Zeitschrift: NAGON / Naturforschende Gesellschaft Ob- und Nidwalden
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Ob- und Nidwalden
Band: 3 (2005)

Artikel: Forschungsfront Nanotechnologie
Autor: Knop, Karl / Bernhart, Christian / Tiefenauer, Louis
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1006740

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Forschungsfront Nanotechnologie

Thematische Plattform
im Pfarreizentrum Alte Post, Alpnach
Freitag, 8. Oktober

Nanotechnologie befasst sich mit Objekten in der Grössenordnung von wenigen Nanometern und stösst damit in den Bereich von atomaren und molekularen Strukturen vor. Das physikalische Verhalten solcher kleinster Objekte wird von der Quantenmechanik dominiert, was zu neuartigen Phänomenen führt. Die elementaren biologischen Strukturen sind auch solche «Nano-Objekte». In der Nanotechnologie verschwinden die Grenzen von Physik, Chemie und Biologie.

Einleitung

Dr. Karl Knop, CSEM Neuchâtel

Seit der bahnbrechenden mit dem Nobelpreis für Physik 1986 ausgezeichneten Entwicklung des Rastertunnelmikroskops (STM) durch Binnig und Rohrer aus dem Jahre 1981 ist ein neues interdisziplinäres Forschungsthema kometenartig entstanden: die Nanotechnologie. Das STM hat den Blick in die kleinsten Dimensionen bis zur atomaren Auflösung geöffnet, in einen Grenzbereich der Natur, wo die verschiedenen Disziplinen der Physik, Chemie und Biologie zu verschmelzen beginnen. Forscher aus den traditionell getrennten Gebieten haben sich zu diesem gemeinsamen Thema der Nanowissenschaften zusammen geschlossen im Bestreben die Grenze zu den kleinsten funktionellen Strukturen auszuloten.

Im nachfolgenden Beitrag von Christian Bernhart «Nanotechnologie sprengt die Grenzen der Dimensionen und Disziplinen» wird das Forschungs- und Anwendungsgebiet der Nanotechnologie kurz beschrieben.

Organisation: *Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique: Dr. Karl Knop, Dr. Ulrich Claessen*

Programm

- *Eröffnung, Begrüssung, Ziele und Ablauf Dr. Karl Knop, CSEM Neuchâtel*
- *1. Einführungsvortrag: Immer kleiner – Grenzen der Nanotechnologie heute, Harry Heinzelmann, CSEM Neuchâtel*
- *2. Einführungsvortrag: Pushing limits in Nanotechnology: Nano and Bio: Learning from Nature, Dimitrios Fotiadis, Biozentrum Uni Basel*
- *Marktplatz Nanotechnologie: eine Ausstellung im CSEM Alpnach mit Beiträgen vom Paul Scherrer Inst., der EMPA, von Leister Process Technologies Microsystems Divison und dem CSEM.*
- *3. Einführungsvortrag: Nanotechnologie – Grenzenloser Fortschritt? Dr. Louis Tiefenauer, Paul Scherrer Inst., Villigen*
- *Podiums-Diskussion (Arena), Andreas Hirstein (Moderation, Redaktor NZZ am Sonntag), Harry Heinzelmann, Dimitios Fotiadis, Louis Tiefenauer, Thomas Jung (PSI), Klaus von der Rippe (Uni Zürich), Andreas Stemmer (ETHZ)*
- *Schlusswort, Dr. Karl Knop*

Die Technologieplattform «Forschungsfront Nanotechnologie» vom 8. Oktober 2004 in Alpnach stand ganz unter dem Zeichen des Generalthemas «Limits'04», welches vom Organisationsteam für die Jahrestagung der scnat gewählt wurde. Die Nanotechnologie gibt Anlass zu drei grundsätzlich verschiedenen Betrachtungen:

- die physikalische Grenze zu den kleinsten funktionellen Strukturen

- die Grenze zwischen der unbelebten und belebten Welt
- die philosophischen und ethischen Grenzen der Forschung

Zu diesen drei Fragen haben die drei Wissenschaftler Harry Heinzelmann vom CSEM, Dimitrios Fotiadis vom Biozentrum der Universität Basel und Louis Tiefenauer vom Paul-Scherrer-Institut vorgetragen. Der dritte Beitrag findet sich in leicht gekürzter Fassung weiter unten.

In einer abschliessenden Podiumsdiskussion, geleitet von Andreas Hirstein, Wissenschaft-Redaktor bei der *NZZ am Sonntag*, haben die drei Referenten mit der Unterstützung von weiteren Experten Stellung zum Tagesthema genommen und Publikumsfragen beantwortet.

Nanotechnologie sprengt die Grenzen der Dimensionen und Disziplinen

Christian Bernhart, lic. phil. I, Journalist

Die Nanotechnologie ebnet mit der gezielten Veränderung im Molekular- und Atombereich den Weg zur Umgestaltung der Materie, so zu neuen Werkstoffen, diagnostischen Werkzeugen oder zu effizienterer Energienutzung. Grenzen zwischen Physik, Chemie und Biologie werden verwischt, der interdisziplinäre Ansatz ist Gebot. Vor der breiten Anwendung sind noch Jahre der Forschung und Risikobeurteilung nötig.

Vom blossen Auge längst nicht mehr zu erkennen übersteigt die Nanotechnologie die herkömmliche Vorstellungskraft. Im Kleinstbereich von einigen Millionstel Millimeter beeinflusst, verändert und konstruiert diese neue Technologie Materie und Partikel zu neuen Verbindungen mit ganz neuen Eigenschaften. Beispiel Kohlenstoff: Durch die Bogenentladung zweier Graphitelektroden gelingt es dem Japaner Sumio Iijima 1991 erstmals eine Kohlenstoffstruktur als nadelartige Röhren, Nanotubes, herzustellen. Die Röhrchen haben je nach Ausrichtung ihrer in Sechsecken angeordneten Kohlenstoffmoleküle unterschiedliche Eigenschaften. Sie sind entweder leitend wie Metall oder wirken als Halbleiter, wie Silizium. Eine weitere Eigenschaft: einwandige Nanotubes haben eine Steife, die zehnmal grösser als jene von Stahl ist. Nanotubes gelten heute als Bausteine künftiger Computerchips. Auf dem Marktplatz der Forschungsfront Nanotechnologie hat Referent Harry Heinzelmann am CSEM hergestellte Nanotubes präsentiert und erläutert.

