

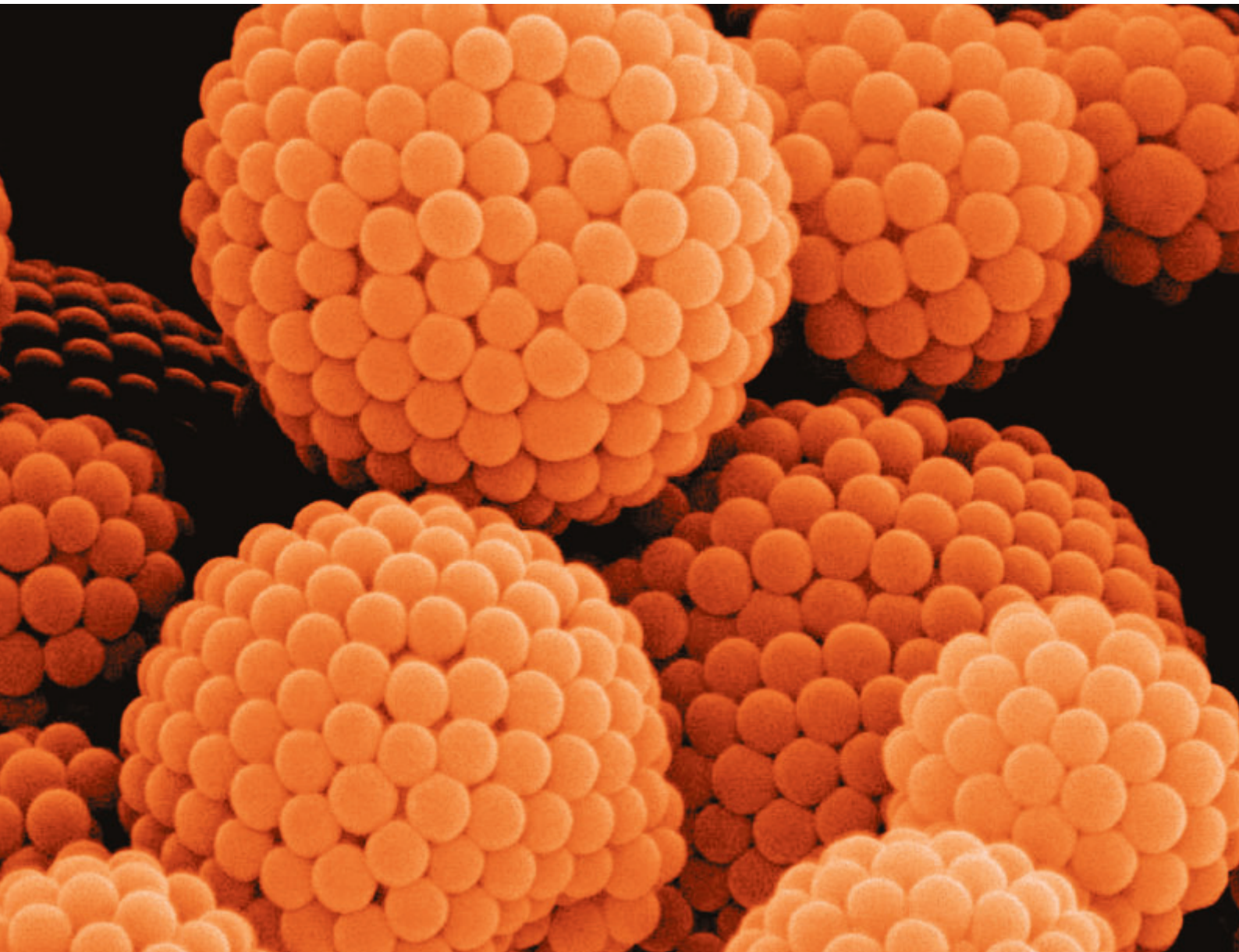


Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

iDEEN
INNOVATION
WACHSTUM
Die Hightech-Strategie für Deutschland

nano.DE-Report 2011

Status quo der Nanotechnologie in Deutschland



HIGHTECH-STRATEGIE

Ideen zünden!

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Neue Werkstoffe; Nanotechnologie
53170 Bonn

Bestellungen

Schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35 53182 Bonn
oder per Tel. : 01805 – 262 302
Fax: 01805 – 262 303
(Festnetzpreis 14 ct/min, höchstens 42 ct/min aus Mobilfunknetzen)
E-Mail: books@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Redaktion

VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf

Gestaltung

Medienpartner Mäurer GmbH, Hückelhoven

Druck

WAZ-Druck GmbH & Co. KG, Duisburg

Bonn, Berlin 2011

Bildnachweis

Titelfoto: Nanopulver, © Fraunhofer ISC



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



nano.DE-Report 2011

Status quo der Nanotechnologie in Deutschland

Grußwort



Die Nanotechnologie ist eine Schlüsseltechnologie. Sie hat das Potenzial, wichtige technologische Lösungsbeiträge zu den großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu leisten. Ihre Anwendungsmöglichkeiten sind überaus vielfältig. Nanotechnologie ist ein wichtiger Bestandteil in effizienteren Solarzellen für eine regenerative Energieversorgung, in leistungsfähigeren Batterien für eine umweltfreundliche Elektromobilität oder in wirksameren Therapien gegen Volkskrankheiten.

Um das Potenzial der Nanotechnologie bei der Lösung der anstehenden Aufgaben zu nutzen und die Zukunftsfähigkeit des Wirtschafts- und Technologiestandorts Deutschlands zu stärken, fördert die Bundesregierung die Nanotechnologie im Rahmen der Hightech-Strategie 2020. Wir sichern damit die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie auf dynamischen Zukunftsmärkten und schaffen hochqualifizierte Arbeitsplätze in der Spitzentechnologie. Mit dem Aktionsplan Nanotechnologie 2015 hat die Bundesregierung die Weichen für die nachhaltige Nutzung der Innovationspotenziale der Nanotechnologie gestellt und Rahmenbedingungen für einen sicheren und verantwortungsvollen Umgang mit dieser Technologie geschaffen. Ein zentrales Element ist dabei auch die Risikoforschung. In den Fördermaßnahmen NanoCare und NanoNature werden mögliche Risiken durch Nanomaterialien für Mensch und Umwelt systematisch untersucht.

Die Nanotechnologie ist in Deutschland auf Wachstumskurs. Die Zahl der Unternehmen, die nanotechnologisches Know-how zur Herstellung innovativer Produkte für den Weltmarkt nutzen, nimmt ebenso dynamisch zu wie Patentanmeldungen und Publikationen in diesem Zukunftsfeld. Der vorliegende nano.DE-Report 2011 bietet eine aktuelle Bestandsaufnahme der Nanotechnologie in Deutschland. Er gibt Auskunft über die deutsche Position im internationalen Vergleich, beschreibt die Entwicklung von Beschäftigten- und

Umsatzzahlen und analysiert die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Der nano.DE-Report erhöht damit die Transparenz des Nanotechnologiesektors in Deutschland und bietet den beteiligten Akteuren eine fundierte Datenbasis für die Ausrichtung ihrer zukünftigen Aktivitäten.



Prof. Dr. Annette Schavan, MdB
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Inhalt

1 Zusammenfassung	3
2 Einleitung	5
2.1 Definition der Nanotechnologie	5
2.2 Aktionsplan Nanotechnologie der Bundesregierung	6
2.3 Ziele des nano.DE-Reportes	6
2.4 Methodischer Ansatz	7
3 Nanotechnologie in Deutschland	9
3.1 Nanotechnologieunternehmen	10
3.2 Öffentlich finanzierte Nanotechnologie-Forschung	15
3.3 Finanzsektor und Beteiligungskapital	20
4 Markt- und Anwendungspotenziale der Nanotechnologie	23
4.1 Übersicht der nanotechnologisch beeinflussten Marktpotenziale	23
4.2 Chemie	28
4.3 Metall- und Keramikwerkstoffe	33
4.4 Medizin/Pharma	36
4.5 Optik/Photonik	40
4.6 Energie	43
4.7 Umwelttechnik	46
4.8 Maschinenbau	49
4.9 Bau	52
4.10 Automobil	54
4.11 Informations- und Kommunikationstechnik	57
4.12 Verpackung	59
4.13 Textil	61
4.14 Sicherheitstechnik	64
4.15 Sensorik/Messtechnik	67
5 Sozioökonomische Rahmenbedingungen	70
5.1 Leistungsfähigkeit des deutschen Wissenschaftssystems	70
5.2 Patentierung von Nanotechnologie	71
5.3 Europäische Nanotechnologieförderung – Neuerungen in den Arbeitsprogrammen	73
5.4 Nanotechnologie im internationalen Vergleich	74
5.5 Studienangebot und Nachwuchsförderung in der Nanotechnologie	76
5.6 Risikoforschung zu Nanomaterialien	78
5.7 Internationale Maßstäbe der OECD für die Sicherheit von Nanomaterialien	79
5.8 Öffentliche Wahrnehmung von Risiken, Chancen und Nutzen der Nanotechnologie	80
5.9 Wissensvermittlung im Bereich der Nanotechnologie	81
5.10 Nanomaterialien – Rahmenbedingungen aus Sicht der chemischen Industrie	83
Anhang:	
Quellen- und Endnotenverzeichnis	85
Weiterführende Informationen	90
Glossar	91

1 Zusammenfassung

Entwicklung des Nanotechnologiesektors in Deutschland

Immer mehr Institutionen in Deutschland befassen sich mit der Forschung und Entwicklung, der Produktion und den Dienstleistungen im Bereich der Nanotechnologie. Die Nanotechnologie in Deutschland umfasst rund 1800 Institutionen, davon ca. 40 % kleine und mittlere Unternehmen (KMU), 13 % Großunternehmen, 24 % Hochschulinstitutionen, 9 % institutionelle Forschungseinrichtungen sowie sonstige Einrichtungen wie Netzwerke, Behörden, Verbände und Finanzinstitutionen (Stand Januar 2011). Seit Ende 2008 ist die Zahl der Nanotechnologieakteure um ca. 50 % angestiegen. Die bezüglich der Akteurszahlen am stärksten vertretenen Nanotechnologieteilgebiete sind Nanomaterialien, Nanobeschichtungen sowie die Nanoanalytik. Zu den wichtigsten Anwendungsfeldern der Nanotechnologie zählen die Chemie, der Geräte- und Maschinenbau (incl. Messtechnik), der Dienstleistungssektor (Auftragsforschung, -beschichtung etc.) sowie der Bereich Medizin/Pharma (vgl. Abschnitt 3).

Arbeitsplätze, Umsätze und Forschungsausgaben deutscher Nanounternehmen

Die Gesamtzahl der Beschäftigten im industriellen Nanotechnologiesektor in Deutschland im Jahr 2010 wird auf 61.000 Mitarbeiter geschätzt. Vergleicht man die Beschäftigtenzahlen mit der Erhebung von 2008, so ist festzustellen, dass der Nanotechnologiesektor mittlerweile fast den Stand vor der Weltwirtschaftskrise erreicht hat. Die Beschäftigtenzahl wird nach eigenen Prognosen der Unternehmen im Jahr 2011 um 4 % auf dann ca. 64.000 ansteigen. Dies entspricht einem Zugewinn von rund 3.000 Arbeitsplätzen. Der Gesamtumsatz deutscher Nanotechnologieunternehmen im Bereich der Nanotechnologie wird für 2010 auf ca. 13 Mrd. € geschätzt. Das Umsatzwachstum gegenüber 2009 ist mit 76 % ausgesprochen hoch, was sich in erster Linie durch Nachholeffekte infolge des Umsatzeinbruchs durch die Weltwirtschaftskrise erklären lässt. Die Unternehmen rechnen für 2011 mit einem Umsatzwachstum von 8 % auf 14,3 Mrd. €. Der Forschungsaufwand deutscher Nanounternehmen im Bereich der Nanotechnologie wird auf rund 1,3 Mrd. € im Jahr 2010 hochgerechnet. Dies entspricht einer Forschungsquote von ca. 10 % bezogen auf den Umsatz. Nach Unternehmensangaben ist mit einer Steigerung der Forschungsinvestitionen im Jahr 2011 um 4 % auf ca. 1,4 Mrd. € zu rechnen. (vgl. Abschnitt 3.1)

Öffentlich finanzierte Nanotechnologie-Forschung

In Deutschland sind rund 600 öffentlich finanzierte Forschungseinrichtungen aus Hochschulen und institutionellen Forschungsorganisationen im Bereich der Nanotechnologie

tätig. In diesen Forschungseinrichtungen befassen sich rund 10.000 Wissenschaftler mit der Forschung im Bereich der Nanotechnologie. Drittmittel des Bundes zählen zu den wichtigsten Finanzierungsquellen der Nanotechnologieforschung in Deutschland. Bei ca. 80 % der Institutionen macht diese Finanzierungsquelle mehr als ein Viertel des gesamten Nanotechnologieforschungsbudgets aus. Als Anwendungsbereiche der Nanotechnologie, die in den nächsten fünf bis zehn Jahren am stärksten von der Nanotechnologieforschung profitieren können, stehen die Elektronik, Medizin/Pharma und die Energietechnik an der Spitze. In Bezug auf die Qualität und den Entwicklungsstand des eigenen Forschungsgebietes in Deutschland im Vergleich zu anderen Regionen, sehen die beteiligten Institutionen die deutsche Forschung in einer Spitzenposition gleichauf mit den USA vor Japan, dem europäischen Ausland, weiteren asiatischen Staaten und sonstigen Regionen. Die Standortbedingungen in Deutschland werden von den Forschungsinstitutionen überdurchschnittlich bis gut bewertet. Am positivsten werden die Anzahl und Qualität an Forschungsk Kooperationen, die Einbindung in themenspezifische Netzwerke, die verfügbare Labor- und Geräteausstattung sowie der Zugang zu Fördermitteln auf Bundesebene bewertet. Zwei Drittel der Nanoforschungsinstitutionen haben im Zeitraum zwischen 2009 und 2010 Patente angemeldet, die deutliche Mehrzahl davon zwischen ein und fünf Patenten. 5 % der Institutionen haben mehr als zehn Patente angemeldet. Von den beteiligten Institutionen wurden in den Jahren 2009 bis 2010 insgesamt elf Spin-Offs ausgegründet. Im Zeitraum von 2011 bis 2012 sind nach Angaben der beteiligten Institutionen bis zu 50 weitere Ausgründungen geplant (vgl. Abschnitt 3.2).

Finanzsektor und Beteiligungskapital

In Deutschland sind ca. 75 Kapitalbeteiligungsgesellschaften im Bereich der Nanotechnologie engagiert. Als Anwendungsfelder mit den größten Marktchancen in den nächsten fünf bis zehn Jahren werden von den Finanzinstitutionen die Bereiche Chemie, Elektronik, Medizin/Pharma, Energie und Optik eingeschätzt. 16 der befragten Finanzinstitutionen verfügen aktuell über insgesamt 41 Beteiligungen an Nanotechnologieunternehmen, davon sind zehn Beteiligungen im Jahr 2009 und fünf in 2010 hinzugekommen. Die meisten Beteiligungen stammen aus Deutschland. Bezüglich der Beteiligungssummen ergibt sich ein relativ breites Spektrum zwischen 250 Tausend € und über 5 Mio. €. Die durchschnittliche Beteiligungssumme wird auf ca. 1,8 Mio. € geschätzt. Bei den Beteiligungen handelt es sich überwiegend um Frühphasen-Investments. Auf Basis einer Hochrechnung auf alle im Nanotechnologiebereich tätigen Finanzinvestoren kann die jährliche Venture Capital Investitionssumme auf rund 40 Mio. € in Deutschland im Jahr 2010 abgeschätzt werden (vgl. Abschnitt 3.3).

Internationale Position Deutschlands

Deutschland zählt weltweit zu den führenden Nanotechnologiestandorten. Ein internationales Benchmark der Nanotechnologie-Aktivitäten durch die Marktforschungsinstitution Lux Research stuft Deutschland auf Platz 3 hinter den USA und Japan ein (vgl. Abschnitt 5.4). Bezogen auf die Anzahl der Nanotechnologiepublikationen liegt Deutschland auf Platz 4 hinter den USA, China und Japan. Von den Top Ten der Länder mit den höchsten Publikationszahlen weist Deutschland den dritthöchsten Einflussfaktor als Indikator für die Häufigkeit der Zitationen auf (vgl. Abschnitt 5.1). In Bezug auf Patentanmeldungen steht Deutschland hinter den USA und Japan an dritter Stelle und an der Spitze der europäischen Länder (vgl. Abschnitt 5.2).

Nach Einschätzung der deutschen Nanotechnologieunternehmen hat Deutschland bezogen auf ihre derzeit wichtigsten Nanotechnologieprodukte in rund einem Drittel aller genannten Anwendungen die Marktführerschaft inne. Bei 42 % der Produkte wird Deutschland nicht unter den führenden Nationen genannt sondern vor allem die USA, Japan und ferner andere asiatische Staaten wie Korea, Taiwan oder China (vgl. Abschnitt 3.1). In Bezug auf die Qualität und den Entwicklungsstand des eigenen Forschungsgebietes sehen die beteiligten Nanotechnologie-Forschungseinrichtungen Deutschland in einer Spitzenposition gleichauf mit den USA knapp vor Japan, sowie vor dem europäischen Ausland, weiteren asiatischen Staaten und sonstigen Regionen (vgl. Abschnitt 3.2).

Marktpotenziale der Nanotechnologie

Der Weltmarkt in den Bereichen Nanomaterialien, Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und Nanostrukturierung kann gemäß der Prognosen verschiedener Marktforschungsinstitutionen für das Jahr 2011 auf ca. 93 Mrd. US \$ geschätzt werden. Dabei fallen rund 12 Mrd. US \$ auf den Bereich Nanomaterialien, 5 Mrd. US \$ auf Nanobeschichtungen, 2 Mrd. US \$ auf Nanoanalytik und 74 Mrd. US \$ auf Nanostrukturierung. Die Angaben für den Bereich Nanostrukturierung beinhalten hierbei das Equipment zur Waferstrukturierung (Geräte für Lithografie, Beschichtungen etc.) für die Elektronik, das hierbei den weitaus größten Marktanteil ausmacht. Die wirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnologie reicht aufgrund der Hebelwirkung als „enabling technology“ allerdings wesentlich weiter. Nanotechnologische Produkte sorgen in fast allen Industriebranchen für optimierte Komponenten und Systeme in nachgelagerten Wertschöpfungsstufen.

Internationale Marktprognosen gehen davon aus, dass die Nanotechnologie bis zum Jahr 2015 weltweit an der Wertschöpfung von Gütern mit einem Marktwert von bis zu 3 Billionen US \$ wesentlich beteiligt sein wird. Gemäß diesen Abschätzungen ist für das Jahr 2011 von einem Marktpotenzial nanooptimierter Produkte von ca. 1 Billion US \$ auszugehen (vgl. Abschnitt 4.1). Da weder eine eindeutige Definition für nanooptimierte Nanotechnologieprodukte existiert, noch der Einsatz der Nanotechnologie in Endprodukten in der Vielzahl von Anwendungen entlang der Wertschöpfungskette nach-

vollziehbar und überprüfbar ist, können diese Zahlen nur als grobe Schätzgröße für die wirtschaftliche Hebelwirkung gewertet werden. Diese Hebelwirkung ist derzeit im Bereich von Elektronikprodukten mit Strukturgrößen unter 100 nm am größten einzuschätzen.

Wertschöpfungskette und Anwendungsfelder

Als branchenübergreifende Querschnittstechnologie ist die Nanotechnologie keinem klassischen Wirtschaftszweig zuzuordnen. Entsprechend der Positionierung in der Wertschöpfungskette lassen sich zum einen Hersteller und Anwender nanotechnologischer Produkte unterscheiden. Hersteller nanotechnologischer Produkte umfassen dabei Produzenten von Nanomaterialien sowie von Geräten zur Erzeugung und Analyse nanoskaliger Strukturen und Materialien. Anwender nanotechnologischer Produkte setzen diese zur Optimierung und Funktionsverbesserung von Zwischenprodukten und Endprodukten in verschiedenen industriellen Anwendungsfeldern ein. Weiterhin nehmen Dienstleistungsunternehmen eine wichtige Rolle im Innovationsprozess der Nanotechnologie ein, die an verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette nanospezifische Dienstleistungen in den Bereichen Auftragsanalytik und -forschung, Lohnbeschichtung, Beratung, Risikobewertung, Simulation, Vertrieb etc. anbieten. Fast alle industriellen Anwendungsfelder profitieren von nanotechnologischen Entwicklungsansätzen zur Optimierung des jeweiligen Produkt- und Dienstleistungsportfolios. Im Kapitel 4 sind für 14 Anwendungsfelder branchenspezifische Applikationen und Entwicklungen, Beispiele für F&E-Projekte sowie spezifische Rahmenbedingungen und Herausforderungen zusammengefasst (Abschnitt 4.2 ff.).

Risikobewertung und wissenschaftlicher Nachwuchs

Die Entwicklung der Nanotechnologie in Deutschland ist eng gekoppelt mit den sozioökonomischen Rahmenbedingungen auf nationaler und internationaler Ebene. Speziell beim industriellen Einsatz von Nanomaterialien können sich mögliche Risiken in Bezug auf den Verbraucher-, Arbeits- und Umweltschutz als Hemmnis bei der Vermarktung nanotechnologischer Produkte erweisen. Der Risikoforschung im Bereich Nanomaterialien kommt dabei eine wichtige Rolle im Hinblick auf eine verantwortungsvolle Nutzung der Nanotechnologie zu (vgl. Abschnitt 5.6). Studien zur öffentlichen Wahrnehmung von Risiken, Chancen und Nutzen der Nanotechnologie zeigen, dass die deutsche Bevölkerung dem Technologiefeld aufgeschlossen gegenüber steht, aber Anwendungen von Nanomaterialien in verbrauchernahen Produkten Konfliktpotenziale bergen (vgl. Abschnitt 5.8). Offene Fragen in der Sicherheitsbewertung und der regulatorischen Handhabung der Nanotechnologie sind nur auf supranationaler Ebene lösbar und erfordern eine intensive internationale Abstimmung (vgl. Abschnitt 5.7 und 5.10). Angesichts eines absehbaren Fachkräftemangels in der Nanotechnologie stellen sich auch hinsichtlich der Ausbildung, Qualifizierung und Förderung von Nachwuchswissenschaftlern große Herausforderungen (vgl. Abschnitt 5.5).

2 Einleitung

Die Nanotechnologie ist eine der Schlüsseltechnologien im Rahmen der Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung. Schlüsseltechnologien sind als Treiber für Innovationen von entscheidender Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit der deutschen Wirtschaft [1]. Als führender Nanotechnologiestandort in Europa verfügt Deutschland über eine gute Ausgangsposition in der wirtschaftlichen Umsetzung dieser Schlüsseltechnologie.

Die gezielte technologische Nutzung nanostrukturierter Materie und Wirkprinzipien auf der Nanoskala werden die Innovationsprozesse in vielen Hightechbereichen und Wirtschaftsbranchen in den nächsten Jahrzehnten wesentlich mitbestimmen. Die Nanotechnologie gilt weltweit als Hoffnungsträger für die Entwicklung hocheffizienter und ressourcenschonender Produktionstechniken und Produkte, die langfristig Lösungsbeiträge für drängende globale Zukunftsfragen liefern können, wie den Klima- und Umweltschutz, die Sicherstellung der Ernährung sowie der Wasser- und Energieversorgung einer wachsenden Weltbevölkerung oder für die Umsetzung zukunftsfähiger Konzepte in den Bereichen Mobilität, Sicherheit, Information und Kommunikation. Die Nanotechnologie, oftmals wegen der vielfältigen Teilgebiete auch unter der Mehrzahl Nanotechnologien zusammengefasst, nimmt daher folgerichtig in den Forschungsstrategien aller wichtigen Industrieländer einen bedeutenden Platz ein. Die Bedeutung für den technologischen Fortschritt dokumentiert sich auch an zahlreichen Nobelpreisauszeichnungen im Bereich der Nanotechnologie, wie zuletzt die Verleihung des Physiknobelpreises 2010 für die Entdeckung des Graphens, einer nanoskaligen Kohlenstoffvariante mit hohem technologischen Anwendungspotenzial.

Die innovationspolitische Herausforderung für Deutschland in der Nanotechnologie liegt in der Umsetzung dieser neuartigen Effekte und Materialien in wettbewerbsfähige Produkte und technologische Problemlösungen im Einklang mit gesellschaftlichen Anforderungen wie dem Umwelt-, Arbeits- und Verbraucherschutz. Unterstützt von einer frühzeitigen und kontinuierlich ausgebauten Förderung des Technologiefeldes hat sich eine dynamische Nanotechnologie-Unternehmenslandschaft in Deutschland entwickelt. Sowohl junge Start-Up Unternehmen wie auch etablierte Unternehmen und internationale Großkonzerne setzen bei der Entwicklung neuer Produkte zunehmend auf die Nanotechnologie. Auf der anderen Seite werden in Teilbereichen der Nanotechnologie auch strittige gesellschaftliche Fragen diskutiert, wie der sichere Umgang mit Nanomaterialien sowie deren Handhabung im Rahmen staatlicher Regularien. Der vorliegende Report zum Status quo der Nanotechnologie ist eine aktuelle

Standortbestimmung Deutschlands innerhalb dieses dynamischen Innovationsfeldes.

2.1 Definition der Nanotechnologie

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Nanotechnologie für wirtschaftliche Anwendungen sowie deren Relevanz im Rahmen gesetzlicher Regelwerke wächst der Bedarf hinsichtlich international abgestimmter Definitionen und Standards. Internationale Normungs- und Standardisierungsaktivitäten der ISO und des IEC haben bereits im Jahr 2005 begonnen. Anfang 2011 liegen mittlerweile elf international abgestimmte Standards des technischen Komitees TC 229 „Nanotechnologien“ der ISO in publizierter Form vor [2]. Sie liefern ein erstes Grundgerüst an Definitionen und Klassifikationen unterschiedlicher Teilbereiche der Nanotechnologie. Dabei gibt es zwei wesentliche Kriterien zur Einordnung:

- **Nanospezifische Eigenschaften: nanospezifisch sind Materialeigenschaften und Effekte, die sich nicht unmittelbar aus den Eigenschaften größerer Strukturbausteine extrapolieren lassen, so dass signifikante Eigenschaftssprünge zu erwarten sind. Ursache hierfür sind oftmals ein stark vergrößertes Oberflächen-zu-Volumenverhältnis sowie Quanteneffekte auf der Nanoskala.**
- **Größenbereich: Der Größenmaßstab „nanoskalig“ wird in der Mehrzahl der Definitionsansätze zwischen ungefähr 1 und 100 nm angesetzt und grenzt sich damit nach oben zur Mikroskala ($> 0,1\text{ }\mu\text{m}$) und nach unten zu Atomen und einfachen Molekülen ab ($< 1\text{ nm}$). Nanospezifische Eigenschaften sind in diesem Größenbereich weitgehend abgedeckt, können in Ausnahmefällen prinzipiell aber auch oberhalb 100 nm auftreten [3].**

Die Festlegung der Definitionskriterien ist in der Fachszene weiterhin umstritten. Hinzu kommt, dass mit diesen Kriterien nur ein grober Rahmen abgesteckt ist und noch viele Detailfragen offen bleiben, beispielsweise wie signifikante Eigenschaftssprünge definiert sind oder wie Nanomaterialien mit einer Größenverteilung einzuordnen sind, die nur teilweise im Nanobereich liegt. Definitionen nach technisch-wissenschaftlichen Kriterien stehen dabei z. T. im Widerspruch zu Vorschlägen im regulatorischen Kontext, die eine Ausweitung des Größenbereiches von Nanomaterialien unter dem Gesichtspunkt des Vorsorgeprinzips deutlich oberhalb von 100 nm befürworten, um mögliche nanospezifischen Toxizitätseffekte mit größerer Sicherheitsmarge berücksichtigen zu können. Ein weiteres Problem in der definitorischen Einordnung ist die komplexe Zusammensetzung realer Materialien, bei denen Nanoobjekte

oftmals nur einen geringen Anteil an der Größenverteilung im gesamten Materialverbund einnehmen, der messtechnisch mitunter schwierig zu erfassen ist (vgl. Abschnitt 4.10).

Angesichts des Mangels einer eindeutigen und praxistauglichen definitorischen Einordnung der Nanotechnologie wurde im Rahmen des vorliegenden Reports auf folgenden pragmatischen Definitionsansatz zurückgegriffen, der bereits bei der letztmaligen Status-Quo-Erhebung der Nanotechnologie in Deutschland angewendet worden ist:

Die Nanotechnologie befasst sich mit der kontrollierten Herstellung, Analyse und Nutzung von Materialien und Komponenten mit funktionsrelevanten Strukturgrößen zwischen ca. 1 und 100 Nanometern in mindestens einer Richtungsdimension. Dabei resultieren aus der Nanoskaligkeit neue Funktionalitäten und Eigenschaften, die zur Verbesserung bestehender oder zur Entwicklung neuer Produkte und Anwendungen beitragen können.

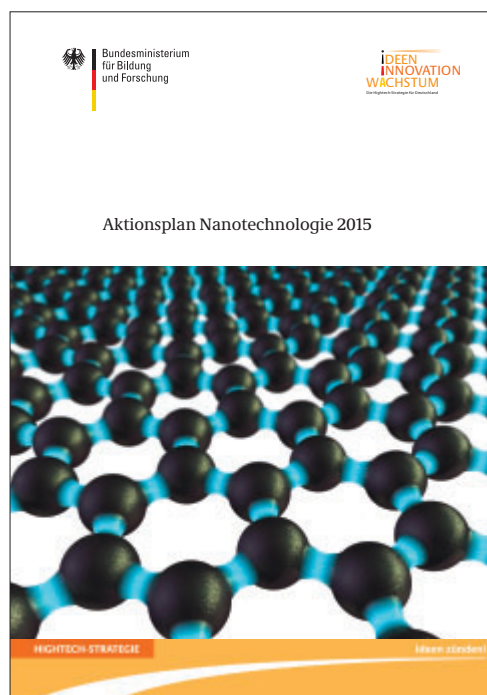
Durch die Beibehaltung des gewählten Definitionsansatzes wird eine Kontinuität und Vergleichbarkeit der erhobenen Daten gewährleistet. Eine Zuordnung der eigenen Aktivitäten zum Bereich der Nanotechnologie blieb im Rahmen der Erhebung dem Ermessen der befragten Forschungsinstitutionen und Unternehmen überlassen.

2.2 Aktionsplan Nanotechnologie der Bundesregierung

Die Bundesregierung verfolgt mit der 2006 initiierten Nano-Initiative im Rahmen der Hightech-Strategie eine konsequente Nutzung der Wertschöpfungspotenziale der Nanotechnologie zur Stärkung des Innovations- und Technologiestandortes Deutschland [4]. Mit dem im Januar 2011 veröffentlichten Aktionsplan Nanotechnologie 2015 liegt ein Ressort übergreifendes integriertes Konzept zur verantwortungsvollen Nutzung der Nanotechnologie in Deutschland vor [5]. Die Ziele der Bundesregierung im Rahmen des Aktionsplans 2015 sind:

- **Nanotechnologie sicher und nachhaltig zu gestalten,**
- **die Potenziale der Nanotechnologie in Bildung und Forschung zu nutzen,**
- **mit Nanotechnologie zu Wachstum und Innovation in Deutschland beizutragen,**
- **die Möglichkeiten der Nanotechnologie für die Gesundheit zu nutzen,**
- **die Beiträge der Nanotechnologie zu Umwelt-, Klimaschutz und zur Sicherung der Energieversorgung zu realisieren,**
- **mit Nanotechnologie zu umweltfreundlicher und energiesparender Mobilität zu kommen,**
- **die Möglichkeiten der Nanotechnologie für eine nachhaltige Landwirtschaft und zur Sicherung der Ernährung zu nutzen.**

Die Forschungsförderung der Nanotechnologie wird in den nächsten Jahren stark im Hinblick auf ihre Lösungsbeiträge zu den in der Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung beschriebenen globalen Herausforderungen Klima/Energie, Gesundheit/Ernährung, Mobilität, Sicherheit und Kommunikation ausgerichtet werden. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf einem sicheren und verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien liegen. Die Forschung zu Expositionsszenarien, produkt- bzw. partikelspezifischen Risikoabschätzungen sowie ökotoxikologischen Bewertungen wird weiter vorangetrieben werden.



Aktionsplan Nanotechnologie 2015 (Quelle: BMBF)

2.3 Ziele des nano.DE-Reportes

Der nano.DE-Report ist als Informationsgrundlage zur Bereitstellung eines aussagekräftigen und im zeitlichen Verlauf vergleichbaren Indikatorensystems zur wirtschaftlichen Entwicklung der Nanotechnologie in Deutschland konzipiert. Dadurch soll die Transparenz und Außendarstellung des Nanotechnologiesektors in Deutschland verbessert und eine fundierte Datenbasis für Politik und Wirtschaft bereit gestellt werden. Nach einer ersten umfassenden Bestandsaufnahme im Jahr 2009 soll die vorliegende Ausgabe in erster Linie Veränderungen und Trends im Vergleichszeitraum aufzeigen. Weiterhin werden jeweils aktuelle Branchen- und Technologietrends sowie Marktentwicklungen der Nanotechnologie in den verschiedenen wirtschaftlichen Anwendungsfeldern dargestellt. Im Vergleich zur Erstauflage wurde das Indikatorensystem auf die öffentliche Forschung und den Finanzsektor erweitert, um das Innovationssystem der Nanotechnologie noch umfas-

sender charakterisieren zu können. Weiterhin zeigt der Report aktuelle Entwicklungen in Bezug auf die sozioökonomischen Rahmenbedingungen für die Kommerzialisierung der Nanotechnologie in Deutschland auf.

2.4 Methodischer Ansatz

Die Nanotechnologie wird in den allgemeinen Wirtschaftsstatistiken nicht als eigenständiger Wirtschaftszweig erfasst. Somit lassen sich aus allgemeinen statistischen Wirtschaftsdaten (z. B. Umsatz und Mitarbeiterzahlen) kaum Rückschlüsse auf das tatsächliche Ausmaß der wirtschaftlichen Umsetzung der Nanotechnologie ziehen. Als methodischer Ansatz zur Bestimmung der wirtschaftlichen Bedeutung wurde daher eine direkte Datenerhebung bei den deutschen Nanotechnologieunternehmen durch eine schriftliche Befragung gewählt, um eine unmittelbare Selbsteinschätzung der Unternehmen im Hinblick auf das Ausmaß und die Ausrichtung ihrer Nanotechnologieaktivitäten zu erhalten. Für die Befragung wurde ein Datenbestand von 960 deutschen Unternehmen berücksichtigt, die zum Zeitpunkt der Erhebung im vom BMBF eingerichteten Internet-Kompetenzatlas Nanotechnologie (www.nano-map.de) registriert waren. Dabei handelt es sich nicht nur um Nanotechnologiekernunternehmen, bei denen Nanotechnologie einen erheblichen Anteil der Geschäftsaktivitäten ausmacht, sondern z. T. auch um Komponenten- und Systemhersteller, die nanotechnologische Vorprodukte weiterverarbeiten, aber keine eigenen nanotechnologischen Verfahren einsetzen. Ebenso werden Dienstleistungsunternehmen aus den Bereichen Auftragsforschung, -beschichtung und -analytik, Risikobewertung und Beratung erfasst. Insgesamt wurde ein Rücklauf von 205 Fragebögen erzielt. Die Rücklaufquote liegt damit bei 21 %. 12 Unternehmen gaben an, nicht im Sinne der vorgegebenen Definition im Bereich Nanotechnologie tätig zu sein, wobei aber dennoch z. T. zumindest Forschungsaufwendungen für die Nanotechnologie angegeben worden sind. Die Zahl der auswertbaren Fragebögen ist damit gegenüber der Befragung der Erstauflage im Jahr 2009 mit 237 verwertbaren Fragebögen etwas geringer. Zum Teil könnte dies mit aktuellen Diskussionen zu regulatorischen Einschränkungen und Kennzeichnungspflichten von Nanomaterialien erklärbar sein, die die Bereitschaft von Unternehmen, sich öffentlich im Feld Nanotechnologie zu positionieren, gemindert haben dürfte. Die statistische Aussagekraft einer Stichprobe mit über 200 auswertbaren Datensätzen von einer Gesamtzahl von 960 Unternehmen kann aber durchaus als aussagekräftig und repräsentativ für den Nanotechnologiesektor in Deutschland angesehen werden.

Für die Erhebung des öffentlichen Forschungssektors wurde ein separater Fragebogen entwickelt und an 579 Forschungsinstitutionen in Deutschland verschickt, die zum Zeitpunkt der Befragung im Kompetenzatlas www.nano-map.de verzeichnet waren. Dabei handelt es sich um universitäre Einrichtungen von Hochschulen und Fachhochschulen sowie Einrichtungen öffentlicher Großforschungsinstitutionen wie der Leibniz-Gemeinschaft, der Helmholtz-Gemeinschaft, der Max-Planck-Gesellschaft oder der Fraunhofer-Gesellschaft. Zu geringem Anteil

zählen hierzu auch Forschungsinstitutionen, die als Verein oder Stiftung organisiert sind. Bei der Erhebung wurde ein Rücklauf von 177 Fragebögen erzielt, was einer Rücklaufquote von rund 31 % entspricht. Alle antwortenden Institutionen gaben an, im Bereich Nanotechnologie aktiv zu sein.

Da privates Beteiligungskapital ein wesentlicher Erfolgsfaktor bei der Entwicklung neuer Technologiefelder darstellt, wurde der Finanzsektor mit einem eigenständigen Fragebogen in die Erhebung einbezogen. Der Datenbestand basiert auf einer Mitgliederliste des Bundesverbandes Deutscher Kapitalbeteiligungsgesellschaften. Insgesamt wurden 235 Finanzinstitutionen in der Erhebung angeschrieben. 44 Fragebögen wurden zurück erhalten mit einer Rücklaufquote von 19 %. Von den antwortenden Beteiligungsgesellschaften gaben 17 an, sich noch nicht mit der Nanotechnologie befasst zu haben. Demnach standen für die Auswertung 27 Datensätze zur Verfügung. Setzt man die Zahl in Relation zu den 75 Finanzinstitutionen, die im Kompetenzatlas www.nano-map.de registriert sind, entspricht dies einer Beteiligungsquote von 36 %.

Weiterhin wurde eine statistische Auswertung des Datenbestandes des Kompetenzatlas www.nano-map.de in Bezug auf spezifische Anwendungs- und Technologieschwerpunkte der erfassten rund 1.800 Nanotechnologieinstitutionen vorgenommen. Zur qualitativen und quantitativen Analyse von Marktpotenzialen und Branchenanwendungen wurden internationale Marktprognosen und Branchenberichte ausgewertet, die nach 2009 publiziert worden sind. Ergänzt wurden die Marktanalysen durch Einschätzungen von Unternehmen und Forschungsinstitutionen, die im Rahmen der Akteursbefragung erhoben worden sind.

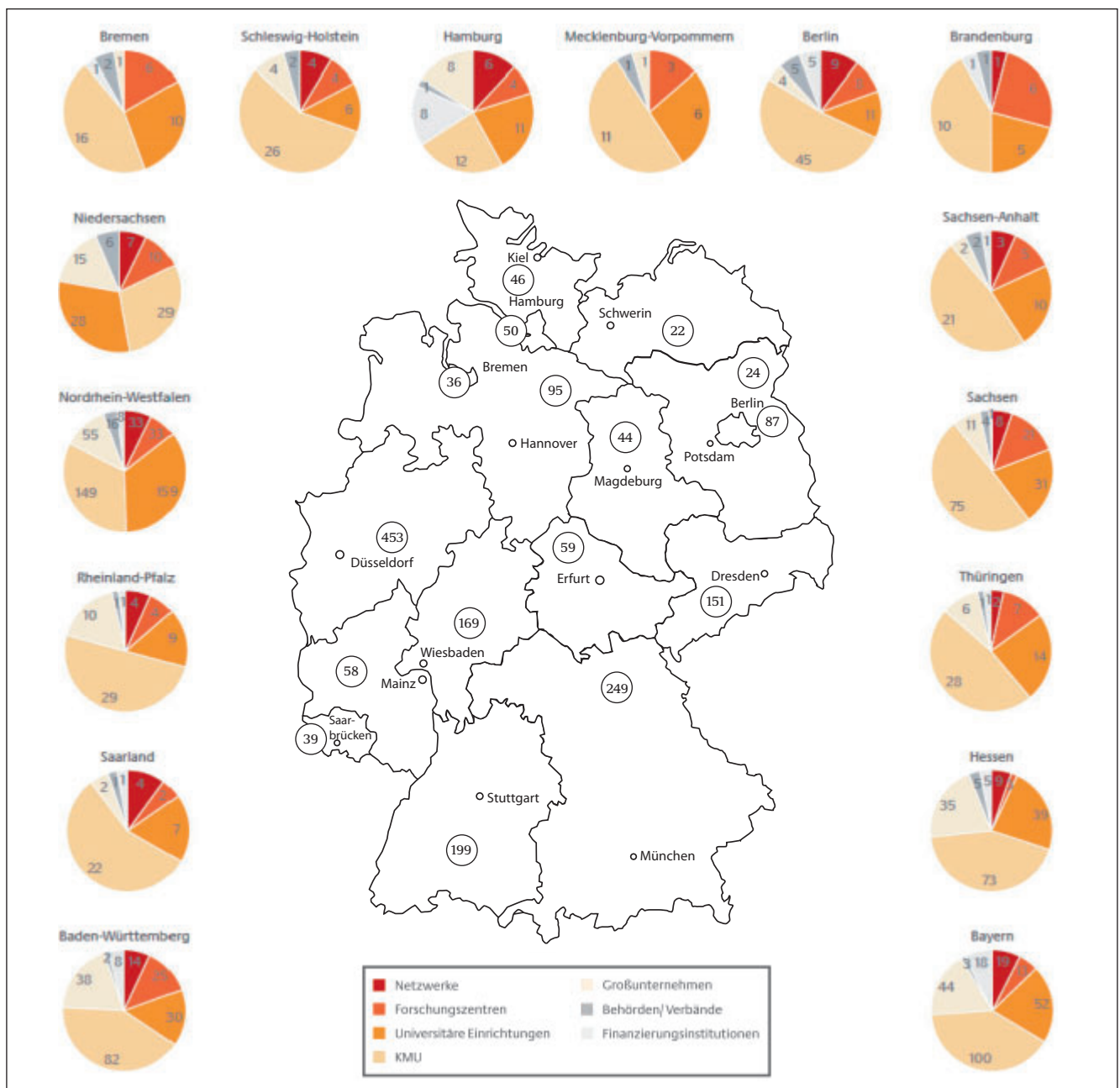
Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte der Nanotechnologie in den einzelnen Anwendungsfeldern wurden durch eine Analyse der vom BMBF im Kontext der Nanotechnologie aktuell rund 2.000 geförderten Forschungsprojekte analysiert. Dabei wurde auf die Förderdatenbank PROFI der Bundesregierung zurückgegriffen, in der u. a. Kurzbeschreibungen zu einzelnen Förderprojekten verfügbar sind.

Für die Beschreibung der sozioökonomischen Rahmenbedingungen der Kommerzialisierung der Nanotechnologie in Deutschland wurden Beiträge ausgewiesener Experten im jeweiligen Themenfeld zusammengetragen. Zu den relevanten Themen in dieser Ausgabe zählen u. a. ein internationales Benchmarking der Nanotechnologie, Nanotechnologie-Patente, Highlights aus der Forschungs- und Nachwuchsförderung des BMBF, die öffentliche Wahrnehmung sowie Informationsplattformen und internationale Aktivitäten zu Risikoaspekten von Nanomaterialien.

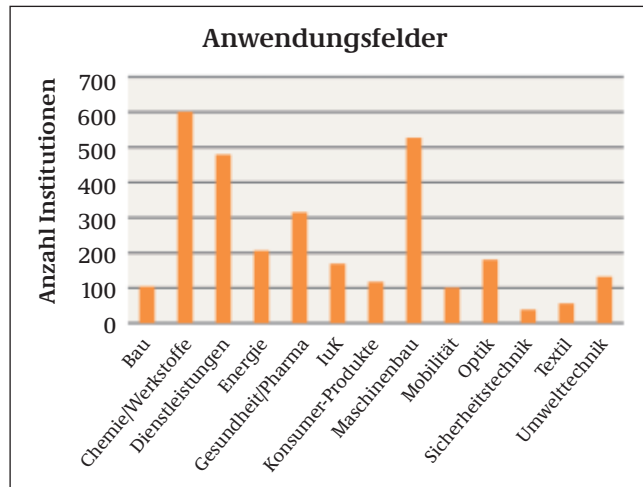
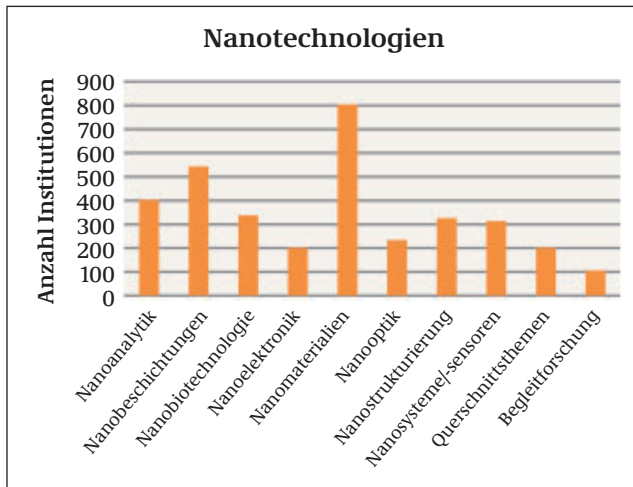
3 Nanotechnologie in Deutschland

Die Nanotechnologie in Deutschland umfasst rund 1.800 Institutionen (Stand Januar 2011), davon ca. 40 % KMU, 13 % Großunternehmen, 24 % Hochschulinstitutionen und 9 % institutionelle Forschungseinrichtungen sowie sonstige Einrichtungen wie Netzwerke, Behörden, Verbände und Finanzinstitutionen. Die Verteilung der Akteure ist regional stark unterschiedlich. Mit Abstand führend bezüglich der Anzahl der Nanotechnologieakteure ist Nordrhein-Westfalen, gefolgt von Bayern, Baden-

Württemberg, Hessen und Sachsen. Die zahlenmäßig am stärksten vertretenen Nanotechnologieteilgebiete sind Nanomaterialien, Nanobeschichtungen und die Nanoanalytik. Zu den wichtigsten Branchen der Nanotechnologie zählen die Chemie, der Geräte- und Maschinenbau (incl. Messtechnik), der Dienstleistungssektor (Auftragsforschung, -beschichtung etc.) sowie der Gesundheitssektor.



Anzahl und regionale Verteilung der Nanotechnologieakteure in Deutschland (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011)

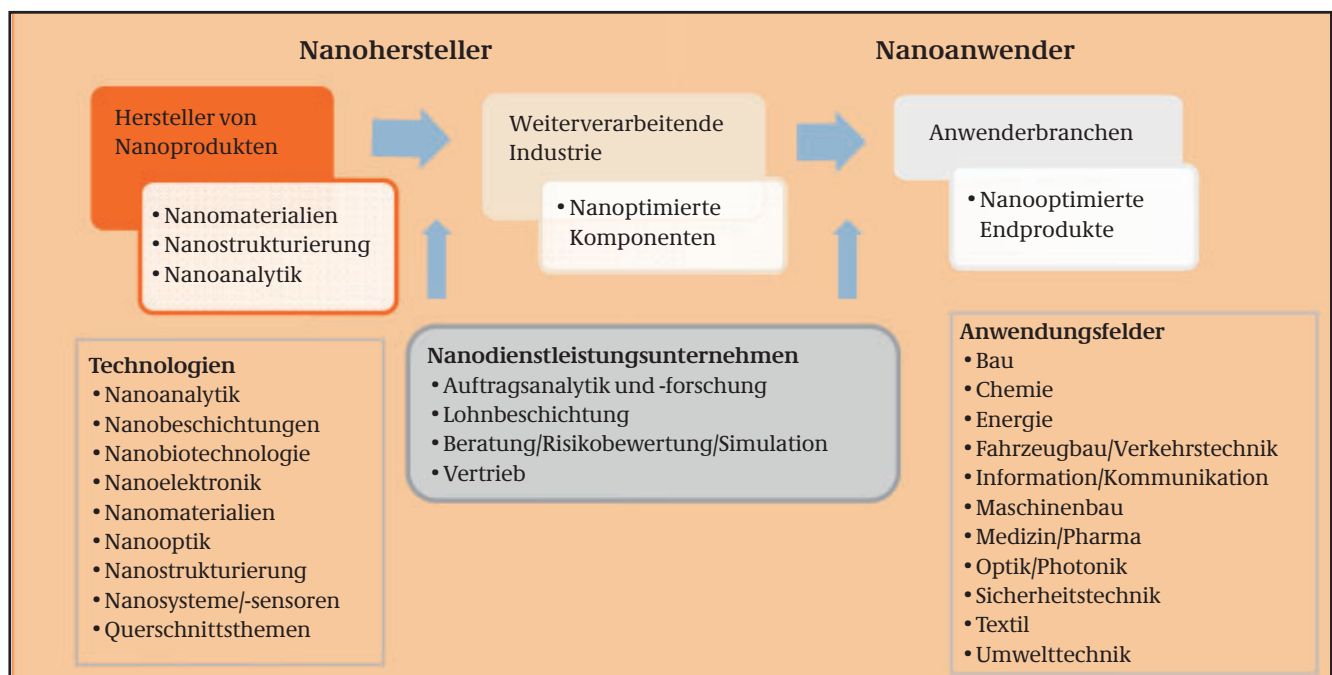


Zuordnung der deutschen Nanotechnologieinstitutionen zu technologischen Teilgebieten und Anwendungsfeldern (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten und Anwendungsfeldern zugeordnet sein.)

3.1 Nanotechnologieunternehmen

In Deutschland gibt es aktuell ca. 960 Unternehmen, die sich mit dem Einsatz der Nanotechnologie in Bereichen der Forschung und Entwicklung sowie der Vermarktung kommerzieller Produkte und Dienstleistungen befassen. Der KMU-Anteil beträgt rund 75 %. Seit 2009 ist die Anzahl der mit Nanotechnologie befassten Unternehmen um mehr als 200 angestiegen (vgl. nano.DE-Report 2009 [6]). Als branchenübergreifende Querschnittstechnologie ist die Nanotechnologie dabei keinem klassischen Wirtschaftszweig zuzuordnen. Entsprechend der Positionierung in der Wertschöpfungskette lassen sich zum einen Hersteller und Anwender

nanotechnologischer Produkte unterscheiden. Hersteller nanotechnologischer Produkte umfassen dabei Produzenten von Nanomaterialien sowie von Geräten zur Erzeugung und Analyse nanoskaliger Strukturen und Materialien. Anwender nanotechnologischer Produkte setzen diese zur Optimierung und Funktionsverbesserung von Zwischenprodukten und Endprodukten in verschiedenen industriellen Anwendungsfeldern ein. Weiterhin nehmen Dienstleistungsunternehmen eine wichtige Rolle im Innovationsprozess der Nanotechnologie ein, die an verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette nanospezifische Dienstleistungen in den Bereichen Auftragsanalytik und -forschung, Lohnbeschichtung, Beratung, Risikobewertung, Simulation, Vertrieb etc. anbieten.



Vereinfachte Darstellung der Wertschöpfungskette der Nanotechnologie (Quelle: VDI TZ)

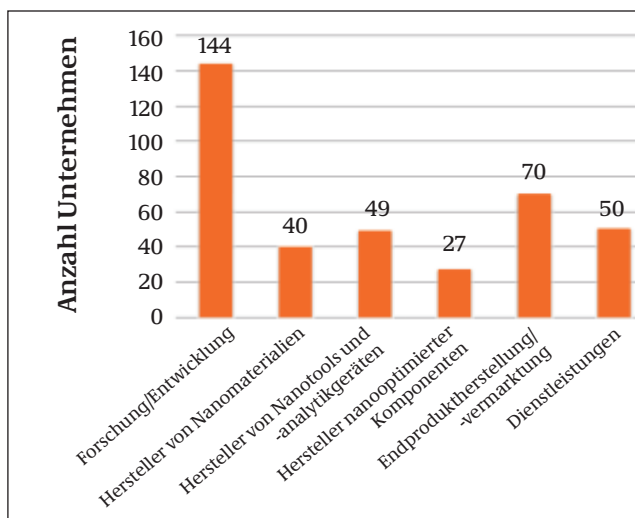
Je nach Intensität des Engagements lassen sich bei Nanoherstellerunternehmen noch Nanokernunternehmen unterscheiden, bei denen Nanotechnologieaktivitäten den überwiegenden Teil der Geschäftsaktivitäten ausmachen, sowie Unternehmen, bei denen die Nanotechnologieaktivitäten nur einen Teilbereich repräsentieren. Bei Nanotechnologiekernunternehmen handelt es sich in erster Linie um spezialisierte Hersteller von Nanomaterialien sowie Geräten zur Nanostrukturierung und -analytik aber auch zum Teil um Komponentenhersteller, z. B. in der Optik und Elektronik.

Bei Nanoanwenderunternehmen nehmen die Nanotechnologieaktivitäten oftmals nur eine untergeordnete Rolle ein, da nanooptimierte Komponenten in der Regel nur einen relativ geringen Teil ausmachen, bezogen auf die gesamte Wertschöpfung des Endproduktes, und die nanooptimierten Komponenten oftmals von Zulieferern zugekauft werden.

Zur weiteren Charakterisierung der Nanotechnologieunternehmen wird die Stichprobe von rund 200 Unternehmen herangezogen, die sich an der Fragebogenerhebung des nano.DE-Reportes beteiligt haben. Dies entspricht einem Anteil von rund 20 % an der Gesamtheit aller Nanotechnologieunternehmen in Deutschland.

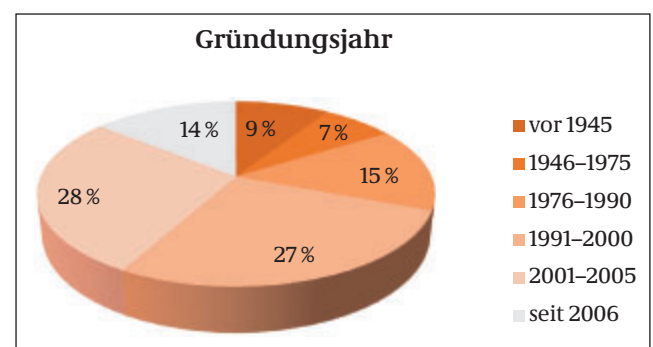
Art der Nanotechnologieaktivität und Gründungsjahr

Zunächst erfolgt eine Charakterisierung der deutschen Nanotechnologieunternehmen im Hinblick auf den Stand innerhalb der Wertschöpfungskette, dem Unternehmensalter sowie des Ausmaßes der Nanotechnologieaktivität. Wie nachfolgender Grafik entnommen werden kann, befassen sich mehr als drei Viertel aller Unternehmen mit Forschung und Entwicklung. Jeweils rund ein Viertel der Unternehmen sind Hersteller von Nanomaterialien oder Geräten zur Nanostrukturierung und -analytik bzw. Anbieter nanospezifischer Dienstleistungen. Der Anteil an Unternehmen die Endprodukte herstellen und vermarkten beträgt 38 %.



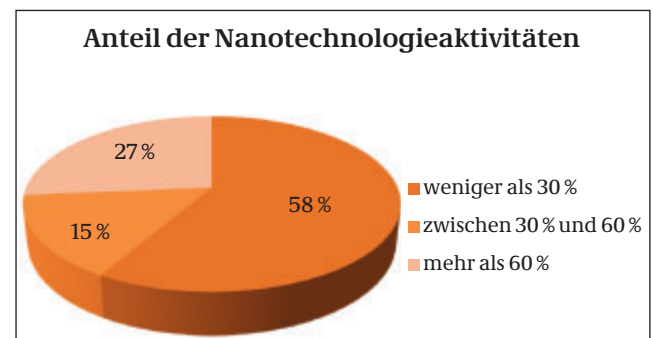
Einordnung der Nanotechnologieaktivitäten deutscher Nanotechnologieunternehmen entlang der Wertschöpfungskette (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011; n = 184, Mehrfachnennungen möglich)

Rund zwei Drittel der beteiligten Nanotechnologieunternehmen sind nach 1990 gegründet worden. Dies unterstreicht die dynamische Entwicklung des Nanotechnologiesektors, dessen Förderung durch das BMBF seit den 90er Jahren verstärkt vorangetrieben worden ist. Der Trend zu Neugründungen ist ungebrochen, was sich in einem Anteil von 14 % der Unternehmen dokumentiert, die nach 2006 gegründet worden sind. Bei rund einem Drittel der Teilnehmer handelt es sich um Unternehmen, die vor der Etablierung des Nanotechnologiefeldes in den 90er Jahren gegründet worden sind und die Nanotechnologie erst im Verlauf der Unternehmensentwicklung in das Geschäftsportfolio aufgenommen haben.



Gründungsjahr der Nanotechnologieunternehmen
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011; n = 198)

Bei rund einem Viertel der befragten Unternehmen beträgt der Anteil der Nanotechnologie mehr als 60 %. Diese Unternehmen können als Nanokernunternehmen bezeichnet werden. Aus der Stichprobe hochgerechnet auf die Gesamtzahl von 960 Nanotechnologieunternehmen ist von einer Anzahl von ca. 250 Nanokernunternehmen in Deutschland auszugehen, die sich fast ausschließlich mit der Nanotechnologie befassen. Bei rund 60 % der Unternehmen macht die Nanotechnologie nur einen Anteil von weniger als 30 % von den Geschäftsaktivitäten aus. Dennoch können auch diese Unternehmen erheblich zur Wertschöpfung in der Nanotechnologie beitragen, wie etwa die chemische Großindustrie, die zu den bedeutendsten Nanotechnologieakteuren zählt, obwohl der relative Anteil der Nanotechnologieaktivitäten eher gering ist.

