

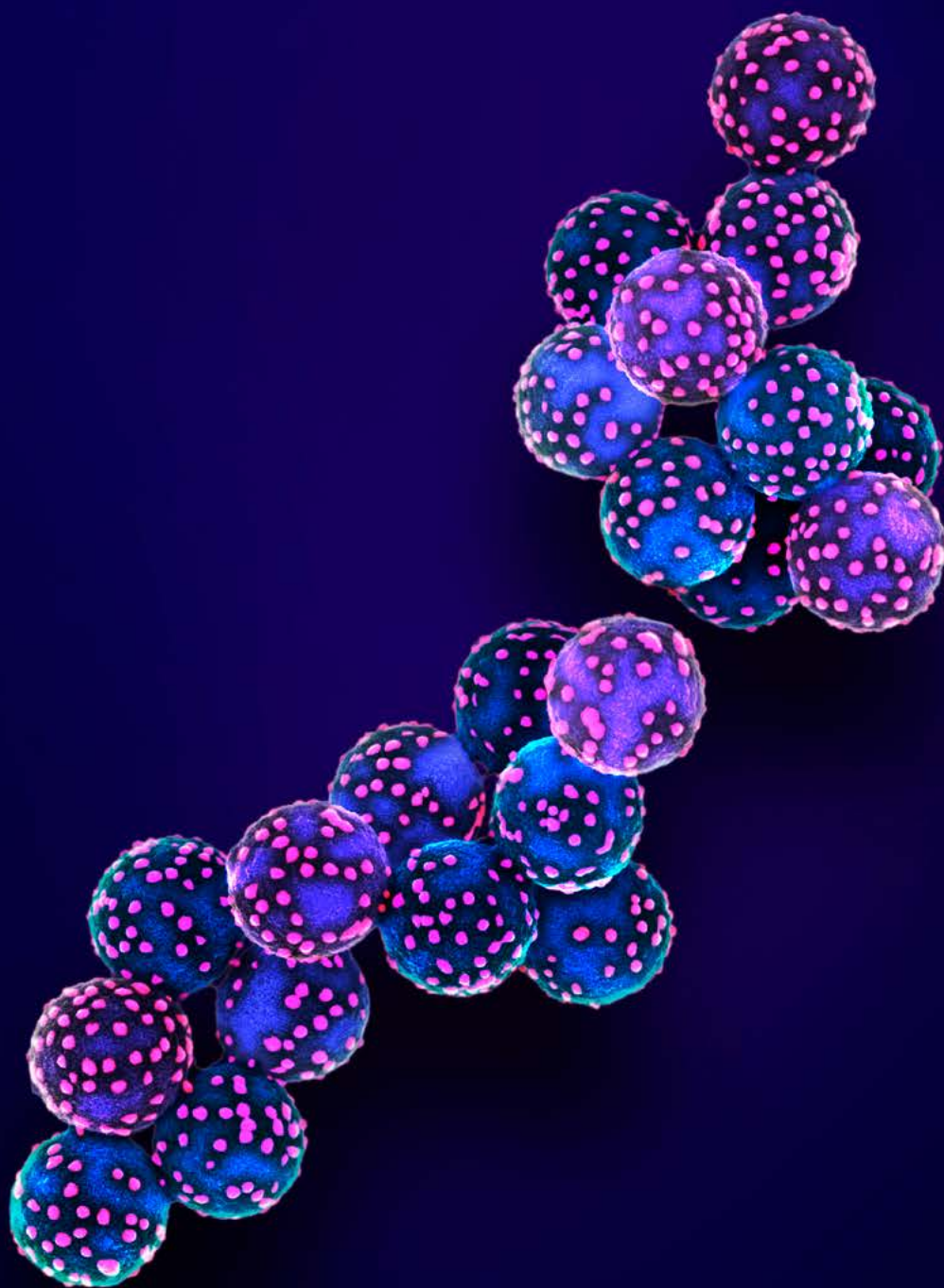


Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

iDEEN
INNOVATION
WACHSTUM
Die Hightech-Strategie für Deutschland

nano.DE-Report 2013

Status quo der Nanotechnologie in Deutschland





Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



nano.DE-Report 2013

Status quo der Nanotechnologie in Deutschland

Vorwort



Die Nanotechnologie zählt zu den bedeutendsten Schlüsseltechnologien unserer Zeit. Sie hat das Potenzial, wichtige Lösungsbeiträge zu großen gesellschaftlichen Herausforderungen wie Klimaschutz, Energieversorgung, Gesundheit oder Mobilität zu leisten. Mittlerweile befassen sich in Deutschland mehr als tausend Unternehmen mit der wirtschaftlichen Verwertung von Nanotechnologie. Rund 70.000 industrielle Arbeitsplätze gibt es schon in diesem Bereich. Und es werden mehr.

Die Bundesregierung setzt bei der Nanotechnologie auf eine sichere und nachhaltige Gestaltung. Durch umfangreiche Begleitmaßnahmen und die Forschung wollen wir vermeiden, dass ihr Innovationserfolg durch unvorhergesehene negative Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt beeinträchtigt wird. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert daher seit nunmehr sieben Jahren die Risikoforschung zu Nanomaterialien. Dadurch liegt heute ein gut differenziertes Bild vor.

Wir setzen uns dafür ein, transparent über die Forschung und Anwendungen der Nanotechnologie zu informieren. Mit seiner fundierten Datenbasis zu aktuellen Forschungsaktivitäten, Marktpotenzialen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen der Nanotechnologie in Deutschland und international leistet der nano.DE-Report dazu einen wichtigen Beitrag.

Für diesen Report wurden relevante Akteure aus der Industrie, der Forschung und dem Finanzsektor befragt, um aktuelle Indikatoren zur wirtschaftlichen Entwicklung der Nanotechnologie in Deutschland abzuleiten und die deutsche Position im internationalen Umfeld einzuschätzen. Das Ergebnis: Auch wenn asiatische Staaten im internationalen Innovationswettbewerb aufstreben, ist Deutschland nach den USA und Japan weiterhin einer der führenden Standorte für die Nanotechnologie. Auf den exzellenten Forschungseinrichtungen und auf dem starken Engagement der Industrie sollten wir für die Zukunft weiter aufbauen.

A handwritten signature in dark ink, reading 'Johanna Wanka'. The script is fluid and cursive, with the first letters of the first and last names being capitalized and prominent.

Prof. Dr. Johanna Wanka
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Inhalt

Vorwort

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	5
1.1 Ziele des nano.DE-Reportes	5
1.2 Methodischer Ansatz	5
2 Stand der Nanotechnologie in Deutschland	9
2.1 Nanotechnologieunternehmen	11
2.2 Öffentliche Nanoforschungsinstitutionen	22
2.3 Finanzsektor und Beteiligungskapital	29
3 Markt- und Anwendungspotenziale der Nanotechnologie	33
3.1 Übersicht zu nanotechnologisch beeinflussten Marktpotenzialen	33
3.2 Medizintechnik und Pharmazie	37
3.3 Chemie	44
3.4 Metall- und Keramikwerkstoffe	50
3.5 Elektronik	54
3.6 Optik/Photonik	60
3.7 Energie	64
3.8 Umwelttechnik	68
3.9 Sensorik und Messtechnik	73
3.10 Automobil	77
3.11 Maschinenbau	81
3.12 Sonstige Anwendungsfelder	83
4 Sozioökonomische Rahmenbedingungen	91
4.1 Nationale Forschungsförderung	91
4.2 Netzwerkbildung und Kooperationen	93
4.3 Nachwuchsförderung	97
4.4 Sicherer Umgang mit Nanomaterialien	99
4.5 Information der Öffentlichkeit	105
4.6 Internationale Aktivitäten	107
Quellen- und Endnotenverzeichnis	113
Abkürzungsverzeichnis	121

Zusammenfassung

Entwicklung der Nanotechnologie in Deutschland

Die Nanotechnologie in Deutschland ist weiter auf Wachstumskurs. Die Anzahl der in der Nanotechnologie aktiven Akteure aus Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft ist seit 2011 von 1.800 auf aktuell rund 2.300 angestiegen. Das wachsende Engagement in der Nanotechnologie wird wesentlich durch die kontinuierliche Forschungsförderung der Bundesregierung und der Europäischen Kommission vorangetrieben. Auch in der Wirtschaft spielt die Nanotechnologie in vielen Branchen eine immer wichtigere Rolle, wenn es in Forschung und Entwicklung darum geht, kleinere, schnellere, leistungsfähigere und intelligentere Produkte zu realisieren. Die Nanotechnologie in Deutschland ist hinsichtlich der technologischen Teildisziplinen und Anwendungsfelder breit aufgestellt. Gegenüber der 2011er Befragung haben sich dabei keine Verschiebungen in der Prioritätensetzung ergeben. Die meisten Institutionen sind weiterhin im Bereich der Nanomaterialien aktiv, gefolgt von Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und der Nanobiotechnologie. Als Anwendungsfelder werden am häufigsten Chemie und Werkstoffe, Maschinen- und Gerätebau (inkl. Messtechnik), der Dienstleistungssektor und der Bereich Gesundheit/Pharma adressiert (vgl. Kapitel 2).

Arbeitsplätze, Umsätze und Forschungsausgaben deutscher Nanounternehmen

Aktuell sind rund 1.100 Unternehmen in Deutschland mit dem Einsatz der Nanotechnologie in Bereichen der Forschung und Entwicklung sowie der Vermarktung kommerzieller Produkte und Dienstleistungen befasst. Der KMU-Anteil liegt bei 75 %. Die gestiegene Zahl an Unternehmen gegenüber 2011 ist vor allem auf die Industriebeteiligung im Rahmen der BMBF-Verbundprojektförderung zurückzuführen aber auch auf Neugründungen und Neuausrichtungen von Unternehmensaktivitäten. Wie bei den vorgehenden nano.DE-Reporten sind aus den Daten einer Akteursbefragung die Mitarbeiter- und Umsatzzahlen der Nanotechnologie in Deutschland abgeschätzt worden. Demnach liegt die Anzahl der mit der Nanotechnologie befassten industriellen Arbeitsplätze bei aktuell rund 70.000 in Deutschland. Ca. ein Drittel der Arbeitsplätze fällt dabei auf die Nanoelektronik, ein Viertel auf den Bereich Nanotools/-analytik und rund 20 % auf den Sektor Chemie/Materialien. Gut 10 % der Arbeitsplätze sind KMU zuzuordnen, deren Geschäftstätigkeiten

sich nach eigenen Angaben zu überwiegendem Anteil mit der Nanotechnologie befassen. Der Gesamtumsatz deutscher Nanotechnologieunternehmen wird auf rund 15 Mrd. € geschätzt. Gegenüber dem für das Jahr 2010 ermittelten Umsatz von 13 Mrd. € ergibt sich eine positive Entwicklung. Auch der aktuelle wirtschaftliche Trend der Nanotechnologie wird von der Mehrzahl der befragten Unternehmen positiv bewertet. So rechnen zwei Drittel der Unternehmen für 2013 mit einem Umsatzwachstum, ein Fünftel sogar mit einem Wachstum von über 10 %. Immerhin 40 % der Unternehmen erwarten eine Zunahme der Nanotechnologie-Arbeitsplätze und 50 % eine Zunahme der Forschungsinvestitionen (vgl. Kapitel 2.1).

Öffentlich finanzierte Nanotechnologieforschung

Rund 800 Forschungsinstitutionen sind derzeit in der Nanotechnologie aktiv, darunter Institute und Lehrstühle von Hochschulen und Fachhochschulen sowie Einrichtungen öffentlicher Großforschungsinstitutionen wie der Leibniz- und Helmholtz-Gemeinschaft oder der Max-Planck- und Fraunhofer-Gesellschaft. Gemäß den Ergebnissen der schriftlichen Akteursbefragung haben sich in den letzten zwei Jahren wenig strukturelle Änderungen hinsichtlich der Art und Ausrichtung der Nanotechnologieforschungsaktivitäten ergeben. Drittmittel des Bundes bleiben die wichtigste Finanzierungsquelle der Nanotechnologieforschung in Deutschland. Bei 85 % der Institutionen macht diese Finanzierungsquelle mehr als ein Viertel des gesamten Nanotechnologieforschungsbudgets aus. Nach Einschätzung der Forschungsinstitutionen werden in den nächsten fünf bis zehn Jahren vor allem die Bereiche Medizin/Pharma, Elektronik und Energie von den Forschungsergebnissen der Nanotechnologie profitieren. Die Qualität und der derzeitige Entwicklungsstand der Nanotechnologieforschung in Deutschland werden weiterhin hoch eingeschätzt. Nur die USA werden noch besser bewertet. An dritter Position der Wertungsskala steht Japan gefolgt vom europäischen Ausland und weiteren asiatischen Staaten, die sich gegenüber der 2011er Befragung in der Wertung deutlich verbessert haben. Zwei Drittel der befragten Nanoforschungsinstitutionen haben im Zeitraum zwischen 2011 bis Mitte 2013 Patente angemeldet. Im gleichen Zeitraum wurden acht Spin-off-Unternehmen gegründet. 20 der befragten Forschungseinrichtungen planen bis 2014 weitere Ausgründungen (vgl. Kapitel 2.2).

Finanzsektor und Beteiligungskapital

Rund 80 Kapitalbeteiligungsgesellschaften sind im Bereich der Nanotechnologie in Deutschland engagiert. Seitens der befragten Finanzinstitutionen werden als aussichtsreichste Anwendungsfelder der Nanotechnologie die Bereiche Chemie, Elektronik, Medizin/Pharma, Optik, Energie und Umwelt eingeschätzt. Hinsichtlich der Innovationshemmnisse bei der Kommerzialisierung der Nanotechnologie werden der Mangel an klaren regulatorischen Vorgaben sowie die negative Medienberichterstattung zu Nanorisiken mittlerweile am relevantesten eingeschätzt. Zehn der befragten Finanzinstitutionen weisen aktuell insgesamt 22 Beteiligungen an Nanotechnologieunternehmen auf. Davon sind in den letzten beiden Jahren fünf hinzu gekommen. Der überwiegende Teil der Beteiligungen betrifft deutsche Nanotechnologieunternehmen. Bei den Investments wird oftmals mit ein oder mehreren öffentlichen Ko-Investoren kooperiert. Dies betrifft in erster Linie die KfW und den Hightech-Gründerfonds (vgl. Kapitel 2.3).

Marktpotenziale und Anwendungsfelder

Für viele Teilbereiche der Nanotechnologie werden in den nächsten Jahren hohe Wachstumsraten hinsichtlich der weltweiten Marktvolumina prognostiziert. So soll der Gesamtmarkt von Nanomaterialien, der Nanopartikel, -hohlkörper, -fasern, -komposite, und -beschichtungen umfasst, bis 2017 auf rund 37 Mrd. \$ ansteigen bei einer jährlichen Wachstumsrate von 19 %. Ebenso dynamisch wird das Wachstum der Märkte für Nanotools wie Nanomanipulatoren, Nahfeldoptiken, Nanoimprint, und Nanolithografie (ohne klassische Halbleiterlithografie) mit einem Anstieg von 4,8 Mrd. \$ in 2012 auf 11,4 Mrd. \$ in 2017 eingeschätzt. Ein moderateres Wachstum mit 5 % pro Jahr wird für den Mikroskopiemarkt im Bereich der Nanoanalytik erwartet, der im Jahr 2016 ein Volumen von 3,4 Mrd. \$ erreichen soll. Übersichten zu Marktabschätzungen für die Marktsegmente Nanomaterialien, Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und Nanostrukturierung sowie für Anwendungsfelder der Nanotechnologie finden sich im Abschnitt 3.1. Für zwölf relevante Industriezweige in Deutschland werden branchenspezifische Applikationen und Entwicklungen der Nanotechnologie, Beispiele für F&E-Projekte sowie spezifische Rahmenbedingungen und Herausforderungen zusammengefasst (Abschnitt 3.2 ff.).

Nanotechnologie-Forschungsaktivitäten des BMBF

Das BMBF fördert die Nanotechnologie jährlich mit rund 220 Mio. € im Rahmen der Verbundprojektfor-schung (vgl. Kapitel 4.1). Übersichten zu den aktuellen Forschungsthemen aus rund 1700 laufenden oder kürzlich abgeschlossenen Einzelprojekten finden sich tabellarisch zusammengefasst in den Beschreibungen der jeweiligen Anwendungsfelder (Kapitel 3.2 bis 3.12). Ergänzende Informationen werden zu europäischen Forschungsaktivitäten des 7. Europäischen Forschungsrahmenprogramms bereit gestellt, an denen Deutschland maßgeblich beteiligt ist (vgl. Kapitel 4.6).

Sozioökonomische Rahmenbedingungen

Sozioökonomische Rahmenbedingungen können den Markterfolg nanotechnologischer Innovationen wesentlich beeinflussen. Aktuelle Entwicklungen werden durch Beiträge ausgewiesener Experten im jeweiligen Fachgebiet dargestellt. Im Einzelnen finden sich Beiträge zur öffentlichen Forschungsförderung der Nanotechnologie in Deutschland (Kapitel 4.1) sowie zu Nanotechnologie-Netzwerken und Kooperationen (Leibnizinstitute, Fraunhofer-Gesellschaft, Initiative „nano-in-Germany“, Deutscher Verband Nanotechnologie, Kapitel 4.2). Weiterhin werden Aktivitäten und Erfolge der BMBF-Nachwuchsförderung in der Nanotechnologie und den Materialwissenschaften beschrieben (Kapitel 4.3). Der Abschnitt „Sicherer Umgang mit Nanomaterialien“ (Kapitel 4.4) umfasst Beiträge zur Nanomaterial-Risikoforschung, zum sicheren Umgang mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz, zu regulatorischen Rahmenbedingungen für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien sowie dem Nachweis von Nanomaterialien in Produkten für regulatorische Anforderungen. Im Kapitel „Information der Öffentlichkeit“ (Abschnitt 4.5) werden Kurzporträts der „nano-Truck-Initiative“ und der internetbasierten Wissensplattform zu Nanomaterialien „DaNa“ des BMBF gegeben. In Bezug auf internationale Aktivitäten werden die Europäische Forschungsförderung, der Stand der internationalen Standardisierung sowie internationale Aktivitäten der OECD auf dem Gebiet der Nanotechnologie in Kurzbeiträgen beleuchtet (Kapitel 4.6).

1 Einleitung

Die Nanotechnologie ist als eine der Schlüsseltechnologien der Hightechstrategie 2020 der Bundesregierung von zentraler Bedeutung für den Technologie- und Wirtschaftsstandort Deutschland. Die Förderung der Nanotechnologie wird ministeriumsübergreifend durch den Aktionsplan Nanotechnologie 2015 vorangetrieben. Der vorliegende Report gibt einen Überblick zum derzeitigen Stand der Nanotechnologie in Deutschland im Hinblick auf die Entwicklung der Industrie- und Forschungslandschaft, der Anwendungs- und Marktpotenziale, der Förderaktivitäten sowie der sozioökonomischen Rahmenbedingungen.

Globale Herausforderungen wie der Klima- und Umweltschutz, die Versorgung einer wachsenden Weltbevölkerung mit Energie, Nahrung und Wasser sowie zukunftsfähige Konzepte in den Bereichen Mobilität, Sicherheit, Information und Kommunikation erfordern neue technologische Lösungen. Die Nanotechnologie ist eine der Schlüsseltechnologien, die die Bundesregierung im Rahmen des Hightechstrategie 2020 fördert und weiterentwickelt, um Lösungsbeiträge für die drängenden Zukunftsfragen zu leisten. In vielen industriellen Bereichen ist die Nanotechnologie der Schlüssel, um innovative und wettbewerbsfähige Produkte für den Weltmarkt herzustellen. Deutschland sieht sich dabei einer starken internationalen Konkurrenz gegenüber, wobei neben den USA und Japan vor allem aufstrebende asiatische Länder wie China, Südkorea oder Taiwan zu berücksichtigen sind.

1.1 Ziele des nano.DE-Reportes

Um aktuelle Entwicklungen der Nanotechnologie und die Position Deutschlands im internationalen Umfeld kontinuierlich zu beobachten, ermittelt das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2009 im Zwei-Jahresrhythmus den Status quo der Nanotechnologie in Deutschland. 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. Weiterhin werden aktuelle Branchen- und Technologietrends sowie Marktentwicklungen der

Nanotechnologie in den verschiedenen wirtschaftlichen Anwendungsfeldern aufgezeigt. Dadurch soll die Transparenz und Außendarstellung des Nanotechnologiesektors in Deutschland verbessert und eine fundierte Datenbasis für Politik und Wirtschaft bereit gestellt werden. Wie in den beiden Vorgänger-Publikationen aus den Jahren 2009 und 2011 werden im vorliegenden nano.DE-Report darüber hinaus aktuelle Entwicklungen der sozioökonomischen Rahmenbedingungen der Nanotechnologie beleuchtet. Hierzu gehören z. B. die öffentliche Forschungsförderung in Deutschland und in Europa, die Netzwerkbildung, die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, der sichere Umgang mit Nanomaterialien durch Risikoforschung, Risikomanagement und Regulierung, die Information der Öffentlichkeit sowie die internationale Abstimmung und Standardisierung.

1.2 Methodischer Ansatz

Der methodische Ansatz des nano.DE-Reportes umfasst folgende Teilaspekte:

- **Erfassung statistischer Indikatoren zur Nanotechnologie in Deutschland durch eine direkte Akteursbefragung in den Bereichen Unternehmen, Forschungsinstitutionen und Investoren. Zusätzlich zu den Fragebogenerhebungen wurden statistische Auswertungen des Datenbestandes des Kompetenzatlas www.nano-map.de in Bezug auf spezifische Anwendungs- und Technologieschwerpunkte der erfassten Nanotechnologieunternehmen und Forschungsinstitutionen vorgenommen.**
- **Recherche von Marktabschätzungen, branchenspezifischen Anwendungen und Forschungsansätzen der Nanotechnologie durch Auswertung einschlägiger Studien und Datenbanken.**
- **Beschreibung der sozioökonomischen Rahmenbedingungen der Nanotechnologie durch Gastbeiträge ausgewiesener Experten.**

Akteursbefragung zur Erfassung statistischer Indikatoren

Die Nanotechnologie ist als Querschnittsthema in einschlägigen Forschungs- und Wirtschaftsdatenbanken in der Regel nicht als eigenständiger Bereich ausgewiesen, so dass sich aus öffentlich zugänglichen Quellen

keine statistischen Indikatoren für die Nanotechnologie ableiten lassen. Im Rahmen der Status quo Analysen des BMBF wurden daher eigene Fragebogen-Erhebungen bei den jeweiligen Nanotechnologieakteuren in Deutschland durchgeführt. Dabei wurden die Sektoren Industrie, öffentliche Forschung und VC-Finanzierung mit jeweils spezifischen Fragebögen separat schriftlich befragt. Als Datenbasis für die Identifikation relevanter Akteure wurde wie bei den vorherigen Befragungen der vom BMBF eingerichtete Internet-Kompetenzatlas Nanotechnologie (www.nano-map.de) herangezogen. Es wird davon ausgegangen, dass der Kompetenzatlas die Akteurslandschaft der Nanotechnologie in Deutschland in wesentlichen Teilen repräsentiert. Zum Zeitpunkt der Befragung im Juni 2013 waren im Kompetenzatlas, der fortlaufend aktualisiert und erweitert wird, 1110 Unternehmen, 770 Forschungsinstitutionen und 79 Finanzinstitutionen registriert.

