Lagerstätte Kropfmühl im Jahre 2012 wieder aufgenommen! Grund war die erwartete steigende Nachfrage und damit enorme Preissteigerungen für Naturgraphit. Treiber ist insbesondere das Thema Elektromobilität welches auf den Einsatz von Li-Ionenbatterien angewiesen ist: Denn jede Li-Ionen Batterie enthält auf ihrer Anodenseite eine Graphitbeschichtung – entweder aus natürlichem oder aber aus synthetischem Graphit. Denken Sie doch einmal daran wenn Sie das nächste Mal ihren Akku aufladen – bei Handy, Laptop, Fotokamera oder im Elektroauto.
Mit der beginnenden Elektrifizierung im 19. Jahrhundert werden Kohlenstoff und Graphit zu industriell wichtigen Hilfsmaterialien für die Aluminium und Elektrostahlherstellung. Da der rasch wachsende Bedarf durch Naturgraphit nicht zu befriedigen war, begann man Graphit synthetisch herzustellen. Grundlage hierfür war die Entwicklung eines Hochtemperaturverfahrens welches Acheson für die Herstellung von Siliziumkarbid, einem Hartstoff, im Jahre 1890 gelang. Durch die Mischung von granularen Koksen mit hocharomatischen Steinkohlepech-Bindern können durch anschließende Formgebungsverfahren Formkörper (Grünkörper) hergestellt werden.
Durch den thermischen Abbau der aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen wird der Körper in einem ersten Brennschritt unschmelzbar verfestigt. Der synthetische Graphit wird durch eine anschließende Hochtemperaturbehandlung bei 3000°C erhalten. Bei diesen hohen Temperaturen können Gitterfehlstellen ausheilen und die dreidimensionale Stapelfolge der Graphenschichten bildet sich aus, die charakteristisch für Graphit ist.
Mit dem vom Prinzip unveränderten Verfahren werden heute 42 Millionen Tonnen Aluminium und 400 Millionen Tonnen Elektrostahl hergestellt mit einem Bedarf an Kohlenstoff- und Graphitelektronen von ca. 22 Millionen Tonnen. Der große Unterschied im Verbrauch der Elektroden bei der Aluminium- und Stahlherstellung lässt sich leicht begründen. In der Aluminiumherstellung fungiert die Elektrode als Anode und ist somit Reaktionspartner; für ein Kilogramm Aluminium wird rund ein halbes Kilogramm Anodenmaterial verbraucht. Bei der Stahlherstellung hingegen dient sie „lediglich“ als Stromleiter – der Verbrauch liegt hier etwa bei 2 bis 4 Milligramm pro Kilogramm Stahl.

Diamant und Graphit - Allotropie

Hybridisierung

Elemente können in der Natur in unterschiedlichen Modifikationen vorkommen – dieses Verhalten nennt man auch Allotropie. Sowohl Diamant als auch Graphit bestehen beide vollständig aus Kohlenstoff: Sie sind in ihrer Elementzusammensetzung also identisch. In einem gravierenden Punkt hingegen unterscheiden sich beide Stoff außerordentlich: In ihren Bindungsverhältnissen. Daraus resultieren die Unterschiede in den Kristallstrukturen und somit die chemischen und physikalischen Eigenschaften.

Im Diamant ist jedes Kohlenstoffatom von vier benachbarten Kohlenstoffatomen umgeben – geht also vier Bindungen ein. Im Graphit hingegen sind es drei Bindungen. Dieser Sachverhalt lässt sich wie folgt erklären. Jedes Atom besteht aus einem Atomkern und einer „Elektronenhülle“ um diesen Atomkern. Hierbei können sich die Elektronen nicht beliebig im Raum aufhalten. Mit Berechnungen und Experimenten konnte nachgewiesen werden dass sich Elektronen – je nach Zustand des Atoms – in gewissen Bereichen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aufhalten, den sogenannten Atomorbitalen: Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für ein Elektron nimmt mit steigendem Abstand von Atomkern erst zu, dann wieder ab. Sie erreicht allerdings nicht Null, es gibt also eine (äußerst winzige aber von Null verschiedene) Wahrscheinlichkeit dafür dass sich ein Elektron mehrere Millimeter von seinem Atomkern befinden kann. Die Atomorbitale werden mit den Buchstaben s, p, d und f bezeichnet, wobei es ein s-Orbital, drei p-Orbitale, fünf d- und 7 f-Orbitale gibt in denen sich jeweils bis zu zwei Elektronen befinden können.

Chemische Bindungen entstehen nun wenn sich diese Orbitale von verschiedenen Atomen überlappen – und sich somit ein Raum bildet der eine hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeit für die Bindungselektronen aufweist. Man bezeichnet diese Art der Bindung auch als kovalente Bindung. Beide Atome teilen sich die Bindungselektronen. Die Bindungselektronen können somit als der „Klebstoff“ bezeichnet werden der den Zusammenhalt zweier Atome erst möglich macht.

Im Fall des Diamanten stellt man fest dass jedes Kohlenstoffatom vier gleichwertige und vor allem nicht unterscheidbare Bindungen aufweist. Dies wird möglich indem ein Elektron aus dem s-Orbital in ein p-Orbital angehoben wird (promoviert). Durch die mathematische Vermischung eines s-Orbitals mit drei p-Orbitalen entsteht die sogenannte sp3-Hybridisierung. Dies bedeutet eine räumliche Ausrichtung der Orbitale in Form eines Tetraeders womit sich ein Bindungswinkel zwischen den Orbitalen von 109,3° (Tetraederwinkel) ergibt. Dies entspricht den Bindungsverhältnissen im Diamant. Die hohe Bindungsenergie in allen drei Raumrichtungen ist verantwortlich für die Härte des Diamanten aber auch die hohe thermische Leitfähigkeit, welche hier auf den Gitterschwingen beruht.

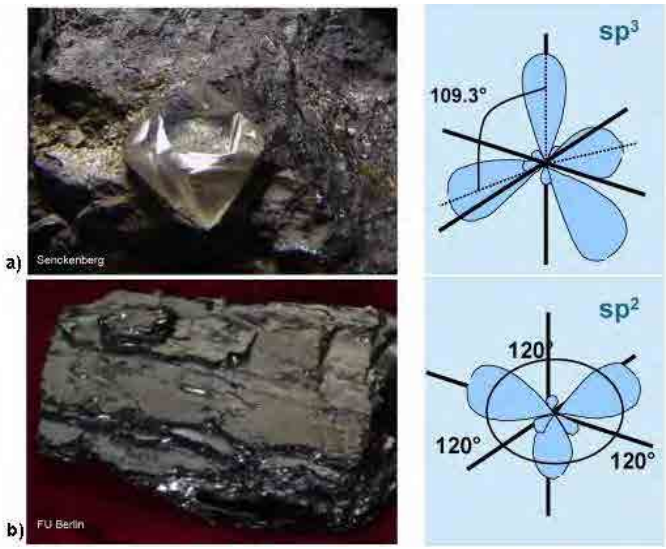


Abbildung 76 Ausrichtung der Hybridorbitale in Diamant (oben) und Graphit (unten).

Im Fall des Graphits liegt ebenfalls eine Hybridisierung vor – hier lassen sich aus einem s-Orbital und zwei p-Orbitalen insgesamt drei sp^2-Orbitale konstruieren. Die geometrische Anordnung ist nun ein gleichseitiges, ebenes, Dreieck mit den Bindungswinkeln von 120°. Das verbleibende, unveränderte p-Orbital welches nicht in die Hybridisierung mit einbezogen ist, steht senkrecht auf dieser Dreiecksfläche. Die Bindungslängen zwischen zwei Kohlenstoffatomen betragen je nach Hybridisierung 0,154 nm für die sp3- Hybridisierung im sowie 0,135nm für die sp^2 –Hybridisierung. Die Bindungsenergie von 430 kJ/mol in der Ebene des Graphitgitters ist eine der höchsten Bindungsenergien die wir kennen. Sie ermöglicht einem Elastizitätsmodul von 1060 GPa und damit eine theoretische Zugfestigkeit von ca. 100 GPa. Diese Werte liegen weit über denen welche wir von Metallen kennen.

Das Zustandsdiagramm

Das Zustandsdiagramm gibt uns Aufschluss unter welchen Druck und Temperaturbedingungen die Kohlenstoffmodifikationen thermodynamisch stabil sind. Das Druck-Temperatur Diagramm zeigt sowohl auf der Temperatur- wie auch auf der Druckachse – einen sehr großen Bereich an. Zum Vergleich: 25°C entsprechen 298K auf der Temperaturachse, der normale Luftdruck auf der Erde beträgt etwa 101325 Pa und entspricht somit rund 0,0001 GPa. Dies zeigt eindrücklich welche enormen Druck- und Temperaturverhältnisse herrschen müssen um Diamanten entstehen zu lassen (siehe Abbildung 77). Andererseits ist es technisch recht einfach Diamant in Graphit zu überführen. Der Diamant wird auf 1500°C unter Luftausschluss erhitzt und wandelt sich dabei in Graphit um. Der Vorgang sollte wie angemerkt unter Luftabschluss erfolgen damit das Hauptprodukt nicht Kohlenmonoxid wird.

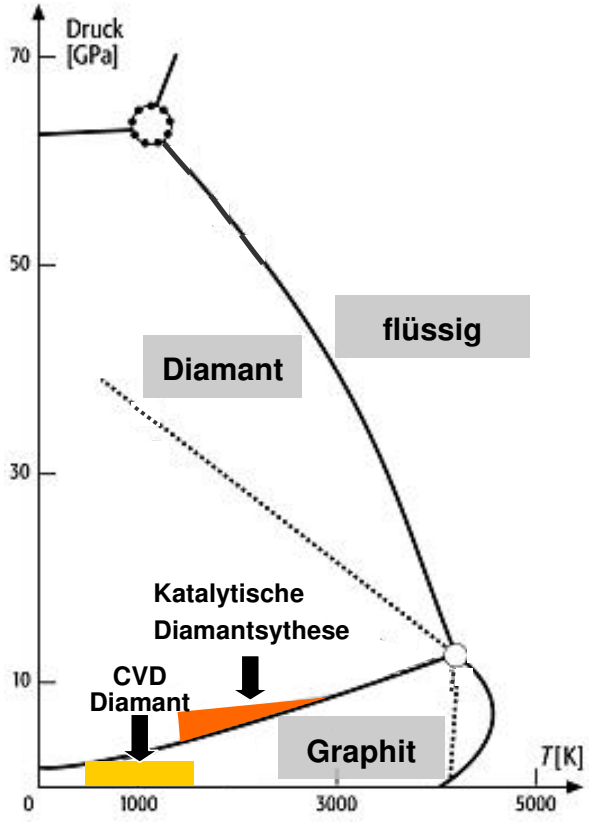


Abbildung 77 Zustandsdiagramm des Kohlenstoffs

Aus wirtschaftlichen Gründen ist es selbstverständlich deutlich verlockender Diamant aus Graphit herzustellen. Wie uns das Zustandsdiagramm lehrt kann dies unter sehr hohen Drücken und Temperaturen erreicht werden. Die erste technische Diamantsynthese gelang General Electrics im Jahre 1955 mittels des zuvor von Bridgman entwickelten Hochdruckverfahrens. Dabei wurde Graphit bei 3000°C und Drücken von mehreren 10 kbar dem thermodynamischen Gleichgewicht folgend umgewandelt. Durch den Einsatz von Eisen- oder Kobaltkatalysatoren ließen sich die Umwandlungsbedingungen zu deutlich reduzierten Drücken und Temperaturen verschieben (katalytische Diamantsynthese (oranger – Bereich) in Abbildung 77). Unter vereinfachten Druck- und Temperaturbedingungen lässt sich Diamant über gesteuerte Zersetzungs- und Abscheidungsreaktionen von Methan aus der Gasphase (CVD, Chemical Vapour Deposition) darstellen. Beide Verfahren, die katalytische Diamantsynthese und die Gasphasenabscheidung werden industriell genutzt.

Physikalische Eigenschaften

Der Unterschied bei den beiden Hybridisierungen erklärt die grundlegend verschiedenen Eigenschaften der Modifikationen. Der Diamant kristallisiert in einer tetraedrischen Kristallstruktur mit hoher Härte, guter Wärmeleitfähigkeit und schlechter elektrischer Leitfähigkeit. Diese Eigenschaften sind isotrop, also von gleicher Größe in allen Raumrichtungen.

Die Härte von Materialien wird häufig nach der Methodik nach Mohs durchgeführt. Hierbei wird geprüft welches Material härter als ein anders ist indem man die unterschiedlichen Stoffe anritzen kann – wobei Diamant mit einer Härte von 10 die Spitze der Skala darstellt – also das härteste Material in dieser Skala ist.

Die beschriebene Hybridisierung kann auch die schlechten Werte für elektrische Leitfähigkeit erklären: Alle Elektronen im sp^3-hybridisierten Diamant sind Bindungselektronen, freie und damit als Landungsträger bewegliche Elektronen hingegen kommen nicht vor. Die extrem hohe Wärmeleitfähigkeit des Diamanten, sie beträgt etwa das Fünffache von Kupfer, erscheint zunächst überraschend für einen elektrischen Isolator. Sie kann jedoch über die Gitterschwingungen erklärt werden.

Gegenüber dem Diamanten ist der Graphit extrem weich. Reiner Naturgraphit kann schon mit dem Fingernagel angeritzt werden. Diesen Effekt macht man sich zum Beispiel auch bei einem weit verbreiteten Schreibutensil zu Nutzen dem Bleistift. Durch Anwenden von leichtem Druck auf das Papier kommt es zum Gleiten der einzelnen Graphitschichten gegeneinander. Die abgeriebenen Graphitschichten bleiben dann als Bleistiftstrich auf dem Papier zurück. Hier nähern wir uns dem Nanobereich; die Schichtdicken dieser abgeriebenen Graphenschichten können im Bereich unterhalb von 100 nm liegen.

Die delokalisierten Bindungen in der aromatischen Schichtebene mit ihrer hohen Bindungsenergie liefert ein Festigkeitspotentials, welches heute in Kohlenstofffasern genutzt wird. Allerdings betragen die höchsten erreichten Zugfestigkeitswerte nur vergleichsweise 7000 MPa, also weit von dem theoretisch Erreichbaren entfernt (100 000 MPa). Die Zugfestigkeit von konventionellen Baustählen liegt hingegen nur bei etwa 500 MPa. Da die Festigkeit abhängig ist von der Anzahl der das Versagen einleitenden Fehlstellen, ist sie auch ein Volumeneffekt. Abbildung 78 vergleicht die Festigkeiten verschiedener Kohlenstoffmaterialien.

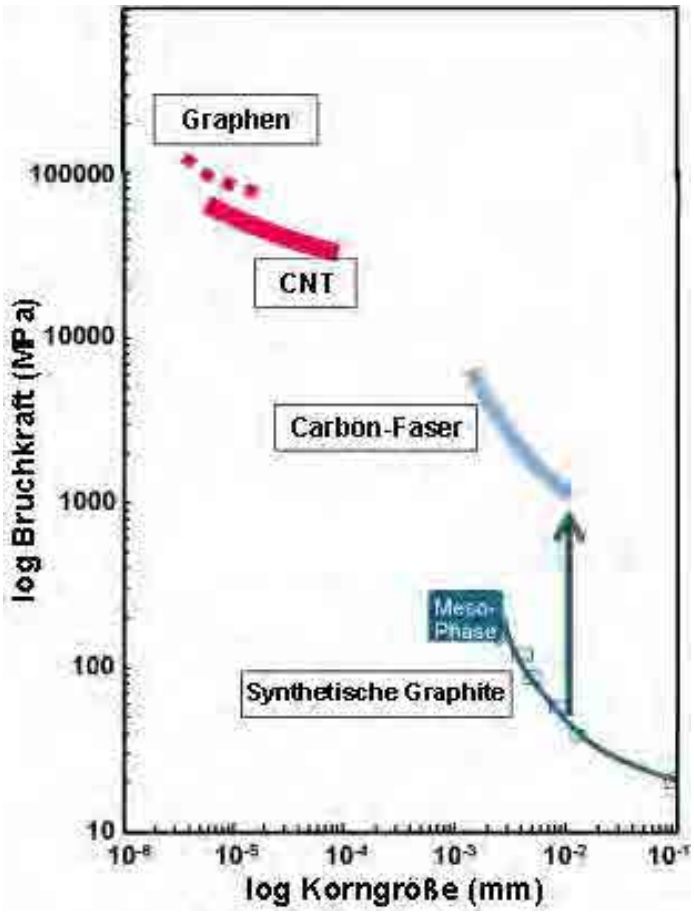


Abbildung 78 Festigkeiten verschiedener Kohlenstoffmaterialien.

Dass die Festigkeit bei den Nanoformen des Kohlenstoffs am höchsten ausfällt ist natürlich in erster Linie auf das kleine Volumen dieser Spezifikation zurückzuführen. Ähnliche verhält es sich mit dem elektrischen Widerstand. Dieser ist in der Schicht extrem klein, senkrecht zur Schicht ergibt sich allerdings auch hier wieder ein komplett gegenteiliges Bild. Der elektrische Widerstand ist hier etwa Hunderttausend bis eine Million mal größer als innerhalb der Schicht. Im umgekehrten Sinne gilt das Gleiche für die thermische Leitfähigkeit. Während die Bindungsstärke in der Schicht sehr hoch ist, ist sie zwischen den Schichten klein und liegt im Bereich der van-der-Waals Wechselwirkung (siehe Tabelle 2).

Somit können sich die einzelnen zweidimensionalen Graphitschichten leicht gegeneinander verschieben. Im Gegensatz zum Diamanten sind alle Eigenschaften des Graphits stark richtungsabhängig man bezeichnet ihn daher als ein stark anisotropes Material.

Trotz der Vielfalt der Morphologie in den Kohlenstoffmaterialien und der gezielten Herstellung, erschien die Welt des Kohlenstoffs verstanden und mit großen Überraschungen war in der Forschung eigentlich nicht mehr zu rechnen. Doch wie schon häufig in der Geschichte der Naturwissenschaften stellte sich dies schon bald als hinfällig heraus. In der Mitte der achtziger Jahre des 20. Jahrhunderts begann die wissenschaftliche Furore allotroper Nanoformen des Kohlenstoffs.

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der Kohlenstoff Allotrope

	Graphit		Diamant	Fulleren	CNT	Graphen
Eigenschaften	‖	⊥				
Mohs-Härte	0,5	9,0	10	3,5	-	-
Thermische Leitfähigkeit	1500	5	2300		≃ 3500	≃ 5000
Elektrischer Widerstand [Ω cm]	$50 \cdot 10^{-6}$	1,0	1020	10^{6}	10^{-4}	10^{-6}
Festigkeit (GPa)	106	3,6		1,6	≃ 100	100
Youngs Modlulus (GPa)	1060	36	1000	16	≃ 1000	≃ 1000
Thermische Ausdehnung ($10^{-6}K^{-1}$)	-1,5	28,3	0,8	-	-1,5	-1,5

Nanoformen des Kohlenstoffs

Mit großer Wahrscheinlichkeit finden sich in den seit Jahrtausenden verwendeten Rußen – etwa als Farbe, Kosmetik oder für Tinten – schon erste Nachweise für die unabsichtliche Herstellung von unterschiedlichen Nanoformen des Kohlenstoffs wie etwa Fullerene oder Carbon-Nanotubes. In der Vor-Nanozeit hat niemand die Eigenschaften der nanostrukturierten Industrieruße mit einem neuen Technologiezeitalter in Verbindung gebracht.
Erst mit Beginn der Nanotechnolgie und dann die Entdeckung nanoskaliger, bis dato nicht gezielt gesuchter Allotrope des Kohlenstoffs lösten einen wissenschaftlichen Tsunami aus. Dieser Tsunami lässt sich gut anhand der getätigten Patentanmeldungen verfolgen. Dabei blieben von der wissenschaftlichen Seite die klassischen Kohlenstoffwerkstoffe, sowie die Kohlenstofffaser und diamantartiger Kohlenstoff auf der Strecke. Das Ganze begann 1985 mit der Entdeckung des fußballartigen Allotrops Fulleren.

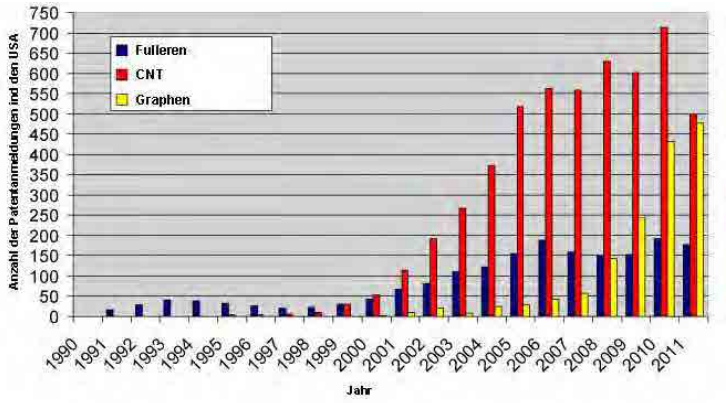


Abbildung 79 Patentanmeldungen zu den verschiedenen Kohlenstoff-Nanoformen

Fullerene

Doch der Beginn auch dieser Entwicklung war ein Zufall. Die Genialität der Entdecker hingegen besteht darin, dies nicht als eine lästige Begleiterscheinung oder gar einen Fehler abzutun, sondern der Sache auf den Grund zu gehen und die sich bietende wissenschaftliche Chance zu ergreifen: Bei der Untersuchung des Absorptionsverhalten von interstellaren Staub synthetisiere die Arbeitsgruppe von W. Krätschmer am MPI für Astrophysik in Heidelberg im Jahr 1982 unbewusst Fullerene (Abbildung 80).

Drei Jahre später beschäftigten sich die Forscher Kroto, Curl und Smalley mit der gleichen Fragestellung. Sie verdampften Graphit mittels Laser und konnten massenspektroskopisch C_{60} Moleküle nachweisen.

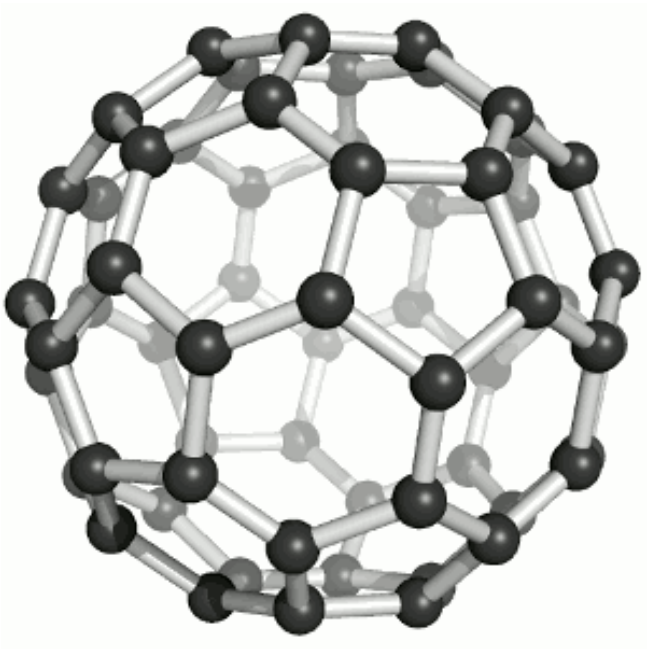


Abbildung 80 Buckminsterfulleren, eine Kugel aus 60 Kohlenstoffatomen.

Und wie schon Kekulé bei der Strukturaufklärung des Benzols mit seiner ungewöhnlichen Summenformel C_6H_6 musste auch für diese Summenformel – C_{60} – eine Strukturaufklärung erfolgen. Theoretisch müsste es sich bei dem hier vorliegenden Molekül um eine Kombination von Kohlenstoffsechs- und Fünfringen handeln. Der Durchmesser eines solchen Teilchens müsste ca. 1 nm betragen. Erst die Synthesemethoden von Krätschmer liefert schließlich genügend Material für eine Infrarotanalyse. 1994 erhielt Krätschmer für die Synthese den SGL Förderpreis durch den Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft. Und tatsächlich: Die Struktur konnte so wie theoretisch berechnet nachgewiesen werden. Sie ähnelt in der Tat einem Fußball (Abbildung 80), der auch aus diesen Strukturelementen aufgebaut sein kann. Kroto, Curl und Smalley erhielten für die Entdeckung des Fullerens im Jahre 1996 den Nobelpreis für Chemie.

Die Fullerene von denen bald weitere, größere synthetisiert und nachgewiesen wurden avancierte schnell zum wissenschaftlichen Highlight.

Große Hoffnung wurde in Anwendungen wie anti-AIDS Mittel, Wirkstofftransporteure, elektronisches Nanobauteile, Oberflächenvergütungen und vieles mehr diskutiert. Tatsächlich sind Fullerene bis heute eine wissenschaftliche Kuriosität. Eine nennenswerte kommerzielle Anwendung hat sich bis heute nicht etablieren können – lediglich in organische Halbleiter finden sie in sehr geringem Maße Verwendung.

Wie Diamant und Graphit findet man Fullerene übrigens auch in der Natur. So enthält Schungit, ein kohlenstoffhaltiges Material welches in Karelien vorkommt neben anderen Nanoformen des Kohlenstoffs auch Fullerene.

Gehen wir zurück zu einigen potentiellen Anwendungen. Im elektrischen Bereich existieren Überlegungen mit Fullerenen die Elektroden in Brennstoffzellen in verschiedenen Batterietypen oder auch in Superkondensatoren. Dabei wird die hohe Elektronegativität, also die anziehende Wirkung auf Elektronen des Fullerens ausgenutzt. Der Ladungsaustausch soll dadurch effizienter erfolgen.

Im medizinischen Bereich wurden bereits frühzeitig die Möglichkeiten diskutiert den Hohlraum der Fullerene mit Medikamenten zu bestücken und über das Fulleren als Transporteur zielgenau an die gewünschten Stellen im Körper zu bringen. Hier sieht man wasserlösliche Fulleren-Derivate, die Zellmembranen durchdringen können, vor allem als aussichtsreiches Medikamenten-Transport-System mit hoher Selektivität an. Die zahlreichen Möglichkeiten, Fullerene mit funktionalen Molekülgruppen auszustatten, erlauben ein sehr zielgenaues Andocken an die betroffenen Zellen, in die dann der Wirkstoff abgegeben wird. Erste in-vitro Experimente mit nicht zytotoxischen Fulleren-Derivaten haben diesbezüglich viel versprechende Ergebnisse geliefert. Aber auch die direkte pharmazeutische Wirkung modifizierter Fullerene ist ein Thema in der Forschung, z. B. durch spezifische Toxizität für manche Tumorzellarten. Außerdem könnten Fullerene aufgrund ihrer elektronischen Eigenschaften als Radikalfänger bei der Behandlung verschiedener Krankheitsbilder genutzt werden.“

Kohlenstoff Nanoröhrchen

Bei weitem die größte Aufmerksamkeit im Nanobereich hat in den letzten Jahren die Stoffklasse der Nanoröhrchen (Carbon Nanotubes, CNT) erfahren.

Vergleicht man die beiden Strukturen der Fullerene und der CNTs, so erscheint es wenig überraschen, dass nach der Entdeckung der Fullerene bald die Entdeckung röhrchenförmiger Kohlenstoffmoleküle gemacht wurden. Der Verdienst der Entdeckung und erstmaligen Beschreibung gebührt S. Iijima im Jahre 1991. Er wurde mit zahlreichen Auszeichnungen geehrt, den Nobelpreis erhielt er jedoch nicht. Diese Entdeckung stimulierte erneut die wissenschaftliche Gemeinde zu intensiver Forschung.

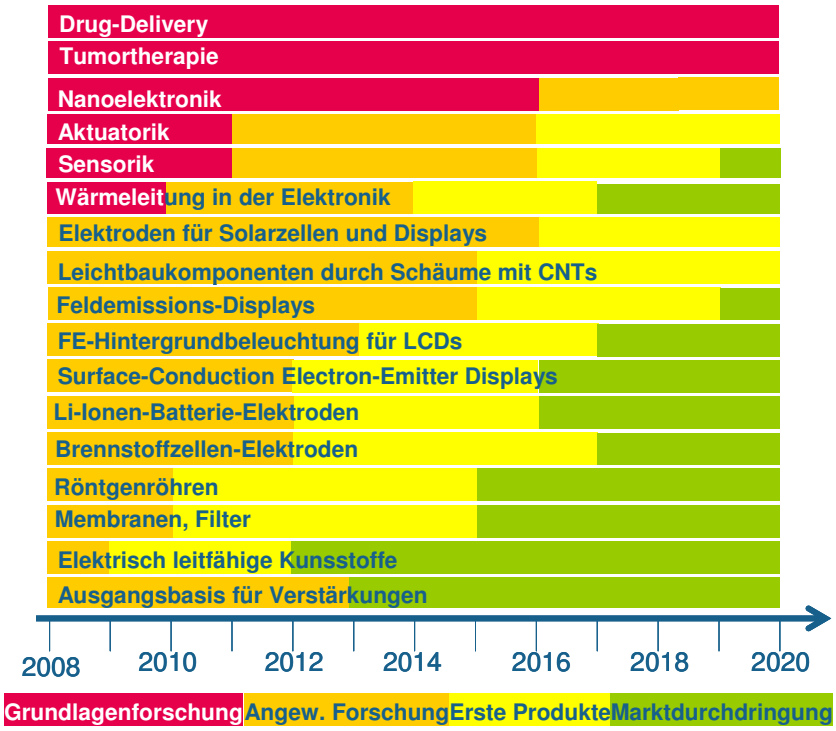
Man unterscheidet zwischen einwandigen (Single Wall Carbon Nanotubes, SWNT) und mehrwandigen Spezies (Multi Wall Carbon Nanotubes, MWNT). Die Herstellung erfolgt über Laserverdampfung von Graphit, die Synthese im Lichtbogen oder über Chemische Gasphasenabscheidung (Chemical Vapour Deposition, CVD). Da das CVD-Verfahren die besten Ausbeuten liefert hat sich dieses Verfahren durchgesetzt. Alle Verfahren benötigen jedoch Katalysatoren wie Nickel-, Kobalt- oder Eisen- Partikel. Diese Katalysator-Verunreinigungen müssen anschließend entfernt werden. Es besteht der dringende Verdacht dass mit Katalysator verunreinigte Nanotubes Krebs verursachen könnten.

Gedanklich kann man sich Nanotubes als aus einer einzelnen Graphitschicht (Graphen) aufgerolltes Röhrchen vorstellen. Je nachdem in welche Richtung man die Schicht aufrollt ergeben sich verschiedene Modifikationen mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften. Diese Eigenschaften reichen von einer metallischen Leitfähigkeit über Halbleitereigenschaften bis zum elektrischen Isolator.

Die in der Tabelle 2 aufgeführten Festigkeiten sind die theoretischen Werte die sich aus dem Elastizitätsmodul ergeben. Tatsächlich liegen die gemessenen Festigkeiten von Nanotubes zwischen 30 – 60 GPa. Damit übertreffen sie alle bekannten Werkstoffe – allerdings sind Nanotubes heute nur in äußerst geringem Längen verfügbar – im besten Fall lassen sich Nanotubes erzeugen die wenige Mikrometer lang sind. Es liegt daher nahe Nanotubes als mechanische Verstärkungskomponente in Polymeren einzusetzen. Der Verstärkungseffekt in diesen Kunststoffen konnte erfolgreich

nachgewiesen werden. Neben den herausragenden mechanischen Eigenschaften ist auch die hohe Bandbreite der elektrischen Eigenschaften von großem Interesse.

Die Nanotube-Varianten welche metallische Leitungseigenschaften aufweisen sind interessant für die Anwendung als Elektroden, in Li-Ionen-Batterien aber auch in Brennstoffzellen. Am wenigsten fortgeschritten ist die Anwendung von Nanotubes im medizinischen Bereich.



Source: Adapted from Meta-Roadmap Nanomaterialien, Zweck et al., 2009

Abbildung 81 Übersicht über mögliche Anwendungen von Kohlenstoffnanoröhrchen

Die gute elektrische Leitfähigkeit ermöglicht es schon mit geringen Zugaben von MWNT´s Harze elektrisch Leitfähig zu machen Die Perkolationsschwelle liegt typischerweise unterhalb von 0,5 Volumenprozent. Die ersten kommerziellen Anwendungen fanden Kohlenstoff-Nanoröhren als elektrisch leitfähige Komponente in Polymer-Kompositen, wie sie z. B. im Automobilbau für Benzinschläuche und -filter eingesetzt werden, um elektrostatische Aufladungen zu vermeiden. Weitere Anwendungsgebiete sind die elektrostatische Lackierung, die Abschirmung von elektromagnetischer Strahlung (Computer, Handys, Cockpits) oder die Herstellung antistatischer Oberflächen. Die zweite Zielrichtung bei der Entwicklung von CNT-Kompositen ist die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen. Die hohe Stabilität bei vergleichsweise geringer Dichte macht besonders Polymerschäume mit CNTs für verschiedene Leichtbauanwendungen im Transport- und Energiebereich interessant.

Für zukünftige Anwendungen wird es von zentraler Bedeutung sein, diese Materialien möglichst in Anwendungen zu führen die zugleich eine hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit aufweisen, zugleich aber einer hohen Oberfläche bedürfen und hohen Temperaturen widerstehen müssen.

Neben dem Einsatz in Verbundwerkstoffen mit organischer, anorganischer oder metallischer Matrix sind auch so genannte 100%-Systeme von großer technischer Bedeutung. Dabei handelt es sich um Halbzeuge, welche ausschließlich aus CNTs hergestellt worden sind. In diesem Sektor publizieren die

Wissenschaftler um Ray Baughmann immer wieder erstaunliche Ergebnisse, wie beispielsweise CNT-Fasern und CNT-Folien. Beide Systeme können einen wesentlichen Beitrag für die Umsetzung anspruchsvoller Applikationen leisten, da sie die Eigenschaften der Nanoröhren in idealer Weise nutzten.

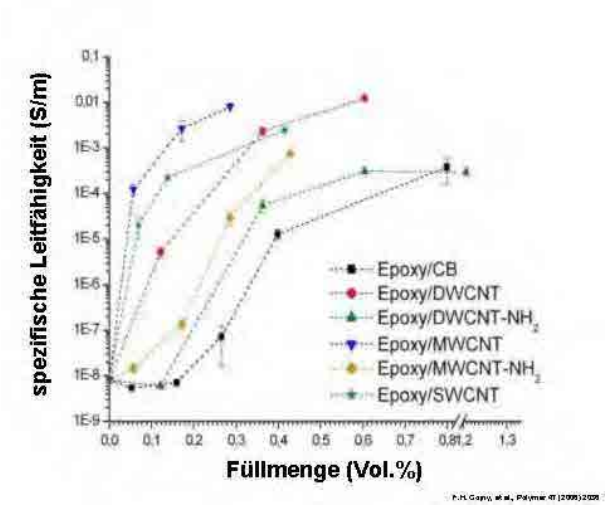


Abbildung 82 Der Einfluss verschiedener CNT Zugaben auf die elektrische Leitfähigkeit von Epoxyd-Harz.

Für viele Anwendungen ist die einzigartige Kombination von mechanischen und elektrischen Eigenschaften einwandiger Nanoröhrchen von weitreichender Bedeutung. So ist die Zugfestigkeit von SWNTs um zwei Größenordnungen größer als die von Stahl und sie halten 1000fach höheren Stromdichten im Vergleich zu Kupfer stand. Abhängig von der Richtung, in der die Kohlenstoffschicht zu einem Zylinder aufgerollt ist, besitzen das Röhrchen entweder metallische oder halbleitende Eigenschaften.

Ein großes Anwendungspotenzial besteht auch in der Verwendung von SWNTs (Single Wall Carbon Nano Tubes) und MWNTs (Multi Wall Carbon Nanotubes) als Elektronen-Feldemitter vor allem für Feldemissons-Displays (FEDs), aber auch für Lampen, Röntgenquellen und Mikrowellengeneratoren. Während für Displays mit Diagonalen kleiner 5 Zoll OLEDs (Organic Light Emitting Diodes) als aussichtsreichste Technologie gelten, werden CNT-basierte FEDs vor allem für das großformatige Marktsegment entwickelt, wo sie aufgrund einer Kombination von hoher Bildqualität, vergleichsweise niedrigen Produktionskosten und einem niedrigen Stromverbrauch den beiden wichtigsten Konkurrenten, den LCDs und den Plasmabildschirmen, überlegen erscheinen. Eine weitere Anwendung großflächiger CNT-basierter Feldemitter im Umfeld der Flachbildschirmtechnologie zeichnet sich in der Verwendung als Hintergrundbeleuchtung ab, auf die etwa 50 % der Kosten bei der Herstellung von LCD-TV Bildschirmen entfallen. Obwohl namhafte Hersteller in den zurückliegenden Jahren Prototypen von CNT-basierten Feldemissions-Displays demonstriert haben, gestaltet sich der Übergang zur industriellen Massenfertigung schwierig. Wesentliche Hürden bestehen derzeit noch in der Gewährleistung homogener CNT-Emitterverteilungen auf den Substraten und der Qualitätssicherung in der Großserienproduktion, insbesondere bei der Evakuierung der Bildröhren.

Aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften und ihrer molekularen Dimension gilt der Einsatz von Kohlenstoff-Nanoröhren in der Nanoelektronik als sehr aussichtsreich. So konnten die prinzipielle Realisierbarkeit und Funktionsfähigkeit von CNT-basierten Transistoren und anderen nanoelektronischen Bauelementen in Forschungslaboratorien bereits demonstriert werden. Für eine standardisierte Produktion besteht jedoch derzeit noch nicht die technologische Reife, da die hierfür erforderlichen halbleitenden Kohlenstoff-Nanoröhren bislang nur als Gemisch mit leitenden

Kohlenstoff-Nanoröhren industriell hergestellt werden können. Die wesentliche Herausforderung besteht daher in der Produktion sortenreiner Nanoröhren mit definierten Eigenschaften und Dimensionen sowie einer kontrollierten Anordnungsmethode.

Bei der Rekombination von Löchern und Elektronen ist es gelungen Licht im Infrarotbereich zu emittieren. Dies eröffnet Anwendungen im Bereich kleinster optoelektronischer Bauteile. Entscheidend für die Entwicklung CNT-basierter integrierter Schaltkreise ist die Weiterentwicklung und Verfeinerung mikrolithographischer Methoden bzw. die Entwicklung und Kontrolle gezielter Wachstumsprozesse von SWNTs auf Si-Substraten. Eine große Bedeutung kommt auch der weiteren Miniaturisierung von Elektroden und Kontaktierungen an den CNT-Metall-Schnittstellen zu. Im Bereich der Datenspeicherung könnten nanoröhrenbasierte RAMs (NRAM) perspektivisch andere Speicherarten wie DRAM, SRAM, Flash Memory und in weiterer Zukunft sogar Festplatten ersetzen. Aufgrund ihrer nicht auf Elektronen beruhenden Speichertechnik sind NRAMs strahlungsbeständig und wären somit für sicherheitsrelevante Anwendungen oder Raumfahrtapplikationen besonders gut geeignet. Allerdings befinden sich die NRAM-Speicher und die anderen CNT-basierten Datenspeicherkonzepte noch in einem eher forschungsnahen Stadium. CNTs können auch als Sensorelemente eingesetzt werden, da sich ihre elektrischen Eigenschaften durch die Oberflächenadsorption von Molekülen ändern.