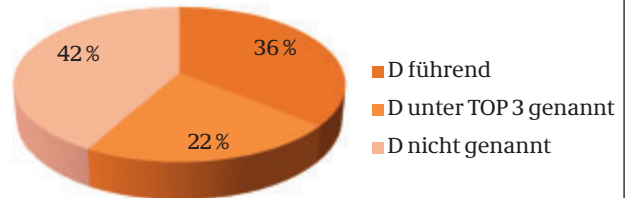


Anteil der Nanotechnologie an den gesamten Unternehmensaktivitäten
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011; n = 197)

Nanotechnologieprodukte und Position Deutschlands

Die deutschen Nanotechnologieunternehmen wurden hinsichtlich ihrer derzeit wichtigsten Nanotechnologieprodukten, dem geschätzten Weltmarktvolumen sowie dem führenden Land im jeweiligen Marktsegment befragt. Bei rund einem Drittel der Nanotechnologieprodukte wird Deutschland als führender Hersteller genannt. Bei 42 % der Produkte wird Deutschland nicht unter den führenden Nationen genannt, sondern vor allem die USA, Japan und ferner andere asiatische Staaten wie Korea, Taiwan oder China.

Marktführerschaft in Bezug auf Nanotechnologie-Produkte



Einschätzung der Position Deutschlands im Hinblick auf die jeweiligen Nanotechnologieprodukte der befragten Unternehmen
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011; n = 180)

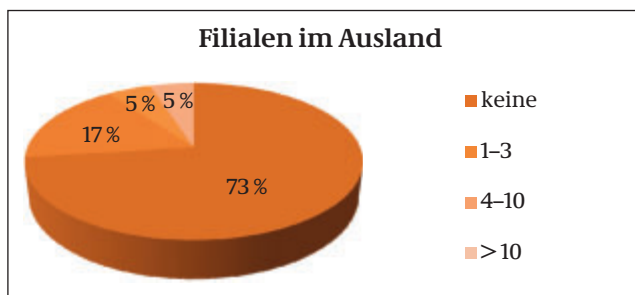
Geschätztes Marktvolumen (basierend auf Angaben der befragten Unternehmen)	> 100 Mio. €/a	21 -100 Mio. €/a	bis 20 Mio. €/a	keine Angaben
	Nanothermovoltaikzellen/-generatoren	Metall-Kolloide; Gold-Biokonjugate	Leuchtmittelbeschichtung; Textil (UV-Schutz); Dosieren von Nanosuspensionen; Nano-optimierte Trennmittel; Energie sparende Heiztechnologie	Nano-Tinten; Katalytische Beschichtungen; Böhmit-Flammenschutz; Polymer-Komposite; elektrisch beheizbare Schichten; CNT-Titanlegierung; Nanobeton; Nanoimprint-Materialien; Korrosionsschutzsysteme; Batterieadditive; Antimikrobielle Füllstoffe; Oberflächendesinfektion; Nanosilber; Elektromagnetische Abschirmung; CNT-Dispersion für Polymere; Zunderschutzsysteme; Medizinische Textilien; Wasserstoffspeicher
	Photovoltaik Solarmodule; Hardcoatings; Nanoformulierungen für Arzneistoffe; Drug-Delivery-Systeme; Photokatalytische Coatings; Membran-Elektroden-Einheit für Brennstoffzellen; Einzelzell-PCR Glasobjektträger; Röntgen-induzierte Photoelektronenspektroskopie; Elektronenmikroskopie; Antifog-Coatings	Nanofasern für Filter; Lithographie-Anlagen/-Masken; Transfektionsreagenzien; XRO-Röntgendiffraktion; Wafer Polishing; Ellipsometer für dünne Schichten, Microarray-Systeme; Laser für Datenleitung; Vertikale Laserdioden, Nanosilber-Textilien, Partikelstandards/-Messtechnik; Dünnschichttechnik/ Molekularstrahlepitaxie	Simulation von nm CMOS-Transistoren; AFM-Sonden; Nano-Lithographie; Multilayer-Röntgenoptiken; Electronical Nanoprobung; HTS Drähte; Nanobeschichtete Synchrotron-optiken; Kleinwinkel Röntgenstreuanlagen; Reaktive Nanofolien; SNOM; Nanomikroskopie; Dünnschichtoptiken für Röntgenstrahlung; CNT-Anwendungen	Lab-on-a-Chip-Systeme; Halloysit-Nanotubes; Insitusonde zur Nanopartikel-detektion; Kondensationspartikelzähler; U-SMPS; Aerosolelektrometer; Nano-IR Spektroskopie; Nanoextraktion von DNS; Biochips; Dendrimerchips; Fullerene für OPV; Nanoschichtsilikate; Injektionstechnologie von Nanopartikeln; LED; Leuchtmittel
	Elektronenmikroskopie; Nanoporöse Antiflexbeschichtung; Ultrakurzpulsaserbau	Nanostrukturierte Oberflächen; Langzeitstabile Trennmittel; Membran-Elektroden-Einheit für Elektrolyse; Sol-Gel für Textil, Metall, Bauwesen; Quantenpunkt-Laser; Flugzeitsekundärionen-massenspektrometrie als Dienstleistung; Keramische Filtermembranen	Nano-Bio-AFM/Pinzetten; Nanometer-Multischicht-Röntgenoptik	UV-Schutz (Farben & Lacke); Nanoschichten für Optik-Komponenten; Organische Solarzelle; Biokeramik (Zahnersatz, Hüftgelenke); Bioseparation; Nano-Silicia in Epoxidharzen; Fasern für Vliesstoffe; Silizium/Galliumarsenid-Substrate; CNT in Faserkompositen und Polymeren
	Lithografieobjektive; Nanopartikelvakzine; Nanopartikelärer Hydroxylapatit als Knochenersatz	Nano-Beschichtungen; UV-härtende Nanokomposit-Lacke; MR-Sensorchips (Strom/Weg); Analysegeräte für Nano-Technik; Elektronendetektor/ Photoelektronenoberflächenanalyse	Röntgendiffraktometer/ Nanoschichtanalytik; VT-SPM (UHV); Nanolacke; Aktive Schwingungsdämpfung; LT-SPM (UHV); Spektromikroskopie, LEEM/PEEM; Versiegelungen für Zinkschichten; SAXS-Röntgenkleinwinkelstreuung; Elektronenstrahlkomponenten; Nano-Plasmabeschichtungen; Niederenergetische Ionenstreuung; Beschichtung von Filtern; Silan-Additive	Hydrophobierungsgele; Funktionalisierte Fasern; Druckbare Elektronik; Gedruckte Sensoren; Nano-Diamantelektroden; Nano-Siliziumdioxid in UV-Acrylaten; Nanocoating für Betonschalungsplatten; Prozessmesstechnik für Plasma-prozesse; 3D-Laserlithografie-systeme; Lithografiemess-technik; Retina-Chip; Leitfähige Materialien; nm-auflösende Sensoren, Nanovibrationsanalyser; Feuerfestprodukte
	Keine Angaben	Andere führend	D unter TOP 3	D führend
Position Deutschlands (basierend auf der Einschätzung der befragten Unternehmen)				

Übersicht zu wichtigen Nanoprodukten deutscher Nanotechnologieunternehmen mit jeweiliger Einordnung der Marktpotenziale sowie der Position Deutschlands im internationalen Vergleich (n = 180)

Die Aufschlüsselung nach einzelnen Produkten zeigt, dass Deutschland vor allem in Produktbereichen der Nanoanalytik, der Nanostrukturierung, der Nanobeschichtungen sowie in Teilbereichen der Nanomedizin als führend eingeschätzt wird.

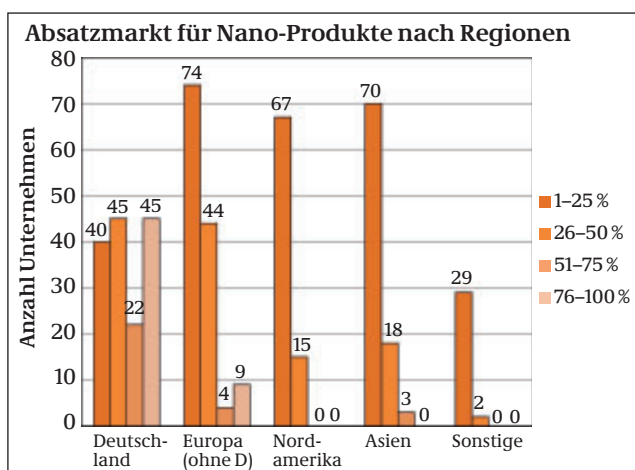
Internationalisierung deutscher Nanotechnologieunternehmen

Fast alle der beteiligten Unternehmen haben ihren Stammsitz in Deutschland, bis auf fünf Unternehmen, die aus den USA stammen. Rund ein Viertel der Unternehmen verfügt über mindestens eine Zweigstelle im Ausland. Bei 5 % handelt es sich um internationale Konzerne mit mehr als 10 ausländischen Filialen. Die deutliche Mehrheit der deutschen Nanotechnologieunternehmen produziert ausschließlich im Inland.



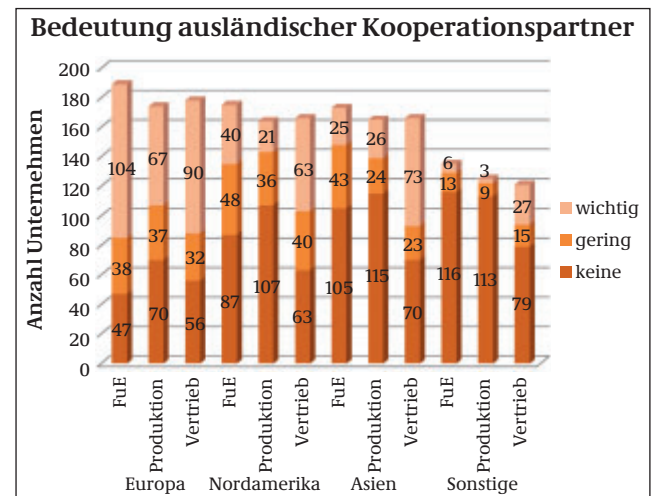
Anzahl der ausländischen Zweigstellen deutscher Nanotechnologie-Unternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 200)

Auch bezogen auf die Absatzmärkte stellt Deutschland den wichtigsten Markt dar. Ca. 30 % aller Unternehmen setzen mehr als 75 % ihrer Produkte in Deutschland ab. Für weitere rund 30 % ist der Anteil der in Deutschland abgesetzten Produkte allerdings kleiner als 25 %. Das europäische Ausland stellt den wichtigsten ausländischen Absatzmarkt dar, der für rund 30 % der Unternehmen mit bis zur Hälfte des Gesamtabsatzes zu Buche schlägt. Nordamerika und Asien haben ungefähr die gleiche Bedeutung als Absatzmarkt. Für die Mehrheit der deutschen Unternehmen tragen Nordamerika und Asien jeweils weniger als 25 % zum Absatz bei. Andere Regionen spielen eine untergeordnete Rolle, da lediglich 31 Unternehmen überhaupt nennenswerte Produktabsätze verzeichnen.



Bedeutung verschiedener Regionen als Absatzmarkt für deutsche Nanotechnologieunternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 159)

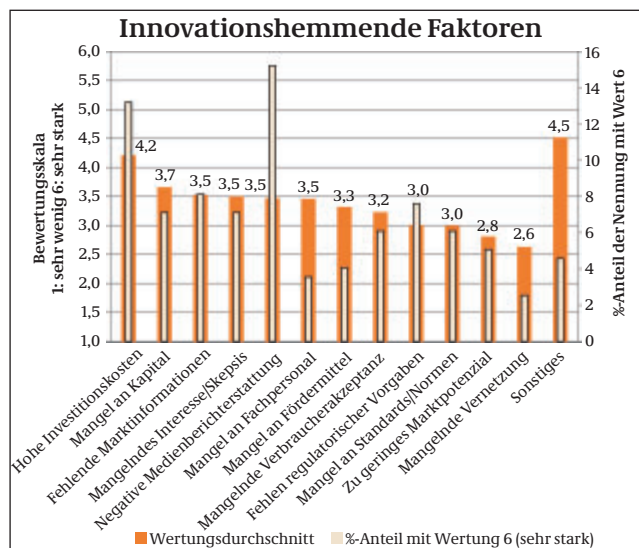
Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Bedeutung ausländischer Kooperationspartner bei der Forschung und Entwicklung (F&E), der Produktion und dem Vertrieb nanotechnologischer Produkte. Europa liegt in der Bedeutung vor Nordamerika, Asien und sonstigen Regionen. Mehr als die Hälfte aller deutschen Nanotechnologieunternehmen halten europäische F&E-Partner für wichtig. In Nordamerika, Asien und sonstigen Regionen werden vor allem Kooperationspartner im Vertrieb als wichtig eingestuft. Nordamerika gilt aber auch für 40 Unternehmen als wichtiger F&E-Kooperationspartner und liegt damit in der Einschätzung höher als Asien mit 25 Nennungen.



Bedeutung ausländischer Kooperationspartner für Forschung und Entwicklung, Produktion und Vertrieb (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 189)

Innovationshemmnisse

Der überwiegende Anteil deutscher Nanotechnologieunternehmen sieht derzeit keine gravierenden Innovationshemmnisse bei der Kommerzialisierung nanotechnologischer Produkte. Fast alle der abgefragten Faktoren wurden im Mittel über alle Unternehmen als durchschnittlich hinsichtlich der hemmenden Wirkung bewertet. Als wichtigstes Kommerzialisierungshindernis wurden hohe Investitionskosten eingeschätzt. Von einigen Unternehmen wurden als sonstige Faktoren u. a. die Langwierigkeit bei der Entwicklung, zu viel Bürokratievorschriften, hohe Kosten für Chemikalien-Zulassungen, billige Produkt-Plagiate oder auch eine Überschätzung bezüglich der erwarteten Nanoeigenschaften genannt. Daneben spielen in Teilbereichen auch technische Aspekte eine Rolle wie z. B. eine fehlende Langzeitstabilität nanospezifischer Eigenschaften. Trotz der verstärkten öffentlichen Diskussion zu möglichen Risiken durch Nanomaterialien werden eine negative Medienberichterstattung sowie eine mangelnde Verbraucherakzeptanz im Durchschnitt aller Antworten derzeit nicht als starkes Innovationshemmnis gesehen. Betrachtet man aber die Anzahl der Einzelwertungen für sehr stark eingeschätzte Innovationshemmnisse, liegt der Faktor „negative Medienberichterstattung“ mit 15 % an der Spitze. Daraus wird deutlich, dass zumindest für den Teilbereich verbrauchernaher Produkte und Nanomaterialien die öffentliche Risikodiskussion durchaus einen stark hemmenden Faktor darstellt.



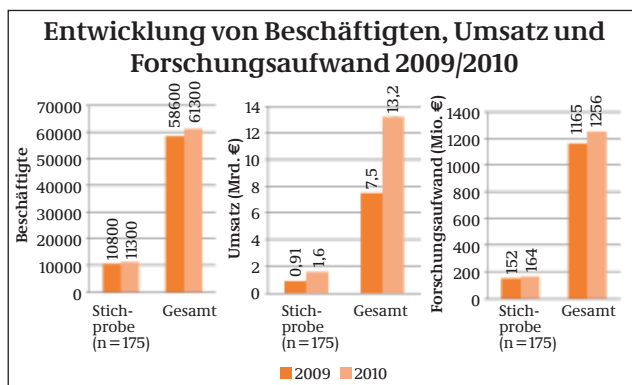
Bewertung hemmender Faktoren auf die Kommerzialisierung von Nanotechnologieprodukten (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 197)

Arbeitsplätze, Umsatz und Forschungsausgaben

Bei der Stichprobenerhebung wurden die Unternehmen nach der Anzahl der Mitarbeiter, des Umsatzes und der Höhe der Forschungsinvestitionen im Bereich der Nanotechnologie in den Jahren 2009 und 2010 befragt. Demnach waren im Jahr 2010 11.300 Mitarbeiter im Tätigkeitsfeld Nanotechnologie in den beteiligten Unternehmen (n = 175) beschäftigt. Rund die Hälfte der Arbeitsplätze fällt hier auf Großunternehmen der chemischen Industrie, der Optik/Messtechnik sowie der Halbleiterfertigung. Die andere Hälfte verteilt sich auf eine Vielzahl kleiner und mittlerer Unternehmen. Durch lineare Extrapolation aus der erhobenen Stichprobe auf die Gesamtzahl der Beschäftigten in Deutschland ergibt sich ein Wert von ca. 61.300 Mitarbeitern im Bereich der Nanotechnologie. Diese Hochrechnung basiert auf der vereinfachten Annahme, dass die Stichprobe als repräsentativ für die Grundgesamtheit der 960 Nanotechnologieunternehmen (Stand Ende 2010) angenommen werden kann. Nach Angaben der Unternehmen ist die Mitarbeiterzahl im Vergleich zum Jahr 2009 um 4 % angestiegen. Vergleicht man die Beschäftigtenzahlen mit der Erhebung von 2008, so ist ein Rückgang von ca. 1.000 Arbeitsplätzen zu verzeichnen. Berücksichtigt man die statistische Ungenauigkeit der Erhebung ist aber davon auszugehen, dass der Nanotechnologiesektor mittlerweile ungefähr den Stand vor der Weltwirtschaftskrise 2009 erreicht hat. Im Zuge der weltweiten Umsatzeinbrüche musste auch der Nanotechnologiesektor massive Einbußen hinnehmen. Besonders betroffen war hierbei der Bereich der Halbleiterfertigung, der aufgrund der Strukturgrößen und des eingesetzten Equipments zu großen Teilen der Nanotechnologie zuzurechnen ist. Die Verluste konnten z. T. durch einen erheblichen Anstieg der Anzahl der Nanotechnologieunternehmen von 750 auf 960 ausgeglichen werden. Der Zuwachs in den Unternehmenszahlen ist hierbei weniger auf Neugründungen zurückzuführen, sondern auf die Tatsache, dass immer mehr Unternehmen Nanotechnologieaktivitäten u. a. im Kontext von BMBF-Fördermaßnahmen entwickeln. Auf der anderen Seite ist insbesondere in der

chemischen Industrie im Zuge der Diskussion um regulatorische Einschränkungen von Nanomaterialien ein Trend zu erkennen, das Ausmaß der Nanotechnologieaktivitäten im Außenfeld eher unterzubewerten. Aufgrund der unklaren Definitionsfrage ist hierbei derzeit noch viel Interpretationsspielraum gegeben. Ungeachtet der statistischen Unsicherheiten der erhobenen Daten und dem Ermessensspielraum der Unternehmen bei der Zuordnung der Nanotechnologieaktivitäten ist derzeit von einem positiven Trend in der Beschäftigungssituation der Nanotechnologie auszugehen, der gemäß der Prognosen der Unternehmen für die weitere Geschäftsentwicklung auch im Jahr 2011 anhalten wird.

115 der befragten Unternehmen haben Angaben für den Umsatz im Bereich der Nanotechnologie in den Jahren 2009 und 2010 angegeben. In Summe ergibt sich für das Jahr 2010 ein Gesamtumsatz von 1,6 Mrd. €. Durch lineare Extrapolation auf die Gesamtzahl der Unternehmen in Deutschland (960) kann der Gesamtumsatz deutscher Nanotechnologieunternehmen auf rund 13 Mrd. € geschätzt werden. Das Umsatzwachstum ist nach eigenen Angaben der Unternehmen gegenüber 2009 mit 76 % ausgesprochen hoch, was sich in erster Linie durch Nachholeffekte infolge des Umsatzeinbruchs durch die Weltwirtschaftskrise erklären lässt. Im Vergleich zur Erhebung im Jahr 2008 liegt der ermittelte Gesamtumsatz deutlich niedriger (vgl. nano.DE-Report 2009 [6]). Allerdings flossen bei der Abschätzung für das Jahr 2007 die weltweiten Gesamtumsätze ausländischer Großkonzerne wie z. B. Applied Materials und AMD in die Kalkulation ein, die in Deutschland zumindest mit einer Produktionsstätte vertreten waren. Die in 2011 erhobenen Zahlen ergeben hingegen für die in Deutschland generierten Umsätze eine realistischere Abschätzung. Eine exakte regionale Zuordnung der Umsätze ist auf Basis der erhobenen Zahlen allerdings nicht möglich.



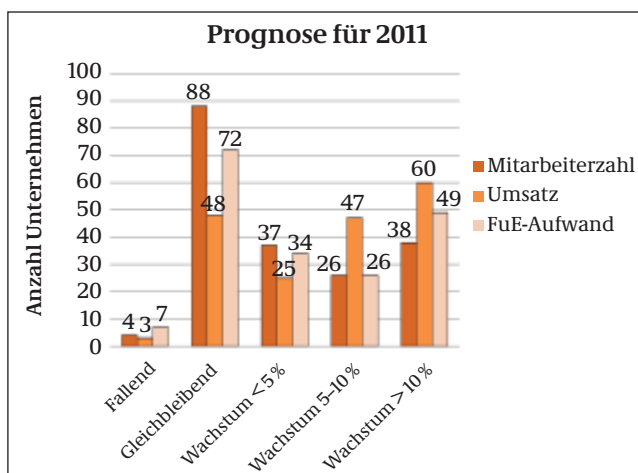
Beschäftigtenzahl, Umsatz und Forschungsaufwand der Nanotechnologie in Deutschland auf Basis einer direkten Erhebung bei deutschen Nanotechnologieunternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011)

Die Forschungsausgaben in der Nanotechnologie der beteiligten Unternehmen (n = 124) betrug im Jahr 2010 164 Mio. € gegenüber 152 Mio. € im Jahr 2009. Die Nanotechnologieforschungsausgaben sind damit in 2010 um 8 % im Vergleich zum Vorjahr angestiegen. Hochgerechnet auf die Gesamtzahl der Nanotechnologie-Unternehmen ist von einem

Gesamtforschungsaufwand in der Nanotechnologie von rund 1,3 Mrd. € auszugehen. Die Forschungsquote bezogen auf den Umsatz der Nanotechnologie betrug im Jahr 2010 ca. 10 %.

Prognose der Geschäftsentwicklung

Basierend auf der Ausgangssituation Anfang 2010 wurden die Unternehmen hinsichtlich der prognostizierten Geschäftsentwicklung in Bezug auf Mitarbeiterzahl, Umsatz und F&E-Aufwand für das Jahr 2011 befragt. Die Mehrzahl der Unternehmen schätzt die Entwicklung positiv ein. Rund 70 % der Unternehmen rechnen mit einem Umsatzwachstum, rund ein Drittel sogar mit einem Wachstum von über 10 %. Dies wird sich voraussichtlich auch in einem Anstieg der Mitarbeiterzahlen äußern. Rund die Hälfte der Unternehmen prognostizieren einen Anstieg der Mitarbeiterzahlen; ca. ein Fünftel erwartet einen Anstieg um mehr als 10 %. Mehr als die Hälfte der Unternehmen wird verstärkt in Forschung und Entwicklung in der Nanotechnologie investieren. Nur 2 % der Unternehmen rechnen mit einer negativen Geschäftsentwicklung in 2011.



Prognose der Geschäftsentwicklung für das Jahr 2011, Stand Januar 2011
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 193)

Ausgehend von den Unternehmensangaben für das Jahr 2010 lässt sich auf Basis der jeweiligen von den Unternehmen erwarteten relativen Änderungsraten die Entwicklung für das Jahr 2011 in absoluten Zahlen prognostizieren. Bezogen auf die Gesamtzahl von 960 Nanotechnologieunternehmen ist bei den Mitarbeiterzahlen mit einem Wachstum um rund 4 % auf dann 63.900 Beschäftigte im Jahr 2011 zu rechnen. Dies entspricht einem Zugewinn von 2.600 Arbeitsplätzen. Für den Umsatz wird ein Wachstum um 8 % auf 14,3 Mrd. € und bei den Forschungsinvestitionen ein Anstieg um 4 % auf ca. 1,35 Mrd. € im Jahr 2011 prognostiziert.

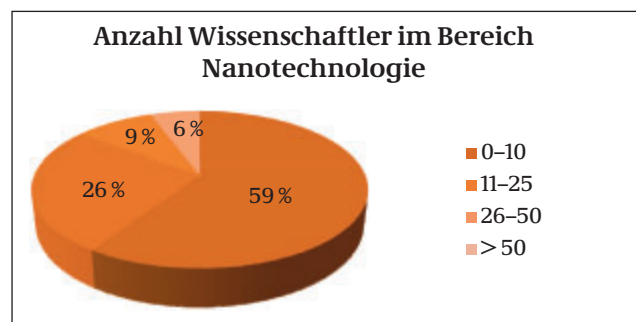
3.2 Öffentlich finanzierte Nanotechnologie-Forschung

In Deutschland sind rund 600 öffentlich finanzierte institutionelle und universitäre Forschungseinrichtungen im Bereich der Nanotechnologie aktiv. Die folgenden Angaben beziehen

sich auf eine Stichprobenerhebung mit einer Beteiligungsquote von 31 % (vgl. Abschnitt 2.4)

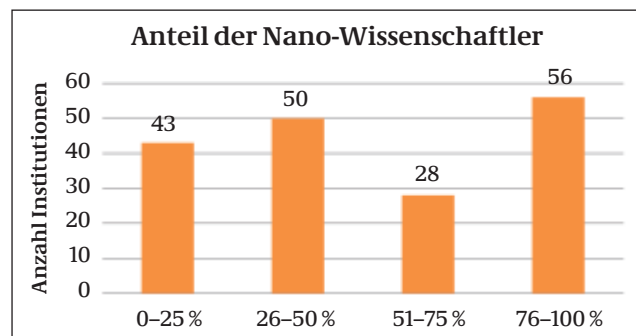
Charakterisierung deutscher Nanotechnologie-Forschungsinstitutionen

Zunächst werden die Nanotechnologie-Forschungsinstitutionen hinsichtlich der Anzahl der Wissenschaftler und des Anteils der Nanotechnologieaktivitäten in Relation zu den Gesamtaktivitäten analysiert. Die Antworten der Forschungseinrichtungen bezogen sich dabei teilweise auf die gesamte Institution bzw. auf einzelne Abteilungen, universitäre Lehrstühle und Arbeitsgruppen. Bei der Mehrzahl der befragten Institutionen befassen sich Forscherteams in der Größe von 1 bis 10 Wissenschaftlern mit der Nanotechnologie. Zehn Institutionen weisen mehr als 50 Nanoforscher auf, wobei das größte Forscherteam bei 300 Wissenschaftlern liegt. In der Summe sind in der Stichprobe von 177 Forschungsinstitutionen 3.200 Wissenschaftler in der Nanotechnologie tätig. Hochgerechnet auf die Gesamtzahl von 579 Forschungsinstitutionen ergibt sich eine Anzahl von rund 10.000 Nanowissenschaftlern in der öffentlichen Forschung in Deutschland.



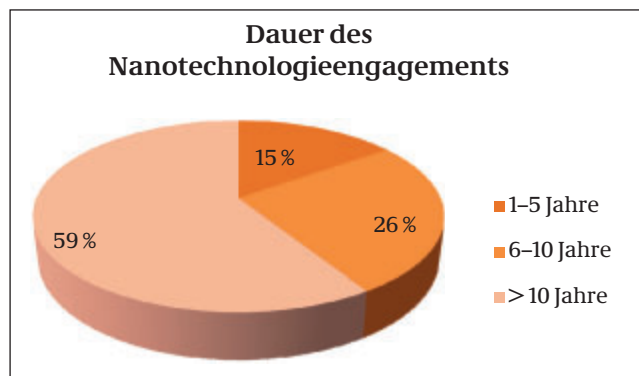
Anzahl der Wissenschaftler in den beteiligten öffentlichen Nanotechnologieforschungseinrichtungen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 177)

Bei einem Drittel der Institutionen handelt es sich um spezialisierte Nanotechnologieforschungseinrichtungen mit einem Anteil an Nanowissenschaftlern von über 75 %. 46 Institutionen befassen sich ausschließlich mit der Nanotechnologie. Die deutliche Mehrzahl der Institutionen ist allerdings neben der Nanotechnologie auch auf anderen Forschungsgebieten aktiv.



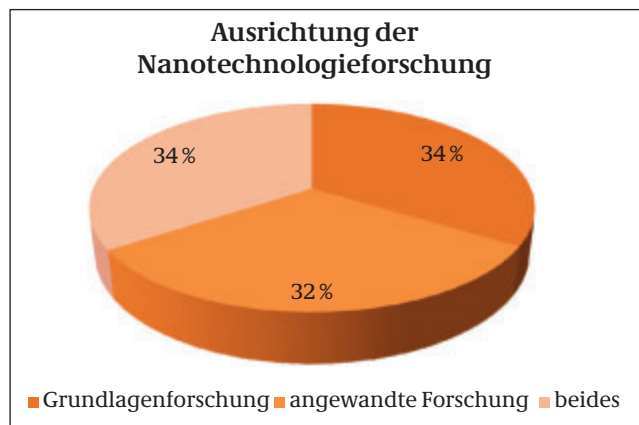
Anteil der Wissenschaftler im Bereich Nanotechnologie bezogen auf die Gesamtzahl an Wissenschaftlern in den beteiligten Forschungseinrichtungen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011; n = 178)

Die Mehrzahl der Forschungseinrichtungen befasst sich bereits länger als 10 Jahre mit der Nanotechnologie. 15 % haben in den letzten fünf Jahren ihre Forschungsaktivitäten auf die Nanotechnologie ausgeweitet.



Dauer des Nanotechnologieengagements der Forschungsinstitutionen
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 178)

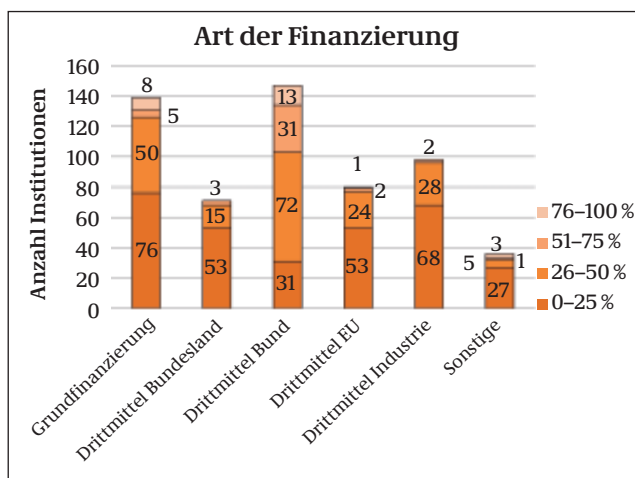
Die Nanotechnologieforschungslandschaft ist dabei sehr ausgewogen aufgeteilt in Bezug auf Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung. Jeweils ein Drittel der Institutionen ist ausschließlich auf Grundlagen- oder Anwendungsorientierte Forschung ausgerichtet, ein weiteres Drittel betreibt beides gleich intensiv.



Ausrichtung der Nanotechnologieforschung
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 178)

Finanzierung der Forschungstätigkeit

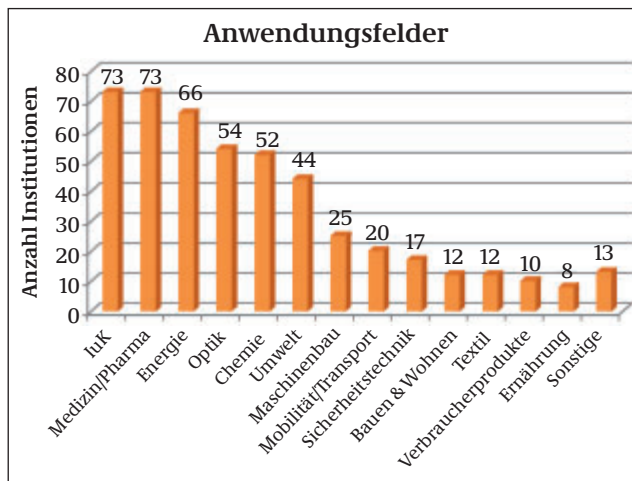
Drittmittel des Bundes zählen zu den wichtigsten Finanzierungsquellen der Nanotechnologieforschung. Bei ca. 80 % der Institutionen macht diese Finanzierungsquelle mehr als ein Viertel des gesamten Nanotechnologieforschungsbudgets aus. Grundfinanzierung stellt die zweitwichtigste Finanzierungsform dar. Bei rund 90 % liegt der Anteil der Grundfinanzierung allerdings unterhalb von 50 % der Forschungsmittel. Drittmittel aus der Industrie liegen von der Bedeutung noch vor EU-Drittmitteln und Drittmitteln des Bundeslandes. Sonstige Fördermittel spielen eine untergeordnete Rolle.



Finanzierung der Nanotechnologieforschung
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 147)

Forschungsthemen und Anwendungsschwerpunkte

Als Anwendungsbereiche der Nanotechnologie, die in den nächsten 5 bis 10 Jahren am stärksten von der Nanotechnologieforschung der befragten Institutionen profitieren können, zählen die Elektronik, Medizin/Pharma und die Energietechnik zu den Top 3. Endverbraucher-Märkte wie Ernährung und Konsumgüter werden nur in geringem Ausmaß von den Nanotechnologieforschungsergebnissen profitieren können.



Anwendungsfelder, die in den nächsten 5 bis 10 Jahren am stärksten von der Nanotechnologieforschung profitieren werden (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 175, bis zu drei Nennungen pro Institution)

Bezüglich einer Einschätzung der Nanotechnologieforschungsgebiete mit den aussichtsreichsten Markt- und Produktpotenzialen in den nächsten 5 bis 10 Jahren ergibt sich ein relativ breites Spektrum an technologischen Teildisziplinen aus den Bereichen Nanoelektronik, Nanooptik, Nanomaterialien, Nanobeschichtungen und Nanobiotechnologie. Die meisten Nennungen erhielten Anwendungen der Nanoelektronik im IuK-Sektor, Nanomaterialentwicklungen in den Bereichen Gesundheit, Energie und Chemie sowie Nanobiotechnologien im Gesundheitsbereich.

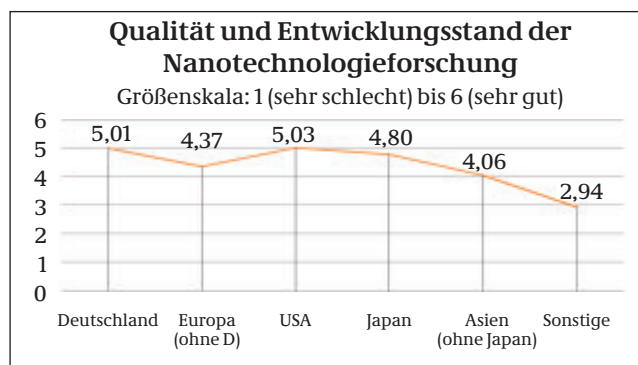
Nanotechnologie-Forschungsgebiet und Position Deutschlands (gemäß Einschätzung der beteiligten Forschungsinstitutionen)		Anwendungsfelder (Anzahl Nennungen)							
		IKT	Fahrzeugtechnik	Gesundheit	Umwelt	Chemie/Werkstoffe	Energie	Sonst. Industrie	Konsumerprodukte
Nanoelektronik/-sensorik	Nanointegrierte Sensoren (Messtechnik), gedruckte Sensoren								
	Quantentechnik/-information; Organische Elektronik; Nanomagnete; Integration von Nanostrukturen (CNT, Quantenpunkte, NEMS) für Sensoranwendungen; Mikro-Nano Integration; Nanoskalige thermoelektrische Schichten und nanobulk-Materialien; Nanoelektronik für schnellere und effizientere Schaltungen								
	Magnetische Datenpeicherung, Spintronik, nano-CMOS-Elektronik, gedruckte Elektronik, Polymerelektronik, Niedertemperatur Verbindungstechnik; Entwurfsmethodik und Systemarchitektur Nanoelektronik; niedrigdimensionale Halbleitersysteme, Datenspeicher; Nanosensorik								
Nanooptik	Optoelektronische Mikrosysteme; Interferenzfarben; OLED, LED								
	OLED, LED; Quantenpunktlaser; Biophotonik; photonische Kristalle, Plasmonik, integrierte optische Systeme; Quantenspeicher								
	Optische Interconnects; Quantenkryptographie, Plasmonik, optische Antennen; Displays; Gigabit-VCSEL								
Nanomaterialien	Wasserstoffspeicherung; Nanodiamanten; Elektrische Isolierung; Nanokapseln; Solarzellen-/thermie; Kohlenstoffnanomaterialien; Textilfunktionalisierung; Filtrationsmembranen; organische Nanopartikel; Nanoschaum; Magnesium-Strukturwerkstoffe; Nanokomposite; Tribolacke								
	Organisch/anorganische Nano-Komposite; Nanopartikel modifizierte Kunststoffe; nano-optimierte Lacke; leitfähige Nanokomposite; Kohlenstoffnanomaterialien; nanoporöse Filtermaterialien; funktionalisierte Nanopartikel; Nanomaterialien für Batterie- und Brennstoffzellentechnik; Membrantechnik; Ferrofluide, Faserverstärkte Nanokomposite								
	Nanoskalige Katalysatoren; Nanooptimierte Energiespeicher; Niedertemperatur-Verbindungstechnik; anorganische Membranen; Nanofüllstoffe für Polymere								
Nanobeschichtungen/ Nanostrukturierung	Nanoschichten; Selbstreparierende Korrosionsschutzschichten; Nanobarriereschichten								
	Nanostrukturierung (Lithografie, Selbstorganisation; funktionale nanoskalige Oberflächenmorphologien; kostengünstige Replikation von Mikro- und Nanostrukturen								
	Nano-Lithographie-Tools; biozide, photokatalytische Beschichtungen								
Nanobiotechnologie	Biomimetische Werkstoffe; Biomineralisation; Drug Delivery Systeme; Nanotransporter für Blut-Hirn-Schranke; regenerative Medizin								
	Nanomedizin; Liposomen als Nanotransporter; biofunktionale Oberflächen; zielgerichteter Wirkstofftransport								
	Nanokrebstherapie; Molekulare Bildgebung; Implantate								
Anzahl Nennungen Gesamt		64	16	64	6	32	30	13	15
Position Deutschlands ☐ führend ☐ Top 3 ☐ nicht genannt		Anzahl Nennungen ☐ 0 ☐ 1-5 ☐ 6-10 ☐ > 10							

Nanotechnologie-Forschungsgebiete mit aussichtsreichen Markt- und Produktpotenzialen in den nächsten 5 bis 10 Jahren mit Zuordnung zum jeweiligen Anwendungsfeld. Die Angaben basieren auf Einschätzungen der befragten Nanotechnologie-Forschungseinrichtungen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 151, Mehrfachnennungen möglich)

In rund zwei Dritteln der Technologiefelder wird Deutschland als führend oder zumindest unter den TOP 3 eingeschätzt. Bei rund einem Drittel der Forschungsfelder vor allem im Bereich der Nanoelektronik wird Deutschland nicht unter den führenden Nationen genannt.

Deutschland als Forschungsstandort im internationalen Vergleich

In Bezug auf die Qualität und den Entwicklungsstand des eigenen Forschungsgebietes in Deutschland im Vergleich zu anderen Regionen, sehen die beteiligten Institutionen die deutsche Forschung in einer Spitzenposition gleichauf mit den USA vor Japan, dem europäischen Ausland, weiteren asiatischen Staaten und sonstigen Regionen. Die Abstände zwischen Deutschland, den USA und Japan werden als relativ gering eingeschätzt und umfassen im Durchschnitt nur 0,2 Punkte in der verwendeten Wertungsskala.



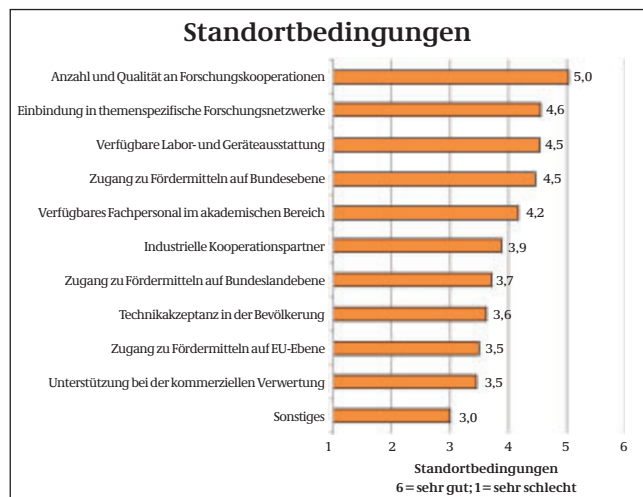
Einschätzung der Qualität und des Entwicklungsstandes des eigenen Nanotechnologie-Forschungsgebietes in verschiedenen Regionen. Angegeben sind die Mittelwerte der Einschätzungen über alle Technologiefelder (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 174)

Die Aufschlüsselung der Einschätzungen nach einzelnen Technologiefeldern zeigt, dass die meisten Nennungen von Nanoforschungsgebieten im Bereich gut bis sehr gut (5 und 6) liegen. Unterdurchschnittliche Wertungen (3) finden sich lediglich in den Feldern Nanoelektronik, Nanomedizin, Nanosensorik und Nanobegleitforschung. Allerdings variieren die Bewertungen in einigen Technologiefeldern relativ stark, wie z. B. in der Nanomedizin, die Einschätzungen zwischen 3 und 6 erhalten hat. In der Nanoelektronik wird die Forschung im Bereich klassischer CMOS-Elektronik als durchschnittlich bewer-

tet, während die Bereiche Nanomagnetismus, Spintronik und Halbleiternanostrukturen als gut bis sehr gut in Deutschland bewertet werden. Als sehr gut werden verschiedene Bereiche der Nanomaterialforschung (z. B. Kolloid- und Grenzflächenchemie, supramolekulare Chemie), der Nanooptik (z. B. Silizium-Photonik und Femtosekundenlaser), der Nanoanalytik, der Nanobeschichtungen sowie Anwendungen im Bereich der Energie und Umwelt, wie nanostrukturierte Thermoelektrika, Wasserstoffspeicher oder organische Solarzellen, bewertet. Die Nanotoxikologieforschung und Risikoforschung zu Nanomaterialien wird in Deutschland als durchschnittlich bis gut bewertet. Deutschland wird hier auf ähnlichem Niveau wie die USA als führender Standort in der Nanotoxikologieforschung eingeschätzt.

Standortbedingungen und Erfolgsfaktoren

Die Standortbedingungen in Deutschland werden von den Forschungsinstitutionen überdurchschnittlich bis gut bewertet. Am positivsten werden die Anzahl und Qualität an Forschungsk Kooperationen, die Einbindung in themenspezifische Netzwerke, die verfügbare Labor- und Geräteausstattung sowie der Zugang zu Fördermitteln auf Bundesebene bewertet. Am unteren Ende der Bewertungsskala rangieren die Unterstützung bei der kommerziellen Verwertung und der Zugang zu Fördermitteln auf EU-Ebene. Die Technikakzeptanz in der Bevölkerung wird als durchschnittlich eingeschätzt.

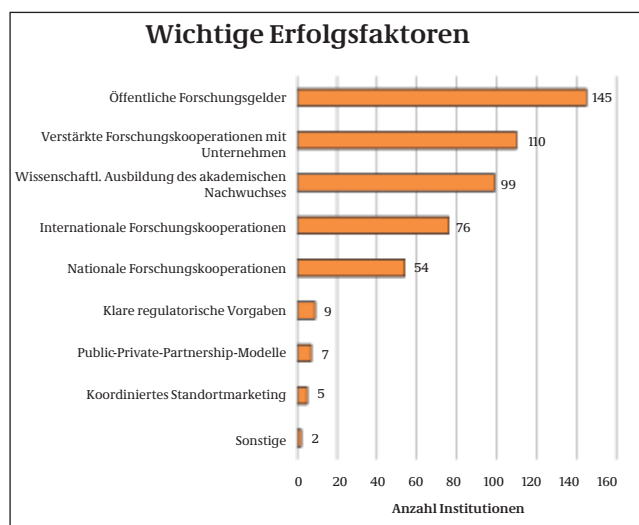


Bewertung der Standortbedingungen für die Durchführung von Nanotechnologie-Forschungsaktivitäten (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 176)

Nanotechnologie-Forschungsgebiet				
Nano-elektronik	Entwurfsmethodik u. Architektur nanoelektronischer Systeme		Mikro-/Nano-Zuverlässigkeit Halbleiternanodrähte Nanotechnologien in der elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik	Halbleiter Nanostrukturen
		LuK-Technik	Organische Elektronik	Spintronik
				Nanomagnetismus
Nanobio/ Nanomedizin		Nanomedizin Drug Development Sensorik für Implantate	Drug Targeting Magnetische Nanopartikel für zielgerichtete Gentherapie	Biominalisation Biofunktionale Oberflächen Magnetisches Drug Targeting
Nanomaterialien/ -Chemie		Nanopartikel als Binde- mittelkomponente; Kohlenstoffnanomaterialien	Nanofüllstoffe in Elastomeren; Nanoskalig strukturierte Kunststoffsubstrate; Nano- diamanten, Diamantoide; Nano- poröse Materialien/Formkörper; Polymere und Nano-Komposite; Gassynthese von Nanopartikeln	Anorganische Membranen; nano-Metallfluoride, Nanofasern; Kolloid- und Grenzflächenchemie; Nanopartikel gefüllte Polymere; Supramolekulare Chemie; Oberflächenstrukturierung/ Polymerchemie
Nanostruk- turierung		Nanostrukturierung		
Nano- optik		Biophotonik	Nanophotonik Nano-Optische Systeme	Silizium-Photonik Femtosekundenlaser
Nanosensorik/ -systemtechnik	Nanoskalige Funktions- schichten für die Sensorik Mikrofluidische Systeme		Biosensorik	Nanosensoren
Nano- Analytik				Nanoskopie Messtechnik an Nanostrukturen und Nanoobjekten
Nanobeschich- tungen			Nanopartikuläre Systeme in organischen Beschichtungen; Oberflächenfunktionalisierung für Textilien; Sol-Gel-Technologie; Tribologische Schichten	Nanokristalline Diamantbeschichtung; Nanoskalige elektrochemische Prozessoren
Anwendungsfeld Energie/Umwelt		Energiewandlung/ Speicherung/ Elektrochemie	Energiespeicher Energieeffizienz Thermoelektrik und Photovoltaik Grundwassersanierung/ Altlastenbearbeitung	Nanostrukturierte Thermo- elektrika; Wasserstoffspeicherung in nanokristallinen Hydriden; Nanomaterialien für die Energietechnik; organische Solarzellen
Nano-Begleit- forschung	Risikoforschung zu Nanomaterialien als Formulierung von Pflanzenschutzmitteln	Toxikologie von Nanopartikeln	Risikoforschung von Nano- materialien Integrierte Chancen-/ Risikobewertung	
Nano-Quer- schnittsthemen			Mathematik als Querschnittsdisziplin Aus- und Weiterbildung Selbstorganisation	Theoretische Beschreibung der Eigenschaften von Nanostrukturen, Nanopartikel- Prozesstechnik; Dynamik in Nanostrukturen; Heterogene Katalyse
3 4 5 6				
Entwicklungsstand und Qualität des Nanotechnologie-Forschungsgebietes in Deutschland (sehr schlecht (1) bis sehr gut (6))				

Einschätzung der Qualität und des Entwicklungsstandes des eigenen Nanotechnologie-Forschungsgebietes in Deutschland aufgeschlüsselt nach einzelnen Technologiefeldern (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 140)

Bezüglich der Faktoren für einen erfolgreichen Ausbau der Nanotechnologieaktivitäten in Deutschland liegen öffentliche Forschungsgelder deutlich an der Spitze, gefolgt von verstärkten Forschungsk Kooperationen mit Unternehmen sowie der wissenschaftlichen Ausbildung des akademischen Nachwuchses. Ebenfalls als relevant werden internationale Forschungsk Kooperationen bewertet. Eine untergeordnete Rolle spielen ein koordiniertes Standortmarketing und Public-Private-Partnership-Modelle. Auch der Bereich regulatorischer Vorgaben wird nur von wenigen Institutionen als wichtig erachtet.

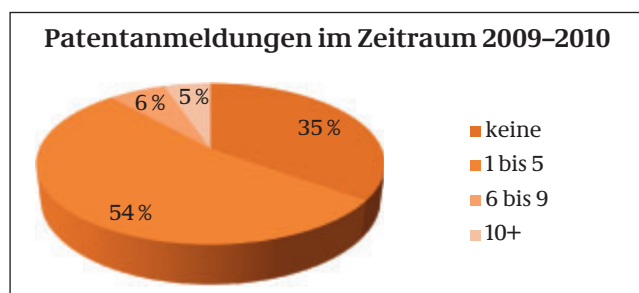


Erfolgsfaktoren für den Ausbau der Nanotechnologie in Deutschland (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 175, bis zu drei Nennungen pro Institution)

Wirtschaftliche Verwertung von Forschungsergebnissen

Patentanmeldungen

Ein relevanter Indikator für die Ergebnisverwertung ist der Schutz von geistigen Eigentumsrechten in Form von Patentanmeldungen. Zwei Drittel der Nanoforschungsinstitutionen haben im Zeitraum zwischen 2009 und 2010 Patente angemeldet, die deutliche Mehrzahl davon zwischen ein und fünf Patente, 5 % der Institutionen haben mehr als 10 Patente angemeldet. In der Summe haben die beteiligten Institutionen rund 450 Patente in den letzten zwei Jahren angemeldet.



Patentanmeldungen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 178)

Spin-Off-Gründungen

Als signifikantester Erfolgsindikator für die Verwertung von Forschungsergebnissen kann die Ausgründung von Spin-Off-Unternehmen herangezogen werden. Von den beteiligten Institutionen wurden in den Jahren 2009 bis 2010 insgesamt elf Spin-Offs ausgegründet. Berlin war dabei mit drei Spin-Offs die aktivste Gründerregion.

Im Zeitraum von 2011 bis 2012 sind nach Angaben der beteiligten Institutionen bis zu 50 weitere Ausgründungen geplant. Auch wenn diese Annahme angesichts der Zahl der Ausgründungen in den Vorgängerjahren etwas zu optimistisch geschätzt scheint, dokumentiert diese Prognose doch die Marktrelevanz und die Anwendungsorientierung der deutschen Nanotechnologieforschungsszene sowie die offensichtlich positive Einschätzung des Wirtschafts- und Finanzumfeldes.

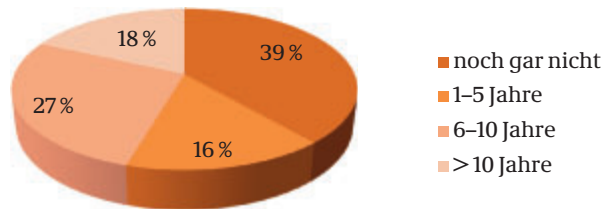
3.3 Finanzsektor und Beteiligungskapital

Die Verfügbarkeit von Beteiligungskapital ist für die Entwicklung neuer Technologien ein wesentlicher Erfolgsfaktor. Eine besondere Rolle spielt hierbei Wagniskapital (Venture Capital), da die Investitionen in Start-up-Unternehmen oftmals mit hohen Risiken bezüglich der Entwicklung des Unternehmenserfolges gekoppelt sind. In Deutschland sind gemäß des Datenbestandes des Nanotechnologie-Kompetenzatlas www.nano-map.de ca. 75 Kapitalbeteiligungsgesellschaften im Bereich der Nanotechnologie engagiert. Die folgenden Angaben beziehen sich auf 44 Finanzinstitutionen, die sich an der Akteurserhebung beteiligt haben. Bei der Erhebung wurden sämtliche Mitglieder des Verbandes deutscher Kapitalbeteiligungsgesellschaften angeschrieben. Bei den teilnehmenden Kapitalgesellschaften handelte es sich in 30 Fällen um VC-Gesellschaften, in 6 Fällen um Fondsgesellschaften und bei 8 Institutionen um andere Beteiligungsgesellschaften wie z. B. mittelständische Beteiligungsgesellschaften oder Industrieholdings.

Dauer des Nanotechnologieengagements

Von den teilnehmenden Finanzgesellschaften haben sich 17 noch nicht mit der Nanotechnologie befasst. Acht Institutionen beschäftigen sich seit über zehn Jahren mit der Nanotechnologie, zwölf Institutionen seit sechs bis zehn Jahren und sieben Institutionen seit ein bis fünf Jahren.

Beschäftigung mit der Nanotechnologie als Investitionsfeld

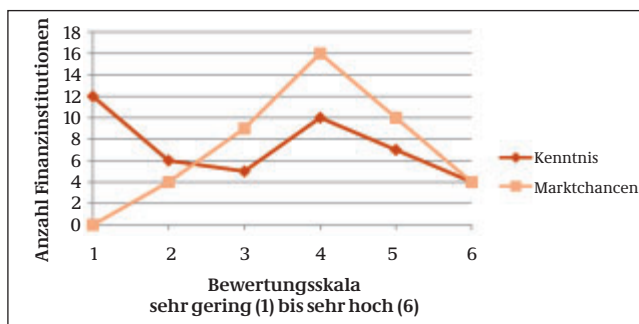


Zeitraum, seit dem sich die beteiligten Finanzinstitutionen mit der Nanotechnologie befassen haben
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 44)

14 von insgesamt 44 Finanzinstitutionen (ca. 32 %) planen ihr Engagement in der Nanotechnologie in den nächsten Jahren zu verstärken.

Kenntnisstand und Einschätzung der Marktchancen

Der Kenntnisstand in der Nanotechnologie wird bei den beteiligten Finanzgesellschaften als sehr unterschiedlich bewertet. Alle Bewertungsstufen von „sehr gering“ bis „sehr hoch“ sind vertreten. Ungefähr ein Viertel der Befragten schätzen ihre Nanotechnologie-Kenntnisse als sehr gering ein. Die häufigsten Einschätzungen der Marktchancen der Nanotechnologie liegen im Bereich zwischen 3 und 5 der Wertungsskala (unterdurchschnittlich bis hoch). Die Marktchancen werden dabei von Institutionen mit hoher bis sehr hoher Kenntnis der Nanotechnologie deutlich höher eingeschätzt (Mittelwert 4,9) als von Institutionen mit sehr geringen Nanotechnologiekenntnissen (Mittelwert 3,5).

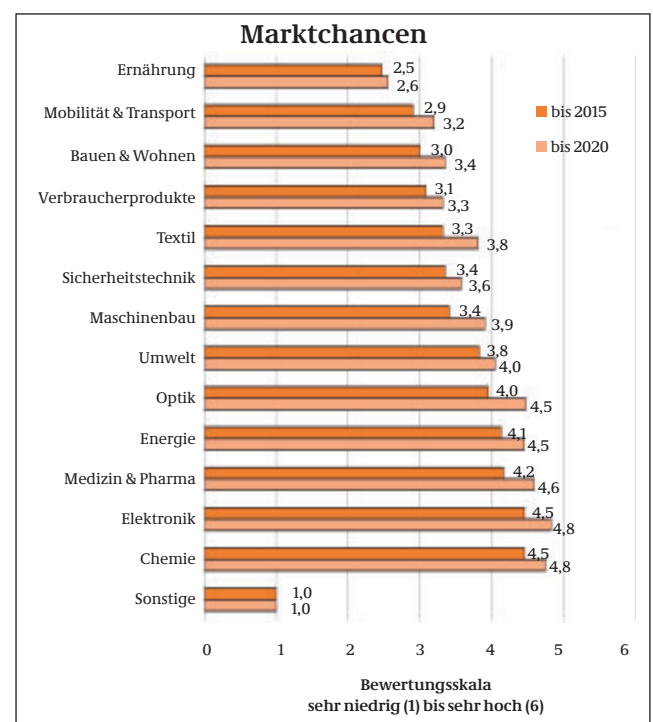


Einschätzung der eigenen Nanotechnologiekenntnisse der beteiligten Finanzinstitutionen und der Marktchancen der Nanotechnologie
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 44)

Die Finanzinstitutionen wurden weiterhin nach einer Einschätzung der Marktchancen in verschiedenen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie für den Zeithorizont 2015 und 2020 befragt. Da für diese Einschätzung detaillierte

Nanotechnologiekennntnisse erforderlich sind, wurden bei den nachfolgenden Auswertungen nur noch die Finanzinstitutionen berücksichtigt, die sich bereits mit der Nanotechnologie als mögliches Investitionsfeld auseinandergesetzt haben.

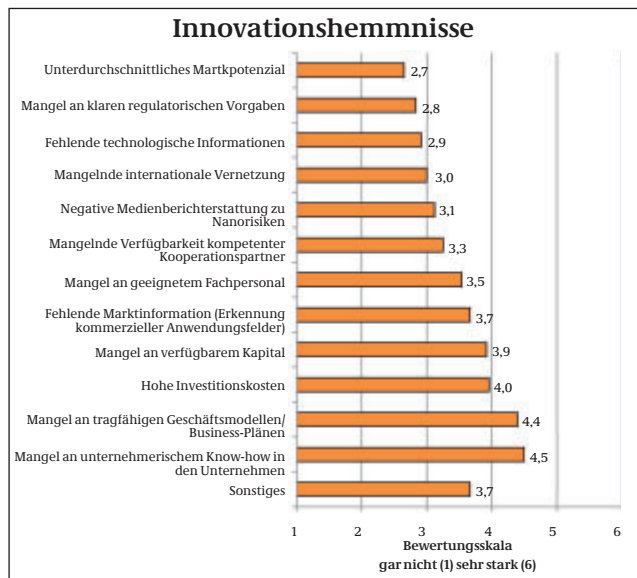
Unter den Top 5 der Anwendungsfelder mit den größten Marktchancen liegen die Chemie, die Elektronik, Medizin/Pharma, Energie und Optik. Zu den Anwendungsfeldern mit den geringsten Marktchancen zählen Ernährung, Mobilität und Transport, Bauen und Wohnen sowie Verbraucherprodukte.