Um eine Vergleichbarkeit und Kontinuität der Daten zu gewährleisten, wurde bei allen Befragungen dieselbe Definition für die Nanotechnologie verwendet:

„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.“

Bei dieser Definition, die sich an den internationalen Standards der ISO orientiert (vgl. Abschnitt 4.6), stehen der Innovationsaspekt und die technische Nutzbarkeit der Nanotechnologie im Vordergrund. International hat sich allerdings noch keine einheitliche Sichtweise hinsichtlich der Definition der Nanotechnologie durchgesetzt. Obwohl in einigen Bereichen international abgestimmte Definition-Standards der ISO existieren, gibt es in Bezug auf Teilaspekte noch unterschiedliche Meinungen. In einer Empfehlung der europäischen Kommission werden Nanomaterialien beispielsweise unabhängig von einer nanoskaligen Funktionalität allein anhand der Größenordnung der jeweiligen Strukturen definiert. Zudem existieren selbst bei einer gegebenen Definition oftmals noch keine ein-

deutigen Verfahren für eine eindeutige Zuordnung und Abgrenzung der Nanotechnologie (vgl. Abschnitt 4.4).

Letztlich unterliegen die Untersuchungen daher einem gewissen Interpretationsspielraum seitens der beteiligten Institutionen, die sich gemäß der gegebenen Definition entweder der Nanotechnologie zugehörig oder nicht zugehörig einordnen können. Bei den im Kompetenzatlas gelisteten Institutionen ist aber von einem unmittelbaren Bezug zur Nanotechnologie auszugehen, da die Aktualität und Konsistenz der Einträge in Abstimmung mit den Institutionen regelmäßig geprüft wird.

Befragung von Nanotechnologieunternehmen

Bei der Befragung wurden 1110 Fragebögen an Unternehmen verschickt, die zum Zeitpunkt der Befragung im Nanotechnologie-Kompetenzatlas verzeichnet waren. Dabei sind nicht nur Unternehmen erfasst, bei denen die Nanotechnologie einen erheblichen Anteil der Geschäftsaktivitäten ausmacht, sondern z. T. auch Komponenten- und Systemhersteller, die nanotechnologische Vorprodukte weiter verarbeiten, aber keine eigenen nanotechnologischen Verfahren einsetzen. Teilweise beschränkt sich der Nanotechnologiebezug auf Forschungsaktivitäten, die beispielsweise im Rahmen von BMBF-Förderaktivitäten durchgeführt werden. Ebenso berücksichtigt sind Dienstleistungsunternehmen aus den Bereichen Auftragsforschung, -beschichtung und -analytik, Risikobewertung, Vertrieb und Beratung. Eine Überprüfung nicht zustellbarer Fragebögen ergab, dass bei 16 bislang im Kompetenzatlas verzeichneten Firmen keine Geschäftstätigkeit mehr feststellbar war, so dass diese Firmen aus der Datenbank und der Grundgesamtheit der Nanounternehmen in Deutschland entfernt wurden. Bei fehlender Rückantwort wurden Nachfassaktionen per E-Mail und telefonisch durchgeführt.

Insgesamt beteiligten sich 197 Unternehmen an der Befragung. Damit liegt die Anzahl der Rückantworten in gleicher Größenordnung wie bei der Befragung 2011 (205 Antworten). Rund ein Drittel der Antworten stammen von Unternehmen, die sich bereits 2011 an der Befragung beteiligt haben. Bezogen auf die Gesamtzahl der Nanounternehmen liegt die Rücklaufquote bei 18 %. Die Anzahl der Unternehmen, die angaben, nicht im Sinne der vorgegebenen Definition

im Bereich Nanotechnologie aktiv zu sein, lag mit 22 bei der 2013er Befragung etwas höher als im Jahr 2011 (12 nicht aktive Unternehmen). Als eine der Ursachen hierfür werden die Diskussionen zu Definitionen, regulatorischen Einschränkungen und Kennzeichnungspflichten von Nanomaterialien sowie die z. T. negative Medienberichterstattung zu Risiken von Nanomaterialien angenommen, die die Bereitschaft, sich öffentlich im Feld Nanotechnologie zu positionieren, vor allem bei der chemischen Industrie gemindert hat (vgl. Abschnitte 3.3 und 4.4). Bei allen im Kompetenzatlas Nanotechnologie gelisteten Unternehmen besteht zumindest im Kontext von Förderprojekten ein Bezug zur Nanotechnologie. Insgesamt wurden 175 Fragebögen ausgewertet. Die Ergebnisse der Befragung sind im Abschnitt 2.1 dargestellt.

Befragung von Forschungseinrichtungen der Nanotechnologie

Für die Erhebung des Forschungssektors wurden Fragebögen an 770 Forschungsinstitutionen verschickt, die zum Zeitpunkt der Befragung im Nanotechnologie-Kompetenzatlas registriert 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. Die Einträge im universitären Bereich betreffen ganze Institute teilweise aber auch Lehrstühle und in Einzelfällen auch Arbeitsgruppen der jeweiligen Hochschulen. Zu geringem Anteil werden hierbei auch Forschungsinstitutionen erfasst, die als Verein oder Stiftung organisiert sind. Es ist davon auszugehen, dass der Datenbestand die öffentliche Forschungslandschaft in Deutschland zwar nicht vollständig abdeckt aber zumindest gut repräsentiert vor allem in Bezug auf Forschungsinstitutionen, die sich an öffentlichen Förderprojekten der Nanotechnologie beteiligen. Bei der Erhebung wurde ein Rücklauf von 174 Fragebögen erzielt, was einer Rücklaufquote von rund 23 % entspricht. Nur eine der antwortenden Institutionen gab an, nicht im Bereich Nanotechnologie aktiv zu sein. Für die Auswertung, deren Ergebnisse im Abschnitt 2.2 zusammengefasst sind, standen somit 173 verwertbare Fragebögen zur Verfügung.

Befragung von Finanzinstitutionen

Wie in der Befragung von 2011 wurde der Finanzsektor mit einem eigenständigen Fragebogen in die Erhebung einbezogen, da privates Beteiligungskapital einen wichtigen Erfolgsfaktor bei der Entwicklung neuer Technologiefelder darstellt. Es wurden 80 Fragebögen an Finanzinstitutionen verschickt, die zum Zeitpunkt der Befragung im Nanotechnologie-Kompetenzatlas registriert waren.

Insgesamt wurden 19 Rückantworten erhalten. Eine Institution, bei der keine Geschäftstätigkeiten mehr festgestellt werden konnten, wurde aus dem Datensatz entfernt. Bezogen auf den Datenbestand von 79 Institutionen liegt die Rücklaufquote bei rund 24 %. Zwei Institutionen gaben an, nicht im Bereich der Nanotechnologie tätig zu sein, so dass insgesamt 17 Fragebögen für die Auswertung herangezogen worden sind. Die Rücklaufquote ist damit deutlich niedriger als bei der Befragung im Jahr 2011 mit 27 auswertbaren Fragebögen. Als Ursache für die niedrigere Beteiligung wird zum einen das als Folge der Finanzkrise allgemein gesunkene Engagement in der Wagniskapitalfinanzierung in Deutschland vermutet. Zusätzlich belastet die in diesem Jahr beschlossene Besteuerung von Streubesitzdividenden inländischer Kapitalgesellschaften aus kleineren Unternehmensbeteiligungen die Bereitschaft von Wagniskapitalgebern, risikoreiche Investments in Deutschland zu tätigen.^[1] Weiterhin ist im Finanzsektor eine Ausrichtung in Bezug auf Anwendungsfelder und Märkte zu verzeichnen (Gesundheit, Energie, Umwelt, IKT etc.), während die Ausrichtung auf Querschnittstechnologien eher eine untergeordnete Rolle spielt. Die Ergebnisse der Befragung werden im Kapitel 2.3 dargestellt.

Überblick zu Marktvolumina, branchenspezifischen Anwendungen und Forschungsansätzen der Nanotechnologie

Zur qualitativen und quantitativen Analyse von Marktpotenzialen und Branchenanwendungen wurden internationale Marktprognosen und Branchenberichte ausgewertet. In Abgrenzung zu den vorangegangenen nano.DE-Reporten wurden hierbei nur Publikationen berücksichtigt, die ab 2011 veröffentlicht worden sind. Als weitere Quelle für Marktabschätzungen wurden Angaben aus der Unternehmensbefragung herangezogen, bei der die Unternehmen in Bezug auf die

Marktvolumina der von ihnen adressierten Nanotechnologieanwendungen für das Jahr 2013 befragt wurden. Hieraus ließen sich über 40 verwertbare Marktabschätzungen extrahieren, die in der tabellarischen Übersicht im Kapitel 3.1 dargestellt sind.

Die Darstellung der Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte der Nanotechnologie in den einzelnen Anwendungsfeldern basiert auf einer Analyse der vom BMBF geförderten Nanotechnologie-Forschungsprojekte. Bei der Analyse wurde auf die Förderdatenbank PROFI der Bundesregierung zurückgegriffen, in der u. a. Kurzbeschreibungen zu einzelnen Förderprojekten verfügbar sind. Bei der Auswertung wurden ausschließlich Projekte berücksichtigt, die nach 2011 abgeschlossen wurden oder noch laufen. Die identifizierten Nanotechnologieprojekte wurden den Anwendungsbereichen zugeordnet, die die Forschungsaktivitäten prioritär adressieren, wobei die Zuordnung in einigen Fällen nicht eindeutig möglich war. Die Projekte sind tabellarisch unter Nennung des entsprechenden Förderkennzeichens aufgeführt. Darüber hinaus wurden weitere Quellen herangezogen, wie Förderaktivitäten anderer Ressorts sowie eine Zusammenstellung der im 7. Forschungsrahmenprogramm der EU geförderten Nanotechnologie-Projekte.

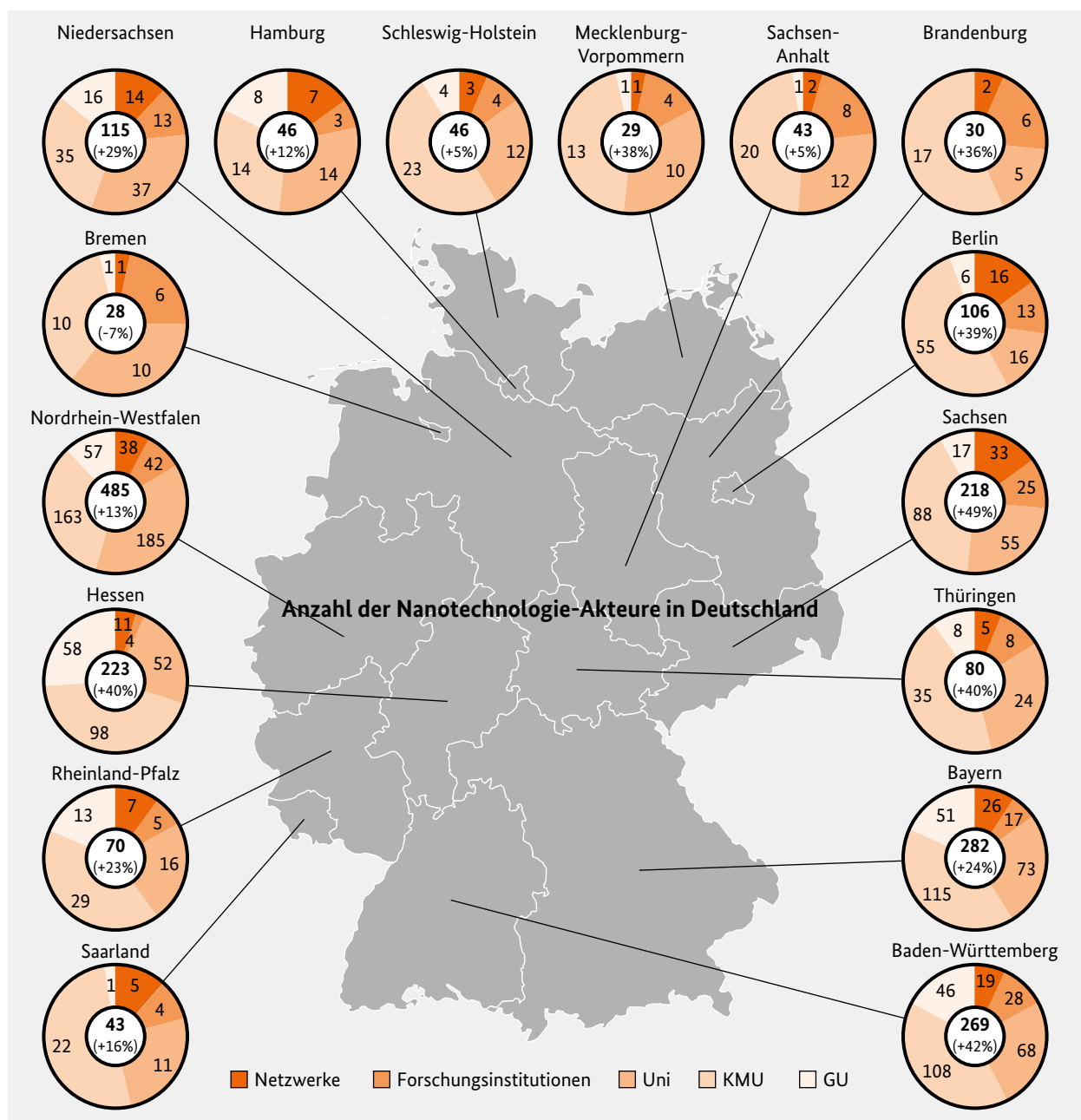
Sozioökonomische Rahmenbedingungen der Nanotechnologie

Für die Beschreibung der sozioökonomischen Rahmenbedingungen der Nanotechnologie in Deutschland und international wurden Beiträge ausgewiesener Experten im jeweiligen Themenfeld zusammengetragen. Zu den Themen in dieser Ausgabe des nano.DE-Reportes zählen u. a. ein Überblick über die Nanotechnologieförderung des Bundes und der europäischen Kommission, die Nachwuchsförderung des BMBF, internationale Aktivitäten der OECD und der ISO sowie ein Überblick zu Aspekten der Risikoforschung, des Arbeitsschutzes und der Regulierung im Bereich der Nanomaterialien.

2 Stand der Nanotechnologie in Deutschland

Die Nanotechnologie in Deutschland ist weiter auf Wachstumskurs. Dies dokumentiert sich vor allem an der Anzahl der in der Nanotechnologie aktiven Akteure aus Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft, die sich seit 2011 von 1.800 auf rund 2.300 (Stand September 2013) erhöht hat.

In vielen Wirtschaftszweigen spielt die Nanotechnologie eine zunehmende Rolle, wenn es in Forschung und Produktentwicklung darum geht, kleinere, schnellere, leistungsfähigere und intelligendere Lösungen zu realisieren.



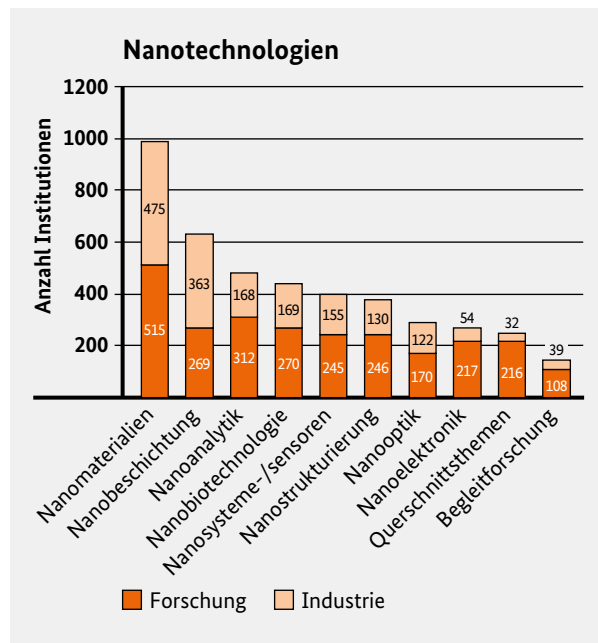
Anzahl und regionale Verteilung der Nanotechnologieakteure aus Forschung und Industrie in Deutschland (Quelle: www.nano-map.de, Stand 09/2013). Der Wert in der Mitte der Kreisdiagramme gibt die Gesamtzahl der Institutionen an (in Klammern die Veränderung gegenüber nano-DE-Report 2011).

Der Nanotechnologiekompetenzatlas www.nano-map.de gibt einen umfassenden Überblick über die Akteurslandschaft und Themenschwerpunkte der Nanotechnologie in Deutschland. Fast 2300 Institutionen aus den Kategorien Netzwerke, Forschungsinstitute, Hochschulforschung, KMU, Großunternehmen, öffentliche Verwaltung, Finanzinstitutionen, Verbände/NGO, Medien/Museen sind im Kompetenzatlas registriert. Bei der Hälfte der erfassten Institutionen handelt es sich um Unternehmen, wobei der KMU-Anteil 75 % beträgt. Forschungsinstitutionen repräsentieren rund ein Drittel der Akteurslandschaft, davon 800 Hochschulinstitutionen und 160 institutionelle Forschungseinrichtungen. Die übrigen Akteure verteilen sich auf sonstige Einrichtungen wie Netzwerke, Behörden, Verbände, Finanzinstitutionen, NGO und Institutionen der Wissensvermittlung (Medien/Museen). Die Zuordnung der Akteure zu Themenschwerpunkten erfolgt durch eine Selbsteinschätzung der Institutionen bzw. durch eine Einordnung seitens des VDI TZ auf der Basis öffentlich verfügbarer Informationen.

In Bezug auf die regionale Verteilung weist Nordrhein-Westfalen die größte Zahl an Nanotechnologieakteuren auf, gefolgt von Bayern, Baden-Württemberg, Hessen und Sachsen. Im Vergleich zu 2011 ist in allen Bundesländern bis auf Bremen die Anzahl der erfassten Nanotechnologie-Akteure angestiegen. Der Anstieg begründet sich im Wesentlichen durch eine Neuerfassung von Forschungsinstitutionen und Unternehmen, die sich erstmalig an Nanotechnologie-Verbundprojekten des BMBF bzw. der EU beteiligt haben. Weitere Veränderungen ergeben sich durch Neugründungen und Neuausrichtungen von Unternehmen/Forschungsgruppen bzw. auch durch Aufgabe von Geschäfts- und Forschungsaktivitäten. Akteure von Bundesländern mit eigenen Netzwerkaktivitäten in der Nanotechnologie wie NRW, Bayern, Hessen, Sachsen und Baden-Württemberg sind dabei vollständiger erfasst als in Bundesländern ohne eigene Nanoaktivitäten.

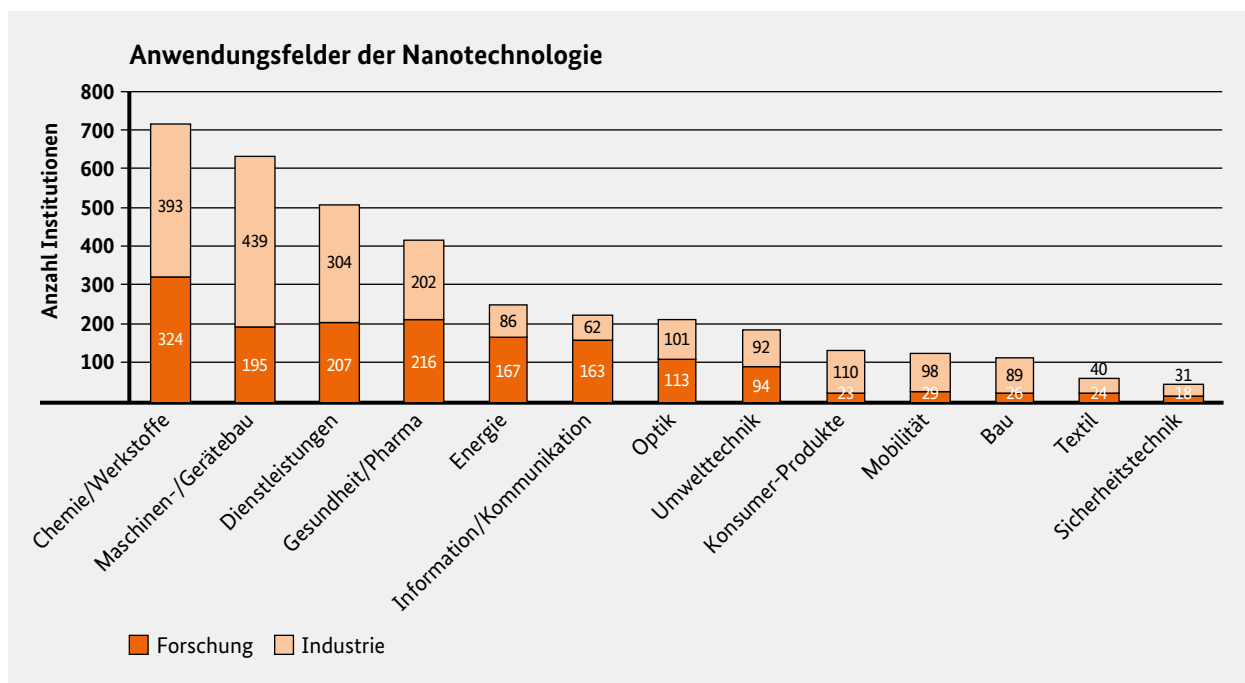
Eine Analyse der technologischen Teilfelder der Nanotechnologie zeigt, dass alle relevanten Forschungsrichtungen in der Industrie und in der öffentlichen Forschung in Deutschland adressiert werden. Zahlenmäßig am häufigsten vertreten sind nach wie vor die Nanomaterialien, gefolgt von Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und Nanobiotechnologie. In

diesen Teilgebieten findet sich auch ein überdurchschnittlich hoher Anteil an Unternehmen.



Zuordnung der deutschen Nanotechnologieinstitutionen aus den Bereichen Forschung (Netzwerke, Forschungsinstitute, Hochschulforschung) und Industrie (KMU und Großunternehmen) zu technologischen Teilgebieten der Nanotechnologie. (Quelle: www.nano-map.de, Stand 09/2013, Institutionen können mehreren Teilgebieten zugeordnet sein).

In Bezug auf die Anwendungsfelder der Nanotechnologie in Industrie und Forschung haben sich keine gravierenden Unterschiede im Vergleich zum Jahr 2011 ergeben. Der Bereich Chemie/Werkstoffe liegt weiterhin vor dem Maschinen- und Gerätebau (inkl. Messtechnik), dem Dienstleistungssektor und dem Bereich Gesundheit/Pharma. Mit 439 Unternehmen ist der höchste Industrieanteil im Sektor Maschinen- und Gerätebau/Messtechnik zu verzeichnen.



Zuordnung der deutschen Nanotechnologieinstitutionen aus den Bereichen Forschung (Netzwerke, Forschungsinstitute, Hochschulforschung) und Industrie (KMU und Großunternehmen) zu Anwendungsfeldern der Nanotechnologie. (Quelle: www.nano-map.de, Stand 09/2013, Institutionen können mehreren Anwendungsfeldern zugeordnet sein).

2.1 Nanotechnologieunternehmen

Mit Stand September 2013 waren 1135 Unternehmen im Kompetenzatlas Nanotechnologie registriert, die sich mit dem Einsatz der Nanotechnologie in Bereichen der Forschung und Entwicklung sowie der Vermarktung kommerzieller Produkte und Dienstleistungen befassen. Gegenüber 2011 ist das ein Anstieg von 175 Unternehmen, der vor allem auf die Industriebeiträge im Rahmen der BMBF-Verbundprojektförderung zurückzuführen ist. Weiterhin waren im Zeitraum einige Neugründungen zu verzeichnen, bei denen vor allem die Bereiche Nanobiotechnologie/Messtechnik aber auch die Bereiche Simulations-/Modellierungssoftware oder Risikobewertung von Nanomaterialien vertreten sind. Rund 20 Unternehmen haben seit 2011 die Geschäftstätigkeit eingestellt und wurden aus dem Kompetenzatlas entfernt. Daneben gab es einige Umstrukturierungen, Ausgründungen, Übernahmen oder Änderungen in der Gesellschaftsform von Unternehmen.