Wissenschaft und Technik

Um Nanodimensionen erst zu erfassen, darin gezielte Änderungen vorzunehmen, sind neue technische Instrumente Voraussetzung. Das erste Instrument, das beide Eigenschaften aufweist und als Meilenstein der Nanotechnologie gilt, ist das 1981 von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer am IBM-Labor in Rüschlikon entwickelte Rastertunnelmikroskop, kurz STM, für Scanning Tunneling Microscope, genannt. Eine extrafeine Nadelspitze tastet die Oberfläche über den Atomen dort ab, wo aufgrund der Elektronen ein Tunnelstrom fliesst. Die feinen Bewegungen werden mit Hilfe eines piezoelektrischen Kristalls als Strom-

Abb. 1
Mit dem Rastertunnelmikroskop (STM) lassen sich die unterschiedlichen Eigenschaften solcher Nanotubes darstellen: Manche sind Leiter – dann fliesst besonders viel Strom zwischen der Probe und der Tunnelspitze des Mikroskops, andere Halbleiter – dann fliesst weniger Strom. Im Bild wird das als eine Mischung dunkler und heller Röhrchen sichtbar.

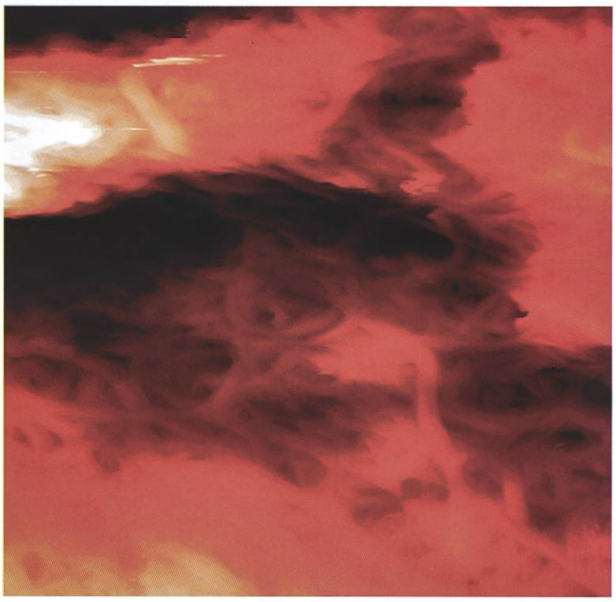

Abb. 1

schwankungen weitergleitet, als Landkarte aufgezeichnet und über Computergrafik sichtbar gemacht. Beim Berühren der Spitze und unter Verstärkung des Tunnelstroms können auch einzelne Atome aus der Oberfläche gelöst und neu positioniert werden.

Das STM, für das Binnig und Rohrer 1986 – zusammen mit Ernst Ruska, Entwickler des Elektronenmikroskops – den Nobelpreis erhielten, weist aber auch auf eine neue Forschungsdimension hin. Der Durchbruch im Nanobereich gelingt erst, wenn Wissenschaft und Technik Hand in Hand zusammenarbeiten. In der Folge hat Binnig das STM mit den Physikern Calvin Quate und Christoph Gerber weiterentwickelt zum Kraftmikroskop, kurz AFM, für Atomic Force Microscope, genannt. Ein Siliziumblock wird mittels Photolitographie so bearbeitet, dass auf der einen Seite ein vorspringender Träger entsteht, dessen Ende mit einer nach unten führenden Spitze versehen ist. Fährt die Spitze über die Atome, so bewegt sich der Träger, dessen Bewegungen über einen Laserstrahl registriert werden.

In diese hohle Spitze lässt sich mittels Gallium-Ionen ein Loch schiessen, den Hohlkörper als Reservoir benützen, um so auf der Oberfläche Material im Nanobereich deponieren zu können. Einen Dispenser dieser Art haben André Meister und Harry Heinzelmann am CSEM entwickelt. Damit können gezielt Biomoleküle oder Lösungen in einem sehr engen Mikrometer-Raster abgegeben werden.

Top-down, Bottom-up oder Kombination

Um in Nanodimensionen vorzustossen werden zwei unterschiedliche Strategien angewandt. Im Top-down-Ansatz dominiert vor allem die Physik und die physikalische Technik. Zur Anwendung gelangen Techniken der Mikrotechnik und der Computerindustrie, wobei man versucht über die Miniaturisierung vorzustossen. Nanoschichten werden über die physikalische oder chemische Abscheidung aus der Gasphase hergestellt oder durch thermisches Hochgeschwindigkeitsspritzen erzeugt. Strukturen werden mittels verschiedenen Lithographie-Verfahren erzielt.

Der gegenteilige Weg ist der Bottom-up-Ansatz. Komplexe Nanostrukturen werden hier gezielt aus atomaren und molekularen Bausteinen aufgebaut. Oder man überlässt den Aufbau den Selbstorganisationsprozessen, die vielen molekularen Verbindungen eigen ist. Dieser Ansatz wird heute vor allem durch die Chemie und Biologie präsentiert. Erfolgversprechend ist aber die Verbindung beider Ansätze. Auf Substraten gewachsene Polymere lassen sich beispielsweise durch elektrische Ströme strukturieren. Oder der oben erwähnte AFM-Dispenser kann als Schreib-Lithograph zur Veränderung gewachsener Oberflächen mit reaktiven Molekülen benutzt werden.

Visionen und Risiken

Der Bottom-up-Ansatz wird auch als Urprinzip der Natur verstanden, insofern sich eine Pflanze oder der Mensch aus einer einzigen Zelle entwickeln. Viele Forscher begreifen deshalb die Zelle als perfekte Nanomaschine, die, wenn man sie denn einmal richtig begreift, als Vorbild für die technische Miniaturisierung gelten könnte. Zu diesem Ansatz hat an der Forschungsfront Nanotechnologie Dimitrios Fotiadis referiert.