Einschätzung der Marktchancen in verschiedenen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie für den Zeithorizont 2015 und 2020
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 24)

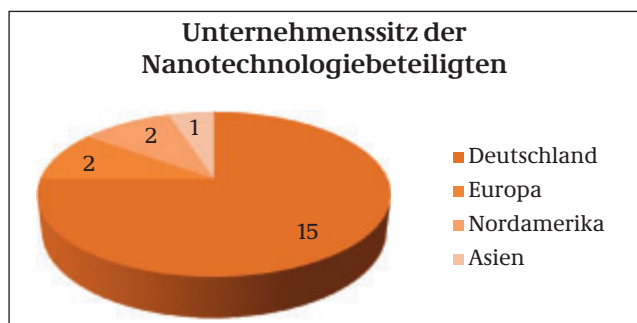
Innovationshemmnisse und Nanotechnologiebeteiligungen

Als hemmend auf die kommerzielle Umsetzung nanotechnologischer Forschungsergebnisse in Produkten wirken sich nach Einschätzung der beteiligten Finanzinstitutionen vor allem ein Mangel an unternehmerischem Know-how in den Unternehmen sowie ein Mangel an tragfähigen Geschäftsmodellen und Business-Plänen aus. Weniger problematisch wird ein Mangel an klaren regulatorischen Vorgaben sowie ein unterdurchschnittliches Marktpotenzial bewertet.

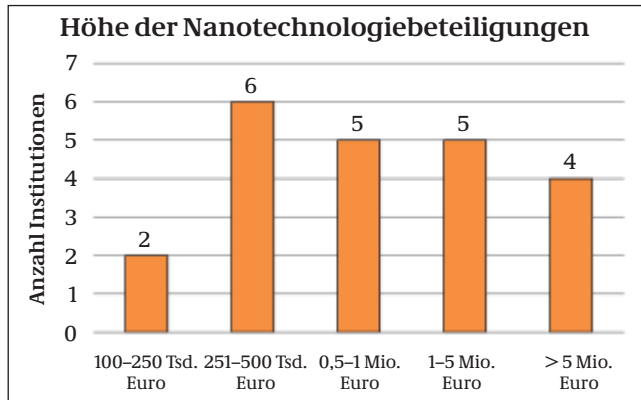


Einschätzung hemmender Faktoren auf die kommerzielle Umsetzung nanotechnologischer Forschungsergebnisse in Produkte
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 24)

16 der befragten Finanzinstitutionen verfügen aktuell über insgesamt 41 Beteiligungen an Nanotechnologieunternehmen, davon sind 10 Beteiligungen im Jahr 2009 und 5 in 2010 hinzugekommen. 15 Beteiligungsgesellschaften verfügen über Nanotechnologiebeteiligungen in Deutschland, jeweils zwei im europäischen Ausland und Nordamerika sowie eine in Asien. Daraus wird eine überwiegend nationale Investitionsstrategie der beteiligten Finanzinstitutionen deutlich. Bezüglich der Beteiligungssummen ergibt sich ein relativ breites Spektrum zwischen 100 bis 250 Tausend Euro und über 5 Millionen Euro. Daraus errechnet sich eine durchschnittliche Beteiligungssumme von ca. 1,8 Mio. € pro Beteiligung. Bei den Beteiligungen handelt es sich überwiegend um Frühphasen-Investments. 7 Beteiligungsgesellschaften verfügen über Wachstumsphasen-Beteiligungen. Unter Annahme der durchschnittlichen Beteiligungssumme von ca. 1,8 Mio. € und einer Hochrechnung auf alle im Nanotechnologiebereich tätigen 75 Finanzinvestoren kann die jährliche Venture Capital Investitionssumme grob auf rund 40 Mio. € in Deutschland abgeschätzt werden.

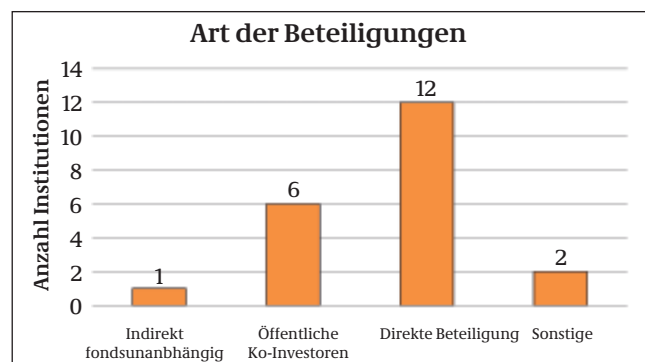


Regionale Herkunft der Nanotechnologiebeteiligungen
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 16, Mehrfachnennungen möglich)



Beteiligungssummen der Nanotechnologieinvestments
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 16, Mehrfachnennungen möglich)

Bei der Mehrzahl der Investments handelt es sich um direkte Beteiligungen. Sechs Finanzinstitutionen haben mit öffentlichen Ko-Investoren kooperiert. Hierbei handelte es sich um den Hightech-Gründerfonds sowie die KfW. Unter der Rubrik „Sonstige“ wurden in zwei Fällen stille Beteiligungen genannt.



Art der Beteiligung der Nanotechnologieinvestments
(Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2011, n = 16, Mehrfachnennungen möglich)

4 Markt- und Anwendungspotenziale der Nanotechnologie

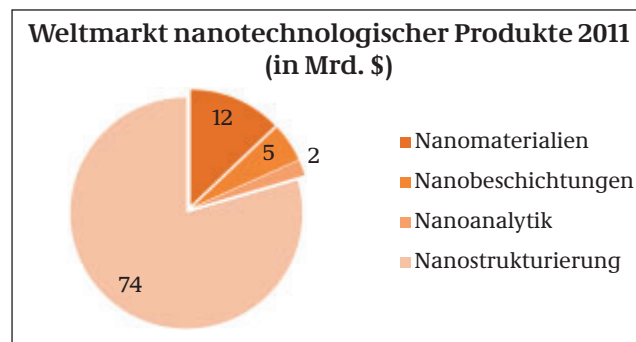
Fast alle Industriezweige in Deutschland profitieren von nanotechnologisch optimierten Komponenten und Produkten. In Branchen wie der Elektronik, der Optik oder der Chemie hat der Einsatz von Nanomaterialien und Nanostrukturen bereits jahrzehntelange Tradition, in anderen Bereichen wie dem Bau- oder Textilsektor wurde die Nanotechnologie erst in den letzten Jahren als Forschungsfeld aufgegriffen, so dass Produktentwicklungen in diesen Bereichen erst nach und nach in den Markt eintreten.

Der vorliegende Report soll einen kompakten Überblick und aktuellen Stand zu den derzeitigen Nanotechnologieaktivitäten in den wichtigsten Industriebranchen in Deutschland vermitteln, nachdem bereits im nano.DE-Report 2009 Markt- und Anwendungspotenziale der Nanotechnologie in verschiedenen Branchen detailliert beschrieben worden sind. Für jede Branche wird ein Steckbrief mit Indikatoren zu aktuellen konjunkturellen Entwicklungen und allgemeiner volkswirtschaftlicher Bedeutung des Wirtschaftszweiges gegeben sowie eine kurze Zusammenfassung der Haupteinsatzgebiete der Nanotechnologie. Zur besseren Einordnung der Bedeutung der Nanotechnologie wurde für jede Branche eine quantitative Akteursanalyse im Hinblick auf Art und Anzahl der beteiligten Akteure sowie der Technologiefelder vorgenommen. Als Datenbasis diente der Kompetenzatlas www.nano-map.de. Weiterhin wird eine tabellarische Übersicht zu Produkten und aktuellen Forschungsentwicklungen im Rahmen von BMBF-Projekten aufgezeigt. Abschließend werden für jede Branche spezifische Rahmenbedingungen und Herausforderungen zur Nutzung der Nanotechnologie sowie exemplarisch ausgewählte BMBF-Fördermaßnahmen skizziert, die das jeweilige Anwendungsfeld adressieren.

4.1 Übersicht zu nanotechnologisch beeinflussten Marktpotenzialen

Im Folgenden wird eine tabellarische Übersicht zu Marktpotenzialen nanotechnologischer sowie nanooptimierter Produkte und Anwendungen gegeben. Als nanotechnologische Produkte werden in diesem Kontext gezielt hergestellte technische Nanomaterialien sowie Geräte zur Herstellung und Analyse von Nanostrukturen und -objekten bezeichnet. Die Märkte nanotechnologischer Produkte lassen sich relativ eindeutig abgrenzen und werden im Folgenden in die Bereiche Nanomaterialien, Nanostrukturierung und Nanoanalytik kategorisiert. Unternehmen, die in diesem Feld tätig sind, können als Nanotechnologiekernunternehmen bezeichnet werden, da ihre Produkte direkt der Nanotechnologie zugeordnet werden können. Der Weltmarkt in den Bereichen Nanomaterialien, Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und Nanostrukturierung kann gemäß der Prognosen verschiedener Marktforschungsinstitutionen für das Jahr 2011 auf ca.

93 Mrd. \$ geschätzt werden. Diese Zahlen beinhalten Ausrüstung und Geräte zur Waferstrukturierung in der CMOS-Elektronik, die hierbei den größten Marktanteil ausmachen.



Abschätzung des Weltmarktes nanotechnologischer Produkte in den Bereichen Nanomaterialien, Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und Nanostrukturierung im Jahr 2011. Angaben in Milliarden \$ (Quellen BCC 2010 [7,8] und iRAP 2009 [9])

Die wirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnologie reicht aufgrund der Hebelwirkung als Schlüsseltechnologie allerdings wesentlich weiter. Nanotechnologische Produkte sorgen in fast allen Industriebranchen für optimierte Komponenten und Systeme in nachgelagerten Wertschöpfungsstufen. Der Einsatz nanotechnologischer Verfahren ist in vielen Industriezweigen oftmals zwingend erforderlich, um konkurrenzfähige Produkte herzustellen (z. B. Elektronikchips oder hochpräzise Optiken) oder technologische Weiterentwicklungen und Verbesserungen zu erzielen (z. B. Nanopartikel zum gezielten Medikamententransport, nanooptimierte Batterien für die Elektromobilität etc.). Die aus dieser Hebelwirkung resultierende Wertschöpfung lässt sich nur grob abschätzen. Internationale Marktprognosen gehen davon aus, dass die Nanotechnologie bis zum Jahr 2015 weltweit an der Wertschöpfung von Gütern mit einem Marktwert von bis zu 3 Billionen \$ wesentlich beteiligt sein wird [58]. Gemäß diesen Abschätzungen ist für das Jahr 2011 von einem Marktpotenzial nanooptimierter Produkte von ca. 1 Billion \$ auszugehen. Da weder eine eindeutige Definition nanooptimierter Nanotechnologieprodukte existiert noch der Einsatz der Nanotechnologie in Endprodukten in der Regel überprüfbar ist, wird auf eine Diskussion dieser Zahlen verzichtet. Letztlich dokumentieren diese Prognosen die erhebliche volkswirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnologie, die sich bis 2015 voraussichtlich auf bis zu ca. 15 % der globalen Güterproduktion auswirken wird. In der folgenden tabellarischen Übersicht wird exemplarisch das Marktpotenzial nanooptimierter Produkte anhand einiger Marktsegmente aufgezeigt, bei denen die Anwendung der Nanotechnologie eine wesentliche Rolle spielt.

Marktsegment	Weltmarktvolumen (Abschätzung für das angegebene Jahr)		CAGR	Quelle
Nanomaterialien				
Gesamtmarkt Nanomaterialien (Nanopartikel, -hohlkörper, -fasern, komposite, -beschichtungen)	9 Mrd. \$ (2009)	20 Mrd. \$ (2015)	15 %	BCC 2010 [7]
Nanomaterialien (Nanostrukturierte Metall-oxid-/Metallpulver/-partikel, Nanoröhren, Makromoleküle, Quantenpunkte, mineralische Nanomaterialien)	3,6 Mrd \$ (2013)	34 Mrd. \$ (2025)	20 %	Freedonia 2010 [10]
Kohlenstoffnanoröhren	167 Mio. \$ (2010)	1 Mrd. \$ (2014)	56 %	BCC 2010 [11]
SWCNT	1 Mio. \$ (2010)	70 Mio. (2014)	189 %	
MWCNT	161 Mio. \$ (2010)	865 Mio. (2014)	52 %	
Polymer-Nanokomposite	460 Mio. \$ (2009)	1,4 Mrd.\$ (2014)	27 %	BCC 2010 [12]
Nanokeramik gefüllte Komposite	48 Mio. \$ (2009)	145 Mio. \$ (2014)	25 %	
Nanoschichtsilikat-Komposite	227 Mio. \$ (2009)	692 Mio. \$ (2014)	20 %	
Sonstige Nanopolymerkomposite (Füllstoffe CNT, Metallnanopartikel, Nanobiokomposite)	185 Mio. \$ (2009)	835 Mio. \$ (2014)	35 %	
Nanoklebstoffe (biomimetische Klebstoffe, medizintechnische Klebstoffe)	257 Mio. \$ (2010)	1,2 Mrd. \$ (2015)	36 %	BCC 2010 [13]
Elektroaktive Polymere (elektrisch leitfähige Polymere, organische Leiter und Halbleiter)	k. A.	2,8 Mrd. \$ (2014)	k. A.	MarketsandMarkets 2011 [14]
Metalloxidnanopulver	2,9 Mrd. \$ (2009)	9,8 Mrd. \$ (2017)	16 %	Future Markets 2010 [15]
Titandioxidnanopulver	360 Mio. \$ (2009)	1,5 Mrd. \$ (2017)	20 %	Future Markets 2010 [15]
Nanoschichtsilikate (Anwendungen als Brandschutz und Gasdiffusionsbarriere)	202 Mio. \$ (2009)	291 Mio \$ (2015)	6 %	Future Markets 2010 [16]
Aerogele	k. A.	1 Mrd. \$ (2015)	k. A.	Global Industry Analysts 2010 [17]
Quantenpunkte (optoelektronische und biomedizinische Anwendungen)	67 Mio. \$ (2010)	670 Mio. \$ (2015)	59 %	BCC 2011 [18]
Metallkolloide	200 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Gold-Biokonjugate	100 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanofasern	80 Mio. \$ (2010)	334 Mio. \$ (2017)	23 %	Future Markets 2010 [20]
UV-härtende Nanokomposit-Lacke	100 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Reaktive Nanofolien (z. B. Fügetechnik in der Mikrosystemtechnik)	2 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Langzeitstabile nanooptimierte Trennmittel	100 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanobeschichtungen				
Gesamtmarkt Nanobeschichtungen	3,6 Mrd. \$ (2010)	17,9 Mrd. \$ (2015)	38 %	BCC 2010 [8]
	2,4 Mrd. \$ (2009)	13 Mrd. \$ (2016)	27 %	Nanoposts.com 2010 [21]
Selbstreinigende, antibakterielle, Easy to Clean-Nanobeschichtungen	764 Mio. \$ (2010)	2,1 Mrd. \$ (2015)	22 %	Future Markets 2011 [22]
Verschleiß- und Korrosionsschutz-Nanobeschichtungen	352 Mio. \$ (2010)	879 Mio. \$ (2015)	20 %	Future Markets 2011 [23]
Antifog-Beschichtungen	300 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Photokatalytische Coatings	1 Mrd. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
	848 Mio. \$ (2009)	1,7 Mrd. \$ (2014)	14 %	BCC 2010 [24]
Controlled-Released Beschichtungen und Verkapselungen	600 Mio. \$ (2010)	1 Mrd. \$ (2015)	11 %	BCC 2010 [25]
Diamant- und Diamant ähnliche Beschichtungen	905 Mio. \$ (2010)	1,7 Mrd. \$ (2015)	13 %	BCC 2010 [26]
Keramische Hochleistungsbeschichtungen (Nordamerika)	1,4 Mrd. \$ (2009)	2 Mrd. \$ (2014)	7 %	BCC 2010 [27]
Thermisches Spritzen	953 Mio. \$ (2009)	1,4 Mrd. \$ (2014)	8 %	
PVD	183 Mio. \$ (2009)	260 Mio. \$ (2014)	7 %	
CVD	183 Mio. \$ (2009)	220 Mio. \$ (2014)	4 %	
Sonstige (sol-gel)	75 Mio. \$ (2009)	100 Mio. \$ (2014)	6 %	
Sol-Gel-Beschichtungen für Textil, Metall, Bauwesen	50 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanoporöse Antireflexbeschichtung	400 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]

Marktsegment	Weltmarktvolumen (Abschätzung für das angegebene Jahr)		CAGR	Quelle
Nanoanalytik				
Mikroskopiemarkt insgesamt (optisch, TEM, SEM)	1,7 Mrd. \$ (2009)	3,1 Mrd. \$ (2014)	13 %	BCC 2009 [28]
Mikroskopiezubehör (Beleuchtung, Kameras, Manipulatoren)	374 Mio. \$ (2009)	513 Mio. \$ (2014)	7 %	BCC 2009 [28]
Rastersonden- und Elektronenmikroskopie	328 Mio \$ (2010)	589 Mio. \$ (2015)	12 %	Future Markets 2011 [29]
Rasterelektronenmikroskopie (SEM)	133 Mio. \$ (2010)	k. A.	k. A.	
Rastersondenmikroskopie (AFM)	108 Mio. \$ (2010)	k. A.	k. A.	
Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	88 Mio. \$ (2010)	k. A.	k. A.	
Elektronenmikroskopie	0,35–1Mrd. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
VT-SPM (Ultrahochvakuum)	12 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
LT-SPM (Ultrahochvakuum)	10 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Elektrische Nanosonden (Electronical Nanoprobng)	5 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Ellipsometer für dünne Schichten	50 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Röntgendiffraktometer/ Analytik von Nano-schichten	12 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Partikelstandards/-Messtechnik	50 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
SAXS-Röntgenkleinwinkelstreuung	1,8 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Photoelektronenoberflächenanalyse	30 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Spektromikroskopie LEEM/PEEM	7 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanostrukturierung				
Geräte zur Waferstrukturierung	62 Mrd. \$ (2008)	90 Mrd. \$ (2014)	6 %	iRAP 2009 [9]
Waferbeschichtung	11,4 Mrd. \$ (2008)	k. A.	k. A.	
Lithographie	12,4 Mrd. \$ (2008)	k. A.	k. A.	
Strahltechnologie und Lichtquellen	5,6 Mrd. \$ (2008)	k. A.	k. A.	
Wafertestung	10,6 Mrd. \$ (2008)	k. A.	k. A.	
Metrologie	6,8 Mrd. \$ (2008)	k. A.	k. A.	
Lithografieobjektive	1,8 Mrd. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Lithographie-Masken	40 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Chemisch-mechanisches Wafer-Polieren	60 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanowerkzeuge (Nanomanipulatoren, Nah-feldoptiken, Nanolithografie, Nanoimprint etc.)	2,6 Mrd. \$ (2009)	6,8 Mrd. \$ (2015)	3 %	BCC 2010 [8]
PVD-Beschichtungsanlagen	9 Mrd. \$ (2009)	14,8 Mrd. \$ (2014)	11 %	BCC 2010 [30]
MBE-Anlagen	30 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Geräte für Nanoprobennbearbeitung/ -vorbereitung (Reaktives Ätzen, SIMS, Ionenstrahl-mahlen, FIB, CMP etc.)	848 Mio. \$ (2009)	1,2 Mrd. \$ (2015)	6 %	Future Markets 2010 [31]
Piezoelektrische Aktoren und Motoren	6,6 Mrd. \$ (2009)	12,3 Mrd. \$ (2014)	13 %	iRAP 2010 [32]
Nanometerpräzise Stellmotoren, Positionierung	3,2 Mrd. \$ (2009)	6 Mrd. \$ (2014)	13 %	
Kameras, Mikroskoplinsen, -spiegel, -optiken	2,8 Mrd. \$ (2009)	5,2 Mrd. \$ (2014)	13 %	
Andere Anwendungen (Kraftstoffinjektoren, Mikropumpen, Druckkartuschen, Robotik)	587 Mio. \$ (2009)	1,1 Mrd. \$ (2014)	13 %	

Beispiele zu Marktpotenzialen nanotechnologischer Produkte in den Bereichen Nanomaterialien, Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und Nanostrukturierung

Marktsegment	Weltmarktvolumen (Abschätzung für das angegebene Jahr)		CAGR	Quelle
Gesundheit				
Nanobiotechnologienanwendungen in der Medizin (Drug-Delivery, Imaging, Antimikrobiotika)	19,3 Mrd. \$ (2010)	29,7 Mrd. \$ (2015)	9 %	BCC 2011 [33]
Drug Delivery Technologien	k. A.	13 Mrd. \$ (2018)	k. A.	Espicom Business Intelligence 2009 [34]
Etablierte Produkte (zugelassene Transporter wie Liposome, Polymerpartikel, Dendrimere)	k. A.	10,2 Mrd. \$ (2018)	k. A.	
Neue Entwicklungen (gewebespezifisch, Theranostik, etc.)	k. A.	2,8 Mrd. \$ (2018)	k. A.	
Nanobeschichtungen in der Medizin (antibakteriell, kontrollierte Wirkstoffabgabe)	115 Mio. \$ (2010)	380 Mio \$ (2015)	27 %	Future Markets 2010 [35]
Biochips (DNA, Protein-Analyse, Wirkstoffforschung)	2,6	6	18 %	BCC 2010 [36]
DNA-Chips	1,3	2,7	15 %	
Mikrofluidische Chiplabore	0,8	2,1	21 %	
Protein-Chips	0,3	0,8	20 %	
Neuentwicklungen Biochips (Glykomik, Gewebeanalysen)	131	265	15 %	
Knochenersatzmaterial (nanopartikuläres Hydroxylapatit)	500 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanopartikel-Impfstoffe	800 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanoformulierungen für Arzneistoffe	1 Mrd. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Elektronik				
Transparente Elektronik (leitfähige Beschichtungen, Tinten, Transistoren)	76,4 Mrd. \$ (2010)	123 Mrd. \$ (2015)	10 %	BCC 2010 [37]
organische Materialien (organische Halbleiter)	2,3 Mrd. \$ (2010)	20,1 Mrd. \$ (2015)	60 %	
anorganische Materialien (ITO, Mischoxide, CNT)	74 Mrd. \$ (2010)	103 Mrd. \$ (2015)	7 %	
Halbleiter-Datenspeicher	46 Mrd. \$ (2009)	79 Mrd. \$ (2014)	11 %	BCC 2010 [38]
DRAM	25 Mrd. \$ (2009)	41 Mrd. \$ (2014)	10 %	
NAND Flash	13 Mrd. \$ (2009)	26 Mrd. \$ (2014)	15 %	
Sonstige (MRAM, PC-RAM, FeRAM, NRAM etc.)	8 Mrd. \$ (2009)	12 Mrd. \$ (2014)	8 %	
Simulation von CMOS Transistoren im nm Bereich	20 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Optik				
LED	5,1 Mrd. \$ (2009)	5,4 Mrd. \$ (2010)	6 %	Strategies unlimited 2010 [39]
Nanophotonische Komponenten (nano-LED, OLED, holografische Speicher, Verstärker, Schalter, photonische Kristalle, Plasmonik etc.)	110 Mio. \$ (2009)	3,6 Mrd. \$ (2014)	101 %	MarketsandMarkets.com 2009 [40]
Quantenpunkt-Laser	50 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
VCSEL Laser	50 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Ultrakurzpulsaser	300 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Leuchtmittelbeschichtungen	10 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanometer-Multischicht-Röntgenoptik	10 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanobeschichtete Synchrotronoptiken	4 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Energie				
Nanooptimierte Batterien	169 Mio. \$ (2009)	1,1 Mrd. \$ (2013)	46 %	iRAP 2009 [41]
Nanooptimierte Photovoltaik (Farbstoffzelle, CIGS/CIS, Quantenpunkte etc.)	68 Mio. \$ (2010)	820 Mio. \$ (2017)	43 %	Future Markets 2010 [42]
Nanooptimierte Brennstoffzellen und Wasserstofftechnik (Elektroden, Katalysatoren und Membranen, Nanomaterialien zur Wasserstoffherstellung und -speicherung)	2 Mrd. \$ (2008)	k. A.	k. A.	iRAP 2009 [43]
Membran-Elektroden-Einheit für Brennstoffzellen	600 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Superkondensatoren	275 Mio. \$ (2009)	713 Mio. \$ (2014)	21 %	iRAP 2010 [44]
Mikroenergiesammler (Energy Harvesting) für energieautarke Sensoren und Schalter, z. B. elektromagnetische Induktion, Thermoelektrik, Photovoltaik, Vibrationswandler)	80 Mio. \$ (2009)	1,3 Mrd. \$ (2014)	74 %	iRAP 2010 [45]

Marktsegment	Weltmarktvolumen (Abschätzung für das angegebene Jahr)		CAGR	Quelle
Energie				
Anwendungen der Supraleitung (Magnete, Elektrotechnik)	2 Mrd. \$ (2010)	3,4 Mrd. \$ (2015)	11%	BCC 2010 [46]
Supraleitung in der Elektrotechnik (Transformatoren, Generatoren, Motoren, Strombegrenzer, Kabel)	23 Mio. \$ (2010)	889 Mio. \$ (2015)	107 %	
Hochtemperatursupraleiter-Drähte	4 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Katalysatoren für die Energietechnik (Kohleverflüssigung, Synthesgaskatalysatoren, Reforming, photoelektrochemische Wasserspaltung etc.)	4 Mrd. \$ (2010)	6 Mrd. \$ (2015)	8 %	BCC 2010 [47]
Thermovoltaikzellen	1 Mrd. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Membran-Elektroden-Einheit für Elektrolyse	50 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Umwelttechnik				
Nanotechnologieranwendungen in der Umwelttechnik (Sanierung und Aufbereitung, Nanosensorik, Energie-Materialeffizienz etc.)	2 Mrd. \$ (2009)	21,8 Mrd. \$ (2014)	62 %	BCC 2009 [48]
Nanotechnologie für die Wasseraufbereitung	1,4 Mrd. \$ (2010)	2,2 Mrd. \$ (2015)	10 %	BCC 2010 [49]
Nano- und Ultrafiltrationsmembranen	1,4 Mrd. \$ (2010)	2,1 Mrd. \$ (2015)	9 %	
Nanomaterial basierte Membranen (Nanofasern, CNT, Nanopartikel)	45 Mio. \$ (2010)	112 Mio. \$ (2015)	20 %	
Keramische Filtermembranen	23 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanofasern/-vliese für technische Filtration	100 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Nanooptimierte Wasserfilter	100 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Katalysatoren für die Umwelttechnik (Luft- und Wasserreinigung, effiziente Produktionstechnik etc.)	12,3 Mrd. \$ (2010)	14,6 Mrd. \$ (2015)	6 %	BCC 2010 [47]
Verpackung				
Nanooptimierte Pharmaverpackungen (Barrierewirkung, aktive Komponenten, smart labels)	3,8 Mrd. \$ (2009)	8,1 Mrd. \$ (2014)	16 %	iRAP 2010 [50]
Nanooptimierte Lebensmittel- und Getränkeverpackungen (Barrierewirkung, Sauerstoff-/Feuchteabsorber, RFID)	4,2 Mrd. \$ (2009)	7,3 Mrd. \$ (2014)	12 %	iRAP 2009 [51]
Elektronik in Verpackungsmaterialien (RFID, OLED, Sensorik etc.)	k. A.	7,7 Mrd. \$ (2020)	k. A.	IDTechEx 2010 [52]
Nanooptimierte Papierherstellung	3,2 Mrd. \$ (2010)	3,7 Mrd. \$ (2015)	3 %	BCC 2010 [53]
Kohlenstoffnanoröhren	8,3 Mio. \$ (2010)	19,3 Mio. \$ (2015)	18 %	
Nanoschichtsilikate	1,9 Mrd. \$ (2010)	2,1 Mrd. \$ (2015)	2 %	
Nanostärke	600 Mio. \$ (2010)	700 Mio. \$ (2015)	3 %	
Bau				
Nanobeschichtungen im Bausektor (Photokatalyse, Hydrophobie, Oleophobie, Selbstreinigung UV-Schutz)	130 Mio. \$ (2010)	400 Mio. \$ (2015)	21 %	Future Markets 2010 [54]
Automobil				
Nanooptimierte Komponenten und Werkstoffe im Automobil (Polymerkomposite, Beschichtungen, Sensorik, Reifen, Schmierstoffe, Batterien)	246 Mio. \$ (2010)	888 mio. \$ (2015)	29 %	Future Markets 2010 [55]
Nanobeschichtungen im Automobilbereich (Korrosions/Verschleißschutz, antibakteriell, Verschmutzungsschutz, Brandschutz, Antibeschlag, Antireflex)	125 Mio. \$ (2010)	310 Mio. \$ (2015)	20 %	Future Markets 2011 [56]
Sensorik				
MR-Sensorchips	100 Mio. \$ (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
Mikrosensoren	5,9 Mrd. \$ (2011)	12 Mrd. \$ (2016)	15 %	BCC 2011 [57]
MEMS Sensoren (Druck, Gas, Beschleunigung, Gyroskope, etc.)	3,2 Mrd. \$ (2011)	6,5 Mrd. \$ (2016)	16 %	
Nanosensoren (chemisch, biologisch, thermisch, Strahlung)	6,5 Mio. \$ (2011)	38 Mio. \$ (2011)	43 %	
Textil				
Nanosilber ausgerüstete Textilien (antimikrobiell)	50 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]
UV-Schutz für Textilien	10 Mio. € (2010)	k. A.	k. A.	VDI TZ 2011 [19]

Beispiele zu Marktpotenzialen nanooptimierter Produkte in verschiedenen Anwendungsfeldern

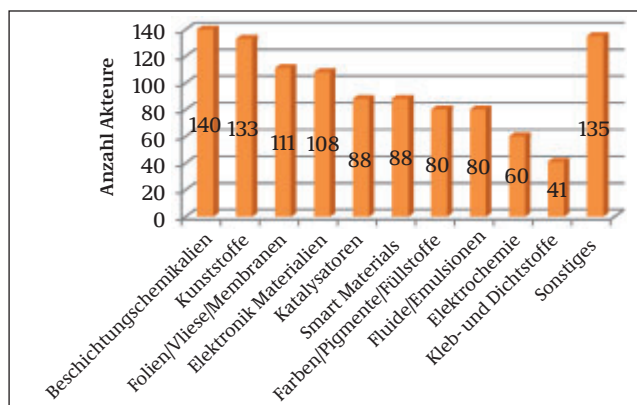
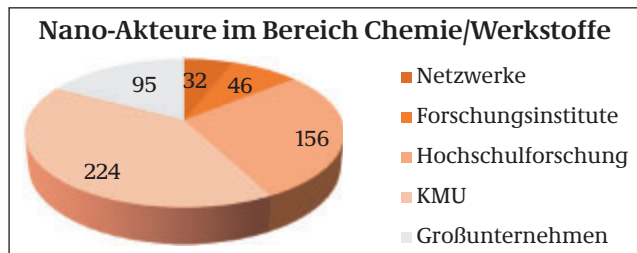
4.2 Chemie

Branchensteckbrief [59]

Industrieverband: Verband der Chemischen Industrie (VCI) www.vci.org
Teilbereiche: Fein- und Spezialchemikalien, Kunststoffe, anorganische und organische Grundstoffe, Chemiefasern, Arzneimittel
Anzahl Unternehmen: Rund 2.000, davon über 90 % KMU
Beschäftigte in Deutschland: 416.250 (2009)
Umsatz: 145 Mrd. Euro (2009)
F&E-Quote in Relation zum Umsatz : 5,7 %
Weltmarktstellung: 1. USA, 2. China, 3. Japan, 4. Deutschland

Nano-Akteure

Dem Anwendungsfeld Chemie sind rund 550 Nanotechnologieakteure zuzuordnen, wobei KMU und Hochschulinstitute ca. zwei Drittel hiervon repräsentieren. Die Großindustrie ist mit rund 100 Unternehmen gut vertreten. Bei den technologischen Teilgebieten weisen Beschichtungskemikalien, Kunststoffe und Folien/Vliese/Membranen sowie Elektronik-Chemikalien die größten Akteurszahlen auf.

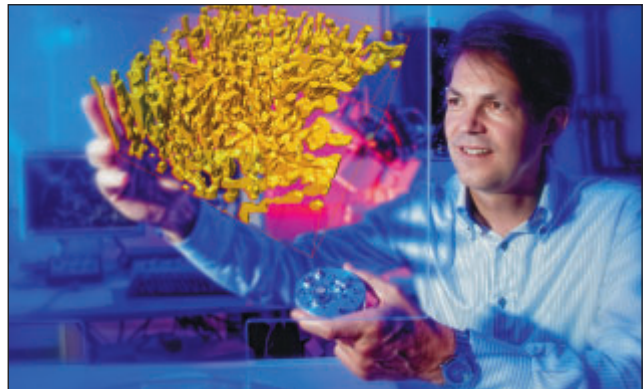


Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Chemie sowie Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

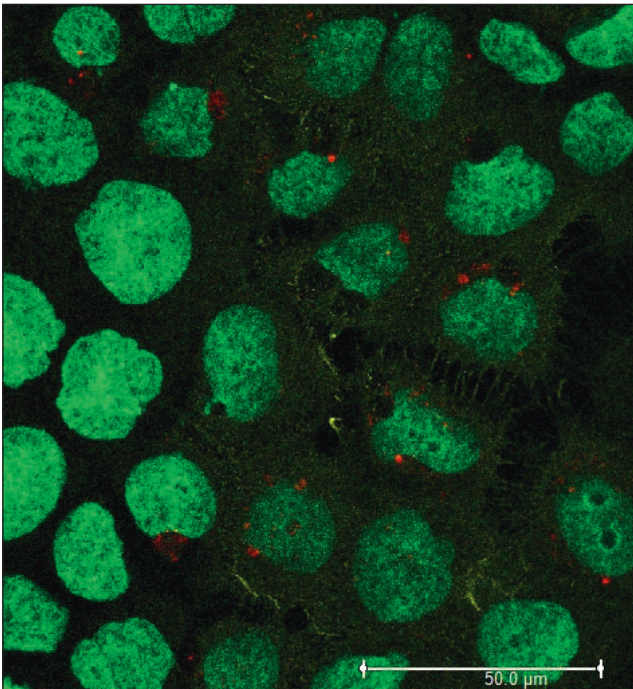
Die chemische Industrie stellt als klassische Zulieferbranche Grundstoffe für andere Wirtschaftszweige zur Verfügung, die eine wichtige Basis für Innovationen in vielen Hightech-

Sektoren darstellen. Schwerpunkt der Nanotechnologieaktivitäten in der chemischen Industrie ist die Herstellung von Nanomaterialien und deren Weiterverarbeitung zur Optimierung chemischer Zwischenprodukte wie z. B. Kunststoffe, Kleb-, Dicht- und Füllstoffe, Pigmente, Katalysatoren oder Beschichtungsstoffe. Die für die chemische Industrie relevanten Nanomaterialien umfassen fast alle Material- und Stoffklassen. Eine eindeutige definitorische Zuordnung, welche Substanzen als Nanomaterialien aufzufassen sind, existiert derzeit allerdings noch nicht. Gemäß einem Standard der Internationalen Standardisierungsorganisation ist zwar die Größenskala von Nanomaterialien auf ca. 1 bis 100 nm festgelegt und eine grundsätzliche Kategorisierung in einzelne Nanoobjekte (Nanopartikel, Nanoplättchen, Nanofasern und -röhren) und nanostrukturierte Materialien vorgenommen, zu denen Nanokomposite und aus Nanoobjekten zusammengesetzte Nanomaterialien zählen [60].



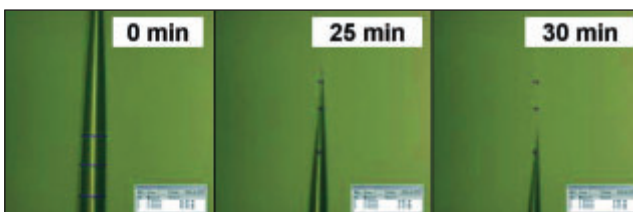
Die Nano-Tomographie ermöglicht präzise Einblicke in das Innere nanostrukturierter Werkstoffe (Quelle: bellhäuser – das bilderwerk)

In Bezug auf nanostrukturierte Materialien ist in der Fachszene aber umstritten, ab welchem Anteil an Nanoobjekten ein Stoff als Nanomaterial zu bezeichnen ist und wie sich dies messtechnisch erfassen lässt. Der wissenschaftliche Ausschuss „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“ (SCENIHR) der Europäischen Kommission hat als Mengenschwelle zur Einordnung von Nanomaterialien einen Anteil von > 0,15 % an Nanoobjekten, bezogen auf die Anzahlgrößenverteilung des Materials, sowie als weiteres Kriterium eine volumenspezifische Oberfläche > 60 m²/cm³ zur Bestimmung von nanostrukturierten Materialien vorgeschlagen [61]. Problematisch an diesem Definitionsvorschlag ist, abgesehen von messtechnischen Schwierigkeiten zur exakten Erfassung, auch die Tatsache, dass eine Vielzahl lange etablierter Materialien unter diese Definition fallen würden, die zumindest einen geringen Anteil an Strukturen aufweisen, die prinzipiell der Nanoskala zuzurechnen wären (z. B. aufgrund von Korngrößen-, Partikelgrößen- und Phasenverteilungen). Erschwerend für eine eindeutige Abgrenzbarkeit ist auch die Tatsache, dass der Anteil von Nanoobjekten eines Materials sich z. B. durch Agglomeration und Deagglomeration im Zeitverlauf ändern kann.



Nano-Sicherheit wird verstärkt erforscht, Zellversuch mit menschlichen Lungenzellen (Zellkerne, grün) und Nanopartikeln (rot) (Quelle: INM GmbH)

Ungeachtet der offenen Definitionsfrage fokussiert der vorliegende Report eher auf funktionale Eigenschaften von Nanomaterialien. Die Nanostrukturen müssen gezielt hergestellt und unmittelbar auf die Nanoskaligkeit rückführbare, technisch nutzbare Materialeigenschaften aufweisen, die verbesserte Komponenten und Produkte ermöglichen. In diesem Sinne zählen zu den neueren Nanomaterialien mit kommerzieller Bedeutung beispielsweise nanostrukturierte Kunststoffkomposite, Metalloxide, Metalle/Legierungen, mineralische Nanomaterialien (z. B. Schichtsilikate) Kohlenstoffverbindungen (Fullerene, Kohlenstoffnanoröhren, Graphene und Kohlefaserkomposite), organische Makromoleküle (z. B. Dendrimere, Cyclodextrine), anorganisch/organische Hybridmaterialien, organische Halbleiter, Quantenpunkte, biologische Materialien (z. B. Proteine wie Bacteriorhodopsin) sowie nanoskalige Emulsionen und Fluide. Darüber hinaus verstärken sich in letzter Zeit Entwicklungsaktivitäten im Hinblick auf multifunktionale „Smart Materials“, die schaltbare, adaptive und/oder regenerative Eigenschaften aufweisen.



Erste Erfolge auf dem Weg zu selbstheilenden Werkstoffen: Elastomere mit Vernetzungsadditiven können Mikrorisse selbst reparieren (Quelle: Fraunhofer UMSICHT).

Da das Eigenschaftsspektrum und die Anwendungspotenziale von Nanomaterialien bereits ausführlich im nano.DE-Report 2009 beschrieben worden sind, wird im Folgenden nur eine tabellarische Übersicht zu aktuellen Produkten und Entwicklungen gegeben, wobei letztere in erster Linie auf Forschungsansätzen laufender BMBF-Verbundprojekte Bezug nehmen.

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die Nanotechnologieaktivitäten der chemischen Industrie sind derzeit stark beeinflusst von der Diskussion um regulatorische Rahmensetzungen speziell im Bereich der europäischen Chemikaliengesetzgebung, aber auch von Regularien in Anwenderbranchen wie der Konsumgüter- und Kosmetikindustrie. Ob die bestehenden Regularien nanospezifische Besonderheiten ausreichend erfassen, wird derzeit in den zuständigen EU-Gremien und -Behörden intensiv geprüft (vgl. Abschnitt 5.10). Der kommerzielle Erfolg von Nanomaterial-basierten Produkten wird entscheidend von der gesellschaftlichen Akzeptanz abhängen, die wiederum unmittelbar mit der Gewährleistung eines sicheren und verantwortungsvollen Umgangs verknüpft ist. Auch wenn derzeit keine abschließende Beurteilung möglich ist, lässt sich feststellen, dass bislang keine Beispiele einer konkreten Gefährdung von Arbeitnehmern oder Verbrauchern durch Nanomaterial-basierte Produkte bekannt sind. Die chemische Industrie hat frühzeitig auf offene Fragestellungen im Zusammenhang mit Nanomaterialien reagiert und entsprechende Leitfäden zum sicheren Umgang entwickelt. Sollten sich die Prüfanforderungen für die Zulassung von Nanomaterialien in Zukunft verschärfen, wird sich das allerdings hemmend auf die Kommerzialisierung Nanomaterial-basierter Produkte auswirken. Insbesondere von KMU werden die hohen Zulassungskosten bereits heute als eines der Haupthemmnisse bei der Kommerzialisierung neuer Nanomaterialien genannt. Weitere Herausforderungen stellen sich durch eine Aufskalierung der Produktion von Nanomaterialien sowie deren Integration in industrielle Prozessketten. Da die Kommerzialisierung von Nanomaterialien aufgrund des geringen Materialeinsatzes häufig kein Volumengeschäft ist, sind z. T. neue Geschäftsmodelle im Sinne einer Vorwärtsintegration in der Wertschöpfungskette weg von Grundstoffen hin zur Vermarktung optimierter Komponenten erforderlich.

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Chemie

Kleb- und Dichtstoffe	Schaltbare Klebstoffe auf Basis magnetischer Kern-/Schale-Nanopartikel als Klebstoffzusatz. Durch äußere Magnetfelder können Klebeverbindungen punktgenau erwärmt und ausgehärtet werden bzw. durch erhöhten Energieeintrag wieder gelöst werden (Vorteil: Energieeinsparung und verbesserte Rezyklierbarkeit). Elektrisch leitfähige Klebstoffe durch Zusatz metallischer Nanopartikel für Elektronikkomponenten. (Vorteil: geringerer Füllstoffgehalt verbessert Verarbeit- und Anwendbarkeit). Siliziumdioxid-Nanopartikeldispersionen zur mechanischen Verstärkung von Klebstoffen oder Silikon-basierten Vergussmassen, z. B. für die Versiegelung druckempfindlicher Elektronikkomponenten (Vorteil: geringer Viskositätsanstieg und Transparenz). Reversible bionische Haft- und Klebeverbindungen (Geckoeffekt, Muschelkleber) durch Nutzung adhäsiver Nanostrukturen z. B. auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren auf Kunststoffsubstraten (Vorteil: rückstandsfreies, reversibles Kleben). Nanoadditive für Epoxiharze mit verbesserten Barriereigenschaften auf Basis organisch modifizierter Schichtsilikate und sphärischer Metalloxidnanopartikel (Anwendung z. B. Verkapselung von OLED). CNT-verstärkte Polymer-Harzsyste (Epoxidharze/Polyurethansysteme) zur Anwendung in Faserverbundwerkstoffen (u. a. für die Luftfahrt).
Katalysatoren	Nanoporöse Katalysatorträger (u. a. aus Keramik, Schichtsilikaten oder Kohlenstoff, CNT) für fein verteilte Edelmetallkatalysatoren z. B. in der chemischen Synthese oder der Umwelt- und Energietechnik (Vorteil: Materialeinsparungen und Effizienz durch vergrößerte Oberfläche). Herstellung/Stabilisierung nanoskaliger Metallkatalysatoren durch Templatverfahren oder ionische Flüssigkeiten (Vorteil: hohe Stabilität, selektives Maßschneiden von Partikelgrößen). Nanopartikelkatalysatoren für die selektive Oxidation alkylierter Aromaten in mehrwertigen Alkoholen/Polyolen und Ionischen Flüssigkeiten, Optimierung unter Einsatz von High-Throughput-Methoden. Mit Katalysatoren imprägnierte Nanopartikel zur Herstellung ultrahochmolekularer Polyethylen-Pulver mit einstellbarer Korngröße und Morphologie. Verbesserte Katalysatoren zur selektiven und effizienten Herstellung mehrwandiger und einwandiger CNT sowie Kohlenstoffnanofasern. Katalytische Reduktion von Kohlendioxid mit Hilfe nanostrukturierter Elektroden und Materialien (photokatalytisch, elektrochemisch, chemisch durch Metallkomplexe oder Metallkatalysatoren in ionischen Flüssigkeiten) zur rohstofflichen Nutzung.
Farben/Lacke/Beschichtungschemikalien	Nano-Silberpartikel als antibakterielle Zusätze für Anstriche/Lacke. Titandioxid-/Zinkoxid-Nanopartikel als UV-Schutz für Lacke oder als photokatalytisch wirksame Zusätze in Wandfarben/Beschichtungen. (Vorteil: Transparenz und Wirksamkeit). Kratzfeste Klarlacke durch Zusatz anorganischer Nanopartikel (z. B. Siliziumdioxid). Nanostrukturierte permanente Trennschichten durch Plasmapolymersation für Formgebungswerkzeuge in der Kunststoffverarbeitung (Vorteil: Einsparung von Löse- und nasschemischen Trennmitteln). Effektpigmente mit changierenden Farbeffekten durch nanobeschichtete Schichtmineralien. (Vorteil: attraktive Farbeffekte durch Interferenzerscheinungen). Selbstheilende Lacke durch neue Polyurethanmischungen mit hoher Fließfähigkeit. (Vorteil: Beim Erwärmen werden kleine Kratzer durch fließfähigen Lack ausgeglichen). Lack-/Beschichtungssysteme mit aktivem Korrosionsschutz, Selbstheilung von mechanischen Defekten auf Basis Zeolith- verkapselter Wirkstoffe oder funktionalisierter CNT. Biomimetische Frostschutzoberflächen auf Basis Peptid-funktionalisierter Lacke. Schaltbare hydrophobe/hydrophile Beschichtungslösungen auf Basis selbstorganisierender Polysiloxan-Copolymere für neuartige Wasch-, Reinigungs- und Pflegemitteladditive sowie technische Coatings (z. B. Vermeidung von Biofilmen). UV-härtbare Druckfarben und -lacke auf Basis Nanopartikel-modifizierter Fotoinitiatoren, die durch Transparenz den farblichen Eindruck der Druckfarben nicht verfälschen, aufgrund der großen Oberfläche katalytisch hoch wirksam sowie chemisch modifizierbar sind. Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen durch flammhemmende Nanopartikelzusätze für PUR-Lacke und -schäume.
Folien	Nanostrukturierte reflektierende Polarisationsfolien für LC-Displayanwendungen (Vorteil: höhere Ausbeute der Hintergrundbeleuchtung, geringerer Stromverbrauch). Nanofüllstoffe und Beschichtungen für Kunststofffolien mit verbesserten Eigenschaften (Barriere, Antistatik, Stabilität etc.) (Vorteil: Transparenz, geringer Füllstoffgehalt). Flexible multifunktionale keramische Folien durch Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsverfahren z. B. für Separatoren oder Wandbeläge (Vorteil: Mechanisch flexibel, beständig, durch Nanopartikel spezifisch funktionalisierbar). Nanostrukturierte multifunktionale Folien durch Softlithographie-Verfahren mit speziellen Eigenschaften (optisch, elektro-nisch, elektrochrom etc.). Folienintegrierte flexible Solarzellen und Batterien zur Energieversorgung z. B. von Textilelektronik oder Umweltsensoren.

Kunststoffe	Elektrisch leitfähige CNT-Polymerkomposite (Vorteil: Erhalt der Polymereigenschaften durch geringen Füllstoffgehalt) z. B. für Elektronikgehäuse, Industrieverpackungen, elektrostatisches Lackieren etc.).
	Transparente Polycarbonat-Nanokomposite (Vorteil: bessere Wärme- und Dimensionsbeständigkeit, Kratzfestigkeit, UV- und Chemikalienbeständigkeit, Brandschutz).
	Funktionalisierte Nano-Schichtsilikate als Füllstoff für Polymere (Thermoplaste, Elastomere, Duroplaste) mit verbesserten Eigenschaften (Festigkeit, Brandschutz, Gasbarriere).
	Anorganisch/organische Hybridpolymere mit verbesserten mechanischen Eigenschaften (z. B. Ormocere, POSS).
	Nanopartikuläre Additive zur Verbesserung der Fließfähigkeit von Polybutylenterephthalat (Vorteil: bessere Verarbeitbarkeit im Spritzguss).
	Selbstheilende Kunststoffe mittels eingebetteter mikro-/nanoverkapselter Verbindungen (Katalysator, Monomer), die bei Materialschädigung aushärten und Risse verschließen können.
	Kratzfeste Nanokomposit-Kunststoffe ohne Lackierung durch organisch modifizierte Siloxane. (kostengünstiger, einfachere Prozesstechnik).
Elektronikchemikalien	Dispersion von Nanopartikeln in Polymermatrices mit Hilfe überkritischer Gase.
	Aufkonzentrierung von Nanopartikeln in oberflächennahen Bereichen polymerer Werkstoffe durch Ultraschallbehandlung zur Verbesserung von Eigenschaften (z. B. Antistatik, Abriebfestigkeit).
	Metalloxidnanopartikel zum chemisch-mechanischen Polieren von Wafern (Vorteil: durch feinere Partikel können glattere Oberflächen für immer kleinere Schaltkreise erzeugt werden).
	Nanomodifizierte Photoresists für die lithografische Nanostrukturierung (Vorteil z. B. Superhydrophobie, Ätzresistenz, Formtreue, einstellbare Viskosität).
	Elektrisch leitfähige Druckfarben auf Basis metallischer Nanopartikel (z. B. Gold, Silber) zur Anwendung in der gedruckten Elektronik.
	Elektrisch leitfähige Beschichtungen und druckbare Pasten/Tinten auf Basis von CNT oder Graphenen für elektronische Kontakte, Dünnschichttransistoren, Touchscreens (Vorteil: gute Prozessierbarkeit, Ersatz seltener Metalle oder Leiterbahn).
	Metallische Nanopartikel als Zusatz für Photoresists zur Photopolymerisation oder lithografischen Herstellung von Mikro-/Nanosystemkomponenten (Vorteil: höhere Empfindlichkeit, Temperaturstabilität, weitere Eigenschaften wie magnetisch oder piezoresistiv).
Adsorber	Lötpasten mit metallischen Nanopartikeln durch Zersetzung metallorganischer Verbindungen beim Löten (Vorteil: erhöhte Zuverlässigkeit der Lötstelle).
	Verkapselungsmaterial auf Basis Nanopartikel-gefüllter fluorhaltiger Blockcopolymere mit hoher Barrierewirkung und Transparenz für die Organische Photovoltaik.
	Superabsorber auf Basis von Nanofasern und Nanopartikeln (Vorteil: chemisch funktionalisierbar, große Oberfläche).
Adsorber	Sol-Gel abgeleitete sphärische Kohlenstoffpulver mit einstellbarer nanoskaliger Struktur sowie Porosität für Anwendungen in textilen Filtermaterialien.

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende:  = Anwendung im Markt,  = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)



Beschichtungsanlage zur Herstellung nanostrukturierter Folien
(Quelle: Bellhäuser)

Beispiele für F&E-Projekte und -Initiativen

Die Innovationsallianz CNT (Inno.CNT) – Einzigartiges Bündnis aus Wissenschaft und Industrie in Deutschland

Dr. Andreas Volz, Projektträger Jülich – Geschäftsbereich NMT

Als eng vernetzter Forschungsverbund mit rund 90 namhaften Partnern aus Wissenschaft, Mittelstand und Großindustrie will Inno.CNT in Deutschland die Grundlagen für einen Leitmarkt für Carbon Nanotubes (CNT) schaffen. Die Allianz schlägt eine Brücke zwischen wegweisender Technologie und praxisnahen Anwendungen in zahlreichen Industriebereichen entlang der Wertschöpfungskette. Inno.CNT startete in 2008 mit ca. 70 Partnern in 18 miteinander vernetzten Projekten, die neben Basistechnologien und Sicherheitsforschung drei Anwendungsgebiete im Fokus haben. Die ursprünglichen 14 Anwendungsprojekte fokussieren daher auf die Bereiche Energie und Umwelt, Mobilität und Leichtbau. Aufgrund der erfolgreichen Arbeit innerhalb der Allianz ist Inno.CNT mittlerweile auf 27 Projekte gewachsen und deckt mit dem neu implementierten Bereich Elektronik ein weiteres Technologiefeld ab. Gefördert wird die Allianz vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Grundlegende Verbesserungen bei mechanischen, elektronischen und thermischen Eigenschaften von Werkstoffen CNT haben das Potenzial, neue Werkstoffe und Produkte in zahlreichen Anwendungen hervorzubringen, deren Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen mit bisheriger Technologie nicht realisierbar sind. Inno.CNT hat sich die Aufgabe gesetzt, vielfältige Anwendungen für CNT zu erschließen und für Deutschland mit dieser Schlüsseltechnologie zur Etablierung neuer Leitmärkte beizutragen. Damit wird ein Beitrag für eine internationale Spitzenposition Deutschlands bei der Nutzung von CNT-basierenden Technologien und Produkten geleistet. Um hier das Marktpotenzial

schnell und gezielt zu heben, fokussiert sich die Allianz auf Bereiche mit hoher wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Relevanz. Die Allianz ist Teil der Hightech-Strategie der Bundesregierung und wird seit 2008 im Rahmen des Programms „Werkstoffinnovation für Industrie und Gesellschaft (WING)“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Inno.CNT: Gemeinsame Ziele als Fundament für einzigartige Lösungen

Die Innovationsallianz steht für gemeinsame Lösungen mit erheblichen Synergieeffekten. Zusammen besteht die Allianz aus inzwischen 27 eng vernetzten Projekten. Drei davon erarbeiten Lösungen für die Herstellung, Funktionalisierung und Dispergierung von CNT. 22 Projekte verteilen sich auf die Anwendungsbereiche Energie & Umwelt, Leichtbau, Mobilität und Elektronik und zwei Projekte befassen sich mit den Querschnittsthemen Gesundheit und Sicherheit. Die besondere Stärke der Innovationsallianz CNT besteht neben der außergewöhnlichen Zusammensetzung aus Industrie und Wissenschaft vor allem in der intensiven Vernetzung der Projekte. Dadurch können das Know-how der Partner untereinander effektiver genutzt und somit große Synergien generiert werden. Vor allem das Zusammenspiel der projektübergreifenden Querschnittstechnologien mit den spezifischen Projekten in den vier Anwendungsfeldern bietet erhebliche Chancen. Durch einen klaren Anwendungs- und Marktbezug sollen die Forschungsergebnisse schnell in wirtschaftlich erfolgversprechende Lösungen übertragen werden.

Aktive Kommunikationsarbeit für eine größtmögliche Transparenz

Um das Verständnis für kommende CNT-basierende Anwendungen zu fördern, beteiligt sich Inno.CNT aktiv an einem offenen und kontinuierlichen Dialog mit der Öffentlichkeit. Denn eine sachlich differenzierte und frühzeitige Kommunikation kann den gesellschaftlichen Umgang mit dieser Technologie und damit die Realisierung ihres Nutzens mit gestalten.



Überblick zu der Projektstruktur der Innovationsallianz CNT
(www.inno-cnt.de)

4.3 Metall- und Keramikwerkstoffe

Branchensteckbrief [62, 63]

Industrieverbände:

Stahl: Wirtschaftsvereinigung Stahl, www.stahl-online.de
 Nicht-Eisenmetalle: Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM), www.wvm-metalle.de
 Keramik: Verband der Keramischen Industrie e.V. (VKI), www.keramverband.de

Anzahl Unternehmen:

Stahl: ca. 100 Unternehmen
 NE-Metalle: ca. 650 Unternehmen
 Technische Keramik: ca. 35 Unternehmen

Beschäftigte in Deutschland:

Stahlindustrie: 92.000 (2009)
 NE-Metalle: 108.400 (2009)
 Technische Keramik: ca. 3.000 (2009)

Umsatz:

Stahl: 32,8 Mrd. Euro (2009), ca. 44 Mrd. Euro (2010)
 NE-Metalle: 32,2 Mrd. Euro (2009)
 Technische Keramik: 40 Mio. Euro (2009)

F&E-Quote:

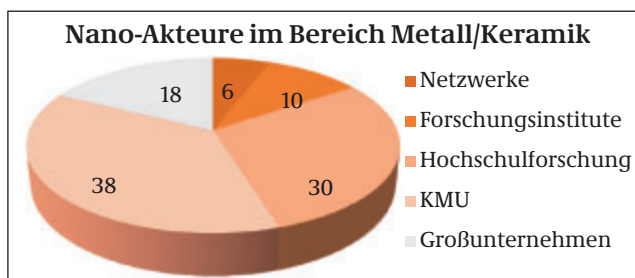
Stahl: ca. 1 % vom Umsatz
 NE-Metalle: k. A.
 Technische Keramik: k. A.

