

Porträt des Nationalen Forschungsprogramms (NFP 64)
Chancen und Risiken von Nanomaterialien



SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS
ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG

- 1 **Editorial**
Nanomaterialien: Chancen wahrnehmen – Risiken minimieren
- 3 **Überblick**
Schlüsseltechnologie unter der Lupe
- 5 **Forschung**
Forschungsziele und Programmstruktur
- 8 Projekte Biomedizinische Forschung
- 14 Projekte Umweltforschung
- 18 Projekte Andere Bereiche
- 20 **Wissenstransfer**
Vertieftes Wissen ist Grundlage für den Chancen-Risiken-Diskurs
- 22 **Glossar**
Kernbegriffe
- 23 **Ablauf**
Programmdauer
Meilensteine
- 24 **Informationen**
Akteure

Was ist ein NFP?

Die Nationalen Forschungsprogramme (NFP) leisten wissenschaftlich fundierte Beiträge zur Lösung dringender Probleme von nationaler Bedeutung. Sie werden vom Bundesrat beschlossen, dauern vier bis fünf Jahre und sind mit 5 bis 20 Millionen Franken dotiert. Die NFP sind problemorientiert und sie haben eine inter- und transdisziplinäre Ausrichtung. In ihnen sind einzelne Forschungsprojekte und -gruppen im Hinblick auf ein definiertes Gesamtziel hin koordiniert.

Weitere Informationen finden Sie unter www.nfp64.ch
Dort kann auch der elektronische Newsletter bestellt werden.

Nanomaterialien: Chancen wahrnehmen – Risiken minimieren

Das Nationale Forschungsprogramm 64 «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» (NFP 64) identifiziert und fördert Bereiche mit Forschungsbedarf, um die wichtigsten Chancen und mögliche Risiken von Produkten auf der Basis künstlicher Nanopartikel besser verstehen zu lernen. Es sollen Forschungsprojekte durchgeführt werden, die einen Beitrag zur Lösung wichtiger Probleme und Fragen rund um diese Partikel leisten. Die im Rahmen dieses Programms durchgeführte Forschung liefert wissenschaftliche Grundlagen für die Formulierung von Empfehlungen und geeigneten Massnahmen bei Herstellung, Gebrauch und Entsorgung von künstlichen Nanopartikeln. Dadurch kann die Gesellschaft von den wissenschaftlichen Fortschritten

aus der Forschung mit auf künstlichen Nanomaterialien basierenden Anwendungen profitieren. Gleichzeitig sollen Konsumenten und Umwelt geschützt werden.

Nanotechnologie – eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts – umfasst Design, Charakterisierung, Produktion und Anwendung von Materialien und Systemen, deren Grösse und Form sich im Nanometerbereich befinden. Als Nanoteilchen gelten solche kleinste Teilchen, deren Dimension in mindestens einer Abmessung ≤ 100 Nanometer ist. Diese können aus nanotechnologischen Prozessen entstehen und stellen einen wichtigen Teil der Nanotechnologie dar. Ihre physiko-



Prof. Dr. Peter Gehr

chemischen Eigenschaften unterscheiden sich fundamental von grösseren Teilchen gleichen Materials, da ihre Oberfläche relativ zu ihrem Volumen wesentlich grösser ist und die Teilchen dadurch eine höhere chemische Reaktivität besitzen. Zudem können Nanoteilchen in Zwischenräume eindringen, die für grössere Materialien unzugänglich sind. Diese Eigenschaften bieten einerseits neue Nutzungsmöglichkeiten; andererseits könnten synthetische Nanoteilchen dadurch auf bisher noch kaum verstandene Art und Weise schädigend wirken.

Bei den Forschungsprojekten des Programms muss berücksichtigt werden, dass Nanomaterialien mit biologischen Systemen anders interagieren können als Materialien, die aus grösseren Teilchen bestehen. Bestimmend sind dabei in erster Linie die Kleinheit der Nano-

partikel, die damit und mit der relativ grossen Oberfläche zusammenhängende hohe Reaktivität sowie die chemische Zusammensetzung. Zum Studium der biologischen Auswirkungen sind moderne und innovative Methoden sowie neue Modelle erforderlich.

Die 18 Forschungsprojekte des NFP 64 untersuchen Chancen und Risiken, die von Nanomaterialien in den verschiedenen Stadien ihres Lebenszyklus ausgehen können. Es handelt sich hauptsächlich um Projekte, die den Einsatz von Nanomaterialien in der Umweltsanwendung feststellen sowie deren Verhalten, Verbleib und Auswirkungen auf Mensch und Umwelt untersuchen. Aus dem zweistufigen Evaluationsverfahren haben sich schwergewichtig Projekte aus Anwendungen in Medizin und Umwelt herauskristallisiert.

Die Schweiz nimmt in der Forschung auf dem Gebiet der Nanowissenschaften und Nanomaterialien einen führenden Platz ein. Mit dem NFP 64 soll diese Position gestärkt werden, um Vorteile für die schweizerische Wirtschaft und Industrie sowie den Arbeitsmarkt zu erzielen. Die Führungsrolle der Schweiz im Bereich der Risikobewertung und in Bezug auf behördliche Regulierungen soll damit erhalten bleiben. Darum werden in den verschiedenen Projekten des NFP 64 – wie dies für den Forschungsplatz Schweiz Usus ist – die Fragestellungen in vernetzter Art und Weise und mit modernen Methoden angegangen, um getreu dem Programmtitel Chancen wahrzunehmen und Risiken zu minimieren.



Prof. Dr. Peter Gehr

Präsident der Leitungsgruppe des NFP 64, Universität Bern

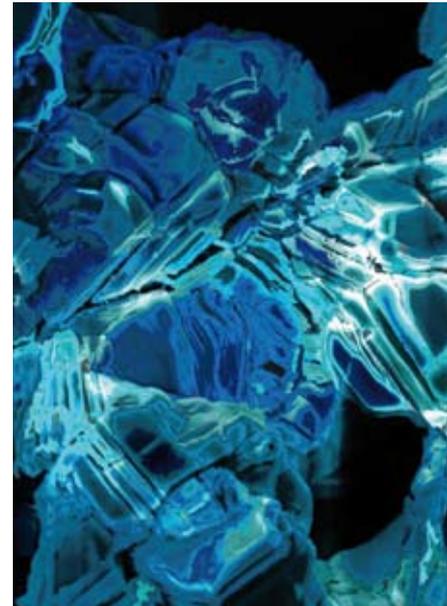
Schlüsseltechnologie unter der Lupe

Auf Nanopartikeln basiert eine der Schlüsseltechnologien für das 21. Jahrhundert. Immer kleinere Strukturen gewinnen immer grössere Bedeutung – technologisch wie wirtschaftlich betrachtet – und sie revolutionieren viele Anwendungen von der Industrie bis zur Medizin. Neben dem riesigen Potenzial können Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Nanomaterialien aber auch Gefahren für Mensch und Umwelt bergen. Das NFP 64 nimmt die Chancen und Risiken von Nanomaterialien unter die Lupe und schafft wichtige Grundlagen für einen gewinnbringenden und sicheren Umgang.