In der Nanotechnologie gelten andere Gesetzmässigkeiten als in unserer täglichen Makrowelt. Ein Nanopartikel verliert die typischen Festkörpereigenschaften. Bei solch kleinen Teilen ist das sehr grosse Verhältnis von Oberfläche zum Volumen dominierend. Die Reaktionsfähigkeit mit Nachbarteilen ist gross, da solche grosse Oberflächen in der Regel nicht abgesättigte Atome aufweisen, die dann gerne mit Atomen anderer Partikel reagieren. Diese Eigenschaften macht sich die Nanotechnologie für die Entwicklung von Sensoren zu nutzen, wie die Firma Leister auf dem Marktplatz demonstriert hat.

Es besteht generell aber auch das Risiko, dass Nanopartikel über Atemwege oder die Haut in den Körperkreislauf gelangen und aufgrund der erwähnten Oberflächenstruktur unerwünschte Reaktionen auslösen können. Das Immunsystem des Menschen ist zwar gegen gewisse Nanopartikel der Umwelt gewappnet, andere, bereits bekannte, wie Dieselruss-Nanopartikel, können hingegen Atemwegerkrankungen auslösen. Die Vielseitigkeit und der künftige Einsatz der Nanotechnologie ist so gross, dass sich das Risiko eher von Fall zu Fall und nicht generell abschätzen lässt. Zurzeit werden sich in erster Linie die Froscher in den Labors diese Frage stellen müssen. Louis Tiefenauer erläuterte in seinem Referat, inwiefern Risikoerwägungen der Nanotechnologie dem grenzenlosen Fortschritt im Wege stehen.

Der Artikel ist im scnat-INFO 2/2004 im Vorfeld des Jahreskongresses erschienen und hier mit der Genehmigung des Autors in leicht abgeänderter Form wiedergegeben.

Nanotechnologie – grenzenloser Fortschritt?

Dr. Louis Tiefenauer, Paul Scherrer Inst., Villigen

Einführung ins Thema

Nanotechnologie bestimmte in den letzten Jahren stark Visionen und Ziele in den technischen Wissenschaften. Nutzer von Kuchenblechen sind begeistert, dass dank Nanotechnologie nichts mehr anklebt, und Forscher sehen unbegrenzte Möglichkeiten für neue Materialien. Entsprechen diese Erwartungen der Wirklichkeit, ist grenzenloser Fortschritt möglich, wünschenswert? Die Frage nach der Orientierung drängt sich auf: was sollen wir angesichts der schier grenzenlosen Möglichkeiten tun, was lassen? Diese Kernfrage der Ethik stellt sich auf verschiedenen Ebenen, nicht nur bei der Anwendung von Wissen, bei der Technologie.

Wer einen interessierten Laien fragt, was er von Nanotechnologie erwarte, bekommt mit grosser Sicherheit keine klare Antwort. Falls der Laie gut informiert ist, wird er Beispiele nennen, die er von Promotoren der Nanotechnologie gehört hat: schmutzabstossende Fensterscheiben, noch

schnellere Computer, bessere medizinische Diagnostik und Therapien – und so weiter. Vielleicht wird er auch die Szenarien der Unheilpropheten kennen, die in der Nanotechnologie eine grosse Gefahr sehen. Ausser Kontrolle geratene Roboter könnten alles auf unserer Erde abbauen, sodass am Ende nur noch ein grauer Schleim vorhanden sein wird. Welche Chancen und Risiken sind mit Nanotechnologie verbunden? Ist wirklich eine technologische Revolution wie vor 150 Jahren im Gange oder werden heute neue technologische Anwendungen lediglich schnell entwickelt? Die unklare Antwort des Laien spiegelt primär die Schwierigkeit wider, was denn unter Nanotechnologie zu verstehen sei. Diese Frage nach der Abgrenzung des Begriffes kann zwar von Interesse sein, für die Beurteilung des technologischen Fortschritts ist sie aber nicht von Bedeutung.

Fortschritt ist auch heute meist positiv annotiert. Soll aber Fortschritt dennoch begrenzt werden und wer soll diese Grenzen setzen? Der Mensch als begrenztes Wesen leidet an den Grenzen seiner Macht, seines Wissens, seiner Erdgebundenheit, und die Sehnsucht Gott-ähnlich zu sein, um diese Grenzen aufzuheben, ist vielen nicht unbekannt. Ist Nanotechnologie das Mittel zur ultimativen Macht über die Natur, zur Allwissenheit und zu grenzenloser Mobilität? Oder anders gefragt: wohin soll uns der Fortschritt dank Nanotechnologie führen? Diese Frage betrifft uns alle und sollte nicht ausschliesslich von Naturwissenschaftlern und Technokraten beantwortet werden.

Grenzen in der Natur und im Leben sind oft nicht absolut, sondern Grauzonen. Sogar wenn der Mensch am Ende seines Lebens an *die* Grenzen gelangt, ist der Zeitpunkt des Übergangs fliessend, weshalb Herz- von Hirntod unterschieden werden können. Der Tod ist *das* Beispiel für eine gesetzte Grenze, die sich zwar verschieben, jedoch nicht aufheben lässt. Oft bestimmen aber Grenzen, die nur vermeintlich absolut sind, unser Leben oder sie werden durch die Gesellschaft gesetzt. Es ist nun spannend solche Grenzen auszuloten und dabei die Nanowissenschaft und nanobasierte Anwendungen im Fokus zu behalten.

Grenzen der Wissenschaft

Wissenschaft ist per se grenzenlos, Pseudowissenschaft ist abgeschlossen. Sogenannten Heilsverkündern, die alles genau zu wissen meinen, muss misstraut werden. Wissenschaft ist nicht bloss ein ständiges Anhäufen von Wissen, bis der Topf voll ist. Unerwartet taucht gelegentlich eine neue Theorie auf, die es zu prüfen gilt, bis sie als Wissen anerkannt werden kann. Die Grenzen der Wissenschaft ist ihre Stärke. An der Grenze zum Unbekannten werden neue Fragen aufgeworfen und dort kann Neues erkannt werden. Wissenschaft ist instabil und sie scheut gesetzte Grenzen, Dogmen.