Weltmarktstellung:

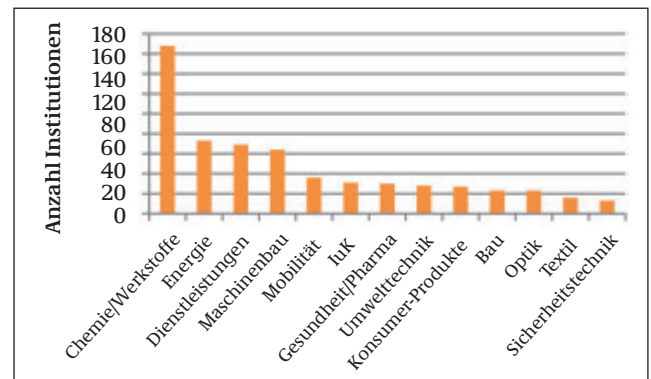
Stahl: China (Platz 1), Japan (2), USA (3), Russland (4), Indien (5), Südkorea (6), Deutschland (7)
 NE-Metalle: k. A.
 Technische Keramik: k. A.

Nano-Akteure

Im Bereich nanostrukturierter Metall- und Keramikwerkstoffe sind rund 250 Nanotechnologieakteure aktiv. Bei den Anwendungsfeldern liegt der Bereich Chemie/Werkstoffe an erster Stelle, gefolgt von Energie, Dienstleistungen, Maschinenbau und Mobilität.



Anzahl der Nanotechnologieakteure im Bereich nanostrukturierter Metall- und Keramikwerkstoffe sowie Verknüpfung mit Anwendungsfeldern (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Anwendungsfeldern zugeordnet sein.)



Anzahl der Nanotechnologieakteure im Bereich nanostrukturierter Metall- und Keramikwerkstoffe sowie Verknüpfung mit Anwendungsfeldern (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Anwendungsfeldern zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Der Einsatz der Nanotechnologie kann in vielen Bereichen die Funktionalität keramischer und metallischer Werkstoffe optimieren, beispielsweise im Hinblick auf Leichtbauanwendungen durch verbesserte mechanische Eigenschaften, durch einen nanooptimierten Korrosionsschutz für Metalle oder der Optimierung spezifischer Eigenschaften technischer Keramik wie Supraleitfähigkeit, Thermo- oder Piezoelektrizität. Nano-optimierte metallische und keramische Werkstoffe finden breite Anwendung in verschiedenen Industriebereichen, z. B. als Konstruktionswerkstoff im Fahrzeug- und Maschinenbau, der Energie- und Umwelttechnik sowie in Hightechbranchen wie der Elektronik und Medizintechnik.

Stahl

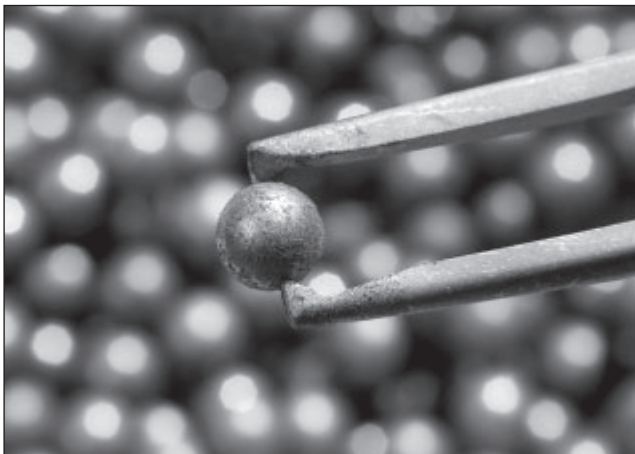
Im Bereich von Stahlwerkstoffen zielt die Nanotechnologie in erster Linie auf eine Funktionsverbesserung durch nanostrukturierte Beschichtungen. Mittels physikalischer Abscheideverfahren von Keramik- oder Kohlenstoffschichten oder durch Laserhärten lassen sich die tribologischen Eigenschaften und die Verschleißfestigkeit von Stählen in hochbelasteten Fahrzeug- und oder Maschinenkomponenten verbessern. Durch Sol-Gel- bzw. Polymer-Beschichtungen können Stahloberflächen im Hinblick auf Korrosionsschutz, Verzunderungsschutz beim Warmumformen, Vereisungsschutz oder Antihaf- und Antifingerprinteigenschaften funktionalisiert werden. Nanokristalline Stähle werden als Substrat für thermische Spritzprozesse für leistungsfähigere Verschleißschutzschichten eingesetzt. Durch nanoskalige Zusätze metallischer Carbonitride in Stahlliegierungen lassen sich Härte und Kriechbeständigkeit von Stählen verbessern. Insgesamt bietet die Nanotechnologie Potenziale, die Funktionalität von Stählen zu verbessern sowie seltene und umweltbelastende Stoffe (Legierungszusätze oder Beschichtungsstoffe) zu ersetzen.

Sonstige metallische Werkstoffe

Im Bereich der Nichteisenmetalle lässt sich die Nanotechnologie zur Eigenschaftsverbesserung von Leichtmetallen, Metalllegierungen oder Metall-Matrix-Kompositen (MMC) einsetzen. Nanooptimierte MMC lassen sich aus einer Vielzahl von Matrixmetallen (z. B. Aluminium, Titan, Nickel) und nanoskaligen Füllstoffen (Boride, Carbide, Nitride, Oxide) herstellen und verbinden die Vorteile einer hohen Festigkeit und Härte mit einer guten Formbarkeit. Mittels Kombination nanostrukturierter Hartmetalle und Hartstoffschichten lassen sich ultraharte Werkstoffe für den Werkzeugbau entwickeln.

Auch CNT lassen sich zur Eigenschaftsoptimierung von Metallen einsetzen, wie zum Beispiel bei CNT-Aluminium-Kompositen, bei denen mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren in eine Aluminiummatrix dispergiert werden. Die durch pulvermetallurgische Verfahren hergestellten Composite weisen eine bis zu dreifach höhere Steifigkeit als konventionelles Aluminium auf.

Nanokristalline Metalle und Legierungen bieten Potenziale, die das Produktportfolio der Metallindustrie deutlich erweitern. Die Verkleinerung von Korngrößen bis in den Nanobereich, die beispielsweise mittels plastischer Deformationsverfahren oder Plasmabogensintern erreicht wird, führt zu einer erhöhten Härte und Festigkeit der Metalle, oftmals allerdings verbunden mit einer verringerten Formbarkeit und Plastizität, die die Anwendbarkeit nanokristalliner Metalle einschränkt. Durch neuere Ansätze wie z. B. einer bimodalen Korngrößenverteilung wird versucht die Einsatzmöglichkeiten zu verbessern.



Fulleren verstärktes Aluminium-Kompositmaterial mit dreifach höherer Härte als herkömmliche Verbundwerkstoffe bei gleichzeitig geringerem Gewicht (Quelle: Siemens)

Metallische Nanopartikel finden darüber hinaus Einsatz in der Katalyse (Edelmetallnanopartikel in Automobilkatalysatoren, Brennstoffzellen etc.), in der Medizintechnik (z. B.

Goldnanopartikel zur Markierung von Biomolekülen in der Diagnostik), in der Umwelttechnik (Eisennanopartikel zur adsorptiven und katalytischen Dekontamination von Umweltschadstoffen) oder in Konsumgütern (z. B. Nanosilberpartikel für antibakterielle Ausrüstungen von Textilien und Haushaltsoberflächen). Diese Anwendungen werden in den jeweiligen Anwendungsfeldern näher beschrieben, da sie nicht in das Umfeld der Metallbranche fallen.

Technische Keramik

Im Bereich der technischen Keramik liefert die Nanotechnologie Ansätze für verbesserte spezifische Funktionalitäten, z. B. in den Bereichen Supraleitung, Thermo-/Piezoelektrizität, Ionenleitfähigkeit, Transparenz, Wärmeresistenz, Biokompatibilität oder mechanische Festigkeit. Erreicht wird dies durch die Verarbeitung nanoskaliger keramischer Ausgangsstoffe, nanoskalige Füllstoffe sowie nanostrukturierte Schichten. Lange etabliert ist der Einsatz nanostrukturierter keramischer PVD-Mehrlagenschichten, die als Hitzeschutz für metallische Werkstoffe z. B. bei Turbinenschaufeln in Kraftwerken oder Triebwerken eingesetzt werden. Nanooptimierte Keramiken mit verbesserter Ionenleitfähigkeit sind der Schlüssel für Weiterentwicklungen bei Feststoffelektrolyt-Brennstoffzellen. In der Prozessierungstechnik betreffen neue Forschungsansätze beispielsweise die Anwendung nanoskaliger Suspensionen zum thermischen Spritzen keramischer Schichten oder die Einarbeitung von Kohlenstoffnanoröhren in keramische Composite, um deren Festigkeit sowie die elektrische und thermische Leitfähigkeit zu erhöhen. Die Herstellung transparenter Keramiken aus Nanopulvern durch Vakuum- bzw. Strahlungsunterstützte Sinterprozesse ist ein weiteres Forschungsfeld. Bei einer Absenkung der Herstellungskosten bieten sich für transparente Keramiken aussichtsreiche Anwendungspotenziale bei Beleuchtungskörpern sowie in der Optik und Sicherheitstechnik.

Nanostrukturierte Keramiken spielen weiterhin eine Rolle bei der Entwicklung neuartiger oder verbesserten Funktionen in der Elektronik, z. B. im Bereich bleifreier Piezokeramiken, hochtemperaturfähiger Elektrokeramiken, magnetisch und elektrisch steuerbarer Funktionswerkstoffe sowie für den Bereich der Datenspeicher. Im Elektronikbereich finden Hochleistungskeramiken vorwiegend in passiven elektronischen Bauelementen sowie als Komponenten für Drucker, Feinpositionierer, medizinische und optische Geräte, Einspritz- und Zerstäubersysteme, als auch in Sensor- und Aktorsystemen Einsatz [64]. Im Bereich der Strukturkeramiken liefert die Nanotechnologie Ansätze für eine Steigerung der mechanischen Stabilität, z. B. durch Nanoröhren sowie für die Realisierung von Konzepten der in-situ Bauteilüberwachung durch integrierte Sensoren oder „selbstheilender“ Werkstoffe, z. B. bei Wärmedämmschichtsystemen für Kraftwerke.

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Metall- und Keramikwerkstoffe

Stahl	Sol-Gel-Beschichtungen für chemische Funktionalisierung von Stahloberflächen (Antifingerprint, Hydrophobie, Korrosionsschutz, Verzunderungsschutz bei der Warmumformung von Stahlblechen im Automobilbau).
	Nanokristalline Stahlliegierungen zum thermischen Spritzen und als Verschleißplatten (Vorteil: hohe Härte und Verschleißbeständigkeit).
	Nanostrukturierte PVD/CVD-Hartschichten auf Keramik- und Kohlenstoffbasis.
	Nanostrukturierte Korrosions-/Hitze- und Verschleißschutz-Beschichtungen durch thermische Spray- und Spritzprozesse auf Basis nanoskaliger Suspensionen.
	Nanoskalige Metall-Carbonitrid-Dispersionen als Legierungszusatz für Stahl zur Verbesserung der Kriechbeständigkeit.
Aluminium	Laserverfahren zur Funktionalisierung dünner, nanopartikulärer Schichten für hochbeanspruchte Motoren- und Getriebe-komponenten aus gehärtetem Stahl (Vorteil: niedrigere Kosten als bei dem PVD-Verfahren).
	Nanobeschichtungen auf Basis wasserlöslicher Polymere zur Verhinderung/Verminderung von Eiswachstum für den Einsatz in der Metallbandbeschichtung.
	Nano-Borkristallite in hochfesten, formbaren Aluminiumlegierungen für Leichtbau und Schutzanwendungen.
	Metall-Matrix-Komposite mit verbesserter Festigkeit durch Zusatz keramischer Nanopartikel.
	Herstellung hochfester nanokristalliner Aluminiumwerkstoffe durch Plasma Spark Sintern.
Hartmetalle	CNT-/Aluminiumkomposite mit erhöhter Härte, Zugfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit.
	Oxidische Nanopulver als pulvermetallurgischer Zusatz für Aluminiumschmelzen (Verbesserung der Dichtheit, Festigkeit und Duktilität des Aluminiumgussbauteils).
	Nanostrukturierte diamantartige Kohlenstoffsichten und keramische Hartstoffsichten durch CVD-Prozesse zur Eigenschaftsverbesserung von Hartmetallen.
	Verschleiß- und Festigkeitsoptimierte Hartmetallkomposite durch nanokristalline Gefügestruktur z. B. durch mechanische Mahlprozesse oder plastische Verformung.
	Superharte Werkstoffe durch Kombination nanostrukturierter Hartmetalle und nanokristalliner Hartschichten.
Keramik/Gläser	Nanooptimierte Glaskeramiken mit nanokristallinen Einschlüssen zur Verbesserung der Temperaturbeständigkeit und Verringerung von Wärmeausdehnungskoeffizienten (u. a. Ceran, optische Spezialgläser).
	Nanostrukturierte Dünnschichtsysteme mit multifunktionalen Eigenschaften (ultrahart, schmutzabweisend, hochtransparent) auf Glas-Oberflächen mittels Magnetron-Sputtertechnik.
	Nanostrukturierte keramische Festkörper und -schichtsysteme für unterschiedliche Anwendungen (Verschleiß-/Hitzeschutz, nanoporöse Substrate etc.).
	"kalt härtende" Keramik durch nanooptimierte mineralische Bindemittelrezepturen für säureresistente, porenfreie Betone (Ersatz von Zement).
	CNT/Keramik-Komposite mit verbesserter Leitfähigkeit (Strom, Wärme) durch intermolekulare elektrische Verschweißung eines CNT-Netzwerkes im Komposit.
Korrosionsschutz	Transparente Keramiken durch Vakuum- und Strahlungs-unterstützte Sinterprozesse von Nanopulvern für optische Keramiken und Beleuchtungskörper.
	Metalloberflächenbehandlung und Korrosionsschutz mit nanokeramischen Beschichtungen (ca. 20-50 nm) für Stahl, Guss-eisen, Aluminium und Magnesium (Vorteil: weniger Prozessschritte, Energieeinsparung) nanokeramische Korrosionsschutz-schichten).
	Nano-Korrosionsschutz-Lacke für Bauteile aus Stahl und Aluminium auf Basis von Sol-Gel-Acrylat- und Polyurethanlacken (verbessertes Korrosionsschutzvermögen, Optik, Umformbarkeit).

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: ☐ = Anwendung im Markt, ☐ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Verbundprojekt C-NeT: Hochfeste Strukturen durch nanoverschweißte Carbon Nanotube Netzwerke in Keramiken

Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung neuartiger CNT/Keramik-Komposite, bei denen durch intermolekulare elektrische Verschweißung Kohlenstoffnanoröhren-Netzwerke in der Keramikmatrix generiert werden, die sowohl für eine mechanische Verstärkung als auch für eine hohe Strom- und Wärmeleitfähigkeit sorgen. Das Dotieren der Keramiken mittels chemisch modifizierter CNT erfolgt durch Einsatz von Kugelmøhlen, Heißpress- und Sintermaschinen. Die Anwendungspotentiale der Hochleistungskeramiken könnten beispielsweise im konstruktiven Bereich, in der Zündtechnik sowie in der Entwicklung von Heizelementen und Elektroden liegen [65].

Verbundprojekt: Carbon Nanotubes in Magnesium, Aluminium und Titan – CaNaMAT

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von Verbundwerkstoffen aus Multiwalled-Carbon-Nanotubes (MWNT), Leichtmetallen (Mg, Al, Ti) und deren Legierungen. Im Vergleich zu den herkömmlichen Legierungen zeichnen sich diese Komposite durch höhere mechanische Festigkeiten und verbesserte thermische, schwingungsdämpfende und tribologische Eigenschaften aus. Die mit dem neuen Ansatz verbundene Gewichtsreduzierung, die verbesserten Dämpfungseigenschaften, eine Verringerung der Reibungsverluste sowie eine deutlich verbesserte Wärmeleitung kann in vielen Anwendungen signifikante Vorteile bringen, z. B. für Kolben im PKW-Bereich [66].



Gesinterte Proben aus CNT verstärkten Metall-Matrix-Kompositen
(Quelle: Fraunhofer IPA)

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die Rahmenbedingungen des Einsatzes der Nanotechnologie im Bereich metallischer und keramischer Werkstoffe sind maßgeblich geprägt durch steigende Anforderungen in Bezug auf die Energie- und Ressourceneffizienz industrieller

Prozesse. Gerade im konstruktiven Leichtbau ist die Erhöhung mechanischer Leistungswerte bei gleichzeitiger Reduktion des Gewichtes ein wesentliches Entwicklungsziel, zu dem die Nanotechnologie signifikante Lösungsbeiträge liefern kann. Auch der Ersatz umweltbelastender Stoffe beispielsweise durch Anwendung von Sol-Gel-basierten Beschichtungen im Korrosionsschutz wird durch die Nanotechnologie ermöglicht. Herausforderungen liegen in erster Linie in der wirtschaftlichen Herstellung nanooptimierter Materialien sowie einer kontrollierten und sicheren Handhabung nanoskaliger Materialien und deren Integration in Kompositmaterialien und Komponenten unter Beibehaltung gewünschter nanospezifischer Funktionalitäten. Der Einsatz von Simulationstechniken und Multiskalenmodellierung wird bei Optimierung von Werkstoffeigenschaften künftig an Bedeutung gewinnen.

4.4 Medizin/Pharma

Branchensteckbrief [67, 68, 69]

Industrieverbände:

Pharma:

VFA: Verband Forschender Arzneimittelhersteller e.V., www.vfa.de

VCI: Verband der Chemischen Industrie, www.vci.de

BPI: Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie e.V. (BPI), www.bpi.de

Medizintechnik: Spectaris (www.spectaris.de)

Anzahl Unternehmen:

Pharma: ca. 900

Medizintechnik: ca. 360

Beschäftigte in Deutschland:

Pharma: 108.000 (2009)

Medizintechnik: 87.000 (2009)

Umsatz:

Pharma: 26,4 Mrd. Euro (2009)

Medizintechnik: 18,3 Mrd. Euro (2009)

F&E-Quote: Pharma: ca. 17% (4,6 Mrd. €, 2009)

Medizintechnik: 9 % (2009)

Weltmarktstellung:

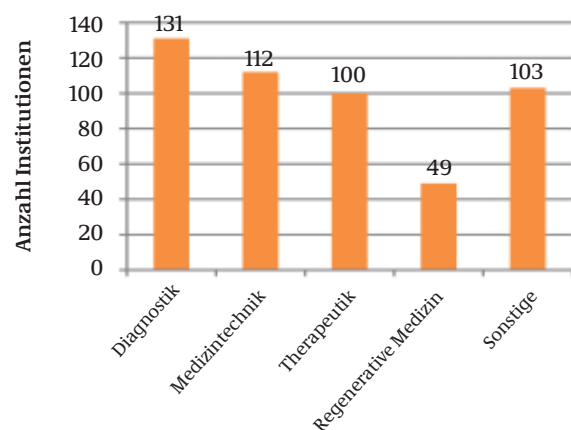
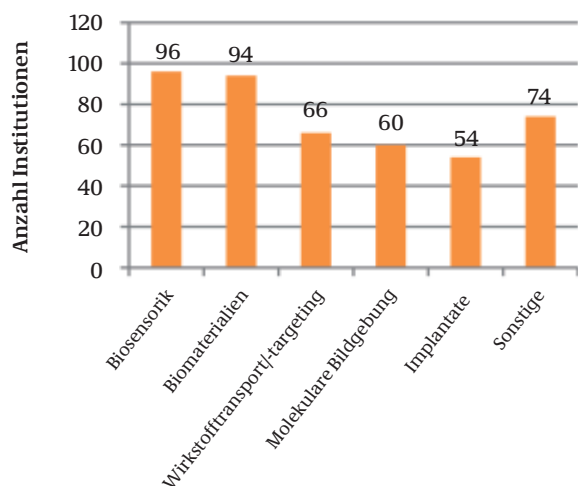
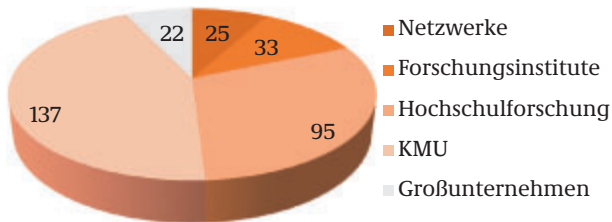
Pharma: 1. USA, 2. Japan, 3. Frankreich, 4. Deutschland

Medizintechnik: k. A.

Nano-Akteure

Im Anwendungsfeld Medizin/Pharma sind rund 300 Nanotechnologieakteure aktiv. Der Anteil an Großunternehmen ist mit 7 % relativ gering. Die größte Zahl an Akteuren ist im Bereich Diagnostik tätig, gefolgt von Medizintechnik und Therapeutik. Bei den nanotechnologischen Teilgebieten im Gesundheitsbereich liegen Biosensorik und Biomaterialien an der Spitze vor Wirkstofftransport und -targeting sowie der molekularen Bildgebung.

Nano-Akteure im Bereich Medizin/ Pharma



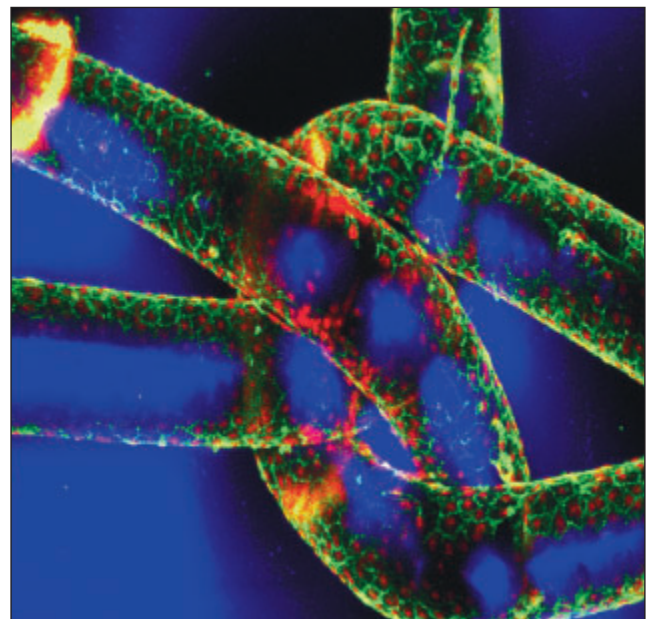
Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Medizin/ Gesundheit sowie Aufschlüsselung nach nanotechnologischen und medizinischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilfeldern zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Der Einsatz der Nanotechnologie in der Medizin betrifft die Bereiche neuer Medikamente durch Wirkstoffformulierung und -transport, verbesserte Diagnoseverfahren und medizintechnische Instrumente sowie den Bereich der regenerativen Medizin durch nanooptimierte Implantate und Gewebezüchtung. Nanotechnologische Entwicklungen werden wichtige Beiträge für eine leistungsfähigere, individuellere und schonendere Medizin liefern und so gleichzeitig für die Gesundheit der Menschen als auch für den Standort Deutschland nützlich sein. In vielen Bereichen der Nanomedizin sind bereits Produkte auf dem Markt etabliert, im Bereich der Diagnostik etwa

nanopartikuläre Kontrastmittel für die MRT-Bildgebung oder nanoskalige Marker für Biochipanwendungen, in der Medizintechnik im Bereich nanostrukturierter Knochenersatzmaterialien, biokompatibler Implantate, antibakteriell beschichtete Katheter oder Wundauflagen sowie nanofunktionalisierter Dialysefilter. Eine medizintechnische Methode der Krebsbekämpfung durch magnetische Hyperthermie auf Basis von funktionalisierter Eisennanopartikel hat 2010 die europäische Zulassung erhalten (vgl. Kasten S. 40). Im Pharmabereich ist die Anzahl zugelassener nanooptimierter Medikamente noch relativ überschaubar. Nach Angaben des Bundesinstitutes für Arzneimittel und Medizinprodukte sind mittlerweile rund 20 nanooptimierte Medikamente auf dem Markt, u. a. gegen Tumorerkrankungen, chronische Hepatitis oder multiple Sklerose. Dazu zählen auch Medikamente, die zur Verkapselung Nanomaterialien wie Liposomen, Polymer-Protein-Konjugate oder polymere Substanzen enthalten [70].

Forschungstrends der Nanotechnologie gehen in Richtung einer präventiven und personalisierten Medizin. Hierzu zählen molekulare Marker zur Früherkennung von Krankheiten, spezifisch auf bestimmte Personengruppen zugeschnittene Pharmazeutika, selektive Drug-Delivery-Systeme sowie integrierte Konzepte von Diagnose und Therapie, die Theranostik. Ein weiteres Innovationsfeld befasst sich mit nanofunktionalisierten Implantaten, die spezifisch mit dem Körpergewebe wechselwirken oder Wirkstoffe kontrolliert im Körper abgeben können. Hohe Erwartungen werden auch in den Bereich des Tissue Engineerings gesetzt, bei dem nanotechnologische Prozesstechnik und nanostrukturierte Trägersubstrate beitragen, Verfahren zur Bereitstellung von Gewebe- oder Organersatz zu entwickeln. Weiterentwicklungen nanoanalytischer Verfahren wie der Fluoreszenzmikroskopie oder der Rasterkraftmikroskopie (z. B. Messung von Proteinfaltungsprozessen) tragen dabei wesentlich zur Aufklärung von Lebensprozessen bei.



Die Nanobioanalytik trägt zur Aufklärung von Lebensprozessen bei (Quelle: Allianz für Wissenschaft Münster)

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Medizin/Pharma

Diagnostik	Magnetische Nanopartikel (Eisenoxid) als MRT-Kontrastmittel zur in-vivo-Diagnostik. Goldnanopartikel als Träger für Antikörper zur molekularen Diagnostik (z. B. beschichtete Katheter zur Detektion tumorspezifischer Zellen im Blut). Quantenpunkte mit biologischer Oberflächenfunktionalisierung als optische Marker für in-vitro-Diagnostik. Biochips, mikrofluidische Laborchip-Systeme für diagnostische Schnelltests (DNA, Proteine etc.).
	Nanopartikuläre superparamagnetische Sonden auf Eisenoxidbasis zur Tumordetektion sowie für das onkologische Therapie-monitoring mit selektiver Ankopplung an das Tumorgewebe (Targeting, molekulare und zelluläre Bildgebung). Optische Bildgebung auf Basis nanoverkapselter und nanooptimierter Fluoreszenzmarker sowie selektiven Laserscannern zur nicht-invasiven, schonenden diagnostischen Früherkennung von Krebserkrankungen (Brust, Prostata). Hochsensitive elektrochemische Nanobiosensor-Systeme für die medizinische Diagnostik durch nanostrukturierte Elektrodenanordnungen mittels Nanopartikellithographie. Kontinuierlicher Glucosesensor auf Basis organischer Elektronik als flexibles Pflaster. Nanopartikuläre Farbstoffe als molekulare Sondenplattform in der optischen Bildgebung. NIR-absorbierende nanopartikuläre Polymere zur photoakustischen Bildgebung von Biomaterialien als dreidimensionale Mikroskopie-Plattform für die Diagnostik.
Therapeutik	Wirksamere Wirkstoffanwendung durch nanoskalige Transportbehälter wie Liposomen, Polymer-Protein-Konjugate oder Polymerkapseln. Humanisierte monoklonale Antikörper für therapeutische Anwendungen (z. B. Krebs). Hydrogele zur kontrollierten Freisetzung von Nanopartikeln und verkapselten Wirkstoffen für verschiedene Applikationsformen und Therapieansätze.
	Zielgerichteter Transport von Arzneistoffen mit funktionalisierten Nanopartikeln, z. B. über systemische Barrieren wie Blut-Hirn-Schranke. Sensor-Aktor-gesteuerte Wirkstofffreisetzung. Nanomaterialien zur Kopplung von Diagnose und Therapie (Theragnostik), z. B. neue Sonden und molekularbiologische Diagnostika und deren Integration in Systeme der Schnelldiagnostik und Chirurgie. Nanotransporter (u. a. Polymernanopartikel) zur inhalativen Anwendung von Arzneistoffen (z. B. zur Behandlung von Asthma) oder zur dermalen Anwendung.
Medizintechnik	Erhöhung der Biokompatibilität und Funktionalisierung der Oberflächeneigenschaften von Implantaten und Kathetern durch Nanobeschichtungen (z. B. Titan-/Kohlenstoffschichten). Magnetische Nanopartikel zur Hyperthermie-Behandlung von Tumoren (u. a. Glioblastom). Antibakterielle Medizintechnikprodukte z. B. Silberbeschichtung von Verbandstoffen und Stützstrümpfen oder von Kathetern in der Kardiologie. Dialysetechnik auf Basis nanofunktionalisierter Membranen und Hohlfasern mit spezifischen Filtrationseigenschaften.
	Netzhautimplantat mit nanostrukturierten Hochbarriereschichten. Nanostrukturierte implantierbare Mikroelektroden zur Neurostimulation oder zur Anwendung in Neuroimplantaten (Cochlea-Implantate). Bioaktive Implantate mit gezielter Wechselwirkung zwischen Implantat und biologischem Umfeld durch nanofunktionalisierte Oberflächen (z. B. immobilisierte Antibiotika, Wachstumsfaktoren, thermosensitive Polymere etc.). Anwendungen z. B. Knochen-, Gelenk-, Glaskörperersatz. Spinnenseidenproteine und Nanofaser-basierte Protein-Polymer-Kompositen zur Nutzung für Wundauflagen und Hygieneartikel.
Zahnmedizin	Nano-Hybrid-Komposite für Kunststofffüllungen mit verringerter Polymerisationsschrumpfung, verbesserter Abriebsbeständigkeit und Farbechtheit. Nanostrukturiertes Hydroxylapatit in kristalliner Form als Zahnersatzmaterial.
	Anwendung von Silicatein und Biosilica zur Herstellung schützender Zahnbeschichtungen.

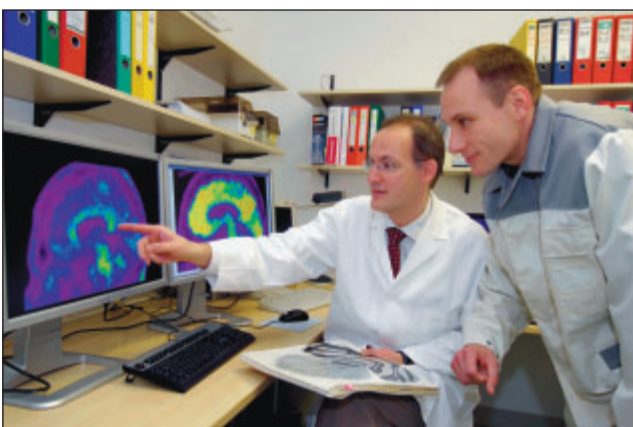
Biomedizinische Grundlagenforschung	Zell/Elektronik gekoppelte Testsysteme (z. B. Patch-Clamp-Verfahren zur Untersuchung der Elektrophysiologie von Zellen).
	Hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie (z. B. STED) und Rastersondenverfahren zur Aufklärung biochemischer Zellprozesse.
	Superparamagnetische Nanopartikel zur Einschleusung von Nukleinsäuren in Zellen (Magnetofection), Weiterentwicklung für therapeutische Zwecke.
	Oberflächenfunktionalisierte magnetische Nanopartikel (Fe, Co) zur magnetischen Zellseparation/Bioanalytik.
	Nanostrukturierte, dreidimensionale Trägermaterialien für Zellkulturen im Bereich Gewebezüchtung, z. B. magnetoaktive Polymere zur Zellkultur von Bindegewebszellen oder dreidimensionale Nano-Cellulose Gerüststrukturen für Knorpelgewebe.
	Nanoreaktionstechnik für die Produktion von Wirkstoffen und Biomaterialien sowie zur Zellselektion, -manipulation und -expansion (z. B. immobilisierte molekulare Transportbänder, Nanoreaktoren, Einzelzellmanipulatoren, molekular geprägte Membranen etc.).
	Molekulare Schalter auf Basis an Nanoobjekten (z. B. Nanopartikel, Antikörper, Zellmembran) gekoppelten photostabilen Substanzen mit hoher Fluoreszenzmodulation und Quantenausbeute, die mittels Licht geschaltet werden können.
	Nanoskalige Tomografie und Manipulation von Einzelzellen durch biophotonische Stimulation und Multiphotonen-Mikroskopie.
	Mikrofluidische Laborchips mit Biomembran überspannten Nanoporen zur Untersuchung integraler Membranproteine.

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: ☐ = Anwendung im Markt, ☐ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Technologie-Initiative Molekulare Bildgebung – MoBiTech

Ziel dieser Technologie-Initiative ist es, durch konzertierte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Unternehmen am Standort Deutschland die Technologieführerschaft in der Molekularen Bildgebung aufzubauen und die Industrialisierung dieser Medizintechnologie voranzutreiben. Im Ergebnis sollen für die klinische Diagnostik sowie für die Arzneimittelentwicklung neue bildgebende Sonden (Kontrastmittel, nuklearmedizinische Tracer), neue bildgebende Medizingeräte und neue leistungsfähige Systeme zur Datenverarbeitung und Bildanalyse realisiert werden [71].



Forscher in der diagnostischen Bildgebung vergleichen ein gesundes Gehirn (linker Bildschirm) mit dem eines Alzheimer-Patienten (Quelle: Bayer AG).

Effizienter Wirkstofftransport in biologischen Systemen – BioTransporter

Mit dieser Fördermaßnahme verfolgt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Ziel, Unternehmen und Institute am Standort Deutschland bei der Erforschung

der Grundlagen für eine neue Generation von vorrangig therapeutischen Applikationssystemen (sogenannte Drug-Delivery-Systeme) zu unterstützen. Damit soll erreicht werden, dass bereits entwickelte hochwirksame Wirkstoffe gezielt z. T. auch über biologische Barrieren an den Wirkort transportiert werden und Nebenwirkungen durch eine hohe Wirkstoffdosis vermieden werden [72].

Bioaktive Implantate

Die Biologisierung von Medizinprodukten und insbesondere von Implantaten steht verstärkt im Fokus innovativer Entwicklungen. Sollen Implantate optimal an die menschliche Physiologie angepasst werden, greift man zunehmend auf das große Potenzial der Biotechnologie einerseits und Nano- und Werkstofftechnologien andererseits zurück. Diesen Trend zur Konvergenz zweier Schlüsseltechnologien unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderung vorwettbewerblicher Verbundprojekte mit der Maßnahme „Bioaktive Implantate“ [73].

ERA-Net EuroNanoMed: Europäisches Verbundprojekt im Bereich Nanomedizin

Die im Januar 2009 ins Leben gerufene ERA-Net Fördermaßnahme EuroNanoMed unterstützt transnationale F&E-Projekte im Bereich der Nanomedizin. Sie ermöglicht die grenzübergreifende Zusammenarbeit von Forschergruppen aus Industrie, öffentlicher und klinischer Forschung und setzt auf transnationale Projekte, die den Transfer von Forschungsergebnissen aus dem Labor an den Patienten beschleunigen. Themenschwerpunkte sind die regenerative Medizin, Diagnostika sowie Wirkstofftransport-Systeme [74].

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Herausforderungen bei der Entwicklung von Nanotechnologianwendungen im Bereich der Pharmazie liegen vor allem in der langen Zeitspanne von der Forschung bis zum zugelassenen Produkt verbunden mit einem hohen Kostenaufwand

und langfristigen Kapitalrendite-Zyklen. Auch im Bereich der Medizintechnikprodukte kann die Entwicklung von der Grundlagenforschung bis in den Markt 15 bis 20 Jahre in Anspruch nehmen, wie das Beispiel einer Hyperthermie basierten Krebstherapie zeigt (s. Kasten unten). Ob die Zulassungsprozeduren im Pharma- und Medizintechniksektor in Bezug auf nanospezifische Eigenschaften angepasst werden müssen, wird derzeit von Fachgremien und Regulierungsbehörden diskutiert. Bislang wurden die ohnehin aufwändigen und strengen Zulassungsprüfungen als ausreichend betrachtet, um auch besondere Effekte von Nanomaterialien mit zu erfassen. Die weitere Entwicklung wird von Ergebnissen der laufenden Risiko- forschung zu Nanomaterialien sowie den politischen Rahmense- tzungungen in den nächsten Jahren abhängen. In der Bevölkerung besitzt die Anwendung der Nanotechnologie in der Medizin eine sehr hohe Akzeptanz, so dass mögliche Risiken angesichts erhöhter Heilungschancen durchaus akzeptiert werden [131]. Der demografische Wandel und eine immer älter werdende Bevölkerung in den Industriestaaten wird ein starker Treiber für die Anwendung neuer und leistungsfähiger nanotechnolo- gischer Verfahren in der Medizin sein.

Hitzetod für den Krebs

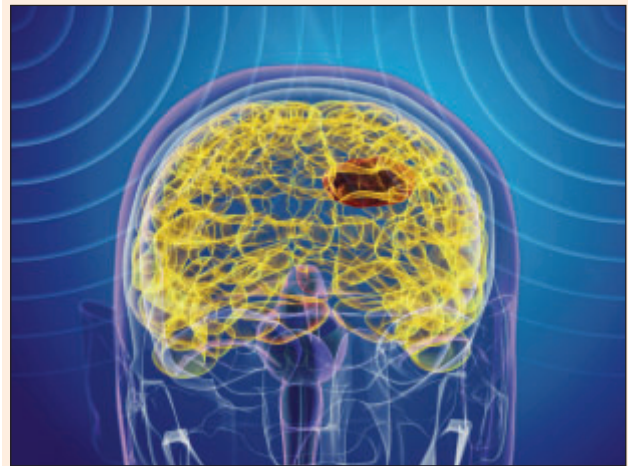
Hyperthermie – ein neues Verfahren zur zielgerichteten Therapie aggressiver Tumoren mit Hitze

Dr. O. Bujok, Projekträger VDI TZ

Die Nano-Krebs®-Therapie der MagForce Nanotechnologies AG ist ein innovatives Verfahren der zielgerichteten Tumor- bekämpfung. Es beruht auf dem Prinzip der Hyperthermie. Hierbei werden Eisenoxid-Partikel, deren Oberfläche mit Aminosilanen beschichtet sind und deren Größe nur wenige Nanometer beträgt, in den Tumor injiziert. Bedingt durch ihre Größe und ihre Beschichtung breiten sich die Partikel nur im Tumor aus, dringen aber nicht in umliegendes, gesun- des Gewebe ein. In einem äußeren magnetischen Wechsel- feld werden die Partikel dann aufgeheizt und bewirken ein lokales Absterben der Krebszellen. Im Rahmen der klinischen Studien wurden bei Patienten mit Glioblastom (Hirntumor) und Prostatakarzinom viel versprechende Erfolge erzielt. Die Geschichte der Hyperthermie geht maßgeblich auf die wissenschaftlichen und unternehmerischen Aktivitäten von Dr. Andreas Jordan zurück, der sich seit 1987 mit ihrer Erfor- schung zur Krebsbekämpfung befasst. Erste Versuche zur Hyperthermie in den 1980'er Jahren verwendeten elektroma- gnetische Felder zur Aufheizung bestimmter Körperpartien. Diese Verfahren waren wenig erfolgreich, da sie entweder nicht die erforderliche Temperatur von 43 °C im Gewebe erreichten oder aber neben dem erkrankten Gewebe auch umliegendes, gesundes Gewebe in Mitleidenschaft zogen und zu ungewollten Nebenwirkungen in Form von Verbren- nungen führten. Dr. Jordan hatte die Idee, die lokale Anwen- dung von Wärme durch das Einbringen von Magnetpartikeln in den Tumor zu erreichen. Er fand heraus, dass gerade

Partikel mit Durchmessern im Nanometerbereich eine sehr starke Erwärmung zeigten. Eine weitere Herausforderung konnte durch die Zusammenarbeit mit dem INM (Institut für Neue Materialien in Saarbrücken) gemeistert werden – der Verbleib der Partikel im Tumor. Jordan und die Forscher vom INM entdeckten, dass Eisenoxidpartikel mit einer Beschich- tung aus Aminosilanen hervorragend in Tumorzellen auf- genommen werden und diese nicht mehr verlassen. Damit war der Durchbruch für die heute von MagForce vertriebene „Nano-Krebs®-Therapie“ erreicht.

Die Arbeiten der MagForce Nanotechnologies wurden im Rahmen von zwei Verbundprojekten der Maßnahme Nano- biotechnologie innerhalb des Zeitraumes von 2002 bis 2006 vom BMBF gefördert.



Der mit magnetischen Nanopartikeln angereicherte Tumor wird bei der hyperthermischen Krebstherapie mittels elektromagnetischer Wechselfelder erhitzt (Quelle: MagForce Nanotechnologies AG)

4.5 Optik/ Photonik

Branchensteckbrief [75, 76]

Industrieverbände:

SPECTARIS, www.spectaris.de

Anzahl Unternehmen:

Optische Industrie: ca. 1.000 Unternehmen

Beschäftigte in Deutschland: Photonik: 120.000 (2009)

Umsatz:

Photonik: 18,4 Mrd. Euro (2009)

F&E-Quote: Photonik: 8 % (2009)

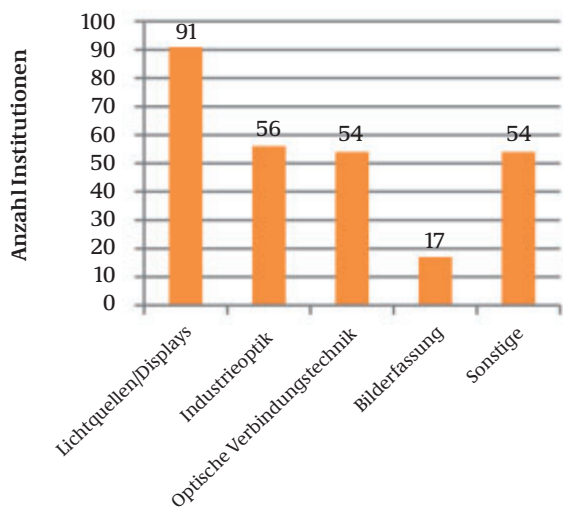
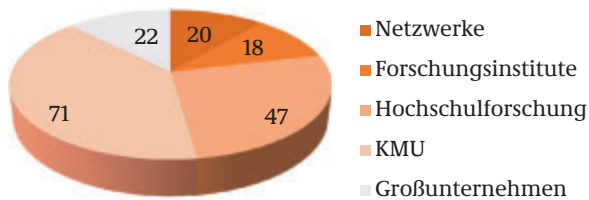
Weltmarktstellung:

1. Japan, 2. USA, 3. Taiwan, 4. Südkorea,
5. Deutschland (7 % des Weltmarktes)

Nano-Akteure

In der Optik sind ca. 180 Nanotechnologieakteure tätig, wobei die größte Zahl dem Bereich Lichtquellen/Displays zugeordnet werden kann, gefolgt von Industrieoptik und optischer Verbin- dungstechnik.

Nano-Akteure im Bereich Optik/ Photonik

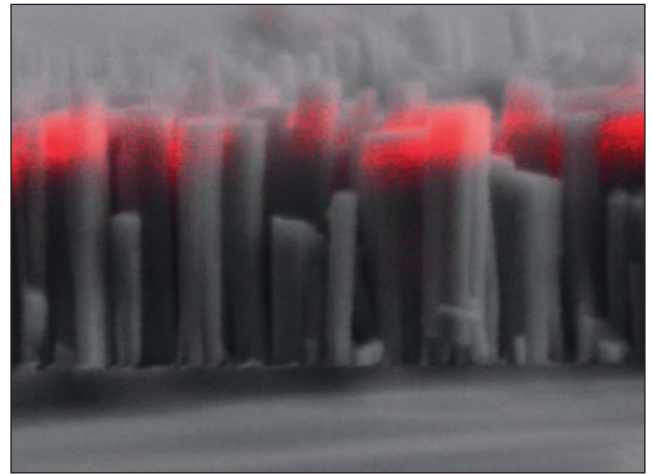


Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Optik und Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Anwendungen der Nanotechnologie haben in der Optik schon eine relativ lange Tradition, wie beispielsweise extrem präzise Optiken für Teleskope oder optische Lithografiegeräte zur Herstellung von Nanostrukturen in der Halbleiterfertigung. Außer in der Ultrapräzisionsoptik spielt die Nanotechnologie auch in der Optoelektronik bei der Herstellung von Halbleiterlasern und LED/OLED, bei passiven Bauelementen in der Kommunikationstechnik, in der Photovoltaik, der Sensorik und Analytik, der Biophotonik sowie in der Konsumeroptik (z. B. kratzfeste und entspiegelte Kunststoffbrillengläser) eine zentrale Rolle.

Zukünftige Entwicklungen betreffen die Nutzung neuartiger nanooptischer Komponenten wie photonische Kristalle, Metamaterialien oder Quantenpunkte, die Einsatzpotenziale bieten für neue Anwendungen in der Hochgeschwindigkeits-Kommunikationstechnik, die Quantenoptik und -kryptographie, neuartige Laserlichtquellen, Displays sowie in der Produktionstechnik zur ultrapräzisen Lasermaterialbearbeitung.



Nanosäulen aus Galliumnitrid, die je nach Materialzusammensetzung in unterschiedlichen Farben leuchten, könnten den Weg zu kostengünstigen weißen LED ebnen (Quelle: Paul-Drude-Institut für Festkörperphysik)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

OLED-Initiative 2015

Organische Leuchtdioden (abgekürzt: OLED für Organic Light Emitting Diode) sind Bauelemente aus ultradünnen organischen Schichten – ähnlich wie Plastikfolien – die beim Anlegen einer Spannung Licht aussenden. OLED werden aufgrund ihrer sehr flachen Bauweise, Energieeffizienz, dem Potenzial für eine großflächige, kostengünstige Massenproduktion sowie der Integrierbarkeit auch in flexible Substrate hohe Marktchancen im Bereich Displays und Beleuchtungskörper prognostiziert. Der Umsatz mit OLEDs beträgt auf dem europäischen Markt bereits heute über \$ 120 Mio. jährlich. Bis 2013 wird der Umsatz mit OLEDs in Europa auf über \$ 680 Mio. steigen [77]. Nach der ersten Förderphase der OLED-Initiative, die seit 2005 mit einem Fördervolumen von 100 Mio. Euro über fünf Jahre gefördert worden ist, sollen in einer zweiten Förderphase erfolgreiche Ansätze weiter unterstützt werden. Deutsche Unternehmen besitzen in diesem innovativen und international stark beachteten Feld eine hervorragende Ausgangsposition.



Elektrooptische Charakterisierung kommerzieller OLED-Beleuchtungskörper (Quelle: OSRAM)

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Optik/Photonik

Lichtquellen/Displays	Quantenpunkt- und Quantenkaskaden-Hochleistungslaser für Anwendungen im Bereich Telekom, Sensorik, Spektroskopie.
	Leistungsstarke EUV-Quellen mit hocheffizienten und langlebigen Kollektoroptiken für die EUVL Lithografie.
	OLED mit druckbaren Materialien (Lösliche Polymermaterialien für transparente Elektroden, Lochinjektionsmaterialien, Barriereklebstoffe, Emitter).
	Hocheffiziente, lichtstarke OLED Flächenlichtquellen mit maßgeschneiderter Lichtauskopplung zur Realisierung von hocheffizienten und langlebigen Bauelementen im Beleuchtungssektor.
Ultrapräzisionsoptik	Zinkoxid-Nanostäbe mit hoher Quantenausbeute für kostengünstige, großflächige und flexible UV LED. Deep-UV LEDs auf der Basis von (AlGaIn)N/AlGaIn Quantenfilmen.
	Ultrapräzise Asphären und optische Freiformflächen z. B. durch ultraschallunterstütztes Schleifen oder magnetorheologisches Polieren mit in-situ-Messtechnik.
	Diffraktive optische Elemente mit Nanometer-Präzision. z. B. für extrem flache Kamerasysteme auf Basis eines mikrooptischen Facettenaugenmoduls.
	Ultrapräzise Teleskop- und Röntgenspiegel mit sub-nm Genauigkeit für Anwendungen in der Astronomie und Produktions- und Messtechnik.
Industrie-/Consumer-optiken	Ultrapräzise Diamantzerspanung zur Masterfertigung für komplexe hybride, refrakto-diffraktive Optikkomponenten und Anwendung in einer Prozesskette für rechnergestütztes Optikdesign komplexer Optiken, z. B. für miniaturisierte Beleuchtungssysteme der Displaytechnik in Handys und Notebooks, Gleitsichtbrillen oder LED-Automobilleuchten.
	Ultrapräzisionsoptiken (Röntgenspiegel und Strahlführung) für die EUV-Lithografie in der Halbleiterfertigung.
	Anti-Reflexschichten, hochreflektive dielektrische Schichtsysteme und Antikratzschichten für Kunststoffoptiken z. B. auf Basis hochbrechender anorganischer Nanopartikel und Hybridpolymere.
	Phototrope Brillengläser mit lichtabhängiger Tönung auf Basis von Silberhalogenid-Nanopartikeln.
Nanooptische Komponenten und Materialien	Nanokompositmaterialien mit optimierbarem Brechungsindex zur Herstellung von Kunststoffoptiken im Spritzgussverfahren, z. B. für Lichtscheibenstreuoptiken in Beleuchtungskörpern.
	Selbstorganisierende plasmainduzierte Oberflächenstrukturen auf 3D optischen Kunststoffoberflächen für diffraktive optische Elemente im Bereich Displays, Sensorik und Abbildungsoptiken.
	Photonische Kristalle als optische Filterstruktur und Strahlführung, z. B. in der optischen Datenkommunikation.
	Optische Spezialgläser und Glaskeramiken (Farbeffekte, Verbesserung der Transmission und Temperaturbeständigkeit etc.) z. B. für hochpräzise Teleskopspiegel.
Optische Datenübertragung	Dreidimensionale Metamaterialien mit negativem Brechungsindex aus metallischen Nanostrukturen. Zukünftige Anwendungen im Bereich Sensorik, Mikroskopie, optische Tarnkappen.
	Nanoskalige Hybridpolymere für multifunktionale Beschichtungen spezialoptischer Fasern für Hochleistungsanwendungen und Sensorik (hohe Temperaturbeständigkeiten, gute Haftbarkeit, mechanische Festigkeit, einstellbarer Brechungsindex und Sterilisierbarkeit).
	Nanostrukturen in Komponenten von Glasfasernetzen (Distributed Feedback-Laser mit sehr schmaler Linienbreite, VCSEL-Laser, nanodotierte, optische Verstärker, nanostrukturierte Glasfasermäntel zur Verbesserung der Biegefestigkeit).
	CMOS integrierte Silizium-Nanophotonik (Integration von Modulatoren und Sensoren mit CMOS-Schaltkreisen).
Produktionstechnik	Breitbandige Terahertzstrahlungsquelle auf Basis selbstorganisierter ErAs-Quantenpunkte in einer III-V-Halbleitermatrix für THz-basierte optische Datenkommunikation über Glasfaser.
	Optische Quellen (u. a. Quantenpunkt-Halbleiteremitter) von polarisationsverschränkten einzelnen Photonenpaaren für Anwendungen in der Quantenkryptographie sowie quantenkryptografische Verschlüsselung.
	Frequenzkamm-Laser auf Basis von III/V-Halbleiterquantenpunkten in Kombination mit elektrooptischen Modulatoren für Wellenlängenmultiplexverfahren in der optischen Datenübertragung (Datenübertragungsrate ca. 100 Gbit/s).
	Lasermikrosintern von Nanopulvern zur Herstellung mikrosystemtechnischer Komponenten.
	Nanoimprintverfahren zum kostengünstigen Übertragen von Nanostrukturen in Kunststoffflächen.
	Hochreine Nanopartikelsynthese durch Laser-Ablationsverfahren.
	Nanometerpräzise Laserbearbeitung mittels Picosec-Laser.
	EUV-Lithografie zur Halbleiterstrukturierung.

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: ☐ = Anwendung im Markt, ☐ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Treiber des Einsatzes der Nanotechnologie in der Photonik sind weitere Leistungssteigerungen und die Miniaturisierung optoelektronischer Komponenten in der Informations- und Kommunikationstechnik. Im Bereich organischer Leuchtdioden sind einige technologische Hürden zu meistern im Hinblick auf eine wirksamere Verkapselung der oxidationsempfindlichen organischen Halbleitermaterialien sowie eine Optimierung der Herstellungsprozesse in Richtung einer großflächigen und kostengünstigen OLED-Produktion. Eine weitere Herausforderung liegt in der Weiterentwicklung grundlagenorientierter Forschungsansätze zur Nutzung nanooptischer Materialien und Komponenten wie Metamaterialien, dreidimensionale photonische Kristalle oder der Quantenkryptographie mit dem Ziel der Integration in technische Systeme.

4.6 Energie

Branchensteckbrief [78, 79, 80, 81, 82]

Industrieverbände:

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.,
www.bdew.de

Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW)

Bundesverband Windenergie e.V. (BWE)

Anzahl Unternehmen:

Elektrizitätsversorgung: 670 (2008)

Photovoltaik: ca. 350 Hersteller (2010)

Beschäftigte in Deutschland:

Elektrizitätsversorgung: 220.000 (2008)

Photovoltaik: 150.000 (2010)

Windenergie: 100.000 (2010)

Sonstige regenerative Energien: Biomasse-Verstromung: 38.400 (2008); Wasserkraft: 2.300 (2008); Geothermie: 600 (2008)

Umsatz:

Elektrizitätsversorgung: 268 Mrd. Euro (2008)

Photovoltaik: 10 Mrd. Euro (2010)

Windenergie: 30 Mrd. Euro (2008)

F&E-Quote:

Photovoltaik: ca. 3 % (2008)

Windenergie: k.A.

Weltmarktstellung:

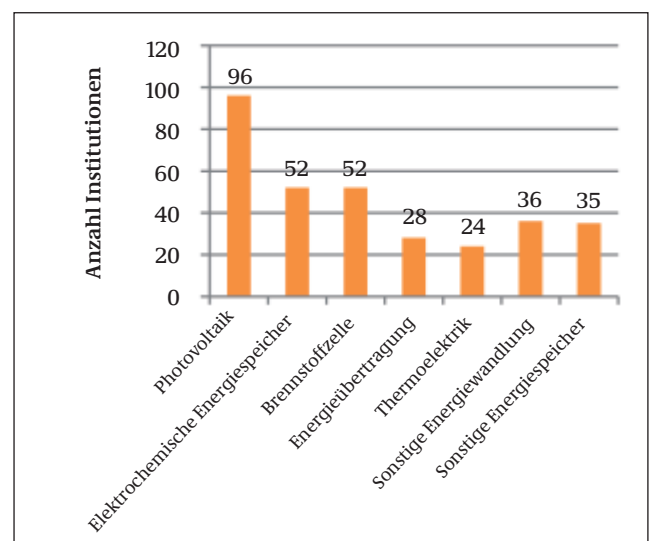
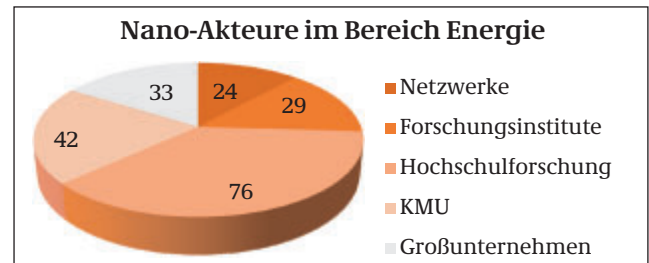
Photovoltaik: Hersteller: 1. China, 2. Deutschland

Windenergie: 1. Deutschland, 2. Dänemark 3. Spanien

Nano-Akteure

Dem Anwendungsfeld Energie können rund 200 Nanotechnologieakteure zugeordnet werden. Ein Großteil der Akteure kommt aus der öffentlichen Forschung, während Unternehmen im Vergleich zu anderen Anwendungsfeldern eher unterrepräsentiert sind. Dies zeigt, dass Nanotechnologienanwendungen im Energiebereich zum großen Teil noch dem Bereich

Grundlagenforschung zugeordnet werden können. Die Photovoltaik repräsentiert das zahlenmäßig größte Teilgebiet im Energiebereich. Weitere wichtige Teilfelder sind elektrochemische Energiespeicher und Brennstoffzellen.