Die Unternehmenslandschaft der Nanotechnologie in Deutschland ist strukturell und thematisch breit aufgestellt und deckt sämtliche Bereiche der Wertschöpfungskette ab. Dazu zählen Produzenten von Nanomaterialien, Hersteller von Geräten zur Erzeugung und Analyse nanoskaliger Strukturen sowie Anwenderunternehmen, die nanotechnologische Komponenten zur Optimierung und Funktionsverbesserung von Zwischen- und Endprodukten in verschiedenen industriellen Anwendungsfeldern einsetzen. Auch der Dienstleistungssektor nimmt eine wichtige Rolle ein, der in verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette nanospezifische Dienstleistungen in den Bereichen Auftragsanalytik und -forschung, Lohnbeschichtung, Beratung, Risikobewertung, Simulation, Vertrieb etc. erbringt.

Zur weiteren Charakterisierung der Nanotechnologieunternehmen in Deutschland wird wie in den vorhergehenden Ausgaben des nano.DE-Reportes eine Stichprobe der an der Fragebogenerhebung beteiligten 175 Unternehmen herangezogen. Da es sich bei der Befragung nicht um ein gleichbleibendes Unterneh-

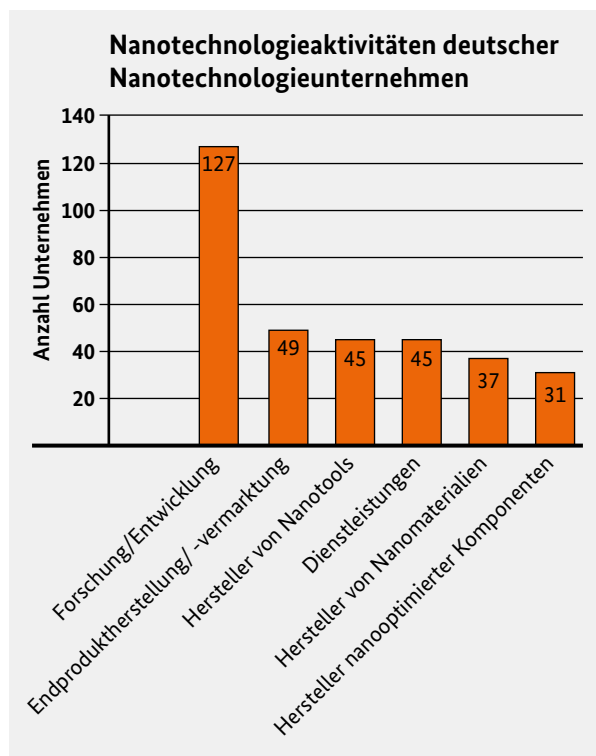
menspanel handelt, sondern eine relativ hohe Fluktuation bei den Teilnehmern zu verzeichnen ist (rund zwei Drittel der antwortenden Unternehmen hatten sich 2011 nicht beteiligt), erfolgt zunächst eine grundsätzliche Charakterisierung der erfassten Nanotechnologieunternehmen. Aus dem Vergleich mit den Daten von 2011 können dabei Rückschlüsse gezogen werden, wie gut die jeweilige Stichprobe die gesamte Unternehmenslandschaft in Deutschland repräsentiert.

Art der Nanotechnologieaktivität und Gründungsjahr

Die teilnehmenden Nanotechnologieunternehmen wurden zunächst im Hinblick auf die Positionierung innerhalb der Wertschöpfungskette sowie dem Gründungsjahr des Unternehmens charakterisiert. Rund zwei Drittel der Unternehmen befassen sich mit der Nanotechnologie im Bereich der Forschung und Entwicklung. Hersteller von nanooptimierten Endprodukten, Dienstleister sowie Hersteller von Geräten zur Nanostrukturierung und -analytik sind mit einem Anteil von jeweils etwa einem Viertel vertreten. Rund

20 % der Unternehmen sind aktiv in der Herstellung von Nanomaterialien und nanooptimierten Komponenten. Die Abweichungen in der Zusammensetzung im Vergleich zur Befragung von 2011 sind gering, so dass davon auszugehen ist, dass die Struktur der Nanotechnologieunternehmenslandschaft durch die Stichproben gut repräsentiert wird.

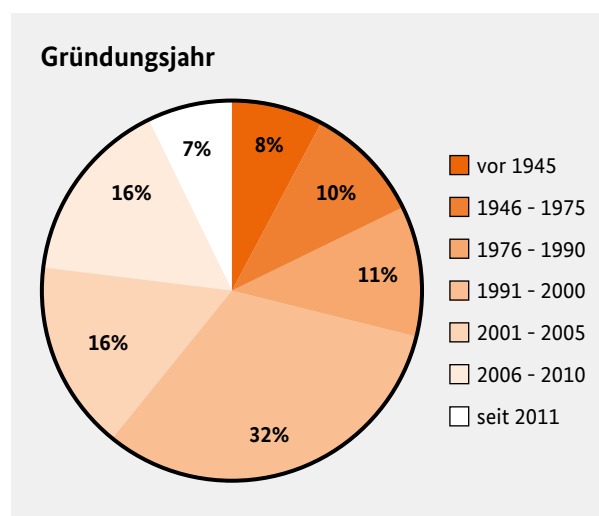
Mit 71 % wurde die deutliche Mehrheit der Unternehmen nach 1990 gegründet. Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der 2011er Befragung (69 % der Unternehmensgründungen nach 1990). Lediglich der Anteil der nach 2006 gegründeten Unternehmen ist mit 23 % im Vergleich zum nano.DE-Report 2011 (14 %) deutlich höher. 12 (7 %) der befragten Unternehmen sind im Zeitraum von 2011 bis 2013 gegründet worden. Dies unterstreicht, dass die Nanotechnologie ein junges und sich weiter entwickelndes Technologiefeld in Deutschland darstellt. Bei den Gründungen handelt es sich allerdings nicht nur um Start-ups, sondern auch um Ausgründungen von Geschäftsbereichen bereits etablierter Unternehmen.



Einordnung der Nanotechnologieaktivitäten deutscher Nanotechnologieunternehmen entlang der Wertschöpfungskette (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013; n = 173, Mehrfachnennungen möglich).

Anteil der Nanotechnologieaktivitäten

Die befragten Unternehmen unterscheiden sich hinsichtlich des Anteils der Nanotechnologie an den Geschäftsaktivitäten. 29 % der Unternehmen befassen sich mit der Nanotechnologie im Kerngeschäft, d. h.



Gründungsjahr der Nanotechnologieunternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013; n = 155).

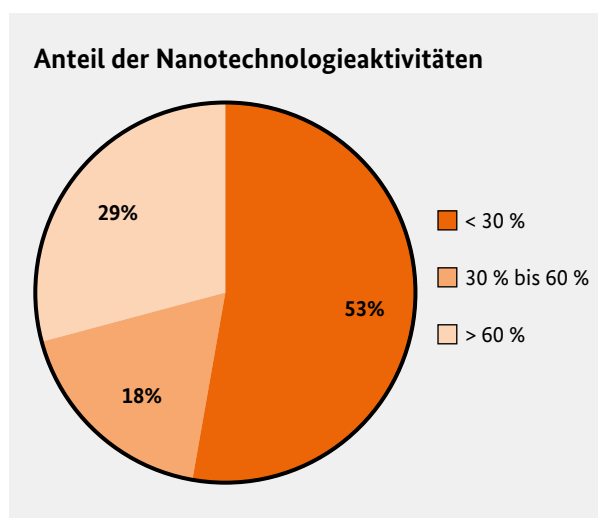
mit einem Anteil von mehr als 60 % der Geschäftsaktivitäten. Hierbei handelt es sich vor allem um spezialisierte Hersteller von Nanomaterialien und Geräten zur Nanostrukturierung und -analytik sowie auch um Komponentenhersteller in der Optik (z. B. Hersteller von nanostrukturierten Diodenlasern) oder in der Elektronik (z. B. Hersteller von Nanoelektronikkomponenten). Dieser Wert stimmt gut mit der 2011er Befragung überein. Hochgerechnet auf die Gesamtzahl der Nanounternehmen gemäß Datenbestand des Kompetenzatlas www.nano-map.de ist davon auszugehen, dass die Anzahl der überwiegend mit der Nanotechnologie befassten Unternehmen in Deutschland derzeit bei rund 300 liegt. Diese Unternehmen treten im Selbstverständnis und in der Außendarstellung allerdings nicht alle als Nanotechnologieunternehmen in Erscheinung, sondern werden z. T. auch klassischen Branchen zugeordnet, wie beispielsweise Halbleiterhersteller der Elektronikbranche.

Bei ca. der Hälfte der Unternehmen spielt Nanotechnologie eher eine untergeordnete Rolle mit einem Anteil kleiner als 30 % an den Unternehmensaktivitäten. Diese Unternehmen betreiben Nanotechnologie überwiegend im F&E-Bereich oder die Nanotechnologie betrifft nur einen relativ geringen Teil der Wertschöpfung bzw. des Geschäftsportfolios. Letzteres gilt beispielsweise für die chemische Großindustrie, die

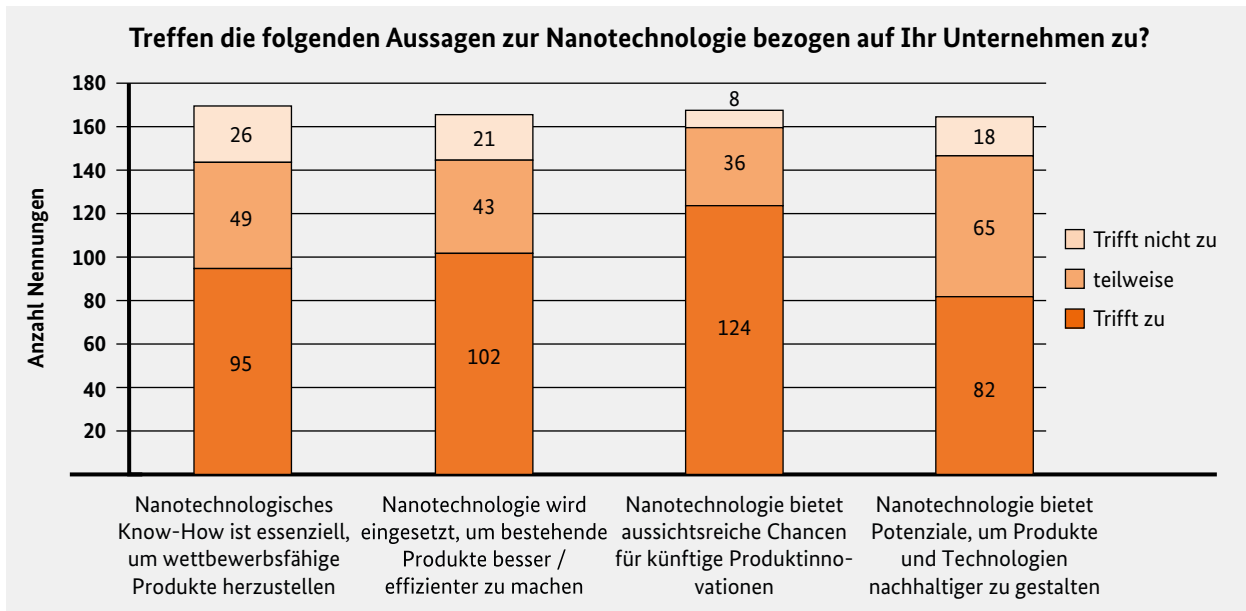
einen wichtigen Kompetenzträger für die Herstellung von Nanomaterialien und Ausgangsstoffen für die Nanotechnologie darstellt, obwohl der relative Anteil der Nanotechnologieaktivitäten am Gesamtgeschäft in der Regel eher gering ausfällt.

Bedeutung der Nanotechnologie

In Ergänzung zur Erfassung des Anteils an den Geschäftsaktivitäten wurde in der vorliegenden Erhebung die Frage nach der inhaltlich/fachlichen Bedeutung der Nanotechnologie für das jeweilige Unternehmen integriert. Rund 75 % der Unternehmen sind der Auffassung, dass Nanotechnologie aussichtsreiche Chancen für künftige Produktinnovationen bietet. Für fünf Prozent trifft diese Aussage nicht zu. Deutlich mehr als die Hälfte der Unternehmen schätzen nanotechnologisches Know-How als essenziell ein, um wettbewerbsfähige Produkte herzustellen und setzen Nanotechnologie ein, um bestehende Produkte besser und effizienter zu machen. Auch die These, dass die Nanotechnologie Potenziale bietet, um Produkte und Technologien nachhaltiger zu gestalten, findet hohe Zustimmung. Lediglich zehn Prozent der Unternehmen teilen diese Auffassung nicht.



Anteil der Nanotechnologie an den gesamten Unternehmensaktivitäten (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013; n = 172).



Bedeutung der Nanotechnologie für die befragten Unternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013; n = 170).

125 der beteiligten Unternehmen haben konkrete Vorteile und Alleinstellungsmerkmale der Nanotechnologie für ihre jeweiligen Produkte und Prozesse benannt. In den meisten Fällen wird als wesentlicher Vorteil der Nanotechnologie die Verbesserung von Materialeigenschaften, die Erzielung neuer Eigenschaften sowie eine bessere Produktperformance genannt. Oftmals ist die Einstellung definierter Materialeigenschaften und das Erreichen multifunktionaler Material- und Produkteigenschaften ein Alleinstellungsmerkmal für die Anwendung der Nanotechnologie.

Nanotechnologieprodukte und die internationale Position Deutschlands

Die Nanounternehmen in Deutschland wurden hinsichtlich ihrer wichtigsten nanotechnologischen Produkte sowie deren Einordnung in Bezug auf Marktpotenziale und die Positionierung Deutschlands im internationalen Wettbewerb befragt. Die folgende Matrix bildet das Spektrum der Antworten ab. Die Position Deutschlands wird insgesamt positiv bewertet. Es zeigt sich aber auch, dass Deutschland in einigen Märkten wie der Elektronik und teilweise der Pharmazie hinter der Konkurrenz aus den USA und Asien liegt. Stark wird Deutschland hingegen in verschiedenen Bereichen der Mess- und Gerätetechnik (z. B. Nanoanalytikgeräte, Ionenstahlbearbeitungsanlagen) der Optik

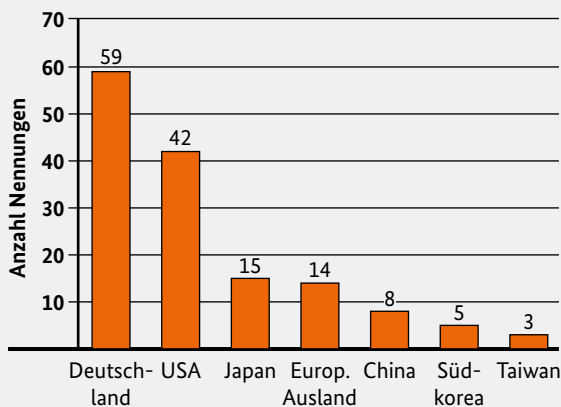
(Röntgenoptiken, Diodenlaser, OLED) sowie in Teilbereichen der Nanomaterialien und -beschichtungen eingeschätzt.

Von den befragten Unternehmen nennen 59 Deutschland als führenden Standort in Bezug auf das jeweilige Produkt, gefolgt von 42 Nennungen für die USA, Japan und dem Rest von Europa. In wenigen Anwendungsfeldern werden auch China, Südkorea und Taiwan als Hauptkonkurrenten genannt. Auch wenn die Einschätzung möglicherweise subjektiv etwas zu positiv bewertet wird, lässt sich insgesamt eine starke Position der deutschen Nanotechnologie-Unternehmen in Bezug auf die adressierten Märkte ableiten. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Abfrage nur einen thematischen Teilausschnitt aus dem Gesamtbereich der Nanotechnologie repräsentiert.

Bewertung der führenden Länder im jeweiligen Marktsegment					
	Keine Angaben	andere führend	D unter Top 3	D führend	
Geschätztes Weltmarktpotenzial	> 1 Mrd. € p.a.	Nanomaterialien/-schichten Beschichtungen für den Einsatz im Baubereich, Autoabgaskatalysatoren Nanobio Nano-Reformulierung von Medikamenten, Medizinische Tracerentwicklung/Drug Delivery Elektronik CMOS FinFET Transistoren 22 nm CMOS Technologie 45/40 nm CMOS Technologie 32/28 nm CMOS Technologie	Nanotools/ Messtechnik Wasserstoffsensoren Nanomaterialien/-schichten Antireflexcoatings für harte Oberflächen, organische Materialien für OLEDs, kratzfeste Beschichtungen Elektronik/Photonik Laserdioden, OLED	Nanotools/ Messtechnik Drucksensoren	
	50 Mio. bis 1 Mrd. € p.a.	Nanotools/ Messtechnik Photoelektronenmikroskopie, Elektronenmikroskopie Nanomaterialien/-schichten Energieeffizienzschichten (Heiz-/Energietechnik), Glazing-Komponenten für den Automotive-Bereich Nanobio Nanocarrier zum gezielten Wirk- und Impfstofftransport ultra-Sensitive Protein-Testung	Nanotools/ Messtechnik Rastersondenmikroskopie, Elektronenstrahl-Lithographiesysteme Nanomaterialien/-schichten Nanoschichten für Dentalanwendungen, antimikrobielle Beschichtungen	Nanotools/ Messtechnik Tieftemperatur-/Vakuum-Rastertunnelmikroskope, IR-Emitter Nanomaterialien/-schichten Antibakterielle Lackierung, Kratzfest-Lackierung Nanobio Zellisolierung/-charakterisierung (Streptamer-Technologie)	
	Bis 50 Mio. € p.a.	Nanotools/ Messtechnik Dosieranalyse für Nano-Suspensionen, Beamline-Endstations, Röntgenoptik für Fluoreszenzspektrometrie Nanomaterialien/-schichten Nanooptimierte Trennmittel	Nanotools/ Messtechnik AFM-Sonden, Software für Modellierung und Auswertung, Partikelgrößenanalyse im nm-Bereich, Lab on a chip Systeme, universeller nanomechanischer Tester Nanomaterialien/-schichten Biofilmträger für biologische Kläranlagen, Beschichtungen für Medizintechnik, Elektrolumineszenz-Folien, Carbon Nanohorns	Nanotools/ Messtechnik Nanokeramische Sprühdüsen Micro-Contact-Printing Nanomaterialien/-schichten QD-Halbleiter, Nanometer-Multischichten, Dental-Füllstoffe, Nanozusätze für UHPC	Nanotools/ Messtechnik LEIS-Analysegeräte, Röntgenoptik für Synchrotrons, Nanowerkbank, TOF-SIMS, Röntgenoptik für Diffraktometer, Partikelgrößen-Standards Nanomaterialien/-schichten Nano-Alu-Gießwerkstoffe, Textil-Beschichtungen, Kohlenstoffnanomembranen, Hartmetalle mit nano-Binder, Dämmstoffe, Filtermaterialien mit nano-Adsorbentien, magnetische Nanopartikel, antibakterielles Nanosilber Nanobio Retina Implantate
	Keine Angaben	Nanomaterialien/-schichten Graphene, Edelmetallnanopulver, Nanodiamant, leitfähige Vliese (EMV), leitfähige Tinten, Quantenpunkte, optische Funktionsschicht, Wärmetauscherbeschichtung, Reflexionsschichten (UV, VIS, IR), Dekorationsschichten, Membranen zur Wasseraufbereitung, Polymer-Füllstoffe, Höchstleistungsbeton, Wärmedämmung, Bitumen-Additive Nanobio Hochbrechende Polymere für ophthalmologische Implantate, Intraokularlinse mit Wirkstoffdepot	Nanotools/ Messtechnik Nanobasierte IR Komponenten (Ermittler und Detektoren) für NDIR-Gassensorik Nanomaterialien/-schichten CNT/Carbon Papier, CNT, Wasserstoff-Speicherung, chemische u. elektrochemische Energiespeicher, Nanotechnik-basierte Fugematerialien für MST Fertigung, holografische Sicherheitsetiketten, Verkapselung von Inhaltsstoffen (Kosmetik, Lebensmittel) Nanobio Nicht-virale genetische Modifizierung von Zellen	Nanotools/ Messtechnik Mikrolithographie, PVD/PECVD-Anlagen Nanomaterialien/-schichten Nanofasern, Halloysit Nanotubes, Vliesstoffe für Filter Beschichtungen auf optischen Bauteilen, Bautenfarben, Lacke und Lasuren, leitfähige Oberflächen/Komposite Elektronik/Photonik Funktionale Schichten für Photonik-Elektronik Integration auf Si-Basis, Si-GaAs-Substrate	Nanotools/ Messtechnik Ionenstahlbearbeitungsanlagen/Präzisionsoptiken, Nanomaterialien/-schichten Magnesiumfluorid-Sole, chemisch Nickel Nano-Schichten, Versiegelung verzinkter Bauteile, tribologische Oberflächen, easy-to-clean Eigenschaften Fassadenimprägnierung, Korrosionsschutz, Markisengewebe mit Nano-Ausrüstung, nanobeschichtete Zahnimplantate, PVD beschichtete Werkzeuge

Exemplarische Übersicht zu wichtigen Nanoprodukten deutscher Nanotechnologieunternehmen mit jeweiliger Einordnung der Marktpotenziale sowie der Position Deutschlands im internationalen Vergleich (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n=148).

Führende Länder für Nanotechnologie-Anwendungen und -Produkte



Einschätzung der führenden Länder in Bezug auf die wichtigsten Nanotechnologienanwendungen und -produkte der befragten Unternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013; n = 104, Mehrfachnennungen möglich).

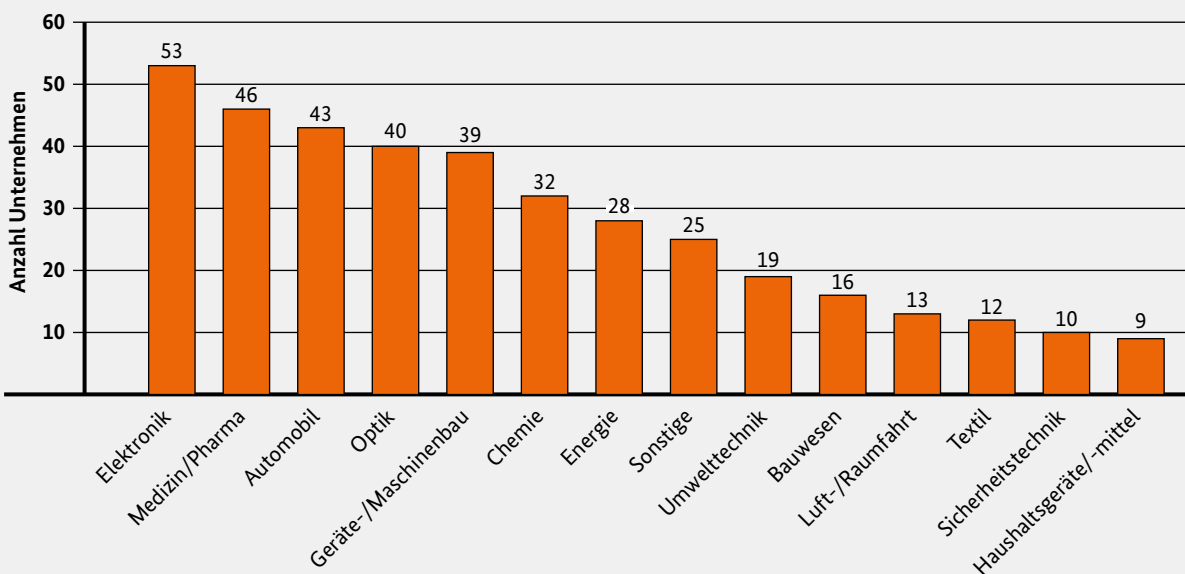
Zu den wichtigsten Anwendungsfeldern nanotechnologischer Produkte der beteiligten Unternehmen zählt die Elektronik gefolgt von den Sektoren Medizin/Pharma, Automobil, Optik und Chemie.