Kleinste Roboter, die Medikamente direkt und somit nebenwirkungsfrei zum erkrankten Gewebe bringen, oder Implantate – so leicht wie Kunststoff und doch hart wie Stahl – könnten die Medizin in naher Zukunft grundlegend verändern. Der Stoff, aus dem diese Träume sind, ist winzig klein. Doch ruhen auf ihm weltweit riesige Hoffnungen.

Klein, kleiner, am kleinsten

Der Sammelbegriff «Nanotechnologie» befasst sich mit Teilchen und Strukturen, die kleiner sind als der zehntausendste Teil eines Millimeters. Das ist weniger als ein Achthundertstel eines Haardurchmessers. Oder anders gesagt: Stellt man sich einen Fussball im Verhältnis zur Erdkugel vor, so ist ein Nanoteilchen nochmals ähnlich klein im Verhältnis zum Fussball.



Nano ist überall

Die Winzlinge öffnen Türen für eine breite Palette von Anwendungen: in der Medizin, der Energie- und Umwelttechnik, für die Speicherung von Daten, in der chemischen Industrie, bei der Herstellung neuer Materialien, im Nahrungsmittel- und Konsumgüterbereich, etc. Dies macht die Nanotechnologie zu einer echten Querschnittstechnologie und zum vielversprechenden Hoffnungsträger für alle Bereiche des Lebens. Zahlreiche Stoffe, beispielsweise Metalle, Metalloxide, Kohlenstoffmodifikationen und Farbpigmente, können Strukturen im Nanometerbereich aufweisen. In der Weiterverarbeitung verleihen sie Materialien oft veränderte – meist wesentlich verbesserte – Eigenschaften wie Kratzfestigkeit oder Farbtiefe. So ermöglichen sie die Entwicklung intelligenter und leistungsfähiger Produktinnovationen, wie sie im NFP 62

«Intelligente Materialien» untersucht werden. Auf Nanomaterialien basierende Technologien versprechen besonders wichtige Verbesserungen in den Bereichen Gesundheit und Umweltschutz.

Verantwortungsvolle Risikoforschung

Wo Licht ist, ist auch Schatten. Neben dem Potenzial dürfen auch die Risiken der neuen Technologien nicht ausser Acht gelassen werden. Trotz schneller Fortschritte in der Entwicklung von Nanomaterialien und immer mehr erhältlichen Produkten auf Nanobasis ist erst sehr wenig über die Auswirkungen einer Exposition von Mensch und Umwelt bekannt. Denn verglichen mit der Erforschung von Anwendungen wurde bislang wenig in die Risikoforschung investiert. Zur Schliessung dieser Wissenslücke trägt nun das NFP 64

«Chancen und Risiken von Nanomaterialien» bei, um die wichtigsten Opportunitäten zu identifizieren sowie mögliche Gefahren für Mensch und Umwelt besser einzuschätzen.

Einsatzgebiete

Sektoren	Produktgruppen
Automobilbau	ultraglatte Oberflächen
Automobiltechnik	Lacke
Bauwesen	ultradünne Schichten
Chemie	Halbleiter
Elektronik	Laser
Energetechnik	Speicher
Informationstechnik	Keramiken
Maschinen- und Anlagebau	Flüssigkeiten
Medizin	Polymere
Mess- und Regeltechnik	Wirkstoffe
Optik	Solar- und Brennstoffzellen
Pharmazie	Ultrapräzisionsmaschinen
Umwelt/Lebensmitteltechnik	Rastersondensysteme
Werkzeugtechnik	Rasterelektronenmikroskope

Forschungsziele

Das NFP 64 soll Chancen erkennen helfen, die aus dem Gebrauch von Nanomaterialien für die menschliche Gesundheit, die Umwelt und natürliche Ressourcen entstehen. Gleichzeitig soll es mögliche Risiken aufzeigen, die Nanomaterialien für dieselben Bereiche darstellen.

Konkret möchte das NFP 64

- Kenntnisse über künstliche Nanomaterialien, ihre Entwicklung, ihren Einsatz, ihr Verhalten und ihr Risiko wissenschaftlich erforschen
- Methoden und Werkzeuge entwickeln, mit denen das Verhalten von Nanomaterialien und ihre potenziellen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt überwacht werden können
- Werkzeuge entwickeln, welche die Vorteile von Nanomaterialien maximieren und die Risiken für Mensch und Umwelt minimieren
- die Entwicklung und Anwendung sicherer und effektiver, auf Nanomaterialien basierender Technologien unterstützen
- Entscheidungsträgern, inklusive Herstellern, Vertreibern und Konsumenten, Informationen zur Ausarbeitung von Bestimmungen und Arbeitspraktiken bereitstellen
- die in der Schweiz vorhandenen Fachkenntnisse und -kompetenzen bei der Entwicklung innovativer Nanomaterialien und bei der Risikobeurteilung verbessern und vertiefen

Programmstruktur

Das NFP 64 verfügt über einen Finanzrahmen von CHF 12 Millionen. Die 18 bewilligten Projekte stammen von Forschungsgruppen aus Bern, Fribourg, Lausanne, St. Gallen und Zürich und können in die Forschungsmodule Biomedizinische Forschung, Umweltforschung und Andere Bereiche eingeteilt werden. Geplant ist, Ende 2011 einen «Second Call» zu veranstalten, um mit später beginnenden Projekten allfällige Forschungslücken – beispielsweise in den Bereichen Nahrungsmittel und Konsumgüter oder Baustoffe – zu schliessen sowie weitere wichtige Probleme zu bearbeiten, wie etwa dasjenige der Langzeitwirkung, der Toxikokinetik und der Organtoxizität.