Grenzen werden auch erreicht, wenn die Forscher mit ihren Sinnen keine messbaren Signale mehr wahrnehmen können. Gemäss Galileo Galilei soll das Messbare gemessen und das Nichtmessbare messbar gemacht werden. Forschergenerationen haben seither Instrumente gebaut. Mit den Messgeräten können wir unsere Sinne erweitern und

ergänzen wie das Paradeinstrument der Nanotechnologie, das «atomic force microscope» (AFM), anschaulich zeigt. Oberflächen werden abgetastet, ähnlich wie mit Fingerkuppen einer Hand die Rauhigkeit einer Oberfläche abgetastet wird. Mit dem AFM können Unebenheiten von einem Zehnmillionstel Millimeter erfasst werden. Damit lassen sich selbst Atome, Grundbausteine unserer Welt, abbilden. Dieses Beispiel zeigt, dass mit technischen Geräten *Grenzen verschoben* werden können. Damit wird unser Verständnis über die Natur und über Eigenschaften von Materialien wesentlich erweitert.

In der Wissenschaft stösst man aber auch auf Fragen, die mit Instrumenten nicht zu beantworten sind: «Warum ist nicht nichts?» Die Antwort eines Kosmologen: «Weil das Nichts unstabil ist», befriedigt nicht. Wissenschaftlich eher haltbar ist, einzugestehen, dass wir Menschen mit dieser Frage an eine absolute *Grenze der Erkenntnis* stossen. Viele Grenzen können aber sicher auch in Zukunft mit neuen technischen Geräten überschritten werden. Im Prinzip sind die Kombinationsmöglichkeiten dafür unbegrenzt. Aber nicht alle diese Möglichkeiten können auch wirklich untersucht werden, weil die Ressourcen dafür fehlen. Die Auswahl der interessanten Fragestellung ist ein wichtiger Prozess.

Die Geschichte der Wissenschaft zeigt, dass immer wieder Überraschungen auftreten. Als Beispiel sei die heute bestätigte Kontinentaldrift, oder genauer ausgedrückt, die Plattentektonik, erwähnt. Der Meteorologe Alfred Wegener hat diese Theorie 1915 auf Grund von geographischen und geologischen Daten postuliert und hartnäckig verteidigt. Sie wurde aber erst 50 Jahre später anerkannt, vor allem auch deswegen, weil er den Mechanismus der Plattenverschiebung nicht erklären konnte. Dieses Beispiel zeigt, dass ein Überbrücken von *Disziplingrenzen* notwendig sein kann, um einen bedeutenden wissenschaftlichen Fortschritt zu erreichen.

Grenzen in der Forschung

Kunst und Wissenschaft sind zwei der bedeutendsten Kulturleistungen des Menschen. Wissenschaftliche Erkenntnisse können durch blosses Nachdenken, wie z.B. in der Mathematik, oder durch genaues Beobachten, z.B. von Planetenbewegungen in der Astronomie, und selbstverständlich im Sinne von Galilei durch Experimente gewonnen werden. Das systematische Bemühen Erkenntnisse zu gewinnen, wird Forschung genannt. Die Ausführungen sollen hier auf naturwissenschaftliche Forschung beschränkt werden. Wo sind hier gesetzte Grenzen vorhanden und wo können, bzw. sollen diese überschritten werden?

Der Begriff Forschung soll zunächst präzisiert werden. Es wird oft von Forschungsgebieten oder Forschungsfeldern gesprochen. Diese umfassen ein Ziel, z.B. die «Energieproduktion der Zukunft» oder einen Katalog von miteinander verwandten Fragestellungen, wie die Untersuchung von Prozessen, die zur Krebsentstehung führen. Die *Grenzen* von Forschungsgebieten, die ja recht willkürlich festgelegt werden, sind unscharf und in ständiger Wandlung. Es werden unfruchtbare Debatten über das Wesen und die Bedeutung von

Abb. 2
Eine magnetische Flüssigkeit, ein so genanntes Ferrofluid, das unter der Einwirkung eines magnetischen Feldes steht. Ferrofluide sind Suspensionen feinster Nanopartikel.

Abb. 2

disziplinärer bzw. interdiszplinärer Forschung geführt und darüber, wo die Grenzen der Disziplinen verlaufen. Forschung kann Neues zum Verständnis der Natur sowie für technische Anwendungen liefern. Oft sind die *Abgrenzungen* zwischen Grundlagen und Anwendungen unscharf und man spricht von grundlagen-orientierter bzw. anwendungs-orientierter Forschung. Wenn ein grosses Problem mit einer neuartigen Technologie gelöst werden soll, wird auch von Programmforschung gesprochen. Welcher dieser Begriffe verwendet wird, kann für einen Wissenschaftler relevant werden. Die Förderung eines vorgeschlagenen Forschungsprojektes kann wesentlich davon abhängen, ob sich die begrifflichen Vorstellungen des Gutachters und des Antragstellers decken. Es werden dabei *Grenzen der Kommunikation* sichtbar, die oft schwer überwindbar sind.