Kohlenstoff-Nanoröhren sind aufgrund ihrer großen elektrochemisch zugänglichen Oberfläche und ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit attraktive Elektrodenmaterialien. So geht man z. B. davon aus, dass durch die Verwendung von Kohlenstoff-Nanoröhren anstelle von Graphit die Speicherkapazität von Li-Ionen-Batterien deutlich erhöht werden kann. Zudem verspricht man sich Verbesserungen bei der Zyklen-Festigkeit. Auch in Superkondensatoren und in Brennstoffzellen können CNTs als Elektrodenmaterialien eingesetzt werden. Dagegen hat die Forschungsaktivität auf dem Gebiet der CNT-Wasserstoffspeicherung in den letzten Jahren deutlich abgenommen, und es gilt in der wissenschaftlichen Gemeinschaft weitgehend als Konsens, dass der derzeitige Stand der Forschung mittelfristig den Einsatz von CNTs in kommerziellen Wasserstoffspeichern unwahrscheinlich werden lässt.

Im medizinischen Bereich werden Kohlenstoff-Nanoröhren auch als Medikamenten-Transport-Systeme untersucht, da sie die Zellmembran überwinden können. Die aussichtsreiche, sehr intensive Forschung auf diesem Gebiet befindet sich derzeit noch in einem sehr frühen und grundlagennahen Stadium. Bis zu echten therapeutischen Einsätzen in vivo ist hier noch eine Vielzahl molekularbiologischer und technologischer Hürden zu überwinden. Als ein entscheidendes Anwendungshemmnis der Kohlenstoff-Nanoröhren für kommerzielle Massenprodukte in Deutschland gilt die ungeklärte Frage nach ihrer Toxizität. Da umfassende Untersuchungen hierzu bislang nicht durchgeführt worden sind, können verlässliche Aussagen über das toxische Potenzial noch nicht gemacht werden.

Wie auch für Fullerene berichtet können Kohlenstoffnanotubes zur Verbesserung der Eigenschaften von Metallen eingesetzt werden. In diesem Falle ist durch den Zusatz von mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhrchen die Härte von Aluminium deutlich verbessert worden.

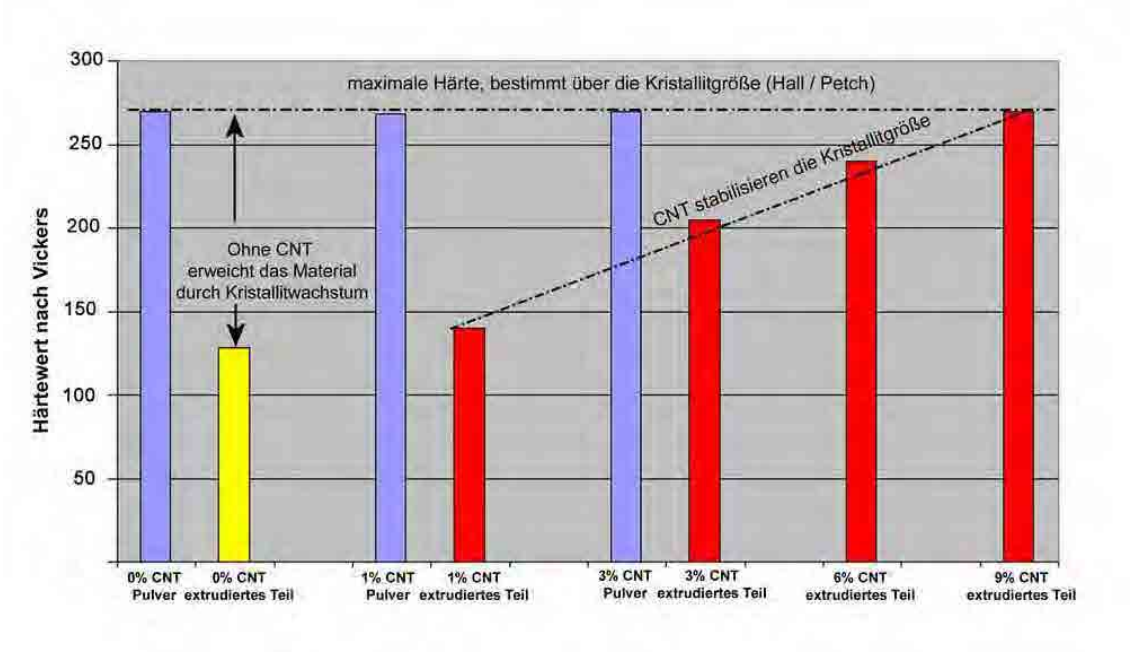


Abbildung 83 Einfluss von mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhrchen auf die Härte von Aluminium (Bayer Material Science)

Graphen

Graphen und sein historischer Ursprung

Als Graphen wird eine singuläre Graphitschicht bezeichnet. Vorgeschlagen hatte diese Bezeichnung H.P. Boehm welche dann auch von der International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) übernommen wurde.

Die IUPAC Beschreibung im englischen Originaltext lautet:

> *Graphene is a single carbon layer of the graphite structure, describing its nature by analogy to a polycyclic aromatic hydrocarbon of quasi infinite size.*

Boehm hatte als erster Graphen durch die Reduktion von Graphitoxid synthetisiert und seine Ergebnisse 1961 publiziert. Die Abscheidung einer einzelnen Schicht erfolgte erstmals durch Blakely und Mitarbeiter auf einem Nickel-Träger im Jahr 1970.Diese Publikationen wurde in den folgenden Jahrzehnten wenig Beachtung geschenkt – scheinbar war die Zeit noch nicht reif für dieses Material.

Vielmehr beschäftigte man sich mit theoretischen Modellen und hielt lange die Existenz einer einzelnen Graphenschicht für nicht möglich. Im Jahr 2010 erhielten Geim und Novoselov den Nobelpreis für Physik für ihre Beschreibung der außerordentlichen Eigenschaften dieses Materials auf dem Gebiet der Graphene:
Die Materialeigenschaften von Graphen heben sich von allen anderen Kohlenstoffmodifikationen deutlich ab (Tabelle 2). Hervorzuheben ist die mit ca. 100 GPa außerordentlich hohe Zugfestigkeit dieser Schicht sowie die extreme Wärmeleitfähigkeit.

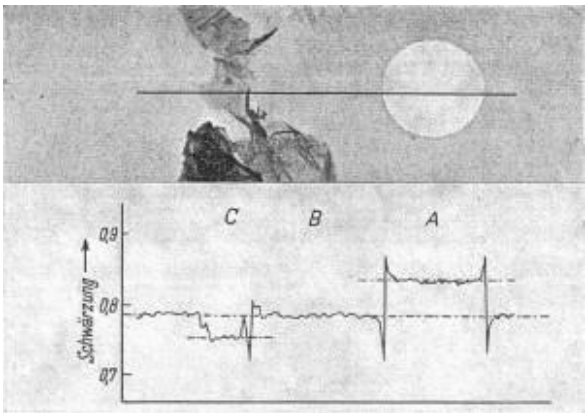


Abb. 4. Photometrische Ausmessung der elektronenmikroskopischen Aufnahme Nr. 623/56. Die Photometerkurve ist im gleichen Maßstab abgebildet. Die Dicke des Objektträgerfilms betrug 113 Ã…; die berechnete Dicke der Kohlenstoff-Folie ist 12,6 Ã…- Einheiten. Vergrößerung 38000 : 1

H. P. BOEHM, A. CLAUSS, G. O. FISCHER und U. HOFMANN
Z. Naturforschung 17 b, 150-153 [1962]; eingegangen am 2. November 1961

Abbildung 84 Erster Nachweis von Graphene durch Boehm: „photometrische Ausmessung der eletronenmikroskopischen Aufnahme Nr. 623/56. Die Photometerkurve ist im gleichen Maßstab abgebildet. Die Dicke des Objektträgerfilms betrug 113 Å ...; die berechnete Dicke der Kohlenstoff-Folie ist 12,6 Å...-Einheiten. Vergrößerung 38000:1“ (H.P. Boehm, A. Clauss, G.O. Fischer und U. Hofmann (1962) Z. Naturforschung 17b: 150-153).

Graphen – Herstellung, Anwendungen, Umsetzung

Graphene könnten als Netze für Elektronenmikroskope dienen, die im Elektronenstrahl keinen Schatten werfen und womöglich ein einziges Molekül für die Untersuchung halten. Die Graphenschichten verdanken ihre Stabilität dem Umstand, dass sie leicht gekrumpelt sind, wie zerknülltes und dann wieder geglättetes Papier. Die krumpligen Graphitnetze gelten in der Physik derzeit als ausgesprochen heißer Stoff, natürlich nicht ihrer Eignung für die Elektronenmikroskopie allein wegen. Die monoatomaren Schichten verblüffen vielmehr durch ihre elektrischen Eigenschaften.

Die Einschränkung des Leitvermögens auf nur eine atomar dünne Schicht den Elektronen zeigt ein bizarres Kollektivverhalten auf: Sie bilden Quasiteilchen aus, die als lichtschnelle Elektronen erscheinen – schon taucht in der Literatur die Idee von super-schnellen elektronischen Schaltern auf. Mehr noch: Die elektrischen Eigenschaften der Graphitflöckchen werden mit einer Mathematik beschrieben, die auch für extreme Zustände zuständig ist, wie die am Rande eines Neutronensterns herrschenden. Und wer mit einem Bleistift schreibt, produziert Graphitflöckchen zuhauf, also führen Bleistifte geradewegs in stark strapazierte Bereiche des Kosmos.

Die Methoden zur Herstellung freitragender monoatomarer Graphitschichten sind derzeit nicht von der Art, dass sie die Chipindustrie begeistern könnten – eine Methode ist tatsächlich, Graphit- schichten mit Tesafilm zu bekleben und diesen abzuziehen, bis nur mehr eine Einzelschicht übrig geblieben ist. Aber wenn einmal größere, sauber reproduzierbare, in Massen herstellbare Graphene verfügbar wären, würden sich gewiss zahlreiche Anwendungen finden. Die Kohlenstoffnetze sollten sich nämlich einfach photolithographisch strukturieren, also mit beliebigen Mustern versehen lassen. Womöglich entstehen so quantenmechanische Modellsysteme für die verzwicktesten Aufgabenstellungen, wie auch die mathematische Abbildung eines Neutronensterns.

Nicht untypisch für Nano: Aus einem Nichts wie einer Bleistiftspur entsteht durch Wissen (und ein vergleichsweise bescheidenes Budget) das Potenzial für eine ganz große Sache.

Die wohl einfachste Art der Herstellung von Graphenen ist das wiederholte Abziehen von Graphitschichten mittels eines Klebebandes – etwa Tesafilm – von einem hochgeordneten synthetischen Graphit. Das war die Vorgehensweise welche Novoselov anwendete. Die geeignetere

Methode ist aber die Herstellung von Graphen durch die Reduktion von Graphenoxid. Interessante Herstellungsmethoden sind die thermische Zersetzung von Siliziumcarbid und auch die Gasphasenabscheidung auf Metallfolien wie z. B. Kupfer.
Inzwischen sind neue Methoden gefunden worden die die Massenproduktion von transparenten Elektroden erlauben: nach der Gasphasenabscheidung auf Cu wird das entstandene Graphen über mehrere Transferprozesse auf eine Polymerfolie übertragen – als Material wird etwa PET verwendet, ein Stoff der jedem als Getränkeverpackung (Mehrwegflaschen aus Kunststoff) bekannt ist. Dies wird von großen Elektronikfirmen mittlerweile in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren praktiziert und erlaubt die Herstellung von mehreren 100m langen Substraten – Graphen hat das Labor verlassen und ist auf dem Sprung in den Markt.
Diese transparenten Graphenelektroden könnten eines Tages das heute bekannte und verwendete ITO (Indium-tin-oxide / Indium-Zinn-Oxid) ersetzen. Ohne dieses Material sind Displays wie wir sie heute kennen nicht denkbar.
Interessant wird dies insbesondere durch die knappe Ressource und den damit verbundenen Preisanstieg von Indium. Experten gehen unter Einbeziehung aller Ressourcen und aller bekannten Reserven davon aus dass Indium das erste technisch in größerem Maßstab verwendete Element sein könnte dessen Vorkommen auf unserem gesamten Planeten ausgebeutet sein werden. Sollten also keine leistungsfähigen und effizienten Recyclingverfahren zur Verfügung stehen wird der Flatscreen-TV von übermorgen somit kaum auf graphenbasierte transparente Elektroden verzichten können.
Auch die Welt der Smartphones wird sich verändern – Handys müssen ja nun nicht mehr in starren Gehäusen verpackt sein, die Displays werden einfach auf PET basierte Polymere gedruckt. Somit bietet eine einzige Schicht sp^2-hybridisierter Kohlenstoff, eine Schicht hochgeordnetem Graphit – dem Graphen – das Potential die Welt der Elektronik von morgen komplett zu revolutionieren. Der nächste technologische Durchbruch findet in diesem Bereich auf Basis von Kohlenstoff statt!
Die Materialeigenschaften von Graphen heben sich von allen anderen Kohlenstoffmodifikationen deutlich ab. Hervorzuheben ist die mit ca. 100 GPa außerordentlich hohe Zugfestigkeit dieser Schicht.
Aber auch die elektrischen und magnetischen Eigenschaften sind für Grundlagenexperimente als auch für praktische Anwendungen von hohem Interesse. Aufgrund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit könnte es Silizium in Transistoren ersetzen welche den Vorteil einer sehr viel höheren Taktfrequenz aufweisen. Der erste Graphen-Transistor wurde bereits 2010 mit einer Taktrate von 100 GHz von IBM hergestellt. Die Transparenz der Graphenschicht eröffnet Anwendungen im Bereich von flexiblen Displays und großflächigen Monitore.

Ausblick – future Nanotechnologie

Einleitend haben wir in diesem Artikel von Old-Nanotech gesprochen: historische, zufällige Anwendungen von Nanomaterialien. Zusätzliche haben wir die New-Nanotech vorgestellt – faszinierende Kohlenstoff Nanoformen und ihre Anwendungen in Praxis und vor allem in der Forschung. Als Ausblick für die Nanotechnologie hingegen soll noch ein Blick auf die Entwicklungen der nächsten Jahrzehnte gewagt werden – natürlich immer in vollem Bewusstsein dass Prognosen und Vorhersagen immer fehlerbehaftet sind, besonders wenn sie die ferne Zukunft betreffen!

Nano-motoren

Die Fragestellungen nach Energie und Mobilität sind zwei der herausragenden Fragestellungen die uns als Gesellschaft in den nächsten Jahrzehnten zentral beschäftigen werden.
Hierbei ist allen Zukunftskonzepten eines gemein – ob es sparsame Verbrennungsmotoren, Hybridautos oder reine Elektroautos sind. Die Energie wird in Form eines Treibstoffes wie Benzin, Ethanol oder Diesel oder aber in Form einer Batterie bereitgestellt. Nehmen wir an dass die Batterie mit Solarstrom geladen wurde. Somit wird zwar Sonnenlicht zur Energieerzeugung verwendet allerdings wird immer noch der Umweg über den Elektromotor gemacht. Spannender wäre es doch das Sonnenlicht direkt in Bewegung umzuwandeln – also ohne Verwendung eines Motors! Klingt wie Science Fiction? Das ist es sicherlich

noch – allerdings ist es im Labor schon möglich ein Stäbchen von einigen Mikrometern Länge durch Anwendung dieser molekularen Motoren mehrfach zu drehen. Und dies erfolgt ausschließlich durch molekulare Drehung! Ferne: jede Muskelbewegung in unserem Körper ist durch einen chemischen Motor verursacht – das Konzept funktioniert also bestens!
Doch wie genau funktioniert das Konzept?
Spezielle chirale Moleküle wurden mit einer speziellen Struktur so im Reagenzglas hergestellt dass sie Licht absorbieren und sich dadurch räumlich ändern – ihre Konformation wechselt. Dies alleine ist jedoch noch keine Besonderheit – jede Doppelbindung ist dazu in der Lage. Dies allerdings in beide Richtung und ungesteuert. Die speziellen nano-Motoren hingegen sind so konstruiert dass sie sich nur in eine Richtung drehen können - und dies ausschließlich mit Licht. Derartige Technologien würden es erlauben direkt aus Licht mechanische Energie zu erzeugen – ohne Umweg z.B. über ein Kraftwerk, eine Solarzelle und einen Elektromotor.
Man stelle sich nur vor dass sich alleine durch Sonneneinwirkung Automobile, Fabriken oder anderen Bewegungen induzieren kann: Die Konzepte entstehen gerade im Labor doch die ersten Tests sind vielversprechend. Es gelingt schon heute Objekte im kleinen Maßstab durch simples Auflegen auf eine derartige Oberfläche in Bewegung zu versetzen. Und wer weiß – vielleicht wird es eines Tages in der Tat möglich zu sein dieses Konzept in der Praxis umzusetzen.

Nanoautos

Man kann die Idee allerdings noch weiter spinnen: montiert man diese Nano-Motoren in größere Strukturen etwa in Form eines Nano-Autos – dann bewegt sich das wohl kleinste Automobil der Welt sogar selbstständig fort.

Schlussanmerkung

Nutzen und Erkenntnisse der Nanotechnologie stehen nicht für sich alleine dar, sie bilden keinen eigenständige Industriezweig – sondern nehmen eine Enabler-Funktion für mögliche Innovationen in bestehenden Industrien dar. Bildlich gesprochen: Es ist technische aktuell bekanntermaßen möglich einen Touchscreen ohne die Verwendung von Erkenntnissen aus der Nanotechnologie herzustellen – aber durch die Verwendung von graphenbeschichteten Schichten kann die Technologie verbessert werden.
Die Herstellung von Brennstoffzellen zählt schon seit einigen Jahrzehnten zum Stand der Technik und findet in geringem Ausmaß industrielle Anwendung – aber unter Umständen sind gerade kohlenstoffbasierte Nanomaterialien oder andere Erkenntnisse aus der Nanotechnologie die entscheidenden Enabler für die Brennstoffzelle von morgen.
Wissenschaftlich ist das Doppel Nanotechnologie/Kohlenstoff wie dargelegt ein herausragendes Doppel das in den letzten Jahren und Jahrzehnten immense Aufmerksamkeit erregt hat. Naturgemäß sind die technischen Anwendungen bei einer derart jungen Disziplin – die zusätzlich noch eine Querschnittstechnologie darstellt – aktuell noch sehr gering. Dies gilt sowohl für die Mengen an hergestellten Nanomaterialien, als auch für die damit verbundenen Umsätze und/oder Gewinne: die zukünftigen Potentiale hingegen sind gewaltig! Es lohnt sich am Ball zu bleiben!

Literatur

Meta-Roadmap Nanomaterialien: Zukünftige Entwicklungen und Anwendungen, Nils Elsner, Gunther Hasse, Andreas Hoffknecht, Michael Klink, Oliver Krauß, Stefan Pieper, Dirk Pohle, Georg Reiners und Axel Zweck, VDI, 2009

Versuch 33: Herstellung von Graphen in der Schule (1 von 6)

Die Nanotechnologie hält zunehmend Einzug in unseren Alltag. Sie ist laut dem Bundesministerium für Bildung und Forschung eine der entscheidenden Schlüsseltechnologien der Hightech-Strategie [1]. Allerdings wird die Nanotechnologie in den Schulen weder im Physik- noch im Chemieunterricht ausführlich behandelt. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die wenigsten Schulen über die notwendige Ausstattung (z.B. REM, STM, Lithographiegeräte) verfügen. Hier bietet Graphen die Lösung. Graphen ist eine monoatomare Schicht sp^2-hybridisierten Kohlenstoffs, die sich über 100 µm erstrecken kann und damit auf speziellen Substraten unter einem Auflichtmikroskop sichtbar ist [1]. Die Anwendungen des Graphens gehen jedoch weit über die bloße Faszination einer Monolage hinaus. Mit elektrisch kontaktierten Monolagen lassen sich sowohl Feldeffekttransistoren [2], als auch sehr sensible Gassensoren [3] einfach herstellen. Damit eignet sich Graphen ideal, um Schüler in der Schule für die Nanotechnologie zu begeistern. Dieser Artikel bietet eine detaillierte Anleitung für die Herstellung und Untersuchung von Graphen in der Schule.

Graphit besteht de facto aus vielen, durch schwache van-der-Waals-Kräfte (0,07eV) aneinander haftenden Graphen-Monolayern. Innerhalb einer Graphenlage sind die Kohlenstoffatome durch kovalente Bindungen (4,3 eV) gebunden. Aufgrund der großen energetischen Diskrepanzen zwischen den kovalenten Bindungen und der van-der-Waals-Kräfte lässt sich Graphen mechanisch aus Graphit isolieren [2].
Für die Herstellung von Graphen ist die sogenannte Scotch-Tape-Methode sehr gängig, da es sich um ein einfaches Low-Tech-Verfahren handelt.

Man benötigt für den Versuch:

- Einweghandschuhe
- Papier
- Pinzette
- Natürliche Graphitflocken
- Si/SiO_2-Wafer mit einer 90nm SiO_2-Schicht
- Scotch-Tape oder ein anderes schwach klebendes Klebeband
- Skalpell (optional)
- Aceton (optional)
- Isopropanol (optional)
- N_2(g) aus einer Flasche oder ein Föhn (optional)
- Ein Auflichtmikroskop mit bis zu 400x Vergrößerung

Zuerst sollte man für einen sauberen Arbeitsplatz sorgen, dazu kann man einfach ein weißes Blatt Papier auf dem Tisch auslegen. Zudem sollte man Latexhandschuhe benutzen um das Graphit und das Substrat sauber zu halten. Nun benötigt man das Klebeband. Am besten eignet sich Wafertape, welches man beim Kauf der Wafer gleich mit kaufen kann. Falls dies nicht verfügbar ist, bietet sich Scotch-Tape an, welches man in vielen Schreibwarenläden kaufen kann. Man beginnt, indem man einen ca. 10 cm langen Streifen Wafertape an beiden Enden ca. 1 cm umfaltet. Nun legt man mit der Pinzette eine Graphitflocke auf das Tape (Abbildung 85). Das Tape wird anschließend gefaltet. Es ist wichtig, dass man an dieser Stelle sehr stark mit dem Daumen auf das Graphit drückt und eventuelle Luftblasen mit der Pinzette heraus reibt. Nachdem man das Tape sehr langsam (!) wieder auseinandergefaltet hat, sollte man den Vorgang wiederholen, bis das gesamte Tape mit Graphit bedeckt ist.

Versuch 33: Herstellung von Graphen in der Schule (2 von 6)

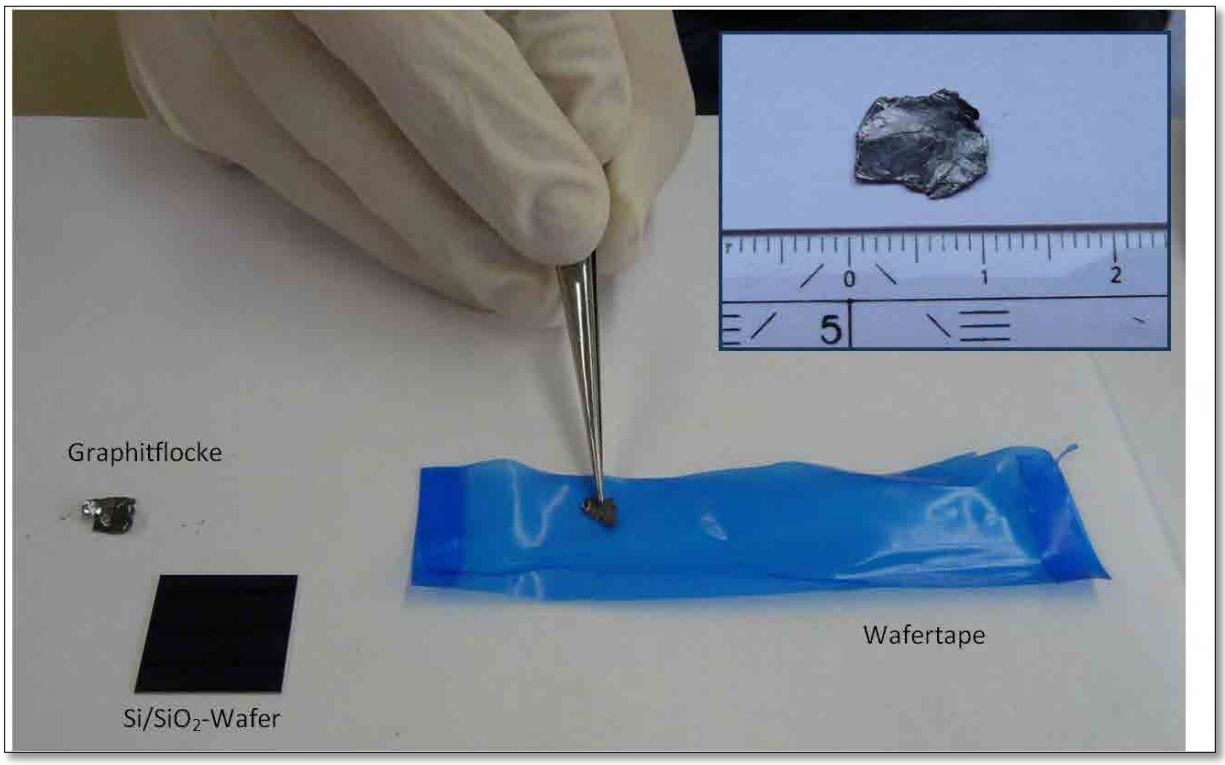


Abbildung 85 Graphitflocke wird auf das Wafertape gedrückt

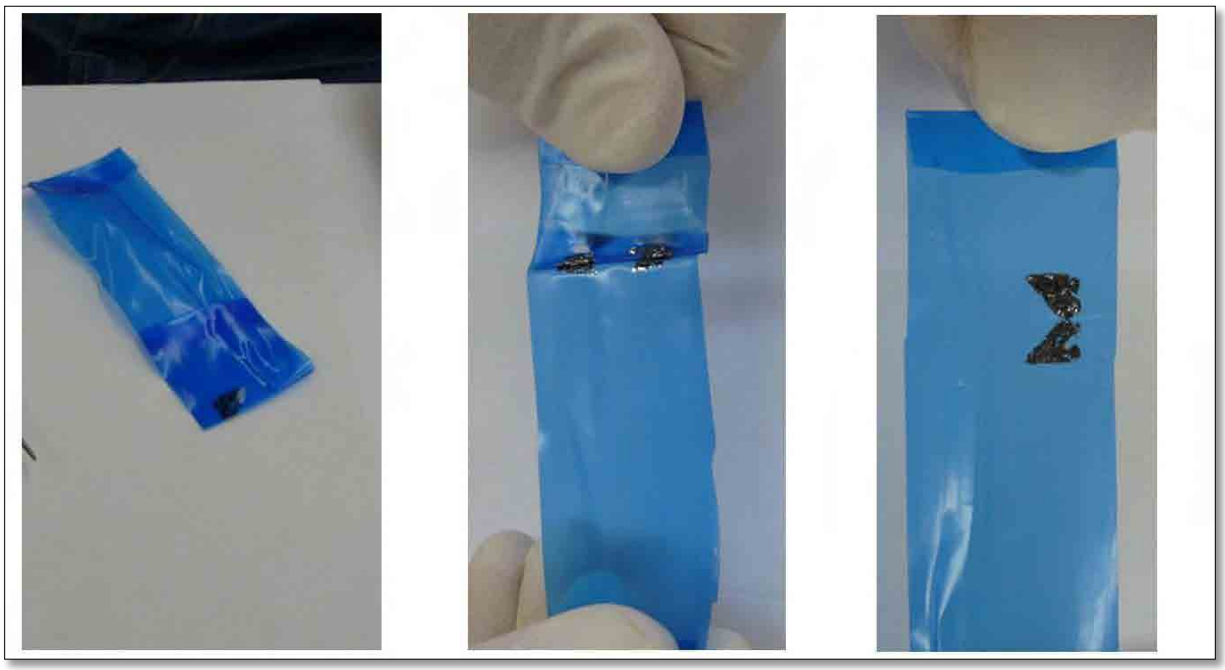


Abbildung 86 Ausdünnung des Graphits mittels Wafertape

Versuch 33: Herstellung von Graphen in der Schule (3 von 6)

Abbildung 87 Transport auf ein zweites Stück Wafertape

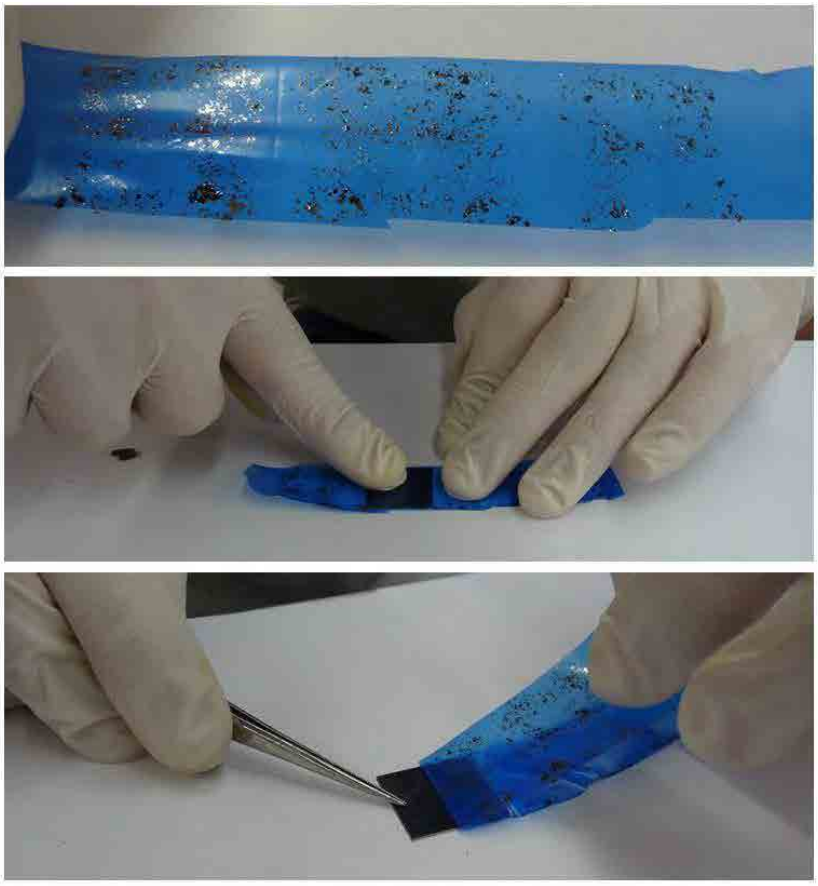


Abbildung 88 Das ausgedünnte Graphit wird nun auf den Wafer gedrückt. Nachdem alle Luftblasen beseitigt sind, wird das Tape sehr langsam abgezogen.

Versuch 33: Herstellung von Graphen in der Schule (4 von 6)

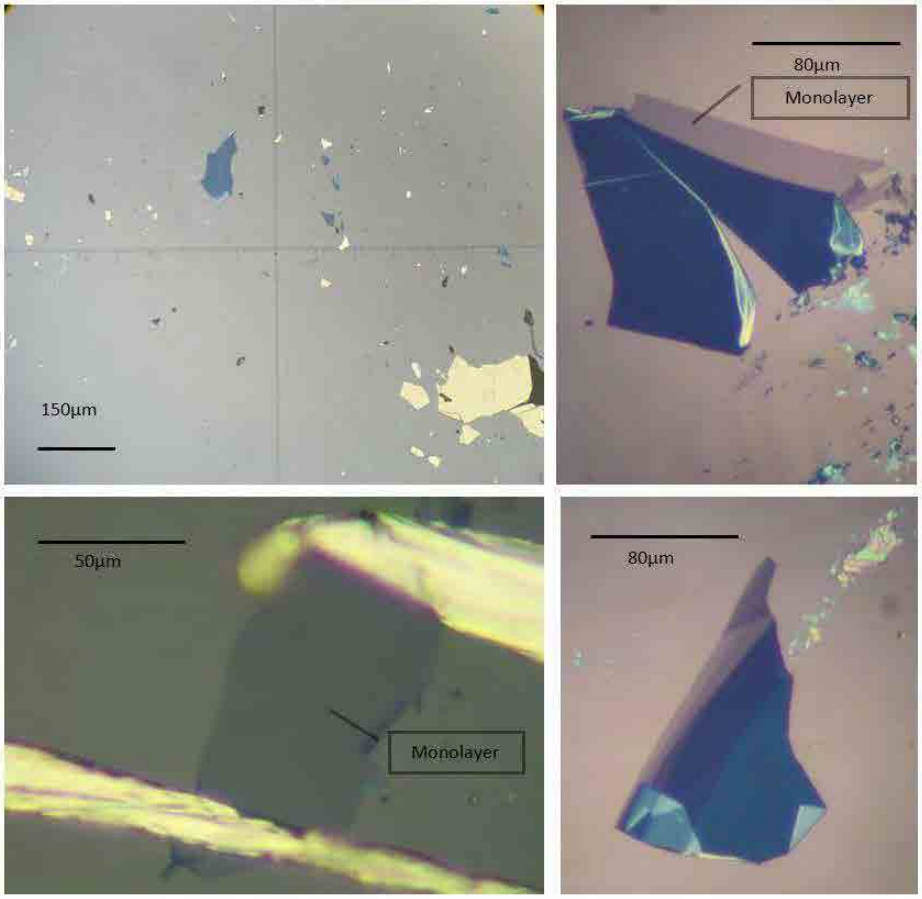


Abbildung 89 Graphit und Graphen unter dem Auflichtmikroskop oben links: viel Graphit unter niedriger Vergrößerung unten links : kontaktierter Monolayer; rechts: Multilayer mit few-layer-Graphen.

Wenn man das Stück Tape gegen das Licht hält, sollte man bereits Stellen erkennen können, an denen das Graphit leicht transparent zu werden beginnt. Diese Stelle sollte man nun auf ein zweites Stück Tape drücken und wieder die Blasen heraus reiben. Nachdem man das Tape abgezogen hat, wiederholt man den Ausdünnungsprozess, bis auch das zweite Stück Tape komplett bedeckt ist. Wenn man nun auch das zweite Stück Tape gegen das Licht hält, sollte man sich eine Stelle aussuchen, die relativ große transparente Stücke aufweist. Dese Stelle klebt man nun auf den Si/SiO_2-Wafer. Hier sollte man nun mit dem Finger das Tape festdrücken und mit sehr wenig Kraft die Blasen aus dem Tape reiben. Es ist wichtig, dass man das Tape nun sehr langsam von dem Wafer abzieht um das Graphen nicht zu beschädigen. Auf dem Wafer sollte man mit bloßem Auge bereits Partikel erkennen können. Wenn man Scotch-Tape anstatt des Wafertapes benutzt hat und das Graphen auch elektrisch kontaktieren möchte, sollte man den Wafer an dieser Stelle von Klebstoffrückständen reinigen, indem man ihn jeweils für eine Minute erst in ein Becherglas mit Aceton und dann in ein Becherglas mit Isopropanol legt. Wenn man den Wafer aus dem Isopropanolbad nimmt, sollte man ihn möglichst schnell mit Stickstoff oder mit einem Föhn trockenblasen. Anschließend kann man den Wafer unter einem Auflichtmikroskop untersuchen. Dabei gilt: Je geringer der Kontrast zum Wafer-Hintergrund, desto dünner die Schicht. Bei den gelblich glänzenden Partikeln auf dem Wafer handelt es sich um Graphit, das deutlich dicker als 50 nm ist.

Versuch 33: Herstellung von Graphen in der Schule (5 von 6)

Tipps

Das Graphit kann man bei der NGS Naturgraphit GmbH als „Graphenium Flocken“ kaufen. Bereits 1-2 g sollten für einen Versuch mit einem 25-köpfigen Kurs voll ausreichen. Falls das Graphen im Anschluss kontaktiert werden soll, empfiehlt es sich das teurere Graphit (25 € / Gramm) zu kaufen, da die Größe der Graphenlage deutlich zunimmt und so eine Kontaktierung mit schulischen Mitteln möglich ist.

Bezugsquellen

NGS Naturgraphit Gmbh

Die Si/SiO_2-Wafer findet man im Internet. B. unter: http://www.mtixtl.com/

Beim Kauf sollte man folgende Eckdaten angeben:

- Siliziumwafer <100>
- Bordotiert (für FETs)
- Thermisches Oxid 90nm dick
- In 2x2cm Stücke geschnitten

Die Größe des Wafers hängt dann natürlich von der Kursgröße ab

Tipps und Anregungen

- Der Wafer und das Graphit sollten nur mit der Pinzette berührt werden.
- Man kann bei schlechten Ergebnissen den Wafer reinigen, indem man ihn mit einem in Aceton getränkten Taschentuch abreibt.
- Um Graphit zu sparen, kann man auch neues Wafertape auf altes Wafertapes drücken, dort wo noch sehr dickes Graphit liegt.
- Um Graphen auf dem Wafer zu suchen, muss der Wafer mit einem Auflichtmikroskop abgerastert werden. Man sollte zudem eine „Landkarte“ der Wafer unter dem Mikroskop zeichnen, um das Graphen zu einem späteren Zeitpunkt wiederzufinden.
- Da Sauerstoff mit dem Graphit interkaliert, werden die Graphenflakes größer, wenn man Sauerstoff auf das Tape leitet.
- Es macht Sinn, eine Probenbox anzulegen, so dass man die Proben unterscheiden kann.
- Normalerweise wird Graphen in Reinräumen hergestellt, deshalb ist es wichtig auf Sauberkeit zu achten.
- Ein Gramm Graphit sollte zur Herstellung von 20-30 Proben reichen.

Versuch 33: Herstellung von Graphen in der Schule (6 von 6)

Literatur

[1] P.Blake, et al. “Making graphene visible,” Appl. Phys. Lett. 91, 063124 (2007)
[2] K.Novoselov, et al. “Electric field effect in atomically thin carbon films.” Science 306, 666–669 (2004)
[3] F.Schedin, et al. “Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene”. Nature Mater. 6, 652–655 (2007)
[4] http://www.youtube.com/watch?v=rphiCdR68TE
[5] http://www.uni-leipzig.de/~nfp/Publications/2006/Diplomarbeit_Martin_Rothermel/mr-diplomarbeit 2006.pdf, 11
[6] http://www.jufo.stmg.de -> 2008 -> Graphen
[7] http://www.jufo.stmg.de -> 2010 -> Graphene Sensoring

Hinweis

Diese Versuchsanleitung ist aus einer Jugend forscht Arbeit am St. Michael-Gymnasium in Bad Münstereifel entstanden. Weitere Informationen finden Sie unter Kapitel 14.