Internationale Vernetzung deutscher Nanotechnologieunternehmen

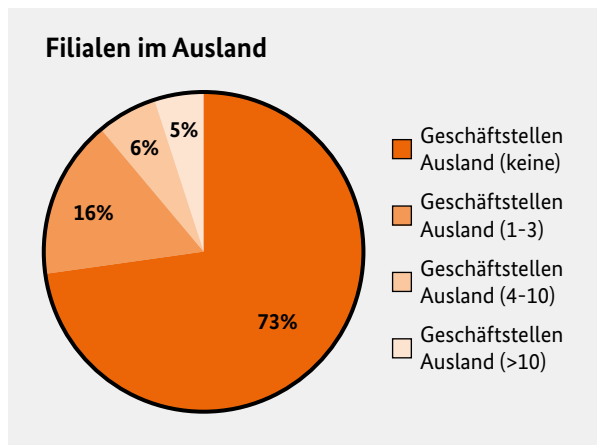
Zur Charakterisierung der internationalen Vernetzung wurden die beteiligten Unternehmen hinsichtlich des Stammsitzes, ausländischer Filialen, Absatzmärkten sowie der Bedeutung ausländischer Kooperationspartner befragt. Fast alle der beteiligten Unternehmen haben ihren Stammsitz in Deutschland, bis auf fünf Unternehmen, (vier in den USA und eines in den Niederlanden). Rund ein Viertel der Unternehmen verfügt über mindestens eine Zweigstelle im Ausland. Fünf Prozent sind internationale Konzerne mit mehr als zehn ausländischen Filialen. Die deutliche Mehrheit von 73 % der deutschen Nanotechnologieunternehmen produziert ausschließlich im Inland.

Bezogen auf die Absatzmärkte stellt Deutschland weiterhin den wichtigsten Markt dar. Im Vergleich zu der Erhebung von 2011 ist der Anteil an Unternehm-

Wichtigste Anwendungsfelder nanotechnologischer Produkte

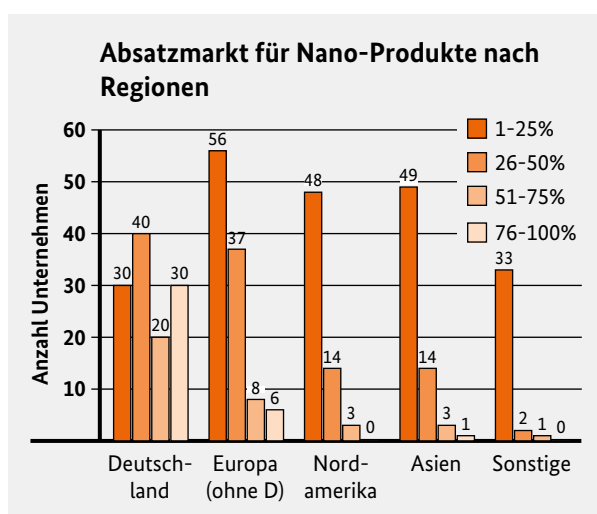


Wichtigste Anwendungsfelder der nanotechnologischen Produkte der befragten Unternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013; n = 173, max. drei Nennungen waren möglich).



Anzahl der ausländischen Zweigstellen deutscher Nanotechnologie-Unternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 160).

men, die fast ausschließlich für den deutschen Markt produzieren geringer. In Bezug auf die ausländischen Märkte bleibt Europa der wichtigste Absatzmarkt für deutsche Nanounternehmen. Nordamerika und Asien sind ungefähr gleichbedeutend, wobei diese Märkte bei den meisten Unternehmen jeweils maximal ein Viertel des Gesamtumsatzes ausmachen. Der Anteil sonstiger Regionen liegt geringfügig höher als bei der 2011er Befragung, allerdings weisen nur ca. ein Viertel der Unternehmen hier nennenswerte Umsätze aus.



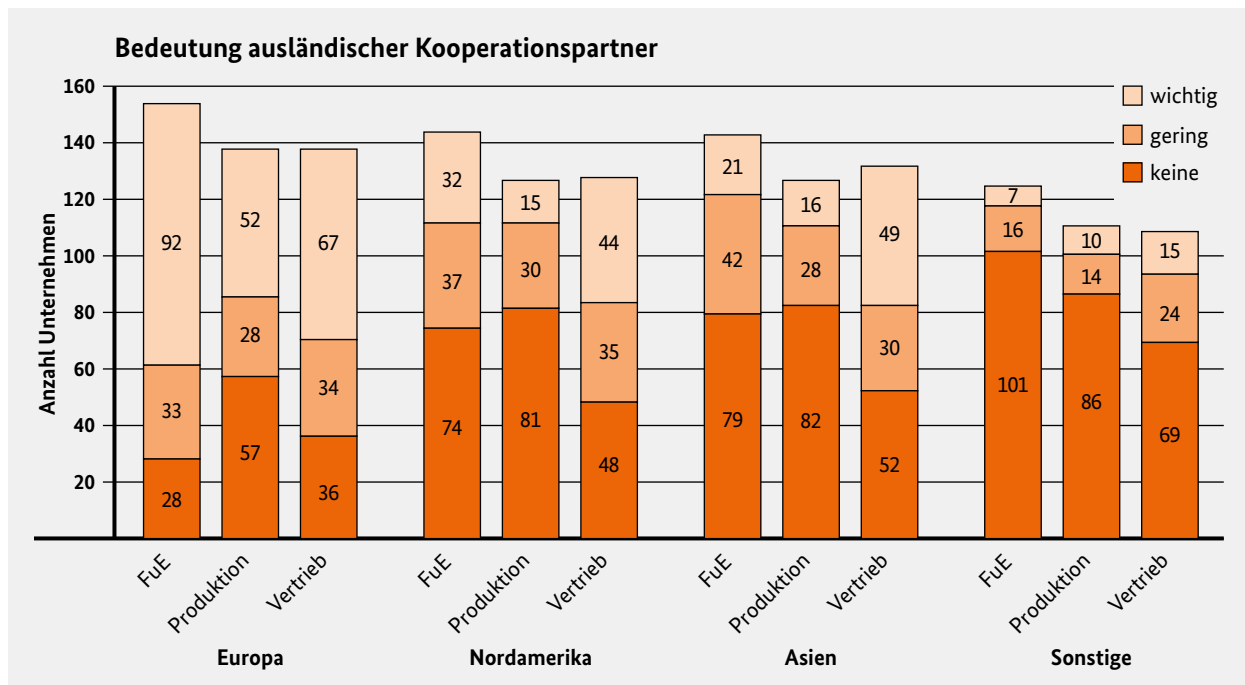
Bedeutung verschiedener Regionen als Absatzmarkt für deutsche Nanotechnologieunternehmen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 120).

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. Knapp zwei Drittel 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. In Bezug auf F&E-Kooperationspartner wird Nordamerika häufiger als wichtig eingestuft als Asien, während Asien mehr Nennungen hinsichtlich der Bedeutung von Vertriebspartnern erhalten hat.

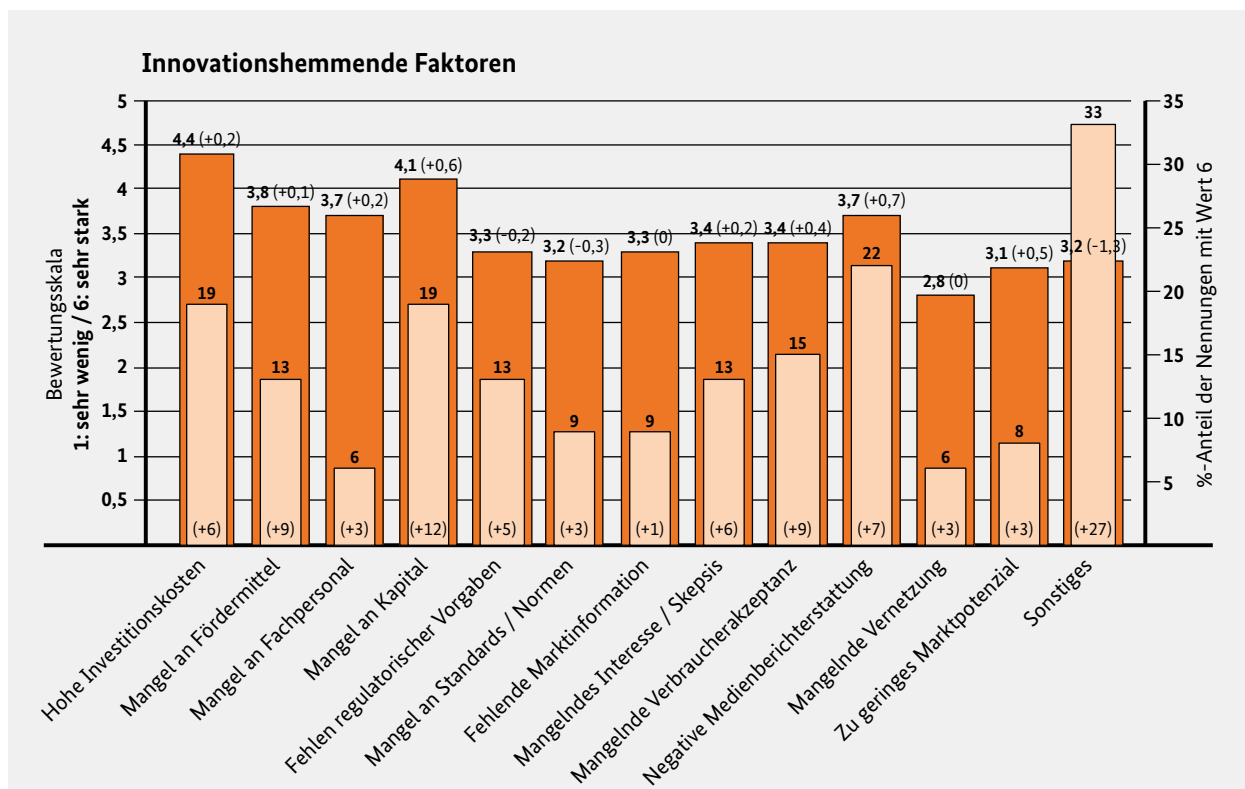
Innovationshemmnisse

Die Mehrheit der deutschen Nanotechnologieunternehmen sieht keine schwerwiegenden Innovationshemmnisse im Hinblick auf die Kommerzialisierung von Nanotechnologieprodukten. Der Wertungsschnitt der abgefragten Faktoren liegt im mittleren Bereich von 2,8 bis 4,4 auf einer Skala von 1 (sehr wenig) bis 6 (sehr stark). Gegenüber der Befragung von 2011 haben sich keine gravierenden Verschiebungen der Wertungsdurchschnitte ergeben. Als relevanteste Barrieren werden weiterhin finanzielle Faktoren wie hohe Investitionskosten und ein Mangel an Kapital und an Fördermitteln eingeschätzt. Relativ weit oben in der Wertungsskala liegt weiterhin der Mangel an Fachpersonal und die negative Medienberichterstattung zu Nanorisiken. Letzterer Faktor wird von fast einem Viertel der Unternehmen (+ 7 % gegenüber der 2011er Befragung) als sehr starke Innovationsbarriere bewertet. Die Analyse der Datensätze zeigt, dass diese Einschätzung nicht nur Nanomaterialhersteller betrifft, sondern breit gestreut über unterschiedliche Teilbereiche und Anwendungsfelder der Nanotechnologie vertreten wird.

Sonstige von den Unternehmen genannte Innovationsbarrieren beziehen sich in erster Linie auf unternehmerische Risiken wie z. B. die Unsicherheit in überschaubarem Zeithorizont einen Return on Invest zu erzielen, fehlende technologische/innovative Durchbrüche sowie die zu große Lücke zwischen Grundlagenforschung und kommerzieller Anwendung („valley of death“). Als weitere Hindernisse werden vereinzelt auch zu viel Bürokratie, eine generelle Technikfeind-



Bedeutung ausländischer Kooperationspartner für Forschung und Entwicklung, Produktion und Vertrieb (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 153).



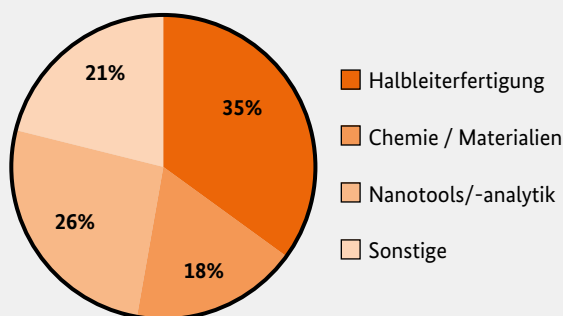
Bewertung hemmender Faktoren auf die Kommerzialisierung von Nanotechnologieprodukten. In Klammern ist jeweils die Veränderung gegenüber dem nano.DE-Report 2011 angegeben. (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 173).

lichkeit in Europa sowie eine zu geringe Förderung von Unternehmer-/Gründertum angeführt. Im Baubereich wird die langwierige Zulassung neuer Werkstoffe nach deutschem Baurecht als starke Innovationsbarriere bewertet.

Arbeitsplätze, Umsatz und Forschungsausgaben

Wie in den vorangegangenen Befragungen wurden auch in der aktuellen Erhebung Arbeitsplätze, Umsatz und Forschungsausgaben der Unternehmen im Bereich der Nanotechnologie erfasst. Die Angaben der Unternehmen beruhen dabei auf einer Selbsteinschätzung hinsichtlich der Zuordnung von Unternehmensaktivitäten zur Nanotechnologie im Sinne der verwendeten Definition. In Summe gaben die 141 antwortenden Unternehmen an, rund 10.200 Mitarbeiter im Bereich der Nanotechnologie zu beschäftigen. Die Struktur der Stichprobe wird durch Aufschlüsselung nach Technologiefeldern deutlich. Circa ein Drittel der Arbeitsplätze fällt auf die Nanoelektronik, ca. ein Viertel auf den Bereich Nanotools/-analytik und ca. ein Fünftel auf den Sektor Chemie/Materialien. Zwölf Prozent der Arbeitsplätze sind KMU zuzuordnen, deren Geschäftstätigkeiten sich nach eigenen Angaben zu überwiegendem Anteil mit der Nanotechnologie befassen.

Verteilung der Arbeitsplätze nach Sektoren



Aufschlüsselung der Stichprobe zu Beschäftigten im Bereich der Nanotechnologie nach Sektoren (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 141).

Die Zuordnung zur Nanotechnologie hat aufgrund des Fehlens eindeutig nachvollziehbarer Definitionskriterien allerdings eher subjektiven Charakter. Vor allem bei Unternehmen, die sich nur in Teilbereichen mit der

Nanotechnologie befassen, ist eine Zuordnung schwierig. Eine isolierte Betrachtung nanotechnologischer Verfahren ist vor allem bei komplexeren Wertschöpfungsketten kaum möglich und aus unternehmerischer Sicht oftmals auch nicht sinnvoll. Dies gilt speziell für die Großindustrie, sofern die Nanotechnologie nicht klar einzelnen Organisationsstrukturen zugerechnet werden kann. Eine Zuordnung ist möglich beispielsweise in der Halbleiterfertigung oder bei der Herstellung von Nanotechnologieequipment (z. B. Lithografiegeräte), da die jeweiligen Geschäftsbereiche in der Regel komplett der Nanotechnologie zugeordnet werden können. Auch KMU, die sich nach eigenem Verständnis als Nanotechnologieunternehmen bezeichnen, rechnen in der Regel ihre gesamten Geschäftsaktivitäten der Nanotechnologie zu. In diesem Fall werden dann sämtliche Mitarbeiter erfasst, während bei anderen Unternehmen z. T. nur die Wissenschaftler und Techniker zugerechnet werden, die unmittelbar an Nanotechnologieentwicklungen und -projekten arbeiten. Problematisch ist die Zuordnung in der chemischen Industrie, da auf EU-Ebene Nanomaterialien im regulatorischen Kontext unabhängig von einer funktionalen Nanoeigenschaft definiert werden und in diesem Sinne auch konventionelle Chemieprodukte erfasst werden können. Dies erschwert eine Abgrenzung und senkt zudem die Bereitschaft der Unternehmen, sich selbst der Nanotechnologie zuzurechnen aufgrund möglicher regulatorischer Einschränkungen.

Trotz der beschriebenen Zuordnungsprobleme und einer mangelnden Objektivierbarkeit lassen sich die Ergebnisse der Erhebungen heranziehen, um die volkswirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnologie zumindest in der Größenordnung zu erfassen. Um eine Abschätzung für die Gesamtzahl der Arbeitsplätze der Nanotechnologie in Deutschland zu erhalten, wird eine lineare Hochrechnung der erhobenen Stichprobe auf die Gesamtzahl der Unternehmen vorgenommen, die zum Zeitpunkt der Erhebung im Kompetenzatlas Nanotechnologie verzeichnet waren. Dabei wird von der vereinfachenden Annahme ausgegangen, dass die Stichprobe repräsentativ für die Gesamtzahl der Nanotechnologieunternehmen in Deutschland ist. Die Datenbasis bilden hierbei die zum Zeitpunkt der Befragung im Kompetenzatlas www.nano-map.de verzeichneten 1094 Unternehmen. Da ca. 11 % der Stichprobe der befragten Unternehmen angaben, nicht im

Nanotechnologiebereich tätig zu sein, wird die Grundgesamtheit für die Hochrechnung um diesen Wert korrigiert und mit 975 Nanotechnologie-Unternehmen angenommen. Durch lineare Hochrechnung von den 141 antwortenden Unternehmen auf die Gesamtheit von 975 Unternehmen errechnet sich hieraus ein Wert von rund 70.000 Arbeitsplätzen in der Nanotechnologie in Deutschland. Diese Abschätzung fügt sich gut in die Reihe der vorgehenden Erhebungen ein. Das liegt vor allem an einer weitgehend konstanten Beteiligung einiger Großunternehmen, die hinsichtlich der Beschäftigtenzahl mehr als 50 % der Stichprobe ausmachen. Dabei handelt es sich um Großunternehmen aus der Halbleiterfertigung, bzw. der Optik/Messtechnik (Lithografiegeräte, Nanoanalytikgeräte, Präzisionsoptiken). Die chemische Industrie stellt in dieser Hinsicht einen Spezialfall dar (s. BASF-Beitrag rechts).

Aufgrund von Plausibilitätsbetrachtungen lässt sich annehmen, dass Unternehmen, die sich an der Umfrage beteiligen, in ausgewogenem Verhältnis zu Firmen stehen, die sich nicht beteiligen, aber von denen aufgrund von Größenstruktur und Tätigkeitsfeld her ähnliche Aktivitäten angenommen werden können. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die ermittelten 70.000 Arbeitsplätze zumindest in der Größenordnung die wirtschaftliche Bedeutung der Nanotechnologie in Deutschland abbilden kann. Zur Plausibilisierung lässt sich anführen, dass allein am Elektronik-Cluster Dresden 51.000 Mitarbeiter beschäftigt sind,^[2] von denen sich ein erheblicher Anteil mit Nanotechnologie befasst. In der chemischen Industrie in Deutschland mit derzeit rund 43.000 Mitarbeitern allein in der Forschung^[3] zählt die Nanotechnologie zu den wichtigen Kernkompetenzen. Auch im Photonik-/Optiksektor mit derzeit 134.000 Mitarbeitern in Deutschland haben nanotechnologische Fragestellungen erhebliche Bedeutung (vgl. Abschnitt 3.6). Hinzu kommen ca. 300 ausschließlich mit der Nanotechnologie befasste KMU, auf die gemäß der Stichprobenhochrechnung ein Anteil von rund 8.000 Mitarbeitern in Deutschland fällt. Für die Ableitung konjunktureller Entwicklungen ist die Abschätzung allerdings nicht geeignet, da zu große Unsicherheiten bezüglich des Verfahrens der Hochrechnung, der Definition und der Zurechenbarkeit der Nanotechnologie zu einzelnen Geschäftsaktivitäten bestehen.

Gastbeitrag: Nanotechnologie aus Sicht der chemischen Industrie – Das Ziel sind Produkte nicht Technologien

Professor Dr. Martin Strohrmann, Senior Vice President, Material Physics & Analytics, BASF SE

Welchen Beitrag leistet die Nanotechnologie zur Beschäftigung in Deutschland? Auch im mittlerweile dritten nano.DE Bericht des BMBF ist das erneut eine wesentliche Frage. Und auch diesmal wurden im Vorfeld die entscheidenden „Nano-Akteure“ befragt, wie viele Mitarbeiter im Bereich Nanotechnologie beschäftigt sind. Darunter auch wieder die BASF. Aber eines ist zumindest anders als sonst: BASF wird für diesen Bericht zum ersten Mal keine Beschäftigungszahlen liefern. Denn als echte Querschnittstechnologie nutzen wir die Nanotechnologie mittlerweile in den unterschiedlichsten Bereichen, um nachhaltige Lösungen voranzutreiben. Mit ihr können wir Materialien und Systeme entwickeln, die zum Beispiel besondere Oberflächeneigenschaften, mechanische Festigkeit, optische Eigenschaften oder isolierende Wirkung haben. So ermöglichen beispielsweise nanoporöse Dämmstoffe eine deutlich effizientere Isolierung von Gebäuden als klassische Dämmmaterialien. Damit leistet die Nanotechnologie einen wichtigen und unverzichtbaren Beitrag zur Nachhaltigkeit. Aber: Die Nanotechnologie im Sinne einer gezielten Strukturierung auf der Nanoskala ist nur eine von verschiedenen Technologien, neben anderen Werkzeugen wie der Prozesstechnik, der computergestützten Modellierung und der „klassischen“ chemischen Synthese. Eine Berechnung wie viele Mitarbeiter in diesem Bereich beschäftigt sind, ist für uns nicht entscheidend. Wir konzentrieren uns auf die Entwicklung von Produkten mit dezidierten Eigenschaften und nutzen dabei jeweils die Technologie, die es uns ermöglicht, unser Ziel zu erreichen.

Denn aus Sicht der Kunden zählen die Eigenschaften eines Produktes. Dabei ist es nicht relevant, ob ein Produkt mit Hilfe der Nanotechnologie entwickelt und hergestellt wurde oder nicht. Eine Ausnahme sind Kunden in Branchen, die angesichts der Risikodiskussion eine Ablehnung von Verbrauchern befürchten oder regulative Anforderungen erfüllen müssen. Die Grundlage dafür sind regulatorische Definitionen. Sie unterscheiden sich jedoch wesentlich vom „allgemei-

nen Verständnis“ von Nanotechnologie, wie es ISO definiert hat und was die Grundlage des nano.DE Berichts ist. Bei ISO zählen zum Beispiel nanostrukturier- te Materialien und Nanoobjekte zu den Nanomateriali- en. Die EU definiert in ihrer regulatorischen Definition Nanomaterialien jedoch nur über den Anteil an Nano- objekten im jeweiligen Material. Als Unternehmen müssen wir uns mit der regulatorischen Definition der EU befassen, um die Anforderungen unserer Kunden zu verstehen und um unsere gesetzlichen Anforderun- gen zu erfüllen. Das ist ein Unterschied der Nanotech- nologie zu den meisten anderen Technologien.