Modul Biomedizinische Forschung

Das biomedizinische Modul befasst sich mit den möglichen Auswirkungen des Einsatzes von Nanomaterialien auf die Gesundheit. Denn im biologisch-medizinischen Bereich können neue Nanomaterialien zu zukunftsweisenden Entwicklungen im Bereich neuer Medikamente, Untersuchungsmethoden und medizini-

scher Geräte führen. Synthetische Arzneimittel auf Nanopartikelbasis ermöglichen neue Generationen von multifunktionalen Medikamenten. Sie kombinieren die Eigenschaften konventioneller Wirkstoffe mit denen von Diagnose- und Behandlungsgeräten. Der Ansatz dabei ist, kleine Mengen aktiver Wirkstoffe gezielt an gewünschte

Orte im Körper zu transportieren und damit grössere Behandlungseffekte ohne Nebenwirkungen zu erzielen. Ein weiteres Anwendungsfeld sind Implantate oder Knochenersatzmaterialien, die dank Nanopartikeln mit optimierten mechanischen oder immunologischen Eigenschaften ausgestattet werden können. In diesem Zusammenhang können Nanopartikel in den Körper gelangen, dort verbleiben oder durch Wechselwirkungen freigesetzt werden, was neben den erwünschten auch unbeabsichtigte Wirkungen auslösen kann. In den neun Projekten des biomedizinischen Moduls müssen neben Toxizitätstests auch innovative Ansätze für eine Risikobewertung erarbeitet werden.

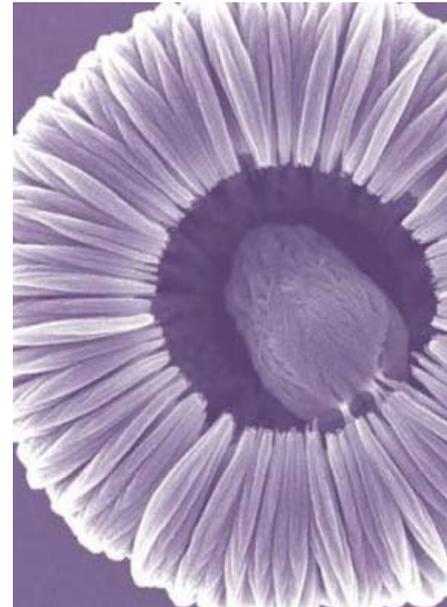
Modul Umweltforschung

Die sieben Projekte im Modul Umweltforschung evaluieren die Auswirkungen von Nanopartikeln auf Umwelt und ökologische Systeme. Nanopartikel können in Wasser, Luft und Boden gelangen, ob absichtlich – beispielsweise beim Einsatz als Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft – oder unerwünscht – wie im Herstellungs-, Gebrauchs- oder Entsorgungsprozess. Obwohl Partikel von Nanometergröße in der Umwelt auch natürlich vorkommen, können die ökologischen Auswirkungen freigesetzter synthetischer Nanomaterialien noch nicht mit abschliessender Gewissheit bewertet werden. Die Umwandlung von Nanomaterialien im Laufe ihres Lebenszyklus, einschliesslich ihres Auf- und Abbaus, sowie ihre Wechselwirkungen mit anderen Stoffen in der Umwelt machen es schwierig, die potenziellen

Auswirkungen zu bewerten und zu steuern. Hier soll dieses Modul zu mehr Klarheit führen.

Modul Andere Bereiche

In diesem Modul sind vorerst zwei Projekte vertreten, bei welchen die Entwicklung und der Einsatz von innovativen Nanomaterialien, Nanokompositen sowie Bau- und Konstruktionswerkstoffen untersucht werden. Dabei werden über den gesamten Lebenszyklus der Nanomaterialien mögliche Risiken für Mensch und Umwelt evaluiert. Weiter können in diesem Modul künftig zusätzliche Projekte angesiedelt werden, die sich mit dem Einsatz von Nanomaterialien in Nahrungsmitteln und Konsumgütern befassen oder auch mit Langzeitwirkungen, Toxikokinetik oder Organtoxizität.





Projekte Biomedizinische Forschung

Kohlenstoff-beschichtete Nanomagnete: Der in vivo Lebenszyklus

Prof. Dr. med. Beatrice Beck Schimmer
Institut für Anästhesiologie,
UniversitätsSpital Zürich

Kohlenstoff-beschichtete Nanomagnete binden Moleküle und damit auch Medikamente besonders effektiv auf ihrer Oberfläche. Dass sie zudem magnetisch steuerbar sind, könnte in Zukunft genutzt werden, um Wirkstoffe an spezifische Stellen des Körpers zu transportieren. Das Forschungsteam untersucht an Zell- und in vivo Modellen, wie gut sich Kohlenstoff-beschichtete Nanomagnete im Gewebe steuern lassen, wie viele Partikel dabei im Blut zurück bleiben und inwie-

weit Medikamente und Entzündungsmediatoren mittels magnetischer Separation wieder aus dem Blut eliminiert werden können. Da die möglichen Gefahren im Umgang mit Kohlenstoff-beschichteten Nanomagneten im Körper erst rudimentär bekannt sind, werden auch ihre Kompatibilität, Interaktion, Akkumulation und Toxizität in Zellen von Gefäßsystemen und Organen – beispielsweise in Endothel-, Blut-, und Leberzellen – analysiert.

Neuartige Nanopartikel für die effiziente und sichere Medikamentenzufuhr

Prof. Dr. Francesco Stellacci
Supramolecular Nanomaterials and Interfaces Laboratory, EPF Lausanne
(in Zusammenarbeit mit MIT Cambridge und Ann Arbor Michigan, USA / IIT Lecce, Italien)

Viren können genetisches Material gezielt zu bestimmten Zellen transportieren, um deren Funktion zu beeinflussen. Diese Mechanismen versucht die moderne Nanomedizin zu imitieren und beispielsweise für die Behandlung von Krebs zu nutzen.

Es werden synthetische, virus-analoge Partikel entwickelt, die Medikamente oder genetisches Material präzise und möglichst risikoarm zu bestimmten Zellen transportieren können und dabei schwere immun- oder zytotoxische

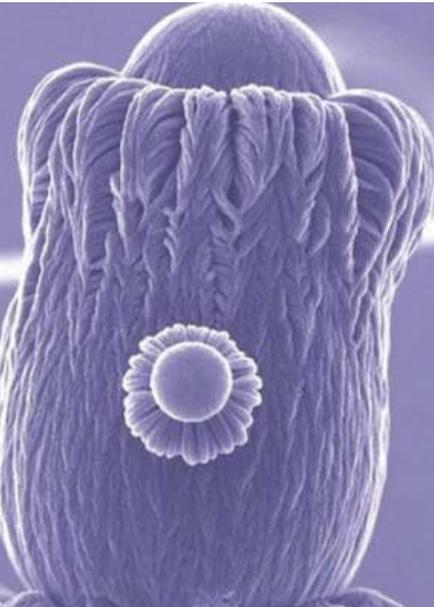
Reaktionen vermeiden. Dazu werden metallische Nanopartikel mit organischem Molekülmantel hergestellt, welche die Wirkstoffe durch die Zellmembran führen, ohne diese zu verletzen. Die Ergebnisse dokumentieren und erweitern das theoretische und praktische Wissen über die Mechanismen der Zellpenetration sowie über biokompatible Nano-Vehikel, die gezielt Regionen im lebenden Organismus erreichen.