Sicherheit

Nanopartikel sollten weder durch Inhalation noch durch Hautkontakt in den Körper gelangen. Aus diesem Grund dürfen die hier genannten Experimente nur in Absprache mit dem Sicherheitsbeauftragten der Schule und unter Beachtung der aktuellen Gefahrstoffverordnung durchgeführt werden. Der Autor bzw. die Autoren übernehmen keine Haftung für den unsachgemäßen Umgang mit Nanomaterialien und deren Folgen.

Versuch 34: Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen (1 von 7)

Einleitung

In der Natur gibt es nur zwei Modifikationen des Kohlenstoffs: Graphit und Diamant. Eine dritte, die Fullerene, wurde im Jahr 1985 mittels Laserverdampfung von Graphit geschaffen. 1996 wurde ihre Entdeckung mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet. Fullerene sind Kohlenstoffverbindungen von mindestens 60 Atomen (C_{60}), die sich in 6er und 5er Ringen zusammenschließen und eine Kugel in der Art eines Fußballs formen. Aber trotz des hohen entgegengebrachten Interesses schafften die Fullerene es bisher nicht über den Status der Grundlagenforschung hinauszukommen. Hier scheinen die 1991 in Japan entdeckten Kohlenstoffnanoröhrchen es leichter zu haben. Nanoröhrchen (Nanotubes) bestehen aus aufgerollten Graphitschichten und können bei einem Durchmesser von nur ein bis zwei Nanometern bis zu mehrere Mikrometer lang werden. Sie sind somit die kleinsten bekannten röhrenförmigen Gebilde. Vom Aufbau her unterscheidet man zwei Arten: Multiwall- und Singlewall-Nanotubes. Wie der Name schon sagt, bestehen die Wände der Multiwall-Nanotubes aus mehreren Schichten, während die Singlewall-Nanotubes nur eine Wand haben. Einwandige Nanoröhrchen können, je nach Richtung des Aufrollvektors, entweder elektrisch leitfähig sein oder Halbleitereigenschaften besitzen.
Insbesondere die Singlewall-Nanotubes haben uns bei unserer Jugend-forscht-Arbeit fasziniert, da es hier sehr weitreichende Verwendungsmöglichkeiten gibt. Bisher wurden zwar nur in wenigen Bereichen praktische Anwendungen realisiert, aber vieles deutet auf eine Revolution in der Materialforschung hin. So sind die Röhrchen, da sie technisch eindimensional sind, quasi ballistische Leiter und leiten sowohl Strom als auch Wärme ideal. Ein weiterer interessanter Punkt ist ihre hohe Stabilität bei geringem Gewicht. Verglichen mit Stahl wiegen sie nur 1/6 und sind ca. 500mal zugfester. Dabei richten sie sich sogar nach einer Verbiegung von 120° wieder in ihre ursprüngliche Position und „heilen“ kleinere Schäden in ihrem Gefüge selbst.
Zurzeit versuchen Forscher dieses neue Wundermaterial in Geräte zu integrieren. Dies wird wahrscheinlich als erstes in LCD-Displays, wo die Feldemitter ersetzt werden, passieren. Große Firmen wie IBM arbeiten im Moment daran ganze Stromkreise aus Nanoröhrchen zu bauen und wollen es so schaffen, die fast ausgereizte Silizium-Technologie zu ersetzen. So hat Infineon vor kurzer Zeit den ersten Prototypen eines leistungsfähigen Transistors vorgestellt. Andere Institute setzen aus Nanoröhrchen so genannte „Bucky Papers“ zusammen, die sich durch zufügen von Elektronen strecken, und bauen mit ihnen neuartige „künstliche Muskeln“ (Aktuatoren). Doch auch andere Ideen, wie z.B. neuartige Detektoren für verschieden Gase scheinen mit Nanoröhrchen realisierbar zu sein.
Gründe, um dieses aktuelle Thema im Chemieunterricht aufzugreifen, gibt es also mehr als genug. Doch welche Experimente kann man hierzu mit schulischen Mitteln machen?

Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten Kohlenstoffnanoröhrchen herzustellen. Die drei wichtigsten Methoden sind:
Die Laser-Methode: Bei dieser Methode wird ein Graphitblock unter Schutzgasatmosphäre mit einem starken Laser beschossen. Der hierbei abgelöste Kohlenstoff kann sich zu Nanoröhrchen formen. Da für diese Methode jedoch ein starker, normalerweise nicht an einer Schule zur Verfügung stehender Laser benötigt wird, ist diese Methode für den Unterricht gänzlich ungeeignet.
Die CVD-Methode: Ein Substrat, beispielsweise ein Siliziumstück, wird mit einem Katalysator wie Eisen, Nickel oder Cobalt präpariert und in einen Ofen gelegt. In diesen Ofen wird ein kohlenstoffhaltiges Gas (Acetylen) geleitet und bei 800°C zersetzt. An den einzelnen Katalysatorpartikeln auf der Oberfläche des Siliziums kann sich der freigesetzte Kohlenstoff ansetzen und zu Nanoröhrchen formen. Aufgrund der Explosionsgefahr des Gases Acetylen ist aber auch diese Methode nicht für den Schulunterricht geeignet.

Versuch 34: Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen (2 von 7)

Die Lichtbogen-Methode: Diese Methode hat sich für uns und den normalen Schulunterricht als am geeignetsten erwiesen.
Hierbei wird mit zwei Graphitstäben ein Lichtbogen erzeugt. In ihm wird aufgrund der hohen Temperatur der Kohlenstoff atomisiert. Damit sich die Kohlenstoffatome miteinander verbinden und so Nanoröhrchen formen können, muss man mit Hilfe von Gasen wie Helium oder Argon eine Schutzgasatmosphäre erzeugen. Ohne dieses Schutzgas würde der Kohlenstoff sofort zu CO_2 oxidieren und es könnten sich keine Röhrchen bilden.
Um nun Singlewall-Nanotubes herzustellen, muss ein Katalysator in die Reaktion mit eingebracht werden. Hierzu verwendeten wir ein Gemisch aus Nickel-, Yttrium- und Kohlenstoffpulver im Gewichtsverhältnis 1:1:1. Diese Stoffe sowie die benötigten reinen Graphitstäbe (99,999...%) sind im Chemikalienfachhandel erhältlich. Die Graphitstäbe sollten einen Durchmesser von 6 mm haben, sodass man mit einem Bohrer (Durchmesser: 1,7 mm) entlang der Längsachse hinein bohren kann. In das gebohrte Loch füllt man den Katalysator, wobei man diesen zwischendurch mit dem Bohrer fest in den Stab drücken muss, da er sonst herausfallen würde (Abbildung 90).

Abbildung 90 angebohrte Graphitstäbe.

Nachdem wir die Graphitstäbe entsprechend präpariert hatten, machten wir uns an den Bau der Lichtbogenkammer. Hierzu stand uns ein ausrangiertes Stahlrohr von der Universität Bonn zur Verfügung. Für dieses fertigten wir auf der Drehbank für jede Seite eine 4 mm dicken Aluminiumplatte (Abbildung 91, (1)). Die Nachführung der Graphitstäbe zur Aufrechterhaltung des Lichtbogens musste von den Aluminiumplatten elektrisch isoliert und zudem luftdicht sein. Dazu drehten wir zuerst ein 4 cm großes Loch zentral aus den Aluminiumplatten und presste einen Kunststoffzylinder (Abbildung 91,(2)) ein. In die Mitte des Zylinders bohrten wir eine Führung für die 16 mm großen Stahlstangen (Abbildung 91 (3)), an deren Spitzen die Graphitelektroden (Abbildung 91, (4)) befestigt werden können. Zum Abdichten wurde jetzt in eine eingefräste Nut noch ein O-Ring (Abbildung 91,(5)) eingesetzt und die Konstruktion mit einer Aluminiumplatte (Abbildung 91, (6)) zusammengepresst.
Die vordere und die obere Öffnung schlossen wir mit einer stabilen feuerfesten Glasscheibe, so dass wir während der Experimente in unsere Kammer schauen konnten. Als Anschlüsse für das Schutzgas und die Vakuumpumpe benutzten wir die an der Kammer vorhandenen Stutzen.
Ein großes Problem war die Hitzeentwicklung, die sowohl das Vakuumfett als auch die Gummidichtungen schmelzen lies. Aus diesem Grund mussten wir die Kammer kühlen. Die Kühlung realisierten wir über ein Kupferrohr, welches wir um die Kammer wickelten und an die Wasserleitung anschlossen (Abbildung 92). Während der Experimente konnten wir jetzt Kühlwasser an der Kammer vorbei leiten. Zur Erzeugung des Lichtbogens benutzten wir ein Schweißgerät.

Versuch 34: Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen (3 von 7)

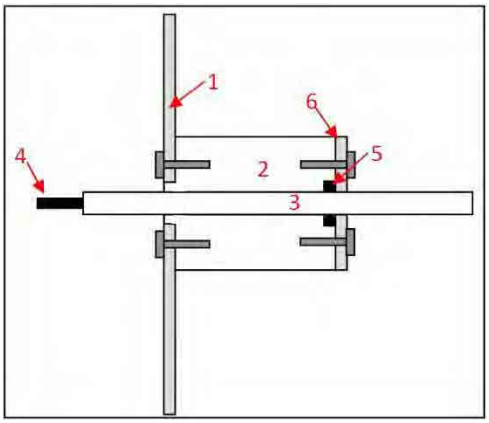


Abbildung 91 Skizze der Lichtbogenkammer. (Legende: siehe Text)

Abbildung 92 Selbstgebaute Lichtbogenkammer.

Falls man jedoch keine Kammer bauen möchte, so kann man auch auf ganz einfache Weise einwandige Kohlenstoffnanoröhrchen im Schulunterricht herstellen. Man stellt einen Blecheimer mit der Öffnung nach unten auf und flutet den Eimer mit Helium, während man die mit den Katalysatoren gefüllte Graphitstäbe mit einem Schweißgerät im Eimer verdampft (Abbildung 93).

Abbildung 93 Einfacher Aufbau zur Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen in der Schule.

Versuch 34: Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen (4 von 7)

Dabei bilden sich ebenfalls Nanoröhrchen in Form von schwarzen Spinnenweben, welche sich im Eimer absetzen. Natürlich ist die quantitative Ausbeute nicht so hoch wie in den oben beschriebenen Lichtbogenkammern, jedoch ist es möglich, genügend Nanoröhrchen für einen experimentellen Nachweis herzustellen.

Vorsichtsmaßnahmen

Schweißerschutzbrille tragen!

Nach jedem Brennvorgang sollte man einige Zeit warten, bis sich die Kammer abgekühlt hat und sich das schwarze Nanoröhrchengewebe abgesetzt hat. Bei der Entnahme der Proben sollte man eine Atemschutzmaske tragen und den Raum gut lüften. Zwar sind die entstehenden Nanoröhrchen fest mit dem Ruß im Kohlenstoffgewebe verbunden, jedoch kann man beim Umgang mit Nanopartikeln nie vorsichtig genug sein.

Nachweis von einwandigen Kohlenstoffnanoröhrchen

Das größte Problem bei der Herstellung von Nanoröhrchen ist, dass man diese mit einfachen schulischen Mitteln nicht sichtbar machen kann. Dazu benötigt man hochauflösende Elektronenmikroskope. Am Institut für Halbleitertechnik der RWTH Aachen stand uns ein Rasterelektronenmikroskop (REM) zur Verfügung. Mit ihm gelang der Nachweis, dass es sich bei den Proben, die wir in unserer Lichtbogenkammer hergestellt hatten, um Kohlenstoffnanoröhrchen handelte. Auf der Abbildung 94 sieht man deutlich neben Verunreinigungen lange Fäden, welche aus Bündeln unserer Nanoröhrchen bestehen.
Den Beweis, dass wir wirklich einwandige Kohlenstoffnanoröhrchen hergestellt haben lieferte uns freundlicherweise das Institut für Anorganische Chemie und Anorganische Materialforschung der Universität Bonn. Anhand der hier erstellten transmissionselektronenmikroskopischen Aufnahmen (TEM-Aufnahmen) konnten wir erkennen, dass die „Spaghetti´s“ auf den REM-Aufnahmen (Abbildung 94) Bündel aus Singlewall-Nanotubes sind (Abbildung 95). Auch einzelne Kohlenstoffnanoröhrchen mit einem Durchmesser von nur 1,4 nm zeigten sich auf den TEM-Aufnahmen.

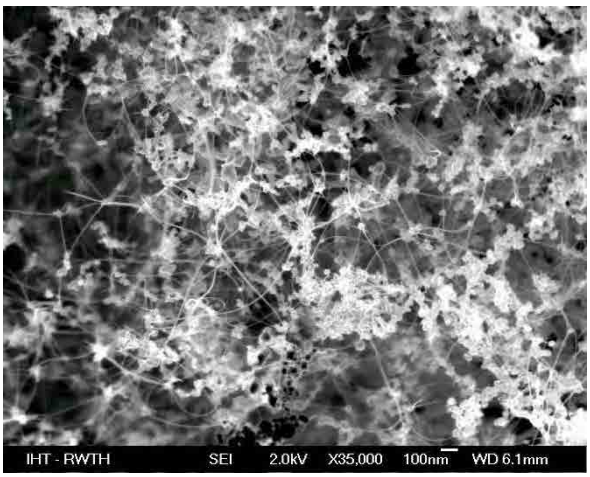


Abbildung 94 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Kohlenstoffnanoröhrchen.

Versuch 34: Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen (5 von 7)

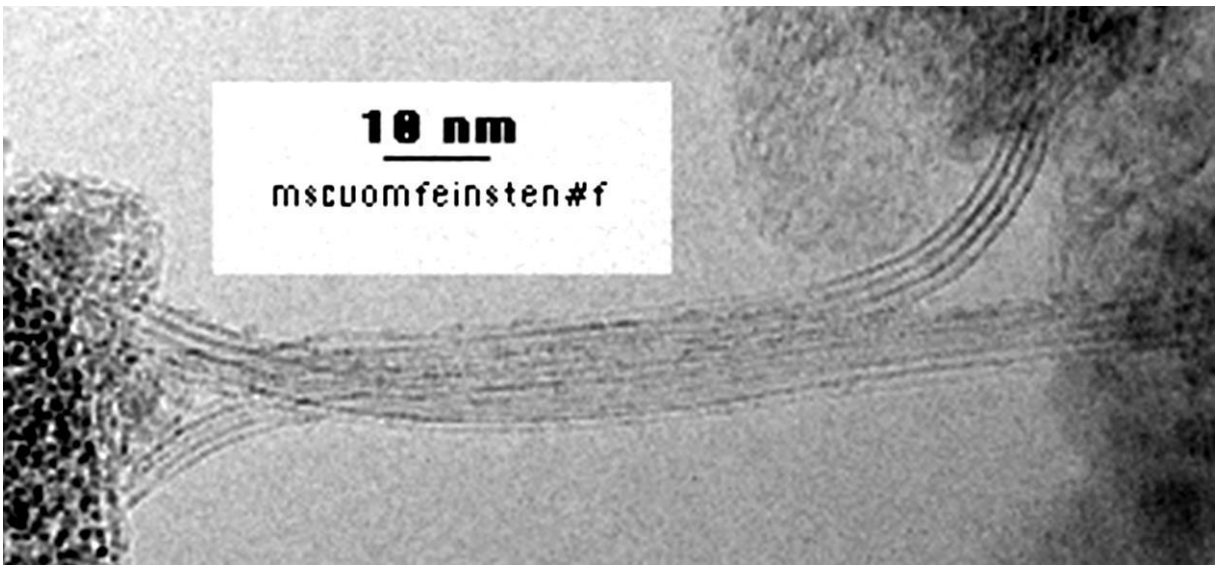


Abbildung 95 Nachweis der Singlewall-Nanotubes durch TEM-Aufnahme

Mit den REM- bzw. TEM-Aufnahmen hatten wir nun den Beweis erbracht, wirklich einwandige Kohlenstoffnanoröhrchen hergestellt zu haben. Da aber nicht jede Schule die Möglichkeit hat, solche Aufnahmen machen zu lassen, suchten wir nach einer Methode für einen indirekten Nachweis der Nanoröhrchen mit schulischen Mitteln.

Abbildung 96 Versuchsaufbau zur Herstellung von Bucky-Paper

Abbildung 97 selbsthergestelltes Bucky-Paper

Versuch 34: Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen (6 von 7)

Hierzu gibt es einmal die Möglichkeit ein sogenanntes „Bucky- Paper“ herzustellen. Dieses Paper sollte im Idealfall aus reinen Nanoröhrchen bestehen, die miteinander verfilzen und so im Gegensatz zu normalem Kohlenstoff ein festes Papier bilden. Das aus der Lichtbogenkammer gewonnene Nanoröhrchenmaterial gaben wir in eine 2%-igen Seifenlösung (einfaches Spülmittel) und versuchten die Nanoröhrchen im Ultraschallbad zu lösen. Anschließend saugten wir das Gemisch mit einer Wasserstrahlpumpe durch einen sehr feinen Filter (Porengröße: 0,5µm) (Abbildung 96). Unser so hergestelltes Bucky-Paper konnte uns aber von seiner Festigkeit her nicht wirklich überzeugen (Abbildung 97). Inzwischen wissen wir, dass die Herauslösung der Nanoröhrchen aus dem Kohlenstoffgewebe viel komplizierter ist, als wir es uns gedacht haben.

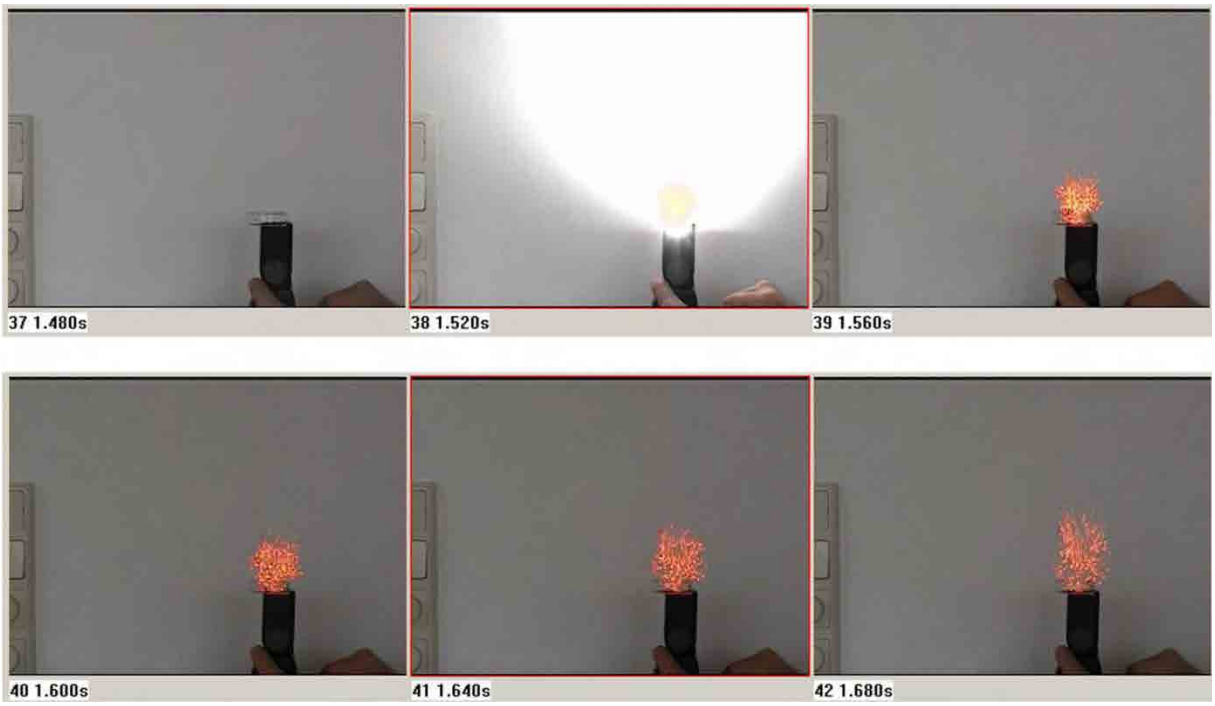


Abbildung 98 Selbstentzündung der Singlewall-Nanotubes nach Belichtung mit Blitz

Aus diesem Grund wandten wir uns einem einfachen, dafür aber auch viel spektakulärerem Versuch zu: Das gewonnene Material wird auf einen normalen Teller gelegt und mit Hilfe eines einfachen, aber ausreichend starkem Kamerablitzes angeblitzt. Man sollte annehmen, dass nun nichts geschieht, denn durch einen Kamerablitz entsteht normalerweise nur eine geringe Hitze, die – wie man experimentell leicht zeigen kann - Kohlenstoffpulver nicht entzünden kann. Einwandige Kohlenstoffnanoröhrchen entzünden sich jedoch explosionsartig (Abbildung 98).
Singlewall-Nanotubes besitzen eine so hohe Wärmeleitfähigkeit, dass sich die Energie in ihnen sofort ausbreiten kann. Die Röhrchen werden durch diese Energie aufgerissen, sodass Sauerstoff von außen an den Kohlenstoffatomen angreifen kann. Die Nanoröhrchen verbrennen unter Bildung von CO_2. Fullerene sowie mehrwandige Kohlenstoffnanoröhrchen können auf diese Weise nicht entzündet werden.
Wir hoffen, mit unserem Beitrag einen Weg aufgezeigt zu haben, wie man in der Schule einwandige Kohlenstoffnanoröhrchen experimentell erzeugen und nachweisen kann.

Versuch 34: Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen (7 von 7)

Literatur

Ajayan et al., Nanotubes in a Flash - Ignition and Reconstruction, Science 2002 296: 705
Dresselhaus, Mildred S.; Dresselhaus, Gene; Avouris, Phaedon (Eds.)
Carbon Nanotubes – Synthesis, Structure, Properties and Applications Springer-Verlag, Berlin 2001
The Wondrous World of Carbon Nanotubes
(http://students.chem.tue.nl/ifp03/Wondrous%20World%20of%20Carbon%20Nanotubes_Final.pdf)

Sicherheit

Nanopartikel sollten weder durch Inhalation noch durch Hautkontakt in den Körper gelangen. Aus diesem Grund dürfen die hier genannten Experimente nur in Absprache mit dem Sicherheitsbeauftragten der Schule und unter Beachtung der aktuellen Gefahrstoffverordnung durchgeführt werden. Der Autor bzw. die Autoren übernehmen keine Haftung für den unsachgemäßen Umgang mit Nanomaterialien und deren Folgen.

Hinweis

Diese Versuchsanleitung ist aus einer Jugend forscht Arbeit am St. Michael-Gymnasium in Bad Münstereifel entstanden. Weitere Informationen finden Sie unter Kapitel 14.

9. Kapitel: Nanotechnologie im Alltag

Autoren

Kapiteleinleitung
Dr. Lorenz Kampschulte, Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Kiel

Versuchsanleitungen
StD Michael Funke, Gymnasium Zum Altenforst, Troisdorf
PD Dr. Stefan Thalhammer, Universität Augsburg

Nanotechnologie im Alltag

von Dr. Lorenz Kampschulte

Die Nanotechnologie hat heute schon in viele Bereiche unseres Alltagslebens Einzug gehalten, oft ohne dass wir davon besonders Notiz genommen hätten. Im Vergleich zu den großen Visionen, die die Nanotechnologie beflügeln, sind diese Anwendungen oft noch relativ einfach. Ein Blick in die Forschungslabore zeigt aber, dass die Komplexität der Anwendungen in der näheren Zukunft deutlich zunehmen wird.

Was Nanoprodukte betrifft, wird man in der Welt der Werbung und Produktpräsentationen mit einigen interessanten Phänomenen konfrontiert:

1) „Nano“ als Trendwort: Die Vorsilbe „Nano“ erfreut sich in Marketingkreisen großer Beliebtheit, „Nano“ signalisiert Fortschritt und ein hohes Innovationspotential. Das führt leider auch dazu, dass viele Produkte mit „Nano“ beworben werden, in denen eigentlich gar keine Nanotechnologie enthalten ist.

2) „Nano“ als Gefahrensignal: Umgekehrt fürchten einige Unternehmen, dass das Wort „Nano“ auf einem Produkt beim Nutzer Sicherheitsbedenken hervorrufen könnte. Sie lassen es deshalb lieber weg, obwohl tatsächlich Nanotechnologie im Spiel ist.

3) „Nano“ für alles: Der Begriff „Nano“ ist nur eine Größendimension und nicht geschützt. Einzig für die Bereiche Lebensmittel und Kosmetik gibt es seit 2013 eine EU-weite Verordnung, nach der alle dort eingesetzten Nanomaterialien geprüft und auf der Verpackung aufgeführt sein müssen.

Insgesamt gibt es zurzeit am Markt weit über tausend verschiedene Nanoprodukte, aus ganz unterschiedlichen Bereichen. Wesentliche Einsatzgebiete und Funktionsprinzipien werden im Folgenden beispielhaft aufgezeigt.

Abbildung 99: Nanotechnologie wird schon heute in einer Vielzahl von Produkten eingesetzt um deren Eigenschaften zu verbessern.

Haushalt und Freizeit

Eines der zentralen Themen im Bereich Haushalt und Freizeit sind selbstreinigende oder leicht zu reinigende (sog. Easy-to-Clean) Oberflächen. Bei den selbstreinigenden Oberflächen handelt es sich meist um Beschichtungen, die der Lotus-Pflanze nachempfunden sind, d.h. sie besitzen auf der Funktionsfläche eine Kombination aus einer Mikro- und einer Nanostrukturierung, die schmutz- und wasserabweisend wirkt (Verweis 4. Kapitel: NANOTECHNOLOGIE UND BIOLOGIE Autoren: Prof. Dr. Wilhelm Barthlott (Seite 78)). Der Effekt bietet sich für alle Oberflächen an, die regelmäßig mit Wasser in Kontakt kommen, wie z.B. Fassaden, Dachziegel und Markisen. Da die technische Umsetzung des Lotus-Effekts patentiert und der Begriff eine geschützte Markenbezeichnung ist, tragen nur sehr wenige Produkte tatsächlich diesen Namen. Es gibt aber eine Vielzahl von Anwendungen, die sehr ähnlich funktionieren und mit einer rauen, meist wasserabweisenden Oberfläche ausgestattet sind. Zum Beispiel bei Outdoorbekleidung sorgen diese Oberflächen dafür, dass Wasser und Schmutz besser abperlen.
Easy-to-Clean-Oberflächen hingegen sind meist ultradünne Glasschichten, die aus polymerisierten Siliziumdioxid-Molekülen bestehen. Durch Selbstorganisation werden diese untereinander vernetzt und richten sich geometrisch aus. Die Herstellung der unter 100 nm dünnen, glasähnlichen Schichten basiert auf den Grundlagen des nass-chemischen Sol-Gel-Prozesses. Die transparenten Schichten weisen eine Vielzahl von Funktionalitäten auf. So sind sie z.B. schmutzabweisend und lassen sich besonders leicht reinigen („Easy-to-Clean“), bieten eine erhöhte Kratzfestigkeit und schützen vor Feuchtigkeit und Korrosion. Sie wirken antibakteriell und bieten Schutz gegen die meisten Säuren und Laugen. Auch einige Anti-Graffiti-Farben verdanken ihre Funktion ultradünnen Glasschichten, ebenso wie Anti-Fingerprint-Beschichtungen an Edelstahl-Oberflächen bei Küchengeräten oder Wasserhähnen.

Dem Edelmetall Silber wurde bereits in der Antike eine schützende Wirkung zugesprochen. Mit dem Siegeszug der Antibiotika im Kampf gegen krankheitserregende Bakterien geriet Silber zunächst in Vergessenheit. Seit einigen Jahren wird es durch die erhöhte Antibiotikaresistenz vieler Erreger aber wieder zur Vorbeugung von Infektionen eingesetzt. Silber bietet Schutz gegen ein breites Spektrum unterschiedlicher Bakterien, Pilze und anderer Krankheitserreger, da die vom Silber abgegebenen Ionen wichtige Funktionen der Mikroorganismen stören und Bakterien angreifen. Die Wirkung basiert hauptsächlich auf drei Mechanismen: 1) Enzyme werden blockiert und damit lebensnotwendige Transportfunktionen unterbunden, 2) die Zellstrukturfestigkeit wird beeinträchtigt, 3) die Membranstruktur wird geschädigt.
Durch den Einsatz nanoskaliger Silberpartikel ist es möglich diese Schutzfunktionen in bestehende Werkstoffe zu integrieren ohne die mechanischen Eigenschaften des Materials zu verändern. Die Nanopartikel wirken wie ein Depot und können über die gesamte Produktlebensdauer kontinuierlich Silberionen abgeben. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von Anwendungen, von Brotzeitdosen und Kühlschränken über Pflaster, chirurgisches Besteck und Katheter bis hin zu Schutzanzügen für Einsatzkräfte in Katastrophengebieten.
Einen völlig anderen Ansatz, der aber ähnliche Wirkung verspricht, verfolgt eine amerikanische Firma: Sie spinnt Bambuskohle-Nanopartikel in Textilfäden mit ein. Bambuskohle-Nanopartikel sind kleine schwammartige Strukturen, die hauptsächlich aus Kohlenstoff bestehen. Sie wirken ähnlich wie Aktivkohle durch eine extrem große Oberfläche und die katalytische Wirkung des Kohlenstoffs. Durch die Einlagerung der Nanopartikel wird das Gewebe antibakteriell und fungizid. Feuchtigkeit wird von den porösen Partikeln absorbiert und Gerüche verursachende Moleküle werden zersetzt. Außerdem wird das Gewebe durch die elektrische Leitfähigkeit der Nanopartikel antistatisch.

Kosmetik und Medizin

In fast allen modernen Sonnencremes mit höherem Lichtschutzfaktor werden heute Titandioxid- oder Zinkoxid-Nanopartikel als UV-Filter eingesetzt. Sie machen sich die besonderen physikalischen Eigenschaften zu Nutze, die sich durch die geringe Größe der Nanopartikel ergeben. So absorbiert Titandioxid in Form von Nanopartikeln ultraviolette Strahlung und ist zudem völlig farblos und damit

unsichtbar auf der Haut. Auch in textilen Fasern wird nanoskaliges Titandioxid eingesetzt, um gerade bei leichter, luftiger Kleidung einen besseren UV-Schutz zu erreichen. In Make-Up werden nanoskalige Titandioxid- und Glimmer-Partikel eingesetzt, um mehr Haut-Teint durchscheinen zu lassen und so eine natürlichere Wirkung des Make-Ups zu erzielen.
Bei einigen Zahncremes sind in der Formulierung Hydroxylapatit-Nanopartikel enthalten, die kleine Kanäle am Zahnfuß verschließen und so die Schmerzempfindlichkeit reduzieren sollen. Hydroxylapatit ist den mineralischen Bestandteilen der Zähne und Knochen sehr ähnlich und wird daher auch eingesetzt, um ein besseres Einwachsen von Implantaten zu ermöglichen.
Ein neu entwickeltes, vielversprechendes Verfahren für die Tumortherapie basiert auf magnetischen Nanopartikeln. Bringt man diese Eisenoxid-Partikel in das Tumorgewebe ein, und setzt den Tumorpatienten anschließend einem magnetisches Wechselfeld aus, bewegen sich die Partikel durch das externe Feld und erzeugen dadurch Reibungswärme im Gewebe, wodurch der Tumor abstirbt.

Abbildung 100: Eine amerikanische Firma stellt aus Bambusholzkohle Nanopartikel her, die in Stofffasern eingesponnen werden. Sie wirken antibakteriell und lassen sich zum Beispiel zu Socken verarbeiten.

Bau und Industrie

Einige interessante Anwendungen der Nanotechnologie finden sich auch in der Bauindustrie. Mischt man normalem Zement Nanopartikel aus Siliziumdioxid zu, kann man daraus „ultrahochfesten“ Beton herstellen. Durch die Mischung mit Wasser reagieren die Siliziumdioxid-Partikel mit dem Calciumhydroxid, das der Zement während des Abbindens freisetzt. Dies wiederum verdichtet die schon vorhandene Struktur des Zementgefüges und führt zu einer deutlich höheren Festigkeit. Auch bei Mörteln und Fliesenklebern lassen sich durch gezielte Zugabe von Nanopartikeln die Abbindevorgänge im Material beeinflussen und so besondere Eigenschaften sowohl bei der Verarbeitung als auch beim ausgehärteten Endprodukt erzielen.

Ein weiteres Einsatzgebiet von Nanopartikeln aus Siliziumdioxid sind besonders kratzfeste Lacke. Dabei werden die Partikel direkt in den Lack eingerührt und gemeinsam appliziert. Nach dem Aushärten reduzieren die winzig kleinen, harten Glaspartikel die Empfindlichkeit gegen Kratzen und Abrieb deutlich, ohne den Lack wesentlich spröder zu machen. Zudem kann man durch die Zugabe der Nanopartikel die Fließeigenschaften beim Lackauftrag einstellen.
Ein anderes Beispiel für Nano-Kompositwerkstoffe sind modifizierte Kohlefaser-Bauteile, wie sie z.B. bei Fahrradrahmen, Hockey- und Tennisschlägern zum Einsatz kommen. Kohlefaserwerkstoffe sind im Allgemeinen sehr leicht und extrem stabil, brechen aber gerade bei stoßartigen Belastungen leicht. Um das zu verhindern, bringt man Kohlenstoff-Nanoröhrchen in die Matrix aus Kohlefasern und Epoxidkleber mit ein. Sie bauen sich beim Aushärten zwischen die Kohlefasern ein und sorgen so für eine Quervernetzung zwischen den einzelnen Fasern. Eine finnische Firma hat es so geschafft, die Schlagfestigkeit bei Hockeyschlägern um 60-70% erhöhen.
Einen anderen Ansatz verfolgt ein österreichischer Skihersteller: Durch die Einlagerung von Siliziumdioxid-Nanopartikeln in die Kohlefaser-Matrix wird diese elastischer und der Ski kann sich damit dynamischer verformen.
Der Modifizierung von Kunststoffen mit Nanomaterialien sind fast keine Grenzen gesetzt: So kann man zum Beispiel Kohlenstoff-Nanoröhrchen oder Fullerene einsetzen um Kunststoffe leitfähig zu machen, oder natürliche Schichtsilikate in Nanometergröße (Tonerden, Nano-Clay) um Elektrokabel mit einer erhöhten Flammschutz auszurüsten. Im Brandfall bildet sich eine nicht brennbare Kruste aus Kunststoff und Schichtsilikaten, die das Abtropfen des Kunststoffs und damit eine Ausweitung des Brandes verhindert. Schichtsilikate werden auch eingesetzt um Getränkeflaschen aus Kunststoff gasdichter zu machen, so dass die Kohlensäure und andere Inhaltsstoffe nicht so leicht entweichen können.

Energie und Umwelt

Im Bereich der regenerativen Energien und der Umwelttechnologie werden große Erwartungen an die Nanotechnologie gestellt. Hauptziel ist dabei, den Wirkungsgrad bestehender Systeme zu verbessern. So werden zum Beispiel auf Solarzellen mikro- und nanostrukturierte Oberflächen aufgebracht um die Reflexion am Deckglas der Solarzellen zu reduzieren und damit die Lichtausbeute zu steigern. Nebenbei sorgen diese Strukturen – ähnlich dem Lotus-Effekt – für eine Selbstreinigung der Glasoberfläche durch Regen. Aber auch ein völlig neuartiger Solarzellentyp befindet sich in der Entwicklung: die Farbstoffsolarzelle (Verweis Kapitel Nanoelektronik, Grätzelzelle). Sie beruht auf der Einbettung von Farbstoffen und Titandioxid-Nanopartikeln in eine Elektrolytmatrix und ahmt die Photosynthese nach. Im Gegensatz zu den klassischen siliziumbasierten Solarzellen ist sie deutlich kostengünstiger herzustellen.
Auch das Thema Elektromobilität kommt um die Nanotechnologie nicht herum. In modernen Lithium-Ionen-Akkus kommen nanostrukturierte Elektroden zum Einsatz. Das Hauptproblem bei Akkumulatoren ist im Allgemeinen, dass durch den zum schnellen Laden nötigen Strom an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Speichermaterial Wärme entsteht, die das Speichermaterial der Zelle degeneriert. Dadurch sinkt die Kapazität nach wenigen hundert Ladevorgängen deutlich ab. Vergrößert man die Elektrodenoberfläche durch Nanopartikel (und hier ist durchaus eine Verhundertfachung möglich), steht mehr Fläche für die Einleitung von Strom zur Verfügung und das Speichermaterial wird geschont. Somit können die Akkus schneller geladen werden und haben gleichzeitig eine höhere Lebensdauer. Auch im Bereich der Brennstoffzellen spielen die Membranoberflächen und Durchlässigkeit eine entscheidende Rolle, auch hier wird mit verschiedenen Nanomaterialien experimentiert.
Im Bereich der Umwelttechnik kommen neben besonders reaktiven, nanostrukturierten Katalysatoren vor allem Filtersysteme mit elektrogesponnenen Nanofasern zum Einsatz.

Elektronik

Typische Strukturen auf Mikrochips, wie Prozessoren oder Speicherbausteine, bewegen sich heute in der Größenordnung von etwa 10 nm. Damit ist die Halbleitertechnologie auch schon im Bereich der Nanotechnologie angekommen, auch wenn die Verfahren, die genutzt werden, im Wesentlichen denen

der vorhergehenden Chipgenerationen mit Strukturbreiten >100 nm entsprechen. In einigen Hochleistungschips werden auch Schichten aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen eingesetzt, um die unterschiedlichen Ebenen der Chips zu verbinden.
Eine andere Anwendung dieser Röhrchen liegt im Bereich der Sensorik: Man bringt eine dünne Schicht von Kohlenstoff-Nanoröhrchen auf einen isolierten Chip auf. Anschließend modifiziert man chemisch die Oberfläche der Röhrchen. Lagern sich nun an die Oberfläche spezifisch zur chemischen Modifikation bestimmte Moleküle an, so ändert sich die Leitfähigkeit der Röhrchen. So kann man zum Beispiel den Wasserstoff- oder Kohlendioxid-Gehalt von Luft messen, oder auch den Glucose-Gehalt von Flüssigkeiten.

Risiken?