Ein weiterer Unterschied, der sich aus unserer Eigenverantwortung ergeben hat, ist die spezielle Sicherheitsforschung zu Nanomaterialien. In den vergangenen acht Jahren haben wir uns als BASF eine hohe Expertise und Reputation erarbeitet. Wir haben bisher mehr als 150 Sicherheitsstudien durchgeführt und uns mit Partnern an 27 nationalen und internati- onalen Projekten beteiligt. Darunter auch vom BMBF geförderte Projekte wie NanoCare und NanoGEM. Das zentrale Ergebnis von NanoGEM ist, dass die Eigen- schaften einer Substanz wesentlich darüber entschei- den, wie sich ein Nanopartikel im Körper verhält und nicht dessen Größe. Diese Meinung wird zwischenzeit- lich von mehreren renommierten Wissenschaftlern ge- teilt wie z. B. von Donaldson und Poland,^[4] die in einer gemeinsamen Veröffentlichung mit dem Mythos einer nano-spezifischen Toxizität aufräumen. Es scheint, als würden auch in der Toxikologie langsam die Grenzen von nano und nicht nano verschwinden.

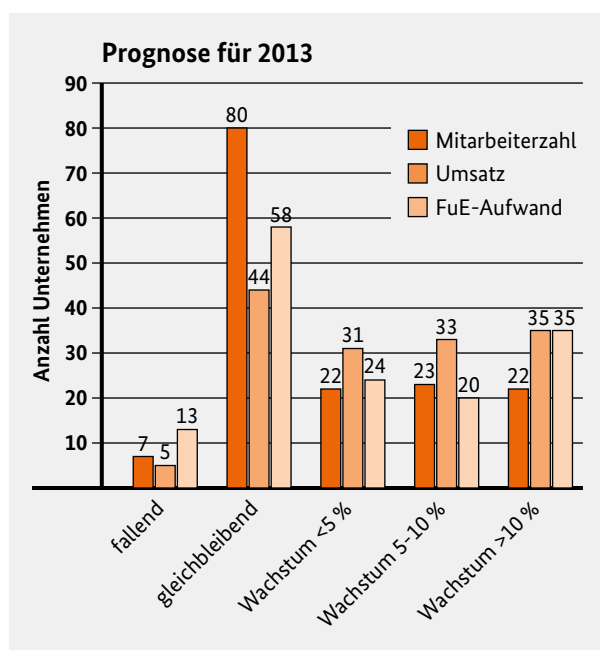
Die Nanotechnologie ist aus unseren heutigen Laboren nicht mehr wegzudenken. Sie ist ein starker Innovationstreiber bei der Entwicklung nachhaltiger Lösungen, die wir benötigen, um den großen Heraus- forderungen unserer Zeit zu begegnen. Ihre Potenziale hat sie noch lange nicht voll entfaltet. Wie wir unsere hoch gesteckten Ziele wie zum Beispiel die Energie- wende erreichen – ob mit nano oder ohne nano – wird zwar letztlich egal sein. Ich bin aber sicher, es geht nicht ohne Nanotechnologie.

111 der befragten Unternehmen haben Angaben zum Umsatz im Bereich der Nanotechnologie für das Jahr 2012 gemacht. Hieraus ergibt sich eine Summe von rund 1,7 Mrd. €. Durch lineare Extrapolation auf die Gesamtzahl der aktiven Nanounternehmen in Deutschland (975, korrigiert um nicht aktive Unterneh- men s. oben, Stand Juni 2013) kann der Gesamtumsatz deutscher Nanotechnologieunternehmen auf rund 15 Mrd. € geschätzt werden. Im Vergleich zur Abschät- zung von 2010 mit 13 Mrd. € lässt sich eine positive Entwicklung ableiten. Allerdings gelten die gleichen Einschränkungen der Aussagekraft der Abschätzungen wie bei der Zahl der Arbeitsplätze.

Die Unternehmen wurden hinsichtlich des gesam- ten Forschungsaufwandes des Unternehmens und des Forschungsaufwandes befragt, der der Nanotechnolo- gie zugerechnet werden kann. Die Nanotechnologie- forschungsinvestitionen im Jahr 2012 summierten sich nach Angaben von 111 antwortenden Unternehmen auf 42 Mio. €. Dieser Wert liegt deutlich niedriger als bei der Erhebung 2011, was in erster Linie durch den Einfluss fehlender Angaben von Großunternehmen in der aktuellen Erhebung bedingt ist. Gemäß einer Hochrechnung nach oben beschriebenem Verfahren würden die gesamten Nanotechnologie-Forschungsin- vestitionen von Unternehmen in einer Größenordnung von 370 Mio. € liegen. Da Großunternehmen bezüglich der Angaben zum Forschungsaufwand in der Stichpro- be unterrepräsentiert waren, ist diese Abschätzung aber eher als zu niedrig einzustufen.

Die Unternehmen wurden hinsichtlich der wirt- schaftlichen Entwicklung im laufenden Geschäftsjahr 2013 befragt. Die Abschätzungen zum Zeitpunkt Juni/ Juli 2013 liefern hierbei eine belastbare Datenbasis hin- sichtlich der Entwicklung der Geschäftsaktivitäten des jeweiligen Unternehmens und bieten in der Summe eine gute Prognose in Bezug auf die konjunkturelle Entwicklung des gesamten Nanotechnologiesektors. Demnach ist derzeit von einem positiven wirtschaft- lichen Trend der Nanotechnologie in Deutschland auszugehen. So rechnen zwei Drittel der Unterneh- men mit einem Umsatzwachstum, ein Fünftel sogar mit einem Wachstum von über 10 %. Hinsichtlich der Mitarbeiterzahlen und der Forschungsinvestitio- nen fallen die Einschätzungen etwas moderater aus. Immerhin 40 % erwarten eine Zunahme der Nano-

technologie-Arbeitsplätze und 50 % eine Zunahme der Forschungsinvestitionen in 2013. Weniger als 5 % der Unternehmen prognostizieren eine Abnahme der Umsatz- und Beschäftigtenzahlen. Rund 8 % rechnen mit fallenden Forschungsinvestitionen im Bereich der Nanotechnologie.



Prognose der Geschäftsentwicklung für das Jahr 2013, Stand Juli 2013 (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 154).

2.2 Öffentliche Nanoforschungsinstitutionen

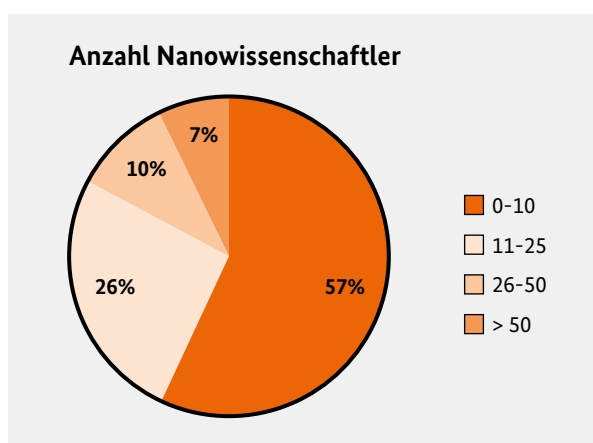
Im Rahmen der VDI TZ durchgeführten Akteursbefragung wurden öffentliche Forschungsinstitutionen mit einem separaten Fragebogen adressiert. Die folgenden Angaben betreffen eine Stichprobe von 174 Forschungsinstitutionen. Dies entspricht einer Beteiligungsquote von 23 % bezogen auf die Gesamtzahl der im Kompetenzatlas erfassten Nanotechnologieforschungseinrichtungen (vgl. Abschnitt 1.2). Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde der gleiche Fragebogen wie bei der 2011er Erhebung verwendet. Da rund 60 % der antwortenden Forschungsinstitutionen sich erstmalig an der Befragung beteiligt haben, lässt ein Vergleich mit den 2011er Ergebnissen nicht nur Rückschlüsse hinsichtlich einer Veränderung des

Nanotechnologieengagements zu, sondern auch im Hinblick darauf, wie gut die jeweilige Stichprobe die gesamte Nanotechnologieforschungslandschaft in Deutschland abbildet.

Charakterisierung deutscher Nanoforschungsinstitutionen

Zunächst wurden die Nanotechnologieforschungsinstitutionen 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.

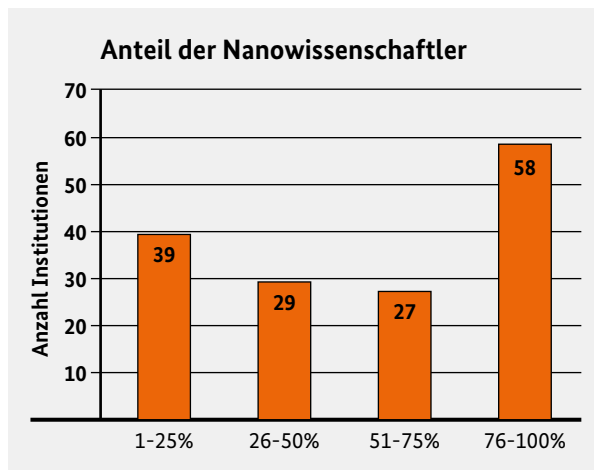
Bei einem Großteil der befragten Institutionen ist die Größe der Forscherteams auf ein bis zehn Wissenschaftler beschränkt. In 7 % der Einrichtungen befassen sich mehr als 50 Forscherinnen und Forscher mit der Nanotechnologie, wobei das größte Forscherteam ein über mehrere Institute verteiltes universitäres Nanotechnologienetzwerk mit 350 Wissenschaftlern darstellt.



Anzahl der Wissenschaftler in den beteiligten öffentlichen Nanotechnologieforschungseinrichtungen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 153).

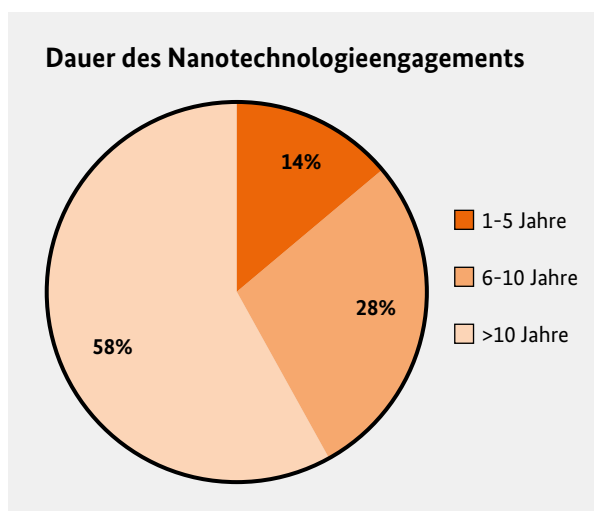
Bei gut einem Drittel der Institutionen handelt es sich um spezialisierte Nanotechnologieforschungseinrichtungen mit einem Anteil an Nanowissenschaftlern von über 75 %. 49 Institutionen befassen sich ausschließlich mit der Nanotechnologie. Die Mehrzahl der

Einrichtungen ist neben der Nanotechnologie auch in anderen Forschungsbereichen aktiv.



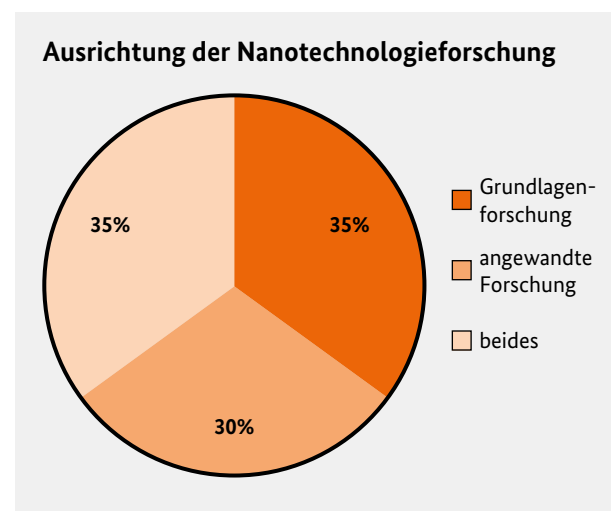
Anteil der Wissenschaftler im Bereich Nanotechnologie bezogen auf die Gesamtzahl der Wissenschaftler in den beteiligten Forschungseinrichtungen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013; n = 153).

58 % der Forschungsinstitutionen sind bereits länger als zehn Jahre auf dem Gebiet der Nanotechnologie engagiert. 14 % der Einrichtungen haben ihre Forschungsaktivitäten erst in den letzten fünf Jahren auf die Nanotechnologie ausgeweitet oder sind neu gegründet worden.



Dauer des Nanotechnologieengagements der Forschungsinstitutionen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 155).

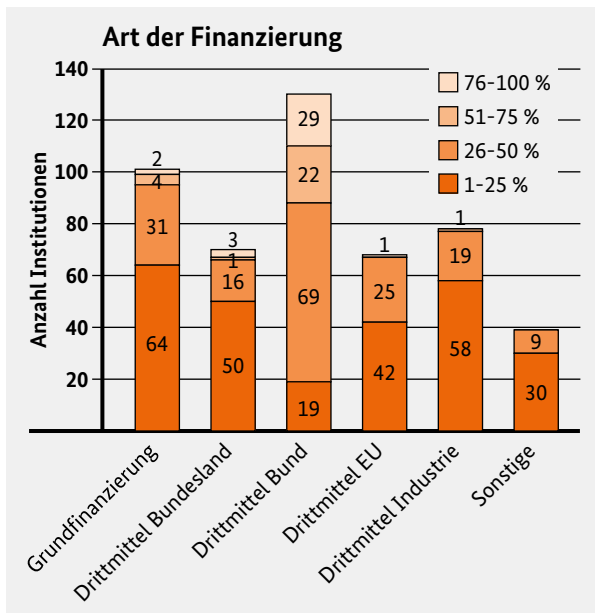
Die Ausrichtung der Nanotechnologieforschungslandschaft in Deutschland gibt wie in der 2011er Befragung ein sehr ausgewogenes Bild in Bezug auf Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung. Jeweils ca. ein Drittel der Einrichtungen ist ausschließlich auf Grundlagen bzw. Anwendungen orientiert und ein weiteres Drittel befasst sich mit beiden Aspekten.



Ausrichtung der Nanotechnologieforschung (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 167).

Finanzierung der Forschungstätigkeit

Auch in Bezug auf die Finanzierung der Nanotechnologieforschung in Deutschland ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie in der 2011er Stichprobe. Drittmittel bilden weiterhin die wichtigste Basis für die Finanzierung. Der Bund stellt dabei den größten Förderer dar, gefolgt von Drittmitteln der Industrie, den Bundesländern und der Europäischen Kommission. Der Anteil der Grundfinanzierung liegt bei fast allen Institutionen unter 50 %. Sonstige Fördermittel spielen eine untergeordnete Rolle.

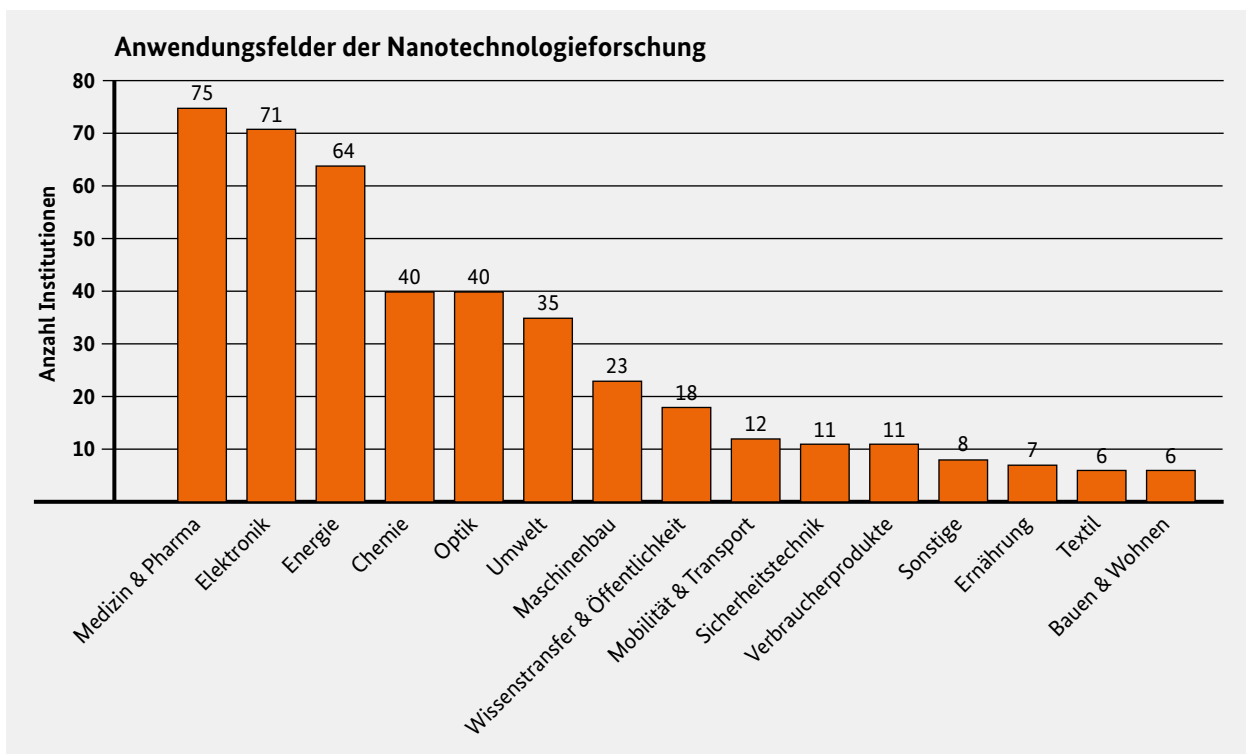


Finanzierung der Nanotechnologieforschung (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 153).

Forschungsthemen und Anwendungsschwerpunkte

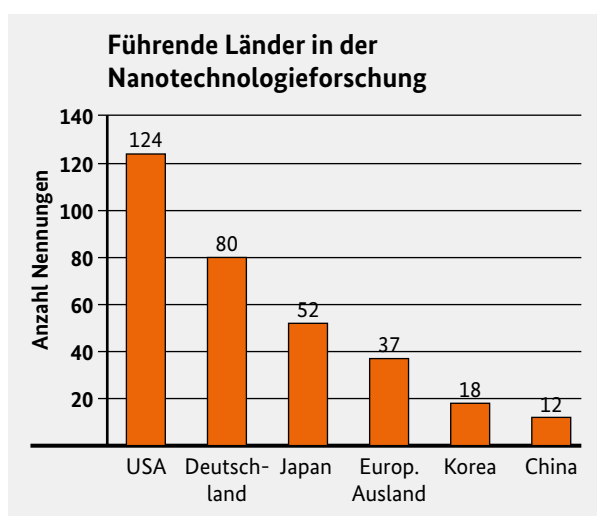
Nach Einschätzung der befragten Forschungsinstitutionen werden in den nächsten fünf bis zehn Jahren vor allem die Bereiche Medizin/Pharma, Elektronik und Energie von den Forschungsergebnissen der Nanotechnologie profitieren. Die Einschätzung deckt sich mit den Ergebnissen der 2011er Befragung. Lediglich der Bereich Medizin/Pharma hat die Elektronik als wichtigstes Anwendungsfeld mit etwas Vorsprung abgelöst. Die nächst wichtigen Anwendungsfelder sind Chemie, Optik und Umwelt. Insgesamt wird ein breites Anwendungsspektrum adressiert, was auch dem Querschnittscharakter der Nanotechnologie entspricht.

Die Forschungseinrichtungen sind weiterhin nach ihren Nanotechnologie-Forschungsgebieten befragt worden, die sie in Bezug auf Markt- und Produktpotenziale in den nächsten 5 bis 10 Jahren am relevantesten einschätzen. Hierbei wurden auch die jeweiligen Anwendungsfelder und die führenden Länder im jeweiligen Forschungsgebiet abgefragt. In Bezug auf die Bewertung der führenden Position in den genannten



Anwendungsfelder, die in den nächsten 5 bis 10 Jahren am stärksten von der Nanotechnologieforschung profitieren werden (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 159, bis zu drei Nennungen pro Institution).

Forschungsfeldern mit den aussichtsreichen Markt- und Produktpotenzialen erhalten die USA mit 124 die häufigsten Nennungen. Deutschland wird von 80 Institutionen zu den führenden Nationen im jeweiligen Forschungsfeld gezählt. Es folgen Japan mit 52 Nennungen, das europäische Ausland (37), Korea (18) und China (12).

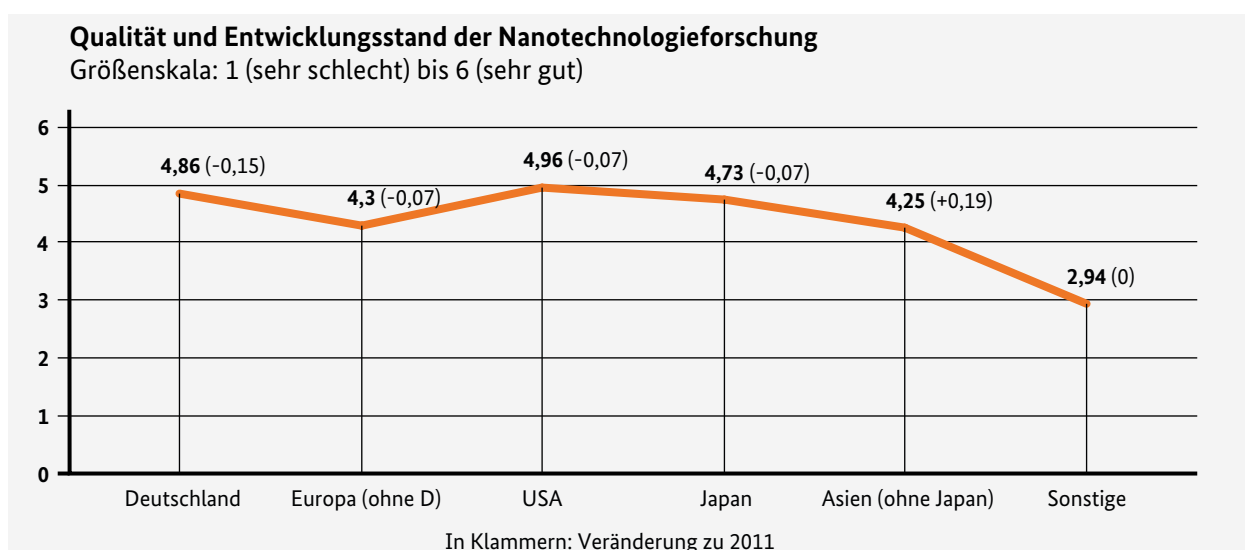


Führende Länder in Bezug auf Nanotechnologie-Forschungsgebiete mit aussichtsreichen Markt- und Produktpotenzialen in den nächsten 5 bis 10 Jahren. Die Angaben basieren auf Einschätzungen der befragten Nanotechnologie-Forschungseinrichtungen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 151, Mehrfachnennungen möglich).

Das Themenspektrum der beteiligten Forschungsinstitutionen deckt erwartungsgemäß eine große thematische Breite ab. Deutschland wird in vielen Forschungsfeldern mit zu den führenden Nationen gezählt. Lediglich im Bereich der Nanoelektronik wird eine deutliche Führungsrolle asiatischer Staaten und den USA gesehen. Allerdings gibt es auch in der Elektronik Bereiche, in denen Deutschland mit hohen Kompetenzen vertreten ist, wie in der Spintronik, der druckbaren Elektronik oder der Graphenforschung.