Um eine Unterstützung für ein Forschungsprojekt zu erhalten, muss innerhalb eines Forschungsgebietes ein klares Ziel definiert werden. Der Traum eines jeden Forschers ist es aber, frei und ohne allzu eng festgelegte Vorgaben eine bedeutende Entdeckung machen zu können. Eine zu starke *Eingrenzung* des Zieles kann einerseits den Fortschritt behindern, unklare Zieldefinitionen können andererseits zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. Sollen beim Festlegen eines Forschungszieles Grenzen gesetzt werden und wenn ja, von wem? In der Schweizerischen Bundesverfassung wird im Art. 20 die Forschungsfreiheit als Grundrecht aufgeführt: «Die Freiheit der wissenschaftlichen Lehre und Forschung ist gewährleistet». Wie steht es mit potentiell diskriminierender Forschung? Soll z.B. die Suche nach Genen, welche für Homosexualität verantwortlich sein könnten, untersagt werden? Wie stark kann eine Kommission oder der einzelne Forscher die Forschungsfreiheit bei der Festlegung der Ziele für sich reklamieren? Eine liberale Haltung lehnt Verbote grundsätzlich ab unter der Voraussetzung, dass das Ziel relevant, die zu erwartenden Ergebnisse nicht vorwiegend schädlich, und die verwendeten Mittel und Methoden nicht dem Gesetz widersprechen.
Bei der Frage der zulässigen Methode wird schnell sichtbar, dass *Forschung nicht unbegrenzt* sein kann. Wer würde unwidersprochen die gesetzlich festgelegten Grenzen für Tierversuche aufheben? Die allgemeine ethische Frage «Was sollen wir tun», wird normativ: «Was dürfen wir tun?» Es besteht ein gut abgestützter gesellschaftlicher Konsens darüber, dass das Prinzip des Nicht-Schadens bei der Wahl der Methode befolgt werden muss. Übertretungen würden zudem weitere Verschärfungen von Vorschriften nach sich ziehen, was die Forscher zusätzlich motiviert, die Regeln einzuhalten. Doch auch ohne Übertretungen von Kodizes oder von *gesetzlichen Grenzen* wird die gesellschaftliche Diskussion über ein Verbot von Tierversuchen weitergeführt. Viele Kritiker betrachten nämlich die Ergebnisse, die durch Tierversuche gewonnen wurden, als irrelevant oder lehnen Tierversuche grundsätzlich ab mit der Begründung, die Würde der Kreatur werde verletzt. Die *Grenze des gesetzlich Erlaubten* muss sich nicht mit der Grenze des *persönlich Vertretbaren* decken.

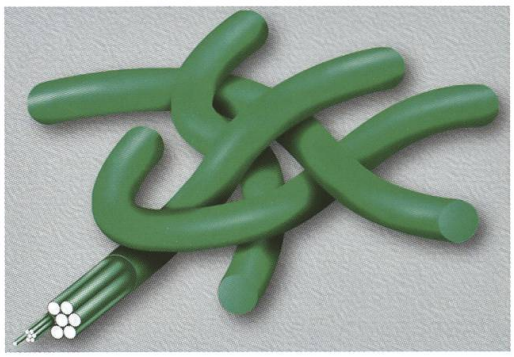

Abb. 3

Abb. 3
Modifikation des Kohlenstoffs: die Nanotubes. Ihren Namen verdanken die 1991 entdeckten Röhren ihren Ausmassen: Die dünnsten von ihnen haben einen Durchmesser von lediglich einem Nanometer (Millionstel Millimeter).

Forschung ist nicht nur in der Wahl der Forschungsmethode *begrenzt,* sondern auch wegen der zur Verfügung stehenden Mittel. Forschung ist teuer und es ist schwierig für den einzelnen Forscher einen angemessenen Anteil der *begrenzt vorhandenen Mittel* zu erhalten. Die knappen Mittel sollen aber nicht gemäss einer falsch verstandenen Verteilungsgerechtigkeit verteilt werden, sondern nach Qualitätskriterien. Doch wie können bei einer nicht klar messbaren Erfolgskontrolle die knappen Mittel sinnvoll und gerecht verteilt werden? Bei der Festlegung von Prioritäten und der Zuteilung von Mitteln spielen die Werte derjenigen Personen, die entscheiden, eine zentrale Rolle. Sollen die Mittel in sogenannte *Grenzforschung* fliessen, wo das Risiko zwar hoch, der potentielle Gewinn aber ebenfalls hoch ist? Oder sollen diese für ebenfalls wichtige Abklärungen zur Verfügung stehen, die bald zu Anwendungen führen? Dieser Prozess der Verteilung von Forschungsgeldern ist mit Macht verbunden. Deshalb kann Ethik ein Ratgeber sein, welcher ohne Zeitdruck die Verhältnisse analysiert und Interessengebundenheit offen legt. Oft wird aber das Einbinden von ethischer Kompetenz mit der Begründung abgelehnt, dass dadurch eine nicht annehmbare Einmischung stattfindet und Forschung *eingegrenzt* werde. Bestimmt kann der Entscheid über Verwendung von Forschungsmitteln nicht nach rein demokratischen Prinzipien erfolgen. Gerade aber bei der Einführung neuer Technologien ist der Einbezug der Gesellschaft sinnvoll. Sonst werden von der Gesellschaft und deren Vertretern, den Politikern, mittelfristig für bestimmte Forschungsprojekte keine Mittel mehr zur Verfügung gestellt.

Grenzen setzen bei Anwendungen von Forschungsergebnissen

Wie bisher ausgeführt soll die Wissenschaft möglichst frei bleiben, und der Forschung soll nur in begründeten Fällen Grenzen gesetzt werden. Wie steht es bei der Anwendung von Forschungsergebnissen? Ein wichtiger Punkt scheint mir, dass besonders auch den Forschern die Ambivalenz jeder Technologie und Erfindung immer wieder bewusst ist: ein Messer kann heilen oder töten. Der Forscher soll sich primär auf die Forschungsziele konzentrieren. Als Insider hat er auch eine besondere Mitverantwortung für voraussehbare Probleme bei potentiellen Anwendungen. Diese Mitverantwortung kann auch bedeuten, dass er sich *selber Grenzen setzt* und etwas nicht tut, was er tun könnte. Die Geschichte der Entwicklung der Atombombe liefert dazu ein Beispiel. Das Ziel der Amerikaner war es, eine Waffe zur Verfügung zu haben, um das monströse Naziregime zu besiegen. Dies wurde bekanntlich auch erreicht, doch zu welchem Preis? Albert Einstein bereute es bis zu seinem Tode, die Entwicklung der Atombombe propagiert zu haben, Eduard Teller dagegen nicht. Die beiden Wissenschaftler hatten unterschiedliche Werte-Prioritäten. Teller war der Ansicht, dass Massenvernichtungswaffen der Friedenssicherung dienen. Handelte Teller deshalb unverantwortlich? Beide Wissenschaftler haben nach bestem Gewissen gehandelt. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass bei bestimmten Anwendungen *Grenzen durch die*

Gesellschaft gesetzt werden müssen, um unerwünschte Folgen zu vermeiden, da nicht allein auf die Verantwortung der einzelnen Akteure gesetzt werden kann.
Ein aktuelles Beispiel ist das reproduzierbare Klonen von Menschen. Verantwortung heisst, der Gesellschaft Rechenschaft abzulegen. Aus medizinischen Gründen ist das Klonen von Menschen nicht zu verantworten, da durch das Klonen von Tieren bekannt geworden ist, dass gravierende gesundheitliche Probleme auftreten. Sicher könnte weitere Forschung solche «Nebenwirkungen» wenigstens teilweise beheben. Doch bei der Frage des Klonens von Menschen stellt sich ganz grundsätzlich die Frage: «Sollen wir das wirklich tun?» Die meisten Leute werden das mit Nein beantworten, aber nicht alle. Diese wenigen Befürworter führen Gründe an, die nicht ganz unvernünftig sind. Bei erblicher Belastung liessen sich z.B. durch Klonen von Nachkommen Krankheiten vermeiden. Doch Grenzen werden hier von der Gesellschaft gesetzt, nicht nur von religiösen Menschen, die Klonen aus innerster Überzeugung ablehnen.