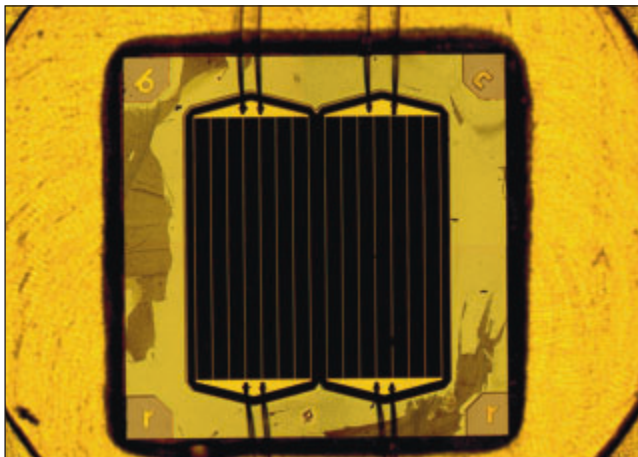


Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Energie und Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Die Nanotechnologie bietet vielseitige Potenziale, um die Effizienz der Energienutzung, aber auch der Energiewandlung, -übertragung und -speicherung zu verbessern und insbesondere den Methoden der regenerativen Energieversorgung langfristig zum Durchbruch zu verhelfen. Auch in der konventionellen Energieversorgung gibt es zahlreiche Forschungsansätze der Nanotechnologie, wie z. B. nanostrukturierte Hitzeschutzschichten für Turbinen zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Gaskraftwerken, Nanobeschichtungen für einen effizienteren Wärmetausch in Kraftwerkskühltürmen, Heizsystemen oder Industrieanlagen sowie Nanomaterialien und -sensoren zur besseren Ausbeutung von Öllagerstätten. In der Photovoltaik kann die Nanotechnologie für erhebliche Effizienzsprünge und Kostensenkungen sorgen. Das betrifft beispielsweise großflächige organische Solarzellen oder hocheffiziente Stapel- oder Quantenpunktzellen, bei denen Nanostrukturen für eine optimale Lichtabsorption und -umwandlung sorgen. Durch Nanostrukturen und Nanobeschichtungen können Reflektionsverluste vermieden oder

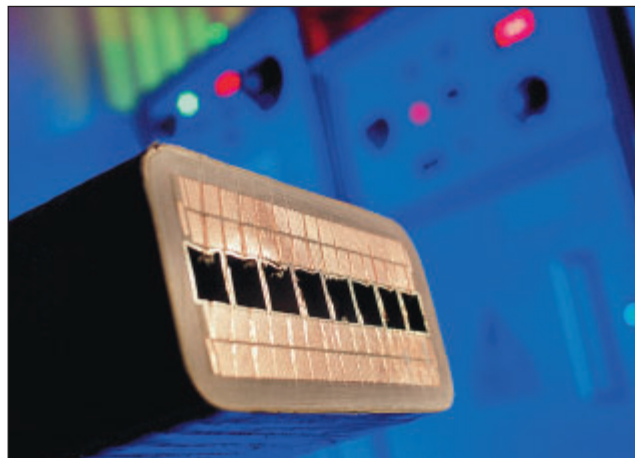
Lichtwellenlängen konvertiert werden, um so die Lichtausbeuten zu erhöhen. In der Windenergieerzeugung finden Nanomaterialien Einsatzpotenziale in Leichtbaumaterialien für Rotorflügel. Nanobeschichtungen mit Verschmutzungs- oder Vereisungsschutz können Energieverluste und Wartungskosten reduzieren.



Triple-Junction-Weltrekordsolarzelle mit einem Wirkungsgrad von 41,1% (Quelle: FHG-ISE)

Brennstoffzellen wie Polymer- und Festkörperelektrolyt-zellen (PEM bzw. SOFC) lassen sich durch Nanomaterialien für Katalysatoren, Elektroden und Membranen in der Effizienz und Stabilität steigern. Mittelfristig könnte dadurch der Einsatz für Automobilantriebe oder als Kraft-/Wärmeaggregate für die Energieversorgung in Haushalten wirtschaftlich konkurrenzfähig werden. Nanostrukturen sind weiterhin der Schlüssel für effizientere Thermoelektrika zur Stromerzeugung aus Abwärme im Automobil oder aus Körperwärme zur Versorgung textilintegrierter Elektronik. Die dezentrale Energiegewinnung für Mikrosysteme („micro energy harvesting“) zum Betrieb autarker Sensoren und mobiler Elektronik gilt als zukunftssträchtiges Einsatzfeld der Nanotechnologie. In mechanisch flexible Substrate integrierte Nanostrukturen bilden dabei die Basis, um kleinste Energiemengen in Form von Temperaturunterschieden, Sonnenstrahlung, Vibrationen etc. in nutzbare elektrische Energie umzuwandeln.

Nanooptimierte Katalysatoren bieten in vielen Bereichen Potenziale zur Erzeugung und Umwandlung chemischer Energieträger, z. B. durch photoelektrolytische Wasserstoff-erzeugung oder eine katalytische Biomassekonversion. Den Bereich elektrischer Energiespeicher adressiert eine Vielzahl nanotechnologischer F&E-Projekte. Durch vergrößerte Elektrodenflächen und optimierte Separatoren lassen sich Energiedichte und Stabilität von Batterien erhöhen und damit Einsatzmöglichkeiten in Elektro- und Hybridfahrzeugen oder stationären Stromspeichern erschließen. Im Bereich der Energieübertragung sind Beiträge für die Entwicklung kostengünstigerer Supraleiter sowie Komponenten und Sensoren für intelligente Stromnetze zu erwarten.

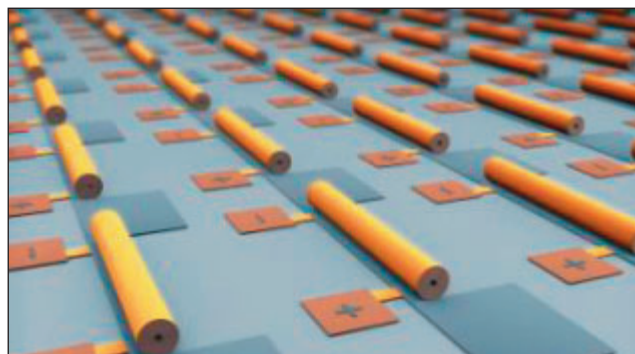


Nanofüllstoffe machen Hochspannungs-Kunststoffisolatoren in Generatoren effizienter (Quelle: Siemens)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Innovationsallianz „Lithium-Ionen-Batterie – LIB 2015“

Große leistungsfähige und sichere Lithium-basierte Energiespeicher sind ein essenzieller Baustein für die Weiterentwicklung von alternativen Antriebskonzepten, z. B. für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, oder regenerativen Energietechniken wie Windkraft. Hierfür müssen noch signifikante Verbesserungen im Hinblick auf Speicherkapazität, Energiedichte und Sicherheit der Batterien erreicht werden. Im Rahmen der Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ hat sich ein Industriekonsortium von BASF, BOSCH, EVONIK, LiTec, und VW verpflichtet, in den nächsten Jahren 360 Millionen Euro für Forschung und Entwicklung an der Lithium-Ionen Batterie zu investieren. Gleichzeitig wird das BMBF 60 Millionen Euro für diesen Bereich zur Verfügung stellen [83].



Vision eines hochleistungsfähigen Energiespeichers auf Basis zusammen-gerollter ultradünner Schichtsysteme (Quelle: TU Chemnitz, Professur Materialsysteme der Nanoelektronik)

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Energie

Photovoltaik/ Solarthermie	Sol-Gel-Antireflexschichten für Glasabdeckungen von Solarzellen zur Verbesserung der Lichtausbeute.
	Semitransparente Farbstoffsolarzellen mit nanostrukturiertem Titandioxid als Trägermaterial für lichtabsorbierende Farbstoffe (z. B. für Fassadenelemente, Wirkungsgrad ca. 10 %).
	Multi-Junction Solarzellen auf Basis von nanostrukturierten Verbindungshalbleiterschichtstapeln Wirkungsgraden bis zu 40 %.
	Solarreceiver für die Solarthermie mit optimierter Energieaufnahme und Hitzebeständigkeit durch Nanobeschichtungen von Absorberflächen.
	Organische Photovoltaik auf Basis druckbarer Materialien durch kostengünstige Rolle-zu-Rolle-Verfahren (Entwicklungsziel: > 10 % Wirkungsgrad, Haltbarkeit > 5 Jahre durch effiziente Verkapselung).
Konventionelle Energieträger	Druckbare Dünnschichtzellen auf Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Basis in Kombination mit organischen Halbleitern für Hybridsolarzellen (Vorteil: Kostensenkung und bessere spektrale Ausbeute).
	Kostengünstige Farbstoffsolarzellen durch Applikation nanobasierter Siebdruckpasten und Rolle-zu-Rolle Versiegelung auf Basis laminierter Folien.
	Nanostrukturierte Dünnschichtsolarzellen mit optimierten Photonenmanagement (Nutzung von Plasmoneneffekten, Lichtfallen durch photonische Kristalle, Photonenkonvertierung mittels Nanostrukturen).
	Nanostrukturierte Schichtverbundsysteme (Gradientenschichten, Haftvermittlung und thermische Barriere durch Plasmaverfahren) als Hitzeschutz für Turbinenschaufeln in Gas- und Dampfkraftwerken für höhere Betriebstemperaturen und Wirkungsgrade.
	Keramische Antihafschichten für Wärmetauscher/-rohre in Kraftwerken verhindern Verkrustung und sorgen für effizienteren Wärmetausch.
Windenergie	Nanomembranen zur Abtrennung von Kohlendioxid in CCS-Kraftwerken.
	Nanomaterialien zur Aufbereitung nuklearer Abfälle (z. B. CNT-Membranen zur Abtrennung radioaktiver Nuklide), strahlungsresistente Materialien zur Einkapselung.
	Sol-Gel-Beschichtungen für Flammrohre in Ölheizungen (Hitzebeständigkeit >1.500°C, korrosionsbeständig gegenüber schwefelhaltigen Brennstoffen).
	Nanokristalline Legierungen für Dauermagneten in Windkraftwerken (hohe Effizienz, Korrosionsbeständigkeit).
	Sol-Gel basierte Nanobeschichtungen für Rotorblätter mit Antihafteigenschaften (Eis, Verschmutzung) und UV-/Korrosionsschutz.
Sonstige Energiewandlung	CNT-verstärkte Harze zur mechanischen Verstärkung von Glasfaserkompositen für Leichtbau-Windrotorblätter.
	CNT-Polymerkomposite für stabilere Kunststoffrotoren in kleinen Windkraftanlagen.
	Adaptive Mikro-/Nanostrukturen für Rotorblattoberflächen zur Verringerung des Luftwiderstandes und Geräuschminderung.
	Brennstoffzellen: – PEM-Brennstoffzellen: verbesserte Temperaturstabilität und Protonenleitfähigkeit der Membranen, nanostrukturierte Edelmetall-Katalysatoren/-träger zur Wasserstoff-Oxidation bzw. Methanol-Reformation. – SOFC-Brennstoffzellen: Effizienzsteigerung durch nanostrukturierte Elektrolytmembranen (Ionenleitfähigkeit) und Elektroden.
	Herstellung chemischer Energieträger: – (Photo-)elektrokatalytische Wasserstofferzeugung auf Basis nanostrukturierter und nanopartikelbeschichteter Elektrodenoberflächen. (Vorteil: Optimierte Halbleiterbandlücken und Reduzierung von Überspannungen). – Kohleverflüssigung zur Herstellung flüssiger Kraftsstoffe auf Basis nanostrukturierter Katalysatoren. – Biomassekonversion durch Bioraffinerien unter Nutzung u. a. ionischer Flüssigkeiten, nanostrukturierter Katalysatoren etc.
Sonstige Energiewandlung	Energiewandler für Mikrosysteme: flexible Systeme für elektronische Bauelemente mit geringem Strombedarf (Sensoren, passive Bauelemente), z. B. in Polymerfolien integrierte keramische Piezoaktoren auf Basis von Zinkoxidnanodrähten, folienintegrierte Solarzellen und Batterien.
	Thermoelektrik: Effizientere Materialien (Chalkogenide, Si/Ge, V-VI-Halbleiterfilme) durch Nanostrukturierung (u. a. Multi-Quantum-Well-Strukturen oder Nanodrähte) und damit verbundener verringerter Wärme – sowie erhöhter Stromleitfähigkeit (Phononenstreuung, höhere thermoelektrische Effizienz) für unterschiedliche Temperaturbereiche und Anwendungen (Automobil, Industrie, Körperwärmenutzung für Sensoren/Elektronik).

Energiespeicher	Nanostrukturierte Elektrodenmaterialien und Separatoren für Superkondensatoren und Batterien.
	CNT basierte Elektrodenmaterialien mit hohen spezifischen Ladungskapazitäten für Superkondensatoren und Batterien.
	Optimierte Lithiumionenbatterien für Automobilantriebe und stationäre Großspeicher durch Nanostrukturierung und Einsatz von Nanokompositen für Elektrodenmaterialien (Anode u. a. Kohlenstoff, Kohlenstoff/Silizium; Kathode: u. a. Lithiumeisenphosphat, Lithiumkobaltphosphat) und Separator-/Elektrolytsystemen (keramische Folien, Polymermembranen, ionische Additive), Entwicklung neuer Batterietypen (Lithium-Luft, Lithium-Schwefel).
	Nanoporöse Adsorptionsspeicher u. a. auf Basis metallorganischer Käfigstrukturen für mobile Gasspeicher (Wasserstoff, Erdgas).
	Wasserstoffspeicher auf Basis nanokristalliner Metallhydride.
Energieübertragung	CNT-Materialien für Hochleistungsschalter und Stromkabel mit geringem Widerstand und hoher Stromtragfähigkeit.
	Nanopartikel zur Verbesserung der Stromtragfähigkeit von YBCO-Hochtemperatursupraleitern (z. B. kostengünstige Sol-Gel basierte Nanopulver als Pinningzentren oder Abscheidung mittels MOCVD).
	Verbesserung von Kunststoff-Isoliermaterialien durch Nanofüllstoffe (Nanosilikate) für mittel- bzw. hochspannungsbetriebene Anlagen.
	Nanomaterialien und Komponenten für die Leistungselektronik sowie für intelligente Stromnetze (magnetoelektronische Sensoren, nanokristalline Magnetwerkstoffe, Leistungshalbleiter).
	Optimierter Wärmetausch und -transport durch Nanomaterialien (z. B. CNT) und Nanopartikel basierte Fluide.

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: ☐ = Anwendung im Markt, ☐ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Innovationsallianz „Organische Photovoltaik“

Mit der Innovationsallianz „Organische Photovoltaik (OPV)“ sollen neue oder entscheidend verbesserte Solarzellen auf der Basis von halbleitenden Polymeren möglich werden, da Eigenschaften wie Transparenz oder Flexibilität diese neue Technologie für den mobilen Einsatz prädestinieren. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine deutliche Verbesserung der Wirkungsgrade und der Langlebigkeit des Materials bzw. der Bauelemente sowie eine drastische Reduzierung der derzeit noch hohen Herstellungskosten. Bei entsprechenden Entwicklungsfortschritten kann langfristig erwartet werden, dass die OPV die Energieerzeugung anderer Photovoltaik-Technologien ergänzt und weltweit einen signifikanten Beitrag zur Energieversorgung im stationären Bereich leisten wird. Das BMBF unterstützt die 2007 ins Leben gerufene Innovationsallianz „Organische Photovoltaik“ mit einem Fördervolumen von 60 Mio. Euro, wobei Industriepartner wie BASF, Bosch, Merck und Schott weitere 360 Mio. Euro Investitionen zugesagt haben [84].

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Rahmenbedingungen wie ein weltweit wachsender Energiebedarf, politische Vorgaben zur Einschränkung klimaschädlicher CO₂-Emissionen sowie die absehbare Verknappung fossiler Energieträger erzeugen einen hohen Innovationsdruck und werden den Einsatz der Nanotechnologie im Energiesektor begünstigen. Die Nanotechnologie kann dazu beitragen, die vorhandenen Energiereserven effizienter zu nutzen und regenerative Energiequellen wirtschaftlicher zu erschließen. In vielen Bereichen ist es allerdings noch ein weiter Weg bis in die wirtschaftliche Anwendung, wie bei-

spielsweise bei der Organischen Photovoltaik. Generell liegt die Herausforderung darin, einzelne technologische Entwicklungen in ein langfristiges und nachhaltiges Gesamtkonzept der Energieversorgung einzupassen.

4.7 Umwelttechnik

Branchensteckbrief [85, 86, 87]

Industrieverbände:

Kein einheitlicher Branchenverband, es existieren verschiedene Teilbereiche wie Maschinenbau, Entsorgung/Recycling, erneuerbare Energien etc.

Anzahl Unternehmen: k. A.

Beschäftigte in Deutschland: 1,8 Mio. (2006)

Umsatz: Ca. 200 Mrd. € (2010)

F&E-Quote: k. A.

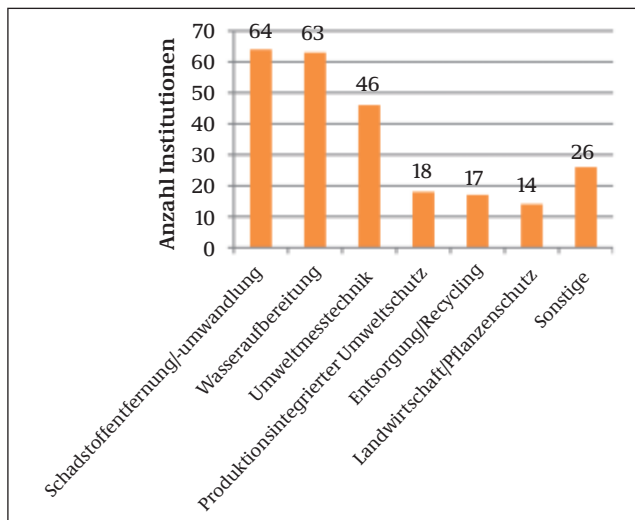
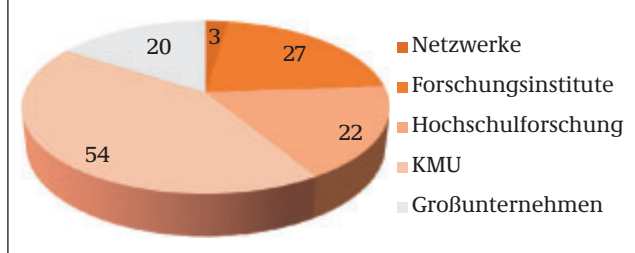
Weltmarktstellung:

Weltmarktanteil Deutschlands je nach Marktsegment zwischen 6 und 30 %

Nano-Akteure

Das Anwendungsfeld Umwelttechnik umfasst ca. 130 Nanotechnologieakteure. Der Anteil thematischer Netzwerke ist im Vergleich zu anderen Anwendungsfeldern gering. Die überwiegende Zahl der Nanoinstitutionen befasst sich mit der Entfernung und Umwandlung von Schadstoffen, der Wasseraufbereitung und der Umweltmesstechnik.

Nano-Akteure im Bereich Umwelttechnik

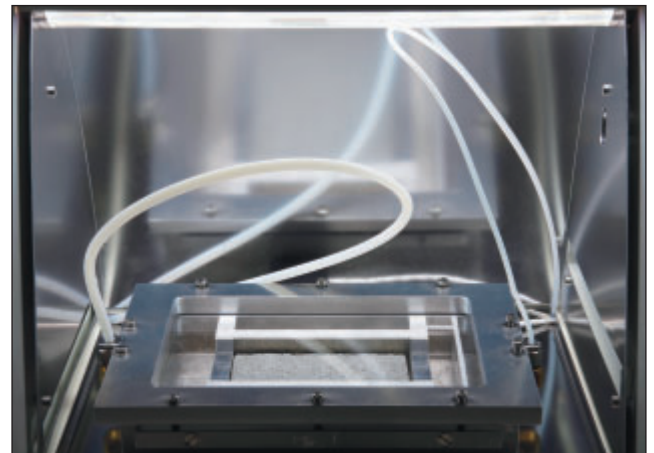


Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Umwelttechnik und Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Im Bereich der Umwelttechnik gilt die Nanotechnologie als ein Hoffnungsträger im Hinblick auf die Entwicklung ressourcenschonender und nachhaltiger Technologien. Gemäß dem Schlagwort „green nanotechnology“ soll die Nanotechnologie zukünftig dazu beitragen, dass durch ein intelligentes Materialdesign auf der Nanoskala die Funktion seltener oder umweltbelastender Stoffe ersetzt und durch der Biologie nachempfundene energie- und ressourceneffiziente Verfahren wie Selbstorganisation und Selbstreparatur die industrielle Produktion wesentlich nachhaltiger gestaltet werden kann. Kurz- bis mittelfristig wird der Einfluss der Nanotechnologie sich allerdings eher auf die Verbesserung klassischer Umwelttechnologien wie Aufbereitungs- und Sanierungstechniken und Umweltmesstechnik sowie auch im produktionsintegrierten Umweltschutz auswirken. Bereits auf dem Markt sind nanooptimierte Filter und Katalysatoren zur Reinigung von Luft und Wasser oder der Einsatz von Eisennanopartikeln zum Abbau von Chlorwasserstoffen zur Altlastensanierung. Insbesondere die Membrantechnologie wird durch die Einarbeitung polymerer Nanofasern oder Kohlenstoffnanoröhren, nanoporöser keramischer Substrate sowie funktioneller Nano-beschichtungen in Zukunft deutlich selektiver und leistungsfähiger, etwa im Bereich der Wasseraufbereitung und Meerwas-

serentsalzung, der CO₂-Abtrennung in Kraftwerken oder der industriellen Stofftrennung. Großflächige photokatalytische Beschichtungen von Gebäude- und Infrastrukturoberflächen können künftig einen Beitrag zum Abbau von Luftschadstoffen leisten. Lösungen für den Ersatz umweltbelastender Stoffe, etwa im Korrosions- und Brandschutz auf Basis von Nanomaterialien und -beschichtungen sind bereits auf dem Markt etabliert.



Messkammer zur Überprüfung des Luftreinigungseffektes photokatalytisch beschichteter Pflastersteine (Quelle: Fraunhofer IME)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

NanoNature: Nanotechnologien für den Umweltschutz – Nutzen und Auswirkungen

Ziel der Fördermaßnahme NanoNature ist es, potenzielle Marktsegmente für Nanomaterialien im Umweltbereich zu erschließen und damit die Weltmarktstellung Deutschlands im Export von Umwelttechnologien zu stärken, z. B. in den Bereichen Gewässer- und Luftreinigung, Bodensanierung, Trinkwasseraufbereitung, Wertstoffrückgewinnung oder Aufbereitungstechnologien für Prozessmedien.

Weiterhin sollen systematisch der Eintrag, die Verteilung, der Verbleib und die Wirkung von synthetischen Nanopartikeln und Nanomaterialien in der Umwelt erforscht und angepasste Messmethoden entwickelt werden. Dazu soll der gesamte Lebenszyklus der Nanopartikel bzw. -materialien in Bezug auf eine mögliche Ökotoxizität betrachtet werden [88, 89].

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

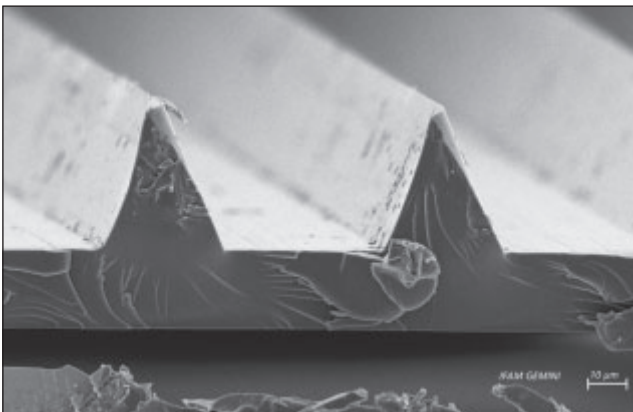
Herausforderungen im Bereich der Umwelttechnik liegen vor allem in einem sicheren Umgang mit Nanomaterialien und der Vermeidung möglicher ökotoxikologischer Langzeiteffekte. Durch den Eintrag industrieller Nanomaterialien in die Umwelt sind negative Auswirkungen durch eine Verbreitung, Anreicherung und Aufnahme in Umweltkompartimenten und in die Nahrungskette denkbar.

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Umwelttechnik

Schadstoffentfernung/ Filtration flüssiger Medien	Nanoporöse keramische Filtrationselemente zur Aufbereitung von Industrieabwässern (Vorteil: hohe chemische und thermische Stabilität). Lösemittelstabile Polymermembranen für die organophile Nanofiltration, z. B. zum Recycling homogener Katalysatoren oder der Reinigung organischer Lösemittel. Nanostrukturierte Superadsorber auf Basis polymerer Vliese und Fasern zur Absorption von Flüssigkeiten (Hygiene-, Medizintechnikbereich). Eisenoxidananopartikel zur Absorption und magnetischen Abtrennung von Schwermetallen zur Trinkwasseraufbereitung in belasteten Regionen.
	Mixed-Matrix-Membranen durch Kombination von CNT mit Polymerfasern oder anorganisch/organische Hybridsysteme zur Trinkwasseraufbereitung (Vorteil: verbesserter Durchsatz). Nanoskalige Bioverbundwerkstoffe zum Abbau organischer Schadstoffe, z. B. durch immobilisierte Mikroorganismen in porösen Keramikstrukturen. Nanostrukturierte Polymermembranen (z. B. durch molekulares Prägen oder verankerte Polymerbürsten) zur selektiven Abtrennung toxischer Chemikalien oder pathogener Keime. Keramische Nanofiltrationsmembranen zur Aufreinigung von Lösemitteln (Vorteil: Energieeinsparungen durch Ersatz destillativer Aufreinigung) und Industrieabwässern.
Schadstoffentfernung/ Filtration gasförmiger Medien	Photokatalysatoren auf Basis nanopartikulärer Titandioxidbeschichtungen zum Abbau organischer Schadstoffe für den Einsatz in Glasfaserfiltern, z. B. für Reinraumtechnologie, Pharmaproduktion, OP-Räume. Nanoporöse Gastrennmembranen z. B. Mixed-Matrixmembranen auf Basis organisch-anorganischer Hybridpolymere, Zeolithe.
	Dreidimensional nanostrukturierte Filtermedien zur effizienten Abscheidung feinsten Tröpfchen aus Gasen, z. B. Kühlschmierstoffpartikel aus der spanenden Industrie. Kohlenstoffnanoröhren zur Funktionalisierung hocheffizienter Polymermembranen zum Einsatz in der CO₂-Abtrennung von Rauchgasen. Photokatalytische CO₂-Reduktion mit Farbstoff-sensibilisierten Halbleitern (u. a. Titandioxid) zur rohstofflichen Nutzung von CO₂ aus Kraftwerks-Abgasströmen.
Bodenverbesserung	Eisennanopartikel zur in-situ Grundwassersanierung und Abbau chlorierter Kohlenwasserstoffe. Nanoporöse Bodensubstrate zur Wasserspeicherung.
	Carbo-iron-Methode (Komposit aus Aktivkohle und nanoskaligem Eisen) zur In-situ Sanierung organisch belasteter Grundwässer.
Ersatz/ Verminderung toxischer Stoffe	Nanopartikuläre Zusätze für Antifoulinganstriche (z. B. Zinkoxid, Siliziumdioxid) als Ersatz toxischer TBT-Anstriche im Schiffsbau. Ersatz toxischer Stoffe durch Nanomaterialien in unterschiedlichen Industrieanwendungen (Chrom-Ersatz im Korrosionsschutz, Ersatz halogenhaltiger Brandschutzmittel).
	Antifoulinganstriche auf Basis nanopartikulärer Lackzusätze mit kontrollierter Abgabe von Bioziden. Nanoverkapselte Wirkstoffe, z. B. in Kapseln aus elektrogesponnenen Nanofasern zum effizienten und kontrolliertem Einsatz von Pestiziden (Vorteil: verminderter Einsatz umweltbelastender Stoffe).

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende:  = Anwendung im Markt,  = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Im Sinne eines verantwortlichen Umgangs mit Nanomaterialien sind Emissionen von Nanoobjekten über den gesamten Lebenszyklus von Nanomaterial-basierten Produkten von der Herstellung, Weiterverarbeitung, Produktnutzung und Entsorgung/Wiederverwertung zu minimieren. Offene Fragestellungen im Hinblick auf die messtechnische Erfassung und ökotoxikologische Auswirkungen von Nanomaterialien werden im Förderschwerpunkt NanoNature des BMBF adressiert (s. oben). Weitere Herausforderungen liegen im Nachweis von realen Umweltentlastungspotenzialen der Nanotechnologie, gemessen an quantitativen Bilanzierungen über den gesamten Lebenszyklus. Aufgrund der unzureichenden Datenbasis existieren derzeit nur wenige Produktbeispiele, für die konkrete Aussagen zu Umweltentlastungseffekten getroffen werden können [90]. Im Rahmen des Nanodialoges der Bundesregierung wurde ein Kriterienraster entwickelt, das als Hilfestellung zur systematischen Beurteilung von Chancen- und Risikoaspekten Nanomaterial-basierter Produkte dienen soll [91].



Das der strömungsgünstigen Haifischhaut nachempfundene Lacksystem mit mikrostrukturierter Oberfläche kann den Wandreibungswiderstand bei Schiffen und Flugzeugen um bis zu 8 % absenken. Es besteht aus einem UV-härtbaren, mit Nanopartikeln verstärkten Lack, der mit einem Rollenapplikator aufgetragen und strukturiert wird (Quelle: Fraunhofer IFAM)

4.8 Maschinenbau

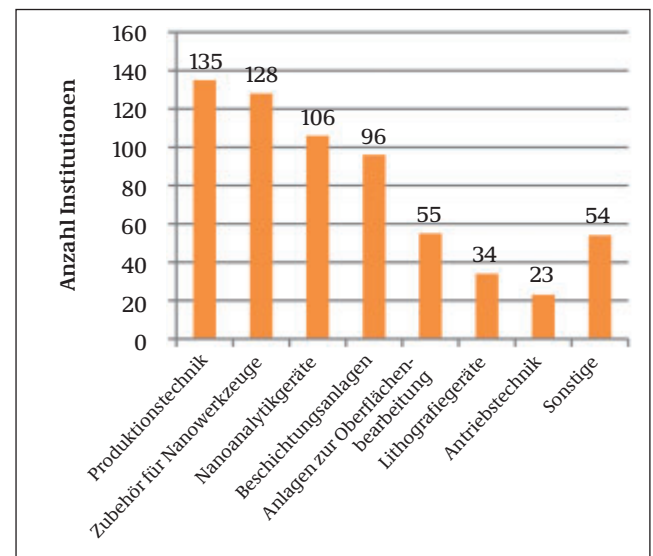
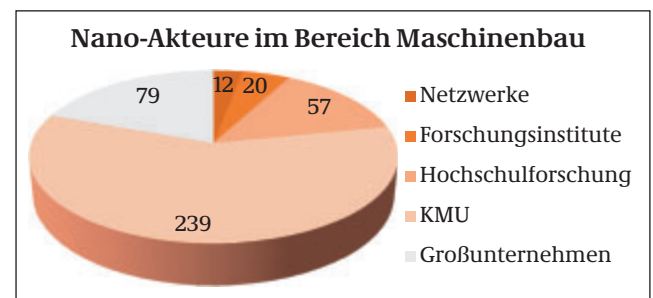
Branchensteckbrief [92, 93, 94]

Industrieverband: VDMA
Anzahl Unternehmen: 6.100 (2008) davon rund 90 % KMU
Beschäftigte in Deutschland: 912.000
Umsatz: 174 Mrd. Euro (2010)
F&E-Quote: 5 % vom Umsatz forschender Unternehmen
Weltmarktstellung: 1. Deutschland, 2. USA, 3. Japan, 4. Italien, 5. China (bezogen auf den Export)

Nano-Akteure

Das Anwendungsfeld Maschinen- und Gerätebau ist mit ca. 530 Nanotechnologieakteuren nach der Chemie das zweit-

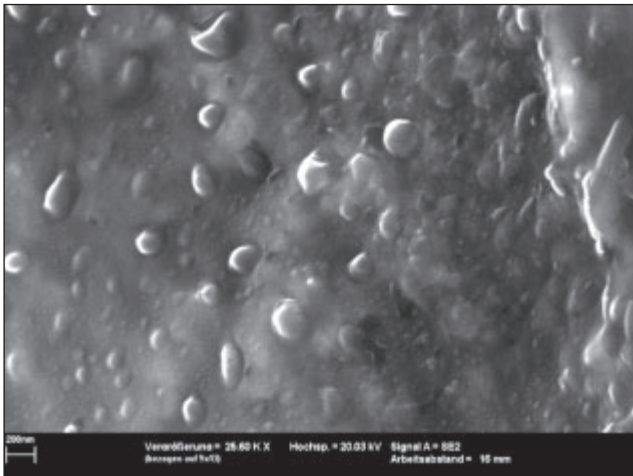
größte Anwendungsfeld der Nanotechnologie. Bei mehr als drei Vierteln der Akteure handelt es sich um Unternehmen. Dies dokumentiert den hohen Kommerzialisierungsgrad im Maschinenbau, dem u. a. Hersteller von Nanobeschichtungs- und Nanostrukturierungsanlagen sowie von nanoanalytischen Geräten zugeordnet sind. Die Produktionstechnik repräsentiert das zahlenmäßig größte Teilgebiet im Maschinenbau. Weitere wichtige Teilfelder sind die Herstellung von Zubehör für Nanostrukturierungs- und Nanoanalytikgeräte sowie Beschichtungsanlagen.



Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Maschinen-/Gerätebau und Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Im Maschinenbau steht beim Einsatz der Nanotechnologie die Verbesserung mechanischer Eigenschaften bei der Konstruktion von Maschinen- und Anlagenkomponenten im Vordergrund. Nanostrukturierte Beschichtungen aus Kohlenstoff, Hartmetall- und Keramikkompositen ermöglichen bis zu 100fach längere Standzeiten im Vergleich zu unbeschichteten Werkzeugen und Maschinen. Gleichzeitig lassen sich weitere Funktionen wie Schutz vor Korrosion und Verschmutzung, Abrieb- und Kratzfestigkeit oder verbesserte tribologische Eigenschaften realisieren.



In Werkstoffoberflächen eingearbeitete Nanokapseln können bei mechanischer Beschädigung aktive Substanzen freisetzen wie z. B. Korrosionsschutzmittel in galvanischen Schichten oder Schmiermittel für mechanische Lager (Quelle: Fraunhofer IPA)

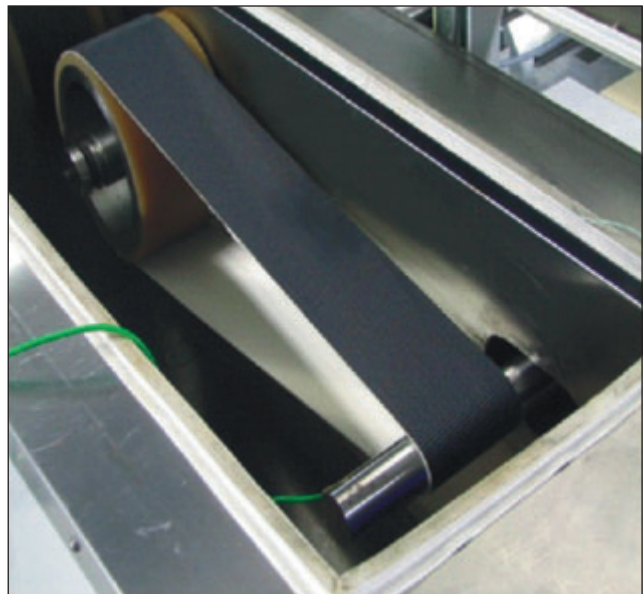
Konventionelle Werkzeugmaschinen stoßen bei immer höheren Anforderungen hinsichtlich Produktivität und Standzeiten sowie der Bearbeitung neuer Materialklassen wie Faser oder Partikel verstärkter Komposite an Grenzen. Die Nanotechnologie bietet dabei neue Lösungsansätze, um mehrere und nach klassischen Konzepten oftmals gegenläufige Materialeigenschaften zu kombinieren, z. B. eine hohe Elastizität bei zugleich hoher Härte und Bruchfestigkeit. Das Applikationsspektrum der Nanotechnologie im Maschinenbau reicht allerdings noch wesentlich weiter und umfasst beispielsweise eine optimierte Mechatronik durch hochsensible und ultrapräzise Sensoren und Stellglieder, einen verbesserten Produktschutz durch nanobasierte Sicherheitsmerkmale oder leistungsfähigere Maschinen durch hochfeste Leichtbauwerkstoffe. So führt etwa der Zusatz von Kohlenstoffnanoröhren (CNT) in Aluminium zu deutlich verbesserten Festigkeitswerten.

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Nano geht in die Produktion

Die kommerzielle Nutzung von Nanomaterialien scheiterte in der Vergangenheit oftmals an der fehlenden Produktionstechnik zur großtechnischen Herstellung und der Weiterverarbeitung unter Beibehaltung der gewünschten nanospezifischen Eigenschaften sowie einer gleichzeitig sicheren Handhabung von Nanomaterialien. Das BMBF hat 2006 die Fördermaßnahme „Nano geht in die Produktion“ initiiert, um die Integration der Nanotechnologien in die Produktion voranzutreiben und damit einen neuen Schub für „Hightech-Produktionsverfahren“ auszulösen, die Wettbewerbsvorsprünge und damit hochqualifizierte Arbeitsplätze in Deutschland sichern. Dafür

werden entlang der gesamten Wertschöpfungskette effiziente industrielle Verfahren und Ausrüstungen entwickelt, mit denen die Eigenschaften von nanoskaligen Partikeln, Fasern oder Schichten und ihre Wechselwirkungen untereinander sowie mit anderen Materialien kontrolliert und eingestellt werden können. Im Fokus stehen die umweltschonende, staubfreie Herstellung nanoskaliger Partikel, die Verarbeitung in Matrixwerkstoffen, die Beschichtung von Oberflächen sowie eine zuverlässige Online-Analytik [95].



Prüfstand zur Ermittlung des Drehmoment- und Temperaturverlaufes eines nanooptimierten Fördergurt-Testmusters im Betrieb (Bild: Forbo Siegling GmbH)

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Besondere Herausforderungen liegen in der Etablierung von Energie- und Ressourcenschonenden Prozessen in der Produktionstechnik. Die verarbeitende Industrie ist für ca. 40 % des Energieverbrauches in Deutschland verantwortlich und bietet durch Prozessoptimierungen und verbesserte Werkstoffe für Leichtbau und Verschleißminderung erhebliche Einsparpotenziale. Die Rahmenbedingungen für den Einsatz der Nanotechnologie stehen damit günstig, da sie oftmals der einzige Weg für multifunktionale Werkstoffoptimierungen darstellt. Auf der anderen Seite ergeben sich Herausforderungen mit dem sicheren Umgang von Nanomaterialien in der Prozesstechnik, der Entwicklung einer skalierbaren und wirtschaftlichen Prozesstechnik für die Verarbeitung von Nanomaterialien, sowie der Etablierung standardisierter Verfahren und Komponenten, um für eine reibungslosere Integration in bestehende Wertschöpfungsketten zu sorgen.

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Maschinenbau

Tribologie/ Verschleißschutz	Silikatische Schmierölzusätze zur Ausbildung von in-situ Verschleißschutzschichten. Verschleißschutzschichten für Werkzeuge zur Trocken-, Hart- und Hochgeschwindigkeitsbearbeitung auf Basis nanostrukturierter dotierter Titanaluminiumnitrid-Schichten mittels Magnetronspütern. Nanostrukturierte Beschichtungen auf der Basis von amorphem Kohlenstoff zur Reibungsreduktion und Trockenschmierung. Nanokristalline plasmageschärfte Diamantbeschichtungen für ultraharte Schneidklingen mit verbesserter Haltbarkeit z. B. zur Bearbeitung faserverstärkter Kunststoffe. Siliziumdioxidnanopartikel als Füllstoff für Kunststoffkomposite zur Reibungsminderung bei Antriebsgurten und Förderbändern. Nanokomposit-Elastomere auf Basis agglomeratfreier geträgerter Nano-Füllstoffe für hochbelastete Maschinenbauteile (Vorteile: u. a. verbesserte Hitzealterung und mechanische Eigenschaften). Superharte Werkstoffe durch Kombination nanostrukturierter Hartmetalle und nanokristalliner Hartschichten für Werkzeuge in der Trocken-, Hart- und Gussbearbeitung. Optimierte Gleitlager auf Kunststoffbasis in direktem Kontakt mit Wasser auf Basis von Nanopartikeln (z. B. Schichtsilikate, Dispersionen, Polymere). Gezielte chemische und topographische Optimierung von technischen Oberflächen (z. B. Wälzlager, Folien, Flugzeugflügel) mittels Plasmaprozessen im Hinblick auf Benetzungs- und Tribologieeigenschaften. Nanopartikelverstärkte Gleitlackssysteme für Verschleißschutzanwendungen in tribologisch hochbelasteten Reibkontakten.
Chemische Oberflächenfunktionalisierung	Oberflächenveredelte Industriewalzen und Werkzeuge mit Antihafteigenschaften und verbesserter Verschleißbeständigkeit durch nanopartikelbasierte Beschichtungsverfahren (z. B. Laserauftragschweißen, thermisches Spritzen, Plasmaprozesse). Nanostrukturierte permanente Trennschichten durch Plasmapolymerisation oder hybriden Nanokompositenschichten für Formgebungswerkzeuge in der Kunststoffverarbeitung (Vorteil: Einsparung von Löse- und nasschemischen Trennmitteln). Verschleißbeständige Leichtreinigungsschichten auf Bauteilen im Bogen-Offset-Druckprozess bei gleichzeitiger Verbesserung der Druckfarben-Abweisung durch Nanopartikel dotierte Sol-Gel-Schichten. Nanotechnologische Titandioxid- und Chitosanschichten mit antimikrobiellen Eigenschaften für Oberflächen in hygienekritischer Produktion (z. B. Lebensmittel, Pharmaindustrie, Biotechnologie, Lebenswissenschaften, Kosmetik). Plasmagestützte Nanobeschichtungen für Drucksiebe und daran angepasste Pastensysteme zum Feinstliniendruck keramischer Schaltungsträger (Vorteil: höhere Integrationsdichte). Photokatalytische Antifoulingbeschichtungen für Mikrosiebe im Bereich Filtration und Mikrofluidik auf Basis von Sol-Gel-Verfahren.
Füge-/Umformtechnik	Reaktive Folie aus metallischen Nanoschichtstapeln zum Metallbilden/Kaltschweißen von Elektronik-/Mikrosystemtechnikkomponenten (Vorteil: lokal begrenzte und kontrollierte Wärmeentwicklung). Aufbau- und Verbindungstechnik von mikroelektronischen Komponenten auf Basis nanofunktionalisierter, druckfähiger Materialien (Ziel: Verringerung von Kosten und Strukturgrößen). Schaltbare und reversible Klebverbindungen auf Basis magnetischer Nanopartikel oder biomimetischer Haftverbindungen (Geckoeffekt, Muschelkleber etc.).
Dichtung/ Dämpfung/ Aktorik	Ferrofluid-Dichtungen und Dämpfer z. B. für leckarme Wellenabdichtungen in den Bereichen Hochvakuum, Gase und Flüssigkeiten. (Weiterentwicklung der Magnetofluiden in Richtung Sättigungsmagnetisierung, Langzeitstabilität und niedrigerer Viskosität). Folien- und faserförmige Aktoren und Sensoren auf Basis elektroaktiver Polymer-Komposite (z. B. Nafion, CNT, ionische Flüssigkeiten, Silicon-Komposite) für Anwendungen im Bereich Fluidik/Stellglieder sowie flächige Sensoren (Textil-/Bauwesen). Sensorik und adaptive Dämpfung von Schwingungen auf Basis maßgeschneiderter Elastomere mit eingebetteten magnetischen Nanopartikeln.

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: □ = Anwendung im Markt, ■ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

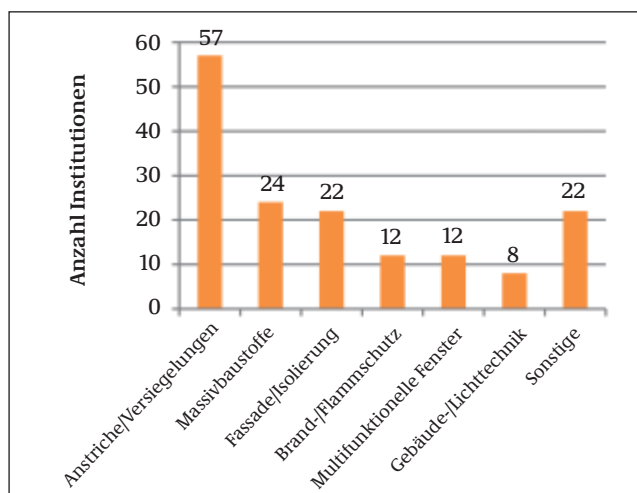
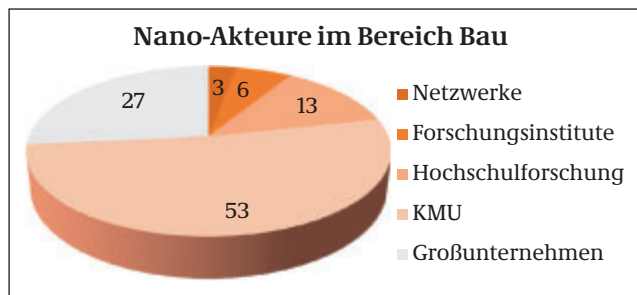
4.9 Bau

Branchensteckbrief [96, 97]

Industrieverbände:
Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.
www.bauindustrie.de
Anzahl Unternehmen: ca. 230.000
Beschäftigte in Deutschland: 716.000 (Bauhauptgewerbe)
Umsatz:
ca. 85 Mrd. Euro (2009)
F&E-Quote: k.A.
Weltmarktstellung: k.A.

Nano-Akteure

Rund 100 Nanotechnologieakteure sind im Anwendungsfeld Bautechnik tätig. Der hohe Anteil an Unternehmen (über 75 %) deutet auf einen hohen Kommerzialisierungsgrad und eine schwach ausgeprägte Forschungsszene in diesem Anwendungsfeld hin. Der überwiegende Anteil der Nanotechnologieaktivitäten fokussiert auf den Bereich Anstriche/Versiegelungen. Weitere wichtige Anwendungsbereiche stellen die Optimierung von Massivbaustoffen sowie Fassade und Isolierung dar.



Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Bau sowie Zuordnung zu den technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Hauptanwendungsgebiete der Nanotechnologie im Bausektor sind optimierte Baustoffe und funktionale Beschichtungen von Fassadenoberflächen. Darüber hinaus wird der Bausektor von nanobasierten Innovationen in der Energie- und Gebäudetechnik profitieren, wie z. B. effizientere Solar- und Brennstoffzellen oder OLED für flächige Beleuchtungselemente und „leuchtende Tapeten“. Eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten adressiert die Optimierung von Beton als wichtigsten Baustoff. Durch nanoskalige Zuschlagstoffe wie Silica, Kohlenstoffnanoröhren oder Polymere in Zementmischungen lassen sich nicht nur die Festigkeit sogenannter UHPC-Betone (Ultra High Performance Concrete) deutlich verbessern, sondern auch andere Eigenschaften wie das Fließ- und Abbindeverhalten (selbstverdichtender Beton, Spritz- und Transportbeton), die Korrosions- und Säurebeständigkeit oder die elektromagnetische Abschirmung optimieren. Die intelligente Steuerung von Licht- und Wärmeflüssen und die Senkung des Energieverbrauches ist ein weiteres Einsatzgebiet der Nanotechnologie. Multifunktionelle Fenster auf Basis selbstgesteuert bzw. schaltbar farbwechselnder Beschichtungen oder integrierter Mikrospiegeloptiken können Licht- und Wärmeverhältnisse im Gebäude flexibel an die äußeren Bedingungen anpassen. Nanoporöse Dämmstoffe wie Vakuumisulationspaneele, Aerogele oder Polymerschäume sowie mikroverkapselte Phasenwechselspeicher können für eine effiziente und raumsparende Isolierung bzw. einen verringerten Energiebedarf für Klimatisierung und Heizung beitragen. Im Infrastrukturbau kann die Nanotechnologie dazu beitragen, den Instandhaltungsaufwand zu verringern, etwa durch selbstreinigende Beschichtungen oder belastbarere Fahrbahnaufbauten und Asphaltmischungen. Die Funktionalisierung von Straßenbelägen, z. B. zur Verringerung von Fahrbahngeräuschen oder des Vermeidens der Wasseraufnahme zur Verringerung von Frostschäden sowie nachhaltige Konzepte zur Fahrbahnsanierung können langfristig spürbare volkswirtschaftliche Entlastungen mit sich bringen. Nanooptimierte Produkte bieten aber auch Innovationen für den Innenbereich, wie keramische Folien als Fliesenersatz oder Farbeffekte und die Vermeidung von Fingerabdrücken bei Edelstahlarmaturen.



Transparente Leichtbaudachkonstruktionen auf Polycarbonatbasis (Quelle: Bayer MaterialScience AG)

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Bautechnik

Thermische Isolierung, Wärmeregulation	Nanoporöse Aerogelgranulate für Temperatur- und Wärme-isolierende Fassadenkomponenten (Vorteil: durchsichtige Fassadenelemente zur Tageslichtnutzung). Transparenter Wärmeschutz für Plexiglass Fassaden auf Basis nanoskaliger IR-Absorber z. B. für Wintergärten etc. Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien für Innenputze und Farben zur reversiblen Wärmespeicherung und -abgabe. (Vorteil: Vermeidung von Temperaturspitzen in Gebäuden). Vakuumisulationspaneele auf Basis von evakuierten nanoporösen Siliziumdioxidkernen (Vorteil: hohe Dämmwirkung bei geringer Dicke).
	IR-reflektierende Farben und Putze (low-e Farben) mit beliebigem optischen Farbeindruck auf Basis metallischer oder halbleitender Partikel mit nanoskaligen Interferenzbeschichtungen. Nanoporöse Kunststoffschäume, z. B. durch Vernetzung Tensid stabilisierter Mikroemulsionen (Vorteil: Hohe Isolationswirkung bei geringer Dicke, Potenzial für kostengünstige Herstellung).
Baustoffe	Nanooptimierter Beton, z. B. durch erhöhte Festigkeit und Korrosionsschutz durch nanoskalige Bindemittelzusätze (UHPC etc.). Polymere Zuschlagformulierungen zur Bodenverfestigung von Straßenuntergründen. Nanooptimierter Fliesenkleber durch polymere Fließmittelzusätze, die durch Ausbildung von Nanostrukturen eine erhöhte Haftfestigkeit und verbessertes Abbindeverhalten zeigen. Brandgeschützte Baustoffe für Glas und Naturbaustoffe durch Nanobeschichtungen, Nanofüllstoffe und Brandschutzgele mit Intumeszenzwirkung.
	CNT in Bindemitteln für ultra-hochfesten Beton (UHPC) und Trockenmörtelsystemen (verbesserte Biegezug- und Druckfestigkeiten, Duktilität z. B. für dünnwandige Bauteile mit hoher chemischer und mechanischer Beanspruchung, wie Kühltürme). „Kalt härtende“ Keramik und optimierter Ultrahochleistungsbeton durch nanooptimierte mineralische Bindemittelrezepturen und Hochenergiemahlen von Hüttensand für säureresistente, porenfreie Betone, (Vorteile: Ersatz von Zement, korrosionsbeständig, hohe Tragfähigkeit). Photokatalysatoren auf Basis nanopartikulärer Titandioxidbeschichtungen zum Abbau organischer Schadstoffe (Vorteil: Transparenz, Effizienz, Verbesserung der Wirksamkeit auch im sichtbarem Spektralbereich durch Dotierung, Anwendungsentwicklung für Wandfarben, Beton, Straßenbeläge etc.). Ultrahochleistungsbeton für Anwendungen im Straßenbau für beständigere Fahrbahnaufbauten.
Multifunktions-gläser	Antireflexgläser auf Basis nanoporöser Siliziumdioxidbeschichtungen zur Anpassung des Brechungsgrades, kostengünstige Herstellung mittels Sol-Gel-Tauchbeschichtung. Schaltbare und selbstabtönende Gläser auf Basis von Photo-/Elektrochromie durch nanoskalige Beschichtungen.
	Selbsttönende Verglasungen auf der Basis von Metallo-Polyelektrolyten. Färbung durch Oxidationsstufenwechsel der Metallionen (Vorteil: geringe Schaltungsspannung, einfacher Schichtaufbau durch Tauchbeschichtung). Scheibenintegrierte Mikrospiegeloptiken zur intelligenten Steuerung von Licht- und Wärmeflüssen.
Oberflächenfunktionalisierung	Schmutzabweisende bzw. selbstreinigende Fassadenoberflächen auf Basis superhydrophober und photokatalytischer Beschichtungen. Witterungsstabile Dachziegelversiegelungen und spezielle Farbeffekte durch Nanopartikelbeschichtungen. Schmutzabweisende, antibakterielle und selbstreinigende (photokatalytische) Wandfarben für den Innen- und Außenbereich. Kratzfest- und UV-Schutzbeschichtungen z. B. für Parkettboden auf Basis anorganischer Nanopartikel.
	Großflächige, transparente und witterungsbeständige Beschichtungen mit integriertem UV-Schutz auf Polycarbonat für Dachkonstruktionen etc. Oberflächenfunktionalisierung von Straßenbelägen, u. a. Griffigkeit, Entwässerung, Wasserverdrängung und Verminderung von Reifen-Fahrbahngeräuschen.
Gebäudetechnik	Zeolith-Gas-Wärmepumpe mit nanostrukturiertem Zeolithfüllstoff im Wärmetauscher in Kombination mit Gas-Brennwertheizung zur Verbesserung des Wirkungsgrades. Nanooptimierte SOFC-Brennstoffzellenkraftwerke zur Strom- und Wärmeerzeugung.
	OLED-Lichtkacheln/ Beleuchtung für flächige und Freiform-Beleuchtungskörper, Sicherheitshinweise etc.) Nanooptimierte Solarzellen und Solarthermielelemente zur Hausenergieversorgung (s. Anwendungsfeld Energie).

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende:  = Anwendung im Markt,  = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTexture: Erschließung höherer Ressourcen-/ Energieeinspar- und Leistungspotenziale sowie neuer Funktionalitäten

Die Fördermaßnahme ist auf die Bereiche Gebäudeoberfläche/ Gebäudegestaltung sowie Gebäudekonstruktion/Bau fokussiert. Im Vordergrund stehen dabei zum einen Themen wie z. B. die Reduzierung des Energiebedarfs, die Verbesserung des Wohnkomforts sowie die Haltbarkeit und Lebensdauer von Gebäudeelementen wie Fassaden, Dächern, Fenstern oder Türen. Zum anderen sollen Verbesserungen zementgebundener Werkstoffe des Bausektors hinsichtlich ihrer Belastbarkeit, Langlebigkeit und Energieeffizienz adressiert werden [98].

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Politische Rahmenbedingungen im Klima- und Umweltschutz werden in den kommenden Jahren den Einsatz nanooptimierter Komponenten in der Bautechnik begünstigen. Nanooptimierte Dämmstoffe, multifunktionale Glasfassaden und effizientere Gebäudetechnikkomponenten können Lösungsbeiträge für die energetische Sanierung des Gebäudebestandes in Deutschland liefern. Allerdings steht der Einsatz von Nanotechnologien im Bausektor auch einigen Herausforderungen gegenüber wie z. B. der sehr langen Nutzungsdauer von Gebäuden und den hohen Anforderungen für Haltbarkeitsgarantien und Qualitätszertifikate, die für neue nanotechnologische Produkte oftmals noch nicht nachgewiesen werden können. Weiterhin werden angesichts des hohen Kostendruckes im Bauwesen Preisaufschläge und lange Entwicklungszeiten für innovative Technologien auf der Kundenseite kaum akzeptiert. Zudem stehen nanotechnologische Produkte in einem harten Preis-Leistungs-Wettbewerb gegenüber Konkurrenzlösungen. Neue Materialien und Technologien im Bauwesen erfordern darüber hinaus in der Regel eine Zulassung im Rahmen der Richtlinien der Bauproduktengesetzgebung, die in jedem Bundesland spezifisch geregelt ist [99]. Auch Fragen der gesundheitlichen Unbedenklichkeit des Einsatzes von Nanomaterialien im Bausektor, etwa in Lacken und Wandfarben, werden diskutiert. Studien im Auftrag des deutschen Lackverbandes haben allerdings gezeigt, dass die Verwendung von Nanopartikeln für kratzfeste Lacke nicht zu einem Eintrag von Nanomaterialien in die Umwelt führt, da die Nanopartikel fest in die Lackmatrix eingebunden sind und auch beim Abschleifen nicht als einzelne Nanopartikel freigesetzt werden [100].

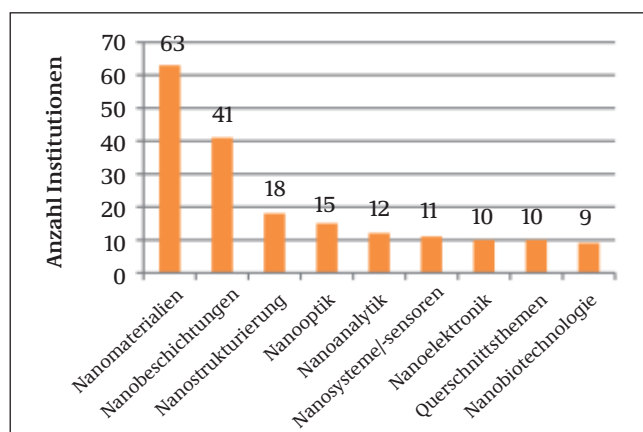
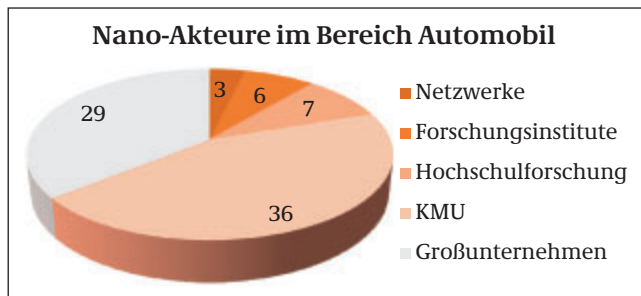
4.10 Automobil

Branchensteckbrief [101, 102, 103]

Industrieverbände:
Verband der Automobilindustrie (VDA), www.vda.de
Anzahl Unternehmen:
Ca. 20 Hersteller, über 1.300 Zulieferer
Beschäftigte in Deutschland: 709.000
Umsatz:
317 Mrd. Euro (2010) Gesamt Automobilindustrie
F&E-Quote: 6,3 %
Weltmarktstellung:
Automobilproduktion: 1. Japan, 2. China, 3. USA, 4. Deutschland.
Der Anteil der deutschen Konzernmarken an der Weltautomobilproduktion: 16,3 %

Nano-Akteure

Ca. 80 Institutionen befassen sich mit Nanotechnologieanwendungen im Automobil. Relativ wenige öffentliche Forschungseinrichtungen adressieren in der Nanotechnologieforschung gezielt automobile Anwendungen. Nanomaterialien und Nanobeschichtungen sind mit Abstand die wichtigsten Teilgebiete der Nanotechnologie im Automobilbau.



Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Automobilbau und Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Als Querschnittstechnologie bietet die Nanotechnologie Innovationspotenziale in fast allen Baugruppen und Komponenten im Automobil, wie beispielsweise der Funktionalisierung der Außenhaut, Leichtbaukomponenten im Karosserie- und Motorbereich, Korrosions- und Verschleißschutz, multifunktionale Innenausstattung oder neuartige Elektronik- und Sensorikkomponenten. Nanotechnologie leistet bereits heute wichtige Beiträge für erhöhte Sicherheit, Nachhaltigkeit und Gebrauchsnutzen in Automobilen. Beispiele sind entspiegelte Cockpitanzeigen, Antibeschlagschichten für Außenspiegel und Scheinwerfer, nanostrukturierte Füllstoffe für eine erhöhte Kratzfestigkeit und spezielle Farb- und Glanzeffekte in Automobillacken oder rollwiderstandsoptimierte Reifen, Edelmetallnanopartikel für wirksamere Abgaskatalysatoren oder Nanobeschichtungen als Verschleißschutz in Hochdruck-Dieseinspritzpumpen und Zylinderlaufbahnen für eine effizientere Kraftstoffnutzung. Im Leichtbau werden Leichtmetall-Nanokomposite und faserverstärkte Polymere deutliche Gewichtseinsparungen im Motor- und Karosseriebau ermöglichen.



Prototypentwicklung eines Motorblocks mit nanobeschichteten Zylinderbuchsen (Quelle: Institut für Fertigungstechnik keramischer Bauteile, Universität Stuttgart)

In Zukunft wird die Nanotechnologie wichtige Beiträge liefern, um technologische Hürden bei der Etablierung der Elektromobilität zu überwinden, z. B. bei der Entwicklung leistungsfähigerer Batterien und Superkondensatoren. Nanomaterialien in Elektroden und Separatoren sind der Schlüssel, um Energiedichte von Lithiumionenbatterien zu vergrößern, Ladezeiten zu verringern sowie Zuverlässigkeit, Sicherheit und Lebensdauer zu erhöhen. Auch der Brennstoffzellentechnologie im Automobil könnte die Nanotechnologie durch Materialien für eine effektive Wasserstoffspeicherung den Weg ebnen.



Nanooptimierte Materialien können wichtige Beiträge für die Elektromobilität liefern (Quelle: VDI TZ, Ulrich Zillmann)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Elektromobilität

Die schrittweise Elektrifizierung der Straßenfahrzeuge – von Hybridkonzepten bis zum komplett elektrisch betriebenen Auto – eröffnet die Option auf eine zukunftsfähige Mobilität. Sie bietet die Chance, die Abhängigkeit vom Erdöl zu reduzieren und die Emissionen des Straßenverkehrs zu minimieren. Das BMBF unterstützt Forschung und Entwicklung neuartiger, innovativer Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung aller hierfür erforderlichen Subsysteme wie Batterieentwicklung und -integration, Energiemanagement sowie die entsprechenden Beiträge der Werkstoff- und Nanotechnologieforschung. Im Zeitraum von 2011 bis 2014 werden Projekte mit einem Gesamtvolumen von etwa 90 Mio. Euro gefördert [104].

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Automobil

Antriebsstrang, Fahrwerk	Metall-Matrix-Werkstoffe für Leichtbaukomponenten in Motoren. Verbesserung der Warmfestigkeit durch sprühkompaktierte Magnesiumsilicid-Nanopartikel in der Aluminium-Legierung.
	Rollwiderstandsoptimierte Gummimischungen für Automobilreifen auf Basis nanoskaliger Strukturruße und Metalloxide.
	Nanoskalige Verschleißschutzschichten auf Basis diamantartiger Kohlenstoffe für hochbelastete Komponenten in Dieseleinspritzpumpen.
	Verschleißfeste, nanokristalline Zylinderlaufbahnninnenbeschichtungen für Aluminiummotoren durch thermisches Spritzen (hohe Härte/Verschleißbeständigkeit + niedriger Reibungskoeffizient, Verzicht auf Laufbuchsen).
	Verbundwerkstoffe aus Multiwalled-Carbon-Nanotubes (MWNT), Leichtmetallen (Mg, Al, Ti) und deren Legierungen (Vorteile: höhere mechanische Festigkeiten, verbesserte thermische, schwingungsdämpfende und tribologische Eigenschaften).
Karosserie/Außenhaut	Nanobeschichtete textilbasierte Kraftstofffilter mit verbesserten Abscheideeigenschaften zur Entfernung von Wasser aus Dieseldieselfkraftstoffen.
	Verbesserte Abgaskatalysatoren zur Stickstoffreduktion auf Basis nanoskaliger eisenhaltiger Zeolithverbindungen (toxikologisch unbedenklich, kostengünstig).
	Kratzfeste Klarlacke auf Basis von Siliziumdioxidnanopartikeln sowie Farbeffektlacke auf Basis von Interferenzpigmenten.
	Schlag-/abrasionsfeste Kunststoffverschiebungen auf Polycarbonatbasis. Verbesserung der Witterungs- und Kratzbeständigkeit durch Plasmabeschichtungen mit integriertem UV-Schutz.
	Antibesschlag-Gehäuse-/Außenspiegel auf Basis von nanoskaligen Titandioxidbeschichtungen.
Elektrik/Elektronik/Sensorik	Multifunktionale Lackbeschichtungen, z. B. Photovoltaik zur Klimatisierung, schaltbare Farbeffekte, Sensorik, Hydrophilie, Selbstheilung.
	Polymer-Nanokomposite auf Basis nanoskaliger Füllstoffe (z. B. Schichtsilikate) für Karosserieanwendungen (z. B. Stoßfänger, Leichtbauheckklappe, Dachmodule, Kotflügel, Karosserieverkleidung).
	Magnetoresistive Positions- und Winkelsensoren z. B. für ABS- und ESP-Anwendungen auf Basis des GMR-Effektes.
	Superkondensatoren für Antriebe von Hybridautos.
	Nanostrukturierte Hochtemperatur-Halbleiter, z. B. Feldeffekttransistoren (SiC, GaN) für die integrierte Abgassensorik von Dieselmotoren.
Interior	Dreidimensionale OLED-Leuchtkörper für Automobilanwendungen (z. B. Tagfahroleuchten, Fahrtrichtungsanzeiger, Heckleuchten).
	Nano-elektronische Komponenten für energieeffiziente Elektrofahrzeuge (Leistungselektronik, Batteriemanagement, etc.).
	Nanooptimierte Lithiumionen-Batterien als Antriebsquelle für die Elektromobilität.
	Nanooptimierte Brennstoffzellen als Antriebsquelle für die Elektromobilität bzw. als Hilfsaggregat.
	Optische Nanobeschichtungen für elektrochrome Rückspiegel oder entspiegelte Cockpit-Anzeigen.
Interior	Nanopartikelbasierte Veredelung und Funktionalisierung von Textiloberflächen in Kraftfahrzeugen (Verbesserung des Raumklimas, Schmutzresistenz, Hygiene, Abriebfestigkeit, Duftstoffe).

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende:  = Anwendung im Markt,  = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Verbundprojekt Nano-MMC: Ultraleichtbauwerkstoffe auf Basis von sprühkompaktierten Aluminiumlegierungen mit hohen Volumenanteilen an Magnesiumsilicid und Nanopartikelverstärkung

Das Verbundprojekt hat die Entwicklung von Aluminiumwerkstoffen mit verringerter Dichte und erhöhter Warmfestigkeit zum Ziel. Die Steigerung der Warmfestigkeit soll über Nanopartikel erfolgen, die im Herstellungsprozess mittels Sprühkompaktieren in die Legierung eingearbeitet werden. Anwendungspotenziale des Werkstoffes liegen in Komponenten von Verbrennungsmotoren wie Kolben, Kurbel- und Ventiltriebsteile.

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die Umsetzung nanotechnologischer Innovationen im Automobilbau ist aufgrund relativ langer Entwicklungszyklen

sowie hoher Sicherheits- und Gewährleistungsanforderungen oftmals ein langwieriger Prozess. Die Automobilindustrie ist dabei Anwender von nanotechnologischen Innovationen, die überwiegend aus dem Bereich der Zuliefererindustrie erfolgen, wie z. B. nanooptimierte Leichtbaukomposite, Lacke, Beschichtungen, Sensorik- und Elektronikkomponenten. Mittlerweile haben eine Reihe von Entwicklungen Einzug in die Praxis gefunden, nicht zuletzt aufgrund der im Zeitraum von 2004 bis 2009 geförderten Leitinnovation „Nano-Mobil“ des BMBF, in deren Rahmen 18 Verbundprojekte mit insgesamt 99 Partnern zum Thema Nanotechnologie im Automobilbereich mit einer Fördersumme von ca. 40 Mio. Euro gefördert wurden [105]. Der Zukunftstrend Elektromobilität stellt einen zusätzlichen Treiber für nanotechnologische Innovationen im Automobil dar.

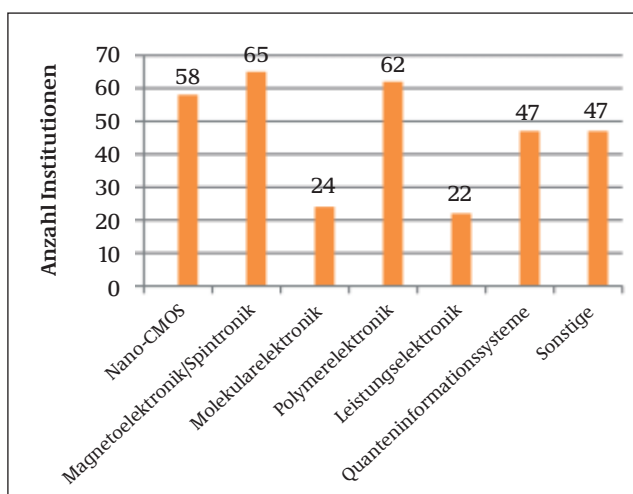
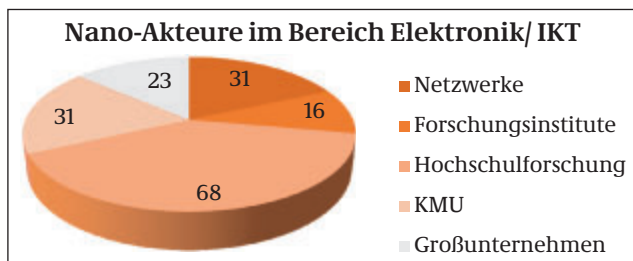
4.11 Informations- und Kommunikationstechnik

Branchensteckbrief [106]

Industrieverbände:
Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie Bitcom
Anzahl Unternehmen:
IT- und Telekommunikations-Hardware: ca. 6.000 (2010)
Beschäftigte in Deutschland:
IT- und Telekommunikations-Hardware: ca. 75.000 (2010)
Umsatz:
129 Mrd. Euro (2010)
F&E-Quote: k. A.
Weltmarktstellung: k. A.

Nano-Akteure

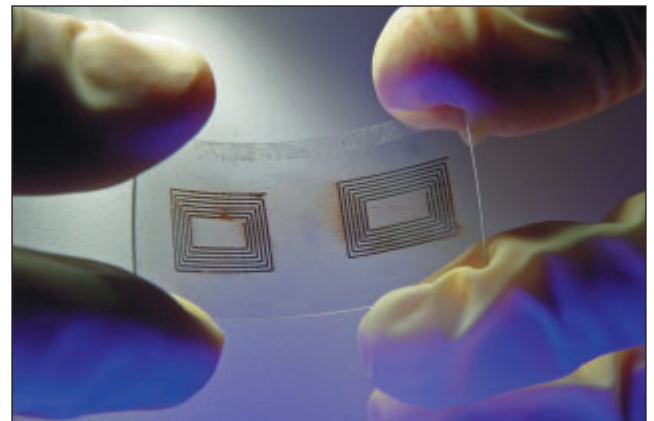
Ca. 170 Nanotechnologieinstitutionen sind im Bereich Informations- und Kommunikationstechnik aktiv. Der überwiegende Anteil an öffentlichen Forschungseinrichtungen zeigt, dass die Nanotechnologie im Bereich der Iuk-Technik noch stark auf Grundlagenforschung ausgerichtet ist. Neben der Nano-CMOS-Technologie befassen sich viele Akteure mit den Themen Spintronik/Magnetoelektronik, Polymerelektronik sowie Quanteninformationssystemen.



Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Informations- und Kommunikationstechnik und Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Während in den letzten Jahrzehnten Innovationen in der Halbleitertechnik überwiegend auf Leistungssteigerungen der Silizium basierten CMOS-Elektronik durch stetige Miniaturisierung von Strukturgrößen bis in den Nanobereich – aktuell liegen die Gatelängen von Transistoren bei 32 nm – basierten, gewinnen in den letzten Jahren zunehmend auch alternative Forschungsansätze wie die Polymerelektronik oder die Spintronik an Bedeutung. Als Entwicklungsziele stehen nicht mehr nur eine Erhöhung der Integrationsdichte und der Taktraten auf der Agenda, sondern auch die Energieeffizienz, kostengünstige Herstellungsverfahren (z. B. bei der Polymerelektronik) sowie eine zunehmende Systemintegration sensorischer und mikrosystemtechnischer Komponenten zu „Smart Systems“. Während im Bereich der Siliziumelektronik sich die Dominanz Asiens und der USA im Zuge der Wirtschaftskrise weiter verstärkt hat, zählt Deutschland im Bereich der Polymerelektronik und der Systemintegration anwendungsspezifischer Schaltkreise u. a. für die Automobilelektronik zu den führenden Nationen.



Mittels Tintenstrahltechnik lassen sich elektrische Leiterbahnen kostengünstig auf flexiblen Substraten aufbringen (Quelle: Jan-Peter Kasper/ Friedrich-Schiller-Universität Jena)

Aufgrund der hohen Integrationsdichte basieren fast alle Datenspeichertechnologien auf nanotechnologischen Ansätzen. Dies gilt für Flashspeicher, die quantenmechanische Tunneleffekte in Nanostrukturen nutzen, ebenso wie für Sonden-basierte Verfahren (Millipede), Phasenwechselspeicher, optische Holografiespeicher, magnetische oder ferroelektrische RAM-Speicher. Für eine verbesserte Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der Verdrahtung elektronischer Komponenten werden Nanomaterialien wie Kohlenstoffnanoröhren untersucht. Kostengünstige Strukturierungsverfahren, wie die Nano-Imprintlithografie, werden im Hinblick auf Präzision und Defektdichte optimiert. Darüber hinaus wird die Nanotechnologie bei der Grundlagenforschung zur Entwicklung zukünftiger Elektronikkonzepte wie die Molekularelektronik oder die Quanteninformationsverarbeitung aufgegriffen.



Rastertunnelmikroskopie-Aufnahme (50x50 nm²) magnetischer organischer Moleküle mit unterschiedlicher Spin-Ausrichtung, die als Basis für zukünftige Datenspeicher dienen könnten (Quelle: CFN Karlsruhe)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Spitzencluster Organische Elektronik

Der organischen Elektronik werden in den kommenden Jahren Milliarden-Umsätze prognostiziert. Deutschland hat bei der Technologieentwicklung weltweit eine Spitzenposition inne. Das BMBF fördert mit dem Spitzencluster „Organische Elektronik“ gezielt strategische Partnerschaften, in denen Unternehmen, wissenschaftliche Einrichtungen und weitere regionale Akteure gemeinsam daran arbeiten, diese Schlüsseltechnologie marktnah zu entwickeln. Das Kooperationsnetzwerk besteht aus derzeit drei deutschen und acht internationalen Großunternehmen, sechs mittelständischen Unternehmen sowie neun Forschungseinrichtungen und Hochschulen, darunter zwei Eliteuniversitäten. Die Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft arbeiten entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Organischen Elektronik eng zusammen, angefangen von der Erforschung und Entwicklung neuer Materialien, über die Konzeption von Komponenten und Systemen bis hin zur Vermarktung von Anwendungen und Dienstleistungen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt die Forschungsprojekte der Partner des 2008 prämierten Spitzenclusters mit ca. 40 Mio. € in einem Zeitraum von fünf Jahren [107].

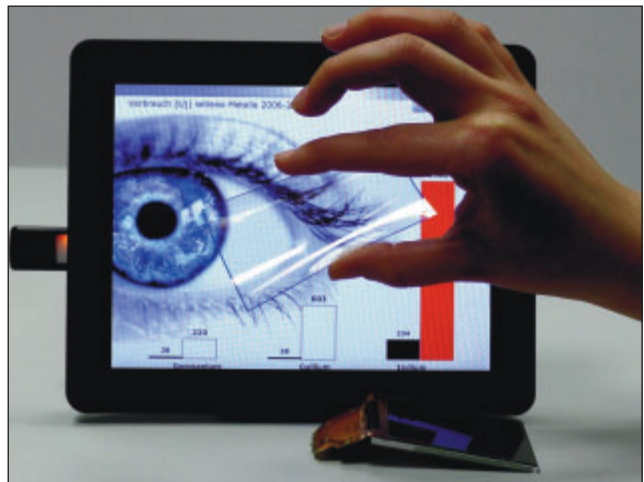
Spitzencluster Cool Silicon

Mit der Initiierung des Spitzenclusters „Cool Silicon“ im Jahr 2008 und Fördergeldern von rund 40 Millionen Euro über fünf Jahre greift das BMBF ein zentrales Zukunftsthema der Elektronik auf und stärkt gleichzeitig den Halbleiterstandort Dresden.

Ziel von CoolSilicon ist es, die Energieeffizienz elektronischer Systeme und die Energieeffizienz der Datenverarbeitung, -speicherung und -übertragung um den Faktor 10 zu verbessern. In diesem Kontext spielen nanotechnologische Ansätze aber auch die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Bauelementen und Systemen eine wichtige Rolle [108].

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Eine der großen Herausforderungen der Nanotechnologie im Bereich der Elektronik ist es, Lösungsbeiträge im Hinblick auf die Ressourcen- und Energieeffizienz zu leisten. Die CO₂-Emissionen der Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien, vor allem des Internets, liegen mittlerweile in vergleichbarer Größenordnung wie die des internationalen Luftverkehrs und tragen daher erheblich zur Klimabelastung bei. Ein weiterer kritischer Punkt ist die zunehmende Verknappung und Verteuerung seltener Rohstoffe im Elektronikbereich, wie beispielsweise Indium, Gold oder Seltener Erdmetalle. Nanomaterialien liefern Ansatzpunkte, um diese seltenen Rohstoffe durch alternative Lösungen zu ersetzen, z. B. transparente leitfähige Beschichtungen auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren oder Graphenen.



Touchscreen mit Kohlenstoffnanoröhren für transparente leitfähige Beschichtungen (Quelle: Fraunhofer IPA)

Weitere Herausforderungen betreffen die Entwicklung kostengünstiger Massenherstellungsverfahren für die organische Elektronik, die in Zukunft eine Schlüsselrolle bei der Verbreitung flexibler und in Alltagsgegenstände integrierbarer Elektronik- und Sensorikkomponenten spielen wird. Der aus diesen Entwicklungen sich verstärkende Trend einer intelligenten und vernetzten Alltagswelt bietet Herausforderungen durch die daraus resultierenden gesellschaftlichen Konsequenzen und Folgewirkungen.

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Informations- und Kommunikationstechnik

Datenverarbeitung	Siliziumelektronik mit Strukturgrößen 32 nm bzw. 28 nm (bezogen auf halben Abstand zweier Speicherzellen), 22 nm in Vorbereitung.
	Nano-Mikro-Integration anwendungsspezifischer, multifunktionaler Chipsysteme mit Sensoren, Aktuatoren, Wandlern, Antennen sowie Optimierung der Zuverlässigkeit.
	Polymerelektronik für einfache Schaltungen und passive Komponenten (RFID-Etiketten).
	Spinelektronische Bauelemente und Logiken auf Basis ferromagnetischer Halbleiter und neuen Systemarchitekturen.
	Bauelemente auf Basis einzelner Moleküle, Aufbau durch Selbstorganisationsprinzip (Molekularelektronik, z. B. Graphen, CNT) z. B. für zukünftige fehlertolerante Schaltkreise.
Datenspeicher	Energieeffiziente Elektronik durch Designoptimierung und neue Komponenten u. a. verlustarme Schaltungen, Transistoren mit Materialien hoher Dielektrizitätskonstanten („high-k“).
	Magnetoresistive Speicherchips (MRAM) auf Basis spinpolarisierter Elektronen in magnetischen Schichten (Vorteil: nicht flüchtig, strahlungsresistent; Nachteil: bislang schlecht skalierbar), wird vor allem als eingebetteter Speicher weiterverfolgt.
	Flashspeicher auf Basis quantenmechanischer Tunnelleffekte durch nanoskalige Barrierschichten (Vorteil: hohe Speicherdichte, kostengünstig; Nachteil: niedrige Schreibgeschwindigkeit und begrenzte Lebensdauer).
	Phasenwechsel-Speicher auf Basis schaltbarer phasenwechselnder Materialien (Vorteil: nicht flüchtig, CMOS integrierbar), Anwendung in Multichip-Packagings.
	3-dimensionale Silizium Transistoren (Multigate) für Speicheranwendungen.
	Thermomechanische polymere Lochspeicher mittels AFM basierte Cantilever-Mikrosystemtechnik („Millipede“) für Massenspeicheranwendungen.
	Holographische Datenspeicher auf Basis lichtempfindlicher Polymere (Speicherkapazität > 500 GB).
Produktionstechnik	Ferroelektrische Speicherchips (FeRAM) auf Basis ferroelektrischer Kristalle (Vorteil: nicht flüchtig; Nachteil: Temperaturinstabilität, schlechte Skalierbarkeit).
	Aufbau und Verbindungstechnik auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren in der Mikrosystemtechnik und Elektronik (Leitkleber, Pasten, Drähte, Kühlelemente etc.) (Vorteil: hohe Leitfähigkeit von CNT).
	Optische Immersionslithographie zur Herstellung von nanoskaligen Strukturen auf Silizium-Wafern (aktuell 32 nm Technologie).
	ALD-Abscheideverfahren für Dielektrika und Metallelektroden.
	EUV-Lithographie für Nanoelektronikkomponenten mit Strukturgrößen < 16 nm.
	Strukturierung von Nanoschichtsystemen mittels Elektronenstrahl-Lithographie als Basistechnologie für künftige nanoelektronische Komponenten.
	Nano-Imprint-Technologien für künftige Festplattenspeicher mit Zellgrößen < 16nm bei signifikanter Verbesserung der Präzision und Defektdichte.

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: ☐ = Anwendung im Markt, ☐ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

4.12 Verpackung

Branchensteckbrief [109]

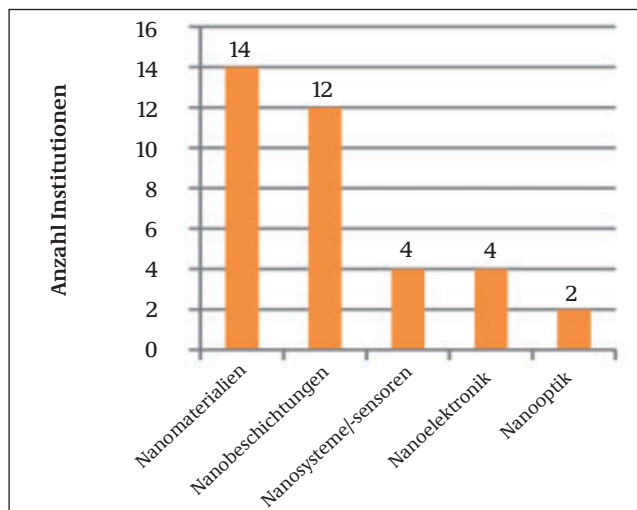
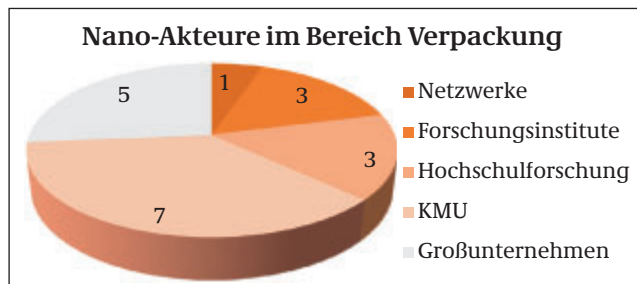
Industrieverbände:
Bundesverband Glasindustrie (BVGlas) e.V., Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA) e.V., Industrievereinigung Kunststoffverpackungen (IK) e.V., Verband Metallverpackungen (VMV) e.V. und Wirtschaftsverbände Papierverarbeitung (WPV) e.V.
Anzahl Unternehmen: ca. 800
Beschäftigte in Deutschland: 115.000 (2009)
Umsatz: 24 Mrd. Euro (2009)
F&E-Quote: k. A.
Weltmarktstellung: k. A.

Nano-Akteure

Mit rund 20 Akteuren stellt der Verpackungssektor ein relativ kleines Anwendungsfeld der Nanotechnologie dar. Allerdings bieten einige Nanotechnologieentwicklungen in der Chemie (z. B. Kunststoffe und Barrierschichten) sowie in der Polymerelektronik auch Anwendungspotenziale im Verpackungssektor. Die wichtigsten Nanotechnologieteilgebiete sind Anwendungen von Nanomaterialien und -beschichtungen für Verpackungen.

Nanotechnologie-Anwendungen

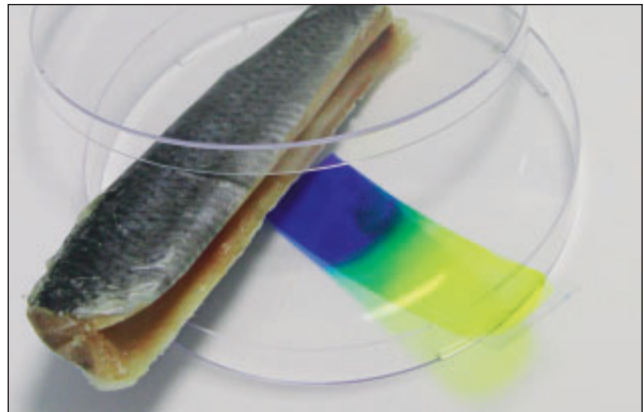
Die Nanotechnologie ist im Verpackungssektor ein Innovationstreiber bei der Entwicklung intelligenter und multifunktionaler Verpackungen. Durch nanopartikuläre Zusätze wie Schichtsilikate oder Nanobeschichtungen z. B. auf Siliziumdioxidbasis kann die Barrierewirkung von Verpackungen



Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Verpackung sowie Zuordnung zu technologischen Teilgebieten
(Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

gegenüber Feuchtigkeit, Sauerstoff, Kohlendioxid und Strahlung verbessert oder deren Restentleerbarkeit optimiert werden. Neben passiven Schutzfunktionen lassen sich auch aktive Komponenten wie Sauerstoffquencher oder antibakterielle Silberzusätze in die Verpackung integrieren. Ebenso bietet die Nanotechnologie Lösungen für den Produkt- und Fälschungsschutz für hochwertige Konsumgüter und Medikamente z. B. auf der Basis einer Codierung durch farbwechselnde Nanobeschichtungen oder DNA-Markierungen. Die druckbare Elektronik auf Basis nanotechnologischer Verfahren ermöglicht neuartige, verpackungsintegrierte Sensoren und ist damit der Schlüssel für intelligente Verpackungen der Zukunft, bei denen beispielsweise die Frische von Lebensmitteln oder die Einhaltung der Kühlkette bei Lagerung und Transport durch Farbwechselindikatoren direkt angezeigt werden können. Die Integration von Sensorelementen in RFID-Etiketten für Verpackungen ist Gegenstand aktueller Entwicklungen. Im Bereich der Industrieverpackungen können Zusätze von Kohlenstoffnanoröhren in Plastikkomposite die Leitfähigkeit und damit den Explosionsschutz beim Gefahrstofftransport verbessern oder zur Entwicklung hochfester Polymerschäume für stoßgesicherte Verpackungen beitragen. Neben Kunststoffkompositen können auch Papierpackstoffe optimiert werden. Durch nanostrukturierte Cellulosefasern lässt sich die Reißfestigkeit und Stabilität von Papier deutlich

erhöhen und mittels Beschichtungen spezielle Oberflächen-funktionalisierungen einstellen.



Sensorfolie warnt durch Farbumschlag vor verdorbenen Lebensmitteln
(Quelle: Fraunhofer EMFT)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Projekt Polytos

Im Projekt „Gedruckte organische Schaltungen und Speicher“ (Polytos) innerhalb des Spitzenclusters „Forum Organische Elektronik“ werden neue Materialien, Konzepte, Bauteile, Herstellungsverfahren und Software für gedruckte organische Schaltungen mit integrierten Sensoren für Anwendungen im Verpackungsbereich entwickelt. Diese Systeme können in Zukunft als gedruckte „Smart Labels“ Anwendung finden. „Smart Labels“ sind intelligente und flexible Transponder, die samt Antenne auf eine Folie aufgebracht werden und Informationen übertragen können. Sie finden vornehmlich im Logistik- und Verpackungsbereich Anwendung [110].

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Verpackungen sind speziell im Lebensmittelbereich besonderen regulatorischen Rahmenbedingungen unterworfen. Gerade im Lebensmittelbereich wird die Verwendung von Nanomaterialien aufgrund von Sicherheitsbedenken kritisch diskutiert. Die Verwendung nanoskaliger Zusätze ist zulassungspflichtig und es muss nachgewiesen werden, dass keine Migration von Nanopartikeln in die Lebensmittel stattfindet. Bislang ist die Verwendung von Titanitridnanopartikeln in Kunststoffverpackungen die einzige explizit zugelassene Verwendung von Nanomaterialien bei Lebensmittelverpackungen [111]. Darüber hinaus sind Innen- und Außenbeschichtungen z. B. auf Siliziumdioxidbasis bei Verpackungen eine etablierte Anwendung. Eine große Herausforderung ist die Kostensenkung für nanotechnologische Applikationen, da der Verpackungssektor sehr kostensensitiv ist. Die steigende Nachfrage im Hinblick auf Sicherheit und Transparenz im Lebensmittelsektor sowie die gestiegenen Anforderungen im Hinblick auf den Produktschutz und die Nachverfolgbarkeit von Warenströmen kann die Anwendung der Nanotechnologie hingegen begünstigen.

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Verpackungen

Verpackungsmaterialien	Verbesserte Gasdichtigkeit von PET-Flaschen durch nanoskalige Innenbeschichtungen (Siliziumdioxid, amorpher Kohlenstoff).
	Nanoskalige Füllstoffe (exfoliierte Tonminerale) für Polyamid-komposite in Flaschen, Folien, Containern.
	Entwicklung von Oberflächen mit weicher Haptik für Aluminiumverpackungen durch keramische Beschichtungen auf Basis chemisch funktionalisierter Nanopartikel.
	Antimikrobielle Verpackungen durch Nanosilber-Polymerkomposite (nicht für Lebensmittelkontakt zugelassen).
	Titannitrid-Nanopartikel-Füllstoffe als wärmeabsorbierende Substanzen zur energieeffizienten Erwärmung von PET bei der Flaschenherstellung.
	Verbesserte Restentleerbarkeit für Kunststoff-Verpackungen durch nanostrukturierte Plasmaminnenbeschichtungen von dreidimensionalen Formkörpern.
Intelligente Verpackungen	Aktive Komponenten in Folienverbünden (Sauerstoffabsorption etc.) z. B. durch Nano-Töne in Verbindung mit Metalloxiden.
	Nanooptimierte Papierpackstoffe z. B. auf Basis nanostrukturierter Cellulose oder nano-Beschichtungen zur Funktionsverbesserung (Stabilität, Haftfähigkeit, Oberflächenstruktur).
Fälschungs-schutz	Nanomaterialien/-beschichtungen als Sensorlabel zur Farbindikation von Temperaturänderungen/und -verläufen (z. B. Unterbrechung der Kühlkette) Frischeindikatoren (Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen) oder pathogenen Keimen.
	Kostengünstige RFID integrierte Sensorik auf Basis von Nanomaterialien/-tinten zur Überwachung physikalischer Parameter des Verpackungsgutes (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Frischeindikatoren).
	Optische Sicherheitsmerkmale auf Basis nanoskaliger Schichten mit spezifischen Farbkippeffekten.
	DNA-basierte Sicherheitsmerkmale und Detektionseinheiten zum Nachweis komplementärer DNA-Sequenzen.
	Optische Sicherheitscodierung mittels Interferenzstrukturen nach dem Vorbild der Natur (Schmetterlingsflügel) durch Anwendung von Nanostrukturierungsverfahren (Selbstorganisation, ALD).

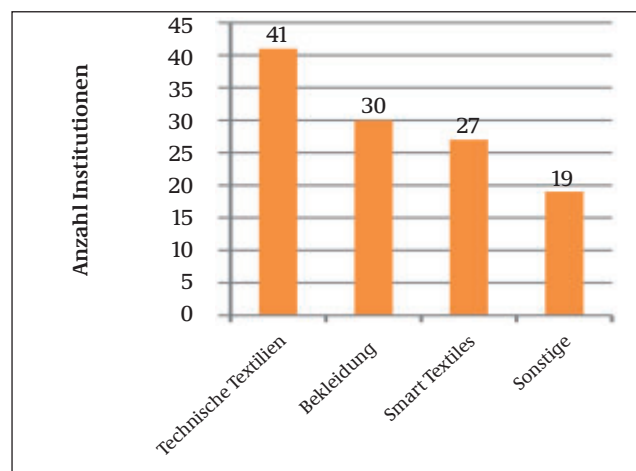
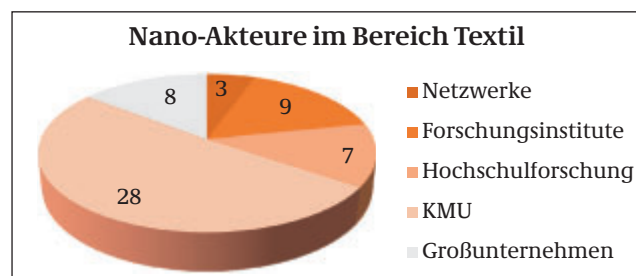
Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: □ = Anwendung im Markt, □ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

4.13 Textil**Branchensteckbrief [112]**

Industrieverbände:
Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e.V. (www.textil-mode.de)
Anzahl Unternehmen: 1.200 (2009)
Beschäftigte in Deutschland: 120.000 (2009)
Umsatz: 27. Mrd. Euro (2009)
F&E-Quote: Ca. 1 %
Position Deutschlands in Europa: 1. Deutschland, 2. Italien, 3. Frankreich

Nano-Akteure

Ca. 60 Nanotechnologieinstitutionen sind im Bereich textiler Anwendungen tätig. Anwendungsbereiche umfassen hierbei technische Textilien, Bekleidung und multifunktionelle Textilien.



Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Textil sowie Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)



Textilintegrierte LED für Sicherheitswesten (Quelle: interactive wear)

Nanotechnologie-Anwendungen

Die Anwendungsfelder der Nanotechnologie umfassen sowohl hochwertige funktionalisierte Bekleidungstextilien als auch technische Textilien, beispielsweise im Automobil, in der Sicherheits-, Medizin-, und Umwelttechnik oder im Bauwesen. Bekleidungstextilien sind eines der Hauptanwendungsfelder der Nanotechnologie im Konsumentenbereich, rund 15 % der Einträge einer internationalen Produktdatenbank betreffen Anwendungen in Kleidungsstücken [113]. Darunter fallen schmutzabweisende Kleidung (z. B. Krawatten, Oberbekleidung) auf Basis nanotechnologischer Beschichtungen/Imprägnierungsmitteln sowie hygienische, antibakterielle Eigenschaften auf Basis eingearbeiteter Nanosilberpartikel (z. B. für Socken, Unterwäsche, Schuhe). Weitere Anwendungen betreffen den Einsatz nanoporöser Aerogelmaterialien für extrem isolierende Wärmeschutzbekleidungen oder nanoskalige Makromoleküle, die als Wirk- oder Duftstoffdepot oder zur Adsorption unangenehmer Körpergerüche in Textilfasern eingebunden werden. Ein weiterer Trend ist die Integration mobiler Elektronik- und Sensorikkomponenten in Textilien wie z. B. OLED, MP3-Player oder Sensoren zur Überwachung von Körperfunktionen. Mit Hilfe nanoskaliger Füllstoffe lassen sich Textilfasern bereits mit geringem Füllstoffgehalt so modifizieren, dass sie

einerseits problemlos verarbeitet, andererseits mit spezifischen Funktionen versehen werden können. Forschungsaktivitäten betreffen beispielsweise elektrisch leitfähige und antistatische Textilfasern durch Einarbeitung von Kohlenstoffnanoröhren in Textilfasern, die Abschirmung elektromagnetischer Strahlung (IR-/Mikro-/Radiowellen) durch transparente leitfähige Schichten (z. B. auf Basis von ITO-Nanopartikeln), nanostrukturierte, textilintegrierte Thermoelektrika zur Umwandlung von Körperwärme in Strom für die Versorgung mobiler elektronischer Geräte oder die Beheizung von Textilien durch elektromagnetische Wechselfelder auf Basis magnetischer Nanopartikel. Im Bereich des dynamischen Marktsegmentes technischer Textilien bietet die Nanotechnologie die Option zur multifunktionalen Ausrüstung von Textilfasern, in der Medizintechnik etwa durch eine kontrollierte Abgabe von medikamentösen Wirkstoffen oder Wundauflagen mit feuchtigkeitsregulierenden Oberflächeneigenschaften auf Basis von Nanobeschichtungen oder in der Umwelttechnik durch hocheffiziente Filtermedien für Umweltschadstoffe.



Wundauflagen mit feuchtigkeitsregulierenden Oberflächeneigenschaften mittels Nanotechnologie (Quelle: Bayer AG)

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

NanoTextil – Nanotechnologien für textile Anwendungen

Ziel der Fördermaßnahme „NanoTextil – Nanotechnologien für textile Anwendungen“ ist die Entwicklung neuer oder deutlich verbesserter Werkstoffe sowie Verfahren durch die Anwendung von Nanotechnologien auf textile Komponenten. Die Fördermaßnahme ist auf Technische Textilien und Funktionsbekleidungen fokussiert, um eine möglichst große Hebelwirkung zu erzielen. Neue nanotechnologische Forschungsansätze im Bereich der Fasern, Garne, Gewebe, Gewirke, Geflechte, Gelege, Vliesstoffe, Beschichtungen, Verbindungstechniken und Composite sowie der Textilmaschinen sollen zu neuen Werkstoffen und Anwendungslösungen für textile Produktinnovationen mit hoher Breitenwirksamkeit führen [114].

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Textil

Bekleidung	Superhydrophobie/Schmutzabweisung von Textilfasern durch Ausbildung von Mikrostrukturen in Beschichtungen mit Siliziumdioxid-Nanopartikeln und unpolaren Vernetzungsmitteln (z. B. fluorierte Alkylsilane).
	Antibakterielle Ausrüstung von Textilien durch Nano-Silberpartikel zur Vermeidung von Infektionen (z. B. Kleidung für Neurodermitis-Patienten oder Diabetiker) oder unangenehmen Körpergerüchen.
	Nanoschäume (z. B. Aerogele) als Superisolationssysteme für Kälteschutzbekleidung. Aufgrund der nanoporösen Struktur wird der konvektive Wärmetransport auch bei geringer Dicke der Isolationsschicht effizient gemindert.
	Mikroverkapselte Phasenwechsel-Materialien in Textilien zur Aufrechterhaltung eines angenehmen Temperaturniveaus.
	Changierende Farbeffekte durch Effektpigmente aus Kern/Schale-Partikeln/Plättchen (z. B. aus Metalloxiden), deren Wirkung auf Lichtinterferenz basiert.
	Abschirmung elektromagnetischer Strahlung (IR-/Mikro-/Radiowellen) durch transparente leitfähige Schichten (z. B. auf Basis von ITO-Nanopartikeln).
Technische Textilien	Spezifische Adsorption oder kontrollierte Freigabe von Geruchs-/Wirkstoffen durch nanostrukturierte Hohlkörper z. B. auf Basis von Makromolekülen wie Cyclodextrinen.
	Antiadhäsive Wirkung auf biologischen Materialien z. B. für Wundauflagen durch keramische Beschichtungen beispielsweise mittels Sol-Gel-Verfahren.
	Antistatische Ausrüstung von Textilien durch Einarbeitung von Kohlenstoffnanoröhren in Textilfasern zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit.
	Verbesserte Alterungsbeständigkeit und Schutz vor Ausbleichung von Textilfasern durch UV-Schutz mit Zinkoxid- oder Titandioxidnanopartikeln (Rutil-Modifikation) sowie Haftverbesserung von Schutzschichten durch Plasmaaktivierung.
	Integration von Nanopartikeln und CNT für Textilien mit speziellen Schutzfunktionen (Abriebsbeständigkeit, elektrostatische Aufladung, Brandschutz, Flüssigkeitsaufnahme, Partikelkontamination und Verschmutzung, elektromagnetische Abschirmung und Klimaregulation).
	Kunstrasen-Monofilamente mit antimykotischen, antibiotischen und flammhemmenden Eigenschaften auf Basis von Nanopartikelfüllstoffen.
	Integration multifunktionaler Nanopartikel in thermisch sowie UV-härtender Binder-Systeme zur Eigenschaftsoptimierung technischer Textilien (z. B. Abriebfestigkeit, Leitfähigkeit, Thermochromie).
	Technisch nutzbare Spinnenseidenfasern durch kontinuierliche Spinnprozesse.
Multifunktionelle Textilien	Nanofasern durch Blasverfahren aus Polymerschmelzen für neuartige, vliesstoffbasierte Filter.
	Elektrisch leitfähige Textilfasern zur Ansteuerung von Sensoren/Aktoren in multifunktionalen Kleidungsstücken (z. B. im Bereich der Gesundheitsüberwachung).
	Textilintegrierte Unterhaltungselektronik (z. B. GPS, MP3) und Leuchtdioden (z. B. für Sicherheits- und Warnsignale).
	Leuchtende Polymere zur Integration von OLED-Elementen in Textilien z. B. im Sicherheitsbereich.
	Beheizung von Textilien durch elektromagnetische Wechselfelder auf Basis magnetischer Nanopartikel (z. B. Eisenoxide), die in das Textilgewebe integriert werden.
	Stromgewinnung zur Versorgung mobiler elektronischer Geräte durch textilintegrierte Generatoren (z. B. nanostrukturierte Thermoelektrika zur Umwandlung von Körperwärme in Strom oder Piezogeneratoren zur Nutzung von Bewegungsenergie).

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: ☐ = Anwendung im Markt, ☐ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die Nanotechnologie eröffnet für die Textilbranche Chancen, sich mit hochwertigen, innovativen Produktlösungen, insbesondere im Bereich technischer Textilien, neue Wachstumsmärkte zu erschließen und damit Innovationsimpulse für andere Branchen wie dem Automobil- und Flugzeugbau sowie der Medizin-, Umwelt- und Bautechnik zu liefern. Herausforderungen liegen dabei vor allem im sicheren Umgang mit Nanomaterialien, da Textilien am Körper getragen werden und somit ein direkter Hautkontakt gegeben ist. Ein Hauptaugenmerk muss daher darauf gerichtet sein, Nanomaterialien fest in die Textilmatrix einzubinden, so dass eine Loslösung einzelner Nanoobjekte vermieden wird. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Nanosilbermaterialien als antibakterieller Wirkstoff im Textilbereich werden verstärkt mögliche Umweltbelastungen für die Umwelt sowie auch eine mögliche Resistenzbildung von Keimen als negative Begleiterscheinungen diskutiert. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Nanosilbermaterialien bei der Textilwäsche zu großem Teil ausgewaschen werden können. Im Rahmen der Fördermaßnahme NanoNature werden explizit mögliche Folgewirkungen des Nanosilbereinsatzes auf die Umwelt untersucht. Eine weitere Herausforderung liegt in der Etablierung von Qualitätssiegeln, die die Funktionalität und Haltbarkeit nanotechnologischer Entwicklungen nach objektiven Prüfkriterien messbar macht, wie z. B. schmutzabweisende Eigenschaften. Das Hohensteiner Qualitätssiegel „Nanotechnologie“ sowie das Denkendorfer Prüfsiegel für selbstreinigende Textilien sind als bereits umgesetzte Beispiele zu nennen. Des Weiteren ist ein Projekt des DIN zur Entwicklung eines Prüfkongzeptes für Textilien mit Nanokompositausrüstung initiiert worden [115].

4.14 Sicherheitstechnik

Branchensteckbrief

Industrieverbände:

Arbeitsgemeinschaft für Sicherheit der Wirtschaft e.V. (www.asw-online.de), Verbände in Teilbereichen, z. B.:
Verband für Sicherheitstechnik e.V. VFS (www.vfs-hh.de)
Bundesverband der Hersteller- und Errichterfirmen von Sicherheitssystemen e.V. (www.bhe.de)
Bundesverband Sicherungstechnik Deutschland e. V. (www.bsd-ev.de)

Anzahl Unternehmen: Ca. 200 [116]

Beschäftigte in Deutschland: k.A.

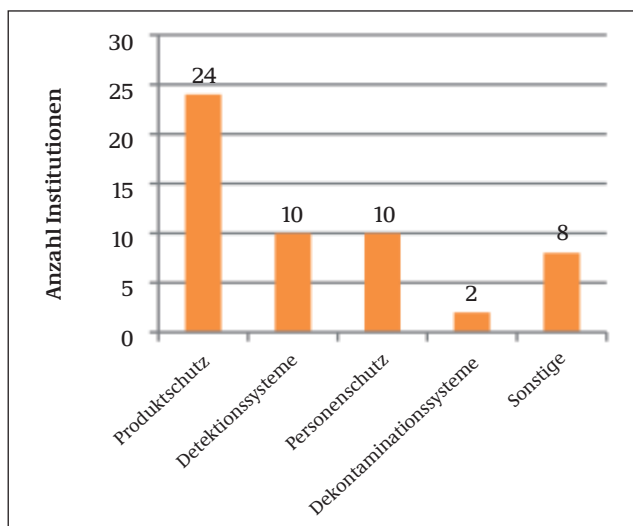
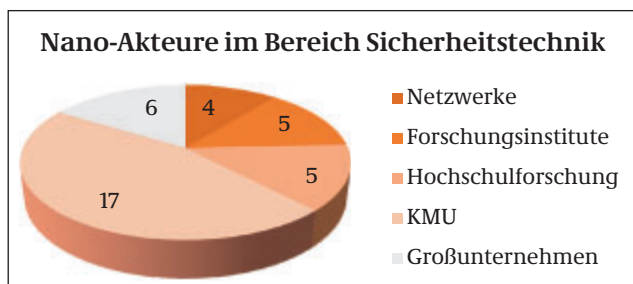
Umsatz: ca. 20 Mrd. € in Deutschland (2008) [130]

F&E-Quote: k.A.

Position Deutschlands: Deutscher Sicherheitsmarkt umfasst ca. 10 % des Gesamtweltmarktes

Nano-Akteure

Ca. 40 Institutionen befassen sich mit Nanotechnologieanwendungen in der Sicherheitstechnik. Anwendungen im Bereich Produktschutz liegen dabei zahlenmäßig an der Spitze, gefolgt von Detektionssystemen und Personenschutz.

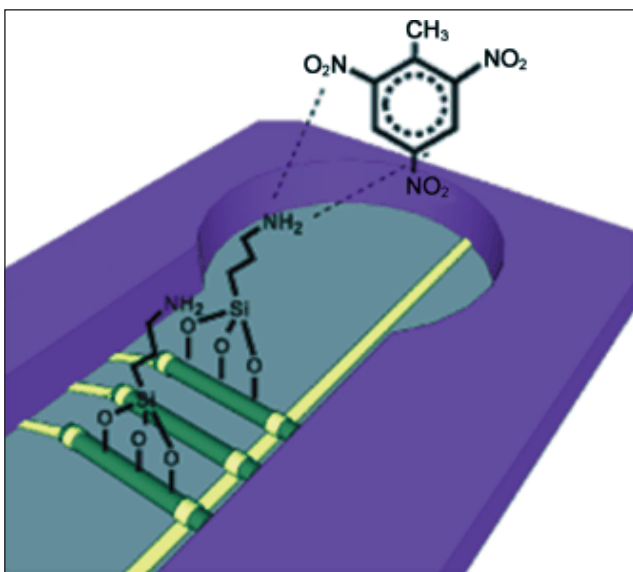


Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Sicherheitstechnik sowie Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

In der zivilen Sicherheitstechnik fokussieren Nanotechnologieanwendungen auf den Bereichen Personen- und Objektschutz, Detektion und Dekontamination von Gefahrstoffen sowie Produkt- und Fälschungsschutz. Ein wirtschaftlich wichtiges Einsatzfeld ist die Dokumentensicherheit und der Plagiatsschutz. Der wirtschaftliche Schaden durch Fälschungen von Konsum- und Investitionsgütern, Sicherheitsdokumenten, Währungen bis hin zu pharmazeutischen Produkten oder Automobil- und Flugzeugersatzteilen wird auf weltweit über 600 Mrd. \$ pro Jahr geschätzt. Nanomaterialien bieten Ansatzpunkte für fälschungssichere Sicherheitsmerkmale auf Basis biologischer Materialien wie Proteinen oder DNA bzw. einer optischen Codierung auf Basis nanostrukturierter Interferenzschichten, Quantenpunkten oder IR-Pigmenten. Ein weiteres Feld ist die schnelle online-Detektion von Gefahrstoffen in sicherheitsrele-

vanten Infrastrukturen (z. B. Flughäfen, Öffentlicher Nah- und Fernverkehr). Nanosensorelemente, wie Nanodrähte oder Feldeffekttransistoren mit spezifischen Bindungsmechanismen für Gefahrstoffe (z. B. auf Basis biologischer Antikörper oder spezifischer Beschichtungen) ermöglichen eine schnelle und hochsensitive Detektion von Sprengstoffen oder biologisch-chemischen Kampfstoffen. Nanomaterialien wie Kohlenstoffnanoröhren bieten weiterhin Potenziale für hochfeste und leichte Komposite für schuss- und stichfeste Personenschutzanzüge. Für ballistische Panzerungen sind nanostrukturierte transparente Keramiken oder nanopartikelverstärkte Metalle von Interesse.



Prinzip eines Sensors für Explosivstoffe auf Basis eines Nano-Feldeffekt-Transistors. Die Anbindung eines Explosivstoff-Moleküls führt zu einer messbaren Änderung der Elektronendichte in den Nanodrähten (Quelle: Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.)



Speziell im Anwendungsgebiet Gefahrstoffdetektion und -dekontamination kann die Sicherheitstechnik künftig von nanotechnologischen Lösungen profitieren (Quelle: Feuerwehr Dortmund)

Bakteriorhodopsin – ein biologischer Lichtwandler als Sicherheitspigment und optischer Datenspeicher

„Biologisches Farbpigment legt Fälschern das Handwerk“
Dr. O. Bujok, Projektträger VDI TZ

Die Fälschungssicherung von Staatsdokumenten, aber auch von hochwertigen Waren (z. B. Medikamente), ist von herausragender gesellschaftlicher wie wirtschaftlicher Bedeutung. Ungeachtet dessen stellen aktuelle Sicherheitsstandards und -technologien kein wirkliches Hindernis für Fälscher dar. Ein Fortschreiben bestehender Technologien kann nicht die Antwort sein – ein Technologiebruch ist notwendig. Für diesen Technologiebruch steht das Biomolekül Bakteriorhodopsin (BR), ein biologischer Lichtwandler, den ein in Salinen vorkommendes Bakterium zur Photosynthese nutzt.

Mit Methoden der „weißen Biotechnologie“ erzeugt dieses Bakterium Varianten dieses Biomoleküls. Verarbeitet zu Pigmenten, bilden diese eine neue Plattformtechnologie für Sicherheitselemente. Dieses optimierte Biopigment ist herkömmlichen Pigmenten haushoch überlegen, kann es doch drei Leistungsmerkmale in sich vereinen:

1. **Publikumsmerkmal und Kopierschutz:** Bestrahlung mit sichtbarem Licht, z. B. einer Schreibtischlampe, führt ohne jegliche Hilfsmittel zu einem Farbumschlag. Dieser tritt auch beim Kopieren auf und führt zu einer fehlerhaft gefärbten Kopie.
2. **Maschinenlesbares Merkmal:** Es können erhebliche Datenmengen optisch gespeichert und per Terminals ausgelesen werden. Ein Zweiphotonenprozess erlaubt das „Beschreiben“ des photochromen Pigments.
3. **Hochsicherheitsmerkmal:** Ein „molekulares Etikett“, das in der Aminosäuresequenz des Biomoleküls verschlüsselt ist, erlaubt die Identifizierung von BR-gesicherten Produkten bis zur einzelnen Produktionscharge und damit die Rückverfolgbarkeit des Materials.

In den vom BMBF geförderten Projekten BSafe und BSafePlus wurden innerhalb der letzten Jahre die Grundlagen für diese Innovation gelegt. Gänzlich neue Verfahren für die Produktion und Isolierung des Biowerkstoffes in technischen Mengen, aber auch neue Verfahren zur Verarbeitung in Produkten, markieren diese Pionierleistung auf dem Gebiet der Nanobiotechnologie. Die offizielle Marktvorstellung des Biowerkstoffes Bakteriorhodopsin zur Fälschungssicherung erfolgte in 2010.

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Themenfeld „Detektion von Gefahrstoffen“

Die BMBF-Fördermaßnahme adressiert die Entwicklung von Detektionssystemen für biologische oder für chemische und explosive Substanzen sowie die Einsatzmöglichkeiten der Terahertz-Technologie zum Aufspüren von Waffen und Gefahrstoffen. Dabei werden auch Projekte mit Bezug zur Nanotechnologie gefördert:

Verbundprojekt BIONAPATEST

Ziel des Projektes ist die Etablierung von Präparations-technologien von Nanopartikeln und ihrer Modifizierung sowie die Nutzung dieser Strukturen für die Erhöhung der Empfindlichkeit von bioanalytischen Nachweisverfahren für sicherheitsrelevante Stoffe [117].

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die zivile Sicherheitstechnik hat in Deutschland in den letzten Jahren vor dem Hintergrund weitreichender Bedrohungsszenarien infolge internationaler terroristischer Aktivitäten sowie dem dynamischen Anstieg wirtschaftlicher Schäden durch Kriminalität stark an Bedeutung gewonnen.

Infolge der globalen Vernetzung terroristischer und krimineller Aktivitäten sowie der Erhöhung ziviler Sicherheitsanforderungen, z. B. bei der Sicherung internationaler Transport- und Warenketten, ist die Nachfrage nach hochtechnologischen Sicherheitsprodukten auf staatlicher und wirtschaftlicher Ebene stark gestiegen. Die Rahmenbedingungen für die Entwicklung nanotechnologischer Innovationen in der Sicherheitstechnik sind daher positiv. Entsprechende Anwendungen werden in Teilbereichen der BMBF-Förderung adressiert.

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Sicherheitstechnik

Personen-/Objektschutz	Transparente Sinterkeramiken für ballistischen Schutz auf Basis defektarmer Verfahren zur Herstellung feinkristalliner Gefüge (Vorteile: verbesserte Schutzwirkung und Transparenz).
	Nanooptimierter Stahl mit verbessertem ballistischem Schutz und Mehrfach-Schuss-Beständigkeit (u. a. auf Basis nanoskaliger Carbidphasen oder nanokristalliner Gefügestrukturen).
	Antibeslag- und Anti-Reflexbeschichtungen für Visiere und Schutzbrillen auf Basis von Sol-Gel-Beschichtungen.
	CNT modifizierte Schaumstoffe mit verbesserten mechanischen und Energie absorbierenden Eigenschaften für Protektoren.
	Nanopartikel als Füllstoff für thermoplastische Filamentgarne mit hoher mechanischer Stabilität und Energieabsorptionsfähigkeit für Schutzhelme.
	Schutzkleidung gegen chemische/biologische Gefahrstoffe auf Basis nanofunktionalisierter Textilfasern (z. B. elektrogesponnene Hohlfasern mit integrierten Wirkstoffen).
	Auxetische Fasern (Verdickung bei Zugbelastung) auf Basis molekularer auxetischer Materialien mit hervorragenden Energieabsorptions-Eigenschaften für Schutzausrüstungen und -kleidung.
Gefahrstoffdetektion	Schuss und stichfeste Schutzkleidung auf Basis scherverdickender Nanofluide oder CNT-Fasern.
	Biomonitoring-Systeme mit integrierter molekularer Diagnostik und Medikation.
	Mikrosystemtechnische Sensorik (mikrofluidische ChipLabors, miniaturisierte Spektrometer, elektronische Nasen etc.) zur Detektion biologischer und chemischer Gefahrstoffe.
	Neuartige Sensoren auf Basis molekular geprägter Polymere mit selektiven Adsorptionsstellen für bestimmte Gefahr-/Explosivstoffe.
Dekontaminationssysteme	Hochempfindliche Gefahrstoffdetektion auf Basis selektiver Bindungsmechanismen (Antikörper, Beschichtungen) und unterschiedlicher Nachweisprinzipien (z. B. Feldeffekttransistor-Sensor aus Siliziumnanodrähten, elektrochemische metallische Nanodrahtgitter, Nachweis der Adsorption durch Laser- oder SAW-Detektion) oder spektrometrischer Nachweis durch Hilbert-Spektrometer, basierend auf Josephson-Kontakt-Sensoren.
	Früherkennungssysteme für Gefahrstoffe auf Basis großräumig vernetzter Nanosensoren (smart dust).
	Dekontaminationssysteme für chemische/biologische Gefahrstoffe auf Basis von Nanomaterialien (magnetische Nanopartikel, Eisen-/Metalloxidnanopartikel zur oxidativen Zersetzung oder nanoporöse Gele zur Adsorption).
Produkt-/Fälschungsschutz	Superabsorbierende Gele zur Neutralisation von Gefahrstoffen.
	Chemisch/biologische Filtersysteme auf Basis nanokatalytischer bzw. nanostrukturierter Materialien (Nanofasern, katalytische Beschichtung etc.).
	Photochrome Sicherheitspigmente und optische Datenspeicher auf Basis prozessierbarer Bakteriorhodopsin-Druckfarben.
	Optische Sicherheitsmerkmale auf Basis nanoskaliger Schichten mit spezifischen Farbkippeffekten.
	DNA-basierte Sicherheitsmerkmale und Detektionseinheiten zum Nachweis komplementärer DNA-Sequenzen.
	IR-aktive Spezialpigmente für die Formulierung unsichtbarer Sicherheitstinten für Textilanwendungen.
	Optische Sicherheitscodierung mittels Interferenzstrukturen nach dem Vorbild der Natur (Schmetterlingsflügel) durch Anwendung von Nanostrukturierungsverfahren (Selbstorganisation, ALD).