Deutschland als Forschungsstandort im internationalen Vergleich

Nach Einschätzung der Forschungseinrichtungen werden die Qualität und der derzeitige Entwicklungsstand in Bezug auf das eigene nanotechnologische Forschungsgebiet in Deutschland hoch eingeschätzt. Lediglich die USA werden noch besser bewertet. An dritter Position der Wertungsskala steht Japan gefolgt vom europäischen Ausland und weiteren asiatischen Staaten. 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. Die größte Veränderung gegenüber der 2011er Befragung ergibt sich in der deutlichen Verbesserung der Einschätzung der asiatischen Staaten (ohne Japan), die mittlerweile mit dem europäischen Ausland nahezu gleich gesetzt werden.



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 2013, n = 149).

Anwendungsfeld	Deutschland unter führenden Nationen genannt	Deutschland unter führenden Nationen nicht genannt
Gesundheit	Plasmonische Nanosensoren (D, USA), Nichtinvasive Magnetotaxis (D), Bio-nano-Wechselwirkung/ Risikoforschung (USA, D), molekulare Bildgebung (D), Drug Delivery, Nanoverkapselung (USA, JP, D), Biosilica/Biomineralisation (D), magnetische Nanopartikel für Diagnostik/Therapie/ Biotechnik (USA, D, F), Drug Delivery (USA, D)	biokompatible Werkstoffe für Prothesen/Implantate (USA), Nanopartikel für pulmonale Pharmazie (USA), Spin-Hybride (Magnethybride) für Therapie/ Diagnostik (USA), Zellersatztherapie für neurondegenerative Krankheiten (USA, SE), kolloidale Vaccinträger (USA), Knochenaufbaumaterialien für regenerative Medizin (k.A.), Wundauflagen (k.A)
Elektronik	Graphene (KR, USA, UK, CN, D), Spintronik (USA, JP, KR, D), druckbare Elektronik (USA, EU, D)	Polymerelektronik (Asien, USA), Atomlagenabscheidung für Elektronik (FI), nichtflüchtige Speicher (JP), Magnetische Speicher (JP), Nanomagnetismus (JP, USA), Inspektion Halbleitertechnik (USA), Nanopartikel für gedruckte Elektronik (USA), 2-D-Materialien für die Elektronik (USA, CN), Quanteninformativverarbeitung/Qubits (JP, USA, EU), Ferroelektrika (USA, KR, JP)
Optik	Green Photonics für Rechner-Interconnects (D), Galliumnitrid/Silizium Photonik für Beleuchtung (D), 3D Lasernanolithographie (D), Nanooptik für Lithografie (D, NL), Lichtemitter für Beleuchtung, Displays, Kommunikation (D, JP, KR)	Quantenkommunikation für Kryptographie (EU, CH, F), Silizium-Photonik (JP), GaN-basierte Laser auf Si für optische Datenübertragung (JP), Meta-Materialien (USA), Plasmonik für Sensorik-Energie, OLED für Beleuchtung (KR)
Chemie	Füllstoffeffekte in Kautschuken für Reifen (D, FR, USA), Nanometallgranulate für die Sensorik (D), kontinuierliche Nanopartikelsynthese (D, NL), hyperververzweigte Polymere als „Quat-Primer“ für Oberflächenbeschichtungen (JP, USA, D), Korrosionsschutz (EU, D)	SPS-Sintertechnologie (JP), ODS-Stähle für Brennstoffzelle (JP, USA), Mikrowellensynthese/Nanopartikel (USA), Magnetische Katalysatoren und Reagenzien (USA), Nanoverstärkte Faserverbunde für Flugzeuge (USA), nanoporöse Adsorbentien (USA), Metalloxid-Nanopartikel (USA), Dispersionsbeschichtungen als Verschleißschutz für Umformwerkzeuge (k.A.), tribologische Reibungs- und Verschleißregulierung (k.A.), Fügen mit reaktiven Nanofolien (k.A.)
Energie/ Umwelt	Thermoelektrik (D, JP, USA), Schadstoffabbau für Grundwasser-/Aquifersanierung (D, USA, CZ), nanooptimierte Solarzellen (D, USA), Katalysatoren für Brennstoffzellen (D, JP, USA)	Elektromobilität (Asien), organische Solarzellen (KR), Magnetokalorik zur Kühlung (CN), Elektrolyte und Elektroden für Lithium-Batterien (CN, JP, KR), Organische Batterien (JP), Nano-Vliesstoffe für Filter (JP), photokatalytischer Schadstoffabbau (JP), thermoelektrische Generatoren (USA)
Messtechnik	Nanopartikel-Detektion für Prozesskontrolle (USA, D), nanogranulare Magnetsensorik (USA, D), Desorption von Oberflächenadsorbaten für Massenspektrometrie/ Proteomics (USA, D)	Gas-Sensorik (CN, KR), Integration von Nanostrukturen (CNT, Quantum Dots) für Sensoranwendungen (EU, JP), Rastersonden-Messtechnik (USA), Magnetische Dünnschichten, Biosensorik (USA, JP), optochemische Nanosensoren (k.A.)
Sonstige	Selbstreinigende Oberflächen für Textilien (D, CH), Nano-/ Mikro-Spiegelarrays für Bau/Energie/ Sicherheit (D)	Wärmefunktionsgläser für Bauwesen (JP, USA, EU), Funktionalisierung der Matrix von Leder (k.A.), Nanofunktionalisierung von Leder-Oberflächen (k.A.)

Nanotechnologie-Forschungsgebiete mit aussichtsreichen Markt- und Produktpotenzialen in den nächsten 5 bis 10 Jahren mit Zuordnung zum jeweiligen Anwendungsfeld. In Klammern sind die jeweils benannten führenden Nationen aufgeführt. Die Angaben basieren auf Einschätzungen der befragten Nanotechnologie-Forschungseinrichtungen (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 151).

Sonstige Regionen fallen in der Bewertung deutlich ab und werden nur durchschnittlich eingeschätzt.

Die Aufschlüsselung der Einschätzungen nach einzelnen Technologiefeldern zeigt, dass die Qualität und der Forschungsstand des jeweiligen Gebietes in Deutschland überwiegend im Bereich gut bis sehr gut (5 und 6) bewertet werden. Lediglich eine unterdurchschnittliche Wertung (3) betrifft den Bereich der Nanotechnologie in Bezug auf Lebensmittel. Bei einigen

Teilbereichen fällt die Bewertung der Position Deutschlands unterschiedlich aus. So wird beispielsweise die Forschung zur organischen Elektronik bzw. Poly-merelektronik in Deutschland zwischen überdurchschnittlich (4) und sehr gut (6) bewertet. Qualität und Entwicklungsstand der Nanotoxikologieforschung bzw. der Risikoforschung zu Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt werden in Deutschland als gut eingeschätzt.

Qualität und Entwicklungsstand des eigenen Nanotechnologie-Forschungsgebietes in Deutschland von 1 (sehr schlecht) bis 6 (sehr gut)		
Wertung 6	Wertung 5	Wertung 3-4
• Nanooptik • Nanostrukturierte Thermoelektrika • Nanokristalle als Quellen nichtklassischen Lichts • Nanomaterialien • nichtinvasive Magnetotaxis • Polymerelektronik (PV, OLED, Sensorik) • Mikroreaktionstechnik • Nanomagnetismus • Nanophotonik • Medizin/Gesundheit • Elektrochemie • Halbleiter-Quantenpunkte	• organische Elektronik • Nano-Beschichtungen/-Prozesse • funktionale Dünnschichten für Sensorik • Photonik, THz • Controlled Release Systeme • Textile Nanoanwendungen • Molekulare Funktionalisierung von Halbleiteroberflächen • Bio-Nanowechselwirkungen/Gesundheit, Nanotoxikologie, Risikoabschätzung Umwelt • Nanobiotechnologie, Nanobiophotonik • Nanoindentation • Elektrokatalysatoren • Poröse Materialien • Photokatalyse an Nanomaterialien • Nanomaterialien für Optoelektronik/ Spintronik • Thermoelektrika • Chemische Nanotechnologie, Synthese von Nanomaterialien, funktionelle Nanokomposite • Nanostrukturierte Halbleiter • Festkörper-Quanteninformation • Grundwasser-/Aquifersanierung	• Lebensmittelnanotechnologie • Oberflächenfunktionalisierung und Nanostrukturierung • organische Elektronik • nanoelektronische Materialien • DLNA-Nanocarrier • Atomabscheidung • Nanodrähte • Nanokristalline Materialien

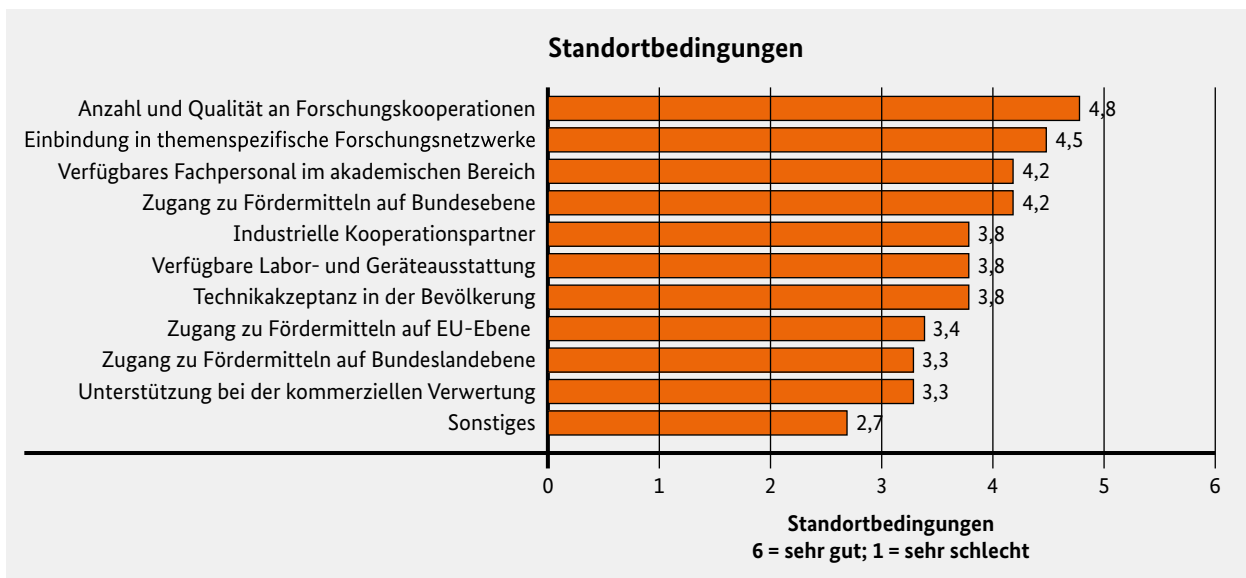
Einschätzung der Qualität und des Entwicklungsstandes des eigenen Nanotechnologie-Forschungsgebietes in Deutschland auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 6 (sehr gut). (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 51).

Standortbedingungen und Erfolgsfaktoren

Die Standortbedingungen in Deutschland hinsichtlich der Durchführung von Nanotechnologie-Forschungsaktivitäten werden von den Forschungsinstitutionen überdurchschnittlich bis gut bewertet.

Am positivsten werden die Anzahl und Qualität an Forschungsk Kooperationen, die Einbindung in the-menspezifische Netzwerke, das verfügbare Fachpersonal im akademischen Bereich 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 Bundesland- und EU-Ebene. Die Technikakzeptanz in der Bevölkerung liegt im mittleren Bereich der Bewertung. Die Bewertung deckt sich in hohem Ausmaß mit der Erhebung aus dem Jahr 2011, so dass davon ausgegangen wird, dass die Stichproben die Nanotechnologieszene insgesamt repräsentativ abdeckt und dass sich in den letzten zwei Jahren keine Veränderungen in den Standortbedingungen ergeben haben.

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. Die größte Verschiebung in der Bewertung gegenüber 2011 ergibt sich hinsichtlich der wissenschaftlichen Ausbildung des akademischen Nachwuchses, die nur noch von 23 % der Institutionen für wichtig erachtet werden (2011: 57 %). Die Nennung klarer regulatorischer Vorgaben als wichtiger Erfolgsfaktor hat sich hingegen deutlich erhöht. Immerhin 13 % halten dies für relevant im Vergleich zu 5 % im Jahr 2011. Ein koordiniertes Standortmarketing und Public-Private-Partnership-Modelle werden nur von wenigen Institutionen als erfolgsrelevant eingeschätzt.



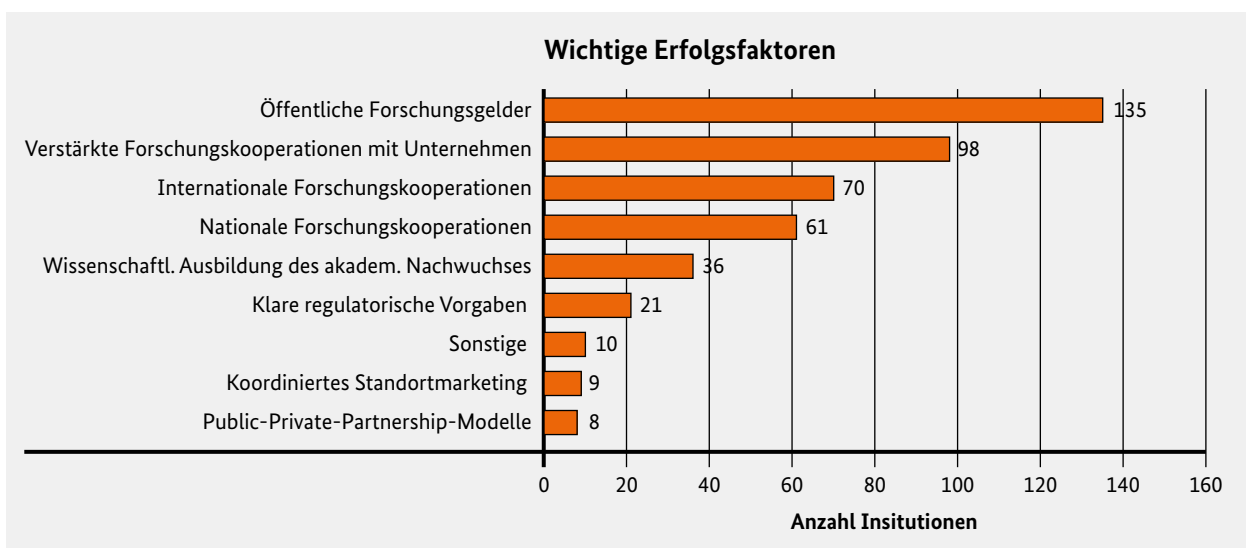
Bewertung der Standortbedingungen für die Durchführung von Nanotechnologie-Forschungsaktivitäten (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 153).

Wirtschaftliche Verwertung von Forschungsergebnissen

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Verwertung der Nanotechnologieforschungsergebnisse wurden Patentanmeldungen und Spin-off-Ausgründungen abgefragt.

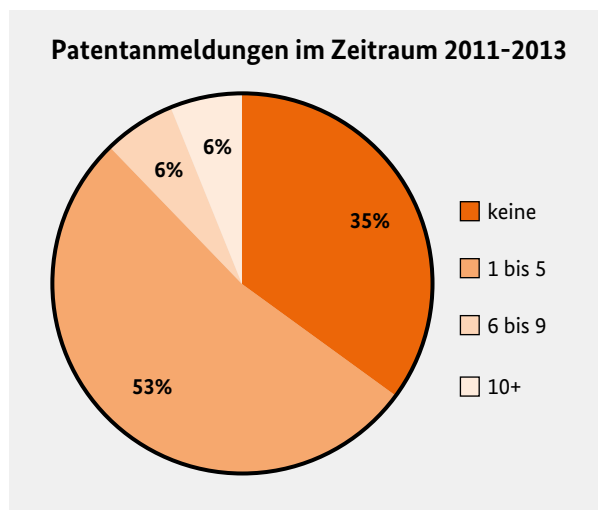
Patentanmeldungen

Die Patentierungsaktivität deutscher Nanotechnologieforschungseinrichtungen im Zeitraum 2011 bis Mitte 2013 ist nahezu unverändert gegenüber dem Zeitraum 2009 bis 2010. Rund ein Drittel der Einrichtungen weist keine Patentanmeldungen auf, während gut die Hälfte der Einrichtungen 1 bis 5 Patentanmeldungen ein-



Erfolgsfaktoren für den Ausbau der Nanotechnologie in Deutschland (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 157, bis zu drei Nennungen pro Institution).

gebracht haben. Jeweils 6 % der Institutionen weisen eine hohe Patenttätigkeit mit mehr als sechs bzw. zehn angemeldeten Patenten im abgefragten Zeitraum auf.



Patentanmeldungen der befragten Forschungseinrichtungen im Zeitraum 2011 bis Mitte 2013 (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 153).

Spin-Off-Gründungen

Spin-off-Ausgründungen stellen einen signifikanten Erfolgsindikator für die wirtschaftliche Verwertung von Forschungsergebnissen dar. Von den Forschungseinrichtungen wurden insgesamt acht Ausgründungen im Zeitraum von 2011 bis Juni 2013 angegeben. Ca. 20 der befragten Forschungseinrichtungen planen bis 2014 weitere Spin-offs.

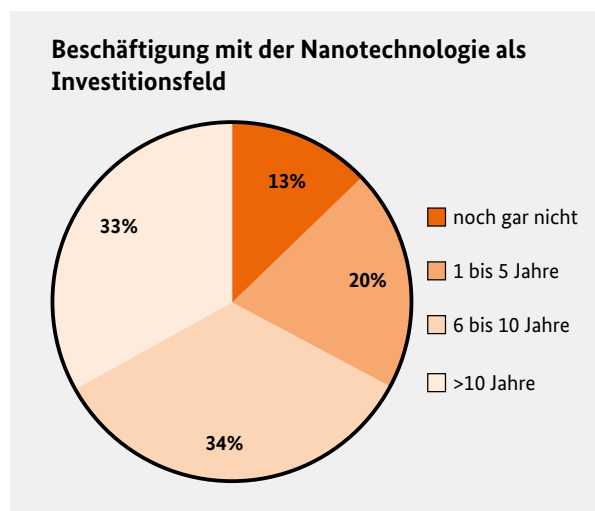
2.3 Finanzsektor und Beteiligungskapital

Wie zum nanoDE.Report 2011 wurde eine Erhebung bei Kapitalbeteiligungsgesellschaften durchgeführt, die im Bereich der Nanotechnologie aktiv sind. Speziell in Hochtechnologiefeldern wie der Nanotechnologie spielt Risikokapital eine wichtige Rolle, um neue Technologieansätze zum kommerziellen Erfolg zu führen. In Deutschland sind nur wenige VC-Geber auf das Themengebiet Nanotechnologie spezialisiert. Eine Ausnahme bildet hierbei die Nanostart AG, die sich seit einigen Jahren im nationalen und internationalen VC-Markt mit speziellem Investitionsfokus auf die Nano-

technologie erfolgreich behauptet (vgl. nanoDE-Report 2009). In Deutschland sind gemäß des Datenbestandes des Nanotechnologie-Kompetenzatlas aktuell 79 Kapitalbeteiligungsgesellschaften im Bereich der Nanotechnologie engagiert. Die folgenden Angaben beziehen sich auf 17 Finanzinstitutionen, die einen Fragebogen bei der Akteurserhebung übermittelt haben. Aufgrund der geringen Stichprobenzahl (vgl. Abschnitt 1.2) haben die Ergebnisse eher qualitativ orientierenden Charakter und können nicht als repräsentativ gewertet werden. Bei den teilnehmenden Kapitalgesellschaften handelte es sich in 14 Fällen um VC-Gesellschaften und in drei Fällen um sonstige Beteiligungsgesellschaften wie z. B. mittelständische Beteiligungsgesellschaften.

Dauer des Nanotechnologieengagements

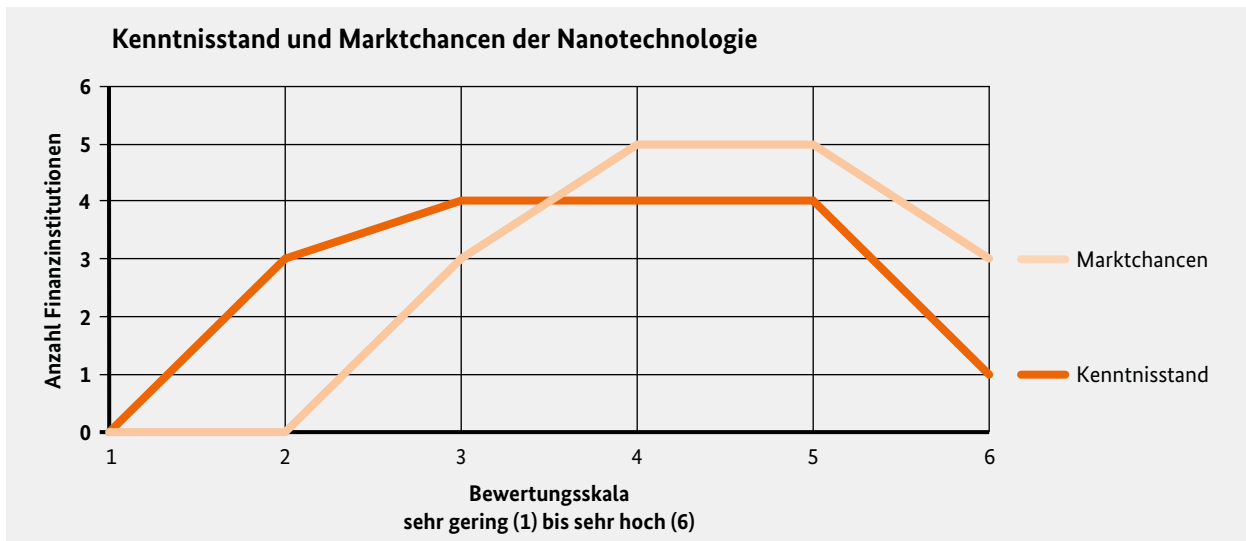
Bis auf zwei haben sich alle der antwortenden Beteiligungsgesellschaften mit der Nanotechnologie als Investitionsfeld befasst, davon jeweils ca. ein Drittel länger als sechs bzw. zehn Jahre. Fünf der Finanzinstitutionen planen ihr Engagement in der Nanotechnologie in den nächsten Jahren zu verstärken.



Dauer des Engagements der beteiligten Finanzinstitutionen in der Nanotechnologie (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 17).