Zurück zur Technologie-Diskussion. Die Entdeckung der Kernspaltung bedeutete zwar einen gewaltigen wissenschaftlichen Fortschritt. Die Anwendung dieses Wissens in neuartige Waffen und erst später zur Energieerzeugung zeigt deutlich, wie ambivalent Forschungsanwendungen meist sind. Erst ca. 30 Jahre nach der Entdeckung der Kernspaltung ist dann auch die friedliche Nutzung der Kernspaltung in der Gesellschaft kritisch diskutiert worden und Kernenergie ist bis heute ein kontroverses Dauerthema geblieben. Solche Kontroversen könnten auch bei der Nanotechnologie auftreten und Akzeptanzdiskussionen können in den nächsten Jahren erwartet werden.

Jede Anwendung birgt Chancen und Risiken. Das Ergebnis einer Nutzen-Schaden-Analyse wird eine Hilfe bieten beim Entscheiden, *wo Grenzen gesetzt* werden sollen. Ob ein Risiko akzeptiert wird, hängt vor allem auch davon ab, ob die Betroffenen einen Nutzen erfahren. Auferlegte Lasten oder Risiken, ohne erkennbaren Nutzen, werden nicht akzeptiert, wie die Ablehnung von Genfood durch eine Mehrheit der Bevölkerung zeigt. Ein bestimmtes Risiko kann diskussionslos akzeptiert oder strikte abgelehnt werden, je nach Situation. Ich gebe ein Beispiel: Die Nebenwirkungen der massiven Bestrahlungen bei Krebserkrankung werden in Kauf genommen, während Grenzwerte für die Strahlenbelastung im Umkreis von Kernkraftwerken millionenfach tiefer angesetzt werden und in den Bereich der natürlichen Schwankungen zu liegen kommen. Sicherlich wird eine solche unterschiedliche Akzeptanz von Risiken, abhängig vom erkennbaren Nutzen, auch bei nanobasierten Anwendungen auftreten. Wie bei andern technischen Errungenschaften – ein bekanntes Beispiel ist das Automobil – werden *Grenzen* technischer und verhaltensmässiger Natur *zur Schadenminimierung* festgelegt. Wir besitzen zum ersten Mal frühzeitig die Möglichkeit, vor einer technologischen Anwendung eine fundierte Diskussion über Risiken zu führen.

Grenzen und Erwartungen bezüglich der Nanotechnologie

Im gesamten Bereich Nanotechnologie werden Schäden heute vor allem durch die toxische Wirkung von Nanopartikeln befürchtet. Es gibt aber nur wenige toxikologische Untersuchungen über Nanopartikel definierter Grösse. Nanopartikel können auf verschiedene Art und Weise in die Umwelt gelangen, wie z.B. durch Abbau von Gesteinen in Minen oder weltweit bei Verbrennungsprozessen. Sie sind deshalb allgegenwärtig. Neuerdings können grössere Mengen von definierten Nanopartikeln industriell hergestellt werden. Am bekanntesten sind Fullerene, «Fussballmoleküle» aus Kohlenstoffatomen, die in kleineren Mengen auch im Russ von Kerzenflammen zu finden sind. Die Toxizität von Nanopartikeln hängt von verschiedenen Faktoren ab: dem Aufnahmeweg in den Körper, der Konzentration, der Oberfläche und vermutlich auch von der Grösse. Es ist deshalb nicht damit zu rechnen, dass durch intensivierte Forschungsanstrengungen schnell eine generelle Entwarnung gegeben werden kann. Eine gewisse Unsicherheit wird bleiben. Ob diese Fussballmoleküle sowie die mit ihnen verwandten Nanoröhrchen grosstechnisch eingesetzt werden, wird vor allem davon abhängen, welchen Nutzen sie bringen werden.

Ein *prophylaktisches Setzen von Grenzen* für nanotechnologische Anwendungen wird von der Mehrheit der Bürger *abgelehnt*. Grenzen sollen gezielt gesetzt werden, wenn Schäden vermieden werden können. In mehreren Studien zur Technikfolgenabschätzung von Nanotechnologie wurden Problemfelder erkannt. Es liessen sich aber kaum neue ethische Fragen, aufgeworfen durch Nanotechnologie, erkennen. Wegen der grossen Unbestimmtheit für zeitlich fern liegende Anwendungen wird dennoch eine Begleitforschung begrüsst. Damit könnten Schadenpotentiale frühzeitig erkannt und geeignete Massnahmen rechtzeitig ergriffen werden. Ein solches Vorgehen ist eine sinnvollere Reaktion auf die heute bestehende Ungewissheit, als ein generelles Moratorium für die Nanotechnologie zu fordern. Mit einem Memorandum lassen sich Vermutungen über schädliche Auswirkungen von neuen Materialien nicht aus der Welt schaffen. Anders als bei der Kernenergie kann bei der Nanotechnologie bereits in einem Frühstadium die Bevölkerung in die Diskussion einbezogen werden. Es gilt diese grosse Chance zu nutzen. Dabei sollen auch utopische Visionen diskutiert werden, im Bewusstsein, dass Vieles in der Zukunft anders sein wird, als wir uns das heute ausmalen. Anstelle der visionären mechanisch agierenden Nanorobotern im Blut könnten zum Beispiel Viren-basierte Systeme Krebszellen eliminieren. Durch eine gesellschaftliche Diskussion über solche Utopien kann Akzeptanz für konkrete nanotechnologische Anwendungen in naher Zukunft erreicht werden. Dabei werden grundlegende Fragen aufgeworfen. *Technik-Kritiker* sollen *nicht* mit dem Schimpfwort Utopisten *ausgegrenzt* werden.