Nanopartikel-Transport durch die menschliche Plazenta

Dr. Peter Wick
Materials Biology Interaction, Empa St. Gallen

Der Mensch ist seit jeher einer Vielzahl von Partikeln ausgesetzt – mit der Nanotechnologie kommen neue synthetische

hinzu, deren Auswirkungen noch unbekannt sind. In den letzten Jahren wurden Bedenken laut, dass während der Schwangerschaft aufgenommene Nanopartikel, z.B. Luftschadstoffe, gesundheitliche Auswirkungen auf den Fötus haben könnten. Heute ist bekannt, dass Partikel bis zu einer Grösse von 200 – 300 nm Durchmesser in der menschlichen Plazenta vom mütterlichen ins kindliche Blut gelangen können. Unklar ist jedoch, wie diese Partikel durch die Plazenta-Gewebeschanke gelangen und welche Auswirkungen sie auf das ungeborene Kind haben. Das Projekt geht dem Mechanismus des Partikeltransports mit einem Plazentamodell auf den Grund und erforscht auch mögliche Auswirkungen auf das Plazentagewebe. Auf dieser Grundlage können neue Therapiestrategien für eine zielgerichtete Medikamentenverabreichung während der Schwan-



gerschaft entstehen, ohne dass Mutter und Kind gleichzeitig therapiert werden, wenn nicht beide eine Behandlung benötigen.

Risikoanalyse inhalierter Nanopartikel mit in vitro Technologie

Prof. Dr. Marianne Geiser Kamber
Institut für Anatomie,
Universität Bern

Die Inhalation von künstlichen Nanopartikeln aus Pudern, Dispersionen oder Sprays, wie sie in der industriellen Verarbeitung und bei der Verwendung von Konsumgütern auftritt, birgt Risiken. Menschen mit chronischen Lungenerkrankungen, Kinder und ältere Personen sind empfindlicher und potenziell stärker gefährdet.

Das Forschungsteam untersucht die gesundheitlichen Auswirkungen inhalierter Nanopartikel auf gesunde und kranke Lungengewebe. Dabei wird ein neu entwickeltes realitätsnahes und portables Testsystem mit Zellkulturen eingesetzt, das die Lungenoberfläche simuliert und die Beobachtung entzündlicher Mechanismen und Verläufe erlaubt. Das vielseitige System kann für verschiedene Partikelarten und Zellkulturen aus verschiedenen Partikelquellen eingesetzt werden und erlaubt realistische in vitro Toxizitätsprüfungen.

Nachweis und Verbleib von Nanopartikeln in der Lunge und erwartete biologische Effekte

PD Dr. Michael Riediker
Institut für Arbeit und Gesundheit,
Universität Lausanne

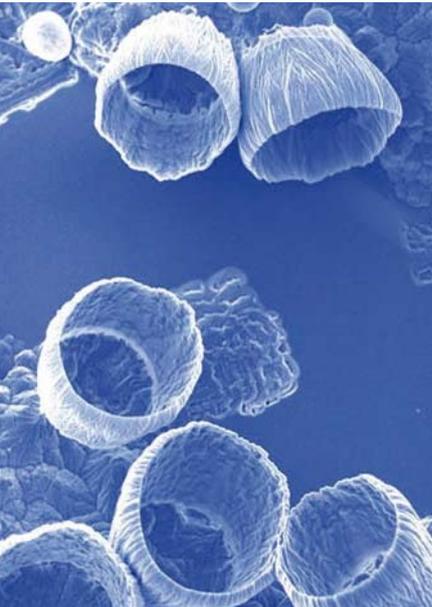
Für die Entwicklung neuer therapeutischer Anwendungen wird genaueres Wissen über die Aufnahme und den Verbleib von Nanopartikeln in der Lunge benötigt. Wegen ihrer Kleinheit sind Nanopartikel fähig, in lebende Zellen einzudringen. Wegen ihrer grossen Oberfläche weisen sie zudem eine hohe Reaktivität auf, womit gesundheitliche Risiken verbunden sein können. Es wird angenommen, dass eingeatmete und in der Lunge abgelagerte Nanopartikel in der Oberflächenflüssigkeit suspendiert werden und von dort in den Blutkreislauf gelangen. Eine weitere Hypothese

besagt, dass nur reaktive Partikel in der Oberflächenflüssigkeit oxidativen Stress verursachen und damit entsprechende Marker in Blut und Urin erhöhen. Diese Hypothesen werden wie folgt getestet: fluoreszierende, superparamagnetische Eisenoxide (PVA_SPIONS) werden inhaliert und ihre Deposition und Translokation ins Blut wird quantifiziert. Anschliessend werden Proben von Ausatemluft, Blut und Urin analysiert. Verglichen werden diese mit den Proben von Personen, die alternativ mit vergleichbaren Mengen Tabakrauch in Kontakt kommen. Die in diesem Projekt erarbeiteten Daten verschaffen die Grundlage für eine bessere Risikoanalyse von gesundheitlichen Folgen eingeatmeter Nanopartikel.

Nanopartikel aus abbaubaren Implantaten: Verteilung und Wirkung im Hirngewebe

Prof. Dr. Martin Frenz
Institut für angewandte Physik,
Universität Bern

Nanopartikel werden zunehmend in Diagnosetechniken, als Transporter pharmazeutischer Wirkstoffe oder in biokompatiblen Gefäss-Implantaten eingesetzt. Sie können, falls sie ins Blut gelangen, ins Gehirn transportiert werden, über die Blut-Hirn-Schranke in das Hirngewebe gelangen und dort in Zellen eindringen. Treten Nanopartikel mit Zellen in Wechselwirkung, können sie in diesen oxidativen Stress verursachen oder Abläufe der Proteinsynthese verändern. Die Forschungsgruppe will zeigen, wie sich Nanopartikel via Blutkreislauf im Organismus verteilen, und untersuchen, ob sie im Gehirn uner-



wünschte zelluläre Reaktionen auslösen. Weiter werden Wechselwirkungen synthetisch hergestellter Nanopartikel in Zellen und Organellen analysiert sowie mit optischen und elektronenmikroskopischen Methoden die Verteilung der Nanopartikel in den Zellen ermittelt. Schliesslich soll mittels markierter Partikel die Verteilung im Gesamtorganismus nachgewiesen werden.