Kenntnisstand und Einschätzung der Marktchancen

Wie schon im nano.DE Report 2011 wird deutlich, dass der Kenntnisstand in Bezug auf die Nanotechnologie innerhalb des VC-Sektors relativ heterogen eingeschätzt wird. Der Durchschnittswert der 16 antwor-

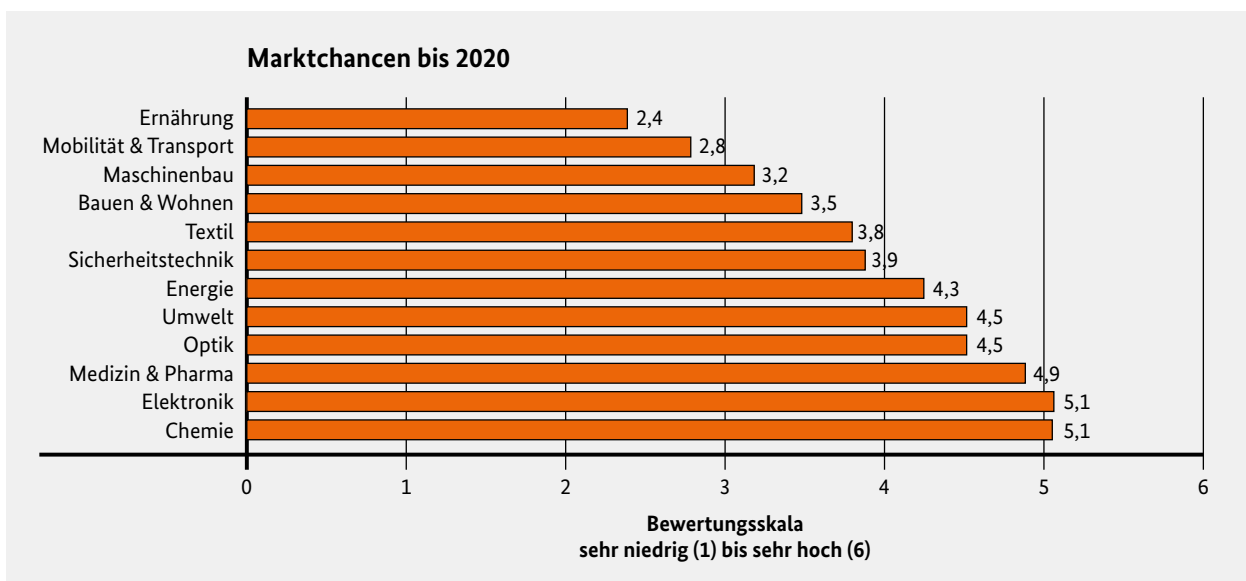


Einschätzung der eigenen Nanotechnologiekennntnisse der beteiligten Finanzinstitutionen und der Marktchancen der Nanotechnologie (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 16).

tenden Institutionen für die Bewertung des eigenen Kenntnisstandes in der Nanotechnologie innerhalb einer Skala von 1 „sehr niedrig“ bis 6 „sehr hoch“ liegt bei 3,8, wobei alle Werte von 2 bis 6 vertreten sind. Auf der gleichen Skala wurden die Marktchancen im Durchschnittswert mit 4,5 bewertet. Insgesamt fällt die Bewertung der Marktchancen im Jahr 2013 damit

etwas positiver aus als bei der Befragung im Jahr 2011 aus (Durchschnittswert 4,0).

Die Finanzinstitutionen wurden weiterhin nach einer Einschätzung der Marktchancen in verschiedenen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie bis 2020 befragt. Gegenüber 2011 ist die Einschätzung in



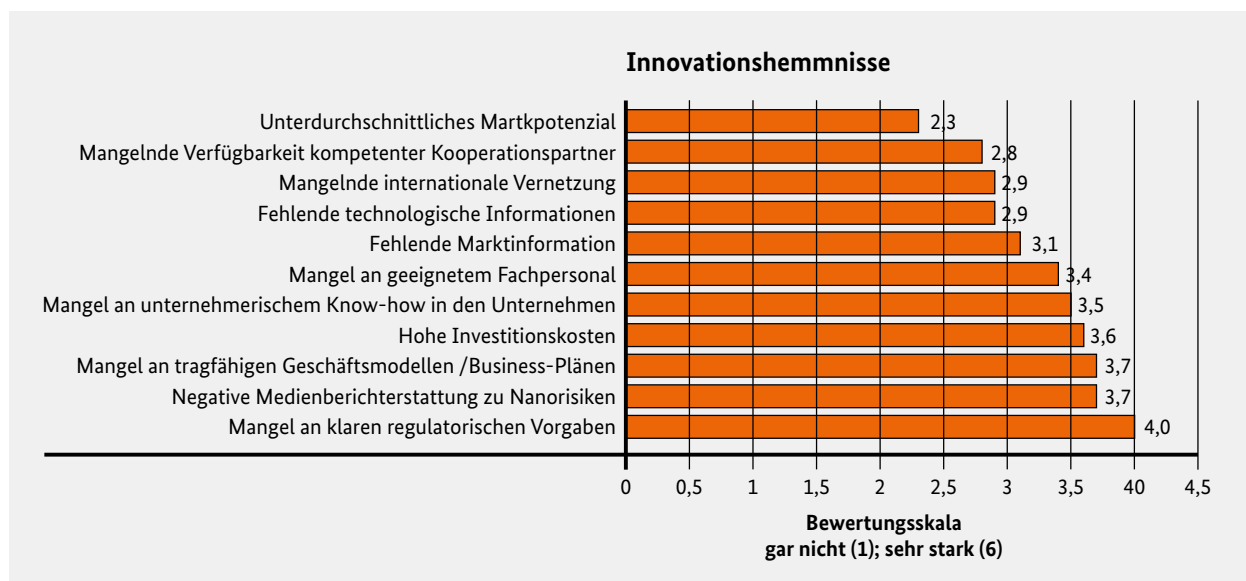
Einschätzung der Marktchancen in verschiedenen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie bis 2020 (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 16).

der Reihenfolge der Anwendungsbereiche weitgehend unverändert. Als aussichtsreichste Anwendungsfelder werden Chemie, Elektronik, Medizin/Pharma, Optik, Energie und Umwelt eingeschätzt. Am geringsten werden die Marktchancen in den Bereichen Ernährung, Mobilität und Transport sowie Maschinenbau bewertet.

Innovationshemmnisse und Nanotechnologiebeteiligungen

In der Bewertung der Innovationshemmnisse bei der Kommerzialisierung der Nanotechnologie gab es gegenüber 2011 eine Verschiebung in der Bedeutung der einzelnen Faktoren. Der Mangel an klaren regulatorischen Vorgaben und die negative Medienberichterstattung zu Nanorisiken sind in der Bewertung auf die Spitzenpositionen vorgerückt. Damit werden diese Faktoren auf Investorensseite im Ranking etwas wichtiger eingeschätzt als von den Nanounternehmen (vgl. Abschnitt 2.1). Insgesamt liegen die Bewertungen aber nur im wenig überdurchschnittlichen Bereich von 4,0 bzw. 3,7 auf einer Skala von eins bis sechs. Daneben werden eher wirtschaftliche Faktoren wie der Mangel an tragfähigen Geschäftsmodellen und Business-Plänen, hohe Investitionskosten sowie der Mangel an unternehmerischem Know-how in den Unternehmen als überdurchschnittlich wichtige Innovationshemmnisse gehalten.

Zehn der befragten Finanzinstitutionen weisen aktuell insgesamt 22 Beteiligungen an Nanotechnologieunternehmen auf, davon sind fünf im Jahr 2011 hinzu gekommen. Der überwiegende Teil der Beteiligungen betrifft deutsche Nanotechnologieunternehmen. Bei zwei der Beteiligungsgesellschaften beschränkt sich das Investment auf Nordamerika. Ein VC-Geber ist sowohl in Deutschland, Nordamerika und Asien aktiv. Die Höhe der Investments ist breit gestreut und reicht von Beteiligungen unter 100.000 € bis zu über 5 Mio. €. Die Beteiligungssumme der beteiligten VC-Gesellschaften in der Nanotechnologie betrug im Jahr 2012 rund 23 Mio. €. Bezüglich der Investitionsphasen sind sowohl Frühphasen-, Wachstumsphasen- als auch Spätphasen-Beteiligungen vertreten. Bei der Mehrzahl der Investments handelt es sich um direkte Beteiligungen. In einigen Fällen wurden auch indirekt fondsabhängige sowie stille Beteiligungen genannt. Sechs Finanzinstitutionen haben mit einem oder mehreren öffentlichen Ko-Investoren kooperiert. Hierbei handelte es sich in fünf Fällen um die KfW-Bank und in drei Fällen um den Hightech-Gründerfonds.



Einschätzung hemmender Faktoren auf die kommerzielle Umsetzung nanotechnologischer Forschungsergebnisse in Produkte (Quelle: Akteursbefragung VDI TZ 2013, n = 16).

3 Markt- und Anwendungspotenziale der Nanotechnologie

Die Nanotechnologie ist als Schlüssel- und Querschnittstechnologie ein wesentlicher Innovationstreiber für die deutsche Industrie. Nanotechnologische Entwicklungen umfassen dabei zum einen Weiterentwicklungen und Verfeinerungen etablierter Prozesse, wie beispielsweise Lithografie- und Beschichtungsverfahren, betreffen zum anderen aber auch neue Technologiepfade wie die organische Elektronik, nanostrukturierte Carbon-Werkstoffe oder steuerbare Nanotransporter für Wirkstoffe in der Medizin. Aufgrund des Querschnittscharakters lassen sich Marktpotenziale sinnvollerweise nur für definierte Anwendungsfelder und Technologien ermitteln. Die Vorgängerausgaben des nano.DE-Reportes haben Markt- und Anwendungspotenziale der Nanotechnologie in verschiedenen Branchen detailliert aufgezeigt. Die vorliegende Ausgabe liefert eine Aktualisierung im Hinblick auf Marktprognosen, Branchenentwicklungen, Forschungsaktivitäten, Rahmenbedingungen und Herausforderungen.

3.1 Übersicht zu nanotechnologisch beeinflussten Marktpotenzialen

Im Folgenden findet sich eine tabellarische Übersicht zu Marktprognosen von relevanten Teilbereichen und Anwendungsfeldern der Nanotechnologie. In Abgrenzung zu den vorhergehenden Ausgaben werden hierbei nur Zahlen berücksichtigt, die nach dem Jahr 2011 veröffentlicht worden sind. Ebenfalls eingeflossen sind Marktabschätzungen von Unternehmen, die im Rahmen der Akteursbefragung das Weltmarktvolumen der von ihnen adressierten nanotechnologisch beeinflussten Märkte beziffert haben. In der Tabelle werden dabei die Kategorien nanotechnologische Produkte (gezielt hergestellte technische Nanomaterialien sowie Geräte zur Herstellung und Analyse von Nanostrukturen und -objekten) und nanooptimierte Produkte unterschieden. Im letzteren Fall handelt es sich um Märkte, die zumindest teilweise von Produkten adressiert werden, bei denen die Nanotechnologie wesentliche Beiträge für eine Funktionsoptimierung liefert.

Marktsegment	Weltmarktvolumen (Bezugsjahr)		CAGR	Quelle
Nanomaterialien				
Gesamtmarkt Nanomaterialien (Nanopartikel, -hohlkörper, -fasern, komposite, -beschichtungen)	15,9 Mrd. \$ (2012)	37,3 Mrd. \$ (2017)	19 %	BCC 2012 ^[5]
Kohlenstoffnanoröhren	239 Mio. \$ (2012)	527 Mio. \$ (2016)	22 %	BCC 2012 ^[6]
MWCNT	219 Mio. \$ (2012)	292 Mio. \$ (2016)	9 %	
Few Wall CNT	1,8 Mio. \$ (2012)	120 Mio. \$ (2016)	131 %	
SWCNT	1,2 Mio.\$ (2011)	115 Mio.\$ (2016)	149 %	E.ca 2012 ^[7]
Kohlenstoffnanohörner	0,1 Mio. €	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Polymer-Nanokomposite	920 Mio.\$ (2011)	2,4 Mrd.\$ (2016)	20 %	BCC 2012 ^[9]
Nanoskalige keramische Pulver (US-Markt)	612 Mio.\$ (2011)	1,2 Mrd. \$ (2016)	16 %	BCC 2011 ^[10]
Magnesiumoxid-Nanopulver	18,3 Mio. \$ (2011)	31,2 Mio. \$ (2018)	9 %	TMR 2012 ^[11]
Kolloidale Kieselsäure	250 Mio.	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Aerogele	174 Mio. \$ (2012)	1,4 Mrd. \$ (2017)	52 %	MaM 2012 ^[12]
Nanofasern (Aluminiumoxid, Polymere, Kohlenstoff, Cellulose)	352 Mio. \$ (2011)	852 Mio. \$ (2017)	16 %	FM 2011 ^[13]
Metallische Nanopartikel, Nanotinte, Nanokleber	k.A.	2 Mrd. \$ (2017)	k.A.	E.ca 2012 ^[14]
Nanosilber für antimikrobielle Anwendungen	50 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Quantenpunkte (Quantum Dots)	k.A.	7,5 Mrd. \$ (2022)	55 %	E.ca 2012 ^[15]
Nanofüllstoffe für Leiterplatten	5 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]

Marktsegment	Weltmarktvolumen (Bezugsjahr)		CAGR	Quelle
Elektro-aktive Polymere	2,2 Mrd. \$ (2011)	3,4 Mrd. \$ (2017)	8 %	E.ca 2012 ^[16]
Leitfähige Polymere	1,8 Mrd. \$ (2011)	k.A.	k.A.	
Magnetische Nanomaterialien (nanokristalline weichmagnetische Kerne, magnetische Flüssigkeiten, Katalysatoren und Umweltreinigung)	97 Mio. \$ (2012)	209 Mio. \$ (2017)	17 %	BCC 2013 ^[17]
Nanobeschichtungen				
Dünnschichtmaterialien	9,3 Mrd. \$ (2011)	14,9 Mrd. \$ (2016)	10 %	BCC 2012 ^[18]
Physikalische Verfahren: Verdampfung, Sputtern, Ionendeposition	4,2 Mrd. \$ (2011)	7,5 Mrd. \$ (2016)	12 %	
Chemische Verfahren (Gasphasen-/Flüssigphasen-deposition, Plattieren)	5,1 Mrd. \$ (2011)	7,4 Mrd. \$ (2016)	8 %	
Keramische Hochleistungsbeschichtungen (Nordamerika)	1,4 Mrd. \$ (2011)	2 Mrd. \$ (2016)	7 %	BCC 2012 ^[19]
Thermisches Spritzen	935,2 Mio. \$ (2011)	1,3 Mrd. \$ (2016)	8 %	
PVD	208,4 Mio. \$ (2011)	294,6 Mio. \$ (2016)	7 %	FM 2011 ^[20]
Gesamtmarkt Nanobeschichtungen	1,6 Mrd. \$ (2011)	7,8 Mrd. \$ (2017)	27 %	
Antifog-Beschichtungen	300 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Antimikrobielle Beschichtungen	100 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Kratzfeste Beschichtungen	2 Mrd. € (2013)	k.A.	k.A.	
Antireflex-Beschichtungen	1,3 Mrd. € (2013)	k.A.	k.A.	
Energieeffizienzsichten im Bereich Heiz- und Energietechnik	100 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Kratzfest-Lackierung	500 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Antibakterielle Lackierung	200 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Nanoskalige Multischichten für Röntgenoptiken	20 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Nanoanalytik				
Mikroskopiemarkt insgesamt (optisch, TEM, SEM)	2,7 Mrd. \$ (2011)	3,4 Mrd. \$ (2016)	5 %	BCC 2011 ^[21]
Mikroskopiezubehör (Beleuchtung, Kameras, Manipulatoren)	488 Mio. \$ (2011)	632 Mio. \$ (2016)	5 %	
Elektronenmikroskopie	400 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Photoelektronenmikroskopie	80 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Tiefemperatur-Rastertunnelmikroskope	60 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
AFM-Geräte	100 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Sonden	15-20 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Auswertesoftware	2 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Kalibrierstandards	10 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Analysegeräte TOF-SIMS	25 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Analysegeräte LEIS	2 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Partikelgrößenanalyse im nm Bereich	35 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Nanomechanischer Tester (Nano-Indention)	25 – 30 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Nanostrukturierung				
Nanotools (Gesamtmarkt, u. a. Nanomanipulatoren, Nahfeldoptiken, Nanolithografie, Nanoimprint etc.)	4,8 Mrd. \$ (2012)	11,4 Mrd. \$ (2017)	19 %	BCC 2012 ^[5]
PVD-Abscheidungs-ausrüstung	7,1 Mrd.\$ (2011)	10,4 Mrd. \$ (2016)	8 %	BCC 2012 ^[22]
Elektronenstrahl-Lithographiesysteme	120 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Molekularstrahl-Abscheidungsanlagen	300 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	

Beispiele zur Marktabschätzungen nanotechnologischer Produkte in den Bereichen Nanomaterialien, Nanobeschichtungen, Nanoanalytik und Nanostrukturierung.

Marktsegment	Weltmarktvolumen/ Bezugsjahr		CAGR	Quelle
Gesundheit				
Nanomedizin	43,2 Mrd. \$ (2011)	96,9 Mrd. \$ (2016)	14 %	BCC 2012 ^[23]
Anwendungen für Herz-/Kreislaferkrankungen	4 Mrd. \$ (2011)	8,6 Mrd. \$ (2016)	17 %	
Nanomedizinische Produkte gegen Krebs	5,5 Mrd. \$ (2011)	12,7 Mrd. \$ (2016)	18 %	
Anwendungen für Erkrankungen des zentralen Nervensystems	14 Mrd. \$ (2011)	29,5 Mrd. \$ (2016)	30 %	
Anwendungen gegen Entzündungen	7,3 Mrd. \$ (2011)	14,8 Mrd. \$ (2016)	15 %	
Anwendungen gegen Infektionen	9,3 Mrd. \$ (2011)	14,8 Mrd. \$ (2016)	10 %	BCC 2011 ^[24]
Biochips (DNA-, Protein-Analyse, Wirkstoffforschung etc.)	3,9 Mrd.\$ (2011)	9,6 Mrd.\$ (2016)	20 %	
Nanopartikelanwendungen für Biotechnologie, Drug-Delivery, Wirkstoffentwicklung und -formulierung	21,6 Mrd. \$ (2012)	53,5 Mrd. \$ (2017)	20 %	BCC 2012 ^[25]
Nanotransporter für Arzneistoffe	250 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
DNA-Übertragung mit magnetischen Nanopartikeln	50 Mio. \$ (2013)	k.A.	k.A.	
Zellisolierung / -markierung mit funktionalisierten Nanopartikeln	70 Mio. \$ (2013)	k.A.	k.A.	
Immuno-PCR für ultrasensitiven Proteinnachweis	400 Mio. \$ (2013)	k.A.	k.A.	
Nanokomposite für Zahnfüllungen (Deutschland)	50 Mio. \$ (2013)	k.A.	k.A.	
Retina-Implant	2 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Elektronik				
Konsumelektronik, Software, IuK (Marktvolumen Deutschland)	ca. 151 Mrd. € (2011)	ca. 153 Mrd. € (2013)	1-2 %	BITKOM 2013 ^[1]
Gesamtmarkt Halbleiter (global)	ca. 290 Mrd. \$ (2013)	366 Mrd. \$ (2017)	5 %	ZVEI 2013 ^[26]
22 nm CMOS Technologie	ca. 100 Mrd. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
32/28 nm CMOS Technologie	ca. 100 Mrd. € (2013)	k.A.	k.A.	
45/40 nm CMOS Technologie	ca. 100 Mrd. € (2013)	k.A.	k.A.	
Verbindungshalbleiter-Elektronik	27 Mrd. \$ (2012)	47,4 Mrd. \$ (2017)	12 %	E.ca 2012 ^[27]
NAND Flash-Speicher	k.A.	31,1 Mrd.\$ (2014)	k.A.	TechNavio 2011 ^[28]
Flexible Elektronik durch Rolle-zu-Rolle-Produktionsverfahren	10,8 Mrd. \$ (2012)	22,7 Mrd. \$ (2017)	16 %	BCC 2013 ^[29]
Gedruckte Elektronik	4 Mrd. \$ (2013)	15 Mrd. \$ (2018)	30 %	BCC 2013 ^[30]
Transparent leitfähige Beschichtungen für Touchdisplays	956 Mio. \$ (2012)	4.8 Mrd. \$ (2019)	26 %	E.ca 2013 ^[31]
Leitfähige Tinten	2,9 Mrd.\$ (2012)	3,4 Mrd.\$ (2018)	3 %	IDTE 2012 ^[32]
Nanosilber für leitfähige Beschichtungen/ Tinten	100 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Optik				
Photonikmarkt global	ca. 350 Mrd. € (2011)	ca. 615 Mrd. € (2020)	6,5 %	SPECTARIS, VDMA, ZVEI, BMBF 2013 ^[33]
Photonik Inlandsproduktion Deutschland	ca. 27 Mrd. € (2011) ca. 28 Mrd. € (2012)	ca. 44 Mrd. € (2020)	5,6 %	
Nanophotonische Komponenten (nano-LED, OLED, holografische Speicher, Verstärker, Schalter, photonische Kristalle, Plasmonik etc.)	2,5 Mrd.\$ (2011)	10,9 Mrd.\$ (2016)	35 %	BCC 2012 ^[34]
Nanophotonische Leuchtdioden	2,4 Mrd.\$ (2011)	9,9 Mrd.\$ (2016)	33 %	
Nahfeld-Optiken	53 Mio.\$ (2011)	59 Mio.\$ (2016)	2 %	
OLED Materialien (Emitter, Injektions-, Transport- und Blockierschichten)	1,7 Mio. \$ (2012)	1,1 Mrd. \$ (2019)	152 %	NanoMarkets 2012 ^[35]

Marktsegment	Weltmarktvolumen/ Bezugsjahr		CAGR	Quelle
Organische Materialien für OLED	1 Mrd. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Laserdioden	1 Mrd. € (2013)	k.A.	k.A.	
Sättigbare Absorber für Ultrakurzpulslaser	5 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Röntgenoptik für Diffraktometer	25 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Röntgenoptik für Synchrotrons	10 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Röntgenoptik für Fluoreszenzspektrometrie	10 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Energie- und Umwelttechnik				
Nanotechnologie im Energiesektor (ohne Enzym-Katalysatoren)	2,5 Mrd. \$ (2012)	5,8 Mrd. \$ (2017)	18 %	BCC 2013 ^[36]
Nanomaterialien für Energietechnologien (Katalysatoren, Kraftstoffadditive, thermische Isolierung, Li-Ion Batterien, Wasserstoffspeicher, Superkondensatoren, Brennstoffzellen, Thermoelektrika, Photovoltaik, Windenergie)	203,7 Mio. \$ (2010)	2,3 Mrd. \$ (2017)	41 %	Future Markets 2011 ^[37]
Nanooptimierte Photovoltaik (Einsatz von Nanomaterialien wie Fullerenen, CNT, Metalloxide, Quantenpunkte in Dünnschichtsolarzellen wie Farbstoffsolarzellen, Polymersolarzellen, CIGS- und Cadmiumtellurid-Solarzellen)	68 Mio. \$ (2011)	820 Mio. \$ (2015)	86 %	Future Markets 2011 ^[38]
Materialien zum Schutz vor elektrostatischer Entladung in der Photovoltaik (u. a. Kohlenstoffnanomaterialien, leitfähige Polymere etc.)	1,4 Mrd.\$ (2012)	3,4 Mrd. \$ (2019)	13 %	NanoMarkets 2012 ^[39]
Festkörper-Dünnschichtbatterien	65,9 Mio. \$ (2012)	5,95 Mrd. \$ (2017)	146 %	WGR 2012 ^[40]
Nanooptimierte Lithium-Ionen Batteriesysteme	63 Mio. \$ (2010)	575 Mio. \$ (2017)	37 %	FM 2011 ^[41]
Anwendungen der Supraleitung (Magnete, Elektrotechnik)	1,8 Mrd. \$ (2012)	3,3 Mrd. \$ (2017)	13 %	BCC 2012 ^[42]
Supraleitung in der Elektrotechnik (Transformatoren, Generatoren, Motoren, Strombegrenzer, Kabel)	26,9 Mio. \$ (2012)	920,1 Mio. \$ (2017)	103 %	
Membranfiltration (Nano- und Mikrofiltration, Umkehrosmose)	k.A.	16 Mrd. \$ (2017)	k.A.	GIA 2011 ^[43]
Biofilmtäger für biologische Kläranlagen	10 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Filtermaterialien mit nanostrukturierten Adsorbentien	50 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Verpackung				
RFID	1,1 Mrd. \$ (2011)	4 Mrd. \$ (2016)	29 %	C&M Research 2012 ^[44]
Bau				
Nanobeschichtungen für Anwendungen im Bauwesen (u. a. Selbstreinigung, Verschmutzungsschutz, UV-Schutz)	130 Mio. \$ (2011)	400 Mio. \$ (2015)	32 %	Future Markets 2011 ^[45]
Schaltbare Gläser	1,6 Mrd. \$ (2011)	4,2 Mrd. \$ (2016)	22 %	BCC 2012 ^[46]
Nano-SiO ₂ als Zementzusatz für Ultrahochleistungsbeton	5 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Automobil				
Nanobeschichtungen für automobiler Anwendungen (u. a. Selbstreinigung, Verschmutzungsschutz, antibakteriell, Flamm-, Korrosions- und Abrasionsschutz)	125 Mio. \$ (2011)	310 Mio. \$ (2015)	25 %	Future Markets 2011 ^[47]
Autoabgaskatalysatoren	6 Mrd. \$ (2013)	k.A.	k.A.	VDI TZ 2013 ^[8]
Verschleißungen für den Automotive-Bereich	500 Mio. € (2013)	k.A.	k.A.	
Sensorik				
Nanomaterial basierte magnetische Sensoren (GMR, Biosensoren und -assays)	53 Mio. \$ (2012)	108 Mio. \$ (2017)	15 %	BCC 2013 ^[48]

Beispiele für Marktabschätzungen zu Märkten, die von nanooptimierten Produkten adressiert werden.