Wenn man über Alltagsanwendungen der Nanotechnologie spricht, muss man sich zwangsweise mit der Risikodiskussion auseinander setzen. In der Nanotechnologie stecken definitiv unzählige Chancen, nicht nur unser Leben zu vereinfachen und unsere Gesundheit zu erhalten, sondern vor allem auch den Klimawandel an vielen verschiedenen Stellen einzubremsen oder gar aufzuhalten. Auf der anderen Seite birgt die Nanotechnologie aber auch eine Reihe von Risiken, an denen intensiv geforscht wird, die in ihrer Gänze aber schwer zu überschauen sind. Solange die Technologie noch in den Labors steckt, ist das Risiko bei der Nanotechnologie relativ gering, da normalerweise Fachleute damit befasst sind, die sich damit auskennen. Sobald ein Nanoprodukt aber frei am Markt verkäuflich ist, ist es in den Händen von Normalanwendern ohne besondere Schulung oder gar Ausbildung, zudem ist es hunderttausendfach vorhanden, und das an vielen verschiedenen Orten. Hier steigt natürlicherweise das Risikopotential gewaltig an. Umso wichtiger ist es, sinnvolle gesetzliche Rahmenbedingungen zu schaffen, die Hersteller und den Vertrieb mit einzubinden, gleichzeitig aber auch beim Verbraucher durch breite Information ein gewisses Bewusstsein für die Risiken zu schaffen.
Nanoprodukte können hinsichtlich ihres Risikopotentials ganz unterschiedlich sein: Ein Tennisschläger, bei dem die Kohlenstoff-Nanoröhrchen fest in die Kohlefaser-Matrix eingeklebt sind, ist sicher ganz anders zu bewerten als ein desinfizierender Weichspüler, bei dem Silber-Nanopartikel dafür sorgen sollen, dass die Wäsche nach dem Waschgang keimarm ist. Letztendlich kann man keine generelle Aussage zum Gefährdungspotential von Nano-Produkten treffen, sondern muss für jedes Produkt das Risiko einzeln bewerten, was es für den Verbraucher schwierig macht. Ganz generell kann man sagen, dass alle Produkte, bei denen die Nanopartikel stabil in eine Matrix eingebaut oder fest mit einer Oberfläche verbunden sind, als relativ unbedenklich eingestuft werden können.
Eines der großen deutschen Forschungsprojekte zu den Risiken der Nanotechnologie, das Projekt DaNa 2.0 (www.nanopartikel.info) beschäftigt sich intensiv mit der systematischen Erforschung der Risiken der gebräuchlichsten Nanopartikel und der anschaulichen Darstellung der Forschungsergebnisse für interessierte Verbraucher. Aber auch ein solches Projekt kann nur einen Teil der Risiken analysieren, gerade in einem so rasant wachsenden Technologiefeld wie der Nanotechnologie.

Einführung: Easy-to-clean-Beschichtungen

Einführung: 5 Minuten Nanotechnologie

Wassertropfen perlen praktisch rückstandsfrei von Brillengläsern mit Antihaftbeschichtung auf Alkylsilanbasis ab. Solche hydrophoben (wasserabweisenden) Beschichtungen werden auch in vielen anderen Bereichen angewendet (z.B. Keramikversiegelung, Textilimprägnierung).

Die physikalische Ursache des hydrophilen Verhaltens einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche ist das Verhältnis der **Grenzflächenspannung** von Flüssigkeit und Oberfläche. Nach Definition ist eine Oberfläche mit einem **Kontaktwinkel** kleiner als 90° hydrophil (benetzbar), bei größer als 90° hydrophob (unbenetzbar). Bei völliger Benetzung (Kontaktwinkel 0°) bildet das Wasser einen einheitlichen Film auf der Oberfläche. Theoretisch berührt ein Tropf bei einem Kontaktwinkel von 180° (der in der Natur nicht vorkommt) nur an einem Punkt die Festkörperoberfläche. Für glatte hydrophobe Oberflächen wie **Teflon**, liegt der maximale Kontaktwinkel bei 120°.

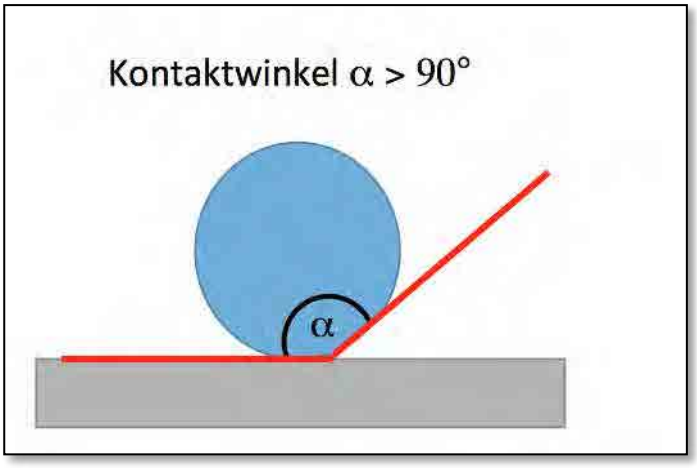


Abbildung 101 Oberflächen mit einem Kontaktwinkel größer als 90° sind hydrophob.

Technische Anwendungen

Anwendungen solcher hydrophober Schichten sind *Clean-Coat-Beschichtungen* von Brillengläsern. Dabei wird eine hauchdünne (5 bis 7 nm), optisch nicht wirksame Schicht aus Alkylsilanen auf die äußerste Glasschicht aufgedampft.
Nach dem gleichen Prinzip funktionieren Anti-Schmutz Versiegelungen. Hier wird die Alkylsilanschicht von Hand aufgetragen, es entsteht eine *easy-to-clean-Oberfläche*, welche das Anhaften von Wasser und Schmutz erheblich reduzieren soll.

Versuch 35: Herstellung einer Easy-to-clean-Beschichtung (1 von 1)

Vorbereitung

Gruppengröße: max. 4 Schülerinnen und Schüler
Bitte trage bei allen Arbeiten Kittel, Handschuhe und Schutzbrille!

Geräte pro Gruppe

- 1 Becherglas 50 ml
- Glasstab
- Pasteurpipette mit Saugball
- Glasplatte evtl. Holzstück

Chemikalien:

- Essigsäureethylester (Nitroverdünner)
- Styropor
- H_2O

Durchführung

1. Einige Styroporstücke werden in einem Becherglas mit ca. 10 ml Essigsäureethylester übergossen und mit einem Glasstab verrührt. Nach kurzer Zeit löst sich der Kunststoff im Lösemittel. Diese Arbeit bitte unter einem Abzug durchführen.
2. Mit der Lösung wird eine Glasplatte oder Holzstück bestrichen (mit der Pasteurpipette).
3. Nach dem Trocknen wird der Styroporlack auf seine Benetzbarkeit untersucht. Einige Tropfen Wasser werden zu diesem Zweck aufgetragen und es wird untersucht, ob und wie stark die Tropfen haften bleiben.

Ergebnis:

Sobald das Lösungsmittel verdampft ist, erhält man eine feste Lackschicht auf dem Glas (oder dem Holzstück).

Erklärung

Die geschäumten Polystyrolkügelchen verlieren durch die Einwirkung des organischen Lösungsmittels die eingeschlossenen Luftbläschen, es entsteht auf der Glasplatte (oder dem Holzstück) ein kompakter, hydrophober und relativ dicker Film aus kurzen Polystyrolketten.

Versuch 36: Hydrophobisierung einer Glasplatte mit Ruß (1 von 2)

Vorbereitung

Geräte
Teelichtkerze, Deckglas

Durchführung
Das Deckglas wird so über die Flamme einer Teelichtkerze gehalten, dass diese besonders stark rußt. Die gesamte Oberfläche des Deckglases wird mit einer Rußschicht überzogen.

Abbildung 102 Benötigte Materialien

Abbildung 103 Verrußen eines Objektträgers

Versuch 36: Hydrophobisierung einer Glasplatte mit Ruß (2 von 2)

Demonstration: Hydrophobisierte Oberfläche

Geräte
verrußtes Deckglas, unbehandeltes Deckglas, Pipette, Wasser, Stativ und Stativklammer

Durchführung
Das Deckglas wird in einen leicht geneigten Winkel (ca. 10-15°) horizontal in einer Stativklammer eingespannt. Nun lässt man vorsichtig – aus ca. 1-2 cm Höhe – einzelne Wassertropfen auf die verrußte Glasoberfläche tropfen. Zum Vergleich wird der gleiche Versuchsaufbau auch mit einer unbehandelten Glasplatte durchgeführt.

Abbildung 104 Wasser perlt als kugelförmiger Tropfen an der hydrophobisierten Glasoberfläche ab.

Erklärung

Glas ist besteht im Wesentlichen aus Siliciumdioxid, welches polare Bindungen ausbildet. Daher kann das Wasser mit der Glasoberfläche Dipol-Dipol-Wechselwirkungen ausbilden und bleibt damit an der Glasoberfläche haften. Dabei verliert der Wassertropfen seine kugelförmige Form und breitet sich auf der Glasoberfläche aus. Ruß besteht vor allem aus Kohlenstoff in der Graphitmodifikation. Graphit ist unpolar und kann mit den Wassermolekülen keine Dipol-Dipol-Wechselwirkung ausbilden. Aus diesem Grunde bleibt der Wassertropfen nicht an der verrußten Glasoberfläche hängen. Es sind lediglich nur sehr schwache Van-der-Waals-Wechselwirkungen zwischen den Wassermolekülen und der verrußten Glasoberfläche möglich. Die Grenzflächenspannung des Wassers ist wesentlich stärker als die sehr schwachen Van-der-Waals-Wechselwirkungen und bewirkt, dass sich ein kugelförmiger Tropfen ausbildet, der sehr leicht und schnell von der Glasoberfläche abrollt.

Versuch 37: Textilien mit hydrophober Nano-Beschichtung (1 von 1)

Materialien:

1x nanobeschichtetes Stoffstück (z.B. aus NanoBoX), fein zerriebener Gartenlehm, Ruß, Feuerzeug, Becherglas mit Wasser, Unterlage (Glas- oder Metalplatte), Holz- oder Metallklammer, Pipette

Durchführung:

1. Spanne das Stofftuch mit der Klammer auf die Glas- oder Metallplatte.
2. Gib einen Wassertropfen mit der Pipette auf den Stoff und beschreibe dessen Form und Aussehen an der Grenzfläche zwischen Stoff und Wasser sowie dessen Verhalten bei Neigen der Unterlage.
3. Gib nebeneinander eine kleine Menge Ruß und Lehm auf das Tuch und lass einen Wassertopfen darüber laufen.

Beobachtung:

Auf dem Blatt und den Stofftuch zeigt der Wassertropfen eine stark abgerundete Form, und läuft bereits bei leichter Neigung des Untergrundes ab. Zwischen Tropfen und Stoffoberfläche ist eine silbrige Schicht zu erkennen. Beim Ablaufen durch die Ruß- und Lehmproben hinterlässt der Tropfen auf beiden Oberflächen eine saubere Spur.

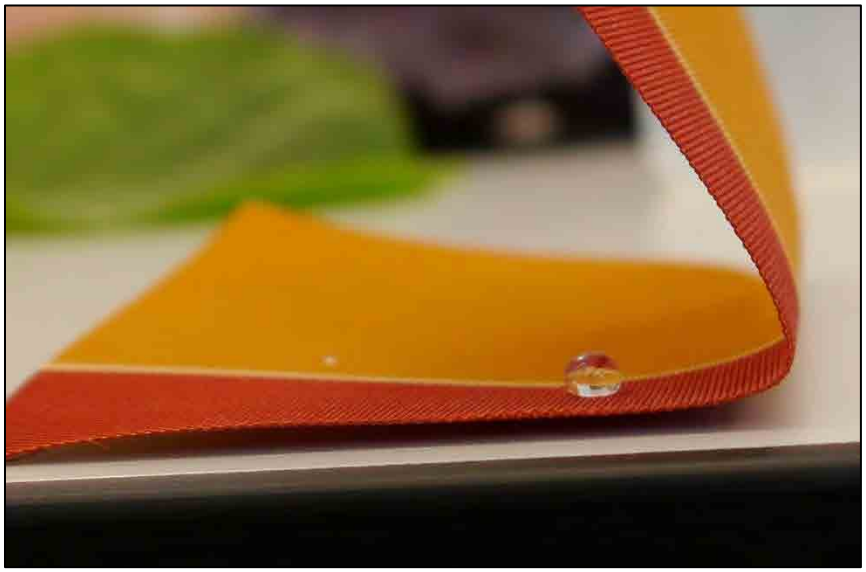


Abbildung 105 Wasser perlt als kugelförmiger Tropfen auf einem hydrophobisierten Textilstück ab.

Bezugsquellen:

Über den Fonds der Chemischen Industrie kann man die NanoBox kostenlos beziehen, die auch ein hydrophobisiertes Textilstück enthält. Siehe auch unter http://fonds.vci.de/

Versuch 38: Pflanzen mit hydrophober Nano-Beschichtung (1 von 1)

Materialien:

Blätter von Kapuzinerkresse oder Weißkohl, fein zerriebener Gartenlehm, Ruß, Feuerzeug, Becherglas mit Wasser, Unterlage (Glas- oder Metalplatte), Holz- oder Metallklammer, Pipette

Durchführung

1. Spanne das Blatt mit der Klammer auf die Glas- oder Metallplatte.
2. Gib einen Wassertropfen mit der Pipette auf das Blatt und beschreibe dessen Form und Aussehen an der Grenzfläche zwischen Stoff und Wasser sowie dessen Verhalten bei Neigen der Unterlage.
3. Gib nebeneinander eine kleine Menge Ruß und Lehm auf das Blatt und lass einen Wassertopfen darüber laufen.

Abbildung 106 Lehmpulver lässt sich rückstandslos mit Wassertropfen entfernen.

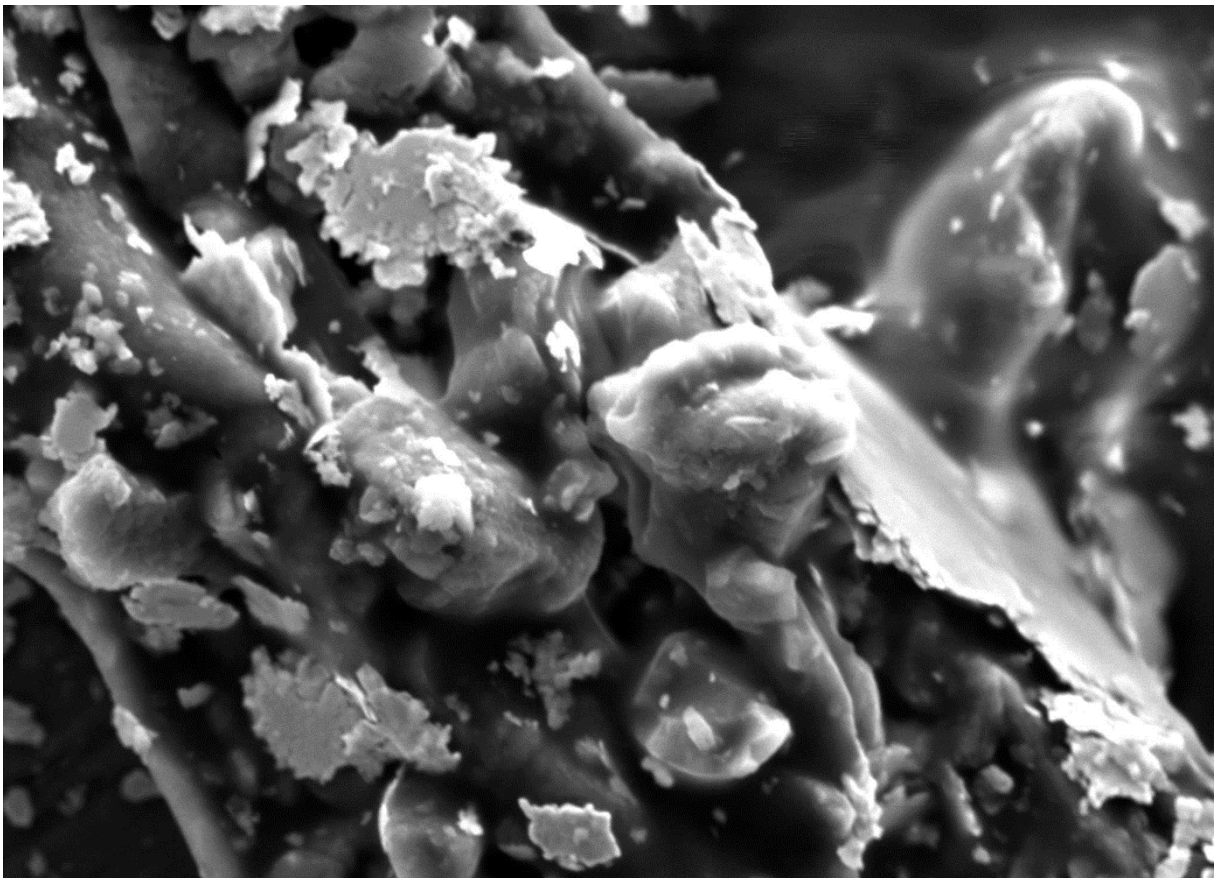
10. Kapitel: Gesundheitsrisiken durch Nanopartikel

Autoren

Kapiteleinleitung

Dr. Otmar Schmid, Institut für Lungenbiologie, Helmholtz Institut München

Dr. Tobias Stoeger, Institut für Lungenbiologie, Helmholtz Institut München



Gesundheitsrisiken der Nanotechnologie

von Dr. Otmar Schmid und Dr. Tobias Stöger

Die Nanotechnologie ist, wie jede Technologie, mit Risiken für Umwelt und Gesundheit verbunden. Ein verantwortungsbewusster Einsatz der Nanotechnologie setzte eine sorgfältige Abwägung von Risiken und Vorteilen der Technologie voraus.
Die besonderen Materialeigenschaften von nanoskaligen Objekten machen die Nanotechnologie so wertvoll. Diese besonderen Eigenschaften könnten aber auch zu bisher unbekannten Wechselwirkungen mit Mensch und Umwelt und somit zu einer Gefährdung unserer Gesundheit führen. Diese Risiken gilt es zu erforschen, zu verstehen und zu minimieren. Dies ist die Voraussetzung für einen sicheren und dauerhaft gewinnbringenden Einsatz von Nanomaterialien. Der Beitrag zeigt, welche Eigenschaften von Nanomaterialien aus toxikologischer Sicht besonders relevant sind, wo derzeit die größten Risiken für die Gesundheit gesehen werden und wie diese Risiken minimiert werden können.

Direkte und indirekte potentielle Gesundheitsgefährdungen

Eine Gesundheitsgefährdung durch Nanomaterialien kann sowohl *direkt* als auch *indirekt* entstehen. Eine *direkte* Gefährdung setzt voraus, dass es einen direkten Kontakt zwischen den Nanomaterialien und dem menschlichen Organismus gibt, während es für eine *indirekte* Gefährdung ausreicht, wenn Nanomaterialien einen oder mehrere Prozesse in der Umwelt so verändern, dass es zu schädlichen Auswirkungen für den Menschen kommen kann.

Als Beispiel für eine *indirekte* Gesundheitsgefährdung betrachten wir Nanosilber, das als antibakterielles Material heute schon in vielen Gebrauchsgegenständen, wie z.B. Textilien und Kleidung, verwendet wird. Im Laufe des Lebenszyklus dieser Gegenstände ist es denkbar, dass Nanosilber z.B. durch Abrieb oder Auswaschen freigesetzt wird und über das Abwasser in Kläranlagen gelangt. Dort könnte es Mikroorganismen, die zur Aufbereitung von Abwasser verwendet werden, schädigen, was zu Verunreinigungen im Trinkwasser und damit zu einer indirekten Gesundheitsgefährdung führen könnte. Die Erforschung der *indirekten* Gesundheitsgefährdung durch Nanomaterialen ist sehr komplex, da die unterschiedlichsten Arten von Nanomaterialien in vielfältigen Produkten vorkommen (vgl. Kapitel: Nanotechnologie im Alltag) und an fast allen Orten des Ökosystems durch Ab- und Benutzung der Produkte oder durch Unfälle freigesetzt werden könnten. Somit gibt es unendlich viele Expositionsszenarien, die untersucht werden müssten. In einem ersten Schritt wird man sich auf die am häufigsten verwendeten Materialen wie (Nano-)Silber, Kohlenstoff in verschiedenen Varianten (Ruß, Fullerene, Nanoröhrchen), sowie Titandioxid, Silica, Zinkoxid und Gold fokussieren. Diese Untersuchungen stehen derzeit noch am Anfang.
Ein direkter Kontakt zwischen Nanomaterialien und Mensch – und damit eine *direkte* Gesundheitsgefährdung - kann im Wesentlichen auf dreierlei Weise erfolgen: über die Haut, den Magen-Darm-Trakt oder die Lunge. Derzeit wird davon ausgegangen, dass das relevanteste Szenario die Inhalation und Deposition von Nanostaub in der Lunge darstellt. Die große Bedeutung der Lunge erklärt sich aus dem großen eingeatmeten Luftvolumen von etwa 25 000 Liter pro Tag und der beträchtlichen Lungenoberfläche von ca. 100 m², was in etwa der Fläche eines halben Tennisplatzes entspricht. Hinzu kommt, dass die Lungenoberfläche zu 98% aus dünnem und relativ ungeschütztem Alveolargewebe besteht (z.T. weniger als 1 µm dünn), das den effizienten Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid mit dem Blut ermöglicht. Die dünne Gewebeschranke erlaubt allerdings auch den Übertritt von Nanoobjekten ins Blut und von dort über den Blutkreislauf in andere Organe wie z.B. Leber, Niere, Herz und Gehirn. Man geht davon aus, dass der auf dem Lungengewebe deponierte Nanostaub sowohl zu einer akuten Gesundheitsgefährdung wie Herzrhythmusstörungen als auch durch langjährige Akkumulation im Gewebe zu chronischen Erkrankungen führen kann, wie z.B. fibrotischen Veränderungen in der Lunge.

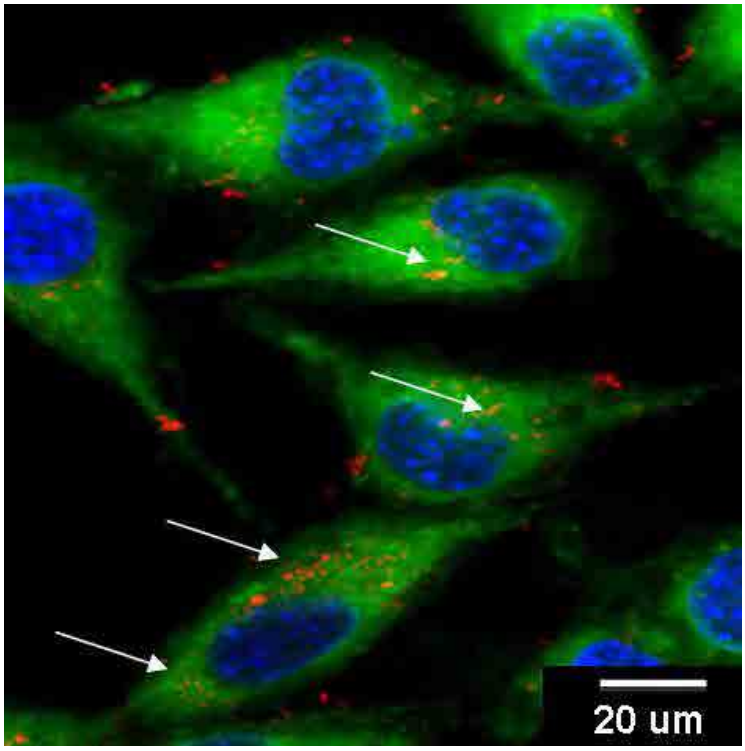


Abbildung 107 Eine konfokalmikroskopische Darstellung von Fibroblasten aus der Lunge, die durch einen Prozess, der Endozytose genannt wird, Nanopartikel aufgenommen haben (hier rot gefärbt). Die weißen Pfeile verweisen auf die Position von einigen dieser Nanopartikel. Die Zellmembran und der Zellkern wurden grün bzw. blau gefärbt. (Die Abbildung wurde von PD Dr. Stefan Thalhammer zur Verfügung gestellt)

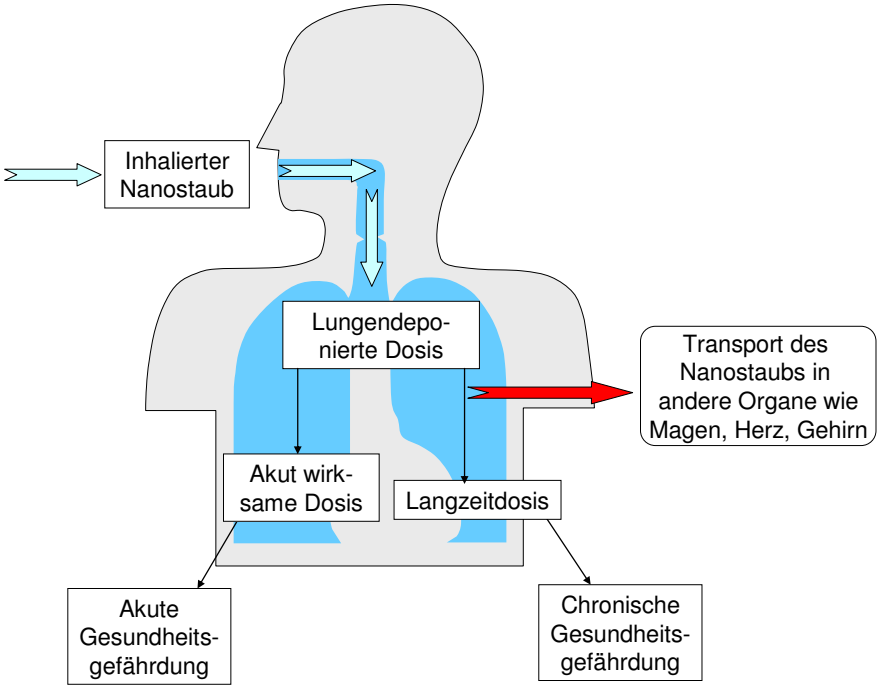


Abbildung 108 Schematische Darstellung der Gesundheitsgefährdung durch inhalierten Nanostaub.

Wie entsteht Nanostaub?

Unter Nanostaub versteht man in der Luft schwebende Teilchen (Aerosole), die eine Größe von unter ca. 100 nm in zumindest einer Dimension hat. Darunter fallen also auch sogenannte Nanofasern oder Nanoröhrchen, die einen Querschnitt von kleiner als 100 nm haben, aber einige Mikrometer lang sein können. Dabei ist zu beachten, dass diese Definition auch auf Dieselruß oder natürlich vorkommende Aerosole zutrifft. Viele der folgenden Überlegungen gelten also generell für diese Aerosole, also auch Umweltaerosole, die vielfach als *(Ultra-)Feinstaub* bezeichnet werden.

Die Freisetzung von Nanomaterialien in die Luft kann sowohl bei der Herstellung von Nanomaterialien als auch während des Umgangs mit Produkten, die Nanomaterialien enthalten, geschehen. Die Freisetzung von Nanostaub kann beispielsweise geschehen bei folgenden Prozessen:

- Herstellung, Handhabung und Verwendung von festen (z.B. Pulver), staubenden oder luftgetragenen Nanomaterialien
- abtragende maschinelle Bearbeitung von Materialien, die Nanomaterialien enthalten (z.B. spanabhebende Bearbeitung, Schleifen usw.)
- Prozesse mit Nanomaterialien, die nicht in vollständig abgeschlossen Behältern abläuft
- Schnittstellen zwischen geschlossenen und offenen Verfahrensschritten (z.B. Be- und Entladen, Probenentnahme)
- Abfallentsorgung
- Aufwirbelung von Partikeln von Oberflächen, z.B. von einem Außengehäuse von Staubsaugern, die mit Partikeln oder Fasern (Nano- und Mikrobereich) verunreinigt sind
- Reinigung, Wartung und Instandsetzung von Maschinen und Apparaten, die bei der Nanomaterialproduktion oder –handhabung verwendet werden
- Unfallereignisse mit daraus resultierender intensiver Freisetzung von Nanomaterialien

Die Größe von Nanomaterialien im Vergleich zu biologischen Strukturen

Zur Beurteilung der gesundheitlichen Risiken von Nanomaterialien ist es hilfreich, das Größenverhältnis von Nanomaterialien und biologischen Strukturen in Relation zu setzen.

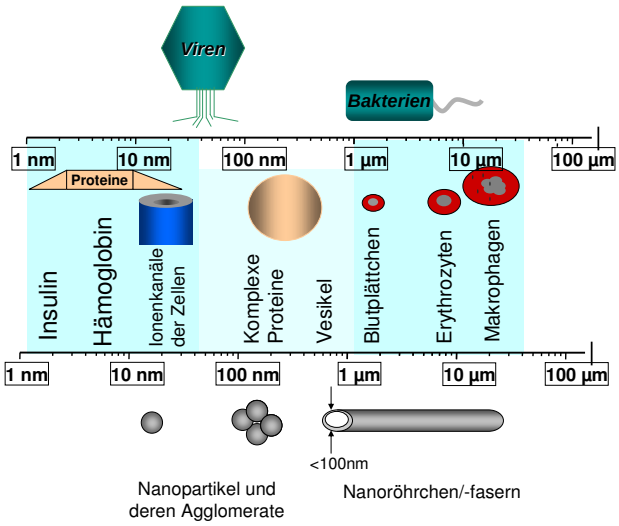


Abbildung 109 Veranschaulichung der Größenrelation zwischen Nanomaterialien und biologischen Strukturen wie Proteinen und Zellen sowie Viren und Bakterien.

Nanoskalige Objekte sind zumeist sehr viel kleiner als Körperzellen wie z.B. Erythrozyten (rote Blutzellen, 8µm) oder Makrophagen (Fresszellen, 20µm), die einige Mikrometer (µm) groß sind. Im Größenbereich von 1 bis 10 nm finden sich Proteine wie Insulin (5nm) oder Hämoglobulin (6nm) im Körper, während komplexe Proteinverbindungen bis zu einigen 100 nm groß werden können. Die Ionenkanäle der Zellen, über die Ionen durch die Zellmembran hindurch transportiert werden, liegen dagegen im Größenbereich zwischen 10 und 30 nm, wobei der durchlässige Bereich nur einen Durchmesser von ca. 2 nm hat.

Abwehrmechanismen der Lunge gegen Nanostaub

Die Inhalation von Partikeln im Größenbereich zwischen ca. 10 nm und 10 µm ist für den menschlichen Organismus nichts Ungewöhnliches, da er tagtäglich mit Viren (20 – 300 nm) und Bakterien (1 – 10 µm) konfrontiert ist. Der Körper hat im Laufe der Evolution Abwehr- und Reinigungsmechanismen entwickelt, die dazu dienen, die Lunge gegenüber diesen Fremdstrukturen zu schützen. Große Staubpartikel (größer als ca. 10µm) werden bereits in der Nase abgefangen und mit dem Nasensekret aus dem Körper ausgeschieden. Da kleinere Objekte auf dem Lungengewebe deponieren können, gibt es im Wesentlichen zwei Mechanismen, nämlich die mukoziliäre Clearance und die phagozytotische Aufnahme durch Fresszellen (Makrophagen), mit denen das Lungengebewebe permanent gereinigt wird. Unter der mukoziliären Clearance (lat. *mukus* = Schleim, *cilia* = Flimmerhaar; engl.: clearance: Beseitigung, Klärung) versteht man die Selbstreinigung der Bronchien mittels einer schützenden Schleimschicht. Im Bronchialbereich deponieren die Staubpartikel auf dieser Schleimschicht, einem viskosen, antimikrobiellen Sekret der Schleimdrüsen. Durch den ständigen Abtransport dieser Schleimschicht durch die konzertierte Bewegung der Flimmerhährchen (Zilien) können sich Nanostaubpartikel nicht in den Bronchien anreichern. Der Schleim mit den Nanopartikeln wird in Richtung Luftröhre zum Rachen transportiert, verschluckt und durch den Magen-Darm-Trakt ausgeschieden. In den tieferen Lungenbereichen (Bronchiolen, Alveolen) gibt es keinen Mukus, da dieser den Gasaustausch behindern würde, und vor allem keine Zilien. Dort werden Fremdstrukturen von den lokalen Makrophagen (Fresszellen) der Alveolen, den sogenannten Alveolarmakrophagen, „gefressen“ (phagozytiert), indem es die Fremdstruktur „umfließt“, in eine sogenannte Lysosom einschließt. Dort wird es durch lysosomale Enzyme und Sauerstoffradikale chemisch zersetzt und somit unschädlich gemacht. Sollte eine Zersetzung nicht möglich sein, verbleiben die Staubpartikel in den Makrophagen, wo sie isoliert und damit auch für den Organismus weitgehend unschädlich sind. Außerdem kann ein kleiner Anteil der deponierten Partikel über die dendritischen Zellen in die Lymphknoten transportiert werden, wo sie dem Immunsystem für eine mögliche Immunantwort präsentiert werden. Dies ist vor allem für Allergene und Bakterien von entscheidender Bedeutung.

Diese Abwehrmechanismen der Lunge funktionieren zumindest bedingt nicht nur für Bakterien, Viren und Umweltstaub, sondern auch für Nanomaterialien in Form von Nanostaub. Insbesondere die mukoziläre Clearance bietet einen sehr effektiven Schutz im Bronchialbereich. In den tieferen Lungenregionen kann sich jedoch Nanostaub – wie auch andere nano-skalige Fremdstrukturen wie z.B. Dieselruß - anreichern, da sowohl die Phagozytose für Objekte kleiner als ca. 100 nm als auch der Transport von partikelbeladenen Makrophagen aus der Lunge sehr ineffektiv sind. Grob geschätzt kann man sagen, dass ca. ein Drittel des in der Lunge deponierten (Umwelt-)Staubs permanent in der Lunge verbleibt und zu chronischen Lungenerkrankungen führen kann. Der Anteil des in der Lunge verbleibenden Nanostaubs kann jedoch, wegen der relativ ineffizienten Clearance höher sein. Zudem werden Nanopartikel im Gegensatz zu Mikropartikeln auch mittels Endozytose (siehe unten) von Epithelzellen oder Fibroblasten aufgenommen (siehe Abbildung 101), oder gelangen in Zellzwischenräume und sind dann für Makrophagen nicht mehr zugänglich.

Toxikologisch relevante Eigenschaften von Nanomaterialien

Schon lange ist bekannt, dass die Inhalation von Stäuben zu Gesundheitsschäden führen kann. Aus der Arbeitsplatzmedizin weiß man, dass hohe Konzentrationen von Staubpartikeln chronische Lungenerkrankungen zur Folge haben können. So führt beispielsweise die Inhalation einer genügend großen Dosis von Asbestfasern zur Asbestose, einer fibrotischen Veränderung des Lungengewebes. Bei dieser Erkrankung wird der Gasaustausch dadurch erschwert, dass luftdurchlässiges Alveolargewebe durch dichtes Bindegewebe ersetzt wird. Asbest ist zudem ein krebserzeugendes Material (Karzinogen), das selbst nach bis zu 40 Jahren Latenzzeit in der Lunge noch zur Bildung von Lungen- und Rippenfell-Tumoren führen kann. Darüber hinaus haben epidemiologische Studien gezeigt, dass die Inhalation von Partikeln gesundheitsgefährdende Effekte nicht nur innerhalb sondern auch außerhalb der Lunge hervorrufen kann. So wurden im Blut ein Anstieg von Entzündungsmarkern und eine erhöhte Neigung zur Blutgerinnung gefunden, was zu einem erhöhten Risiko für Herzrhythmusstörungen und Herzinfarkt führen kann. Somit ist es denkbar, dass diese oder andere Gefährdungen auch von Nanostäuben ausgehen, wobei die Forschung auf diesem Gebiet noch am Anfang steht. Allerdings gibt es bereits Erkenntnisse darüber, welche Eigenschaften des Nanostaubs aus toxikologischer Sicht besonders problematisch sind. Diese werden im Folgenden dargestellt.

Biopersistenz und chemische Zusammensetzung

Neben der Reaktivität ist die Biopersistenz eine der Grundvoraussetzungen für mögliche Gesundheitsrisiken von Nanomaterialien, d.h. dass der Körper Nanomaterialien nur sehr langsam oder gar nicht abbauen kann. Bioabbaubare Materialien lösen sich mit der Zeit auf, treten durch die Vermischung mit Körperflüssigkeiten nur noch in sehr verdünnter Form auf und werden sukzessive ausgeschieden. Biopersistente Materialien können zudem in der Zelle akkumulieren und zeichnen sich damit nicht nur durch eine lange Verweildauer im Organismus aus, sondern auch durch eine hohe lokale Dosis (hohe Masse pro Zelle), da die Materialien nicht löslich sind und sich damit nicht in den Körperflüssigkeiten verdünnen.

Von biopersistenten Materialien geht allerdings kaum Gefahr aus, falls sie biologisch inert sind. Enthalten die Nanomaterialien jedoch bioaktive Elemente wie z.B. Übergangsmetalle und/oder deren Oxide (u.a. Zink, Cadmium, Kupfer, Silber) kann es zur Freisetzung der entsprechenden Metallionen und einer toxischen Wirkung kommen. Darüber hinaus führt – wie unten beschrieben - das hohe Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von Nanopartikeln zu einer erhöhten Reaktivität und damit Toxizität.

Hier kommt auch der sogenannte Trojanische-Pferd Effekt für Metalloxid-Nanopartikel zum Tragen. Metallionen können in gelöster Form nicht unkontrolliert in die Zelle gelangen, da der Metallionenhaushalt durch die Zellmembran kontrolliert wird. Metallhaltige Nanopartikel dagegen können die Zellmembran relativ effizient durch einen zellulären Prozess, der Endozytose (gr. *endo* = hinein) genannt wird, überwinden (siehe Abbildung 110). Im Unterschied zur Phagozytose, die nur von bestimmten Zelltypen wie z.B. Makrophagen durchgeführt werden kann, erlaubt die Endozytose Nanopartikeln (aber keinen Mikropartikeln) den Zugang zu fast jedem beliebigen Zelltyp im Körper. Durch die Aufnahme der Partikel über Endozytose-Vesikel gelangen diese in das stark saure endolysosomale Kompartiment der Zelle, in dem sogar schwerlösliche Metalloxide bei einem pH von 4 bis 5 gut löslich sind. Dadurch können intrazellulär extrem hohe und damit toxische Metallkonzentrationen entstehen, vor denen sich die Zelle nicht mehr schützen kann. Stress- und Entzündungsreaktionen sowie schließlich Zelltod sind dann die Folge.