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende: □ = Anwendung im Markt, □ = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

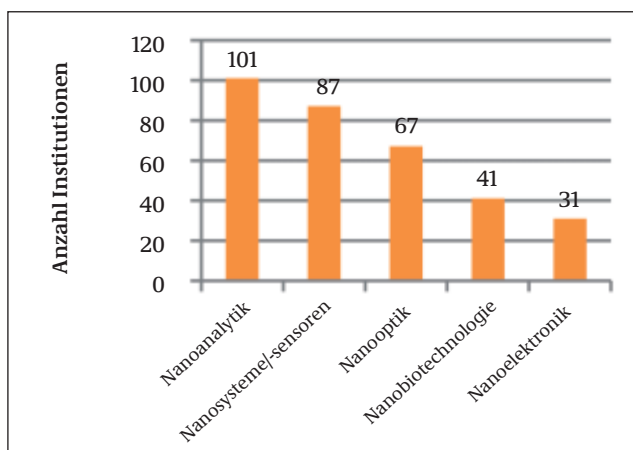
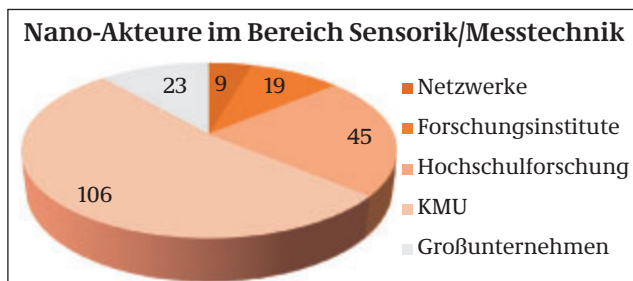
4.15 Sensorik/Messtechnik

Branchensteckbrief [118,119]

Industrieverbände: AMA Fachverband für Sensorik e.V., www.ama-sensorik.de
Anzahl Unternehmen: Ca. 2.300 Unternehmen davon ca. 800 Hersteller industrieller Messsysteme
Arbeitsplätze: Gesamt ca. 230.000
Umsatz: 35 Mrd. Euro pro Jahr
F&E-Quote: k.A.
Weltmarktstellung: Exportquote ca. 60 –70 %, Weltmarktanteil Deutschlands ca. 20 %

Nano-Akteure

Dem Anwendungsfeld Sensorik/Messtechnik können rund 200 Nanotechnologieakteure zugeordnet werden. Wichtige Teilfelder sind sowohl die Nanoanalytik als auch die Herstellung von Nanosensoren. Bezogen auf die Messprinzipien liegen optische Verfahren vor biologischen und elektronischen Detektionsmechanismen.



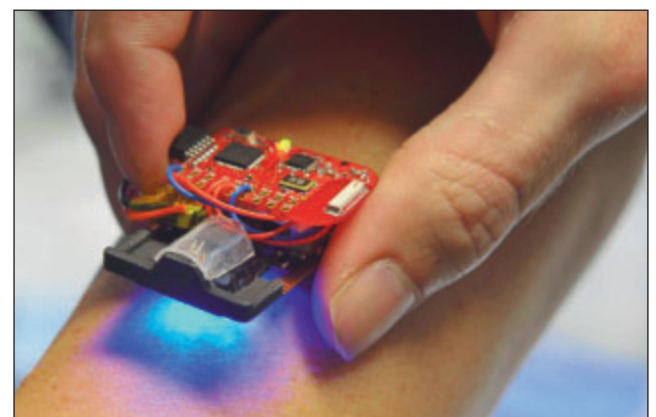
Anzahl der Nanotechnologieakteure im Anwendungsfeld Sensorik/Messtechnik sowie Zuordnung zu technologischen Teilgebieten (Quelle: www.nano-map.de, Stand 01/2011, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein.)

Nanotechnologie-Anwendungen

Die Sensorik ist ein Querschnittsfeld, das in hohem Maße von Nanomaterialien und -strukturen sowie neuartigen physikalischen Effekten auf der Nanoskala profitiert. Als klassisches Beispiel ist die Magnetoelektronik zu nennen, die in den letzten Jahren für einen Innovationsschub in der Sensorik gesorgt hat. Die in nanostrukturierten magnetischen Schichtstapeln auftretenden verschiedenen Magnetowiderstandseffekte sind die Basis für hochempfindliche und robuste Magnetfeldsensoren, die mittlerweile breiten industriellen Einsatz in Festplattenleseköpfen sowie als Weg-, Winkel-, Positions- und Stromsensoren finden. Auch die optische Messtechnik profitiert von der Nanotechnologie z.B. durch Nutzung von Oberflächenplasmonen, Nahfeldmikroskopie, Halbleiterlasern oder anderen nanooptischen Komponenten. In der Gassensorik bieten sich durch Nanomaterialien und Nanostrukturen sowie die chemische Funktionalisierung von Sensorelementen für eine selektive Adsorption von Gasen und Molekülen, ein breites Innovationsfeld für neue Messverfahren. Weitere nanotechnologisch beeinflusste Sensoren sind Kraftsensoren auf Basis ultradünner Dehnungsmesstreifen, thermische Mikrosensoren oder Sensoren, die akustische Oberflächenwellen als physikalische Messgröße nutzen.



Kohlenstoff-Nanofasern zwischen zwei Goldelektroden als Basis für ultraschnelle Photodetektoren (Quelle: Alexander Holleitner/TU München)



Nichtinvasive Sensorik für die Medizintechnik. Durch ein „intelligentes Pflaster“ lässt sich die Konzentration eines Fluoreszenzfarbstoffes im Körper ohne Blutentnahme z.B. für eine Nierenfunktionsprüfung messen (Quelle: Universitätsmedizin Mannheim, Rinderspacher).

Anwendungs- und Entwicklungsbeispiele der Nanotechnologie im Bereich Sensorik/Messtechnik

Adsorptive Sensoren	Nanomechanische Hebelarmsensoren mit unterschiedlichen Oberflächenfunktionalisierungen für den Nachweis von Molekülen in der Umwelt- und Biosensorik.
	Elektroadsorptive Gassensoren und Integration in CMOS-Chip (Vorteil geringere Betriebstemperaturen im Vergleich zu herkömmlichen Metalloxid-Gassensoren).
	Nanodrahtgitter (z. B. Gold, Silizium) zum Nachweis von selektiv adsorbierten Chemikalien und Biomolekülen durch optische oder elektrische Detektionsverfahren.
	Wasserstoffsensoren auf Basis photonischer Kristalle, die abhängig von der Wasserstoffkonzentration ihre optischen Eigenschaften messbar verändern.
Optische Sensoren/Messtechnik	Nanostrukturierte Metalloxid-Sensoren durch Templatverfahren für empfindliche und temperaturstabile Gassensoren (z. B. Kohlenmonoxid, Stickoxide, Wasserstoff, Methan).
	Oberflächenplasmonenresonanzspektroskopie zur zerstörungsfreien Charakterisierung dünner Schichten. Anwendung in der Biosensorik, da Bindungsereignisse spezifischer Moleküle an der Oberfläche sensitiv nachgewiesen werden können.
	Hochdynamische und hochauflösende Weißlicht-Interferometer zur Oberflächencharakterisierung von Nanostrukturen und -komponenten.
	Nanometer-Multischichten für strahlformende Röntgenoptiken für die Röntgenanalytik.
	IR-Halbleiterlaserdioden (VCSEL) für Spektrometer zur Gasanalyse.
	Markerfreie Mikroskopie zur präzisen Charakterisierung lebender Zellen und Geweben durch hochauflösende Methoden wie Multiphotonen-Imaging und optische Nahfeldmikroskopie (z. B. Raman-SNOM).
	Faseroptische Sensoren auf Basis farbstoffsensibilisierter Nanodrähte für die hochempfindliche spektral-optische Chemo- und Biosensorik.
Kraftsensoren	Miniatursierte Infrarot-Gassensoren auf Basis von IR-Emittlern mit hoher Emissivität und Oberflächenionisationsdetektoren (OID) unter Nutzung nanoskaliger Oberflächenschichten.
	Polarisationsselektive Sensoren mit optischen Nanostrukturen (z. B. Subwellenlängengitter) als optische Filter, (Vorteil: verbesserte Bildqualität, CMOS-integrierbar) für Anwendungen in der Medizintechnik, industrielle Bildverarbeitung, Fahr-Assistenzsysteme.
Magnetoelektronische Sensoren	Dünnschicht-Dehnungsmesssensoren auf Kunststoff-Substraten mittels Magnetron-Sputtertechnik für den Einsatz im Bereich Wägetechnik und Prothetik.
	Hochempfindliche Kraftsensoren für die Wägetechnik auf Basis ultradünner keramischer Dehnungsmessstreifen mittels nanopartikelbasierter Funktions- und Fügeschichten.
	Magnetoresistive Positions-/Winkel- und Magnetfeldsensoren (GMR-Effekt) für Anwendungen im Automobil- und Maschinenbau sowie in der Elektronik.
Sonstige Sensoren	Magnetoelektronische Sensoren auf Basis des CMR-Effektes (Colossal Magnetoresistive) z. B. für hochpräzise Strommessungen in intelligenten Stromnetzen.
	Herstellung magnetoresistiver GMR-Sensoren durch Bottom-up-Verfahren aus magnetischen Nanopartikeln z. B. durch Siebdruck (Vorteil: Herstellung direkt auf Bauteil, präzise Einstellung magnetischer Eigenschaften).
	Piezo-Positionssensoren mit sub-nm-Positioniergenauigkeit auf Basis piezoelektrischer Materialien.
Sonstige Sensoren	Hochempfindliche thermische Mikrosensoren und Sensor-Gitter durch Integration thermoelektrischer Nanodrähte.
	Nanooptimierte SAW-Sensoren zur kabellosen Bestimmung physikalischer Parameter (Temperatur, Druck, Kraft, Spannung) auch bei extremen Umgebungsbedingungen u. a. durch nanostrukturierte Oberflächen, neue Substrate wie Langasite (Lanthan Gallium Silikate) sowie neue Fertigungsverfahren.

Beispielhafte Übersicht zu branchenspezifischen Anwendungen und Entwicklungen (Legende:  = Anwendung im Markt,  = Forschung und Entwicklung, u. a. im Rahmen von BMBF-Projekten)

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Der Bedarf an Sensorik und Messtechnik hat in vielen wirtschaftlichen Anwendungsfeldern in den letzten Jahren stark zugenommen. Viele technologische Fortschritte in der Automobil-, Sicherheits-, Produktions- oder Medizintechnik sind unmittelbar an verbesserte Sensor- und Messtechniken geknüpft. Das Schlagwort „Ambient Intelligence“ gilt als zukunftsweisendes Konzept eines interaktiven und intelligenten Umfeldes des Menschen, das durch den Einsatz miniaturisierter, in Alltagsgegenstände integrierter und miteinander vernetzter Sensorikkomponenten den menschlichen Alltag sicherer und nach individuellen Gesichtspunkten gestaltbar machen soll. Die Nanotechnologie bietet vielfältige Potenziale zur Entwicklung neuartiger Sensorkonzepte. Damit verbunden sind aber auch erhebliche Herausforderungen im Hinblick auf Datenschutzaspekte und die informelle Selbstbestimmung, wenn es beispielsweise um Anwendungen in der Medizin- oder Überwachungstechnik geht. Weiterhin bestehen auch erhebliche technologische Herausforderungen im Hinblick auf die Erfassung und das Management einer ständig wachsenden Datenflut.

Beispiele für F&E-Projekte und Initiativen

Kompetenznetzwerk für Nanosystemintegration

Das Verbundforschungsprojekt „Kompetenznetzwerk für Nanosystemintegration – Anwendung von Nanotechnologien für energieeffiziente Sensorsysteme“ erhielt als eines

von elf erfolgreichen Initiativen der zweiten Förderrunde des Programms „Spitzenforschung und Innovation in den Neuen Ländern“ den Zuschlag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Ziel der Forschung ist die Entwicklung von Methoden und Technologien für die Integration von Nanostrukturen und funktionalen Materialien in Systemkomponenten, die aufgrund neuer oder verbesserter Funktionalitäten am Markt erfolgreich sein werden. Im Fokus steht dabei die Entwicklung von autonomen Sensorsystemen, bei denen die Energieeffizienz und die Baugröße von zentraler Bedeutung sind. Darüber hinaus sollen aber auch neue, anwendungsübergreifende Technologien entwickelt werden, die in Kooperation mit regionalen Industriepartnern durch die Entwicklung innovativer Produkte vermarktet werden können [120].

Mikro-Nano-Integration als Schlüsseltechnologie für die nächste Generation von Sensoren und Aktoren

Die Fördermaßnahme zielt auf die Entwicklung neuer Prinzipien für die nächste Generation von Sensoren und Aktoren auf Basis der Mikro-Nano-Integration. Dabei sollen neue Funktionalitäten, eine deutliche Verbesserung der Funktionalität von Mikrosystemen, eine Reduzierung der Systemkosten sowie eine weitere Miniaturisierung des Systems erreicht werden. Innovative Ansätze aus der Mikro-Nano-Integration für Sensoren und Aktoren werden sowohl im Sinne von industriell geführten als auch grundlagenorientierten Projekten untersucht und weiterentwickelt [121]. Im Rahmen der Fördermaßnahme werden 25 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit einem Fördervolumen von 22 Mio. € gefördert [122].

5 Sozioökonomische Rahmenbedingungen

Die Entwicklung der Nanotechnologie in Deutschland ist eng gekoppelt mit den sozioökonomischen Rahmenbedingungen auf nationaler und internationaler Ebene. Als Zulieferer sind nanotechnologische Unternehmen stark von der allgemeinen weltwirtschaftlichen Entwicklung abhängig. Nach der Überwindung der Weltwirtschaftskrise ist auch im Nanotechnologiesektor ein deutlicher Nachfrageschub zu verzeichnen. Der zukünftige Erfolg Deutschlands auf den Weltmärkten der Nanotechnologie wird stark von der Wettbewerbsposition im internationalen Vergleich abhängen.

Als Benchmark für die Exzellenz des Nanotechnologiestandortes kann neben der Forschungsförderung die Anzahl und Qualität wissenschaftlicher Publikationen sowie die Zahl der Patentanmeldungen herangezogen werden. Der Schutz geistigen Eigentums, u. a. durch Patente, ist gerade in einem jungen und dynamischen Feld wie der Nanotechnologie von zentraler Bedeutung für die kommerzielle Verwertung von Forschungsergebnissen. Ebenfalls wichtig für den Markterfolg sind gesellschaftliche Rahmenbedingungen wie die öffentliche Wahrnehmung und die Akzeptanz der Nanotechnologie. Speziell beim industriellen Einsatz von Nanomaterialien können sich mögliche Risiken in Bezug auf den Verbraucher-, Arbeits- und Umweltschutz als Hemmnis bei der Vermarktung nanotechnologischer Produkte erweisen. Risikoforschung, Risikomanagement sowie Risikokommunikation sind ein hoher Stellenwert beizumessen. Offene Fragen in der Risikobewertung und der regulatorischen Handhabung der Nanotechnologie sind nur auf supranationaler Ebene lösbar und erfordern eine intensive internationale Abstimmung. Angesichts eines absehbaren Fachkräftemangels in der Nanotechnologie stellen sich auch hinsichtlich der Ausbildung, Qualifizierung und Förderung von Nachwuchswissenschaftlern große Herausforderungen. Im Folgenden werden der Diskussionsstand und aktuelle Entwicklungen der skizzierten Rahmenbedingungen in der Nanotechnologie durch Beiträge ausgewiesener Experten im jeweiligen Fachgebiet dargestellt.

5.1 Leistungsfähigkeit des deutschen Wissenschaftssystems

*Ed Noyons und Nees Jan van Eck
CWTS Universität Leiden, Niederlande*

Das deutsche Wissenschaftssystem in der Nanotechnologie zählt weltweit zu den leistungsfähigsten, gemessen sowohl an der Anzahl als auch dem Einfluss (Impact) wissenschaftlicher Publikationen. Bezogen auf die Anzahl der Nanotechnologie-Publikationen in den letzten zehn Jahren liegt Deutschland auf Platz 4 hinter den USA, China und Japan. Von den Top 10 der Länder mit den höchsten Publikationszahlen weist Deutschland den dritthöchsten Einflussfaktor als Indikator für die Häufigkeit der Zitationen auf.

Im Rahmen einer vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Studie des Zentrums für Wissenschafts- und Technologiestudien der Universität Leiden wurde der Status des deutschen Wissenschaftssystems im Bereich der Nanotechnologie in den letzten zehn Jahren anhand von Publikationsdaten analysiert. Hierbei wurde die Leistungsfähigkeit des deutschen Wissenschaftssystems als Ganzes sowie einzelner Forschungseinrichtungen, d.h. den zusammengefassten Publikationen aller Forschungsgruppen der jeweiligen Institution, untersucht. Ebenso wurden Kompetenzprofile anhand der Methode der bibliometrischen Kartierung ermittelt. Die Eingrenzung des Technologiefeldes und die Suchparameter für die bibliometrische Analyse wurden anhand eines vom VDI TZ entwickelten Definitionsansatzes vorgenommen [123]. Als Datenbasis wurden Publikationen verwendet, die in der Thomson-Reuters Datenbank „Web of Science“ verzeichnet sind.

Alle Indikatoren und Methoden der Studie basierten auf der quantitativen Analyse bibliometrischer Daten, die unabhängig von Experteneinschätzungen eine objektive Basis bilden. In Bezug auf die Anzahl von Nanotechnologie-Publikationen im Zeitraum 2000 bis 2009 liegt Deutschland mit über 30.000 Publikationen weltweit auf dem vierten Platz, hinter den USA, China und Japan. In Bezug auf den Einfluss der Veröffentlichungen, gemessen am Indikator „durchschnittliche Zahl an Zitationen pro Publikation (CPP)“ normiert auf den Referenzwert des jeweiligen Fachgebietes, liegt Deutschland nach den USA und Großbritannien an dritter Stelle der Top 10 Länder mit den meisten Publikationen.

	Land	P	CPP/FCSM
1	USA	96,337	3.62
2	China	52,181	2.03
3	Japan	39,159	1.83
4	Deutschland	32,687	2.36
5	Frankreich	21,364	2.18
6	Großbritannien	19,383	2.42
7	Südkorea	18,878	2.25
8	Russland	13,297	0.88
9	Italien	12,234	2.01
10	Indien	11,450	1.94

Indikatoren der weltweiten Spitzengruppe in Bezug auf Nanotechnologiepublikationen im Zeitraum 2000–2009 (P = Anzahl an Publikationen, CPP/FCSM = Impact, normalisiert nach Fachgebiet, CPP: Durchschnittliche Zitierhäufigkeit pro Publikation (grober Impact), FCSM: Internationaler Referenzwert für das Fachgebiet)

Innerhalb Deutschlands wurden einzelne Forschungsinstitutionen anhand eines Indikatorensets bewertet. Im Zeitraum der betrachteten zehn Jahre finden sich 60 Forschungsinstitutionen mit über 200 Publikationen. Die Publikationsrate der Top 25 dieser Standorte lag bei über 500 Publikationen. Herausragend ist das Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung mit einem sehr hohen (normalisierten) Impact von 4,65 (CCP/FCSM), der mehr als dem Vierfachen des weltweiten Mittelwerts von 1 entspricht. Die größte Anzahl an Publikationen konnte der TU München zugeordnet werden.

	Forschungseinrichtung	P	P10	PS	PN	CCP/FCSM
1	TU München	948	79	0.23	0.15	2.39
2	LMU München	873	153	0.18	0.12	3.26
3	TU Berlin	864	42	0.29	0.21	1.99
4	TU Dresden	857	74	0.25	0.21	2.54
5	MPI für Festkörperforschung	811	113	0.20	0.11	3.34
6	Universität Erlangen	799	93	0.26	0.13	3.07
7	TU Karlsruhe	785	63	0.22	0.19	2.55
8	Universität Ulm	779	60	0.22	0.23	2.26
9	MPI für Polymerforschung	776	61	0.26	0.10	2.61
10	Forschungszentrum Jülich	767	44	0.23	0.18	2.11
11	Universität Duisburg-Essen	755	33	0.24	0.23	2.09
12	Universität Hamburg	747	93	0.19	0.19	2.96
13	Forschungszentrum Karlsruhe	718	68	0.20	0.23	3.10
14	HU Berlin	707	46	0.30	0.32	1.99
15	MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung	675	175	0.18	0.06	4.65

Bibliometrische Leistungsindikatoren der 15 aktivsten deutschen Forschungsinstitutionen der Nanotechnologie (2000–2009)

P10: Anzahl der Publikationen in den oberen zehn Prozent der weltweit am häufigsten zitierten Beiträge in einem Fachgebiet; PS: Anteil der Selbstzitationen; PN: Anteil nicht zitierter Publikationen

Innerhalb der Spitzengruppe deutscher Forschungseinrichtungen hat ein Drittel einen wissenschaftlichen Einflussfaktor, der mehr als dreimal so hoch ist wie der weltweite Durchschnitt. 80 % der Institutionen wiesen sehr robuste Leistungswerte auf in Bezug auf einen hohen Anteil an Veröffentlichungen, die zu den oberen 10 % der am meist zitierten Publikationen im Fachgebiet gehören, und einem geringen Anteil an nicht zitierten Publikationen. Deutlich oberhalb des Durchschnittes in Bezug auf die genannten Indikatoren liegen hier die LMU München, die Universität

Erlangen sowie die Max-Planck-Institute für Festkörperforschung und Kolloid- und Grenzflächenforschung.

Im Rahmen der Studie wurde auch eine Analyse der inhaltlichen Ausrichtung der Forschungsschwerpunkte der Nanotechnologie-Forschungseinrichtungen durchgeführt. Es wurden insgesamt rund 40 Themencluster der Nanotechnologie identifiziert, deren Publikationen in einem inhaltlich ähnlichen Kontext zueinander stehen und die somit eine grobe Struktur des Fachgebiets repräsentieren. Innerhalb der Themenbereiche wurde der Anteil deutscher Publikationen bestimmt. Aus der Analyse ergab sich, dass Deutschland mit einem hohen Anteil in den Themenbereichen „Organische Elektronik“, „Rastersondentechniken“, „elektromagnetische Eigenschaften von Metall-Nanostrukturen“ sowie „optoelektronische Eigenschaften von Quantenstrukturen“ vertreten ist. Einen relativ geringen Anteil an Publikationen weist Deutschland hingegen u. a. in den Bereichen „Kohlenstoffnanoröhren (CNT) und –Komposite“, „CNT-Elektronik“, „Nanostrukturen in der Photovoltaik“ und „Halbleiter-Nanostrukturen“ auf. Die Aussagen basieren hierbei allerdings auf einem Durchschnittswert der letzten zehn Jahre, so dass aktuelle Entwicklungen u. a. durch aktuelle BMBF-Fördermaßnahmen, wie der Innovationsallianz zu Kohlenstoffnanoröhren, sich noch nicht widerspiegeln.

Als Fazit der Studie kann gesagt werden, dass Deutschland über eine exzellente Position im Bereich der Nanotechnologieforschung verfügt. Zahlreiche Nanotechnologiestandorte mit breiter thematischer Ausrichtung sind vorhanden, deren Kompetenz und Leistungen weit über dem weltweiten Mittelwert liegen.

5.2 Patentierung von Nanotechnologie

Dr. Christian Kallinger

Europäisches Patentamt, München

Interdisziplinäre Wissenschafts- und Technologiegebiete wie die Nanotechnologie besitzen großes Potenzial für Innovationen, stellen aber auch alle Beteiligten vor neue Herausforderungen.

Für die Patentämter liegt die Herausforderung darin, dass die Patentanmeldungen aus dem Bereich der Nanotechnologie über viele technische Bereiche verstreut sind. Daraus ergeben sich Konsequenzen für die Recherche zum Stand der Technik und der Sachprüfung, d.h. die Prüfung der Patentfähigkeit einer Erfindung, die im Folgenden dargestellt werden soll.

Kennzeichnung von Nanotechnologepatenten

Um die Recherchen nanotechnologischer Patentdokumente zu erleichtern, d.h. die relevanten Dokumente einfach und schnell identifizieren zu können, hat das Europäische Patent-

amt (EPA) vor einigen Jahren ein Kennzeichnungssystem für neue Technologien entwickelt, den sogenannten Y01N Code. 2011 wurde dieses interne System von der Weltorganisation für geistiges Eigentum (WIPO) in die internationale Patentklassifikation (IPC) übernommen, so dass nun Nanotechnologie weltweit einheitlich klassifiziert werden kann. Die Nanotechnologie-Kennzeichnung ist in acht Gruppen unterteilt, von denen jede einem spezifischen technischen Gebiet zugeordnet ist. Dadurch kann die Anzahl der zu recherchierenden Dokumente auf einen spezifischen Sachverhalt limitiert werden. Die folgende Tabelle zeigt das neue Klassifikationsschema mit den entsprechenden IPC Klassen.

B82Y5	Nanotechnology for nano-medicine
B82Y10	Nanotechnology for information processing, storage and transmission
B82Y15	Nanotechnology for interacting, sensing and actuating
B82Y20	Nanotechnology for optics
B82Y25	Nanomagnetism
B82Y30	Nanotechnology for materials and surface science
B82Y35	Methods and apparatuses for measuring or analysis of nanostructures
B82Y40	Manufacture or treatment of nanostructures

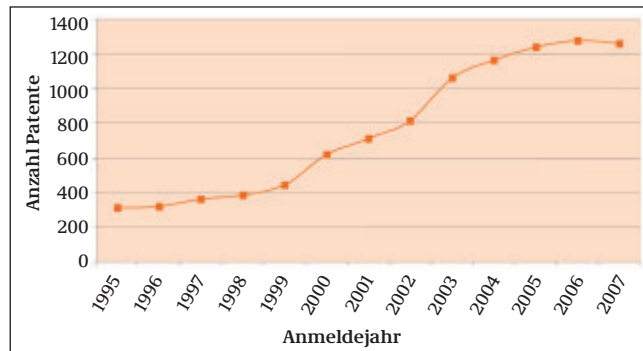
IPC Klassifikationsschema für Nanotechnologie

Die Kennzeichnung ist öffentlich verfügbar und kann bei der Recherche nach Patentdokumenten in der esp@cenet Datenbank unter www.espacenet.com genutzt werden. esp@cenet ist eine kostenlose Internet Datenbank, die der Allgemeinheit vom EPA unentgeltlich zur Verfügung gestellt wird und mehr als 60 Millionen Patentdokumente aus der ganzen Welt enthält. Dokumente mit Nanotechnologiebezug können recherchiert werden, indem das B82Y Kennzeichnungssymbol im ECLA Suchfeld eingegeben wird.

Derzeit sind in den Datenbanken des EPA mehr als 47.000 Patentfamilien, das entspricht mehr als 160.000 Patentdokumenten, als Nanotechnologie gekennzeichnet. Die Kennzeichnung erleichtert jedoch nicht nur interdisziplinäre Recherchen zum Stand der Technik, sondern ermöglicht auch die Beobachtung aktueller Entwicklungen der Zahl der Patentanmeldungen im Bereich der Nanotechnologie. Die Zahl der Nanotechnologieanmeldungen beträgt nur einen geringen Bruchteil des gesamten Anmeldeaufkommens des EPA. Jedoch stiegen die Anmeldezahlen in der Nanotechnologie in den Jahren 2000-2005 schneller an, als die Zahlen für die gesamten Anmeldungen. Erst in den letzten Jahren gleicht sich der Anstieg dem allgemeinen Trend an.

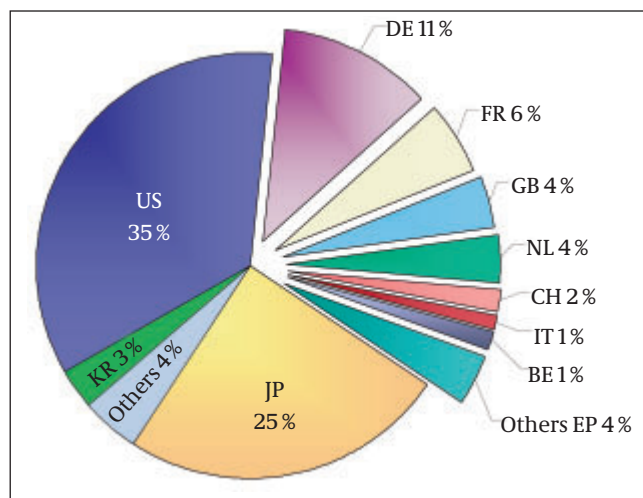
Der Großteil der Anmeldungen aus dem Bereich Nanotechnologie stammt aus den Bereichen B82Y10 (Nanotechnologie für die Informationsverarbeitung), gefolgt von den Bereichen B82Y30 (Nanotechnologie für neue Materialien) und B82Y20 (Nanooptik). Eine detaillierte Analyse der betroffenen IPC Klassen zeigt, dass Patentanmeldungen aus den Bereichen

Halbleitertechnologie, Medizintechnik, Messtechnik und anorganische Chemie über die Hälfte der gesamten Nanotechnologieanmeldungen ausmachen.



Entwicklung veröffentlichter europäischer Nanotechnologie-Patentanmeldungen

Mit Hilfe der Kennzeichnung ist es auch möglich, die regionale Herkunft europäischer Patentanmeldungen (d. h. Anträge auf Patentschutz in Europa – der Antrag kann auch von Antragstellern außerhalb Europas gestellt werden) zu untersuchen.



Aufschlüsselung der europäischen Nanotechnologie-Patentanmeldungen nach Herkunft des Anmelders/Erfinders (1989–2009)

Es zeigt sich, dass Erfinder und Anmelder aus Europa, Japan und den Vereinigten Staaten von Amerika für 95 % der gesamten veröffentlichten europäischen Patentanmeldungen verantwortlich sind. Dabei trägt jede Region ca. ein Drittel zum Gesamtaufkommen bei. Im Ländervergleich führen bei den europäischen Anmeldungen die USA (35 %) vor Japan (25 %). Deutschland steht mit 11 % an dritter Stelle und steht damit an der Spitze der europäischen Länder. Interessant sind diese Zahlen auch im Vergleich mit dem regionalen Ursprung aller, d. h. nicht auf die Nanotechnologie beschränkten Anmeldungen. Hier stammen 27 % aller europäischen Patentanmeldungen aus den USA, 17 % aus Japan und 19 % aus Deutschland.

Internationale Anmelder sind also bei der Patentierung von Nanotechnologie in Europa stärker vertreten als in den klassischen Technologien.

Eine Analyse der Herkunft aufgeschlüsselt nach den technischen Untergruppen der Nanotechnologie zeigt, dass es hier regionale Unterschiede gibt. So dominiert z. B. die Nano-Biotechnologie im europäischen Raum, während die Mehrzahl der Anmeldungen in der Nanoelektronik aus Japan stammt.

Besonderheiten bei der Patentprüfung

Neben oben gezeigten Besonderheiten bei der Recherche lohnt es sich auch, die Besonderheiten zu betrachten, die bei der Prüfung nanotechnologischer Erfindungen im Rahmen des europäischen Erteilungsverfahrens auftreten können.

Grundsätzlich müssen alle europäischen Patentanmeldungen, ungeachtet des technischen Gebietes, die Bedingungen des Europäischen Patentübereinkommens (EPÜ) erfüllen. Um ein Patent zu erhalten, muss die Erfindung:

- **neu sein,**
- **eine erfinderische Tätigkeit beinhalten und**
- **gewerblich anwendbar sein.**

Des Weiteren muss die Erfindung ausreichend offenbart sein und die Ansprüche müssen klar und knapp gefasst und durch die Beschreibung gestützt sein. Im Bereich der Nanotechnologie stellt sich z. B. die Frage, ob Neuheit gegeben ist, wenn eine bereits bekannte Vorrichtung oder ein bekannter Gegenstand verkleinert wird. Eine Vorrichtung gilt somit dann als neu, wenn durch die gezielte Auswahl eines Teilbereichs eines aus dem Stand der Technik bekannten Größenbereichs ein technischer Effekt erzielt oder verstärkt wird, der in dem bekannten Bereich so nicht auftritt (sog. Auswählerfindung). Um patentierbar zu sein, muss eine Erfindung zudem das Produkt einer erfinderischen Tätigkeit sein.

In vielen Fällen sind nanotechnologische Produkte das Ergebnis von spezialisierten Herstellungsverfahren, oder betreffen direkt die Werkzeuge zur Manipulation von Materie im Nanometer- oder sogar molekularen Bereich. Die Anwendungen einiger dieser Methoden auf ein sehr spezielles Problem gehen oft über das allgemeine Fachwissen des sogenannten Durchschnittsfachmanns, oft sogar über das Wissen von Experten, hinaus. Eine ausreichende Offenbarung der Erfindung, d.h. die Angabe von ausreichenden Informationen, wie die Erfindung realisiert werden kann, ist daher in der Nanotechnologie eine sehr wichtige Voraussetzung für die Patentierbarkeit.

5.3 Europäische Nanotechnologieförderung – Neuerungen in den Arbeitsprogrammen

Dr. Olaf Rotthaus

Nationale Kontaktstelle Nanotechnologie, VDI Technologiezentrum GmbH

Neben den deutschen Fördermaßnahmen stellt die europäische Forschungsförderung im 7. Rahmenprogramm (FP-7) eine zweite, wichtige Säule der F&E-Förderung für deutsche Antragsteller dar. Allein in den ersten zwei Jahren (2007–2008) wurden 1,1 Mrd. € in die Nanotechnologieforschung investiert. Wie bereits im 6. Rahmenprogramm, ist auch in den ersten Aufrufen von FP-7 eine hohe Beteiligung und eine gute Erfolgsquote deutscher Antragsteller zu verzeichnen. So liegt bei den geförderten Projekten der ersten drei Ausschreibungsrunden der Anteil der deutschen Partner bei etwa 19 %. Gemessen an den dabei nach Deutschland geflossenen Fördermitteln sind das ca. 22 % der Gesamtfördersumme. Deutsche Antragsteller nehmen damit weiterhin die Spitzenposition im Wettbewerb um europäische Fördergelder ein.

Mit Ablauf des europäischen Nano-Aktionsplans „Nanowissenschaften und Nanotechnologien: Aktionsplan 2005–2009“ [124] und dem Erscheinen des zweiten Durchführungsbereiches Ende 2009 hat ein Prozess der strategischen Neuausrichtung der europäischen Forschungspolitik begonnen [125]. Der Durchführungsbericht empfiehlt, in zukünftigen Ausschreibungen den Anwendungsaspekt stärker zu betonen und sich auf Projekte zu fokussieren, die „kurz- bis mittelfristig Aussichten auf Nutzeffekte, sichere Produkte und eine Verbesserung der industriellen Wettbewerbsfähigkeit“ versprechen. Außerdem rät er zu verstärkten Anstrengungen bei den Regulierungs- und Normungsaktivitäten von Nanomaterialien sowie der Untersuchung ihrer Auswirkung auf die Gesundheit und ihren ökologischen Folgen.

Als eine Folge dieser Neuorientierung wurde mit der 5. Ausschreibungsrunde (Arbeitsprogramm 2011) die Aktivität „Nanotechnologien und Nanowissenschaften“ im NMP-Arbeitsprogramm neu strukturiert. Während sie bisher in die drei Themenbereiche Nanowissenschaften, Nanotechnologien sowie Sicherheits- und Risikoforschung unterteilt war, gelten nunmehr folgende Schwerpunkte:

- **Maximising the contribution of Nanotechnology to sustainable development;**
- **Nanotechnology for benefiting environment, energy and health;**
- **Ensuring the safety of Nanotechnology**
- **Cross-cutting and enabling R&D**

Gegenstand der Förderung

Die ersten beiden Themenbereiche zielen auf eine verstärkte Erforschung der Potenziale der Nanotechnologie für die Lösung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen ab. Das dritte große strategische Thema bleibt die Sicherheit der Nanotechnologie. Der vierte Schwerpunkt ersetzt den bisherigen Bereich „Nanowissenschaften“, allerdings mit einer klar erkennbaren strategischen Neuorientierung hin zur Schaffung von Technologien für die Realisierung marktfähiger Produkte. Als weiterer Schritt in Richtung Industrieorientierung wurden im Rahmen des europäischen Konjunkturprogramms im Jahr 2009 drei „Public-Private-Partnerships“ (PPP) ins Leben gerufen: *Factories of the Future (FoF)*, *Energy-efficient Buildings (EeB)* und *Green Cars (GC)*. Mit diesen Maßnahmen, in die Mittel aus verschiedenen Arbeitsprogrammen einfließen, sollen die besonders von der Wirtschaftskrise betroffenen Wirtschaftszweige Produktion, Bauwesen und Automobilindustrie zwischen 2010 und 2013 mit rund 3,2 Mrd. € unterstützt werden.

Außerdem wurde im Juni 2010 „*Nanofutures*“ als „European Integrated Technology Platform“ gegründet. Nanofutures stellt damit eine Art Dach-ETP dar, die alle europäischen Technologieplattformen (ETPs) im Bereich der Nanotechnologie gruppiert. Sie soll als Treiber für übergeordnete Themen der industriellen Anwendung der Nanotechnologie agieren und dient als gemeinsamer Ansprechpartner für die Kommission.

5.4 Nanotechnologie im internationalen Vergleich

David Hwang

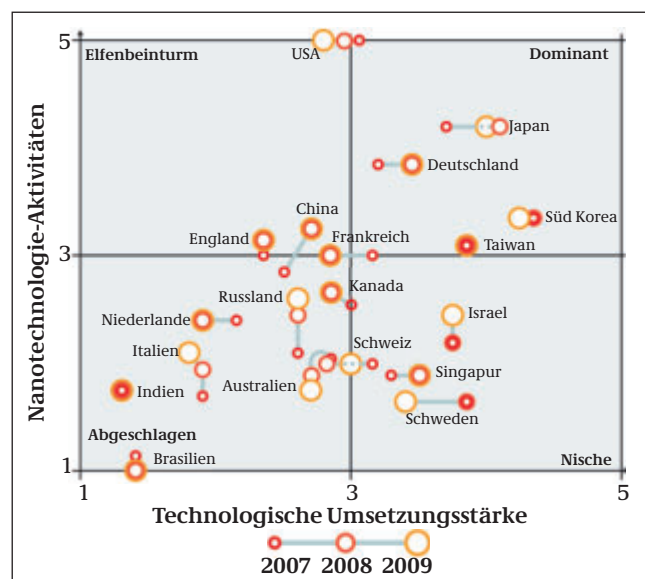
Lux Research Inc.; New York (USA)

Internationale Kooperationen in der Nanotechnologie sind aus der Perspektive nationaler Innovationssysteme, Forschungsinstitutionen und Unternehmen von hoher Bedeutung, um eigene Aktivitäten und Kompetenzen zu ergänzen und Synergien zu nutzen. Für effiziente internationale Kooperationen ist ein objektiver Bewertungsrahmen für die Einschätzung der nationalen Nanotechnologieaktivitäten weltweit erforderlich. Angesichts einer starken Zunahme der Bedeutung der Nanotechnologie für Forschungsstrategien auf staatlicher und unternehmerischer Ebene hat Lux Research basierend auf einer Reihe von Marktreports [126] ein internationales Benchmarksystem entwickelt und 19 Länder gemäß eines vorgegebenen Kriterienrasters bewertet. Dabei handelt es sich um eine zweidimensionale Bewertungsmatrix, bei der die absolute Höhe der Nanotechnologie-Aktivitäten sowie die technologische Umsetzungsstärke anhand eines definierten Indikatorensets bewertet werden [127].

Der Faktor *Nanotechnologie-Aktivitäten* wird dabei anhand von acht Nanotechnologie-spezifischen Indikatoren ermittelt, die ein absolutes Maß für Kompetenzen und Ressourcen des Nanotechnologiesektors im jeweiligen Land darstellen.

Zu diesen Indikatoren zählen das Vorhandensein und der Umfang einer staatlichen Nanotechnologieinitiative, die Höhe der Fördermittel und des verfügbaren Risikokapitals, der Forschungsinvestitionen von Unternehmen, die Anzahl der Forschungszentren, der Publikationen, der Patente und der aktiven Nanotechnologieunternehmen. Die Bewertung erfolgt nach absoluten Zahlen, so dass größere Länder tendenziell höher bewertet werden als kleinere.

Der Faktor „Technologische Umsetzungsstärke“ beschreibt die allgemeine Stärke der Innovationsfähigkeit einer Nation und wird anhand von sechs Indikatoren ermittelt, zu denen die relative Größe des Hochtechnologiesektors, die F&E-Ausgaben, die Anzahl an naturwissenschaftlich-technischen Hochschulabschlüssen und Forschungspersonal, die Bilanz der Zu- und Abwanderung qualifizierter Arbeitnehmer sowie die Qualität der technischen Infrastruktur zählt. Die technologische Umsetzungsstärke wird dabei auf das jeweilige Bruttonationaleinkommen bzw. die Einwohnerzahl normiert. Die Länder wurden entsprechend der Ausprägung der jeweiligen Faktoren in eine Skala von 1 bis 5 für den schlechtesten bzw. den besten Wert eingeteilt. Die Ergebnisse der Bewertung und die zeitliche Entwicklung von 2007 bis 2009 sind in der folgenden Matrix dargestellt.



Internationale Einordnung der Nanotechnologie-Aktivitäten und der technologischen Umsetzungsstärke ausgewählter Länder (Quelle: Lux Research)

Große Unterschiede in der internationalen Nanotechnologielandschaft

Die Einschätzung der individuellen Nanotechnologie-Stärke der untersuchten 19 Nationen liefert ein sehr differenziertes Bild. Die USA werden hinsichtlich der Nanotechnologie-Aktivitäten in allen Faktoren am stärksten bewertet. Zu den Stärken zählt eine gut koordinierte und finanziell ausgestattete Nanotechnologie-Initiative (NNI: National Nanotechnology initiative), die eine ausdifferenzierte Forschungslandschaft

und eine dynamische Start-up-Szene hervorgebracht hat. Auch das Engagement der Privatwirtschaft, vor allem internationaler Konzerne wie 3M, IBM oder Intel, ist weltweit führend, sowohl in Bezug auf F&E-Investitionen in Milliardenhöhe als auch tausender Patentanmeldungen pro Jahr. Die technologische Umsetzungsstärke der USA wird allerdings nur durchschnittlich bewertet. Ursachen hierfür sind der relativ geringe Output des Hoch- und Mitteltechnologiebereiches sowie die im Vergleich zu anderen Nationen durchschnittlichen Werte für F&E-Quoten und die Anzahl an Forschern in Relation zum Bruttosozialprodukt. Die Quote der Universitätsabsolventen im technisch-wissenschaftlichen Bereich pro Einwohner gehört zu den geringsten der betrachteten Gruppe und liegt damit weniger als halb so hoch wie in Taiwan, Südkorea und Singapur und sogar nur ein Drittel so hoch wie in Russland. Dies könnte sich langfristig negativ auf die technologische Entwicklungsstärke der USA auswirken. Auf der anderen Seite weist die USA die geringste Emigrationsquote wissenschaftlicher Absolventen aller betrachteten Länder auf, d.h. die USA gelten weltweit als attraktivster Standort für ausländische Akademiker und profitieren von einem Nettozuzug hochqualifizierter ausländischer Fachkräfte.

Japan hat die zweithöchsten Bewertungen in Bezug auf die Stärke der Nanotechnologie-Aktivitäten. Im Vergleich zu den USA werden weniger Fördermittel bereit gestellt und die Aktivitäten sind im Vergleich zur US-Nanotechnologie-Initiative weniger gut koordiniert. Dies wird allerdings durch ein Netzwerk von Forschungszentren mit ausgeprägten Nanotechnologie-Aktivitäten und einem Technologie-orientierten Privatsektor ausgeglichen. In der Anzahl der Patente liegt Japan weltweit an zweiter Stelle und Konzerne wie Toray und Sumitomo sind sehr aktiv in der Nanotechnologieentwicklung und -kommerzialisierung. Im Vergleich zu 2008 ist Japan in Bezug auf die technologische Umsetzungsstärke leicht zurückgefallen, was auf eine verbesserte Infrastruktur in anderen Ländern zurückzuführen ist, so dass sich der relative Vorsprung von Japan abgeschwächt hat. Dennoch zählt Japan diesbezüglich weiterhin zur Weltspitze und ist ein attraktiver Standort für die Kommerzialisierung der Nanotechnologie, nicht zuletzt aufgrund der kontinuierlich hohen F&E-Ausgaben und starken Ausprägung des Hoch- und Mitteltechnologiebereiches, der ca. 20 % des Bruttosozialproduktes ausmacht. Positiv schlägt für Japan die große Anzahl technischer Arbeitskräfte zu Buche, ebenso wie eine sehr geringe Emigrationsquote von technischen Akademikern.

Deutschland hat seit 2007 weltweit den dritten Platz in Bezug auf die Bewertung der Nanotechnologie-Aktivitäten gehalten. Die deutsche Nanotechnologie-Initiative koordiniert und fördert die Entwicklung der Nanotechnologie in einem ressortübergreifenden Ansatz. Wie auch andere europäische Staaten profitiert Deutschland von den Fördermitteln der Europäischen Kommission aus dem 7. Forschungsrahmenprogramm. Die öffentliche Förderung der Nanotechnologie lag 2009 weltweit an fünfter Stelle und auch bei allen anderen Nanotechnologie relevanten Faktoren schnitt Deutschland

im obersten Fünftel der Bewertungsskala ab. In Bezug auf die technologische Entwicklungsstärke erzielt Deutschland einen Wert von 3,45 und wird damit besser als andere europäische Staaten eingeschätzt. In Bezug auf die F&E-Quoten, den technischen Arbeitskräften, den technischen Akademiker-Abschlüssen und der Emigrationsrate liegt Deutschland im Mittelfeld. In Bezug auf den Hoch- und Mitteltechnologiebereich mit ausgeprägten Stärken im Automobil-, Chemie- und Materialsektor gehört Deutschland zusammen mit Japan und Südkorea zur Spitzengruppe. Zusammen mit der hochentwickelten Infrastruktur liegt Deutschland damit deutlich über dem Durchschnitt.

Chinas Nanotechnologie-Aktivitäten haben sich in den letzten Jahren verstärkt. Das Thema ist in vielen nationalen Strategieplanungen verankert und die öffentlichen und privaten Investitionen sind in den letzten Jahren stark angewachsen, allerdings ohne eine übergreifende Koordinierung. Die Anzahl der wissenschaftlichen Publikationen ist enorm gestiegen, allerdings ohne Auswirkung auf die weiterhin geringe Anzahl an Patentanmeldungen. Der einem Anstieg von Publikationen üblicherweise folgende Anstieg der Patentanmeldungen könnte in China angesichts eines geringen Anreizes von Patentanmeldungen für Forscher und eines insgesamt schwach ausgeprägten Patentschutzsystems ausbleiben. In China aktive Nanotechnologie-Firmen umfassen fast ausschließlich Nanomaterialhersteller wie Shanghai Huzheng Nano Technology Co. oder Tianjin Tianhezhongxin Chemicals Co. Dies legt den Schluss nahe, dass Chinas Forschungsanstrengungen bislang wenig kommerziell verwertbare Ergebnisse erzielt haben. Chinas technologische Entwicklungsstärke hat sich im Vergleich zu 2008 und relativ zu den anderen Nationen nicht weiter verbessert. Die Anzahl der technischen Akademikerabschlüsse ist zwar zwischen 2005 und 2009 um 50 % gestiegen, die Infrastruktur wächst in atemberaubendem Tempo und die Emigrationsquote hat sich durch im Ausland ausgebildete und wieder nach China zurückkehrende Wissenschaftler verbessert; allerdings wird die geringe F&E-Quote als substanzielles Hemmnis betrachtet, was darauf hindeutet, dass die chinesische Wirtschaft längerfristig auf Nachahmer-Produkten und billigen Massenprodukten fokussiert bleiben wird. Eine Intensivierung der Forschungsaktivitäten ist erforderlich, um eine langfristige Wachstumsstrategie aufrecht zu erhalten.

Russland hat sich in Bezug auf die Nanotechnologie-Aktivitäten in 2009 nach einem größeren Sprung in 2008 leicht auf einen Wert von 2,6 verbessert. Die 2007 gegründete staatliche Investitionsgesellschaft Rosnano stellt erhebliche Finanzmittel bereit, um Forschung und Kommerzialisierung im Bereich der Nanotechnologie zur Stärkung der Wirtschaftskraft des Landes zu fördern. Als unmittelbare Folge daraus konnten die Bewertungen im Hinblick auf die Nanotechnologie-Forschungszentren sowie die Anzahl der Publikationen verbessert werden. Fortschritte in der Kommerzialisierung sind allerdings erst in einigen Jahren zu erwarten. Generell ist die russische Wirtschaft weiterhin stark vom Rohstoffexport

abhängig und der Technologiesektor wurde lange vernachlässigt. Die hohe Zahl an Forschern und der Anteil an technischen Hochschulabsolventen werden nicht effizient eingesetzt und viele Hochqualifizierte wandern ins Ausland ab. Als Folge daraus wird Russland in Bezug auf die technologische Entwicklungsstärke mit einem unterdurchschnittlichen Wert von 2,9 bewertet.

Israels Nanotechnologie-Initiative fokussiert eine starke Zusammenarbeit zwischen dem Forschungssektor und dem Privatsektor und hat dadurch den Kommerzialisierungsaktivitäten einen Schub gegeben. Israel erhöht damit seine Attraktivität als internationaler Kooperationspartner. Auch Italien zeigt einen Aufwärtstrend in den Nanotechnologie-Aktivitäten aufgrund einer erhöhten Zahl an Nanotechnologie-Forschungszentren und Nanotechnologie-Unternehmen.

5.5 Studienangebot und Nachwuchsförderung in der Nanotechnologie

Innovationen aus der Nanotechnologie tragen maßgeblich zur Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands bei. Für deren Entwicklung und Umsetzung in marktfähige Produkte werden dringend innovative Ideen und qualifizierte Fachkräfte gebraucht. Die Nanotechnologie bietet gute Aussichten auf zukunftssichere Arbeitsplätze mit attraktiven Karrierechancen. Verstärkt gefragt sind Spitzenforscher ebenso wie junge Menschen, die sich für Forschung, Entwicklung und innovative Anwendungen in Unternehmen der Nanotechnologie interessieren und ihre Studien- und Berufswahl entsprechend ausrichten. Nanospezifische Bildungsangebote zu initiieren, transparent zu machen und zu deren Attraktivität beizutragen, ist ein Anliegen des Aktionsplans Nanotechnologie 2015.

Studienangebot Nanotechnologie

Faszinierende Einblicke in die Welt der aller kleinsten Teilchen der Materie ermöglicht ein Studium der Nanotechnologie. Speziell auf Nanotechnologie ausgerichtet sind derzeit 30 eigenständige, interdisziplinär ausgerichtete Studiengänge. Das Spektrum Ausbildung reicht von Physik über Chemie und Biologie bis zur Elektronik, die in den einzelnen Nano-Studiengängen unterschiedlich gewichtet werden. Grundsätzlich kann zwischen eher naturwissenschaftlichen und eher ingenieurwissenschaftlichen Ausrichtungen gewählt werden. Oftmals werden regionale wirtschaftliche Anforderungen bei der Entwicklung der Studiengänge mit berücksichtigt und spezielle Profile entwickelt, die gelegentlich auch auf Beschäftigte zielen und berufsbegleitend zur Fortbildung genutzt werden können.

Als Besonderheit bietet beispielsweise die Universität Stuttgart seit 2010/11 „Nano- und Optoelektronik & Leistungselektronik“ als Studiengang an, der wahlweise in Vollzeit oder

berufsbegleitend in Teilzeit absolviert werden kann. Beschäftigte in Nano- und Biotechnologieunternehmen können über ein Fernstudium ihr Wissen an der TU Kaiserslautern auf den neuesten Stand bringen. Das zweisemestriges berufsbegleitende Studium wird mit einem Zertifikat abgeschlossen.

Informationen zu Fachbereichen, die Nanotechnologie vermitteln sowie Portraits der Nano-Studiengänge und Weiterbildungsträger, die Nanotechnologie im Angebot haben, sind unter www.nano-bildungslandschaften.de verfügbar. Grundlagen der Nanotechnologie werden in einer Vielzahl von Vorlesungen und Seminaren zumeist in den Fachbereichen Physik, Chemie, Materialwissenschaften/Werkstoffe, Elektrotechnik/Informatik und Ingenieurwissenschaften vermittelt.



Studiengänge zur Nanotechnologie an deutschen Universitäten und Fachhochschulen (Quelle: VDI TZ GmbH)

Beschäftigungsmöglichkeiten

Eine Hochschulausbildung in der Nanotechnologie bietet interessante Arbeitsfelder in Unternehmen zahlreicher Branchen wie z. B. Chemie, Informationstechnik, Pharmazie ebenso wie Maschinenbau, Energietechnik, Elektronik oder Medizin. Weitere Beschäftigungsfelder ergeben sich an Hochschulen in Forschung und Lehre sowie in Verbänden und Behörden, beispielsweise in den Bereichen Gesundheit, Umwelt und Klimaschutz.

Nachwuchsförderung in der Nanotechnologie

Projekträger Jülich – Geschäftsbereich NMT

Dr. Hans-Jörg Clar

Die Nanotechnologie hat in Hochtechnologieländern wie Deutschland als Technologiefeld mit großer Innovationskraft und Querschnittswirkung eine herausragende Bedeutung. Hoch qualifizierter wissenschaftlicher Nachwuchs ist in diesen Technologiefeldern, die ein hohes Anwendungspotenzial und bedeutende Märkte erschließen können, besonders wichtig. Hier sucht die Industrie qualifizierte Fachkräfte, die neueste Erkenntnisse in die Anwendung bringen. An den Hochschulen werden engagierte junge Akademiker für die Forschung und Lehre gesucht. Die Förderung von exzellentem wissenschaftlichen Nachwuchs stellt deshalb einen Schwerpunkt in der HighTech-Strategie der Bundesregierung dar.

Fördermaßnahme

Mit dem Nachwuchswettbewerb „NanoFutur“ unterstützt das BMBF seit 2002 die Gewinnung exzellenter Nachwuchswissenschaftler für Forschung und anwendungsorientierte Entwicklung in der Nanotechnologie. Die Förderung soll junge Forscher nach ihrer Promotion in die Lage versetzen, innovative Ideen im Rahmen eines eigenen Forschungsprojekts zu verfolgen, das Anwendungspotenzial auszuloten und die industrielle Nutzung vorzubereiten. Sie sind damit für die Industrie die qualifizierten Forschungspartner von morgen.

Die jungen Wissenschaftler erhalten nach ihrer Promotion und erster Forschungserfahrung mit dieser Fördermaßnahme die Möglichkeit, eine eigene Nachwuchsgruppe aufzubauen. Sie können ihre wissenschaftliche Exzellenz in einem anspruchsvollen Forschungsprojekt unter Beweis stellen und Erfahrung in Projektmanagement und Personalführung sammeln. Projekt und Nachwuchsgruppe sind an einer deutschen Forschungseinrichtung angesiedelt, die frei wählbar ist und eine gute Infrastruktur mit Arbeitsplatz, Verwaltung, Ausstattung, etc. bereitstellt. Die Förderung wird über fünf Jahre gewährt.

Erfolge

Mittlerweile sind 29 Arbeitsgruppen im Rahmen dieser Fördermaßnahme eingerichtet worden. Das ist das Ergebnis von drei Wettbewerbsrunden mit insgesamt 115 Bewerbungen. Das BMBF hat für die Fördermaßnahme bisher insgesamt 42 Mio. € zur Verfügung gestellt. Die Fördermaßnahme ist

ein erfolgreiches Karriere-Sprungbrett: Von den 29 geförderten Nachwuchsforschern haben inzwischen 13 einen Ruf auf eine Professur erhalten und angenommen. Daneben sind fünf Ausgründungen von jungen Unternehmen erfolgt. Erfolgsgeschichten und Portraits der Nachwuchsforscher aus der bisherigen Förderung in NanoFutur sind in der Broschüre „Nachwuchs für die Nanotechnologie“ aktuell zusammengestellt. Im Blickpunkt der Text- und Bildbeiträge stehen dabei die Forschungsprojekte mit ehrgeiziger Zielsetzung und Ergebnisberichten, insbesondere aber auch die Person des Nachwuchsforschers. Die Broschüre kann über den Pressedienst des BMBF oder vom Projekträger bezogen werden.