Nanomedikamente für chronisch-entzündliche Darmerkrankungen

Dr. Caroline Maake

Anatomisches Institut, Universität Zürich

Die aktuellen Behandlungen chronisch-entzündlicher Darmerkrankungen, wie beispielsweise Morbus Crohn, sind oft nicht ausreichend wirksam oder haben

schwerwiegende Nebenwirkungen. Das Forschungsteam untersucht zusammen mit Basiswissenschaftlern, Ärzten und Fachleuten für Qualitätssicherung im Labor, ob die unerwünschten Nebenwirkungen etablierter Medikamente ausgeschaltet werden können, wenn sich ihre Wirkung gezielt auf die erkrankte Darmregion konzentriert und andere Körperregionen verschont. Hierfür werden die Medikamente in hoher Konzentration in neu entwickelte, abbaubare Nanopartikel verpackt, die erst vor Ort auf die erkrankte Darmwand einwirken. Das Projekt verbindet innovative Entwicklungen aus der Nanotechnologie mit erprobten klinischen Therapiekonzepten und soll so die Grundlagen schaffen, um die Lebensqualität von Betroffenen zu verbessern.

Mit biomimetischen Nanofasern verstärkte Knochenersatzmaterialien

Dr. Reto Luginbuehl

RMS Foundation Bettlach

Nanofasern können Knochenersatzmaterialien verstärken und ihnen knochenähnliche, mechanische Eigenschaften verleihen. Dies eröffnet neue chirurgische Möglichkeiten mit Platten, Schrauben und Zementen. Obwohl Nanofasern in dieser Hinsicht grosses Potenzial zuerkannt wird, sind die biologischen Auswirkungen auf Zellen, Gewebe und Organe bisher wenig geklärt.

In diesem Projekt werden resorbierbare Nanofasern, basierend auf Kalziumphosphaten, sowie die Zell- und Gewebereaktion gegen diese Fasern entwickelt. Dazu werden synthetische

Nano-Kompositmaterialien hergestellt, getestet und deren biologische Auswirkungen in Zell- und Tiermodellen charakterisiert. Die Komposite mit den besten Eigenschaften werden vertieft untersucht im Hinblick auf entzündliche Prozesse, Knochenheilung, Osseointegration und speziell auf die Verteilung der Nanofasern im Organismus.

Biomedizinische Nanopartikel als Immunmodulatoren

Dr. Barbara Rothen-Rutishauser

Institut für Anatomie, Universität Bern

Lungenallergien wie das allergische Bronchialasthma nehmen weltweit stetig zu. Da Nanopartikel sowohl stimulierend als auch suppressiv auf das Immunsystem wirken können, sind sie für die

klinische Diagnostik und die Behandlung von Allergien interessant. Sie eignen sich besonders für die Applikation von Medikamenten oder Impfstoffen.

Ziel dieses Projekts ist es, immunmodulatorische Effekte therapeutischer Nanopartikel in der Lunge zu untersuchen. Dazu werden spezifisch entwickelte Nanopartikel in Zellkultursystemen (in vitro) und Allergie-Mausmodellen (in vivo) eingesetzt. Untersucht werden deren Einfluss auf die angeborene und erworbene Immunität sowie eine mögliche Nano-Immunotoxizität in der Lunge. Die Erkenntnisse dieses multidisziplinären Ansatzes tragen dazu bei, neue therapeutische Applikationen für Lungenerkrankungen zu entwickeln und mögliche negative Auswirkungen therapeutischer Nanopartikel zu erforschen.

Projekte Umweltforschung

Modellierung von Nanomaterialien in der Umwelt

PD Dr. Bernd Nowack
Abteilung Technologie und Gesellschaft,
Empa St. Gallen

Nanomaterialien sind bereits in vielen Konsumprodukten enthalten und können von dort in die Umwelt gelangen. Es existieren jedoch noch keine etablierten Methoden, um Spurenkonzentrationen von Nanomaterialien in Umweltproben zu bestimmen. Die Forschungsgruppe zielt darauf, dank der Beschreibung der Materialflüsse und dem Umweltverhalten von Nanomaterialien aktuelle und künftige Umweltbelastungen abschätzen zu können.

Basierend auf den Informationen über Herstellung und Verwendung von Nanomaterialien wird hochgerechnet, welche Anwendungsformen welche Mengen freisetzen. In einem weiteren Schritt wird modelliert, wie sich die Materialien in Wasser, Sedimenten, Böden und Luft verhalten. Die Ergebnisse geben Anhaltspunkte über die Konzentrationen von Nanomaterialien in den verschiedenen Umweltbereichen. Ergänzt mit Daten aus ökotoxikologischen Studien kann so eruiert werden, ob gewisse Nanomaterialien ein Risiko für die Umwelt darstellen.

Effekte von Silber-Nanopartikeln auf die Nahrungsketten und Umweltprozesse

Dr. Renata Behra
Umwelttoxikologie, Eawag Dübendorf

Nanosilber gehört zu den Materialien, die gegenwärtig am häufigsten in kommerziellen und medizinischen Produkten eingesetzt werden. Ihre keimtötende Wirkung ist in vielen Anwendungen nützlich, birgt aber auch potenzielle Umweltrisiken. Besonders gefährdet sind von Mikroorganismen dominierte Ökosysteme.

Das Forschungsteam untersucht in diesem Projekt die Effekte von Nanosilber auf das Zersettersystem in Laubstreu und autotrophen Biofilmen unter Wasser. Die Mikroorganismen beider Systeme produzieren eine beträchtliche Menge an Biomasse, die innerhalb der Nahrungs-

kette an das Ökosystem weitergegeben wird. Die Studienresultate über die ökologischen Effekte von Nanosilber dienen auch als Basis für Regulierungsmassnahmen und damit für dessen verantwortungsvollen Einsatz.

Verhalten von Silber-Nanopartikeln in Kläranlagen

Dr. Ralf Kaegi

Verfahrenstechnik, Eawag Dübendorf

Nanosilber wird zunehmend als Biozid in verschiedensten Anwendungen eingesetzt. Über die Kanalisation gelangen Silber-Nanopartikel in die Kläranlagen, welche bei deren Verbreitung eine Schlüsselrolle spielen. In diesem Projekt werden die physikalischen und chemischen Veränderungen von Nanosilber

während verschiedener Klärstufen untersucht. Je nach physikalisch-chemischen Eigenschaften kann das Nanosilber die Kläranlage passieren und so in Oberflächengewässer gelangen. Wird es in den Klärschlamm eingearbeitet, gelangt es bei dessen Wiederverwendung in den Boden. Von besonderem Interesse ist dabei, wie sich Partikelgrösse und Oberflächenbeschaffenheit auf den Rückhalt in der Kläranlage auswirken. Die Resultate dienen der Entwicklung von Nanomaterialien mit möglichst geringem Umwelteinfluss.



Nicht-invasive Messung der Interaktion zwischen Nanopartikeln und aquatischen Mikroorganismen

Prof. Dr. Olivier Martin

Labor für Nanophotonik und Metrologie,
EPF Lausanne

Inwieweit freigesetzte Nanopartikel für die Umwelt toxisch sind, ist nur lückenhaft erforscht und teilweise umstritten.