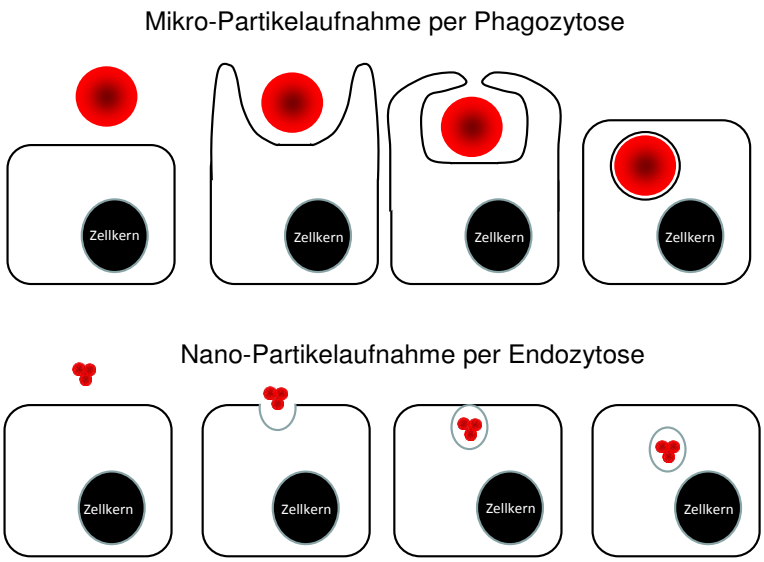


Abbildung 110 Unter *Phagozytose* versteht man einen zellulären Prozess der Aufnahme von Fremdkörpern wie z.B. Partikel, Viren und Bakterien durch spezialisierte Fresszellen (z.B. Makrophagen). Die Phagozyten können dadurch Mikropartikel über Ausstülpungsvorgang der Zellmembran(Pseudopodien) aktiv aufnehmen. In dem dadurch gebildeten Phagolysosom (Membrantasche) kann der Fremdkörper dann durch entsprechende lysosomale Enzyme und speziell produzierte Sauerstoffradikale getötet und abgebaut werden. Beim der *Endozytose* handelt es sich um einen Einstülpungsvorgang der Zellmembran zur Aufnahme von kleineren (Nano-)Partikeln (u.a. auch Proteinen und Lipiden). Bei diesem ebenfalls aktiven Aufnahmeprozess zu dem alle Zellen fähig sind, können die aufgenommenen Partikel im sie umgebenden Endosom durch das relativ aggressive Milieu (saurer pH Wert von 4 bis 5 und lysosomale Enzyme) abgebaut werden.

Beziehung zwischen Größe und biologischer Wirkung

Wie schon erwähnt, können Mikropartikel nur von bestimmten Zelltypen aufgenommen werden, die Teil des körpereigenen Abwehrsystems sind und somit durch diese Zellen unschädlich gemacht werden. Im Unterschied dazu können Nanopartikel mittel Endozytose von fast allen Zelltypen im Körper aufgenommen werden, was vor allem bei toxischen Materialien ein zusätzliches, nano-spezifisches Gesundheitsrisiko mit sich bringt.

Darüber hinaus verteilen sich Nanopartikel im Organismus effizienter als Mikropartikel. So können inhalierte Nanopartikel nicht nur in Lungenzellen gelangen, sondern sie können über das dünne Alveolargewebe (Dicke der Blut-Luft-Schranke: 2 µm) in die Blutbahn gelangen und von dort in sensible Bereiche wie Lymphknoten, Milz, Herz, Leber, Nieren, Knochenmark, Plazenta oder sogar ins Gehirn. Dieser Prozess der *Translokation* von der Lunge in die Blutbahn ist jedoch sehr ineffizient, so dass für die meisten Nanopartikel deutlich weniger als 1% der lungendeponierten Dosis ins Blut und von dort in andere Organe transportiert wird. Trotzdem ist bei hohen Expositionen eine zusätzliche Gefährdung von anderen Organen als der Lunge durch diesen Prozess zu befürchten. Allgemein gilt, dass kleinere Partikel eine höhere Wahrscheinlichkeit zum Übertritt aus der Lunge in andere Organe haben als größere und dieser Prozess für Mikropartikel nicht relevant ist.

Die biologische Wirkung hängt stark von der Oberfläche ab

Nur die Oberfläche von Partikeln steht in direktem Kontakt mit dem biologischen Gewebe. Die innen liegenden Moleküle von biopersistenten Partikeln, bleiben für den Organismus „unsichtbar". Deswegen entscheidet die Oberfläche und ihre Beschaffenheit sehr stark über die biologische Wirkung von Nanopartikeln.
Nanopartikel zeichnen sich durch ein hohes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis aus. Sind bei 1000 nm großen Partikeln ca. 0,1% der Moleküle des Partikels an der Oberfläche präsent so sind es bei 5 nm großen Partikeln ungefähr 27%. Oberflächenatome sind nicht nur besser zugänglich, sondern auch reaktiver als Atome im Inneren eines Objekts, weil sie nicht von allen Seiten mit Nachbaratomen verbunden sind. Durch diese hohe spezifische Oberfläche ergibt sich eine hohe spezifische Reaktivität und damit Toxizität, denn es gibt mehr Kontakt zwischen dem (Nano-)material und den biologischen Strukturen. Viele Studien haben gezeigt, dass die toxikologische Antwort von Lungenzellen und Tieren stark von der Oberflächendosis und weniger von der Anzahl- oder Massendosis der applizierten Nanopartikel abhängt. Wegen des hohen Volumen-zu-Masse Verhältnisses sind Nanopartikel bei gleicher Massendosis in der Regel reaktiver und toxischer als Mikropartikel desselben Materials.

Spezielle Effekte faserartiger Nanomaterialien

Ein weiteres wichtiges Charakteristikum für die Partikeltoxizität ist ihre Form. Faserartige Partikel wie Mineralfasern (z.B. Asbest) oder Kohlenstoff-Nanoröhrchen haben auf Grund ihrer Form aerodynamische Eigenschaften, die dazu führen, dass sie tiefer in die Lunge eindringen und damit effektiver deponieren als kugelförmige Partikel mit derselben Masse. Einmal im Alveolarbereich der Lunge deponiert kann es für lange, biopersistente Fasern zu einem Phänomen kommen, dass frustrierte Phagozytose genannt wird. Bei der Phagozytose, der Aufnahme größerer Partikel durch spezialisierte Zellen, den sogenannten Phagozyten, versucht der Alveolarmakrophage das Lungengewebe zu reinigen, indem er die Fasern aufnimmt und verdaut. Ist die Faser allerdings länger als der Makrophage (ca. 20µm), beginnt zwar der Prozess der Phagozytose, indem der Makrophage versucht das Partikel zu umfließen, dies aber nicht erfolgreich beenden kann. Die Faser ragt aus der Zelle und die Invaginationstasche kann nicht geschlossen werden. Bei dieser unvollendeten, frustrierten Phagozytose kommt es durch permanente Freisetzung von lysosomalen Enzymen und Sauerstoffradikalen zu einer Stressreaktion für das umliegende Gewebe, die eine chronische Entzündungsreaktion auslösen kann. In diesem Zusammenhang wurde für eine Vielzahl von Faserpartikeln und neuartigen Nanofasern im Tierversuch die Entstehung einer lokalen Entzündungsreaktion und auch Fibrose in der Lunge beobachtet. Des Weiteren besteht der Verdacht, dass Nanofasern, ähnlich wie Mineral- oder Asbestfasern, Lungentumore hervorrufen können. Dies sind Indizien für die notwendige besondere Vorsicht beim Umgang mit faserartigen Partikeln, vor allem wenn diese lange genug für frustrierte Phagozytose sind (länger als ca. 10 µm). Es ist gegenwärtig jedoch noch unklar in wie weit die Aneinanderlagerung und Agglomerationen mehrerer kurzer Nanofasern zu einer ähnlichen Toxikologie führt wie sie für lange Fasern beschrieben wurde.

Ansätze zur Risikominimierung

Zur Risikominimierung der Nanotechnologie kann man folgende drei Grundansätze verfolgen:
1) Nanomaterialien werden so konzipiert, dass sie sicher sind, 2) Nanomaterialien werden nicht in die Umwelt freigesetzt und falls doch dann 3) wird die Exposition von Menschen und Umwelt minimiert. Die gesundheitliche Unbedenklichkeit von Nanomaterialien kann optimiert werden, indem der gegenwärtige Stand der toxikologischen Forschung beim Design der Nanomaterialien berücksichtigt wird. Dies könnte beispielsweise bedeuten, dass keine faserartigen Nanostukturen verwendet werden, die länger als 10 µm sind oder dass möglichst bioabbaubare Materialien verwendet werden. Darüber hinaus sollte dafür gesorgt werden, dass Nanomaterialien nicht unkontrolliert in die Umwelt abgegeben wird. Dies kann dadurch geschehen, dass die Nanomaterialien gar nicht erst frei gesetzt werden, z.B.

indem sie so fest in eine Matrix von anderen Stoffen eingebunden werden, so dass sie nicht als Einzelobjekte frei gesetzt werden können. Gesundheitsrisiken könnten auch dadurch minimiert werden, dass freigesetzte Nanomaterialien nicht in direkten Kontakt mit dem Menschen kommen. Dies kann z.B. durch die Verwendung von Schutzkleidung und Atemschutz am Arbeitsplatz geschehen oder durch effektive Luftfiltersysteme, die Nanostaub aus der Luft entfernen. Zumindest sollte jedoch die Zahl und Größe der Nanostaubteilchen an besonders relevanten Orten (z.B. Industrieanlagen zur Herstellung von Nanomaterialien) und damit die Exposition der Menschen zu Nanostaub gemessen werden, um bei entsprechend hohen Konzentrationen Schutzmaßnahmen treffen zu können.

Abschließende Überlegungen

Die zunehmende Verbreitung der Nanotechnologie wird zu einer erhöhten Exposition von Mensch und Umwelt mit Nanomaterialien führen. Speziell die Inhalation von luftgetragenen Nanomaterialien (Nanostäuben) birgt potentielle Risiken für die Gesundheit, die frühzeitig erkannt und so weit wie möglich minimiert werden sollten.

Literatur

Nanoderm (2007). Final Report, Quality of Skin as a Barrier to ultra-fine Particles. QLK4-CT-2002-02678. http://www.uni-leipzig.de/~nanoderm/Downloads/Nanoderm_Final_Report.pdf

Renn O, Roco M (2006). Nanotechnology Risk Governance. International Risk Governance Council White Paper No. 2. http://www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC_white_paper_2_PDF_final_version-2.pdf [Stand 08/2012]

UBA Umwelt Bundesamt (2009), Nanotechnik für Mensch und Umwelt. 1-25. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3765.pdf

11. Kapitel: Nanotechnologie in der Wirtschaft

Autoren

Dr.-Ing. Peter Grambow, Nanoinitiative Bayern, Würzburg
PD Dr. Stefan Thalhammer, Universität Augsburg, Augsburg
Prof. Dr. Dr. Axel Zweck, RWTH Aachen & VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf

Nanotechnologie in der Wirtschaft

Von Dr.-Ing. Peter Grambow, PD Dr. Stefan Thalhammer, Prof. Dr. Dr. Axel Zweck

Einführung

Die Nanotechnologie ist eine der Schlüsseltechnologien dieses Jahrhunderts. Durch moderne Prozesstechnologien werden schon seit Jahren gezielt nanoskalige Strukturen, z.B. dünne Schichten zur Entspiegelung von Brillengläsern, hergestellt. Durch die zunehmende industrielle Beherrschung der Nanoskaligkeit bei der Herstellung und Weiterverarbeitung ergeben sich noch nie dagewesene Systemeigenschaften und Funktionalitäten. Dies führt zu völlig neuartigen und erheblich verbesserten Produkteigenschaften; Autolacke werden kratzfest oder Datenspeicher noch leistungsfähiger. In vielen Bereichen der Industrie hat die Nanotechnologie längst Einzug gehalten. Die Speicherung großer Datenmengen wäre ohne Nanotechnologie nicht denkbar, die kleinsten Transistoren in der Hochvolumenfertigung haben aktuell charakteristische Größen von etwa 10nm, typische Gateoxide solcher MOSFETs (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren) sind nur noch wenige Atomlagen, also etwa 1 bis 2 Nanometer dick. In der Medizin sind durch nanotechnologische Ansätze neue Diagnostik- und Therapieverfahren möglich, Gehirntumore werden bereits mit einer gezielten Nanotherapie durch lokale Erhitzung bekämpft und führen im Mittel zu einer durchschnittlichen Verdopplung der Lebenszeit der Patienten, gegenüber der herkömmlichen Chemotherapie (http://www.magforce.de/).
Trotzdem steht die Nanotechnologie in der Industrie erst am Anfang und bietet ein außerordentlich hohes Potenzial für völlig neue Entwicklungen, z.B. wurde in der medizinischen Grundlagenforschung demonstriert, dass sich zukünftige Medikamente den Tumor selbst suchen und nur diesen lokal bekämpfen könnten.
Eine eigenständige Nanoindustrie gibt es nicht. Die Nanotechnologie ist eine Querschnittstechnologie. Sie stellt an sich keine neue industrielle Branche dar, sondern ist vielmehr ein erweiterter Baustein in den unterschiedlichsten Industriezweigen. Dies reicht von der Mikroelektronik über Informationstechnologie zur Biotechnologie, Pharmazie und Kosmetikindustrie bis hin zur Automobilindustrie und der Luft- und Raumfahrt. Der weltweite Umsatz mit Nanotechnologie beträgt nach einer Veröffentlichung von BCC-Research (https://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology/nanotechnology-market-products-applications-report-nan031g.html) **39,2 Mrd. US Dollar** in 2016 und wird bis 2021 auf **90,5 Mrd. US Dollar** steigen. Dabei stellen die Produkte in denen Schichten und Partikel verwendet werden die Hauptanwendungen dar. Die internationalen Aktivitäten sind besonders in den USA und Asien sehr ausgeprägt und werden durch große öffentliche Förderprogramme unterstützt. Aber auch die europäische Union und das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) stellen beträchtliche Mittel für die Erforschung der Nanotechnologie zur Verfügung. Dabei sind Europa und Deutschland besonders stark im Bereich Chemie und Materialien der Nanotechnologie.
Für die Zukunft wird erwartet, dass fast jeder Industriebereich in irgendeiner Form durch die Nanotechnologie beeinflusst wird. Bei den erwartungsgemäß am stärksten von der Nanotechnologie beeinflussten Bereichen handelt es sich aus internationaler Sicht um die Bereiche Chemie, Life Sciences und Elektronik.

Patente

Betrachtet man die, beim europäischen Patentamt eingereichten Anmeldungen im Bereich Nanotechnologie (B82Y) liegt Deutschland an dritter Stelle, hinter den USA und Japan (siehe Abbildung 111).

Nanotechnologie-Anmeldungen beim Europäischen

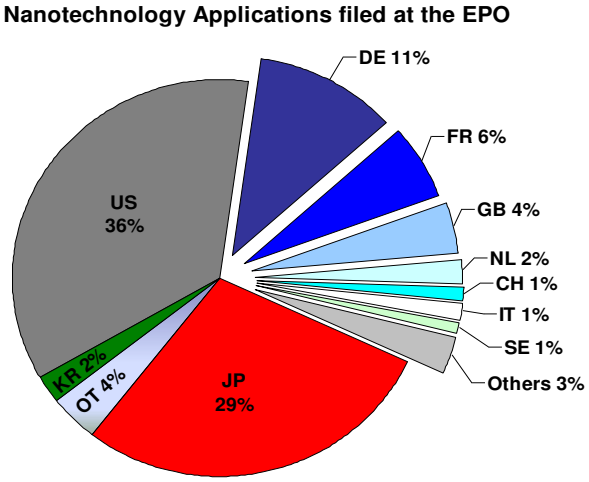


Abbildung 111 Patentanmeldungen der verschiedenen Länder mit nanotechnologischem Bezug beim europäischen Patentamt, Quelle: Europäisches Patentamt, 2012, EPOPATSTAT data base.

Die dynamische Entwicklung der Nanotechnologie zeigt sich auch an der Zahl der Patentanmeldungen. Der deutliche Anstieg in den Jahren 2000 bis 2005 ist vor allem auf die Fortschritte in der Mikroelektronik und den Nanomaterialien zurückzuführen (siehe Abbildung 112). Bei den Diskussionen zur Patentstrategie im Bereich Nanotechnologie weisen Branchenexperten darauf hin, dass die Nanotechnologie prinzipiell keine völlig andere Patentstrategie erfordert als andere Hochtechnologiebereiche. Ein Spezifikum besteht allerdings darin, dass die Entwicklungszeiten von der Entdeckung eines nanotechnologischen Grundeffektes bis zur Anwendung in bestimmten Fällen so lang sein können, dass der Patentschutz kurz nach dem Erreichen der Produktreife ausläuft. Mit Bezug auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist die Neigung Patente anzumelden deutlich geringer als in Großunternehmen. Häufig verfolgen die kleinen und mittleren Unternehmen die Strategie nanologische Betriebsgeheimnisse gar nicht erst offenzulegen, auch wenn sie patentierbar wären. Aus Kostengründen würden KMU im Zweifelsfalle beispielsweise eher Gebrauchsmuster anmelden. Eine sinnvolle Patentstrategie für KMU könnte nach Aussage der befragten Experten z.B. darin bestehen, eine Technologie gemeinsam mit den Hauptanwendern zu patentieren.
Grundsätzlich zeigt sich in Abbildung 112 eine außerordentlich positive Tendenz, da sich die Anzahl der Patentanmeldung auf einem sehr hohen Niveau in den letzten Jahren zu stabilisieren scheint. Offensichtlich ist der europäische Markt auch für asiatische Firmen besonders attraktiv. Spitzenreiter aller Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt ist Samsung noch vor Siemens und anderen europäischen Firmen.

Materialien

Nach Schätzungen der Europäischen Kommission umfasste der Weltmarkt für Nanomaterialien etwa 11 Millionen Tonnen mit einem Marktwert von etwa 20 Milliarden Euro im Jahr 2011. Im Materialsektor arbeiten momentan etwa 300.000 -400.000 Beschäftigte. Wichtige Materialien sind Ruß (Carbon Black) der hauptsächlich in Autoreifen verwendet wird und synthetische amorphe Siliziumverbindungen. In den letzten Jahren sind eine Reihe von interessanten neuen Anwendungen entwickelt worden.
Betrachtetet man beispielsweise auf Nanotechnologie basierte Verbrauchsgüter (siehe Abbildung 113) springt die Entwicklung der letzten Jahre besonders ins Auge. Nanosilber und die Modifikationen der Nanokohlenstoffe verzeichnen erhebliche Wachstumsraten. Insgesamt ergibt sich in den Jahren von 2006 bis 2011 ein Wachstum von über 500%.

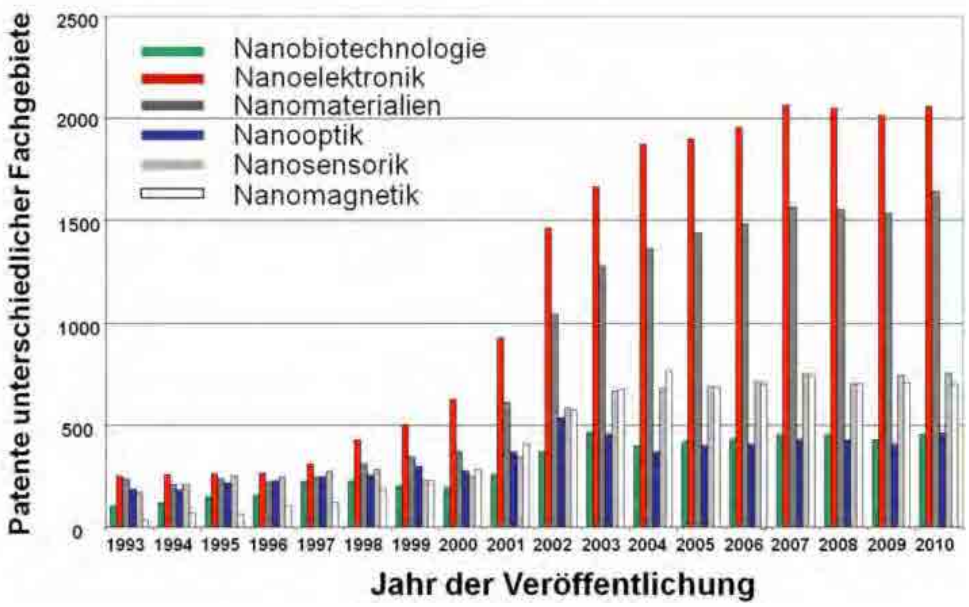


Abbildung 112 Patentanmeldungen beim europäischen Patentamt in unterschiedlichen Teilbereichen der Nanotechnologie, Quelle: Europäisches Patentamt, 2012, EPO PATSTAT data base.

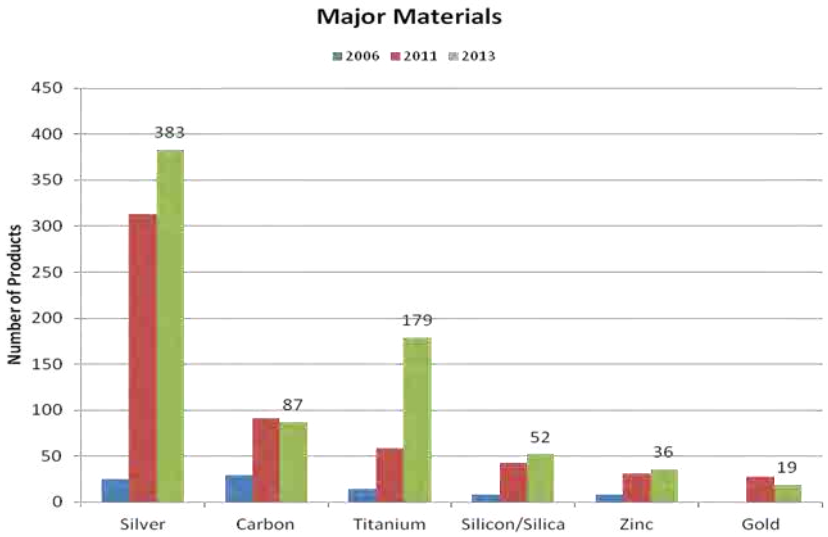


Abbildung 113 Entwicklung Nanotechnologie basierter Verbrauchsgüter in Abhängigkeit der verwendeten Nanomaterialien, Quelle: Woodrow Wilson International Center for Scholars, http://www.nanotechproject.org/cpi/about/analysis/ 2017.

Das technische Potenzial von Nanosilber liegt vor allem in seiner antibakteriellen Wirkung und der höchsten elektrischen Leitfähigkeit aller Elemente. Antimikrobielle Anwendungen finden sich bei medizinischen Produkten, wie z.B. Pflastern und Kathedern (vgl. Abbildung 114), wodurch Keimbildungen deutlich vermindert werden können. Im Verbraucherbereich kann die antimikrobielle Ausrüstung zur Verhinderung der Geruchsbildung in Kleidung eingesetzt werden und den Bewuchs von Gebrauchsgegenständen mit Keimen unterdrücken. Der Einsatz in Knochenzementen, medizinischen Schläuchen und Industrie-Filtersystemen ist Gegenstand aktueller Entwicklungsprojekte.

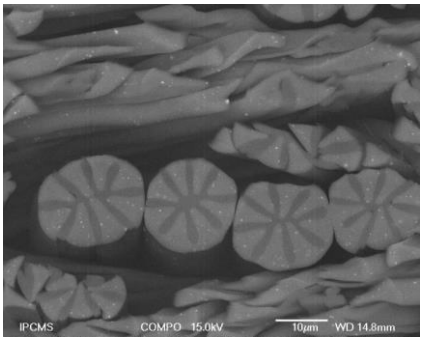


Abbildung 114 Links: Katheter können mit Nanosilber antibakteriell ausgerüstet werden, Rechts: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Textilfasern mit eingebetteten Nanosilberpartikeln. Quelle: i-stock und ras materials, materials + technologies.

Silber besitzt die höchste elektrische Leitfähigkeit aller Elemente. Daher werden Nanosilberpartikel auch als Füllstoff, z. B. in leitfähigen Lacken und Tinten eingesetzt. Mit modernen Methoden können auch sogenannte Nanosilberdrähte hergestellt werden. Durch Verbindung der einzelnen Drähte zu einem weitmaschigen Netzwerk können schon geringste Mengen Nanosilber zu einer durchgehenden Leitfähigkeit führen. Gleichzeitig kann die Schicht so ausgelegt werden, dass sie für einfallendes Licht transparent bleibt. Derartige transparente, leitfähige Schichten für Touch-Screens werden derzeit aus dem Material ITO (Indium-Zinn-Oxid) hergestellt, das durch seine Sprödigkeit sehr leicht bricht. Hier könnten Nanosilberdrähte eine preisgünstigere und mechanisch flexiblere Alternative darstellen.
Kohlenstoff-Nanomaterialien existieren seit langem in der Natur. Sie entstehen vielfach bei Verbrennungsprozessen und sind in geringen Anteilen auch in Ruß und Asche enthalten. Bei Vulkanausbrüchen werden sie ebenfalls freigesetzt. Vom Bleistift abgestrichene Graphen-Schichten dienten seit dem späten Mittelalter zum Markieren und Schreiben. Trotzdem gelang der Nachweis der Nanokohlenstoffe erst in jüngster Vergangenheit. Das technische Potenzial liegt neben einer extrem hohen spezifische Festigkeit in einer sehr hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit und zudem einer hohen chemischen und thermischen Beständigkeit. Die heute bekannten Nanostrukturen des Kohlenstoffs leiten sich im Wesentlichen alle von der schichtartigen Struktur des Graphits ab. Einzelne **Graphen**-Schichten sind die einfachste Form des Nanokohlenstoffs mit einer Dimension im Nanobereich. Aufgerollte Graphen-Schichten, die Nanoröhren oder **Nanotubes**, weisen zwei Dimensionen im Nanobereich auf, während bei den Fullerenen alle drei Dimensionen im Nanobereich liegen.

Aus industrieller Sicht spielen vor allem die CNTs (Carbon Nanotubes), eine herausragende Rolle, da Sie weltweit in großen Mengen verfügbar sind. Die Produktionskapazität von CNTs betrug nach Angaben der amerikanischen Gesellschaft für Keramik 2011 über 4500 Tonnen. Dabei übersteigt die zur Verfügung stehende Kapazität allerdings deutlich die Menge, die auch tatsächlich produziert wird, nach aktuellen Schätzungen etwa um den Faktor 4. Das Preisniveau liegt für die sogenannten mehrwandigen CNTs (MWCNT = Multi Wall Carbon Nanotubes), die einfacher herzustellen sind, bei 100$/kg, immerhin noch ca. 10-mal so hoch wie der Preis für Kohlenstoff-Fasern. Doch wie können die feinen Röhren, Drähte oder Partikel weiterverarbeitet werden? Welche weiteren Schritte bis zum Endprodukt sind zu leisten und wer kann diese nötigen Schritte umsetzen. In Abbildung 115 ist beispielhaft ein kleiner Ausschnitt der nötigen Schritte gezeigt, um von den CNTs zu einem Endprodukt zu kommen. Die CNTs werden zu einem Lack weiterverarbeitet, der aufgrund seiner Fließeigenschaften leicht auf z.B. eine Folie aufgebracht werden kann. Damit kann die Folie durch Anbringen geeigneter elektrischer Anschlüsse als gleichmäßige Heizung verwendet werden. Die angelegte Spannung führt zu einem Stromfluss durch die CNTs, wodurch sich die gesamte Fläche gleichmäßig erwärmt. Diese beheizbare Folie kann zum Beispiel auf die Heckscheibe eines Autos aufgeklebt werden und diese homogen heizen.

Abbildung 115 Zyklus von der CNT-Herstellung über das Lacksystem bis zur Heizbeschichtung, Quelle: Netzwerk NanoCarbon, Cluster Nanotechnologie.

Häufig kommt es bei der Kommerzialisierung solcher Prozesse besonders darauf an, die in kleinen Mengen oder im Labor nachgewiesenen Eigenschaften sukzessive in eine Produktion zu überführen. Dies kann unter Umständen einen langen Atem erfordern, da viele der Verfahren nicht einfach hochskalierbar sind und daher zunächst technische Risiken in der Handhabung geklärt werden müssen. Daher bekommt an dieser Stelle die **Verfahrenstechnik** eine immer größere Bedeutung und wird wichtige Detailfragen z.B. im Hinblick auf Reproduzierbarkeit, Stabilität, Zuverlässigkeit und Qualität lösen müssen.

Die vom BMBF mit über 45 Millionen Euro geförderte Innovationsallianz Inno.CNT, siehe auch http://www.inno-cnt.de lief in 2014 aus. Viele sehr gute Forschungsergebnisse wurden erarbeitet, die Allianz hat hervorragend kooperiert, allerdings kam man häufig nicht über den Status eines Demonstrators hinaus, der die Leistungsfähigkeit der Technologie repräsentierte. Es zeigt sich, dass viele gute Ansätze weiterentwickelt werden müssen, um das eigentliche Produktziel zu erreichen.

Das neu gebildete Netzwerk NanoCarbon (http://www.nanobarbon.net) setzt vor allem auf die Innovationskraft der kleinen und mittelständischen Unternehmen und wurde mit der Unterstützung des ZIM (Zentrale Innovation im Mittelstand)-Programms des Wirtschaftsministeriums gestartet. Ziel des Netzwerks ist es, die Unternehmen dabei zu unterstützen, aus gewonnen Forschungsergebnissen über anwendungsorientierte Entwicklungen schneller zur Produktreife zu gelangen und dabei das technische Potenzial der Nanokohlenstoffe zu nutzen.

Verfahren

Bei der Herstellung und Weiterverarbeitung sind zwei wichtige Prinzipien zu unterscheiden. Geht man vom makroskopischen Bereich aus, besteht die Aufgabe in der Zerkleinerung der Partikel bis sie nur noch wenige Nanometer groß sind. Typische Verfahren wie die Vermahlung, Lithografie oder Ätzprozesse sind beispielhaft in Abbildung 116 gezeigt. Im Gegensatz dazu steht das Bottom Up-Verfahren bei dem Atome oder Moleküle zu größeren Einheiten zusammengesetzt werden, bis sie im Nanometerbereich liegen. Beispiele sind Sol-Gel-Prozesse, Selbstorganisation z.B. in der Molekularstrahlepitaxie oder Fällungsprozesse.

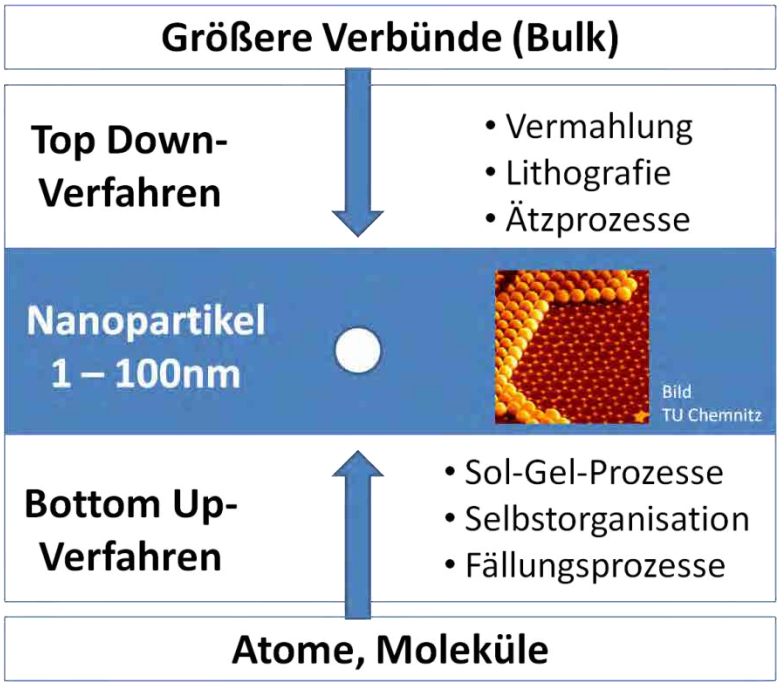


Abbildung 116 Herstellungsverfahren in der Nanotechnologie werden in sogenannte Top Down- und Bottom Up-Verfahren unterteilt. Quelle: Peter Grambow, Cluster Nanotechnologie mit Bild von TU Chemnitz.

Herstellungsbedingt liegen die Nanomaterialien überwiegend als Agglomerate oder Aggregate vor. Bedingt durch die hohe Oberflächenenergie neigen die Partikel dazu, sich mit ihren Nachbarn zu größeren Einheiten zu verbinden. Damit die herausragenden Eigenschaften möglichst effizient genutzt werden können, ist es erforderlich, sie möglichst schonend in dem einzusetzenden Medium oder in einer seiner Komponenten homogen zu verteilen, man spricht vom Dispergieren.

Je nach Viskosität und Beschaffenheit des Mediums kommen verschiedene Technologien zum Einsatz. Beispiele sind die Ultraschalldispergierung, Hochdruckscherdispergierung, Dreiwalzwerke, Zweiwellenschnecken und –kneter oder die einfache Rührwerkskugelmühle (siehe Abbildung 117 rechts). Die Kugelmühle ist für niederviskose Medien, sofern entsprechend kleine Kugeln eingesetzt werden, besonders geeignet. Da mit wachsender Dispergierungsrate die Viskosität stark ansteigt, sind hierbei bestimmte Grenzen hinsichtlich der Konzentration vorgegeben.

Da mittels Kugelmühlen relativ große Energien eingetragen werden können, ist darauf zu achten, dass eine mögliche Materialschädigung nicht zu groß ausfällt. Für die Dispergierung von Nanokohlenstoffen in Thermoplastschmelzen als besonders gut geeignet haben sich Zweiwellenextruder erwiesen. Um einen möglichst hohen Scherenergieeintrag zu gewährleisten, wie er für die Dispergierung von z.B. MWCNT-Agglomeraten erforderlich ist, empfiehlt es sich, die Nanopartikel direkt zusammen mit dem Granulat am Anfang der Schnecke mit einzuspeisen.

Technisch werden heute beispielsweise MWCNTs hauptsächlich über das kostengünstige CCVD (englisch combustion chemical vapor deposition oder Flammenpyrolytische Beschichtung)-Verfahren mit hohen Katalysatorausbeuten im industriellen Maßstab hergestellt (vgl. Abbildung 115). Je nach Größe und Reinheit der Nanotubes sind verschiedene Qualitäten auf dem Markt verfügbar.

Abbildung 117 Links CNT-Herstellungsreaktor, rechts Rührwerkskugelmühle für die Zerkleinerung, Dispergierung und Desaggregation. Quelle: Fa. Bayer und Fa. Netzsch.

Produkte

Den Produkten, die durch Nanotechnologie ermöglicht werden wird ein hohes Wachstum vorhergesagt. Ausgehend von einem Marktvolumen in 2009 von €200 Milliarden lag der Erwartungswert für 2015 zwischen einer und drei Billionen Euro, je nach Prognose. Im Allgemeinen ist eine generelle Vorhersage schwer zu treffen, da die Vielfalt innerhalb der Nanotechnologie sehr groß ist und die Hebelwirkung, wie z.B. in der Halbleiterindustrie ebenfalls sehr groß sein kann.

Es folgt der Versuch einer Standortbestimmung der Nanotechnologie in der Wirtschaft. Hier gibt es neben den vielen Prognosen nur sehr wenig belastbare Fakten. Die Vergleichbarkeit mit anderen sogenannten Schlüsseltechnologien liegt auf der Hand. Von einer Gartner-Beraterin, Frau Jackie Fenn wurde 1995 die in Abbildung 118 gezeigte Betrachtungsweise geprägt, die den prinzipiellen zeitlichen Verlauf neuer Technologien in einzelnen Phasen sehr gut beschreibt (vgl. J. Fenn, B. Gammage, and M. Raskino. Gartner's hype cycle special, Report for 2010).

Am Anfang herrscht außerordentlich große Euphorie. Die Möglichkeiten der neuen Technologie wachsen in den Köpfen und Phantasien und die Erwartungen werden immer größer. Bei der Nanotechnologie war dies genauso. Staatliche Institutionen erkennen das hohe technische und wirtschaftliche Potenzial. Große Förderprogramme werden ins Leben gerufen (z.B. 1 Mrd. € von der EU für **Graphen,** http://graphene-flagship.eu/). Dies schürt natürlich noch höhere Erwartungen. Die Frage nach dem Nutzen für den Verbraucher wird immer lauter gestellt und führt dazu, dass der Druck auf die Wissenschaftler steigt, die ihre Ergebnisse immer anwendungsnäher verkaufen müssen, auch wenn Sie noch weit von dem eigentlichen, möglichen Fernziel, nämlich dem Produkt entfernt sind.

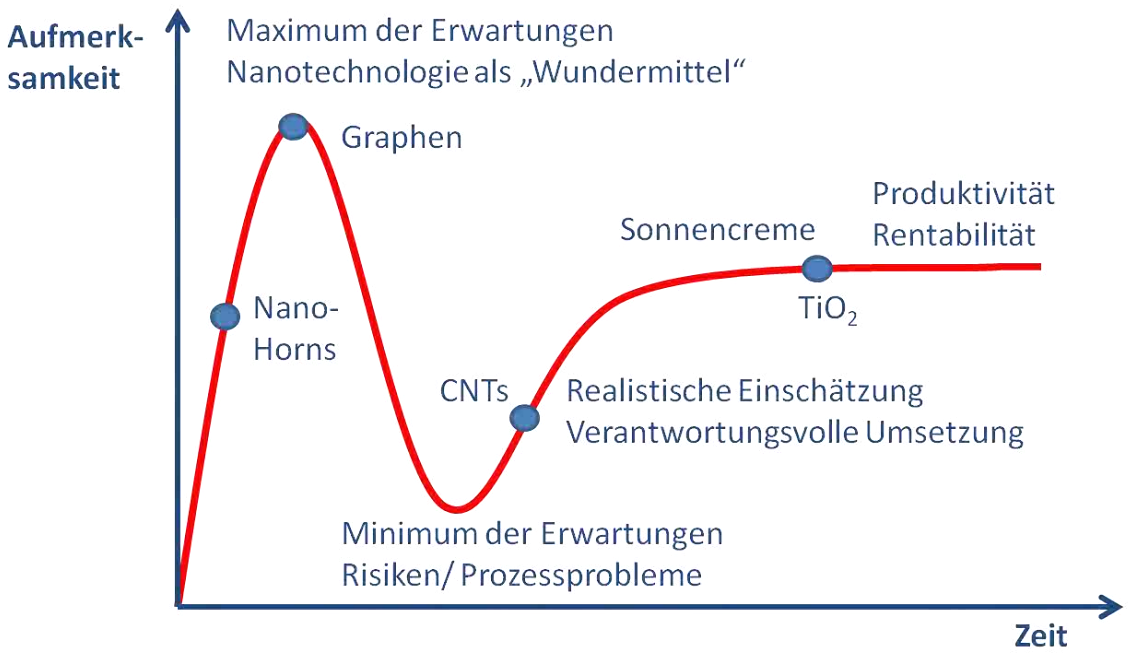


Abbildung 118 Hype Zyklus nach Gardner bezogen auf die Nanotechnologie.
Quelle: Peter Grambow, Cluster Nanotechnologie.