Nanotechnolgie erzeugt im Gegensatz zu klar abgrenzbaren Technologien nicht bestimmte voraussehbare Probleme, wie das bei der Schädigung von Zellen durch ionisierende Strahlen der Fall

ist. Viele Methoden und Techniken der Nanowissenschaft und deren Anwendung sind eher unproblematisch, da sie lediglich das Sichtbarmachen und das Gestalten von Materialien bis hin zur atomaren Skala ermöglichen. Längerfristig werden aber durch unterschiedliche Anwendungen der Mikro- und Nanotechnologie starke Auswirkungen auf den Einzelnen und auf die Gesellschaft erwartet, vor allem in der Medizin. Diagnose und neue Therapieformen werden vom wissenschaftlichen und technologischen Fortschritt profitieren: Oberflächen von Implantaten werden verbessert, Organ- und Gewebeersatz können verbessert werden durch nanotechnologische Verfahren. Es wird erwartet, dass dadurch in mittlerer Zukunft eine hohe Lebensqualität bis kurz vor dem Lebensende erhalten werden kann. «Schöne neue Welt» durch nanobasierte Methoden und Materialien? Die Selbstverantwortung des Einzelnen wird ein grösseres Gewicht erhalten. Jeder wird für sich die Frage beantworten müssen, was er über seinen Gesundheitszustand und sein Geninventar wissen will. Die Freiheit, belastende Information nicht wissen zu wollen, muss gewährleistet bleiben. Eine autonome Entscheidungsfindung wird bedroht, wenn Informationen auf Grund nanobasierten Technologien umfassend und günstig zu haben sind. Kenntnisse über ungünstige körperliche Anlagen oder schlummernde Krankheiten können die Lebensgestaltung beeinflussen. Solche Einflüsse werden auch Auswirkungen auf die Gesellschaft haben. Wenn die Lebenszeit weitgehend planbar wird und der Tod nicht mehr in der gleichen Weise wie heute Grenzen setzt, kann sich das Verhalten des Einzelnen ändern. Die Probleme, hervorgerufen durch die demographische Entwicklung, werden durch nanobasierte Materialien, Diagnosen und Therapiemöglichkeiten weiter akzentuiert.

Begrenzter Fortschritt?

Technologischer Fortschritt führt nicht per se zu einem glücklichen Leben. Wohlergehen und erfüllte Wünsche können zum persönlichen Glück beitragen, sind aber nicht hinreichend für ein sinnerfülltes Leben. Durch Nanotechnologie werden diesbezüglich keine neuen Fragen aufgeworfen. In wissenschaftlichen Vorträgen wird die Allmacht über die Materie durch Nanotechnologie verkündet und eine Aussage von Nobelpreisträger Horst Störmer, dass mit Nanotechnologie fast alles machbar sei, wird unreflektiert wieder gegeben. Soll was technisch besser ist, auch getan werden? Diesen naturalistischen Fehlschluss begehen vor allem auch Naturwissenschaftler und Techniker immer wieder. Nanotechnologie kann zwar vieles leisten, soll aber nicht zum säkularen Religionsersatz verkommen. Nanotechnologie ist nicht das Allmächtige, womit die Natur ultimativ unterworfen werden kann. Heilsversprechungen durch Anwendungen von Nanotechnologie lösen bei den meisten Bürgern nicht die erhoffte Euphorie, sondern eher Abwehr und Angst aus. Mit rein rationalen Gründen lassen sich diese dann nicht wieder abbauen. Es wäre wohl vernünftiger, die *Grenzen von Technologieanwendungen,* insbesondere von Nanotechnologie, zu *erkennen* und öffentlich anzuerkennen, anstatt eine Welt zu pro-

pagieren, in der Wissenschaft und Technik vermeintlich alle Probleme lösen kann.
In welche Richtung soll der technologische Fortschritt weitergehen? Die Geschichte der Technik seit der Industrialisierung zeigt Phasen der Technik-Euphorie und der Technik-Kritik. Eine Welt ohne Technik ist kaum mehr denkbar. Aber die Technik der Zukunft muss fehlertolerant sein und Risiken sollen minimiert werden. Dazu ist vorgängig eine Diskussion risikomündiger Bürger nötig. Dies setzt aber eine hohe Kompetenz zur Risikobeurteilung voraus. Nanotechnologie erscheint heute nicht als Hochrisiko-Unternehmen. Eher sind die langfristigen Auswirkungen ungewiss, weshalb ein wachsames Auge auf die Entwicklung gelegt werden soll. *Begrenzungen* für nanotechnologische Anwendungen müssen vorerst nicht gesetzt werden. Durch weitere Forschung über neue Materialien, aber auch zum Verstehen von Lebensvorgängen auf molekularer Ebene mit Hilfe von nanobasierten Technologien sollen weiterhin Optionen für die Zukunft geschaffen werden. Bei neuartigen Anwendungen sollen Schadensrisiken untersucht werden sowie die Auswirkungen auf die Gesellschaft antizipiert werden. Nanobasierte Methoden und Produkte können in Zukunft wichtige Beiträge zu zentralen Aufgaben der Gesellschaft wie Ernährung, Energie und Gesundheit beisteuern. Bei der Frage, wie dieses Know-how und die nanobasierten Produkte global verteilt werden sollen, wird auch das ethische Prinzip der Gerechtigkeit tangiert. Nanobasierte Produkte gelten als innovativ und lassen sich voraussichtlich gut verkaufen. Können und sollen wir uns diese Spitzentechnik leisten, angesichts des Fehlens elementarer Einrichtungen für Energie und Gesundheit im Grossteil der Welt? Diese politischen und gesellschaftlichen Fragen gehen alle an. Politische und wirtschaftliche *Grenzen* müssen *überschritten werden,* um eine gerechtere und stabilere Welt zu schaffen.

Fortschritt mit Grenzen!