Auch fehlen bislang Instrumente zur Messung von Umweltrisiken, insbesondere bei Mikroorganismen im Wasser.

Bekannt ist jedoch, dass sich die Wirkung von Nanopartikeln auf einzellige Wasserorganismen wie Algen oder Bakterien am oxidativen Stress ablesen lässt.

Ziel dieses multidisziplinären Projekts ist die Entwicklung einer Biosensor-Plattform, die in Echtzeit und parallel mehrere Biomarker für oxidativen Stress

messen kann. Das Prinzip basiert auf der Messung der Dunkelfeld-Absorptionsspektren des Cytochrom C-Proteins mittels plasmonischen Nanoantennen.

Die Plattform ermöglicht es, die Wirkungen synthetisch hergestellter Nanopartikel auf Mikroorganismen im Wasser auf eine nicht-invasive Weise zu messen, was zu einem vertieften Verständnis ökotoxischer Prozesse führt.

Interaktion metallischer Nanopartikel mit aquatischen Organismen

Prof. Dr. Kristin Schirmer

Umwelttoxikologie, Eawag Dübendorf

Um den Effekt von Nanopartikeln auf die Wasserwelt besser zu verstehen, erforscht das Projekt unter der Leitung von Kristin Schirmer die Wechselwirkungen metalli-

scher Nanopartikel mit Wasserorganismen. Mit einem spezifischen Fokus auf autotrophe Algen- und heterotrophe Fischzellen suchen die Forschenden ein besseres Verständnis über die Aufnahme, Eliminierung, Transformation und Wechselwirkung mit biologischen Systemen. Mit diesem Wissen wird ein Leitfaden entwickelt, um das Design metallischer Nanopartikel zu optimieren. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für die Risikoabschätzung und die Regulierung von Produktion, Nutzung und Entsorgung von Nanomaterialien.

Effekte von Nanopartikeln auf Bodenmikroorganismen und Nutzpflanzen

Dr. Thomas Bucheli, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich

Nanopartikel in Pflanzenschutzmitteln und Düngern versprechen einen effizienteren und umweltschonenderen Einsatz von Hilfsstoffen sowie gesteigerte Erträge. Das Forschungsteam untersucht die Risiken von Nanopartikeln in der landwirtschaftlichen Anwendung. Speziell analysiert wird die Anreicherung von Nanopartikeln im Boden, in Mikroorganismen und in Nutzpflanzen, um zu verstehen, ob sie die Zusammensetzung und ökologische Leistung symbiotischer Bodenmikroorganismen beeinträchtigt. Im Fokus stehen die Stickstoff-Fixierung und Phosphor-Aufnahme. Die Experimente mit Nutzpflanzen (Weizen und Klee) und Mikroorganismen (Bakterien

und Pilzen) werden in Systemen aufsteigender Komplexität durchgeführt: Von Labor-Reinkulturen über Topfversuche mit sterilen Böden bis zu Lysimetern mit realen Böden. Die Studie liefert ökotoxikologisch relevante Informationen über Exposition und Effekte von Nanopartikeln als Grundlage für eine umfassende Risikobeurteilung.

Biologischer Abbau und Transformation von Kohlenstoff-Nanomaterialien

Dr. Hans-Peter Kohler
Umweltmikrobiologie, Eawag Dübendorf

Das Forschungsteam der Eawag will das Umweltverhalten von Kohlenstoff-Nanomaterialien, wie z.B. Fullerenen und Kohlenstoff-Nanoröhrchen, untersuchen. Bereits heute kommen in einzelnen

Ländern Fullerene im Kläranlagenauslauf vor, ihr biogeochemischer Abbauprozess wurde bisher aber wissenschaftlich noch kaum erforscht.

Untersucht wird konkret, ob es enzymatische, zelluläre oder mikrobielle Systeme gibt, die fähig sind, Nanomaterialien aus Kohlenstoff abzubauen oder zu verändern, und welche Metaboliten dabei allenfalls entstehen. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage zur Risikobeurteilung und dienen auch für die Gesetzgebung und behördliche Empfehlungen im Hinblick auf die künftige Zulassung und Verwendung solcher Materialien. Dabei wird zudem biotechnologisches Wissen erworben, wie funktionalisierte Kohlenstoff-Nanomaterialien entwickelt werden können, was den Zugang zum neuen Forschungsgebiet der supramolekularen Nanosysteme eröffnet.

Projekte Andere Bereiche

Zellulose Nanokomposite als neue Konstruktionswerkstoffe

Prof. Dr. Christoph Weder
Forschungszentrum für Nanowissenschaft,
Universität Freiburg

Die Bauindustrie setzt vermehrt auf Hochleistungs-Nanokompositen aus synthetischen Kunststoffen und Zellulose-Nanofasern, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Das Forschungsprojekt verfolgt die Entwicklung dieser Materialien, die auf zwei neuen Designansätzen basieren: Einerseits Leichtbaumaterialien, deren mechanische Eigenschaften mit Stahl vergleichbar sind, andererseits poröse Nanokomposite als ökologische Alter-

native zu konventionellen Isolations-schäumen. Parallel dazu wird ein kürzlich etabliertes in vitro Zellmodell aus Epithelzellen der menschlichen Lunge dazu verwendet, die mögliche Toxizität von Zellulose-Nanofasern zu beurteilen und mögliche Risiken über den gesamten Lebenszyklus der angestrebten Materialien hinweg zu bewerten. Da weltweit ein hohes Interesse an Konstruktionswerkstoffen aus Zellulose-Nanokompositen besteht und die Kommerzialisierung solcher Materialien bevorsteht, werden die Resultate dieses Projekts von hoher praktischer Bedeutung sein.

Evaluationsplattform für Sicherheits- und Umweltrisiken von mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen verstärkten Kompositen

Dr. Bryan Chu
Funktionspolymere, Empa Dübendorf

Dank ihren speziellen mechanischen und elektrischen Eigenschaften eröffnen mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen verstärkte Komposite neue Anwendungen für die Industrie. Sie sind im industriellen Massstab herstellbar und bereits heute auf dem Markt erhältlich. Das Gefahrenpotenzial dieser Materialien bei Forschung, Fabrikation, Anwendung und Entsorgung ist jedoch noch ungeklärt. In interdisziplinärer Zusammenarbeit entwickelt das Projekt eine Methode, um Nanopartikel-Emissionen während der Herstellung und Benutzung sowie im Fall eines Materialbruchs zu simulieren und die Risiken für Mensch und

Umwelt einzuschätzen. Zusätzlich soll das Messverfahren eine allgemeingültige Vorgehensweise zur Ermittlung von Gesundheitsrisiken von Nanokompositen begründen.