Gleichzeitig entstehen Schwierigkeiten auf verschiedenen Ebenen. Völlig berechtigte Fragen kommen auf: Warum sind die Materialien so teuer? Gibt es Gefährdungen für Mensch und Umwelt? Lässt sich der Labormaßstab in eine Hochvolumenproduktion übertragen? Usw. Damit sind wir im Tal angekommen und die Frage ist wie es weiter geht. Jetzt sind die Pragmatiker und Ingenieure gefragt. Es geht um Fragen der technischen Umsetzung, genauso wie um die Transparenz in der Öffentlichkeit und eine verantwortungsvolle Begleitforschung. Nur durch eine nüchterne Einschätzung der Situation und die geeigneten Maßnahmen im jeweiligen Bereich kann es wieder bergauf gehen. In der Umsetzungsphase spielen wiederum viele Faktoren zusammen. Welche Maschinen stehen zur Verfügung um das sogenannte Hochskalieren vom Labormaßstab zur Stückzahlproduktion zu gewährleisten? Sind Sicherheitsdatenblätter verfügbar? Kann die Qualität ohne hohe Zusatzkosten abgesichert werden? Erst wenn alle Fragen beantwortet werden können, ist an eine echte Produktion zu denken.

Für einzelne Materialien und Produkte ist die Standortbestimmung einfacher möglich. **Carbon-Nanohorns** beispielsweise stehen noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung (siehe Abbildung 118). Es handelt sich um eine spezielle Form des Nanokohlenstoffes. Im Gegensatz zu den CNTs haben sie zusätzlich eine hohe Mikroporosität und sind in purem Wasser ohne Zusatz von Dispergierhilfsmitteln sowie in unpolaren Lösungsmitteln homogen dispergierbar.

Das **Graphen** erlebt nach Auffassung der Autoren gerade einen sehr großen Hype. Das Material hat den Gipfel der Erwartungen erreicht. Eine der Zukunftsvisionen der Forscher und Firmen ist beispielsweise eine flexible Elektronik mit biegsamen multifunktionalen Bildschirmen, die am Handgelenk getragen werden können.

Ein anderes Material, Titandioxid (TiO_2) wird schon seit einiger Zeit in der Produktion eingesetzt. Durch die weltweite Klimaveränderung besteht ein ständig wachsender Bedarf an Sonnenschutzprodukten mit hohen Lichtschutzfaktoren um das Hautkrebsrisiko zu minimieren. Die erforderlichen hohen Lichtschutzfaktoren lassen sich mit TiO_2-Nanopartikeln realisieren. An dieser Stelle ist die Produktivitätsschwelle überschritten und das Geschäft ist profitabel. Vergleichbar mit dieser

Anwendung gibt es einzelne Produkte in denen Nanobestandteile eingesetzt werden und die die Produktivitätsschwelle bereits überschritten haben.

Da die weltweit verfügbaren Kapazitäten bei den **CNTs** sehr hoch sind gibt es hier schon eine Vielzahl von Produktbeispielen, allerdings ist der ganz große Durchbruch, den sich naturgemäß die Hersteller erhoffen noch nicht erfolgt. Trotzdem wurden Hochleistungsfahrrad-Rahmen bereits mit Hilfe von CNTs hergestellt. Tennisschläger (Head, Völkl) und Badmintonschläger sind weitere Beispiele in denen Kohlenstoffnanostrukturen bereits erfolgreich in der Produktion eingesetzt wurden.

Analytik

Aus wirtschaftlicher Sicht stehen bei den Analysemetoden neben den technischen Parametern wie Auflösung, Geschwindigkeit, Genauigkeit usw. vor allen die Kosten und die Verfügbarkeit der Methoden im Vordergrund. Aus Sicht der Unternehmen insbesondere der KMUs sind die Kosten z.T. exorbitant hoch und selten wirtschaftlich zu rechtfertigen. Aus Sicht der Verbraucher müssen alle nur denkbaren Absicherungen getroffen werden um die Produktsicherheit zu gewährleisten. Daher sind verantwortungsbewusste Regelungen nötig, die auf der einen Seite Planungssicherheit gewährleisten und auf der anderen Seite gesundheitliche und Umweltrisiken minimieren bzw. ausschließen.

Die zur Verfügung stehenden Methoden sind bereits sehr gut entwickelt und gehören in der Wissenschaft oft zum Standardrepertoire der Labore. Allerdings erfordert die Bedienung häufig hochqualifiziertes Fachpersonal, da die Interpretation der Ergebnisse sehr viel Erfahrung und Hintergrundwissen erfordert. Exemplarisch seien einige Verfahren herausgegriffen, die in der Industrie aktuell eine wichtige Rolle spielen:

- **Partikelzählung** in Luft und in Flüssigkeiten, in der Regel basierend auf der Kondensationskeimmethodik in Verbindung mit meist optischen Auswerteverfahren, Partikelgrößen bis auf wenige nm lassen sich auflösen, allerdings lässt sich meist nicht die Form des Partikels bestimmen.
- **Rasterelektronenmikroskopie** (REM)
- Elektronen werden im Vakuum auf die Probe beschleunigt. Die Detektion der rückgestreuten Elektronen ermöglicht hohe laterale Auflösungen im atomaren Bereich, bis hin zur Aussage um welches Material es sich handelt (EDX).
- **Rasterkraftmikroskopie** (SFM)
- Bei diesen Verfahren fährt eine winzige Abtastspitze über die zu untersuchende Oberfläche, die Auslenkungen der Spitze werden mit einer Laserdiode optisch abgetastet und abgebildet. Auflösung bis 0,1nm, das Verfahren ist preisgünstig, relativ schnell und ohne Vakuum einsetzbar. Probleme ergeben sich durch Umwelteinflüsse wie z.B. Erschütterungen und Temperaturänderungen.

Ein grundsätzliches Problem bei allen Untersuchungsmethoden besteht in der sehr lokalen Aussage. Bei vielen Verfahren können nur kleinste Ausschnitte, Auskunft über wenig µl oder μm^2 des jeweiligen Materials gegeben werden. Bei industriellen Prozessen ist jedoch eine Aussage über sehr große Mengen, Flächen oder Volumina erforderlich. Daher sucht man manchmal nach der sprichwörtlichen Stecknadel im Heuhaufen um die entscheidende Information zu ermitteln. Hier sind kreative Lösungen gefragt, vielleicht auch die geschickte Kombination aus Simulation und Stichprobenergebnissen zur Sicherstellung der Qualität.

Wertschöpfungsketten

Um den Einsatz von Nanotechnologie zu diskutieren ist es sinnvoll in Wertschöpfungsketten zu denken um genau zu identifizieren, an welcher Stelle innerhalb der Kette Nanotechnologie eingesetzt wird und welche Auswirkungen dies auf das Endprodukt hat. In Abbildung 119 ist eine solche Wertschöpfungskette für moderne Windmühlen gezeigt.

Abbildung 119 Wertschöpfungskette Windenergie,
Quelle: Netzwerk NanoCarbon. Cluster Nanotechnologie.

Nach der Herstellung des Grundmaterials, im Beispiel sind dies CNTs werden die einzelnen Zwischenschritte im Herstellungs- und Weiterverarbeitungs-Prozess durchlaufen. Nach geeigneter Oberflächenmodifizierung und Dispergierung kann das Zwischenprodukt, der Windmühlenflügel, hergestellt werden. Durch die Verwendung der CNTs ist der Flügel leichter und stabiler, was besonders bei modernen Offshore-Windmühlen mit immer größeren Längen von wachsender Bedeutung ist. Schließlich landet die umweltfreundliche Energie über das Windkraftwerk und den Energieversorger beim Endverbraucher. In dieser Kette ist die Nanotechnologie der Schlüssel zum Erfolg und liefert den entscheidenden Mehrwert.

Weiterführende Systeme mit integrierter Sensorik sind denkbar und könnten z.B. die Wartung verbessern und die Sicherheit (Frühausfallwarnsystem) erhöhen.

Betrachtet man eine andere Wertschöpfungskette, z.B. die eines Autos, wird deutlich, in welcher Vielfalt die Nanotechnologie in diesem Bereich bereits eingesetzt wird oder kurz vor einer Massenproduktion steht. In Abbildung 115 sind einige der Einsatzbeispiele zusammengefasst.

Abbildung 120 Einsatz der Nanotechnologie im Auto. Quelle: (Vortrag Dr. Luther, VDI,TZ).

Die Zielsetzungen, die im Auto verfolgt werden kann man in drei Gebiete unterteilen: Erhöhung der Umweltfreundlichkeit (z.B. CO_2-Reduktion), Erhöhung der Passagiersicherheit (z.B. durch den Einsatz von 77Ghz-Abstandswarnradar-Systemen) und Steigerung des Fahrkomforts. Technisch gesehen sind vor allem die Bereiche Fahrzeugelektronik, Oberflächen und Materialien betroffen. Im Einzelnen kommt die Nanotechnologie bereits heute in den folgenden Teilbereichen zum Einsatz (vgl. auch Abbildung 120):

- Nanopartikel im Abgaskatalysator
- Nano-Rußpartikel (Carbon Black) in den Reifen
- Verbrennungsfördernde Nanopartikelzusätze für Treibstoffe
- Nanomaterialien für Elektromobilität
- Kleben statt Schweißen in der Fertigung: Klebstoffe mit Magnetit-Nanoteilchen härten im Magnetfeld aus
- Reibungsreduktion (CO_2-Reduktion) durch Oberflächenbeschichtung der Ventilstössel
- Schutzschichten für Metallbauteile, die in der Fertigung hohen Temperaturen ausgesetzt sind
- Leichte und gleichzeitig hochstabile Metalle und Kunststoffe für Karosserieteile
- Fahrzeugelektronik mit extrem kleinen Sensoren und Verstärkern, z. B. für das Antiblockiersystem
- 77-GHz-Abstandswarnradar
- Schnell reagierende Dämpfungssysteme auf Basis „intelligenter“ Flüssigkeiten, die sich durch elektrische oder magnetische Einwirkung umkehrbar verfestigen
- Korrosionsschutz-Beschichtungen für Motorkomponenten (z.B. Ventilteilerscheiben)
- Nanometerdünne Reflektorbeschichtungen und kratzfeste Kunststoffabdeckungen bei Frontscheinwerfern
- Leuchtdioden (LED) im Front-, Rück- und Abbiegelicht
- Antireflexgläser für blendfreie Armaturenverglasungen
- („Elektrochrome“) Rück- und Seitenspiegel, die sich bei starkem Lichteinfall auf ein elektrisches Signal hin selbst tönen
- Nanopigmente im Lack, die das Auto je nach Blickwinkel in anderen Farben erscheinen lassen
- Duftgefüllte Nanomembranbläschen für Textilbezüge in der Fahrgastzelle, die Neuwagenduft abgeben

Nanotechnologie in Deutschland

Die Akteure der Nanotechnologieszene in Deutschland waren Weltweit mit die Ersten die auf Basis einer fundierten und breit angelegten Grundlagenforschung frühzeitig Anwendungsoptionen adressiert haben. 2013 umfasst die Nanotechnologie in Deutschland rund 2300 Institutionen, davon ca. 37% kleine und mittlere Unternehmen (KMU), 13% Großunternehmen, 27% Hochschulinstitutionen, 8% institutionelle Forschungseinrichtungen sowie sonstige Einrichtungen wie Netzwerke, Verbände, Museen und Finanzinstitutionen (Abbildung 121). Die Statistik kann unter http://www.nano-map.de aktualisiert werden.
Für die Kernakteure stellen nanotechnologische FuE-Arbeiten keine kurzfristige Modeerscheinung dar, sondern sie widmen sich langfristig den Schlüsselelementen für zukünftige Neuentwicklungen in Branchen mit hohem Beschäftigungspotential, hauptsächlich im Bereich der Elektronik und Informationstechnik, des Automobil- und Maschinenbaus, der Chemie und Pharmazie, Optikfertigung, Medizin und Biotechnologie, oder bei der Energieerzeugung und in der Bauwirtschaft. In Deutschland existieren inzwischen zahlreiche kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die als reine Nano-Unternehmen bezeichnet werden können. Diese flexiblen Innovationsunternehmen besetzen spezifische Nischen innerhalb der Wertschöpfungskette und liefern einen wichtigen Beitrag zum Know-How Transfer aus der Forschung in die Industrie. KMU haben deshalb eine Schlüsselfunktion in den meisten Hochtechnologiebereichen, so dass die Gründung innovativer Start-Ups auch in der jungen Nanotechnologiebranche von größter Bedeutung ist.

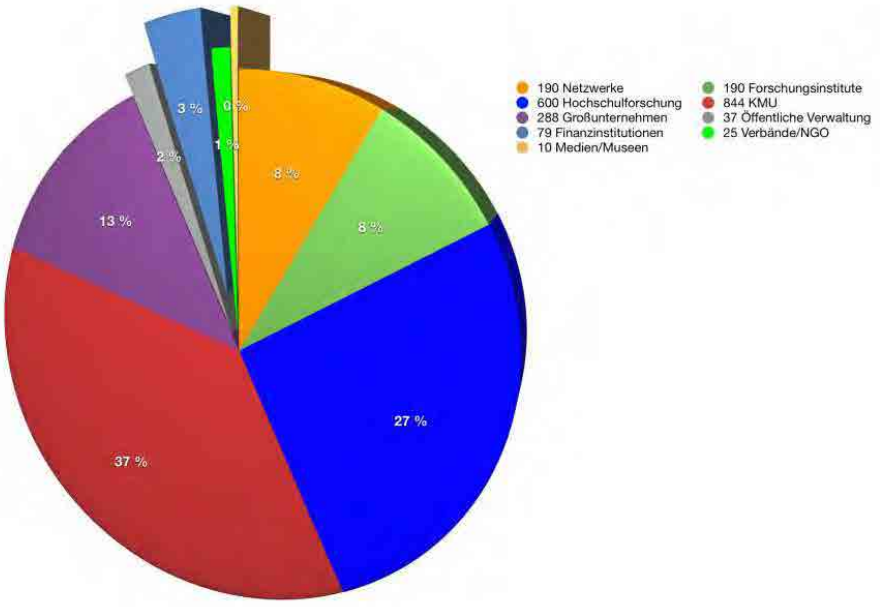


Abbildung 121 Nanotechnologie in Deutschland, Statistik der im Kompetenzatlas Nanotechnologie aufgelisteten Institutionen (http://www.nano-map.de, August 2013)

In der Elektronik und der Datenspeicherung, bei der Oberflächen- und Materialveredlung und in der Präzisionsoptik geht man den Weg der permanenten Miniaturisierung schon seit Jahren. Entsprechend werden mit der Herstellung und Anwendung ultradünner Schichten oder der Ultrapräzisionstechnik Gewinne erzielt und Umsätze gesteigert.
Zunehmend hält die Nanotechnologie auch in der Biologie, Pharmazie und in der Medizin Einzug um neue Produkte zu ermöglichen. Die Vision der Ärzte: bessere Sensoren bei der Schmerzforschung, noch kleinere endoskopische Werkzeuge für die Kardiologie, Operationsmethoden, die kaum noch invasiv sind.

Risiken (öffentliche Wahrnehmung, technische Risiken)

Bei den zu berücksichtigenden Umwelt- und Gesundheits-Risiken sind zunächst gebundene und ungebundene Nanostrukturen zu unterscheiden. Im Festkörper gebundene Nanostrukturen, wie zum Beispiel dünne Schichten zur Entspiegelung von Brillengläsern oder in der Halbleiterindustrie sind vollkommen ungefährlich. Sind die Nanoteilchen ungebunden ist eine Differenzierung natürlicher und synthetisch hergestellter Nanopartikel sinnvoll. Alle Verbrennungsprozesse, von der Kerzenflamme bis zum Vulkanausbruch setzen unzählige Nanopartikel frei, die die Menschheit schon seit der Entdeckung des Feuers begleiten. Trotzdem ist es denkbar, dass synthetisch hergestellte Nanopartikel andere Wirkmechanismen aufweisen. Daher ist es wichtig, diese zu erforschen und bei neuen Erkenntnissen entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Darüber hinaus gibt es nanopartikuläre Stäube, die teilweise sehr tief in den Körper eindringen können und dort zu Abwehrreaktionen führen, die neben erwünschten therapeutischen Effekten (bei Pharmawirkstoffen) auch unerwünschte Auswirkungen haben können (siehe dazu Kapitel 12). Die bekannten Risiken z.B. von Dieselruß bzw. Asbest müssen bei den neuartigen Nano-Stäuben berücksichtigt werden. Um die Nanotechnologie verantwortungsbewusst weiter zu entwickeln ist eine wissenschaftliche Bewertung der Risiken sehr wichtig (www.nano.fraunhofer.de/de/sicherheit.html). Eine Gesamtübersicht der verschiedenen Nanopartikel ist beispielsweise dem DaNa-Projekt (www.nanopartikel.info) zu entnehmen. Das Projekt hat das Ziel der Erfassung, Bewertung und breitenwirksamen Darstellung von gesellschaftlich relevanten Daten und Erkenntnissen zu Nanomaterialien. Die Sicherheitsfragen in der Fertigung im Zusammenhang mit Nanomaterialien werden z.B. auch intensiv in einem Programm der OECD bearbeitet (siehe http://www.oecd.org/science/nanosafety/).
Das Bild der Nanotechnologie in der Öffentlichkeit ist sehr wichtig. Offene Fragen müssen beantwortet werden. Weitere Forschung ist unbedingt erforderlich. Ein enger Austausch der Erkenntnisse aus der Forschung in die Produktion und umgekehrt ist von großer Bedeutung. Netzwerke und Cluster bieten eine ideale Plattform um dies zu gewährleisten und den Wissenstransfer zu befördern.

Die Nanotechnologie hat Einzug in unseren Alltag gehalten. Die Brillenbeschichtung zur Entspiegelung und der Computer mit Nano-Transistoren in der Massenfabrikation sind zu Standardprodukten in unserer Gesellschaft geworden. Darüber hinaus bietet die Nanotechnologie ein außerordentlich hohes Potenzial auch in der Medizin, in der Bauindustrie, in der Energiespeicherung usw.

Dieses Potenzial können wir nur heben, wenn die Risiken der Nanotechnologie bei allen großen Chancen sachlich und offen diskutiert werden. Hierfür gibt es in Deutschland eine ausgezeichnete Basis, da die Risikoforschung von nationalen Stellen (BMBF) und den Bundesländern (Beispiel neu gegründeter Projektverbund Umweltverträgliche Anwendungen der Nanotechnologie des bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz) gefördert werden.

Eine wichtige Aufgabe ist es immer wieder die z. Teil komplexen und komplizierten Sachverhalte einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen um aufzuklären und eine sachliche Diskussion zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang ist die Ausbildung von Schülerinnen und Schülern eine außerordentlich wichtige Aufgabe, damit wir die hohe Fachkompetenz in den einzelnen Bereichen der Nanotechnologie in Deutschland nicht verlieren, um auch in Zukunft eine Vorreiterrolle bei der verantwortungsvollen Nutzung dieser Schlüsseltechnologie innezuhaben.

Literatur (Stand von 2016)

Einblicke in die Nanowelt: Nanotechnologie für Dummies	Spektrum der Wissenschaft Spezial; 1/2012 Richard Brooker und Earl Boysen; Wiley 2006 ISBN 3-527-70299-7
Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications	Michael F. L. De Volder, Sameh H. Tawfick, Ray H. Baughman, A. John Hart, Science 2/2013 Vol. 339 no. 6119 pp. 535-539
Aktionsplan Nanotechnologie 2020 BMBF	http://www.bmbf.de/pub/Aktionsplan Nanotechnologie.pdf
Nanotechnology: An Overview based on indivators and statistics	http://www.oecd.org/sti/inno/43179651.pdf
Kompetenzatlas Nanotechnologie in Deutschland	http://www.nano-map.de
Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt	VDI Technologiezentrum; ISSN 1436-5928; 2004

12. Kapitel: Gesellschaftliche Aspekte der Nanotechnologie

Autor

Professor Dr. Michael Schillmeier, Department of Sociology, Philosophy and Anthropology
University of Exeter

Gesellschaftliche Aspekte von Nanowissenschaft und Nanotechnologie

von Professor Dr. Michael Schillmeier

Will man die vielschichtigen Themen zusammenfassen, die sich den gesellschaftlichen Aspekten von Wissenschaft und Technik widmen, so sind insbesondere zwei zentrale Fragestellungen von Bedeutung:

1) In welcher Gesellschaft leben wir? und
2) In welcher Gesellschaft wollen wir leben?

Dergleichen Fragen lassen sich für moderne Gesellschaften wie der unseren nicht mehr ohne Wissenschaft und Technik beantworten. Man kann sogar sagen, dass Wissenschaft und Technik zu den wichtigsten Merkmalen gegenwärtiger Gesellschaften zählen und maßgebend deren Zukunft mit beeinflussen. Die wissenschaftliche Forschung von heute schafft die Technologien von morgen und kreiert damit auch immer neue Möglichkeiten menschlichen Lebens und Zusammenseins. Aus gesellschaftlicher Sicht lassen sich somit wissenschaftliche, technologische und soziale Aspekte nicht voneinander trennen, so als hätte man es mit drei unabhängigen Bereichen zu tun, die sich jeweils nicht beeinflussen oder die nicht beeinflussbar sind. Das gilt im Besondern für Nanowissenschaften und Nanotechnologien, denen in der Gestaltung unserer gesellschaftlichen Zukunft eine Schlüsselrolle zugeschrieben wird. Wissenschaft und Politik sehen in der Forschung an und mit Nano-Materialien, die rund 5000-mal kleiner sind als der Punkt hinter diesem Satz, die Möglichkeit der Entwicklung innovativer Technologien und das Potential einer Vielzahl von kreativen Anwendungsbereichen. Das Interessante und der für die Wissenschaft so faszinierende Aspekt an der Nano-Dimension ist, dass sich die Eigenschaften und Funktionen von Materialien im Nano-Bereich von denjenigen in der Mikro- und Makrodimension stark unterscheiden können.

Nano-Effekte

Diesen Effekt versucht man nun z.B. für die Medizin zu nutzen und arbeitet vielerorts an verbesserten Diagnoseverfahren und effizienteren Therapiemaßnahmen. Die Einblicke in den Nano-Kosmos des menschlichen Körpers soll helfen, schonende, effektive und auf den einzelnen Patienten zugeschnittene Strategien zur Bekämpfung vieler Krankheiten zu ermöglichen, die heute entweder gar nicht therapierbar sind oder nur mit dem Risiko schwerwiegender Nebenwirkungen. Langfristig soll das neuartige Wissen über die körperlichen Funktionen im Nanobereich auch dazu führen, die Entstehung und Verlauf von Krankheiten so zu verstehen, dass die Ausbreitung von schwerwiegenden Krankheiten wie z.B. Krebs oder Herz-Kreislauferkrankungen in der Gesellschaft minimiert oder gar verhindert werden können. Wichtig ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass derzeit eine große Asymmetrie zwischen Diagnosemöglichkeiten und möglichen Therapieformen besteht: Was diagnostiziert werden kann, ist nicht immer therapierbar. Was diagnostiziert werden kann muss nicht unbedingt eine Krankheit mit Symptomen sein, sondern verweist z.B. auf eine genetische Disposition, die zu dieser oder jener Krankheit führen kann, aber dies nicht zwingend tut. Dies kreiert schwerwiegende emotionale und psychologische Probleme für die Patienten, gerade dann, wenn zum Zeitpunkt der Diagnose keine adäquaten Therapieformen zu Verfügung stehen, d.h. wenn z.B. auf die Diagnose der genetischen Disposition von Brustkrebs nur mit dem Vorschlag auf das Entfernen der Brust geantwortet werden kann. Solange wir 'nur' wissen, dass viele Krankheiten oftmals bereits Jahrzehnte vor der Sichtbarkeit der Symptomatiken entstehen (z.B. Alzheimer, Demenz), aber zur gleichen Zeit keine Therapien zur Verfügung stehen, die die Anfänge der Krankheit schonend zu verhindern im Stande sind, muss für die Nano-Forschung zweierlei gelten: 1) Der Patient hat zum Schutz der eigenen Person das ***Recht auf 'Nicht-Wissen'*** und kann sich dadurch dem Wissen der Diagnose entziehen, und 2) die

Forschung gilt es dahingehend zu fördern, dass Diagnose immer schon an sinnvolle Therapie gekoppelt ist (Theranostik).

Interdisziplinarität

Um eine erfolgreiche Nano-Theranostik in Aussicht zu stellen, gilt es zunächst die Nano-Phänomene selbst zu verstehen, um sukzessive damit wirksame und nicht-toxische Nanomaterialien und -technologien zu entwickeln. Dazu muss die WissenschaftlerIn die Fähigkeit besitzen über die Grenzen der eigenen wissenschaftlichen Disziplin hinaus zu denken und mit anderen Disziplinen zusammenzuarbeiten. Dies ist oftmals ein schwieriges Unterfangen, da es die modernen Wissenschaften nicht gewohnt sind ***interdisziplinär*** zu denken und zu arbeiten. Ganz im Gegenteil: Für die Entstehung moderner Wissenschaften war es unabdingbar sich auf ganz bestimmte Forschungs- und Wissensgebiete zu spezialisieren. Durch ***Spezialisierung*** sind unterscheidbare und eigenständige 'Disziplinen' entstanden, wie z.B. die für uns so selbstverständlichen Gebiete Biologie, Physik, Chemie oder Informatik. Durch Prozesse der Wissens-Spezialisierung formten sich nicht nur spezifische wissenschaftliche Praktiken, sondern jede Disziplin begann ihre eigene 'Sprache' zu sprechen, unterschiedliche Anforderungen und Interessen wurden sichtbar und handlungsbestimmend, usw. Die Spezialisierung auf klar definierte Wissens- und Forschungsbereiche spaltete zwar das Wissen in vielfältige Forschungsgebiete und -praktiken auf, ermöglichte es aber diese an einem gemeinsamen Ort, der Universität höchst erfolgreich zu versammeln. Zur spezialisierten Forschung gesellte sich die universitäre Lehre und so konnte man den wissenschaftlichen Spezialistennachwuchs gezielt ausbilden und fördern. Im Zuge der nanowissenschaftlichen Forschung verschwindet Spezialisierung keineswegs vielmehr ist eine weitergehende und forcierte Spezialisierung zu beobachten. Gleichzeitig benötigt (und ermöglicht) das Wissen über die Nano-Welt aber die Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen und ermöglicht neue Interessensgebiete. Interdisziplinarität meint also, das trotz weitergehender Spezialisierung, die Kooperation mit anderen Disziplinen von zentraler Bedeutung ist, um robustes Nano-Wissen zu generieren. Interdisziplinarität bedarf natürlich auch besonderer Berücksichtigung in der Lehre. Für naturwissenschaftliche Lehre wäre es generell wichtig, die sozialwissenschaftliche und historische Forschung *über* die Entstehung und Praxis der Wissenschaften stärker in das Studium einzubinden. Als fester Bestandteil im universitären Curricularbereich würde ***'Forschung über Forschung'*** zu einem aktiven, selbstkritischen Reflexionsprozess der eigenen Arbeit beitragen und die gesellschaftliche Relevanz, d.h. die gesellschaftliche Eingebundenheit, sowie Folgen- und Verantwortungsbewusstsein von Wissenschaft stärker thematisieren. Dies ist umso mehr erforderlich für einen zukunftsträchtigen Forschungs- und Technologiebereich wie 'Nano', dessen Entwicklung aber immer noch am Anfang steht und Risiken und negative Effekte mit sich bringen kann.

Ökonomisierung der Wissenschaften

Nanowissenschaft, wie jede andere hochtechnologisierte Forschung, ist zeit- und kostenintensiv. Auch die Nanoforschung muss nicht nur mit vielen, oft unerhofften Fehlschlägen rechnen, viele der Probleme werden erst durch die Misserfolge im Labor sichtbar und erfordern, ja ermöglichen dadurch erst neue und kreative Lösungsmöglichkeiten. Diese müssen wiederum in langwierigen und kostenintensiven Versuchsanordnungen erprobt werden, um dann eventuell in effektivere und innovative Materialien und Technologien zu münden. Die derzeitige Forschungssituation muss jedoch gleichzeitig mit knappen Forschungsgeldern und einen hohen wissenschaftlichen wie ökonomischen Erfolgsdruck umgehen. Erfolgreiche Forschung meint nicht nur gute Laborarbeit die in internationalen Publikationen Anerkennung findet, sondern gute Forschung meint vielerorts auch erfolgreiche Vermarktung. Nanoforschung ist daher geprägt von Ausgründungen aus öffentlichen Wissenschaftseinrichtungen. Der Forscher wird zunehmend zum Wissensunternehmer. Dies mag durchaus ein erfolgreiches Modell jenseits der universitären Forschungspraxis darstellen. Es darf aber nicht vergessen werden, dass die ***Ökonomisierung der Wissenschaften***, d.h. der größer werdende Einfluss wirtschaftlicher und rein anwendungsbezogener Interessen, einen ambivalenten Prozess darstellt. Zunächst ist anwendungsbezogene Nano-Forschung durchaus begrüßenswert, da es die gesellschaftliche Relevanz

wissenschaftlicher Forschung betont. Es ist jedoch als problematisch zu bewerten, falls reine ökonomische Interessen die Prozesse wissenschaftlicher Forschung steuern und beherrschen.

Nano-Sicherheit

Die Forschungsergebnisse aus den Nano-Laboren zeigen, dass der Nano-Kosmos sich als komplexer Zusammenhang unterschiedlichster chemischer, biologischer und physikalischer Prozesse darstellt, von denen man in vielen Fällen nur rudimentäres oder kein gesichertes Wissen hat. Trotz aller Forschungsbemühungen und bahnbrechenden Analysetechnologien (wie z.B. das Rastertunnelmikroskop), mit deren Hilfe eine große Menge neuer Daten und wichtiger Erkenntnisse gewonnen werden konnte, ist die Nano-Welt noch immer über weite Strecken ein *terra incognita*, das auf mehr Fragen und Nicht-Wissen, als auf Antworten und gesichertes Wissen verweist. Damit verbindet sich nicht nur das forscherische Interesse nach mehr stabilen Nano-Wissen, sondern es bedarf auch des sensiblen Umgangs mit dem noch nicht Gewussten und etwaigen negativen Folgen, die daraus für Mensch und Umwelt resultieren können. Das Bemühen um ***Nano-Sicherheit*** muss somit zentrales Anliegen der gegenwärtigen Forschung sein, gerade dann wenn man über die mittel- und langfristigen Effekte von Nanopartikel und Nanotechnologien noch keine vergleichbare und gesicherte Datenlage hat. Nanoforschung ist demnach ebenso chancenreich wie risikovoll und bedarf eines ***pro-aktiven*** Umgangs mit Forschungsmaterialien, der mögliche schädliche Nebenwirkungen nicht als unweigerliche 'Kosten' der Forschung verrechnet, sondern etwaige Gefahren für Mensch und Umwelt bereits in der Genese neuer Technologien mitberücksichtigt und versucht diese auszuschließen. Nanotechnologien oder Materialien die Nanoelemente enthalten und bereits den Weg vom Labor in der Gesellschaft geschafft haben, sollten daher als solche immer auch gekennzeichnet sein, damit der Bürger nicht nur darüber informiert ist, sondern auch entscheiden kann, ob er dieses Produkt benutzen will oder nicht.

Demokratisierung der Expertisen

Betont man die Relevanz von Nano-Wissenschaft und Nanotechnologie für die Zukunft unserer Gesellschaft, so gilt es dementsprechend die ***Chancen und Risiken*** der jeweiligen Nano-Materialien genau zu analysieren. Dies lässt sich nicht mehr im wissenschaftlichen Elfenbeinturm bewerkstelligen, sondern erfordert die gesellschaftliche Teilhabe an der wissenschaftlichen Praxis. Der Begriff 'Gesellschaft' sollte in diesem Zusammenhang nicht abstrakt bleiben, sondern all die Menschen und Organisationen einbeziehen, die für die jeweiligen wissenschaftlichen Neuerungen relevant sind. Dies sollte bereits zum frühesten Zeitpunkt der Problembestimmung beginnen. Geht es zum Beispiel um die Forschung bezüglich eines neuen Medikaments zur Verbesserung der Krebstherapie, sollten alle diejenigen ein Mitspracherecht haben, für die das Medikament von Belang ist. Neben den Forschern wären das Ärzte, Krankenschwestern, Patienten usw., die mit Ihrem Wissen und ihren ganz unterschiedlichen aber immer problembezogenen Erfahrungen zur möglichen Entwicklung eines Medikaments beitragen. Eine solche ***Demokratisierung der Expertise*** ist mit dem wissenschaftlichen Experiment selbst vergleichbar, nur dass es die daran beteiligten Akteure erhöht, die am Gelingen des Versuchsaufbaus beteiligt sind. Das heißt aber auch, dass man – ganz ähnlich wie im Labor – mit dem Scheitern des Projekts rechnen muss, aber ***ohne*** damit einen Verlust an kreativer wissenschaftlicher Forschung verbinden zu müssen. Vielmehr wird dadurch der gesellschaftlichen Bedeutung von Nanotechnologien bereits in ihrer Entstehungsphase in demokratischer Form Rechnung getragen. Wenngleich gerade vor dem Hintergrund der steigenden Ökonomisierung von Wissenschaft es noch ein langer Weg sein wird, dieses durchaus konfliktreiche Prinzip gezielt einzusetzen, so haben doch vielerorts die Nanoforscherinnen begonnen an diesem Lernprozess teilzunehmen und unterstreichen damit die gesellschaftliche Bedeutung von ***Nano*** als Schlüsseltechnologie für unsere Zukunft.

13. Kapitel: Nanotechnologie im Studium

Autor

Dr. Waldemar Baron, Gelsenkirchen

Nanotechnologie im Studium
– Anforderungen, Angebote und Perspektiven –

von Dr. Waldemar Baron

Kurzfassung

Das Angebot an Nano-Studiengängen entwickelt sich dynamisch in zahlreichen Bundesländern und ist vielfältig geworden. Es fällt nicht leicht, den Überblick zu behalten, zahlreiche Nano-Studiengänge sind erst in den letzten Jahren eingerichtet worden. Zur Auswahl stehen grundständige Studiengänge, Nano-Vertiefungsbereiche in naturwissenschaftlich-technischen Studiengängen und spezialisierte Nano-Aufbaustudiengänge. Fachliche Schwerpunkte sind regional unterschiedlich und reichen von naturwissenschaftlichen Ausrichtungen beispielsweise in Physik, Chemie oder Biologie bis zur Nano-Elektronik und Nano-Produktionstechnik. Schnupperkurse und einzelne Vorlesungen zur Nanotechnologie können oftmals an Fachbereichen der Physik, Chemie, Elektrotechnik/Informatik und Ingenieurwissenschaften besucht werden. Der Beitrag zeigt, was erwartet wird, welche Studienmöglichkeiten im Einzelnen angeboten werden, welche Vorteile eine Beteiligung an Wettbewerben haben kann und welche interessanten Perspektiven sich für Beruf und künftige Arbeitsfelder abzeichnen.

Abbildung 122 Einbau eines 3,5 m breiten und 2,5 m hohen Frachttors – Quelle: EADS

Anforderungen an Studierende

Nanotechnologische Kompetenzen sind zunehmend gefragt. Nanoforscher und -entwickler werden von Unternehmen häufig in den Bereichen Produktion und Analytik eingesetzt. Entsprechende Fachkompetenzen etwa bei der Rastermikroskopie, der Partikelgrößenmessung und der optischen Mikroskopie werden stark nachgefragt. Zudem werden von Studierenden methodische und soziale Kompetenzen erwartet wie Projektmanagement, fachübergreifendes Denken und wegen der internationalen Vernetzung auch sehr gute Kenntnisse der englischen Sprache. In neu entstandenen Nano-Geschäftsfeldern sind Hierarchien oftmals noch wenig ausgeprägt, was den Spielraum für persönliches Engagement und Kreativität erhöht. Arbeiten im Team gehört vielfach zum Arbeitsalltag nanotechnologischer Forschung und Entwicklung und sollte gut beherrscht werden.
Die Innovationskraft von Nano-Unternehmen wird in hohem Maße durch die Qualifikation ihrer Beschäftigten bestimmt. Dafür bedarf es einer Nano-Ausbildung, die gut auf die Nachfrage ausgerichtet ist. Nanotechnologie wird oftmals in den Fachbereichen Physik, Chemie, Materialwissenschaften / Werkstoffe, Elektrotechnik / Informatik und Ingenieurwissenschaften vermittelt. In den ersten Semestern eines Nano-Studiums werden zumeist Grundlagen in Mathematik, experimenteller und theoretischer Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften angeboten. Interesse an diesen Feldern wird vorausgesetzt. Gegenüber technischen oder naturwissenschaftlichen Studiengängen sind Nano-Studiengänge durch einen hohen Grad an Interdisziplinarität gekennzeichnet. Zur Vertiefung und praktischen Umsetzung von Lehrinhalten sowie zur Steigerung der sozialen Kompetenz der Studierenden sind zumeist Praktika ebenso vorgesehen wie Sprachkurse und wirtschaftswissenschaftliche Module als fachübergreifende Elemente.

Abbildung 123 Nano-Studiengänge an deutschen Hochschulen – Quelle: BMBF/ VDI TZ

Angebotene Studiengänge

Grundsätzlich lassen sich drei Wege unterscheiden, die zu einem Studienabschluss im Bereich der Nanotechnologie führen: Erstens die Aufnahme eines grundständigen, interdisziplinär angelegten Nano-Studienganges, zweitens die Wahl eines Nano-Vertiefungsbereiches innerhalb eines naturwissenschaftlichen oder technischen Studiengangs und drittens die Spezialisierung nach dem Bachelor-Abschluss mit einem Nano-Aufbaustudiengang. Dafür stehen in Deutschland etwa 30 Nano-Studiengänge bereit, die oftmals erst in den letzten Jahren entstanden sind. Portraits dieser Nano-Studiengänge und weitere Infos zum Studien- und Weiterbildungsangebot im Bereich Nanotechnologie sind unter www.nano-bildungslandschaften.de abrufbar. Darüber hinaus werden in einigen naturwissenschaftlichen Studiengängen in Deutschland einzelne Module zur Nanotechnologie angeboten, siehe dazu auch www.dv-nano.de/print/infoportal/nano-studieren.html.

Abbildung 124 Bedarfsgerechtes Hochschulstudium als Chance für ein erfolgreiches Berufsleben.
Quelle: Universität Duisburg Essen

Grundständig – mit Nano direkt einsteigen

Für den Studienbeginn direkt nach der allgemeinen oder einschlägig fachgebundenen Hochschulreife steht etwa ein Dutzend unterschiedlicher Nano-Studiengänge an Universitäten zur Auswahl, wie Tabelle 3 zeigt. Dabei ist insbesondere der Süden Deutschlands gut vertreten. Drei Fachhochschulen decken in einem Studiengang neben Nanotechnologie zusätzlich noch ein weiteres Technologiefeld ab: Materialwissenschaften in Gelsenkirchen, Biotechnologie in Iserlohn und Mikrosystemtechnik in Kaiserslautern.