Grenzen lassen sich durch Forschung überschreiten. Grenzen sollen durch die Gesellschaft dort gesetzt werden, wo Gefahren drohen. Es sind heute kaum neue Risiken erkennbar, die durch die Anwendung von Nanotechnologie entstehen. Die Resultate der wenigen Untersuchungen zur Toxizität von uniformen Nanopartikeln sind nicht alarmierend, aber es wird eine grosse Wissenslücke festgestellt. Das grundsätzliche Problem liegt eher darin, dass es schwierig abzuschätzen ist, welche Veränderungen durch nanobasierte Methoden und Produkte in ferner Zukunft, d.h. in zwanzig bis fünfzig Jahren, eintreten werden. Deshalb ist es sinnvoll, die laufende Forschung zu begleiten, um frühzeitig geeignete Massnahmen treffen zu können. Es besteht die grosse Chance mit dem Einbezug von Laien in einem Frühstadium eine bessere Akzeptanz von Technologie zu erreichen. Diese Begleitung soll langfristig angelegt sein.
In allen Analysen zur Technologiefolgenabschätzung kommt zum Ausdruck, dass wir erst am Anfang einer langandauernden Entwicklung stehen, die vor ca. 20 Jahren mit der Erfindung des AFMs angefangen hat. Ich wage zu behaupten, dass selbst gemässigte Pessimisten die Entwicklung überschätzen. Meine Erfahrung als Wissen-

schaftler im Bereich Nanotechnologie zeigt, dass alles sehr viel langsamer geht als erwartet. Sobald Komplexität zunimmt, lassen Fortschritte auf sich warten. Der Forscher steckt somit in einem Dilemma. Um finanzielle Unterstützung zu erhalten, muss er meist realistische Anwendungsziele aufzeigen, die er aber nur schwer in der Finanzierungsperiode erreichen kann. Dieser hohe Erwartungsdruck kann dann selbst zu einem wissenschaftlichen Betrug führen, was natürlich verheerend für die Glaubwürdigkeit der Wissenschaft ist. Hier müssen sich die Wissenschaftler selbst Grenzen setzen. Zu hohe Erwartungen rächen sich und werden meist mit dem Verlust des Interesses oder sogar mit Entzug von Forschungsmitteln bestraft. Es gibt viele Beispiele in den letzten Jahren dafür: gentechnologisch veränderte Nahrungsmittel oder Gentherapie, um nur zwei zu nennen. Fortschritt bedeutet nicht, in die Zukunft zu *rennen,* sondern einen Schritt nach dem andern vorwärts zu machen unter Wahrnehmung der Umwelt und des Umfeldes. Der Gipfelstürmer ist am Abend oft der letzte. Ich wünsche mir, dass ein angepasstes, stetiges Fort-*Schreiten* weiterhin möglich ist, ohne die Übertreibungen, wie sie gerade auch in der Nanotechnologie festzustellen sind. Unsere *begrenzte* Lebenszeit verführt uns immer wieder, masslos zu werden und *sinnvolle Begrenzungen* nicht zu beachten.

Das kostbarste Gut, das wir Menschen haben ist Zeit, weil kein Mensch ewig lebt, auch mit Nanotechnologie nicht. Es macht grosse Freude, über diese Zeit verfügen zu können, um z.B. über Grenzen nachdenken zu können.

Kurze Zusammenfassung der Podiumsdiskussion

Dr. Karl Knop, CSEM Neuchâtel

Zunächst wurde festgestellt, das Nanowissenschaft und Nanotechnologie keine «gewöhnliche» Wissenschaft bzw. Technologie darstellen, und sich auch schlecht definieren lassen. Es handelt sich um Querschnittsaktivitäten, die sich durch eine grosse Multidisziplinarität auszeichnen. Dies ist sicher einer der Gründe, warum «Nano» so viel Beachtung findet.

Auf der anderen Seite ist die Gefahr, viel – oft auch zu viel – zu versprechen bei der Nanotechnologie mit ihrer grossen Vielfalt besonders gross. Es fällt hier besonders leicht, komplette Systeme mit wunderbaren Funktionen aus dieser Fülle von neuen Effekten zu erfinden. Solche Bilder, oder Visionen, sind aber wichtig für die Motivation, nicht nur der Forscher, sondern auch der Geldgeber. Von den Forschern wurde bedauert, dass einige Geldgeber immer phantastischere Bilder wünschen und den der Objektivität verpflichteten Forscher in ein grosses Dilemma bringen können.

Versucht man sich einen Überblick über vorhandene, bereits genutzte Nanotechnologien zu verschaffen, dann stellt man fest, dass vieles, was angeboten wird, gar nicht so neu ist, sondern der Begriff «Nano» oft zu PR-Zwecken benutzt wird. Daneben gibt es aber echt neue Entwicklungen und erste Produkte, welche den Markt zu erobern beginnen.

Schliesslich wurde das schwierige Thema der Gefahren angegangen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Nanotechnologie das gleiche

widerfahren wird wie der Kerntechnik, der Gentechnik, der Stammzellenforschung, der drahtlosen Kommunikation und anderen Forschungs- und Entwicklungsgebieten, die plötzlich in den Augen einer kleineren oder grösseren Bevölkerungsgruppe – zu Recht oder zu Unrecht – als ernstzunehmende Bedrohung wahrgenommen werden. Um diese Gefahr zu minimieren, müssen die Forscher ehrlich und objektiv informieren. Dazu gehört auch, dass die Forschung ein Risiko nie wird ganz ausschliessen können.

Aus dem Publikum kam die Frage nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis. Glaubt man den Visionen kritiklos, ist die Antwort klar positiv. Die Realität wird allerdings etwas nüchterner sein und der wahre Nutzen der Nanotechnologie wird mit Sicherheit aus einer unerwarteten Richtung kommen, die wir heute nur erahnen können.

Adressen der Autoren:
Dr. Karl Knop, CSEM Neuchâtel
Wannenholzstrasse 18, 8046 Zürich

Christian Bernhart, lic. phil. I, Journalist
Morgartenstrasse 21, Postfach, 3000 Bern 22

Louis Tiefenauer, Paul Scherrer Inst. Villigen
Steiacherweg 24, 5312 Döttingen