Vertieftes Wissen ist Grundlage für den Chancen-Risiken-Diskurs

Beim Wissenstransfer gilt es, die Forschenden untereinander zu vernetzen: Mit einem Kick-off Meeting und jährlichen wissenschaftlichen Treffen werden der Austausch neuer Daten aus den Projekten gewährleistet und gegenseitige Kontakte ermöglicht.

Gerade auf dem Gebiet der Nanomaterialien ist es zudem wichtig, den internationalen Kontext zu verfolgen und den Informationsfluss zu fördern. Auf nationaler Ebene gilt es, die Vernetzung mit dem Aktionsplan und dem Vorsorgeraster Synthetische Nanomaterialien des BAG zu gewährleisten. Die Forschungsgruppen werden vom Leiter Wissenstransfer unterstützt, ihre Resultate an Konferenzen und im Austausch mit anderen Forschungsprogrammen gewinnbringend zu kommunizieren.

Zusammenarbeit mit Forschenden

Um die Forschenden und auch den Forschungsnachwuchs optimal zu fördern, wird das NFP 64 im Sommer 2012 und 2013 je eine «Summer School» anbieten. Die Teilnehmer erhalten dort Gelegenheit, sich und ihre Arbeitsschwerpunkte vorzustellen, aber auch neue Arbeitstechniken und Tools zu erlernen, die für ihre Forschungstätigkeit nützlich sind. Zudem wird bei regelmässigen Site Visits mit den Leitenden der Forschungsgruppen diskutiert, welche Projektinhalte und

Ergebnisse von besonderem öffentlichem Interesse sein könnten und wie sie kommuniziert werden sollen. In der Schlussphase des Programms finden Symposien statt, an denen die Forschenden ihre Arbeiten und Resultate präsentieren und sich mit interessierten Organisationen, Gruppen, Behörden, der Industrie und auch Einzelpersonen vernetzen können. Die dabei entstehenden politischen und öffentlichen Diskussionen sind konkrete Ergebnisse des Praxistransfers.

Issues Management

Das öffentliche Interesse am Themenfeld der Nanomaterialien widerspiegelt dessen höchste gesellschaftliche Relevanz. Besonders deutlich zeigt sich dies in der aktiven medialen Debatte rund um die Chancen und Risiken des Einsatzes, die zeitweise heftig aufflackert. Um Veränderungen in der öffentlichen Wahrnehmung

möglichst früh zu erfassen und auf aufkommende kritische Themen adäquat reagieren zu können, hat das NFP 64 ein Issues Management System entwickelt, das die wichtigsten Themenbereiche systematisch überwacht. In Zusammenarbeit mit den verschiedenen Akteuren werden die wichtigsten Issues diskutiert und bei Bedarf entsprechende Kommunikationsmassnahmen entwickelt.

Regulierungsbedarf

Die Resultate der Forschungsprojekte bilden einerseits die Basis für Regulierungen durch die öffentliche Hand und für Richtlinien bei der Herstellung von auf Nanomaterialien basierenden Produkten in der Industrie. Wichtig ist dabei, nicht nur die Herstellungsphase, sondern den gesamten Lebenszyklus der Produkte im Auge zu behalten. Solange die staatlichen Regulierungen

noch in Ausarbeitung sind, muss sich die Industrie eine gewisse Selbstregulierung auferlegen, indem sie eine Risikenschätzung für die eigenen Produktionsbereiche vornimmt. Im steten Austausch mit den verschiedenen Zielgruppen auf behördlicher, politischer und industrieller Ebene wird darauf hingewiesen, dass beim Einsatz innovativer Nanomaterialien Vorsicht geboten ist, solange nicht alle Auswirkungen bekannt sind. Die regulatorischen Anstrengungen wie auch die Verbesserung der Kenntnisse der Bevölkerung über die Chancen und Risiken von Nanomaterialien in verschiedenen Bereichen dienen dazu, den Konsumenten grösstmögliche Gewissheit über die Sicherheit von auf Nanomaterialien basierenden Produkten zu vermitteln.



Kernbegriffe

Autotroph Bezeichnung für die Ernährungsweise von Organismen, die zum Aufbau ihrer Körpersubstanz nur anorganische Stoffe brauchen. Autotrophe Organismen sind grüne Pflanzen, Algen und einige Bakterien.

Biomimetisch Biologische Strukturen oder Prozesse nachahmend.

Biozid Wirkstoff, der dazu dient, auf chemischem oder biologischem Wege Schädlinge wie Motten, Ratten, Pilze etc. zu zerstören, abzuschrecken oder unschädlich zu machen.

Deposition Ablagerung.

Endothelzellen Zum Hohlraum hin gerichtete Zellen der innersten Wandschicht von Lymph- und Blutgefässen.

Epithelzellen Ein- oder mehrlagige Zellschichten, die fast alle inneren und äusseren Körperoberflächen von Menschen und Tiere bedecken, z.B. die Haut.

Fullerene Kugelförmige Moleküle aus Kohlenstoffatomen, 1985 zum ersten Mal hergestellt. Fullerene werden heute u.a. in der Sportartikelherstellung

verwendet. Sie ermöglichen eine leichtere und stabilere Bauweise.

Heterotroph Bezeichnung für die Ernährungsweise von Organismen, die zum Aufbau ihrer Körpersubstanz Kohlenstoff aus vorhandenen organischen Verbindungen brauchen. Heterotrophe Organismen sind: Mensch, Tier, Pilze und die meisten Bakterien.

Immunotoxisch Das Immunsystem vergiftend, schädigend.

Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT) «Verlängerte» Fullerene, also zu Zylindern gerollte, in Sechsecken angeordnete Kohlenstoffatome. Kohlenstoff-Nanoröhrchen besitzen eine etwa 50-fach höhere Zugfestigkeit als Stahl bei wesentlich kleinerem Gewicht. Sie können isolierend, halbleitend oder metallisch leitend sein.

Metaboliten Bezeichnung für alle Produkte, die im biologischen Stoffwechsel auftauchen.

Nanokomposite (NCM) Verbindung mehrerer Werkstoffe, die unter anderem Teilchen oder Strukturen im Nanometerbereich enthalten. Ziel dieser Verbindung ist die Verbesserung der Materialeigenschaften.

Nanometer (nm) Längenangabe, bezeichnet den milliardsten Teil eines Meters (10^{-9} Meter) und entspricht ca. 5 bis 15 Atomen nebeneinander.