Tabelle 3: Grundständige Nano-Studiengänge an deutschen Universitäten und Fachhochschulen

Hochschule	Grundständiger Nano-Studiengang	Abschluss
U Duisburg Essen	NanoEngineering	Bachelor/Master
U Erlangen-Nürnberg	Nanotechnologie	Bachelor/Master
U Hamburg	Nano-Science and Technology	Bachelor
U Hannover	Nanotechnologie	Bachelor/Master
U Kassel	Nanostrukturwissenschaften	Bachelor/Master
U Regensburg	Nano-Science	Bachelor/Master
U Saarbrücken	Mikrotechnologie und Nanostrukturen	Bachelor/Master
U Tübingen	Nano-Science	Bachelor/Master
U Würzburg	Nanostrukturtechnik	Bachelor/Master
FH Gelsenkirchen	Nano- und Materialwissenschaften	Bachelor
FH Iserlohn	Bio- und Nanotechnologien	Bachelor
FH Kaiserslautern	Mikrosystem- und Nanotechnologie	Bachelor/Master

Nach vier Semestern werden vielfach Spezialgebiete wie physikalische Chemie, Quantenphysik oder Nanoelektronik zur Vertiefung angeboten. Die meisten dieser Studiengänge sind konsekutiv angelegt und haben im direkten Anschluss an den Bachelor-Abschluss ein Masterstudium im Angebot. Die Hauptunterrichtssprache ist Deutsch, an der Fachhochschule Kaiserslautern werden einige Module auch auf Englisch angeboten.

Vertiefend – auf Nano spezialisieren

Ein anderer Weg in Richtung Nano-Abschluss führt über eine Spezialisierung innerhalb der Natur-, Ingenieur- oder Materialwissenschaften, wie Tabelle 4 zeigt. An den Technischen Universitäten Braunschweig und Chemnitz kann beispielsweise im Masterstudium ein Nano-Vertiefungsbereich innerhalb der Elektrotechnik gewählt werden. Die RWTH Aachen hat einen Nano-Vertiefungsbereich in der Elektrotechnik und die Universität Paderborn im Chemieingenieurwesen.
An der Fachhochschule Isny ist eine Spezialisierung auf Optical Engineering und Nanotechnologien im Bachelor-Studiengang Physik-Ingenieurwesen möglich. Die Spezialisierung auf Nanotechnologie in einer späteren Studienphase ermöglicht es, fundierte Kenntnisse in einer zuvor ausgewählten Fachdisziplin auf eine breitere Basis zu stellen.

Tabelle 4: Nano-Vertiefungsbereiche innerhalb naturwissenschaftlicher und technischer Studiengänge

Hochschule	Studiengang mit Nano-Vertiefung	Abschluss
RWTH Aachen	Elektrotechnik / Mikro- und Nanoelektronik	Bachelor/Master
U Bielefeld	Physik / Nanowissenschaften	Bachelor/Master
TU Braunschweig	Elektrotechnik / Nano-Systems-Engineering	Bachelor/Master
TU Chemnitz	Elektrotechnik / Mikro- und Nanoelektronik	Bachelor/Master
U Paderborn	Chemieingenieurwesen / Nanotechnologie	Bachelor/Master
FH Isny	Physik-Ing. / Optical Engineering und Nanotechnologien	Bachelor

Aufbauend – vom Bachelor zum Nano-Master

Eine Ausrichtung auf Nanotechnologie mit bereits erreichtem Bachelor-Abschluss ist über ein eigenständiges Nano-Masterstudium möglich. Ein Dutzend Nano-Aufbaustudiengänge steht mit unterschiedlicher Ausrichtung zur Auswahl, vgl. Tabelle 5, darunter vier Technische Universitäten, die Privathochschule in Bremen und drei Fachhochschulen.

Tabelle 5: Nano-Aufbaustudiengänge an deutschen Universitäten und Fachhochschulen

Hochschule	Nano-Aufbaustudiengang	Abschluss
U Bielefeld	Nanowissenschaften	Master
U Bremen	Nanomolecular Science	Master
TU Chemnitz	Micro and Nano Systems	Master
TU Dresden	Physik und Nanoelektronik	Master
U Hannover	Material- und Nanochemie	Master
TU Ilmenau	Mikro- und Nanotechnologien	Master
TU Kaiserslautern	Nanotechnologie	Master
U Stuttgart	Nano- und Optoelektronik & Leistungselektronik	Master
U Ulm	Advanced Materials	Master
FH München	Mikro- und Nanotechnik	Master
FH Nürnberg	Neue Materialien, Nano- und Produktionstechnik	Master
FH Zwickau	Nanotechnologie	Master

Die jeweiligen fachlichen Schwerpunkte reichen von Biologie, Chemie und Physik bis zu Materialwissenschaften und Elektronik. Als Vorbereitung für gewünschte längerfristige oder regelmäßige Tätigkeiten im Ausland eignen sich etwa die englischsprachigen Nano-Studiengänge in Bremen, Chemnitz, Dresden und Ulm. Studieninteressenten, die bereits im Bereich Nano- oder Biotechnologie beruflich tätig sind, können ihr Wissen über ein Fernstudium auf den neuesten Stand bringen. Das Zentrum für Fernstudien und Universitäre Weiterbildung der TU Kaiserlautern vermittelt Nanobiotechnologie als berufsbegleitendes Fernstudium. Ab dem Wintersemester 2010/11 hat die Universität Stuttgart „Nano- und Optoelektronik & Leistungselektronik“ als Studiengang eingerichtet, der auch berufsbegleitend in Teilzeit absolviert werden kann. Eine Weiterqualifizierung in Richtung Promotion unterstützen spezielle Graduiertenschulen mit dem Schwerpunkt Nanotechnologie, z. B. in Dresden, München, Leipzig und Regensburg.

Wettbewerbe für Schüler/-innen und Studierende

Einen guten didaktischen Einstieg in fachspezifische und vor allem auch fachübergreifende Qualifikationen ermöglichen Wettbewerbsbeteiligungen. Wettbewerbe bieten für Schüler/-innen und Studierende sehr gute Möglichkeiten, sich gezielt mit einem Zukunftsthema wie Nano zu beschäftigen, interessante Ideen gemeinsam zu entwickeln, umzusetzen und wertvolle neue soziale Kontakte zu gewinnen.
Schlüsselqualifikationen haben neben fachlichen Kenntnissen auch methodische und soziale Kompetenzen als Voraussetzung. Als ein gut geeignetes Mittel zur Vermittlung solcher – für beruflichen Erfolg im Bereich Nanotechnologie entscheidender – Handlungskompetenzen gilt projektorientiertes Lernen. Dieses kommt bei Wettbewerbsbeteiligungen in Schule und Hochschule gezielt zum Einsatz. Auf diese Weise können vielschichtige Lernprozesse initiiert, begünstigt, begleitet und unterstützt werden, die nicht auf spezielles Schul- und Fachwissen gerichtet sind, sondern auch lebensnahe Kommunikations-, Kooperations- und Präsentationskompetenz vermitteln.
Einige Schülerwettbewerbe ermöglichen es, speziell ein Nano- oder auch Werkstoffthema zu wählen und zu vertiefen. Neben Geld- und Sachpreisen ergeben sich oftmals auch Angebote für Praktika, vertiefende Projekte und Sponsoring. Der in Deutschland wohl bekannteste Schülerwettbewerb „Jugend forscht“ zielt insbesondere darauf, Leistungen und Begabungen in Naturwissenschaften, Mathematik und Technik zu fördern. Wettbewerbsbeiträge zur Nanotechnologie können beispielsweise in den Themenkomplexen Arbeitswelt, Chemie, Physik und Technik eingereicht werden. Für eine Arbeit aus dem Bereich der chemischen Nanotechnologie ist ein Sonderpreis ausgeschrieben. Teilnahmeberechtigt sind Jugendliche bis zum Alter von 21 Jahren. Bewertet wird in mehrstufigen Verfahren vom Regional- über den Landes- bis zum Bundeswettbewerb. Neben Preisgeldern und Praktika bei begehrten Arbeitgebern winken auch Reisen.
Speziell auf ein Schülerengagement im Bereich Nanotechnologie zielt ein Wettbewerb in Bayern, durchgeführt bereits seit einigen Jahren von der Initiative Junge Forscherinnen und Forscher. Im Wettbewerb stehen Schülerinnen und Schüler vor der Aufgabe, sich mit Unterstützung einer Lehrkraft mit einem selbstgewählten Thema aus dem Bereich der Nanotechnologie auseinanderzusetzen. Mit dem Nachwuchswettbewerb „NanoFutur“ unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2002 die Gewinnung exzellenter Nachwuchswissenschaftler für Forschung und anwendungsorientierte Entwicklung in der Nanotechnologie. Der Wettbewerb zielt auf junge Forscher/-innen mit Promotion.

Ferienpraktika für Schülerinnen und Schüler

Eine weitere Möglichkeit, sich an Spitztechnologien wie Nano, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik zu erproben, wird über Ferienpraktika an renommierten deutschen Forschungseinrichtungen angeboten. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) vermittelt beispielsweise in diesem Bereich Ferienpraktika an Schülerinnen und Schüler etwa im

Karlsruher Institut für Technologie, Leibniz-Institut für Neue Materialien Saarbrücken und Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden. Am Ende des Praktikums steht ein Zertifikat.
Ziel ist es, Jugendliche für diese beruflich aussichtsreichen Querschnittstechnologien über Praktika frühzeitig zu interessieren und eine entsprechende Studienwahl zu erleichtern. Für eine Woche haben Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit u. a. zu erleben, wie Forscher im Dienste der Wissenschaft neue Materialien herstellen und untersuchen. Es wird ermöglicht, im Labor selbst zu experimentieren. Experimentelles Lernen war auch einer der zentralen Schwerpunkte der vom BMBF geförderten und an Schülerinnen und Schüler gerichteten Initiativen „Naturwissenschaften entdecken!“ und nanoTruck, ein Ausstellungsfahrzeug, das quer durch Deutschland auch zahlreiche Schulen besucht hat. Nanotechnologie, Materialforschung und Werkstofftechnik bieten ein breites Spektrum an attraktiven beruflichen Tätigkeiten in Branchen wie beispielsweise Automobil- und Flugzeugbau, öffentliche Infrastruktur oder auch Energieversorgung. In Aussicht stehen gute Karrierechancen für junge Menschen, die sich für fachübergreifend angelegte Zukunfts- und Querschnittstechnologien interessieren und beispielsweise ganz neue Produkte und Dienstleistungen entwickeln wollen.

Berufsperspektiven und Arbeitsfelder

Mit einer nanospezifischen Hochschulausbildung eröffnen sich vor allem Beschäftigungsmöglichkeiten in Unternehmen und Forschungseinrichtungen. Zu den industriellen Beschäftigungsfeldern gehören neben der chemischen Industrie beispielsweise die Bereiche Informationstechnik, Maschinenbau, Energietechnik, Halbleiterproduktion, Biotechnologie, Pharmazie und Medizintechnik. Weitere berufliche Tätigkeitsfelder ergeben sich an Hochschulen in der Forschung und Lehre sowie in Behörden beispielsweise in den Bereichen Gesundheit, Umwelt und Klimaschutz.

Abbildung 125 Überwachung eines Reinraumes durch Roboter - Quelle: Infineon

In Zukunft werden deutlich mehr Beschäftigte mit nanotechnologischen Methoden arbeiten. Nanotechnologische Fähigkeiten und Handlungskompetenzen sind zunehmend gefragt. Schon heute befassen sich in Deutschland etwa 1.000 innovative Unternehmen mit der Entwicklung, Anwendung und Vermarktung nanotechnologischer Produkte, Verfahren und Dienstleistungen. Dazu gehören mehr als 250 Großunternehmen, darunter weltweit ausgerichtete Konzerne mit guten Aufstiegsmöglichkeiten wie Daimler, Carl Zeiss, Degussa, BASF und Bayer. Diese richten sich mit attraktiven Einstiegsangeboten oftmals direkt an die Hochschulen und beziehen Studierende frühzeitig über Praktika, Master- und Promotionsarbeiten ein. Qualifizierter Nachwuchs ist gefragt, Ingenieurinnen und Ingenieure kommen nach drei bis fünf Jahren Berufserfahrung etwa in den Bereichen Vertrieb, Produktion und Elektrotechnik zumeist auf mehr als 50.000 Euro Jahresgehalt.

Deutschland liegt mit der Nanotechnologie in Europa an erster Stelle. Forschung und Entwicklung werden mit mehr als 600 Mio. Euro jährlich von der öffentlichen Hand gefördert. Im Vergleich zu anderen Spitzentechnologien ist die Nanotechnologie ein noch relativ junges Technologiefeld. Derzeit ist von mehr als 60.000 Beschäftigten in Deutschland auszugehen. Mehr als zwei Drittel der Nano-Unternehmen in Deutschland sind nach 1985 gegründet worden.
Die Nanotechnologie hat sich von einer forschungsnahen Disziplin zu einem Wirtschaftsfaktor entwickelt. Nanotechnologie gilt als eines der chancenreichsten Forschungs- und Anwendungsfelder der Welt, das große Industriebranchen ganz massiv beeinflussen wird. Schon heute werden Nanopartikel für wichtige gesundheitliche und praktische Anwendungen genutzt, beispielsweise um Krebszellen zu adressieren und zu bekämpfen, Trinkwasser mittels nanoporöser Filter schnell und einfach aufzubereiten, Kleidungsstücke schmutzabweisend zu beschichten oder auch Autolacke kratzfester zu machen.

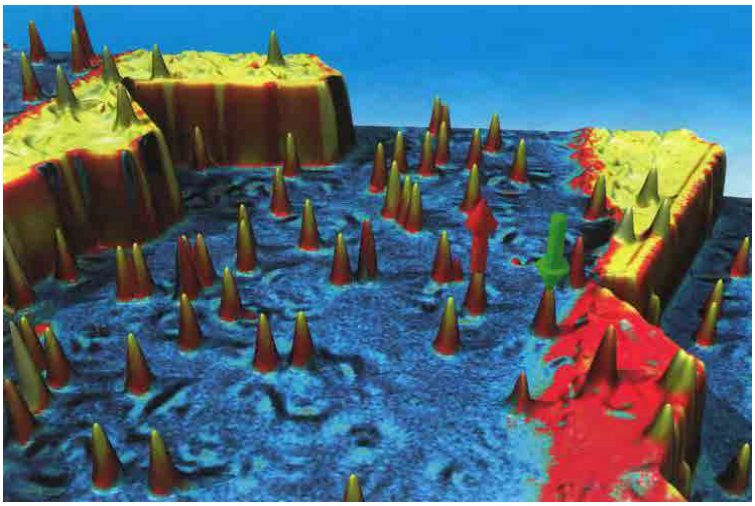


Abbildung 126 Cobalt-Atome auf einer gestuften Platinunterlage – abgetastet mit einem Rastertunnelmikroskop. - Quelle: F. Marczinowski, Uni Hamburg

Ausblick

Nano-Studiengänge werden grundständig, vertiefend und aufbauend angeboten. Fachliche Akzente reichen von Physik, Chemie und Biologie über Informations- und Elektrotechnik bis zu den Ingenieurwissenschaften. Oftmals werden regional unterschiedliche Anforderungen der Unternehmen im Einzugsbereich der Hochschulen berücksichtigt. Nano-Unternehmen fällt es zunehmend schwer, geeignete Fachkräfte am Arbeitsmarkt zu finden. Nanotechnologisch qualifizierte Fachkräfte werden zunehmend auch von Behörden, bei Verbänden und in den Hochschulen selbst beschäftigt. Aufgrund der demographischen Entwicklungen und des wirtschaftlichen Strukturwandels hat Deutschland gemäß ihrer Hightech-Strategie auch künftig einen deutlich zunehmenden Bedarf an Fachkräften. Unternehmen sind stark auf die Verfügbarkeit des erforderlichen Personals angewiesen. Für Studieninteressenten sind Überschaubarkeit und benutzerfreundliche Zugänge auf den zukunftsweisenden Bildungsmarkt der Nanotechnologie wichtig. Für die Umsetzung von Innovationen in marktfähige Produkte von morgen werden selbst bei abschwächender Konjunktur dringend junge Menschen gebraucht, die den Grundstein für eine Karriere in der Nanotechnologie legen. Die künftigen Fortschritte der Nanotechnologie entscheiden mit über die weitere Entwicklung zukunftsträchtiger Branchen und somit auch über den künftigen Wohlstand in Deutschland.

Weitere Informationen zur Studien- und Berufswahl in der Nanotechnologie:

www.bmbf.de/de/neue-werkstoffe-und-materialien-536.html - Nano- und Werkstofftechnologien

www.bmbf.de/pub/Aktionsplan_Nanotechnologie.pdf - Aktionsplan Nanotechnologie 2020

www.nano-bildungslandschaften.de – Studien- und Weiterbildungsangebote Nanotechnologie

www.dv-nano.de/infoportal/nano-studieren.html - Hochschulangebote Nanotechnologie

www.nanotruck.de – Nanoperspektiven, Studium und Beruf

www.nanoreisen.de – Abenteuer hinterm Komma

www.science-on-stage.de Faszination Nanowelten und Schule

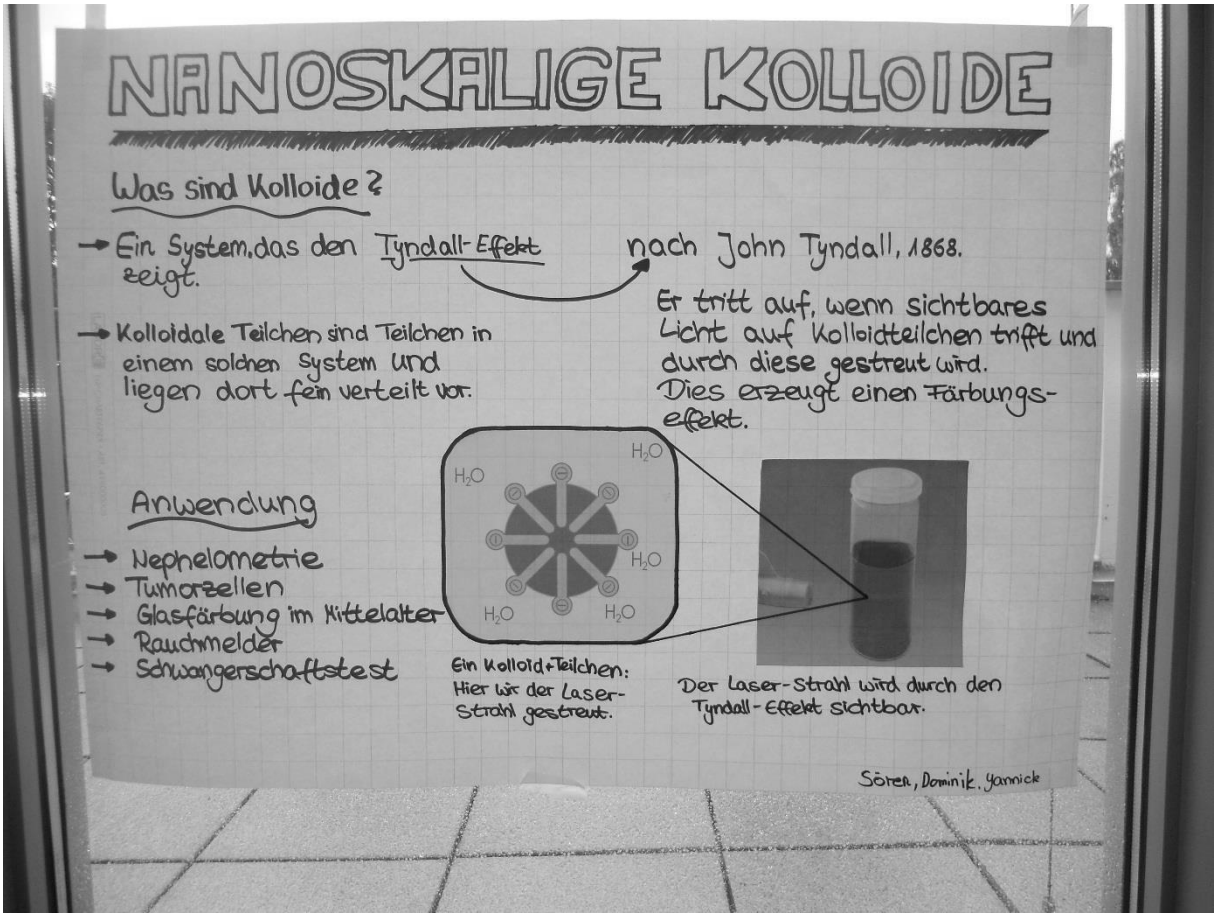
www.vditz.de/publikation/spitzenjobs-fuer-nano-nachwuchs-chancen-und-initiativen-fuer-karrieren-vom-feinsten - Nanotechnologie und Nachwuchs

14. Kapitel: Nanotechnologie im Unterricht und in Schulprojekten

Autoren

Kapiteleinleitung
StD Michael Funke, Gymnasium Zum Altenforst, Troisdorf

Unterrichtsreihen und Projekte
Christoph Petschenka, Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF), Würzburg
StD a.D. Walter Stein, St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel
StD Dr. Ralf Ricken, Hardtberg-Gymnasium, Bonn
OStR´ Dr. Vera Wethkamp, Ernst-Moritz-Gymnasium, Bonn



„Nanotechnologie“ im Unterricht und in Schulprojekten

von StD Michael Funke

Kleidung, die nicht mehr nass wird; Wandfarben, die nicht mehr verschmutzen; Tumorbehandlungen mit magnetischen Flüssigkeiten - die Nanotechnologie ist zwischenzeitlich auch in unserem Alltag angekommen. In der Werbung, über Fernsehberichte sowie beim täglichen Einkauf werden unsere Schülerinnen und Schüler mit dem Begriff „Nanotechnologie“ und den nahezu fantastisch anmutenden Eigenschaften neuer Produkte regelmäßig konfrontiert. Revolutionäre neue Entdeckungen im Nanokosmos werden zunehmend in die Entwicklung neuer Alltagsprodukte umgesetzt, die völlig neue Möglichkeiten eröffnen. Dabei beginnen man gerade erst damit die Erkenntnisse aus den Nanowissenschaften in Nanotechnologien umzusetzen, so dass ständig neue Entwicklungen dazukommen werden. Zukünftig ist auch davon auszugehen, dass sich viele unserer Schülerinnen und Schüler in ihren späteren Berufen mit der Nanowissenschaft intensiv auseinandersetzen werden.

Dieser spannende Kontext ist für die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler von zunehmender Bedeutung und hat somit auch einen enorm hohen motivatorischen Effekt. Damit bietet sich eine einmalige Chance, dieses aktuelle Thema für einen zeitgemäßen naturwissenschaftlichen Unterricht zu nutzen. Gerade dieses Themenfeld bietet gute Anknüpfungspunkte, um die verschiedenen Kompetenzbereiche gemäß der KMK-Bildungsstandards anzusprechen. Fragestellungen zu den Chancen und Risiken sowie den gesellschaftlichen Aspekten der Nanotechnologie bieten einen hervorragenden Gesprächsanlass, um die Aussagen von Werbebotschaften im Unterricht kritisch zu hinterfragen. Dies fördert bei den Schülerinnen und Schülern ein Bewusstsein für ein verantwortungsbewusstes Handeln im Umgang mit neuen Technologien. Damit eignet sich dieser Unterrichtsgegenstand hervorragend, um den Kompetenzbereich Bewertung sinnvoll in den Unterricht einzubringen. Auch für die Weiterentwicklung der Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung ist dieser Sachverhalt besonders ertragreich. Da sich die Phänomene im Nanokosmos in der Regel nur auf submikroskopischer Ebene erklären lassen, ist die Arbeit mit Modellen unabdingbar. Es bieten sich hier zahlreiche, gute Möglichkeiten Hypothesen zu Struktur-Eigenschaftsbeziehungen aufzustellen, eigene Funktionsmodelle zu erstellen und sich dabei intensiv mit den Möglichkeiten und Grenzen von Modellen zur Erklärung von Phänomenen auseinandersetzen. Somit ist dieser Themenbereich besonders gut geeignet, um ein differenziertes Modelldenken zu entwickeln. Als exemplarische Beispiele für wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen eignen sich viele wissenschaftliche Entdeckungen aus dem Bereich der Nanowissenschaften ganz hervorragend und sind damit für eine wissenschaftstheoretische Betrachtung enorm gewinnbringend.

Auch für den Kompetenzbereich Fachwissen gibt es bereits heute schon viele Anknüpfungspunkte zu den bestehenden Kerncurricula in den Fächern Biologie, Chemie und Physik, die auf den bundesweit verbindlichen Bildungsstandards für den Mittleren Bildungsabschluss beruhen. Zwar ist das Thema Nanotechnologie in den regulären Curricula der Fächer Biologie, Chemie und Physik für die Sekundarstufe I nicht als eigener Fachkontext vorgesehen, aber Erklärungen von naturwissenschaftlichen Phänomenen auf der submikroskopische Ebene sind in allen drei Naturwissenschaften ein zentraler Bestandteil des Unterrichts in der Sekundarstufe I. So wird im chemischen Anfangsunterricht der Sekundarstufe I die submikroskopische Betrachtung der Veränderung von Stoffeigenschaften eingeführt. Dabei soll auch ein erstes – erweiterbares Teilchenkonzept vermittelt werden. Prof. Dr. Ingo Eilks schlägt beispielsweise vor, die Abbildung von Atomen durch die Rastertunnelmikroskopie zu nutzen, um ein einfaches Teilchenkonzept im chemischen Anfangsunterricht zu vermitteln (siehe Literaturhinweise), welches sich in den späteren Jahrgangsstufen leicht erweitern lässt. In der folgenden Tabelle sind einige weitere Beispiele aufgeführt, in denen Beispiele aus dem Nanokosmos im regulären Naturwissenschaftsunterricht eingesetzt werden können.

Tabelle 6: Kerncurricula für den naturwissenschaftlichen Fachunterricht an allgemeinbildenden Schulen in der Sekundarstufe I und Anbindungsmöglichkeiten für das Thema „Nanotechnologie“.

Basiskonzept	Anknüpfungspunkte mit Themenbezug aus der Nanowissenschaft	Kontexte mit Fragestellungen aus den Nanowissenschaften
Struktur der Materie	Einführung eines Teilchenkonzepts (Chemie und Physik)	Vertiefung der Atommodelle und zum Modelldenken: - „Atome unter der Lupe“ /Was zeigt ein Rastertunnelmikroskop wirklich? - Tyndalleffekt: wer streut das Licht in einer kolloidalen Lösung?
	Molekulare Wechselwirkungen und Bindungskräfte (Chemie) - Van der Waals-Kräfte vs. Chemische Bindung - hydrophil-hydrophob - Adhäsion und Kohäsion	- Warum ist die Lotusblume immer sauber? - Der Salvinia-Effekt oder warum die Wasserspinne nicht nass wird. - Warum kann der Gecko Fensterscheiben hochlaufen?
	Magnetismus (Physik)	Ferrofluide – was lässt eine Flüssigkeit nach oben steigen? (Rosenzweigstacheln machen Magnetfeldlinien sichtbar)
	Aufbau der DNA (Biologie)	DNA-Isolierung aus Früchten
Energie	Oberflächenvergrößerung und Reaktivität (Chemie)	Mehlstaub- und Bärlappsporenexplosion; Würfelmodell zur Oberflächenvergrößerung Löslichkeit von Kaffee oder Zucker, …
	Photosynthese und nachhaltige Energienutzung (Biologie)	Bau einer Grätzelzelle

Beispiele aus den Nanowissenschaften zeigen aber auch die enge Verknüpfung zwischen den einzelnen Fachdiziplinen der Naturwissenschaften besonders deutlich auf. Gerade im meist stark differenzierten Fachunterricht der Gymnasien werden die engen Bezüge und Überschneidungen zwischen den Fächern Biologie, Chemie und Physik nicht immer für jeden Jugendlichen ausreichend deutlich. Daher sollten fachübergreifende Kontexte im Unterricht immer wieder dazu genutzt werden, um die Überschneidungen der Fächergrenzen erfahrbar zu machen.

In den vergangenen Jahren hat der Kompetenzbereich Kommunikation als wichtiges Unterrichtsziel eine immer größere Bedeutung erhalten. Dies wird insbesondere durch die Wahl der Unterrichtsmethoden und der daraus resultierenden Gestaltung der sozialen Interaktion initiiert. Hierzu gibt es zwischenzeitlich zahlreiche Beispiele, wie man das Thema Nanotechnologie für den Schulunterricht in den Sekundarstufen I oder II aufarbeiten kann. Ein praxiserprobtes Beispiel findet man unter Lernfirma „Nanoworld future“ von P. Wlotzka, Patrick Woldt und M. Busch (2009). Diese Unterrichtsmethode ist nach dem ChiK-Konzept (ChiK = Chemie im Kontext) aufgebaut und ermöglicht den Schülerinnen und Schülern die eigenständige Erarbeitung der Unterrichtsinhalte im eigenen Lerntempo. Aber auch außerhalb des regulären Fachunterrichts gibt es in der Schule viele Freiräume, um dieses spannende Thema zu thematisieren. Ein möglicher Unterrichtsgang für ein Unterrichtsprojekt für die Klassenstufen 8 und 9 wird im folgenden Kapitel durch Dr. Vera Wethkamp und Dr. Ralf Ricken ausführlich beschrieben. Herr Walter Stein vom St. Michael-Gymnasium in Bad Münstereifel berichtet über einige Jugend forscht Projekte an seiner Schule zum Thema Nanotechnologie. Seine *Jugend forscht*-Teilnehmerinnen und –Teilnehmer haben aus ihren Projekten schultaugliche Anleitungen für Experimente z.B. für Projektkurse (NRW, ein einjähriger Oberstufenkurs) & Wahlpflichtkurse entwickelt.

Referenzen und Literatur

Eilks, Ingo, Möllering, Jens; Leerhoff, Gabriele; Ralle, Bernd: Teilchenmodell oder Teilchenkonzept? - Oder: Rastertunnelmikroskopie im Anfangsunterricht. In: Chemie konkret 8(2) (2001), 81-85
Internetlink zum Institut der Didaktik der Naturwissenschaften – Chemie: Rastertunnelmikroskopie im Chemieunterricht (Modellversuch und Lernumgebung) unter: http://www.idn.uni-bremen.de/chemiedidaktik/material/Teilchen/teilchen/stm/stm0.htm

Petra Wlotzka, Patrick Woldt und Martin Busch, Klein – kleiner – winzig, Niveaudifferenzierte Lernstationen zu Grundlagen der Nanotechnologie, UNTERRICHT CHEMIE, Nr. 110 (2009), S. 56

Petra Wlotzka, Patrick Woldt und Martin Busch, Klein - kleiner - winzig" - eine kontextorientierte Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie, Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 62 (2009) 6, S. 355-362

Projektkurs Nanotechnologie:
http://www.lvd.de/index.php?option=com_content&task=view&id=401

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (1 von 9)

von OStR´Dr. Vera Wethkamp und StD Dr. Ralf Ricken

Im vom ehemaligen Verein „Nanotechnologie und Schule e.V.“ entwickelten Werkbuch „Faszination Nanowelten“ [1], reist der kleine grüne „Nanos“ in die „Nanometerwelt“, dem Bereich von 1 bis 100 Nanometer, und entdeckt dort die vorhandenen Strukturen. Im vorliegenden Beitrag wird ein projektorientiertes Konzept zum Einsatz dieses Werkbuchs in der Schule vorgestellt. Die methodischen und didaktischen Hintergründe dieses Konzepts sind in ausführlicher Form in [2] dargestellt. Weitere Unterrichtshilfen und Arbeitsmaterialien zu diesem Werkbuch sind in [3], [4] und [5] zu finden. Für einen umfassenden Überblick über die Grundlagen und die interdisziplinären Themenfelder der Nanotechnologie sind [18] und [19] als Lektüre gut geeignet.
Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept wurde von den Autoren in den Jahrgangsstufen 9/10 des Gymnasiums im regulären Physikunterricht, in Projektwochen und mit Schülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 7/8 im Rahmen der JuniorAkademie NRW erprobt. Je nach Angebot der Schule wäre auch die Durchführung im Differenzierungsbereich der Sekundarstufe I denkbar.

Output der Projektarbeit

Die Präsentation einer Schülerausstellung „Faszination Nanowelten“ steht am Ende der Projektarbeit. Die einzelnen Projektgruppen entwickeln dazu Ausstellungsstände an denen sie ihren Mitschülern, Eltern, Geschwistern oder Freunden Rede und Antwort stehen. Nach Durchlaufen der Ausstellung muss sich das Publikum in einem abschließenden Quiz „Wer wird Nano-Millionär?“ beweisen. Eine Lernzielkontrolle kann ebenfalls eingesetzt werden.

Inhaltliche Lernangebote des Werkbuches

Das Werkbuch „Faszination Nanowelten“ ist inhaltlich hauptsächlich in drei Teile gegliedert. Viele neue Bereiche der Nanotechnologie werden im dritten Teil angesprochen. Die ersten beiden Teile konzentrieren sich eher darauf Grundlagen zu vermitteln, die mit der Nanotechnologie verknüpft sind, aber durch ihre zeitliche Invarianz auch für das Verständnis anderer naturwissenschaftlich-technischer Bereiche wichtig sind. Das ist ein Vorteil, der bei der Auswahl der Themen für den Einsatz des Werkbuchs im Unterricht nützlich ist.

Grundlegende biologische Aspekte werden im ersten Teil für den Einstieg in die „Nanowelten“ herangezogen: Über die „Millimeterwelt“ des Blutes („Blutige Mission“, [1, S. 14]) mit seinen Bestandteilen und ihren Funktionen und über die „Mikrometerwelt“ einer menschlichen Zelle („Allein in der Zelle“, [1, S. 26]) mit ihrem komplexen Aufbau wird die Größenordnung
„Nanometer“ erreicht und anhand des die Erbinformationen tragenden DNS- Moleküls („Den Genen auf der Spur“, [1, S. 34]) vorgestellt.

Der zweite Teil des Werkbuches beschäftigt sich mit eher physikalisch-technischen Fragen. Bei der Herstellung von Halbleiterchips ist man heute bei der Optimierung durch Verkleinerung schon in den Nanometerbereich vorgedrungen. Das Element Silizium ist für

den Herstellungsprozess besonders wichtig. Grundlegende physikalische Fragen wie z.B. „Wie ist ein Siliziumkristall aufgebaut?“ und „Welche Vorstellung von den Bausteinen unserer Welt, den Atomen, hat man heute und wie hat sich diese Vorstellung im Laufe der Zeit verändert?“ werden in diesem Zusammenhang auf einer qualitativen Ebene behandelt („Abenteuer Quantenkosmos“, [1, S. 44]).

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (2 von 9)

Bei der Herstellung von Mikrochips werden diese auf Silizium-Wafer aufgebracht. Die grundlegenden technischen Schritte bei diesem Prozess und die Bedingungen, die dabei zu beachten sind, werden vorgestellt („Mission in der Chipfabrik“, [1, S. 68]).

Um Objekte im Nanometerbereich sichtbar machen zu können, z.B. Atome, reichen Licht-Mikroskope nicht aus. Mit neuen Mikroskopen, wie z.B. dem Rastertunnelmikroskop, kann man solche kleinen Strukturen auflösen. Die Frage „Wie funktionieren dieser besonderen Mikroskope?“ wird in einer anschaulichen Weise beantwortet („Unter die Lupe genommen“, [1, S. 84].

Der dritte Teil des Werkbuches stellt neben einem kurzen geschichtlichen Rückblick („Im Reich der Zwerge“ [1, S. 96]) die heutigen Anwendungsgebiete der Nanotechnologie vor. Beispiele im Alltag („Nanotechnik im Alltag“, [1, S. 100]) und in der Medizin („Minidetektive im Blut“, [1, S. 104]) werden aufgezeigt, Berufsfelder [1, S. 108] werden genannt und über die Zukunft der Nanotechnologie wird diskutiert [1, S. 116].

Methodische Lernangebote des Werkbuches

Mit methodischen Lernangeboten ist hier gemeint, dass das Werkbuch „Faszination Nanowelten“ verschieden Darstellungsformen nutzt um seine Inhalte zu vermitteln.

Ein großer Teil des Werkbuches ist in einer „erzählerischen“ Form geschrieben. Es wird die Geschichte von Nanos erzählt, einem Wesen, das sich der Nanowelt anpassen und auf Nanometergröße schrumpfen kann. Mit Nanos sollen die Schülerinnen und Schüler in ihrer Vorstellung in die Nanowelt reisen und die dort vorhandenen Strukturen entdecken. Durch Nanos Reise werden die einzelnen Bereiche der Nanotechnologie miteinander verbunden.

Zusätzlich zur der Geschichte von Nanos werden Informationstexte und Aufgaben angeboten, die der Vertiefung in die verschieden Themen und der näheren Erläuterung der Nanos-Geschichte dienen.

Neben diesen rein textlichen Darstellungsformen ist die ikonische im Werkbuch „Faszination Nanowelten“ sehr ausgeprägt. Viele farbige Hintergrundbilder, Fotos und Zeichnungen sollen die Vorstellungskraft der Schülerinnen und Schüler anregen.

Das Werkbuch öffnet sich so den unterschiedlichsten Lern- und Lesetypen. Auf welche Weise man sich den Lerninhalten des Werkbuches nähert, kann selbständig entschieden werden.

Auswahl der Lerninhalte für die Projektgruppen

Am Anfang der Projektarbeit steht die Auswahl der Lerninhalte. Dies geschieht hauptsächlich über den Einsatz zweier Videofilme [9] und [10].

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (3 von 9)

Zusammen mit den im Werkbuch angebotenen Themenfeldern haben sich folgende Unterthemen als sinnvoll herausgestellt:

- Alle Projektgruppen: Größenordnungen
- Projektgruppe 1: Wie sehen Atome aus? – Vorstellungen vom Aufbau der Materie im zeitlichen Wandel
- Projektgruppe 2: Unter die Lupe genommen –Vom Licht- zum Rastertunnelmikroskop
- Projektgruppe 3: Immer kleiner, immer schneller!? – Computer-Chips und Herstellungsverfahren
- Projektgruppe 4: Immer sauber bleiben! – Der Lotuseffekt aus physikalischer Sicht
- Projektgruppe 5: Alles Nano!? – Nanotechnik im Alltag
- Projektgruppe 6: Geht‘s auch ohne Strahlung? – Nanotechnik in der Medizin
- Projektgruppe 7: Angst vor Nanotechnologie? – Risiken und Gefahren sachlich betrachtet

Neben dem Werkbuch werden den Projektgruppen auf spezifischen „Ideenblättern“ zusätzliche Arbeitsmaterialien und Medien angeboten (siehe Ideenblatt für Projektgruppe 7 als Beispiel). Diese Ideenblätter dienen der Zielführung und enthalten Vorschläge für die inhaltliche Schwerpunktsetzung, die Durchführung passender Experimente, den Bau von Modellen und weitere Literaturangaben zur vertieften Recherche. Zudem werden spezifische Arbeitsblätter als Erschließungshilfen eingesetzt. Im Folgenden werden einige dieser Materialien exemplarisch angesprochen.