Ausblick

Mit der Bekanntmachung des BMBF vom 19. Juli 2011 ist eine weitere Förderrunde mit dem Titel NanoMatFutur initiiert worden. Im Zuge einer thematischen Neuausrichtung sind dabei die Themengebiete von der Nanotechnologie auf die Werkstoffforschung einschließlich Chemie und Nanotechnologie erweitert worden. Die Nachwuchsförderung wird somit das Rahmenprogramm „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING“ in Gänze abdecken. Aktuelle Informationen sind unter der Webseite dieser Fördermaßnahme zu finden: www.ptj.de/nanofutur oder auf der Homepage des BMBF www.bmbf.de.



Erfolgreicher Nachwuchswissenschaftler: Prof. Dr. Rainer Haag, Institut für Chemie und Biochemie, FU Berlin (Quelle: Projekträger Jülich)

5.6 Risikoforschung zu Nanomaterialien

Dr. Christoph Steinbach
DECHEMA e.V.

Den Akteuren in der Nanotechnologie war frühzeitig klar, dass für eine verantwortungsvolle und sichere Nutzung dieser neuen Technologie eine fundierte Risikoforschung unerlässlich ist. Begleitend zur anwendungsorientierten Forschung wurde die Risikoforschung in der Nanotechnologie vor mehr als einem Jahrzehnt fest etabliert und – mit wachsendem Einsatz von Nanomaterialien in praktischen Anwendungen – weiter intensiviert. Auch die Industrieunternehmen bekennen sich zur Risikoforschung als integralen Teil der Produktentwicklung.

Sicherheitsforschung zu Nanomaterialien wird oft abgeleitet aus der Forschung zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Stäuben und Feinstäuben. Dabei wird untersucht, ob ein Nanomaterial einerseits ein toxisches Potenzial aufweist (Gefährdung), andererseits, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Nanomaterial in Kontakt mit einem Anwender kommt (Exposition). Das Risiko für einen Anwender berechnet sich dann aus den beiden Parametern Gefährdung und Exposition. Es liegen bereits zahlreiche Informationen zur Sicherheit von Nanomaterialien vor. Wie bei jeder neuen Technologie muss aber der Wissensstand kontinuierlich weiter ausgebaut werden. Eine aktuelle exemplarische Übersicht zur Historie von entsprechenden Projekten findet man in einem Statuspapier „10 Jahre Sicherheitsforschung an Nanomaterialien“ von VCI und DECHEMA [128].

Das BMBF hat mit dem Projekt NanoCare im Jahr 2006 einen international viel beachteten Weg aufgezeigt: Es war damals das größte und finanziell bestausgestattete Projekt zur Sicherheitsforschung, zumindest in Europa. Untersucht wurden Nanomaterialien, die im Markt verfügbar und somit für die Risikoforschung mit Bezug auf Anwender und Verbraucher am relevantesten sind. Für die im NanoCare-Projekt untersuchten Nanomaterialien konnten im Vergleich zu gröber strukturierten Materialien keine außergewöhnlichen Gefährdungen, vor allem keine nanospezifischen Risiken, festgestellt werden. Zusätzlich wurden im NanoCare-Projekt Standard-Arbeitsanweisungen aufgestellt, die ein wissenschaftlich fundiertes Arbeiten erleichtern sollen und im Internet als Hilfestellung auch für andere Projekte zur Verfügung stehen.

Mit den im Jahr 2009 veröffentlichten Fördermaßnahmen NanoNature und NanoCare hat das BMBF erneut wesentliche Eckpunkte einer nachhaltigen Risikoforschung in der aktuellen Förderstrategie verankert. Von den bislang 19 Projekten mit über 120 Projektpartnern und einer Fördersumme von 36 Mio. Euro können die meisten der Risikoforschung zu Nanomaterialien, z. B. deren Auswirkungen auf die Umwelt bzw.

den Menschen, zugeordnet werden. In einigen Projekten wird auch die Wirkung nanoskaliger Materialien auf umweltschädliche Substanzen untersucht, z. B. beim Abbau von Schadstoffen mit Hilfe von nanoskaligen Katalysatoren. Die Projekte sind in der Mehrzahl Mitte 2010 angelaufen.

Details zu den vom BMBF geförderten Projekten sowie zu öko- und humantoxikologischen Eigenschaften von Nanomaterialien sind im Internet auf der Website www.nanopartikel.info nachzulesen, die ebenfalls mit Hilfe der BMBF-Förderung erstellt und betrieben wird. Hier werden die Inhalte der aktuellen Risikoforschung an Nanomaterialien für den interessierten Laien und den fachfremden Wissenschaftler aufbereitet. Daneben werden Richtlinien entwickelt, um fundierte wissenschaftliche Forschung zu fördern. Damit soll die Qualität von Studien im Hinblick auf realistische Expositionsbedingungen und -mengen sichergestellt werden.



Screenshot der BMBF-Internetseite zur Sicherheitsforschung von Nanomaterialien (Quelle: www.nanopartikel.info)

Trotz der Bemühungen der Nanotechnologie-Forscher und -Entwickler um transparente Forschung ist die Diskussion über die Sicherheit von Nanomaterialien längst nicht abgeschlossen. Allen Beteiligten ist klar, dass die Risikoforschung weiter geführt werden muss, um das Wissen über die Risikotaspekte von Nanomaterialien auszubauen und zu festigen. Eine Versachlichung der Diskussion ist erforderlich, um zu vermeiden, dass die Umsetzung nachhaltiger Nutzenpotenziale der Nanotechnologie in der Alltagswelt durch eine Verunsicherung der Bevölkerung behindert oder sogar verhindert wird. Mit einer fachlich fundierten Sicherheitsforschung, deren Ergebnisse auch der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen, leistet das BMBF hierzu einen wesentlichen Beitrag.

5.7 Internationale Maßstäbe der OECD für die Sicherheit von Nanomaterialien

Klaus Günter Steinhäuser

Umweltbundesamt Dessau-Roßlau

Im Jahr 2006 setzte die OECD die „Working Party on Manufactured Nanomaterials“ (WPMN) ein mit dem Ziel, international abgestimmte Methoden und Strategien zu entwickeln, um die potenziellen Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien zu erfassen und zu beherrschen. Grund für diese Entscheidung war die Unsicherheit in allen Industriestaaten, in Bezug auf Fragen der Sicherheit mit der rasanten Entwicklung der Nanotechnologie nicht Schritt halten zu können. Immer deutlicher wurden die Hinweise, dass nanoskalige Materialien sich hinsichtlich Umweltverhalten und Toxizität anders verhalten als größer strukturiertes Material. Die Working Party macht es sich zur Aufgabe, Methoden zur Gefahren-, Expositions- und Risikobewertung von Nanomaterialien zu sammeln, die wissenschaftsbasiert und international harmonisiert sind. Die Ergebnisse sollen den beteiligten Ländern helfen, Maßnahmen zum sicheren Umgang mit Nanomaterialien zu ergreifen. Die Arbeitsergebnisse sind auch öffentlich zugänglich (www.oecd.org/env/nanosafety).

Die fachliche Arbeit wird in acht Arbeitsgruppen (Steering groups, SG) geleistet, die sich folgenden Themen widmen:

Die SG 1/2 ist für die OECD Projektdatenbank zur Information und Analyse über die Nanosicherheitsforschung verantwortlich: In dieser Datenbank sind inzwischen mehr als 750 Projekte zur Nanosicherheitsforschung enthalten und recherchierbar. Sie sollen sowohl Wissenschaftlern als auch Regulatoren und anderen interessierten Personen als Arbeitshilfe dienen und ermöglichen, die Forschungsanstrengungen miteinander abzustimmen und Lücken zu erkennen [129].

Kernstück der Aktivitäten der WPMN ist die Sicherheitsprüfung von 13 wichtigen und verbreiteten Nanomaterialien (SG 3). Verschiedene Mitgliedstaaten bilden Konsortien für jeweils einen Stoff und finanzieren gemeinsam die Testung nach insgesamt 59 Prüfkriterien zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften, zur Toxizität und Ökotoxizität sowie zum Umweltverhalten. Deutschland ist für die Koordination des Testprogramms zu Titandioxid verantwortlich und beteiligt sich stark an der Prüfung von Nanosilber. Ziel sind gesicherte Ergebnisse bis Ende 2011, die über das Gefahrenpro-

fil Auskunft geben. Dies ist notwendig, da die aktuellen Daten zu Nanomaterialien oft widersprüchlich und schwer interpretierbar sind. Diese Aktivität ist eng verknüpft mit der Anpassung und Entwicklung von Testverfahren für Nanomaterialien (SG 4). Die OECD hat mit ihren Testrichtlinien für Chemikalien herausragende Bedeutung für die internationale Chemikaliensicherheit. Weiterhin trägt die SG 7 zu dieser Aktivität mit alternativen, tierversuchsfreien Testverfahren und Teststrategien bei.

Gruppe	Name	Aufgabe
SG 1/2	Datenbank zur Information und Analyse der Nanosicherheitsforschung	Qualitätsgesicherte Datenbank für Projekte der Sicherheitsforschung zum Informationsaustausch und zur Identifizierung von Schwerpunkten und Lücken
SG 3	Prüfung einer repräsentativen Auswahl synthetischer Nanomaterialien	Prüfungsprogramm für 13 Nanomaterialien; Gewinnung gesicherter Daten
SG 4	Synthetische Nanomaterialien und Testrichtlinien	Überarbeitung/ Anpassung von OECD-Testverfahren; Identifizierung zusätzlicher Verfahren
SG 5	Zusammenarbeit bei freiwilligen und regulatorischen Programmen	Sammlung und Analyse nationaler Programme zur Sicherheit bei Nanomaterialien
SG 6	Zusammenarbeit bei der Risikobewertung	Fallstudien zur Risikobewertung und Identifizierung spezieller Kriterien
SG 7	Alternative Testmethoden in der Nanotechnologie	Entwicklung von Teststrategien mit tierversuchsfreien Verfahren
SG 8	Expositionsmessung und Expositionsminimierung	Richtlinien für die Exposition von Beschäftigten, Verbrauchern und Umwelt
SG 9	Nachhaltige Nutzung synthetischer Nanomaterialien	Fallstudien zur lebenszeitbezogenen Bewertung der Vor- und Nachteile von Nanoanwendungen in Bezug auf Umwelt und Gesundheit

Übersicht zu den Steering Groups (SG) der OECD WPMN

	Sponsoren	Ko-Sponsoren	Beitragende Staaten
Fullerene (C60)	Japan, USA		Dänemark, China
SWCNT (einwandige Kohlenstoff-nanoröhren)	Japan, USA		Kanada, Frankreich, Deutschland, EC, China, BIAC
MWCNT (mehrwandige Kohlenstoff-nanoröhren)	Japan, USA	Korea, BIAC	Kanada, Frankreich, Deutschland, EC, China
Silber	Korea, USA	Australien, Kanada, Deutschland, Nordischer Ministerrat	Frankreich, Niederlande, EC, China, BIAC
Eisen/Eisen-oxide	China	BIAC	Kanada, USA, Nordischer Ministerrat
Titandioxid	Frankreich, Deutschland	Österreich, Kanada, USA, Korea, Spanien, EC, BIAC	Dänemark, Japan, UK, China
Aluminium-oxid	[USA]		Deutschland, Japan
Cerdioxid	USA, UK/BIAC	Australien, Niederlande, Spanien	Dänemark, Deutschland, Japan, Schweiz, EC
Zinkoxid	UK/BIAC	Australien, USA, BIAC	Kanada, Dänemark, Japan, Niederlande, Spanien, EC, Deutschland
Silicium-dioxid	Frankreich, EC	Belgien, Korea, BIAC	Dänemark, Japan
Dendrimere	k. A.	Spanien, USA	Österreich, Korea
Nanotone	BIAC, [USA]		Dänemark, EC
Gold	Südafrika	Korea, USA	EC

Überblick zu Nanomaterialien im Rahmen der Sicherheitsprüfung der OECD WPNM

Die Aktivitäten der WPMN werden komplettiert durch die SG 8, die Fragen der Expositionsmessung und -minderung bearbeitet. Richtlinien für die Exposition am Arbeitsplatz sind bereits erarbeitet: für die Exposition der Umwelt sowie von Verbrauchern sind demnächst Publikationen zu erwarten. Exemplarische Ansätze zur Risikobewertung werden von der SG 6 zusammengestellt und „critical issues“, die bei der Risikobewertung von Nanomaterialien zu beachten sind,

identifiziert. Die SG 5 verschafft durch einen Vergleich der regulatorischen und freiwilligen Programme in den OECD-Ländern einen Überblick und trägt damit zu einem international abgestimmten Vorgehen bei.

Die WPMN sieht in Nanomaterialien jedoch nicht nur Risiken für Gesundheit und Umwelt. Deshalb wurde als jüngste Gruppe die SG 9 gegründet, die an ausgewählten Beispielen untersuchen soll, welcher Nutzen für Umwelt und Gesundheit sich aus einigen Nanoanwendungen ergeben kann und in welchem Verhältnis dieser Nutzen zu den potenziellen Risiken steht. Dabei soll möglichst der gesamte Lebenszyklus der ausgewählten Nanomaterialien betrachtet werden.

Die Vielfalt der Aktivitäten und die engagierte Mitarbeit der beteiligten Staaten und Gruppen macht die WPMN zu einem sehr dynamischen Forum zur Erarbeitung internationaler Regeln für einen sicheren Umgang mit Nanomaterialien. Das Testprogramm wird eine gemeinsame Grundlage valider Ergebnisse liefern, die bei der Einschätzung helfen, inwieweit sich Nanomaterialien von grobkörnigem Material unterscheiden. Auf diese Weise können die Mitgliedsländer ihre Maßnahmen zur Nanosicherheit auf wissenschaftlicher Grundlage entwickeln. Auch die Industrie beteiligt sich engagiert und erhält einen Einblick, was sie beachten muss, um Nanomaterialien in verantwortlicher Weise weiterzuentwickeln. Dass die OECD dabei den Blick auch auf die Vorteile für Umwelt und Gesundheit durch nanotechnologische Anwendungen richtet, erhöht den Wert im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung dieser innovativen Technologie.

5.8 Öffentliche Wahrnehmung von Risiken, Chancen und Nutzen der Nanotechnologie

PD Dr. Gaby-Fleur Böhl, Dr. Mark Lohmann
Bundesinstitut für Risikobewertung

Das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) hat sich frühzeitig der Frage gewidmet, wie die Nanotechnologie von der Bevölkerung und in den Medien wahrgenommen wird. Das BfR hat seit 2006 eine Delphi-Expertenbefragung zu „Risiken nanotechnologischer Anwendungen in den Bereichen Lebensmittel, Kosmetika und Bedarfsgegenstände“, eine Verbraucherkonferenz, eine repräsentative Bevölkerungsbefragung sowie eine Analyse der Medienberichterstattung zur Wahrnehmung der Nanotechnologie durchgeführt [132]. Die Auswertung der Studien ergab, dass sowohl in der Bevölkerung als auch in der medialen Berichterstattung vorwiegend Chancen thematisiert werden, wohingegen Risiken deutlich seltener erwähnt werden. Insbesondere in den Printmedien wird die Nanotechnologie vor allem in Deutungsrahmen von Forschung und Entwicklung sowie Fortschritt und wirtschaftlichem Nutzen behandelt.

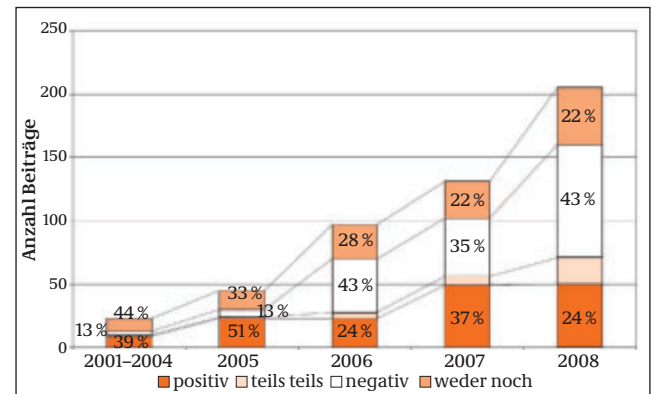
Analyse internetgestützter Diskussionen

Das Internet – nach dem Fernsehen die zweitbedeutendste Quelle für Informationen zur Nanotechnologie – ist eine bisher kaum genutzte Quelle für die Forschung auf dem Gebiet der Risikowahrnehmung. Die bisherigen wenigen vorhandenen Studien beschäftigen sich im Wesentlichen mit Inhalten, die massenmedialen Charakter besitzen (z. B. Webseiten mit Stellungnahmen von Akteuren, die auch in den Massenmedien präsent sind), so dass sie sich mit herkömmlichen Medieninhalten vergleichen lassen. Der besondere, alltagsweltliche Charakter der interaktiven Onlinekommunikation bleibt dabei unberücksichtigt. Dabei wird oft in Internet-Foren, Weblogs und Chatrooms diskutiert, welche Nutzenpotenziale, aber auch Risiken Verbraucher bei neuartigen Technologien, wie der Nanotechnologie, wahrnehmen. In diesen Foren werden nicht nur Kaufempfehlungen oder andere Tipps zu Nanoprodukten gegeben, sondern durch die Verbraucher nebenbei auch Wahrnehmungsmuster zur Nanotechnologie insgesamt entwickelt. Aus diesem Grund hat das BfR eine Analyse von internetgestützten Diskussionen zur Nanotechnologie durchgeführt, in deren Mittelpunkt deutschsprachige Diskussionen in Onlineforen und in Weblogs im Zeitraum von 2001 bis 2008 standen.

Die Onlinediskussionen decken ein breites Spektrum von Themen und Produktgruppen ab, was den vielseitigen Charakter der Nanotechnologie als einer Querschnittstechnologie widerspiegelt. Quantitativ ragen dabei Foren zum Themenbereich Fahrzeuge heraus und dabei insbesondere Diskussionen zur Nanooversiegelung in der Fahrzeugpflege. Spezielle Themen wie z. B. der Einsatz der Nanotechnologie in Lebensmitteln werden dagegen erst in der jüngsten Zeit intensiver diskutiert. Insgesamt wurden 504 Beiträge untersucht (davon 21 % zur allgemeinen Diskussion zur Nanotechnologie, je 20 % zu Fahrzeugen, Lebensmitteln sowie Medizin, 10 % zu Kosmetik und 9 % zu Textilien).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Akzeptanz der Nanotechnologie in der deutschen Bevölkerung derzeit hoch ist. Beim Blick auf die Jahre 2006 bis 2008 wird allerdings deutlich, dass im Onlinediskurs die Zustimmung zur Nanotechnologie deutlich geringer ist als dies die weitgehend positive Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung hätte vermuten lassen. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass in einem beträchtlichen Teil der untersuchten Diskussionsbeiträge die Nanotechnologie oder konkrete Nanoprodukte unter Nutzenaspekten eher negativ bewertet werden. Offenbar stoßen Nanoprodukte der ersten Generation bei der speziellen Gruppe von Verbraucherinnen und Verbrauchern, die in Internetforen aktiv sind, weniger aufgrund von Risikobefürchtungen als aufgrund von Nutzenerwägungen auf Akzeptanzprobleme. Die Befunde zeigen eine Aufspaltung des Diskurses in einen Chancen/Risiken-Diskurs und einen Nutzen/Nichtnutzen-Diskurs. 34 % aller Beiträge thematisieren allein Nutzen oder Nichtnutzen und Schaden, 17 % dagegen allein Chancen oder Risiken. 34 % aller Beiträge berühren Aspekte sowohl des Nutzen/Nichtnutzen- als auch des Chancen/Risiken-Diskurses,

und 15 % thematisieren weder das eine noch das andere. Die Betrachtung der Onlinediskussionen im Zeitverlauf zeigt, dass sowohl Hinweise auf Risiken als auch negative Einschätzungen der Nanotechnologie oder von Nanoprodukten zunehmen. Auch qualitativ vertiefende Analysen der Diskussionsbeiträge, wie die Analyse der verwendeten sprachlichen Bilder, ergaben Anzeichen dafür, dass hier ein nicht unerhebliches Konfliktpotenzial besteht, insbesondere in den erst in jüngerer Zeit verstärkt diskutierten Bereichen Lebensmittel und Kosmetika.



Beurteilung der Nanotechnologie in den erfassten Beiträgen im Zeitverlauf
(Quelle: Bundesinstitut für Risikobewertung)

5.9 Wissensvermittlung im Bereich der Nanotechnologie

Dr. Lorenz Kampschulte

Zentrum Neue Technologien, Deutsches Museum, München

Die Nanotechnologie ist aus Perspektive der Wissensvermittlung ein schwer zu greifendes Thema: Einerseits ist sie technisch so komplex, dass oft sogar fachnahe Spezialisten Probleme haben Zusammenhänge zu erklären, andererseits zeichnet sich ein wesentlicher Einfluss der neuen Technologie auf unsere Gesellschaft ab, so dass die Notwendigkeit einer verständlichen Vermittlung besteht.

Dies sind auch die beiden großen Herausforderungen, die bei der Vermittlung der Nanotechnologie auftreten: Zum einen die rein technische Dimension, die beinhaltet, dass es sich um Systeme von wirklich unvorstellbar kleiner Größe handelt und die Tatsache, dass im Nanokosmos vieles quantenmechanisch und damit nicht nach den Regeln unserer bekannten Welt abläuft. Zum anderen die gesellschaftliche Dimension dieser neuen Technologie: die großen Chancen, aber auch die möglichen Risiken, und gerade hier die vielen noch unbeantworteten Fragen. Ziel der Vermittlung sollte es sein, jedem Bürger die Möglichkeit zu geben, sich soweit zu informieren, dass er für seinen persönlichen Bereich eine grobe Abwägung der Chancen und Risiken der Nanotechnologie durchführen kann. Das ist aufgrund der Komplexität der Thematik wahrlich ein hohes Ziel – aber was braucht man dafür?

Zuallererst ein wenig grundlegendes Verständnis für die Nanotechnologie. Man muss ein Gefühl dafür entwickeln, wie klein Nano ist, wie schwierig es ist, Nano sichtbar und messbar zu machen – und klar machen, dass im Nanokosmos viele Vorgänge ganz anders ablaufen als im Bereich anderer Größendimensionen. Zweitens das Wissen, dass im Bereich der Nanotechnologie noch sehr viel im Fluss ist. Gerade die Anwendungen, mit denen der Verbraucher konfrontiert ist, befinden sich noch am Anfang. Es wird noch viel geforscht, viele der Aussagen sind von eher vorläufiger Art, wirklich gesicherte Ergebnisse gibt es selten. Auch das ist für einen Laien nicht normal. Drittens sollte man ein paar Ideen davon haben, wie Nanotechnologie und Umwelt zusammenspielen, seien es zum Beispiel die Auswirkungen auf die Natur, das Klima oder auch auf unseren Körper. Die vierte Frage hängt eng damit zusammen: Wie stellt man nanotechnologisch veredelte Produkte her? Wie beeinflusst das Herstellungs- bzw. Applikationsverfahren die Abgabe von Nanomaterial an die Umwelt? Sind zum Beispiel die Nanosilber-Partikel nur auf die Fasern der Socken aufgebracht, oder sind sie in die Fasern mit eingeschmolzen? Schlussendlich braucht man noch eine vertrauenswürdige Quelle, die Informationen zur Verfügung stellt und die man gezielt fragen kann. Das können zum einen Infoseiten im Internet sein, wie zum Beispiel vom Projekt DaNa (www.nanopartikel.info), die Initiativen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Ausstellungen wie im Zentrum Neue Technologien des Deutschen Museums, aber auch Kontakte zu Fachwissenschaftlern, sei es im Rahmen von Vorträgen, Bürgerdialogtagen oder Infoveranstaltungen.

Das Deutsche Museum in München hat mit der Eröffnung des Zentrums Neue Technologien eine große neue Kommunikationsplattform für die Nanotechnologie in Deutschland geschaffen. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem BMBF, mit den drei Wissenschaftspartnern Max-Planck-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft und Fraunhofer Gesellschaft sowie den Münchner Universitäten steht die Plattform auch wissenschaftlich auf sehr fundierten Füßen. Kern des Zentrums ist die Ausstellung zu den Grundlagen der Nanotechnologie, die auch immer wieder den Forschungsaspekt der Technologie, die Unsicherheiten und die gesellschaftlichen Diskussionen ins Blickfeld rückt. Gleich neben der Ausstellung gibt es ein großes Auditorium, in dem vielfältige Veranstaltungen stattfinden, von Nano-shows über Fachvorträge bis hin zu Bürgerdialogen. Weiteres Element des Zentrums sind die verschiedenen Labore, z. B. kann man im Gläsernen Forscherlabor sieben Tage die Woche Nanowissenschaftlern live bei der Arbeit zusehen und ihnen Fragen stellen, sei es zum Berufsbild des Nanoforschers oder ganz allgemeine Fragen zur Nanotechnologie.



Zentrum Neue Technologien des Deutschen Museums in München

Die Idee des neu geschaffenen Zentrums Neue Technologien im Deutschen Museum ist es, alle fünf Informations-ebenen an einem einzigen Ort zu bündeln. Dem interessierten Bürger steht damit eine Plattform zur Verfügung, auf der er sich umfangreich über Technologie, Forschung, Chancen und Risiken informieren kann, um seine eigene Einschätzung zu fundieren. Zugegeben ist dies ein hohes Ziel und auch im Zentrum Neue Technologien gibt es noch eine Vielzahl an Möglichkeiten, den Informationsaustausch zu verbessern und zu intensivieren. Dennoch zeichnet sich dieser umfassende und in Deutschland bis dato einmalige Ansatz, klassische Exponate mit der Darstellung von Forschungsprozessen sowie in die Ausstellung integrierten interaktiven Dialogstationen und Veranstaltungen zu kombinieren, nach einem Jahr Betrieb als sehr erfolgreich ab.

Die Initiative nanoTruck – Treffpunkt Nanowelten im Kurzporträt

Wo liegen die größten Chancen der Nanotechnologie für Mensch und Umwelt und wer untersucht mögliche Risiken? Was kann die Nanotechnologie zur Lösung wichtiger Zukunftsfragen beitragen und welche Produkte, Verfahren und Therapien liefern heute schon Antworten? Und schließlich: Welche Ausbildungs- und Studienmöglichkeiten gibt es in der Nanotechnologie? Die Initiative „nanoTruck – Treffpunkt Nanowelten“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) rückt die Kernfragen zur Nanotechnologie in den Mittelpunkt eines Dialogs mit interessierten Bürgerinnen und Bürgern. In einer lebendigen Ausstellungswelt, spannenden Workshops und angeregten Diskussionen wird der Weg geebnet für individuelle Meinungsbildung, Bewertung und Karriereplanung.

Anziehungspunkt der jetzt bis 2013 verlängerten BMBF-Initiative ist das doppelstöckige Ausstellungs- und Kommunikationszentrum nanoTruck. Als mobiler Botschafter und „Dolmetscher“ einer anspruchsvollen Schlüsseltechnologie kommt er direkt zu den Menschen und präsentiert „Nanotechnologie live“. Unter dem neuen Motto „Treffpunkt Nanowelten“ ist das imposante Ausstellungsfahrzeug zu Gast auf Deutschlands Schulhöfen und Marktplätzen, Berufsinformations- und Fachmessen, Wissenschaftsmeilen und Technik-Events.



Der nanoTruck im Einsatz (Quelle: Flad&Flad)

Eines der wichtigsten Ziele der Initiative „nanoTruck“ ist die offene, transparente und verständliche Information und Kommunikation über eine der großen Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Als lebendiges Dialoginstrument des Aktionsplans Nanotechnologie 2015 der Bundesregierung übersetzt sie deren zentrale Aktionsfelder – „die Forschung fördern, den Technologietransfer intensivieren und für einen verantwortungsvollen Umgang mit der Nanotechnologie sorgen“ – ins Anschauliche und Praktische.

Zahlen, Daten, Fakten

Der nanoTruck des Bundesministeriums für Bildung und Forschung besucht an rund 220 Einsatztagen jährlich circa 100 Einsatzorte in ganz Deutschland. Mehr als 110.000 Besucherinnen und Besucher finden an Schulen und Universitäten, in Stadt- und Gemeindezentren, im Rahmen von Wissenschafts- und Techniktagen, Berufsinformations- oder Fachmessen ihren Weg in das doppelstöckige Ausstellungsfahrzeug. Informationen rund um die Nanotechnologie, Tipps zu Ausbildungs- und Studienmöglichkeiten, Terminhinweise, News von der Strecke und vieles mehr bietet die Projekt-Website unter www.nanoTruck.de.

5.10 Nanomaterialien – Rahmenbedingungen aus Sicht der chemischen Industrie

Dr. Hans-Jürgen Klockner

Verband der Chemischen Industrie e.V.

Weltweit wird intensiv diskutiert, ob die geltenden Gesetze zum Schutz des Menschen und der Umwelt mögliche Risiken von Nanomaterialien adäquat behandeln, ob Klarstellungen

und Präzisierungen in existierenden Gesetzen erforderlich sind oder ob neue spezielle Nano-Gesetze erlassen werden sollten. In der Europäischen Union geht man den Weg, existierende Gesetze zu überarbeiten.

Bei der Erörterung der regulatorischen Rahmenbedingungen für Nanomaterialien sind zwei Fragen essentiell:

1. Welche Produkte sollen rechtlich als Nanomaterialien definiert werden?
2. Welche Rechtsfolgen sollen für diese Produkte gelten?

Diese Fragen sind nicht unabhängig voneinander zu beantworten, denn der Regelungsgegenstand und die für ihn geltenden Rechtsfolgen müssen zueinander passen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass Regelungen zum Schutz des Menschen und der Umwelt wissenschaftsbasiert sein sollten und auf dem Vorsorgeprinzip beruhen müssen.

Nanomaterial-Definition

Das Europäische Parlament und viele EU-Mitgliedstaaten sprechen sich aus Vorsorgegründen für eine breite Definition des Begriffs Nanomaterial aus. Die Definition soll auf jeden Fall – in Anlehnung an die „Nano-Objekt“-Definition der ISO/TS 27687 – Partikel mit ein, zwei oder drei Außenmaßen zwischen einem und hundert Nanometern sowie die Aggregate und Agglomerate dieser Partikel umfassen. Dieser Ansatz wird auch von der chemischen Industrie befürwortet, zumal dies die Chance einer weltweiten Harmonisierung der Gesetzgebung eröffnet. Einigen Umwelt- und Verbraucherorganisationen erscheint allerdings sowohl die untere als auch die obere Dimensionsgrenze der primären Partikel als zu eng gefasst. Aus Gründen der weltweiten Harmonisierung wird jedoch voraussichtlich die ISO-Definition eines Nano-Objekts Regelungsgrundlage in der EU werden.

Die Diskussion zwischen EU-Kommission, Behörden der Mitgliedstaaten, Industrieverbänden und Umwelt- und Verbraucherorganisationen fokussiert sich somit derzeit auf den Mindestgehalt an Nano-Objekten, der ein Produkt regulativ als Nanomaterial definieren würde. Es ist abzusehen, dass die EU-Kommission einen sehr geringen Gehalt an Nano-Objekten als Abschnidegrenze festlegen wird. Das hätte zur Folge, dass viele Pigmente und Füllstoffe, die oft seit Jahrzehnten in vielerlei alltäglichen färbenden Anwendungen verwendet werden, in Zukunft regulativ als Nanomaterialien betrachtet werden. Ebenso würden viele Mineralien, die für die Herstellung von Baustoffen oder Keramiken verwendet werden, als Nanomaterialien gelten. Die EU-Kommission betont deshalb ausdrücklich, dass sie mit ihrer ausschließlich größenbasierten Definition nicht die Aussage verbindet, dass als Nanomaterial definierte Produkte per se gefährliche Eigenschaften haben.

Gesetze zum Schutz des Menschen und der Umwelt

Die zu erwartende breite Nanomaterial-Definition wird Auswirkungen auf die damit verbundenen Rechtsfolgen haben –

also darauf, welche Maßnahmen für Nanomaterialien zu ergreifen sind, die für andere Produkte nicht erforderlich sind. Denn je breiter die Definition aus Vorsorgegründen ist, umso mehr Produkte wird sie umfassen, die keine gefährlichen Eigenschaften besitzen. Es besteht mittlerweile ein recht breiter Konsens, dass die existierenden Gesetze zum Schutz des Menschen und der Umwelt auch für Nanomaterialien gelten. Die in der Vergangenheit gelegentlich erhobene Forderung nach einem eigenständigen „Nano-Gesetz“ wird derzeit in der EU nicht weiter verfolgt.

Die Diskussion konzentriert sich deshalb darauf, ob die Vorschriften in den geltenden Schutzgesetzen geeignet und ausreichend für die Erkennung und das Management möglicher Risiken von Nanomaterialien sind. Die Industrie legt Wert darauf, dass sich neue Vorschriften auf die Ermittlung möglicher gefährlicher Eigenschaften beschränken und nicht Maßnahmen zum Risikomanagement vorgeschrieben werden, ohne dass überhaupt gefährliche Eigenschaften des Produkts existieren.

Bei Metallfeinstäuben ist seit langem bekannt, dass sie im Einzelfall andere gefährliche Eigenschaften als grobe Pulver desselben Metalls haben können. Dies wird dann in der Einstufung und Kennzeichnung des Produkts nach den Vorschriften der „Classification, Labelling und Packaging (CLP)-Verordnung“ der EU und entsprechenden Angaben im Sicherheitsdatenblatt sichtbar. Die gleiche Vorgehensweise gilt für nanoskalige Formen jedes chemischen Stoffes. Es muss dafür allerdings sichergestellt sein, dass Informationen zu möglichen gefährlichen Eigenschaften dieser nanoskaligen Stoffformen in realistischen Szenarien vorliegen. Wie in den „REACH Implementation Projects on Nanomaterials“ hervorgehoben wurde, ist in den Registrierungsdossiers anzugeben, welche Informationen für die nanoskalige Form des Stoffes vorliegen und auf welcher wissenschaftlichen Basis sie gewonnen wurden. Die Testmethoden, insbesondere die Probenvorbereitung und die Dosimetrie, werden derzeit im Rahmen der OECD überprüft und falls erforderlich angepasst.

In den produktbezogenen EU-Regelungen für den Kosmetik- und Lebensmittelbereich sowie möglicherweise auch für Biozide wird zukünftig eine eigenständige Risikobewertung und teilweise auch eine Kennzeichnung für Nanomaterialien enthaltende Produkte erforderlich sein.

Kontrovers werden die Notwendigkeit und die Inhalte möglicher Änderungen im Rechtstext der europäischen Chemikalien-Verordnung REACH diskutiert. Das Europäische Parlament, einige EU-Mitgliedstaaten und viele Umwelt- und Verbraucherorganisationen fordern unter anderem eine eigenständige Stoffidentität für Nanomaterialien, eine Herabsetzung der Mengenschwelle für die Registrierungspflicht, die unverzügliche Registrierung auch der phase in-Nanomaterialien sowie die Festschreibung eines nanospezifischen Prüfprogramms. Die chemische Industrie hält diese Forderungen angesichts der zu erwartenden recht breiten Nanomaterial-Definition für unverhältnismäßig und plädiert dafür, den REACH-Text durch die Aufnahme zusätzlicher physikalisch-chemischer Informationen in das Registrierungsdossier und die Vorgabe einer separaten Beschreibung einer ggf. vermarkteten nanoskaligen Stoffform im Registrierungsdossier des Stoffs zu präzisieren.

Hinsichtlich der Gesetze zum Schutz des Menschen und der Umwelt finden Abstimmungsgespräche derzeit auch auf internationaler Ebene statt. Es ist damit zu rechnen, dass innerhalb der nächsten drei Jahre die meisten Gesetzesanpassungen erfolgt sein werden.

Produktregister und Verbraucherinformation

Zur Information der Konsumenten fordern Verbraucher- und Umweltorganisationen, aber auch Regierungen und Behörden einiger EU-Mitgliedstaaten, den Aufbau eines möglichst europaweiten Registers mit Produkten, die Nanomaterialien enthalten. Zudem sollten nach Auffassung der Verbraucherorganisationen bei Produkten mit körpernahen Anwendungen entsprechende Hinweise auf der Verpackung gegeben werden, wie es bereits im Kosmetikbereich in Zukunft rechtlich erforderlich ist. Eine Reihe von EU-Mitgliedstaaten hat unter belgisch-französischer Führung Ende 2010 eine Initiative zum Aufbau eines europäischen Nanoprodukt-Registers gestartet.

Ein generelles Sektor-übergreifendes Nanoprodukt-Register wird von der Industrie abgelehnt. Sie plädiert dafür, in den existierenden stoffbezogenen und sektoralen Produktregistern mehr Transparenz für Nanomaterialien zu schaffen. Eine Kennzeichnung sollte aus Sicht der chemischen Industrie auf Produkte, die Inhaltsstoffe mit gefährlichen Eigenschaften haben, begrenzt bleiben.

6 Quellen- und Endnotenverzeichnis

- [1] BMBF 2010: „Hightech-Strategie 2020 für Deutschland“ (www.bmbf.de/de/6618.php)
- [2] International Organization for Standardization (ISO) – TC 229 Nanotechnologies: „Standards and projects under the direct responsibility of TC 229 Secretariat and its SCs“, www.iso.org
- [3] vgl. Formulierung DIN SPEC 1121: „Nanotechnologien – Terminologie und Begriffe für Nanoobjekte – Nanopartikel, Nanofaser und Nanoplättchen“, 2010 (ISO/TS 27687:2008); Deutsche Fassung CEN ISO/TS 27687:2009
- [4] BMBF 2006: „Nano-Initiative Aktionsplan 2010“, Bonn, Berlin 2006
- [5] BMBF 2011: „Nanotechnologie Aktionsplan 2015“, Bonn, Berlin 2011
- [6] BMBF 2009: „nano.DE-Report 2009 – Status Quo der Nanotechnologie in Deutschland“, Bonn, Berlin 2009
- [7] BCC 2010: „Nanotechnology in Coatings and Adhesive Applications: Global Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [8] BCC 2010: „Nanotechnology: A Realistic Market Assessment“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [9] iRAP 2009: „Nanolithography Equipment for IT, Electronics and Photonics – a technology, industry and global market analysis“ Marktreport abstract, Innovative Research and Products Inc. (www.innoresearch.net)
- [10] Freedonia 2010: „World nanomaterials (industry forecasts for 2013, 2018 & 2025)“, Marktreport abstract, Freedonia Group, Inc. www.freedoniagroup.com
- [11] BCC 2010: „Carbon Nanotubes: Technologies and Global Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [12] BCC 2010: „Nanocomposites, Nanoparticles, Nanoclays, and Nanotubes“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [13] BCC 2010: „Nanotechnology in Coatings and Adhesive Applications: Global Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [14] MarketsandMarkets 2011: „Global Electroactive Polymers Market Trends ,Applications And Fore-casts (2009-2014)“, Marktreport abstract, MarketsandMarkets Inc. (www.marketsandmarkets.com)
- [15] Future Markets 2010: „The World Market for Metal Oxide Nanopowders“, Marktreport abstract, Future markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [16] Future Markets 2010: The world market for nanoclays: Applications, Products, End User Markets, Companies and Revenues“ Marktreport abstract, Future markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [17] Global Industry Analysts 2010: „Aerogels“, Marktreport abstract, Global Industry Analysts Inc. (www.strategyr.com)
- [18] BCC 2011: „Quantum Dots: Global Market Growth and Future Commercial Prospects“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [19] VDI TZ 2011, Unternehmensbefragung nano.DE-Report 2011, Januar 2011
- [20] Future Markets 2010: The world market for nanofibers: Markets, Key Players and Revenues“ Marktreport abstract, Future markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [21] Nanoposts.com 2010: „Nanocoatings: Global Market and Applications“ Marktreport abstract, Nanoposts.com (www.nanoposts.com)
- [22] Future Markets 2011: „The World Market for Anti-Microbial, Easy-Clean and Self-Cleaning Nano-coatings“, Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [23] Future Markets 2011: „The World Market for Abrasion, Wear and Corrosion Resistant Nanocoatings“, Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [24] BCC 2010: „Photocatalysts: Technologies and Global Markets“ Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [25] BCC 2010: „Controlled-Release Technologies: Established and Emerging Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)

- [26] BCC 2010: „Diamond, Diamond-like and CBN Films & Coating Products“ Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [27] BCC 2010: „High-Performance Ceramic Coatings: Markets and Technologies“ Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [28] BCC 2010: „Microscopy: The Global Market“ Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [29] Future Markets 2011: „The World Market for Electron and Scanning Probe Microscopes: Revised and Updated to 2011“; Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [30] BCC 2010: „Physical Vapor Deposition (PVD): Global Markets“ Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [31] Future Markets 2010: „The World Market for Sample Preparation Equipment“; Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [32] iRAP 2010: „Piezoelectric Operated Actuators and Motors – A Global Industry and Market Analysis“; Marktreport abstract, Innovative Research and Products Inc. (www.innoresearch.net)
- [33] BCC 2011: „Nanobiotechnology: Applications and Global Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [34] Espicom Business Intelligence 2009: „Drug Delivery Technologies: Nanoenabled Delivery Players, products & prospects to 2018“, Marktreport abstract; Espicom Business Intelligence, (www.espicom.com)
- [35] Future Markets 2010: „The World Market for Nano-coatings in the Medical Industry“; Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [36] BCC 2011: „Global Biochip Markets: Microarrays and Lab-on-a-Chip“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [37] BCC 2010: „Transparent Electronics: Technologies and Global Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [38] BCC 2010: „Semiconductor Memory: Technologies and Global Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [39] Strategies Unlimited 2010: „High-Brightness LED: Market Review and Forecast 2010“ Marktreport abstract Strategies Unlimited (www.optoiq.com/index/market-research.html)
- [40] MarketsandMarkets 2009: „Nanophotonics - Advanced Technologies and Global Market (2009–2014)“, Marktreport abstract, MarketsandMarkets Inc. (www.marketsandmarkets.com)
- [41] iRAP 2009: „Nano-Enabled Batteries for Portable and Rechargeable Applications – Types, Applications, New Developments, Industry Structure and Global Markets“; Marktreport abstract, Innovative Research and Products Inc. (www.innoresearch.net)
- [42] Future Markets 2010: „Nanotechnology and Photovoltaics: Market, Companies and Products“; Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [43] iRAP 2009: „Fuel Cells, Hydrogen Energy and Related Nanotechnology – A Global Industry and Market Analysis“; Marktreport abstract, Innovative Research and Products Inc. (www.innoresearch.net)
- [44] iRAP 2009: „Ultracapacitors for Stationary, Industrial, Consumer and Transport Energy Storage“; Marktreport abstract, Innovative Research and Products Inc. (www.innoresearch.net)
- [45] iRAP 2010: „Ultra Low Power Energy Harvesting for Wireless Switches and Wireless Sensor Networking“ Marktreport abstract, Innovative Research and Products Inc. (www.innoresearch.net)
- [46] BCC 2010: „Superconductors: Technologies and Global Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [47] BCC 2010: „Catalysts for Environmental and Energy Applications“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [48] BCC 2009: „Nanotechnology in Environmental Applications: The Global Market“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [49] BCC 2010: „Nanotechnology in Water Treatment“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [50] iRAP 2010: „Nano-Enabled Packaging for Pharmaceutical Industry– A Global Industry and Market Analysis“, Marktreport abstract, Innovative Research and Products Inc. (www.innoresearch.net)

- [51] iRAP 2010: „Nano-enabled Packaging for Food and Beverage Industry – A Global Industry and Market Analysis“, Marktreport abstract, Innovative Research and Products Inc. (www.innoresearch.net)
- [52] IDTechEx 2010: „Brand Enhancement by Electronics in Packaging 2010-2020“, Marktreport abstract, IDTechEx Inc. (www.idtechex.com)
- [53] BCC 2010: „Nanotechnology in Paper Manufacturing: Global Markets“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [54] Future Markets 2010: „Nanocoatings for the Construction and Exterior Protection Industry“, Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [55] Future Markets 2010: „Nanotechnology and Nanomaterials in the Automotive Industry“, Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [56] Future Markets 2010: „Nanocoatings for the Automotive Industry“, Marktreport abstract, Future Markets Inc. (www.futuremarketsinc.com)
- [57] BCC 2011: „MEMS: Biosensors and Nanosensors“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- [58] Lux Research 2009: „Nanomaterials State of the Market Q1 2009“, Marktreport Lux Research Inc. (www.luxresearchinc.com)
- [59] VCI 2010: „Auf einen Blick – Chemische Industrie 2010“, Verband der Chemischen Industrie August 2010
- [60] ISO/TR 11360:2010 Nanotechnologies – Methodology for the classification and categorization of nanomaterials, Internationale Standardisierungsorganisation ISO (www.iso.org)
- [61] SCENIHR 2010: „Scientific Basis for the Definition of the Term „nanomaterial“, Bericht des Wissenschaftlichen Ausschusses „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“ (SCENIHR) Dezember 2010
- [62] Wirtschaftsvereinigung Stahl 2010: „Stahl in Zahlen“, (www.stahl-online.de)
- [63] IGBCE 2010: „Brancheninfo: Keramische Industrie“, Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie, Stand April 2010
- [64] Werkstoffinformationsgesellschaft mbH: Hochleistungskeramik 2025, Strategieinitiative für die Keramikforschung in Deutschland des Koordinierungsausschusses Hochleistungskeramik der DKG und DGM, 2008, ISBN Nr. 978-3-88355-364-1
- [65] BMBF-Förderkennzeichen: 03X0084
- [66] BMBF-Förderkennzeichen: 03X3018
- [67] BPI 2010: „Pharmadaten 2010“, (www.bpi.de)
- [68] SPECTARIS 2010: „Branchenbericht 2010“, (www.spectaris.de)
- [69] Verband Forschender Arzneimittelhersteller e.V.: 2010: „Die Arzneimittelindustrie als Wirtschaftsfaktor“, (www.vfa.de)
- [70] Bundesregierung 2010: „Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der SPD – Stand und Perspektive der Nanotechnologien“, Drucksache 17/3771, 15.11.2010, dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/037/1703771.pdf
- [71] www.bmbf.de/foerderungen/11265.php
- [72] www.bmbf.de/foerderungen/13882.php
- [73] www.bmbf.de/foerderungen/7913.php
- [74] www.euronanomed.net/
- [75] SPECTARIS 2010: „Branchenbericht 2010“, (www.spectaris.de)
- [76] SPECTARIS 2010: „Die deutsche Photonik-Industrie“, (www.spectaris.de)
- [77] www.bmbf.de/de/3604.php
- [78] Statistisches Bundesamt 2011: „Beschäftigte, Umsatz und Investitionen der Unternehmen mit 20 und mehr Beschäftigten in der Energieversorgung“, statistische Indikatoren Energie, 2011
- [79] Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (www.solarwirtschaft.de)
- [80] VDMA Power Systems Bundesverband Windenergie e.V. (Hrsg.) „Die Windindustrie in Deutschland – Wirtschaftsreport 2009“, Berlin 2009

- [81] DIW 2010: „Umweltschutz: Hohes Beschäftigungspotential in Deutschland“; Wochenbericht des DIW Berlin Nr. 10/2010
- [82] Daniel Wetzel: „Die sieben irreführenden Argumente der Solarwirtschaft“ in „Die Welt“, Ausgabe vom 25.05.08
- [83] www.bmbf.de/de/11828.php
- [84] www.bmbf.de/de/10413.php
- [85] DIW 2010, Wochenbericht 10/2010, Zahlen von 2006
- [86] Roland Berger 2006: „Wirtschaftsfaktor Umweltschutz“, BMU-Konferenz „Umwelt und Innovation: Leitmärkte der Zukunft“, 30. Oktober 2006, Berlin
- [87] BMU 2009: „Greentech made in Germany 2.0“, Herausgeber BMU, Verlag Franz Vahlen München
- [88] www.bmbf.de/foerderungen/12531.php
- [89] www.nanopartikel.info
- [90] Steinfeldt, M.; Gleich, A. von; Petschow, U.; Pade, C.; Sprenger, R.-U. (2010): „Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte“ Umweltbundesamt Texte 33/2010, Dessau.
- [91] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien“ Bericht und Empfehlungen der NanoKommission 2011
- [92] VDMA 2011: „Branchenporträt Maschinenbau“, (www.vdma.org)
- [93] VDMA 2011, Pressemitteilung VDMA vom 10.02.2011: „Wachstumstreiber Maschinenbau“
- [94] VDMA 2010: „Statistisches Handbuch für den Maschinenbau“, (www.vdma.org)
- [95] www.bmbf.de/de/6666.php
- [96] Quelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, (www.bbsr.bund.de)
- [97] Angaben gemäß Hauptverband der Deutschen Bauindustrie, (www.bauindustrie.de)
- [98] www.bmbf.de/foerderungen/10471.php
- [99] Vgl. Hessen-Agentur: Anwendungen der Nanotechnologie in Architektur und Bauwesen, 2007
- [100] Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V.: „Standpunkt zum Verantwortlichen Umgang mit Nanomaterialien in der Lackindustrie“, (www.lackverband.de)
- [101] Quelle: www.automobil-produktion.de
- [102] VDA Jahreszahlen (www.vda.de/de/zahlen/jahreszahlen/index.html)
- [103] BMWi 2011: Branchenfokus Automobilindustrie (www.bmw.de)
- [104] www.bmbf.de/de/14706.php
- [105] PtJ 2008: „WING-Statusseminar zur Leitinnovation Nano-Mobil“, Projektträger Jülich, Werkstoff-Letter, Juni 2008
- [106] Bitcom 2011, Quelle Statistisches Bundesamt 2010
- [107] www.innovationlab.de/de/forschung/spitzenclusterorganische-elektronik
- [108] www.bmbf.de/press/2544.php
- [109] IGBCE 2010: Die Verpackungsindustrie in Deutschland, Juli 2010
- [110] www.innovationlab.de/de/forschung/forumoe/projekte/nano-pep/
- [111] BMU 2011 „Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien“ Abschlussbericht der Nanokommission, 2011, www.bmu.bund.de/chemikalien/nanotechnologie/nanodialog/doc/46552.php
- [112] Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V. 2011: „Zahlen zur Textil- und Bekleidungsindustrie 2011“
- [113] Datenbank für Nano-Konsumentenprodukte des Woodrow Wilson Centers, www.nanotechproject.org
- [114] www.bmbf.de/foerderungen/7568.php
- [115] TEGEWA: „Sachstandsbericht: Nanotechnologie in Textilien“, www.tegewa.de/de/arbeitsgebiete/nanotechnologie.html
- [116] Quelle: Kompetenzkarte Sicherheitsforschung www.securityresearchmap.de

- [117] www.bmbf.de/de/12917.php
- [118] AMA e.V.: „Sensor- und Messtechnik erwartet Rekordjahr Umsätze steigen, hohe Investitionen geplant Berlin“, Pressemitteilung vom 10. Februar 2011
- [119] www.ama-sensorik.de/site/de/289/wirtschaftliche-bedeutung.html
- [120] www.nanett.org
- [121] www.bmbf.de/foerderungen/14156.php
- [122] www.mstonline.de/news/pdf/MNI_Broschuere.pdf
- [123] VDI TZ 2004: „Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt“, Band 53 Schriftenreihe Zukünftige Technologien, ISSN: 1436-5928
- [124] EU Kommission 2004: „Auf dem Weg zu einer Europäischen Strategie für Nanotechnologie“, KOM(2004)338.
- [125] EU Kommission 2009: „Nanowissenschaften und Nanotechnologien: Aktionsplan für Europa 2005–2009“. Zweiter Durchführungsbericht 2007–2009, KOM(2009)607.
- [126] vgl. <https://portal.luxresearchinc.com/>
- [127] Die Daten wurden aus Interviews mit Regierungsvertretern im Bereich Wissenschafts- und Technologiepolitik sowie aus Sekundärquellen wie Berichten der OECD, der Europäischen Commission, Patent- und Literaturdatenbanken und Artikeln der Handels- und Wirtschaftspresse generiert.
- [128] Dechema/VCI 2011: 10 Jahre Sicherheitsforschung an Nanomaterialien“ Positionspapier, Oktober 2011
- [129] www.webnet.oecd.org/NanoMaterials
- [130] VDI/VDE und ASW: „Marktpotenzial von Sicherheitstechnologien und Sicherheitsdienstleistungen“, 2008 (www.asw-online.de)
- [131] Bundesinstitut für Risikobewertung: „Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung“ BfR-Wissenschaft 05/2008
- [132] vgl. BMBF: nano.DE-Report 2009, Bonn, Berlin, S. 75–76

7 Weiterführende Informationen

Internetadressen

Informationen des BMBF zur Nanotechnologie
www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php

Informationen der Bundesregierung zur Nanotechnologie
www.hightech-strategie.de/de/236.php

Internet-Kompetenzatlas Nanotechnologie
www.nano-map.de

Wissenschaftskommunikation Nanotechnologie
www.nanotruck.de

Bildungsangebote Nanotechnologie
www.nano-bildungslandschaften.de

Virtuelle Reisen in den Nanokosmos
www.nanoreisen.de

Themenfokus „Nanotechnologien“ des BMBF-Portals
„Kooperation international“
www.kooperation-international.de

Risikoforschung zur Nanotechnologie
www.nanopartikel.info

Broschüren

Aktionsplan Nanotechnologie 2015, BMBF 2011

nanoTruck – Treffpunkt Nanowelten, BMBF 2011

Nanotechnologie Aktuell – Forschung, Karriere und
Kompetenz, IWV 2011

Nachwuchs für die Nanotechnologie – Erfolgsgeschichten aus
dem Wettbewerb NanoFutur, BMBF 2009

nano.DE-Report 2009 – Status Quo der Nanotechnologie in
Deutschland, BMBF 2009

Nanopartikel – kleine Dinge, große Wirkung – Chancen und
Risiken, BMBF, 2008

Nanotechnologie – Innovationen für die Welt von morgen,
BMBF, 2006

8 Glossar

ABS	Antiblockiersystem	MRT	Magnetresonanztomographie
AFM	Rasterkraftmikroskopie	MWCNT	Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren
ALD	Atomlagen-Abscheidung	NAND	Logische Grundschtaltung („nicht-und“)
BIAC	Beratungsausschuss der OECD für Wirtschaft und Industrie	NEMS	Nanoelektromechanische Systeme
CAGR	Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate	NIR	Nahe Infrarotstrahlung
CCS	Kohlenstoffdioxidabtrennung und -speicherung	nm	Nanometer
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid	NMP	Nanotechnologie, neue Werkstoffe und Produktionstechnologien
CIS	Kuper-Indium-Diselenid	NRAM	Nichtflüchtiger Datenspeicher auf Basis von CNT
CMOS	Komplementär Metalloxid-Halbleiter	OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CMP	Chemisch Mechanisches Polieren	OLED	Organische Leuchtdioden
CNT	Kohlenstoffnanoröhren	OPV	Organische Photovoltaik
CPP	Zitationen pro Publikation	PCR	Polymerase Kettenreaktion
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung	PC-RAM	Phasenwechselspeicher mit wahlfreiem Zugriff
DIN	Deutsches Institut für Normung	PEEM	Photoemissions-Elektronenmikroskopie
DNA	Desoxyribonukleinsäure	PEM	Polymerelektrolytmembran
DRAM	Dynamischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff	PET	Polyethylenterephthalat
ECLA	Europäisches Klassifikationssystem	POSS	Polyhedrale Silasesquioxane
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit	PUR	Polyurethan
ERA	Europäischer Forschungsraum	PVD	Physikalische Gasphasenabscheidung
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm	REACH	Registrierung, Evaluierung, Authorisierung von Chemikalien
EUV	Extrem Ultraviolett	RFID	Radiofrequenz-Identifikation
EUVL	Extrem Ultraviolett Lithographie	SAW	Akustische Oberflächenwelle
FCSM	Einfluss normalisiert nach Fachgebiet	SAXS	Röntgenkleinwinkelstreuung
FeRAM	Ferroelektrischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff	SCENIHR	Wissenschaftlicher Ausschuss „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“
F&E	Forschung und Entwicklung	SEM	Rasterelektronenmikroskopie
FIB	Fokussierter Ionenstrahl	SG	Untergruppe
GMR	Riesenmagnetowiderstandseffekt	SIMS	Sekundärionen-Massenspektroskopie
GPS	Globales Positionierungssystem	SNOM	Nahfeldsondenmikroskopie
HTS	Hochtemperatursupraleiter	SOFC	Oxidkeramische Brennstoffzelle
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission	STED	Fluoreszenzlöschung durch stimulierte Emission
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik	SWCNT	Einwandige Kohlenstoffnanoröhren
IR	Infrarot	TBT	Tributylzinn
ISO/TS	Internationale Standardisierungsorganisation – Technische Spezifikation	TEM	Transmissionselektronenmikroskop
ITO	Indiumzinnoxid	UHPC	Ultrahochleistungsbeton
LC	Flüssigkristall	UHV	Ultrahochvakuum
k. A.	keine Angaben	U-SMPS	Universeller elektrostatischer Partikelklassierer
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen	UV	Ultraviolette Strahlung
LED	Leuchtdiode	VCSEL	Oberflächen emittierende Diodenlaser
LEEM	Niedrig-Energie-Elektronenmikroskopie	VT-SPM	Variable-Temperatur-Rastersondenmikroskop
LT-SPM	Tieftemperatur-Rastersondenmikroskopie	WING	Werkstoffinnovation für Industrie und Gesellschaft
MBE	Molekularstrahlepitaxie	WIPO	Weltpatentamt
MEMS	Mikroelektromechanisches System	XRO	Röntgenopak
MOCVD	Metallorganische CVD		
MR	Magnetoresistiv		
MRAM	Magnetoresistiver Speicher mit wahlfreiem Zugriff		

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