Nanopartikel (NP) Kleinste Teilchen mit einer Abmessung von 100 Nanometern oder darunter. Nanopartikel weisen gegenüber grösseren Teilchen gleichen Materials andere chemische und physikalische Eigenschaften auf: Ihre Oberfläche ist relativ zu ihrem Volumen wesentlich grösser, wodurch sie eine höhere Reaktivität besitzen. Es gibt natürliche und künstlich hergestellte Nanopartikel.

Organell Von einer Membran umgebener Bestandteil einer Zelle, dem spezifische Funktionen innerhalb der Zelle zukommen, z.B. Mitochondrien.

Oxidativer Stress Zustand, in dem innerhalb der Zelle das Gleichgewicht zwischen reaktionsfreudigen Molekülen, sogenannten freien Sauerstoffradikalen, und den zellulären Abwehrmechanismen gestört ist. Oxidativer Stress schädigt die Zelle, was zu Fehlfunktionen und schliesslich deren Tod führt.

Reaktivität Fähigkeit eines Stoffes, eine chemische Reaktion einzugehen.

Toxizität Giftigkeit.

Translokation Verlagerungsprozess (Ortsveränderung).

Zytotoxisch zellvergiftend, zellschädigend.

Programmdauer

Die Forschungsprojekte des NFP 64 laufen über eine Dauer von fünf Jahren bis Ende 2015. Die Schlussberichte werden im 2016 vorliegen und im Rahmen von Veranstaltungen präsentiert werden.

Meilensteine

Dezember 2010	Beginn der Forschung
März 2011	Kick-off Meeting für Forschende
Sommer 2011	Second Call für weitere Forschungsprojekte
Dezember 2011	Eingabefrist für Proposals
Sommer 2012	Summer School NFP 64
Juli 2012	Beginn der neuen Forschungsprojekte (Second Call)
Dezember 2013	Beginn Fortsetzungsprojekte
Ende 2015	Ende der Forschungsarbeiten
2016	Abschlussarbeiten, Veranstaltungen und Veröffentlichung, Schlussberichte

Akteure

Leitungsgruppe

Prof. Dr. Peter Gehr
Institut für Anatomie,
Medizinische Fakultät,
Universität Bern, CH
(Präsident)

Prof. Dr. Vicki Stone
School of Life Sciences,
Edinburgh Napier University,
Edinburgh, UK

Prof. Dr. Ueli Aebi
M.E. Müller Institute for
Structural Biology,
Biozentrum,
Universität Basel, CH

Prof. Dr. Heinrich Hofmann
Powder Technology
Laboratory, Institute of
Material Science,
EPF Lausanne, CH

Prof. Dr. Patrick Hunziker
Cardiology, Department of
Internal Medicine,
Kantonsspital Basel, CH

Prof. Dr. Andrew Maynard
Woodrow Wilson
International Center for
Scholars, Washington DC,
USA

Prof. Dr. Wolfgang Parak
Fachbereich Physik,
Philipps-Universität
Marburg, D

Prof. Dr. Anders Baun
NanoDTU, Department of
Environmental
Engineering, Technical
University of Denmark, DK

Forschungsratsdelegierter

Prof. Dr. Peter Schurtenberger
Physical Chemistry
Department of Chemistry
Lund University, S

Bundesbeobachter
Dr. Christoph Studer
Bundesamt für Gesundheit
BAG, Bern, CH

Programmkoordinatorin

Marjory Hunt
Schweizerischer National-
fonds SNF
Wildhainweg 3
CH-3001 Bern
Tel +41 (0)31 308 22 22
Email nfp64@snf.ch

Leiter Wissenstransfer/

Medienkontakt
Mark Bächer
Life Science
Communication AG
Obere Wiltisgasse 48
CH-8700 Küsnacht
Tel +41 (0)43 266 88 50
Email
mark.baecher@lscom.ch

Der Schweizerische Nationalfonds

Der Schweizerische Nationalfonds (SNF) ist die wichtigste Schweizer Institution zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung. Im Auftrag des Bundes fördert der SNF die Grundlagenforschung in allen wissenschaftlichen Disziplinen, von Philosophie über Biologie und Medizin bis zu den Nanowissenschaften.

Im Zentrum seiner Tätigkeit steht die wissenschaftliche Begutachtung von Forschungsprojekten. Er unterstützt jährlich fast 3000 Projekte mit 700 Millionen Franken, an denen rund 7000 Forschende beteiligt sind.

Weitere Exemplare dieser Broschüre

können bezogen werden unter:

Schweizerischer Nationalfonds
zur Förderung der wissenschaftlichen
Forschung

Wildhainweg 3

Postfach 8232

CH-3001 Bern

Tel. +41 (0)31 308 22 22

Fax +41 (0)31 305 29 70

Email nfp64@snf.ch

www.snf.ch

www.nfp64.ch

März 2011

Herausgeber

Nationales Forschungsprogramm NFP 64

Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung
der wissenschaftlichen Forschung

Wildhainweg 3

Postfach 8232

CH-3001 Bern

Redaktion

Life Science Communication AG, Küsnacht

Grafik

Karin Schiesser, Küsnacht

Fotos

Titelseite, Gold-Polymer Nanorods

Keystone Photo Researchers NSF/Science Source

Seite 3, Power

Copyright Cris Orfescu, Los Angeles, CA

www.crisorfescu.com

Seite 7, 8, 10, 12, 15, 19, Nanoflowers

Copyright Ghim Wei Ho and Prof Mark Welland

University of Cambridge Nanoscale Science Laboratory

Seite 21, Towers

Copyright www.nanoscience.ch

Das NFP 64 in Kürze

Das NFP 64 ist ein Programm zur Erforschung von Chancen und Risiken von Nanomaterialien. Es verfügt über einen Finanzrahmen von zwölf Millionen Schweizer Franken und dauert bis Oktober 2016. Beteiligt sind 18 Forschungsgruppen aus Bern, Fribourg, Lausanne, St. Gallen und Zürich.

Ziele des NFP 64

- Kenntnisse über künstliche Nanomaterialien, ihre Entwicklung, ihren Einsatz, ihr Verhalten und ihr Risiko wissenschaftlich erforschen
- Methoden und Werkzeuge entwickeln, um das Verhalten von Nanomaterialien und ihre potenziellen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu überwachen
- Werkzeuge erarbeiten, welche die Vorteile von Nanomaterialien maximieren und die Risiken für Mensch und Umwelt minimieren
- Entwicklung und Anwendung sicherer und effektiver, auf Nanomaterialien basierender Technologien unterstützen
- Entscheidungsträgern, der Industrie und den Konsumenten Informationen zur Ausarbeitung von Bestimmungen und Arbeitspraktiken bereitstellen
- In der Schweiz vorhandene Fachkenntnisse bei der Entwicklung innovativer Nanomaterialien und bei der Risikobeurteilung vertiefen.