Alle Projektgruppen: Größenordnungen

Auf dem Weg in die Nanowelten über die Größenordnungen Milli-, Mikro- und Nanometer ist das Rechnen mit Potenzen unerlässlich. Um eine Vorstellung von der Größenordnung Nanometer zu bekommen, ist es wichtig, dass die Schülerinnen und Schüler Beispielaufgaben bearbeiten, in denen Größenordnungen rechnerisch verglichen werden. Das Werkbuch stellt hierzu mehrere Übungen bereit (z.B. [1, S. 51], [5, S. 42]). Zudem wurde ein Arbeitsblatt in Quiz-Form konzipiert (siehe Arbeitsblatt 1). Die Quiz-Form und der Bezug der Beispiele zu einigen Vertiefungsthemen der einzelnen Projektgruppen tragen zur Anschaulichkeit, Motivation und thematischen Orientierung bei. Das Werkbuch [1] und die Videofilme [9] und [10] dienen als Informationsquelle zur Beantwortung der Aufgaben. Auch die interaktive CD-ROM „nanoreisen“ [17] bietet eine interessante und informative Möglichkeit sich mit den verschiedenen Größenordnungen vertraut zu machen.

Projektgruppe 1: Wie sehen Atome aus? – Vorstellungen vom Aufbau der Materie im zeitlichen Wandel

Angefangen bei Demokrit bis hin zur Orbitalvorstellung unserer Zeit begibt sich diese Gruppe auf einen Streifzug durch die Geschichte der Atommodelle. Das Werkbuch mit den Kapiteln „Abenteuer im Quantenkosmos“ [1, S. 45 - 61] und „Im Reich der Zwerge“ [1, S. 96 – 99], Schulbücher,

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (4 von 9)

entsprechende Internetseiten und [4, S. 21 – 25] können als Informationsquellen dienen. Zusätzlich wurde ein Arbeitsblatt entwickelt (siehe Arbeitsblatt 2) mit dessen Hilfe die Schülerinnen und Schüler eine von mehreren Grenzen der Anwendbarkeit des Bohr'schen Atommodells erkennen sollen: Das Bohr'sche Atommodell reicht nicht aus, um beispielsweise die Geometrie von Molekülen zu erklären; das Orbitalmodell hingegen kann räumliche Strukturen vorhersagen. Als Beispiel dient das

Wassermolekül. Das Arbeitsblatt kann mit Hilfe des Werkbuchs [1] gelöst werden. Als Zusatzliteratur sind gängige Chemie-Lehrbücher hilfreich. Für die Beschreibung der Molekülbildung im Orbitalmodell dient das Arbeitsblatt hauptsächlich als Informationsquelle. Die angegebenen Informationen können die Schülerinnen und Schüler später bei der Erstellung ihres Ausstellungsstandes nutzen.

Projektgruppe 2: Unter die Lupe genommen – Vom Licht- zum Rastertunnelmikroskop

Im Kapitel „Unter die Lupe genommen" des Werkbuchs [1, S. 85] werden verschiedene Mikroskope, angefangen beim optischen Mikroskop bis hin zum Rastertunnelmikroskop, vorgestellt.

Unter der Fragestellung „Kann man Atome sehen?" kann vom Licht-Mikroskop ausgehend über dessen Auflösungsvermögen das Rastertunnelmikroskop als Mikroskop, das Atome „sichtbar" machen kann, angesprochen werden. Bei der Diskussion der Auflösungsgrenze von Licht-Mikroskopen, die sich durch Beugung an den Öffnungen ergibt, muss das Wellenverhalten des Lichtes thematisiert werden. Dies kann u.a. mit Hilfe des Arbeitsblattes 3 geschehen. Die Funktionsweise des Rastertunnelmikroskops kann auf qualitativer Ebene mit einer Simulation (siehe z.B. [4, S. 16]) erarbeitet und mit einem selbst gebauten Modell demonstriert werden.

Projektgruppe 3: Immer kleiner, immer schneller!? – Computer-Chips und Herstellungsverfahren

Im Kapitel „Mission in der Chipfabrik" des Werkbuchs [1, S. 69] werden die Prozessschritte bei der Chipherstellung beschrieben. Die Broschüre „Vom Sand zum Superchip" [22] vom BMBF liefert ergänzende Informationen. Die Chipherstellung als Anwendungsgebiet der Nanotechnik ist ein Thema aus der Arbeitswelt. Bei der Erarbeitung der wichtigsten Schritte des Chipherstellungsprozesses lernen die Schülerinnen und Schüler u.a. das Moore'sche Gesetz und das Prinzip der Fotolithographie kennen. Dieses Prinzip entspricht dem Prinzip beim Fotografieren. So können hier in einem neuen Zusammenhang noch einmal im Bereich „Optische Linsen" die Lerninhalte „Strahlenverlauf bei Sammellinsen", „Bilderzeugung durch Sammellinsen" und der „Fotoapparat", aufgegriffen werden. Als zentrale Erschließungshilfen dienen das Arbeitsblatt 4 und der Bau und die Demonstration eines Analogiemodells.

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (5 von 9)

Projektgruppe 4: Immer sauber bleiben! – Der Lotuseffekt aus physikalischer Sicht

Der Lotus-Effekt wird im Werkbuch nicht erklärt. Die Schülerinnen und Schüler bekommen zu diesem Thema deshalb schon in einer frühen Phase Zusatzliteratur. Ausgewählt wurde der Artikel „Der Lotus-Effekt im Badezimmer“ aus dem Magazin „Maßstäbe“ der Physikalisch- Technischen Bundesanstalt [11], in dem in einer anschaulichen und erzählenden Weise der Lotus-Effekt und seine Anwendung beschrieben werden. Mit Hilfe des Arbeitsblattes 5 werden die Begriffe hydrophob und hydrophil über den Vergleich von Adhäsions- und Kohäsionskräften an Genzflächen eingeführt. Die Schülerinnen und Schüler sollen diese Begriffe auf die Oberfläche einer Lotus-Blume oder auch auf andere, ähnlich strukturierte Pflanzen (z.B. Kapuzinerkresse) übertragen und den Effekt demonstrieren. Auch hier können Modelle gebaut werden. Der zweite Teil des Arbeitsblattes gibt Hilfestellungen und Sicherheitshinweise zu den Experimenten in denen zwei Industrieprodukte mit Lotus-Effekt untersucht werden sollen.

Projektgruppe 5: Alles Nano!? – Nanotechnik im Alltag

Im Kapitel „Nanotechnik im Alltag“ des Werkbuchs [1, S. 100 - 103] werden verschiedene Anwendungsgebiete der Nanotechnologie aufgelistet und Alltagsprodukte mit Nano-Effekten vorgestellt. Weitere Recherchemöglichkeiten werden genannt. Die Schülerinnen und Schüler dieser Projektgruppe stellen insbesondere heraus, dass aufgrund der Kleinheit von Nanopartikeln deutlich geänderte Eigenschaften von Materialien zu erwarten sind und diese heute mit Werkzeugen der Nanotechnologie immer besser gezielt erzeugt werden können. Weiterführende Literatur (z.B. [18], [19], [20], [21]wird bereitgestellt. Mit der NanoBox: Informationsserie „Wunderwelt der Nanomaterialien“ inklusive interaktiver CD-ROM [16] wird in diesem Zusammenhang vom Fonds der Chemischen Industrie ebenfalls passendes Material angeboten. Auch auf der Internetseite [23] sind entsprechende Versuchsanleitungen zu finden, die in der Schule mit relativ einfachen Mitteln umzusetzen sind. Zudem bekommen die Schülerinnen und Schüler den Auftrag in Supermärkten, Drogerien, Bekleidungshäusern, etc. nach Produkten mit ausgewiesenen Nano-Effekten zu suchen, diese kritisch zu hinterfragen und zu demonstrieren.

Projektgruppe 6: Geht‘s auch ohne Strahlung? – Nanotechnik in der Medizin

Im Kapitel „Nanodedektive im Blut“ des Werkbuchs [1, S. 104 – 107] erhalten die Schülerinnen und Schüler einen ersten Eindruck von den Möglichkeiten der Nanotechnologie in der Medizin. Weitere Recherchen (z.B. [19], [24]) werden durchgeführt. Zahlreiche geplante bzw. schon realisierte Anwendungen in Diagnostik und Therapie werden erarbeitet und vorgestellt. Insbesondere die Magnetflüssigkeitshyperthermie als mögliche Alternative zur herkömmlichen Strahlentherapie bei der Bekämpfung spezieller Krebstumore bietet sich hier als Vertiefungsthema an. Wie die Herstellung magnetischer Flüssigkeiten mit Schulmitteln gelingen kann, wird an anderer Stelle beschrieben (siehe Themengebiet „Nanomedizin und Lebenswissenschaften“ im vorliegenden Buch).

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (6 von 9)

Projektgruppe 7: Angst vor Nanotechnologie? – Risiken und Gefahren

Das beigefügte Ideenblatt für diese Projektgruppe zeigt einige Aspekte auf, die im Zusammenhang mit möglichen Risiken und Gefahren der Nanotechnologie vertieft bearbeitet werden können. Als Aufhänger hat sich hier der Roman „Beute“ von Michael Crichton [25] in Kombination mit ein paar Filmszenen aus [10], die – ähnlich wie im Roman beschrieben – den Angriff von „Nanoschwärmen“ auf Menschen zeigen, bewährt. Wichtig ist hierbei, dass eine sachliche Betrachtung angestrebt und zwischen Utopien und realen Gefahren unterschieden wird. Das Interview im Werkbuch [1, S. 116 – 121] mit Herrn Prof. Dr. Buchal vom Kernforschungszentrum Jülich geht ebenfalls auf den Roman „Beute“ ein und kann als sachliche Grundlage für weitere Recherchen (z.B. [26] - [29]) und Diskussionen dienen. Es sollte herausgestellt werden, dass naturwissenschaftliche Erkenntnisse sowohl mit Nutzen als auch Gefahren verbunden sein können, und diese öffentlich diskutiert werden müssen, um so einen möglichst verantwortungsvollen Umgang mit neuem Wissen in der gesamten Gesellschaft zu erreichen. Querverbindungen zur Kernenergie und Gentechnik bieten sich ebenso an, wie auch Vergleiche mit der Asbestproblematik und dem leichtfertigen Umgang mit der Röntgenstrahlung in den ersten Jahren nach ihrer Entdeckung.

Verlauf der Projektarbeit

In der Einstiegsphase der Projektarbeit werden die beiden Einführungsfilme [9] und [10] gezeigt. Die Projektgruppen werden festgelegt und die Schülerinnen und Schüler lesen sich in das Werkbuch [1] ein. Der Umgang mit Größenordnungen wird in allen Gruppen geübt. Diese Phase nimmt insgesamt etwa 4 – 5 Unterrichtsstunden in Anspruch. In der sich anschließenden Phase der Vertiefung, Recherche und Produktion beschäftigen sich die Gruppen – zusätzlich auch in Heimarbeit – mit ihren jeweiligen Projektthemen. Die spezifischen Ideen- und Arbeitsblätter, Angaben zur weiteren Internet- und Literaturrecherche, Materialien für die Durchführung von Experimenten und den Bau von Modellen werden zur Verfügung gestellt. Die Ausstellungsstände zur Ausstellung „Faszination Nanowelten“ werden entwickelt und aufgebaut. Erfahrungsgemäß werden für diese Phase insgesamt etwa 5 – 6 Unterrichtsstunden benötigt. In der Präsentationsphase werden die Ausstellungsstände vorgestellt. Kursintern bietet sich hier die Methode des Gruppenpuzzles an und kann mit etwa 2 Unterrichtsstunden veranschlagt werden. Gruppenvorträge für externe Besucher können natürlich ebenfalls angeboten werden. Zum Abschluss testen die Besucher ihr Wissen in einem Quiz „Wer wird Nano-Millionär?“, welches die Projektgruppen gemeinsam entwickelt haben.

Schlusswort

Insgesamt haben die Erfahrungen der Autoren gezeigt, dass ein Einsatz des Werkbuchs „Faszination Nanowelten“ zusammen mit den hier vorgestellten Materialien ein attraktives Lernangebot für Schülerinnen und Schüler sein kann. Der Projektunterricht stellt in diesem Zusammenhang eine geeignete Unterrichtsform dar und fördert in hohem Maße das selbstständige und kooperative Lernen im Kontext eines modernen Forschungsfeldes. Die Einbindung außerschulischer Lernorte wie beispielsweise universitäre Einrichtungen mit Bezug zur Nanotechnologie (z.B. [31]) wurde ebenfalls realisiert und stellt eine weitere Bereicherung dar.

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (7 von 9)

Abbildung 127 Poster zur Nanotechnik in der Medizin

Abbildung 128 Modell eines Rastertunnelmikroskops: Unter den halbierten Tischtennisbällen befinden sich kleine Magnete; die Sonde des Mikroskops wird hier durch einen Federkraftmesser modelliert, an dessen Ende sich ebenfalls ein kleiner Magnet samt halbiertem Tischtennisball befindet

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (8 von 9)

Literatur

[1] Arbeitgeberverband Gesamtmetall – THINK ING. und Nanotechnologie und Schule e.V. (Hrsg.), Faszination Nanowelten. Aulis Verlag Deubner GmbH & Co. KG, Köln 2005

[2] OStR´ Dr. Vera Wethkamp, Entwicklung und Erprobung eines methodisch-didaktischen Konzepts zum selbständigen Lernen mit dem Werkbuch „Faszination Nanowelten“ im Unterricht. Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der Zweiten Staatsprüfung für das Lehramt für die Sekundarstufe II/I, Studienseminar Vettweiß, Bonn 2005

[3] Arbeitgeberverband Gesamtmetall – THINK ING. und Nanotechnologie und Schule e.V. (Hrsg.), Faszination Nanowelten- Tipps für den Unterricht. Aulis Verlag Deubner GmbH & Co KG, Köln 2005

[4] Arbeitgeberverband Gesamtmetall – THINK ING. und Nanotechnologie und Schule e.V. (Hrsg.), Faszination Nanowelten- Unterrichtshilfen, Heft 1.

[5] Arbeitgeberverband Gesamtmetall – THINK ING. und Nanotechnologie und Schule e.V. (Hrsg.), Faszination Nanowelten- Arbeitsblätter, Heft 2.

[6] Das vom Verein entwickelte Werkbuch „Faszination Nanowelten“ sowie weitere Materialien zum Thema „Nanotechnologie und Schule“ können über die Seiten http://www.science-on-stage.de/ oder http://www.mic-net.de/ bezogen werden.

[7] J. Grehn (Hrsg.), Metzler Physik. J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und C.E.Poeschel Verlag GmbH, Stuttgart 1988

[8] R. Sexl, I. Raab, E. Streeruwitz und K. Bethge, Materie in Raum und Zeit – Einführung in die Physik, Bd. 3. Verlag Moritz Diesterweg und Otto Salle Verlag, Frankfurt am Main und Verlag Sauerländer AG, Aarau 1980

[9] Sendung Quarks & Co. vom 03.04.2001 zum Thema Faszination Nanotechnologie, WDR 2001. Siehe auch http://www.quarks.de.

[10] Das Nanoschnitzel – Visionen und Wirklichkeit der Nanotechnologie, BR 2006

[11] Magazin der Physikalisch- Technischen Bundesanstalt PTB, Maßstäbe, Heft 5: Dezember 2004, FischerDruck, Peine 2004

[12] J. Grehn und J. Krause (Hrsg.), Metzler Physik. Schroedel Verlag GmbH, Hannover 1998

[13] J. Pütz (Hrsg.), Einführung in die Elektronik. Fischer Taschenbuch Verlag GmbH, Frankfurt am Main 1974

[14] F. Bader und H.-W. Oberholz (Hrsg.), Dorn-Bader, Physik, Gymnasium Sek I. Schroedel Verlag GmbH, Hannover 2001

[15] Mitgliederzeitschrift der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physik Journal, April 2005, Wiley-Vch Verlag, Weinheim 2005

[16] Fonds der Chemischen Industrie (Hrsg.), NanoBox, Informationsserie Wunderwelt der Nanomaterialien. Frankfurt am Main 2005. Siehe auch http://www.fonds.vci.de.

[17] VDI Technologiezentrum GmbH, CD-ROM nanoreisen, Abenteuer hinterm Komma. Eine virtuelle Erlebnisreise in die Welten des Mikro- und Nanokosmos. Lekkerwerken, Düsseldorf 2004. Siehe auch http://www.nanoreisen.de.

[18] Nils Boing, Alles Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbeck bei Hamburg, Februar 2006

[19] Uwe Hartmann, Faszination Nanotechnologie. Elsevier GmbH, Spektrum Akademischer Verlag, München 2006

[20] Thomas Vilgis, Die Molekül-Küche, Physik und Chemie des feinen Geschmacks. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 2007

[21] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Nanotechnologie – Innovation für die Welt von Morgen, Druckerei Bonifatius, Paderborn, Bonn, Berlin 2004

Unterrichtseinheit zur Nanotechnologie in der Sek I (9 von 9)

Literatur (Fortsetzung)

[22] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Vom Sand zum Superchip – 300mm-Wafer für die Nanoelektronik, Druckhaus Locher GmbH, Köln, Bonn, Berlin 2004
[23] http://www.nanoforschools.ch
[24] http://www.bayer.de
[25] Michael Crichton, Beute (Prey). Roman, Goldmann-Verlag, München 2005
[26] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Nanotechnologie – kleine Dinge, große Wirkung. Chancen und Risiken, WAZ Druck, Duisburg, Bonn, Berlin 2008
[27] http://www.nano-sicherheit.de
[28] http://www.bmbf.de/de/5915.php
[29] NanoBioNet e.V. (Hrsg.), Themenreihe NanoBioNet, Band 2 - Sicherheit der Nanotechnologie, Unionprint Satz und Druck GmbH, Saarbrücken 2007
[30] http://www.chemie.uni-bonn.de/pctc/ (Homepage des Instituts für Physikalische und Theoretische Chemie der Uni Bonn)

Jugend forscht Projekte zur Nanotechnologie (1 von 2)

Nanotechnologie am St. Michael-Gymnasium in Bad Münstereifel

von StD a.D. Walter Stein

Seit 25 Jahren (Stand 2010) nehmen Schülerinnen und Schüler des St. Michael-Gymnasiums von Bad Münstereifel am Wettbewerb Jugend forscht teil. Geforscht wird nachmittags und häufig auch an Wochenenden und in den Ferien. Ziel dieser außerunterrichtlichen Aktivität ist es, naturwissenschaftlich interessierte und begabte Schülerinnen und Schüler weit über den normalen Unterricht hinaus zu fördern. Davon profitieren nicht nur die Jugendlichen, sondern letztendlich auch unsere Gesellschaft, die einen großen Bedarf hat an qualifizierten Fachkräften aus dem technischen und naturwissenschaftlichen Bereich. Doch gerade hieran mangelt es. Warum?

Kinder und Jugendliche können sich doch ein Leben ohne die moderne Technik gar nicht mehr vorstellen. Handy, Computer, Internet, ... sind in ihren Alltag integriert. Sie sind mit ihnen aufgewachsen. Sie sind technikbegeistert! Doch trotz dieser Technikbegeisterung mangelt es, wie oben erwähnt, seltsamerweise am dringend benötigten naturwissenschaftlichen Nachwuchs in Deutschland. Industrie, Universitäten und Schulen versuchen hier mit zahlreichen Aktivitäten gegenzusteuern. Eine humorvolle Physikshow, spannender Physikunterricht und leichte Experimente mit Erfolgsgarantie und schon hat man die Herzen der Kinder gewonnen – glaubt so mancher Zeitgenosse. Doch die durch Wissenschaftskonsum entstandenen positiven Gefühle verschwinden schnell, wenn die Jugendlichen sich plötzlich anstrengen müssen, wenn die Experimente nicht mehr auf Anhieb gelingen, wenn sie für die Lösung des Problems mit der komplexen Natur der Dinge und mit ihren eigenen Unzulänglichkeiten kämpfen müssen.
Durchhalten! Nicht aufgeben! Erfahren, dass erst die Anstrengung die zum Ziele führt dafür sorgt, dass man wesentlich nachhaltigere Glücksgefühle bei der Problemlösung erlebt, als bei einem zu leicht erworbenen oder geschenkten „Sieg“. Lernen, dass die Arbeit selber ein Vergnügen sein kann. Schüler, die dies erlebt haben, haben kämpfen gelernt. Sie haben keine Angst mehr vor naturwissenschaftlichen Leistungskursen und keine Angst mehr vor natur- und ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen mit ihren guten beruflichen Zukunftsperspektiven.

Ein idealer Weg diesen „Flow“ zu erleben ist die Anfertigung einer eigenen Forschungsarbeit und die damit verbundene Teilnahme am Wettbewerb Jugend forscht. Aus diesem Grund betreiben wir seit 25 Jahren am St. Michael-Gymnasium das Projekt „Miniforschung“.

Besonders erfolgreich beim Wettbewerb Jugend forscht waren meine Schülerinnen und Schüler mit Arbeiten aus dem Bereich der Nanotechnologie. Hier drei Beispiele:

1. Graphen – Die dünnste Schicht der Welt!
   (Bundessieg Jugend forscht 2008 und 2010)
2. Herstellung und Nachweis von Kohlenstoff-Nanoröhrchen mit schulischen Mitteln
   (Bundessieg Jugend forscht 2004)
3. Photonische Kristalle: Kleine Kugeln – ganz groß!
   (Jugend forscht 2008)

Jugend forscht Projekte zur Nanotechnologie (2 von 2)

Schüler der oben angeführten Jugend-forscht-Arbeiten haben die folgenden Anleitungen für Lehrer und Schüler geschrieben, damit diese sich im Rahmen einer Physik- oder Chemie-AG forschend mit Graphen, Kohlenstoffnanoröhrchen und Photonischen Kristallen beschäftigen können.

Herstellung photonischer Kristalle (siehe Kapitel 2; Versuch 10)
Sebastian Klick

Elektrische Kontaktierung von Graphen (siehe Kapitel 7; Versuch 32)
Luca Banszerus

Herstellung von Graphen in der Schule (siehe Kapitel 8; Versuch 33)
Luca Banszerus

Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen (siehe Kapitel 8; Versuch 34)

Die Jugend-forscht-Arbeiten selbst, sowie weitere Jugend-forscht-Arbeiten des St. Michael-Gymnasiums findet man unter http://www.jufo.stmg.de/

Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (1 von 3)

Unterstützung für Schulen in Sachen Nanotechnologie durch die Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF)

Nanotechnologie gehört längst zu unserem Alltag und wird ihn weiter, teils sicher auch entscheidend prägen. Diese Zukunftstechnologie eröffnet zahlreiche Chancen für die Gestaltung einer lebenswerten Welt von morgen. Sie wirft aber auch Fragen auf, denen wir uns kritisch und rechtzeitig stellen müssen. Deshalb ist es wichtig, junge Menschen über Nanotechnologie zu informieren. Wir müssen sie auf die Möglichkeiten neugierig zu machen, die darin stecken, sie aber auch für mögliche Risiken sensibilisieren und sie auf die neuen technologischen wie ökonomischen Herausforderungen vorbereiten.

Hier können Schulen und Lehrkräfte einen wesentlichen Beitrag leisten. Die Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF) unterstützt sie dabei und gibt Anregungen, wie sie das Zukunftsthema „Nanotechnologie“ in den Unterricht einbetten können. Im schulischen Alltag bieten sich vielfältige Ansatzpunkte, um das Thema aufzugreifen. Dies ist im naturwissenschaftlich-technischen Unterricht möglich, aber auch fächerübergreifend, um so gesellschaftliche oder ethische Aspekte einzubeziehen. Seminarkurse eignen sich genauso wie Schulprojekte, Neigungsgruppen, Arbeitsgemeinschaften oder der herkömmliche Unterricht.

Als gemeinnützige Bildungsinitiative bietet die IJF Fortbildungen für Lehrkräfte naturwissenschaftlich-technischer Fächer zum Thema Nanotechnologie an. Darüber hinaus führt die Bildungsinitiative Schulbesuche unter dem Titel „Faszination Nanotechnologie“ durch. Beide Angebote wurden in Zusammenarbeit mit dem Cluster Nanotechnologie entwickelt, werden kontinuierlich weiterentwickelt und sind durch die Förderung des Europäischen Sozialfonds in Bayern kostenfrei. Die lehrplanergänzenden Angebote der IJF unterstützen Pädagogen bei der Ausbildung von Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern, damit diese den selbstbewussten und verantwortungsvollen Umgang mit Nanotechnologie und weiteren Zukunftstechnologien lernen.

Abbildung 129 Ausprobieren, Forschen und Experimentieren beim Nano-Schulbesuch der IJF.

Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (2 von 3)

Nano-Lehrerfortbildungen

Zielgruppe:	Lehrkräfte von Realschulen, Gymnasien und Fach-/Berufsoberschulen
Inhalte:	- Aktuelles aus Forschung und Entwicklung - Anregungen für Unterricht und Projekte: Seminarthemen, Arbeitsblätter, Diskussionsmethoden - Experimente von Nanobeschichtungen - Kontakte zu Forschungseinrichtungen und Technologie-Unternehmen

Nano-Schulbesuche

Zielgruppe:	Schülerinnen und Schüler (ab 8. Jahrgangsstufe) Forschen, Präsentieren und Diskutieren.
Inhalte:	Vortrag: Spannendes aus der Welt der Nanotechnologie Experimente, Mikroskopie, Forschungsaufgaben, Rollenspiel, Projektarbeit (Schüler arbeiten selbstständig an Postern)
Berufsorientierung:	Filme, Ausbildungsberufe, Studiengänge

Nano-Schulwettbewerb des Clusters Nanotechnologie

Jährlicher Wettbewerb für weiterführende Schulen in Bayern (Klassen, Schülergruppen, Einzelschüler). Eingereicht werden können Filme, Präsentationen, Projektarbeiten, Seminararbeiten und vieles mehr. Zu gewinnen gibt es attraktive Geldpreise. Weitere Informationen unter: http://www.initiative-junge-forscher.de/angebote/nano-schulwettbewerb.html und unter: www.nanoinitiative-bayern.de/nachwuchsfoerderung/schulwettbewerb-nanotechnologie.html.

Auch die im Rahmen des IJF-Schulbesuchs erstellten Poster können beim Nanoschulwettbewerb des Clusters Nanotechnologie eingereicht werden.

Abbildung 131 Fortbildung für Lehrkräfte: Experimente zur Nanotechnologie

Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (3 von 3)

Informationen und Kontakt:

Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF)
Josef-Martin-Weg 52
Campus Hubland Nord
979074 Würzburg

kontakt@initiative-junge-forscher.de
Tel. 0931 31699-10
Fax 0931 31699-190

www.initiative-junge-forscher.de
Facebook: InitiativeJungeForscher

Autorenverzeichnis (alphabetische Reihenfolge)

M.Sc. Jan Attig, Universität Köln
Versuchsanleitung: 02

Dr. Waldemar Baron, Gelsenkirchen
Kapiteleinleitung: 13

Prof. Dr. Wilhelm Barthlott, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Kapiteleinleitung: 04

Luca Banszerus, ehemaliger Jugend-forscht-Teilnehmer, St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel
Versuchsanleitung: 09, 33

StR Tobias Busche, Montessori-Gymnasium, Köln
Versuchsanleitung: 03

Prof. Dr. Alfred Forchel, Julius-Maximilians-Universität, Würzburg
Vorwort

StD Michael Funke, Gymnasium Zum Altenforst, Troisdorf
Kapiteleinleitung: 14; Versuchsanleitungen: 01, 06, 07, 08, 19, 20, 21, 22, 23, 36

Dr.-Ing. Peter Grambow, Nanoinitiative Bayern, Würzburg
Kapiteleinleitung: 11

Prof. Dr. Andreas Greiner, Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie, Universität Bayreuth
Kapiteleinleitung: 03; Versuchsanleitungen: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18

Prof. Dr. Wolfgang Heckl, Generaldirektor des Deutschen Museums in München & TU München
Vorwort

Prof. Dr. Hubert Jäger, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden
Kapiteleinleitung: 08

Dr. Lorenz Kamschulte, IPN Kiel, Abteilung Didaktik der Chemie
Kapiteleinleitung: 09

Sebastian Klick, ehemaliger Jugend-forscht-Teilnehmer, St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel
Versuchsanleitung: 10

Benedikt Lorbach, ehemaliger Jugend-forscht-Teilnehmer, St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel
Versuchsanleitung: 34

Prof. Dr. Axel Lorke, Lehrstuhl für Experimentalphysik, Universität Duisburg-Essen
Kapiteleinleitung: 02

Moritz Plötzing, ehemaliger Jugend-forscht-Teilnehmer, St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel
Versuchsanleitung: 34

Christoph Petschenka, Initiative junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF), Würzburg
Kapitel 14: Unterstützung in Sachen Nanotechnologie

StD Ludger Remus, Albertus Magnus-Gymnasium, Köln
Versuchsanleitung: 17

Autorenverzeichnis (alphabetische Reihenfolge)

StD Dr. Ralf Ricken, Hardtberg-Gymnasium, Bonn
Kapitel 14: Unterrichtsreihe zur Nanotechnologie in der S I

PD Dr. Johannes Russer, Technische Universität München
Kapiteleinleitung: 07; Versuchsanleitungen: 31

Prof. Dr. Giuseppe Scarpa, Technische Universität München
Kapiteleinleitung: 07; Versuchsanleitungen: 31

Prof. Dr. Michael Schillmeier, University of Exeter
Kapiteleinleitung: 12

Dr. Otmar Schmid, Helmholtz Zentrum München, Institut für Lungenbiologie
Kapiteleinleitung: 10

Meike Spiess, ehemalige Jugend-forscht-Teilnehmerin, St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel
Versuchsanleitung: 34

StD Walter Stein, St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel
Kapitel 14: Jugend forscht Projekte zur Nanotechnologie

Dr. Tobias Stöger, Helmholtz Zentrum München, Institut für Lungenbiologie
Kapiteleinleitung: 10

PD Dr. Stefan Thalhammer, Universität Augsburg und Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut
Kapiteleinleitung: 06, 10; Versuchsanleitungen: 04, 05, 09, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 35, 37, 38

PD Dr. Marc-Denis Weitze, Technische Universität München
Kapiteleinleitung: 01

OStR´ Dr. Vera Wethkamp, Ernst-Moritz-Gymnasium, Bonn
Kapitel 14: Unterrichtsreihe zur Nanotechnologie in der S I

Prof. Dr. Achim Wixforth, Universität Augsburg
Kapiteleinleitung: 05

Prof. Dr. Dr. Axel Zweck, RWTH Aachen & VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf
Kapiteleinleitung: 11

Abbildungsnachweise

Umschlag vorne:	großes Foto: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme eines menschlichen Metaphase-Chromosoms, Stefan Thalhammer (Urheber u. Lizenzeigentümer) Links: Tyndall-Effekt, Stefan Thalhammer; Mitte: Lotuseffekt, IJF; Rechts: Experiment Nanodimension, IJF.
Umschlag hinten:	Links: Lotuseffekt, Michael Funke; Mitte: Gecko, Michael Funke; Rechts: Kohlenstoffröhrchen, Prof. Dr. Hubert Jäger.

Kapitelbilder:

Kapitel 1:	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 2:	mit freundlicher Genehmigung von CENIDE, Universität Duisburg-Essen
Kapitel 3:	Matthias Burgard (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 4:	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 5:	Achim Wixforth (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 6:	Stefan Thalhammer (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 7:	PD Dr. Johannes Russer, Prof. Dr. Giuseppe Scarpa (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 8:	Hubert Jäger (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 9:	mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums, München
Kapitel 10:	Stefan Thalhammer (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 11:	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 12:	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 13:	Stefan Thalhammer (Urheber und Lizenzeigentümer)
Kapitel 14:	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)

Abbildungen:

Abbildung 1:	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 2,3	Jan Attig (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 4-7:	Tobias Busche (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 8:	Linke Abbildung: Urheber: Mario Sarto (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brillanten.jpg, abgerufen am 31.10.2016. rechte Abbildung: Urheber: Ra'ike/Gallery (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Graphite_(very_pure)_-_Ceylon.jpg, abgerufen am 31.10.2016.
Abbildung 9	Prof. Dr. Axel Lorke (Urheber und Lizenzeigentümer)

Abbildungsnachweise

Abbildung 10	Linke Abbildung: Urheber: H.K.D.H. Bhadeshia (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: http://images.google.de/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2F2%2F22%2FDiamond_Cubic-F_lattice_animation.gif&imgrefurl=https%3A%2F%2Fde.wikipedia.org%2Fwiki%2FDiamantstruktur&h=248&w=252&tbnid=1xqQuFhcJs44MM%3A&docid=9RvO2mO1DExVOM&ei=I7zaV6mMKoWtUYuBrvgI&tbm=isch&iact=rc&uact=3&dur=967&page=0&start=0&ndsp=36&ved=0ahUKEwjpqZ6K1pHPAhWFVhQKHYuAC48QMwgzKAAwAA&bih=943&biw=1920, abgerufen am 31.10.2016. Rechte Abbildung: Urheber: Deepkling (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GraphitGitter4.png, abgerufen am 31.10.2016.
Abbildung 11	Urheber: Sponk; (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buckminsterfullerene_animated.gif, abgerufen am 31.10.2016.
Abbildung 12	Mit freundlicher Genehmigung von CENIDE, Universität Duisburg-Essen
Abbildung 13	Urheber: Julian Voss-Andreas (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Well_(Quantum_Corral).jpg, abgerufen am 31.10.2016.
Abbildung 14	Mit freundlicher Genehmigung von CENIDE, Universität Duisburg-Essen
Abbildung 15-18	Stefan Thalhammer (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 19	Jan Attig (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 20- 27	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 28	St. Michael-Gymnasium, Bad Münstereifel (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 29-33	Sebastian Klick (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 34	Andreas Greiner und Mitarbeiter (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 35	Ziyin Fan, Uni Bayreuth (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 36, 37	Rika Schneider, Uni Bayreuth (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 38	Matthias Burgard, Dr. Roland Dersch, Uni Bayreuth (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 39	Matthias Burgard, Uni Bayreuth (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 40	Uwe Justus, Uni Marburg (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 41	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 42- 49	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 50	Achim Wixforth (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 51	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)

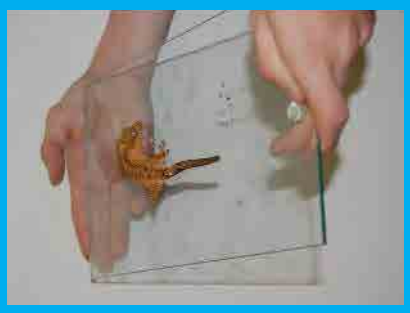
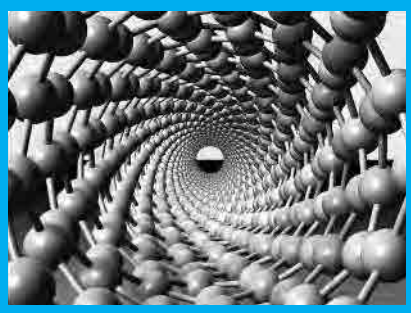
Abbildungsnachweise

Abbildung 52-53	Achim Wixforth (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 54-58	Stefan Thalhammer (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 59-65	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 66-71	PD Dr. Johannes Russer, Prof. Dr. Giuseppe Scarpa (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 72-75	Luca Banszerus (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 76:	Linke Abbildung: Urheber: User:Sven (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Hybridorbital#/media/File:Sp3-Orbital.svg, abgerufen am 31.10.2016. rechte Abbildung: Urheber: User:Sven (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Hybridorbital#/media/File:Sp2-Orbital.svg, abgerufen am 31.10.2016.
Abbildung 77-79	Hubert Jäger (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 80	Urheber: Sponk; (creative commons license: CC BY-SA 3.0); Online unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buckminsterfullerene_animated.gif, abgerufen am 31.10.2016.
Abbildung 81	entnommen aus: A. Zweck et al, 2009 (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 82	Hubert Jäger (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 83	Bayer Science Material (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 84	Z. Naturforschung (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 85-89	Luca Banszerus (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 90-98	Benedikt Lorbach, Moritz Plötzing, Meike Spiess (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 99, 100	mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums München
Abbildung 101-106	Michael Funke (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 107	Stefan Thalhammer (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 108	T. Stöger und O. Schmid (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 109	T. Stöger und O. Schmid (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 110	T. Stöger und O. Schmid (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 111	Europäisches Patentamt (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 112	Europäisches Patentamt (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 113	Woodrow Wilson International Center for Schoolars (Urheber und Lizenzeigentümer)

Abbildungsnachweise

Abbildung 114	i-stock und ras materials (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 115	Netzwerk NanoCarbon (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 116	TU Chemnitz (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 117	Bayer und Netzsch (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 118	Dr. Grambow (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 119	Netzwerk NanoCarbon (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 120	Dr. Luther, VDI (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 121	BMBF, http://www.nano-map.de, August 2013 (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 122	EADS (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 123	BMBF/VDI TZ (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 124	Universität Duisburg Essen (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 125	Infineon (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 126	F. Marczinowski, Uni Hamburg (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 127	Ralf Ricken & Vera Wethkamp (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 128	Ralf Ricken & Vera Wethkamp (Urheber und Lizenzeigentümer)
Abbildung 129-133	Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF) (Urheber und Lizenzeigentümer)

ISBN 978-3-00-058613-2 (gebundene Ausgabe)

Nanotechnologie in der Schule

Aus der Forschung in die Schule

Die Nanotechnologie entwickelt sich zu einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts und ist ein sehr spannendes und ergiebiges Thema für den naturwissenschaftlichen Unterricht. Dieses Buch richtet sich daher vor allem an naturwissenschaftliche Fachlehrkräfte und soll eine Brücke zwischen der Schule und der aktuellen Forschung schlagen. Großer Wert wurde darauf gelegt, das Thema möglichst vielseitig zu betrachten. In 14 Kapiteln werden die unterschiedlichen Teilgebiete der Nanowissenschaften, ihre Anwendungen im Alltag, ihre soziologische und wirtschaftliche Bedeutung für unsere Gesellschaft, Gesundheitsrisiken und die damit verbundenen Chancen und Risiken thematisiert. Jedes Kapitel wird von einem renommierten Fachwissenschaftler auf diesem Teilgebiet eingeleitet. Mit insgesamt 38 Experimenten in sehr unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden werden Möglichkeiten aufgezeigt, dieses Thema in der Schule im Unterricht, in Wahlpflichtfächern oder in Arbeitsgemeinschaften auch experimentell zu behandeln. Ein einfaches Ampelsystem zeigt auf einem Blick den experimentellen Aufwand für die einzelnen Versuche an.

ISBN 978-3-00-058613-2 (gebundene Ausgabe)

Initiative Junge Forscherinnen und Forscher e.V. (IJF)
Josef-Martin-Weg 52 | Campus Hubland Nord | 97074 Würzburg
Telefon 0931 31699-10 | Fax 0931 31699-190
kontakt@initiative-junge-forscher.de | www.initiative-junge-forscher.de
www.facebook.com/InitiativeJungeForscher

EUROPÄISCHE UNION
EUROPÄISCHER SOZIALFONDS
ESF IN BAYERN
WIR INVESTIEREN IN MENSCHEN
Bayerisches Staatsministerium für Arbeit und Soziales, Familie und Integration