3.2 Medizintechnik und Pharmazie

Branchenentwicklung

Die Medizintechnikbranche mit rund 1160 Unternehmen in Deutschland zeigt einen positiven wirtschaftlichen Trend. Im Jahr 2012 konnten sowohl der Umsatz um 4,2 % auf 22,3 Mrd. € als auch die Beschäftigtenzahl um 2,6 % auf 94.500 Mitarbeiter gesteigert werden. Die positive Entwicklung ist dabei auf ein starkes Umsatzwachstum im Auslandsgeschäft um 6,7 % auf 15,1 Mrd. € bei einer Exportquote von 68 % zurückzuführen.^[49] Die pharmazeutische Industrie umfasst ca. 900 Unternehmen und beschäftigt rund 105.000 Mitarbeiter. Die aktuelle wirtschaftliche Entwicklung ist als moderat positiv zu bezeichnen. Bezogen auf das Jahr 2011 standen in 2012 leichte Zugewinne beim Umsatz auf ca. 27 Mrd. € einem Rückgang im Export um 1,4 % gegenüber.^[50] Sowohl die Medizintechnik als auch die pharmazeutische Industrie zählen mit einer F&E-Quote von jeweils rund 9 % zu den forschungsintensivsten Branchen in Deutschland.

Nanotechnologische Produkte haben in der Medizin bereits eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung.^{[51],[52]} Der weltweite Umsatz mit derartigen Produkten, der nach Angaben des Marktforschungsunternehmens BCC im Jahr 2011 rund 43 Mrd. \$ betrug, soll sich bis 2016 mehr als verdoppeln (vgl. Abschnitt 3.1). In der pharmazeutischen Anwendung schon länger etabliert sind Verfahren zur Verbesserung der Aufnahme und Bioverfügbarkeit von Wirkstoffen z. B. durch die Verkapselung mit Liposomen und Polymeren, die Vergrößerung der Oberfläche der Wirkstoffe durch Mahl- und Emulgierv Verfahren oder die chemische Anbindung von Polyethylenglycol an Protein-Wirkstoffe (PEGylierung). In der Medizintechnik finden sich kommerzielle Produkte überwiegend in den Bereichen in-vitro- und in-vivo-Diagnostik, Knochenersatzmaterialien oder nanobeschichteten Geräten und medizinischer Ausrüstung. Die Zahl der nanomedizinischen Produkte auf dem Weltmarkt wird auf über 100 geschätzt, davon rund ein Drittel im Pharmabereich. Hinzu kommen rund 150 Produkte, die sich derzeit in klinischer Erprobung befinden.^[53] Die Tendenz ist hier klar ansteigend, was auch durch eine intensive Forschungsförderung auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene vorangetrieben wird, die das Bedarfsfeld Gesundheit als ein prioritäres Forschungsfeld adressiert. Zu berücksichtigen

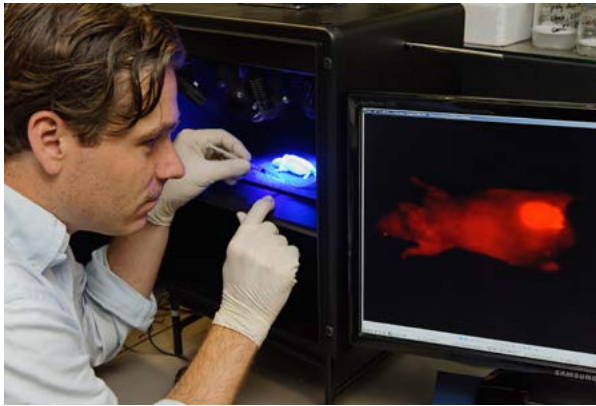
ist auch das Potenzial nanotechnologischer Verfahren und Analysetechniken in der biomedizinischen Grundlagenforschung. Hieraus ergeben sich wichtige Erkenntnisse zur Aufklärung von Krankheitsursachen und -mechanismen, die künftig wesentlich zur Entwicklung neuartiger Diagnose- und Therapieverfahren beitragen können.

BMBF-Forschungsaktivitäten

Innovative Nanotechnologie-Entwicklungen im Anwendungsbereich Pharmazie und Medizintechnik werden durch das BMBF in zahlreichen Fördermaßnahmen innerhalb der Werkstoff- und Gesundheitsforschung unterstützt. Ein aussichtsreiches Feld ist hierbei der Einsatz nanoskaliger, funktionalisierbarer Transporter, um Wirkstoffe effizienter über biologische Barrieren hinweg an den Wirkort zu führen. In Entwicklung sind hierbei Trägersysteme u. a. auf Basis von Lipiden, Makromolekülen, Biopolymeren oder Hydrogelen, wobei oftmals zusätzliche Funktionalisierungen wie die Schaltbarkeit der Wirkstofffreisetzung (z. B. durch pH-Wert oder Magnetfelder) oder eine gezielte Anreicherung am Wirkort, beispielsweise durch spezifische Antikörper, integrierbar sind. Dabei werden eine Vielzahl von Krankheitsbildern (Tumore, Entzündungen, Hautkrankheiten, Alzheimer etc.), Aufnahmewege (Haut, Darm, Blutkreislauf) und Zielorgane (Gehirn, Haut, Verdauungstrakt, sonstige Organe) adressiert. Auch für das Einschleusen von DNA in Zellen (Transfektion) für die Gentherapie werden Nanopartikel als effiziente Transportbehälter entwickelt.

Im Bereich der Diagnostik steht die Optimierung von in-vitro-Verfahren wie mikrofluidische Lab-on-a-Chip-Sensoren, markierungsfreie Detektionsverfahren z. B. durch Nanodrähte oder Verfahrensverbesserungen durch die Anwendung von Nanopartikeln z. B. bei der DNA-Analytik oder der Zellseparation und -diagnostik im Fokus. Die in-vivo-Diagnostik profitiert von neuartigen nanopartikulären Sonden für die molekulare Bildgebung, die im Sinne einer Theranostik auch mit therapeutischen Wirkstoffen kombiniert werden können.

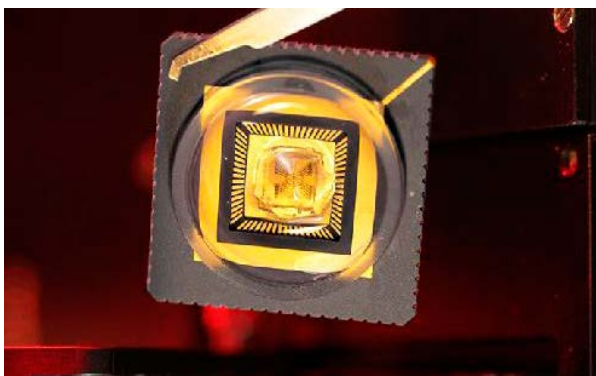
Ein weiteres Forschungsfeld sind biokompatible implantierbare Sensoren z. B. zur Frühdiagnose von Thrombosen in künstlichen Herzklappen oder als Glucosesensoren für Zuckerkrankte. Verbesserungen im



Einsatz von Nanomaterialien für die molekulare Bildgebung in der Krebsdiagnostik und -therapie (Quelle: RWTH Aachen, Foto: Peter Winandy).

Bereich Wundheilung und Hygiene betreffen beispielsweise antibakterielle Beschichtungen von medizinischen Geräten und Wundauflagen oder selbsthaftendes Nahtmaterial nach dem Prinzip des „Gecko-Effektes“.

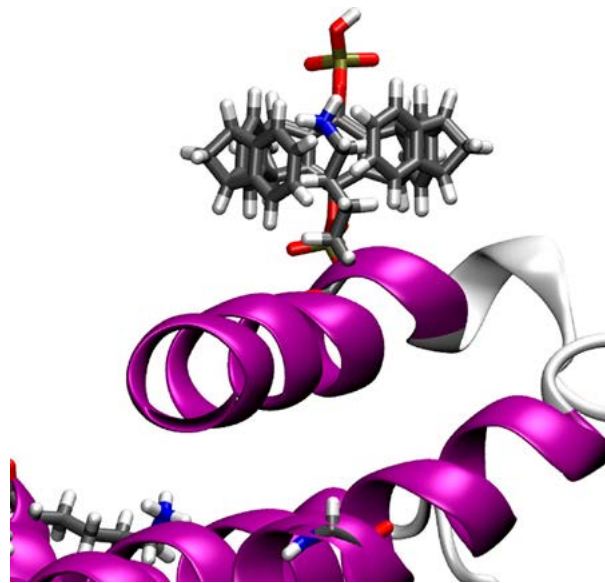
Das Anwendungsfeld Körperersatzgewebe und Implantate profitiert in hohem Maße von nanofunktionalisierten Oberflächen zur Verbesserung der Biokompatibilität und Zellanwachsung sowie der Option zur Integration kontrolliert freisetzbarer Wirkstoffe.



Elektronische Bauelemente aus Graphen werden erforscht mit dem Ziel, eine bessere Verbindung zwischen Nervenzellen und Elektronik für den Einsatz in Neuroimplantaten zu erhalten. (Quelle: Forschungszentrum Jülich).

In der biomedizinischen Grundlagenforschung betreffen aktuelle Forschungsaktivitäten den Einsatz und die Verbesserung nanoanalytischer Verfahren wie Nahfeld-, Rasterkraft- und Fluoreszenzmikroskopie zur

Aufklärung von Lebensprozessen wie Proteinfaltung und -dynamik an lebenden Zellen sowie nanotechnologische Verfahren zur Manipulation von Zellen und Biomolekülen.



Mit Hilfe sogenannter „Molekularen Pinzetten“ lassen sich bestimmte Molekülgruppen wie Aminosäuren greifen und damit die Funktion von Peptiden und Proteinen beeinflussen. Dadurch ergeben sich Anwendungspotenziale in der Therapie von Krankheiten wie Alzheimer oder Krebs (Quelle: Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim/Ruhr).

Zunehmend treten auch Fragen toxikologischer Nebenwirkung nanomedizinischer Verfahren in den Fokus der öffentlichen Forschungsförderung. Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes werden beispielsweise die Gesundheitsauswirkungen innovativer nanoskaliger MRT-Kontrastmittel untersucht und bewertet.

Obwohl die Überführung der aus der anwendungsorientierten Nanomedizin-Forschung des BMBF gewonnenen Erkenntnisse in die medizinische Praxis in der Regel ein langwieriger Prozess über mehrere Zulassungsschritte der entsprechenden Behörden darstellt, konnten bereits zahlreiche Erfolge in der kommerziellen Umsetzung erzielt werden. Als Beispiele sind die Nanopartikel gestützte hyperthermische Krebstherapie (vgl. nano.DE-Report 2011) und der Einsatz magnetischer Nanopartikel in der Zellseparation und -therapie zu nennen (s. Kasten unten).

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
In-Vitro-Diagnostik	Nanoporenanalytik zur elektrischen „labelfreien“ Detektion von Einzelmolekülen	13N10969-70
	Farbstoff-Nanocontainer-verstärkte Immunoassays für Point-of-care-Anwendungen	0315844A-B
	Nanodrahttransistoren als markerfreie Immunsensoren zur vollelektronischen Analyse von DNA Hybridisierung und von Antigen-Antikörper Bindungen	17042X11
	Mikrofluidischer lab-on-a-chip Sensor auf Basis einer Kunststofffolienstrukturierung zum Nachweis von glykiertem Hämoglobin	16SV5424
	Ultraschnelle PCR durch lokale Wärmeerzeugung zur Auftrennung der DNS mittels Laser-geheizter Nanopartikel	0316032
	Diagnostik, Zellseparation und Zytometrie auf der Basis magnetischer Partikel und MR Sensoren	16SV5396-403, 13N12013-20, 16SV3739-43
In-Vivo-Diagnostik/Theranostik	Nanopartikelsonden (Fluoreszenzmarker, QD, PET-Tracer) für molekulare Bildgebung und kombiniert mit Wirkstoffen auch zur Therapie z. B. von Tumoren, Myokarditis etc.	17PNT031, 13N11094, 13N10354-60, 13N10280-8, 01DG12045
	Sensorische Schichten auf künstlichen Herzklappen zur Frühdiagnose von Thrombosen	01DQ12042
	Diagnostische Implantate zur Fernüberwachung von Patienten mit Herz- und Niereninsuffizienz auf Basis nanofunktionalisierter Sensoren und Membranen	16SV5459-65
	Subkutan implantierbare Glucosesensoren auf Basis der Organischen Elektronik	13N10790 -3
Nanoskalierte Wirkstoffe und Formulierungen	Einsatz von Nanobodies (Antikörperfragmenten) in der Schlaganfalltherapie	01EW1208-9
	Nanogel basierter RNA-Impfstoff zur Hepatitis C Vorbeugung	13N11738-9
	Nanoformulierungen zur Verlängerung der Magenverweildauer von Wirkstoffen und kontrollierter Wirkstofffreisetzung	13N11368-70
	GMP konformes Verfahren zur beschleunigten Entwicklung klinisch einsetzbarer liposomaler Formulierungen	13N11280-1
	Neuartige Injektionssysteme zur schmerzfreien, ballistischen Injektion von pulverförmigen Vakzinen mit nanopartikulären Formulierungsstoffen	13N11315-9
Organersatz und Implantate	Entwicklung nanostrukturierter bioaktiver/biomimetischer Blutgefäßprothesen zur Therapie von Gefäßerkrankungen.	0316023
	Nanostrukturierte beschichtete Titanoberflächen für biokompatible Implantate	01DJ12064
	Nanofasern für Implantationsmaterialien zur Regeneration von Knochen und Knorpel	01DN12043
	Implantierbare Nanomaterialien (Polysiloxan-Strukturen, Peptidmatrices) mit Nervenwachstum fördernden Eigenschaften für Anwendungen in der Neuroprothetik	16SV5367, 13N11036-7
	Nanostrukturierte Implantatmaterialien mit optionaler Wirkstofffreisetzung, z. B. für künstliche Intraokularlinsen, Koronastents	13N10944-6, 13N11219-21
	Biokompatible, thermosensitive Hydrogele als Glaskörperersatz	13N10324-6
	Ohrgeweberegeneration durch nanostrukturierte Cellulosegerüste als Zellträger	13N11075-6
	Nanokomposit-Material aus Stammzellen für Hornhaut-Implantate	13N11121
	Nanostrukturierte Cochleaelektroden zur Vermeidung von Zellanwachstungen	13EZ1001A-C
Dialysetechnik	Neue Membranen und funktionale Einwegsysteme zur Adsorption und Abtrennung von Harngiften in der Dialyse (Nierenersatz-Therapie)	13N11416-8
	Neuartige, hochselektive Dialysmembranen zur Entfernung von entzündungsauslösenden Stoffen	13N11796-99
Wundheilung	Multifunktionale Hohlfasermembranen (u. a. Nährstoffversorgung, pH-Regulation etc.) als Verbandmittel zur beschleunigten Wundheilung	13N11575-6
	Polymerfasern mit Nanofasern für selbsthaftendes Nahtmaterial	01EZ1105A-C

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Dentaltechnik	Dental-Implantate mit einer nanostrukturierten hydrophilen antimikrobiellen Oberfläche zur Verbesserung des Einwachsens in die Knochensubstanz	13N11140-2
Wirkstofftransport	Funktionalisierte Nanokapseln, -partikel, -emulsionen (Lipide, Makromoleküle, Biopolymere, Hydrogele) als Trägersysteme zum Wirkstofftransport über biologische Barrieren. Anwendungsfelder: • Tiefere Hautschichten (Hautkrebs-, Aknetherapie) • Blut-Hirn-Schranke (Alzheimer) • Darmgewebe • Urogenitaltrakt • Tumorzellen • Aufnahme über den Mund	01DK12018, 13N11801-4, 13N11339-41, 13N11454-8 01DQ12031, 01DN12072 01EW1009-10 13N11845-6 13N11304-9, 13N11032 01DN12009 13N11385-90
	Multifunktionale Gerüstsubstanzen aus natürlichen Polymeren (z. B. Na-Alginat) und nanoskaligen bioaktiven Glasparkeln für kombinierte Wirkstoffabgabe und Knochenregeneration	01DN12095
	Multifunktionale Nanokapseln mit magnetisch schaltbarer wärmeempfindlicher Schale für die kombinierte Diagnose und Therapie bösartiger Erkrankungen	13N11275-6
Transfektion/Gentherapie	Nanooptimierte Transfektionstechnologie in vitro und in vivo (u. a. Einsatz magnetischer Nanopartikel, künstliche Peptide)	0315728
	Magnetische Nanopartikel kombiniert mit viralen Vektoren zur Gentherapie bei neurodegenerativen Erkrankungen	01DN12044
	Biokompatible Nanotransporter für die Übertragung von siRNA in vivo	13N11533-36
Medizinische Hygiene	Hygienisch wirksame Nanobeschichtungen auf komplexen Medizinprodukten	13N11353-8
Biomedizinische Grundlagenforschung	Untersuchung von Proteinwechselwirkungen in lebenden Zellen, Charakterisierung von Proteinfaltungsreaktionen und Proteindynamiken	0315649, 03IS2211A-I, 0315513A-E
	Markerfreie Darstellung von Chromosomen durch multimodale orts aufgelöste Spektroskopie und Einsatz von Nahfeldmikroskopie	17036A10-B10
	Untersuchung und Beeinflussung von Zell-Oberfläche-Wechselwirkungen (Adhäsion, Proliferation, Differenzierung) durch nanostrukturierte Oberflächen mit graduell einstellbaren bzw. thermosensitiven Eigenschaften	01DR12063, 13N11974-80
	Synthese radioaktiv markierter Arzneimittel und Diagnostika für die molekulare Bildgebung	13N11260-1, 13N10270-2
	Selektive bildgebenden Fluoreszenzmikroskopie mit fluoreszierenden Proteinen und organischen Farbstoffen mit einer optischen Auflösung unterhalb von 100 nm	13N11018-21
	Neuer Festkörper- und Faserlasersysteme als Lichtquellen für die STED Mikroskopie	13N11173
	GSDIM-Weitfeld-Nanoskopie für die Lebenswissenschaften	13N11066-9
Nanotoxikologie	Wechselwirkungen (fluoreszenz-)magnetischer Nanopartikel mit Zellen	0315773A_H
	Bewertung der Gesundheitsauswirkungen innovativer nanoskaliger MRT-Kontrastmittel	03X0100A-E, 03X0104A-E

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

Erfolgsbeispiel für den Transfer von Forschungsergebnissen in die Anwendung: Nanotechnologie für die Zellseparation und -therapie

Dr. Ralph Schaloske, Miltenyi Biotec GmbH

Magnetische Zellseparation

Superparamagnetische Nanopartikel sind zentrale Werkzeuge zur Zellseparation in der biomedizinischen und klinischen Forschung. Das Spektrum möglicher klinischer Anwendungen wird kontinuierlich erweitert, insbesondere in den Bereichen der personalisierten Immuntherapie und regenerativen Medizin. Die Nanopartikel – gebunden an zelltypspezifische Antikörper – ermöglichen die magnetische Anreicherung von nahezu jedem beliebigen Zelltyp.

Die Transplantation von Stammzellen, die mit derartigen Nanopartikeln aus dem Knochenmark, der Nabelschnur oder aus dem zirkulierenden Blut von Spendern gewonnen werden, ist eine etablierte Methode, nach der bereits über 25.000 Leukämiepatienten behandelt wurden. Entscheidend für den Erfolg der Behandlung und das Ausmaß der Nebenwirkungen ist jedoch die Zusammensetzung und somit die Qualität des Zelltransplantats. Durch die Entwicklung neuer Nanopartikel-basierter Reagenzien kann die Qualität von Transplantaten kontinuierlich verbessert werden. Ihre klinische Eignung wird beispielsweise im Rahmen einer vom BMBF geförderten Studie untersucht, die zeigen soll, ob nach einem Herzinfarkt eine Transplantation von körpereigenen adulten Stammzellen die Leistungsfähigkeit und Lebensqualität der Patienten verbessern kann. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie eine BMBF-Förderung die Translation biotechnologischer Forschung für die regenerative Medizin unterstützen kann und zudem Nanotechnologie kommerziell nutzbar wird.

Auch die zur Zelltherapie notwendigen medizintechnischen Geräte werden ständig verfeinert und den wachsenden Anforderungen in der klinischen Forschung und Routine angepasst. Ein kürzlich entwickeltes Instrument zur automatisierten klinischen Zellseparation eröffnet zahlreiche neue Anwendungsmöglichkeiten von Nanopartikeln in der klinischen Forschung: Alle Schritte, von der Probenvorbereitung über die Zellseparation und die Kultivierung der isolierten Zellen bis hin zur Formulierung des fertigen

Zellprodukts, werden in einem geschlossenen System, automatisch und unter GMP-konformen Bedingungen durchgeführt.



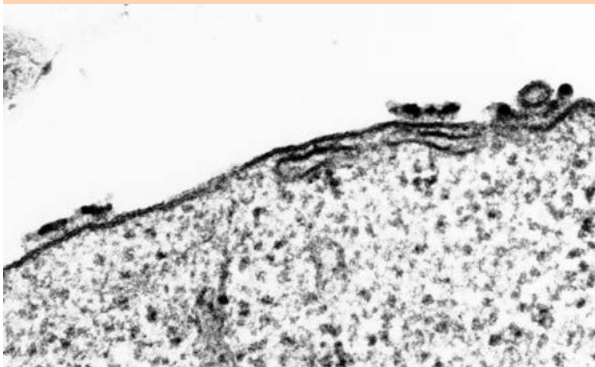
Automatisiertes System zur spezifischen Anreicherung oder Entfernung bestimmter Zellen aus dem Blut oder Knochenmark für die klinische Forschung. Anwendungsfelder liegen vor allem in den Bereichen der personalisierten Immuntherapie und der regenerativen Medizin (Quelle: Miltenyi Biotec GmbH).

Bildgebende Verfahren

Superparamagnetische Nanopartikel finden beispielsweise auch in bildgebenden Verfahren im Rahmen von präklinischen Studien zur Zelltransplantation bei neurodegenerativen Erkrankungen Anwendung. Dazu werden die Partikel z. B. in isolierte, Nervenzellen-bildende Vorläuferzellen eingeschleust. Die so markierten Zellen werden daraufhin in ein Tiermodell injiziert. Die Bewegung und Lokalisation der Zellen im lebenden Organismus kann mithilfe der MRT verfolgt werden, was Rückschlüsse auf die Interaktion zwischen den transplantierten Zellen und dem Organismus zulässt.

Halbleiter-basierte Zellsortierung

Die neueste Entwicklung im Bereich der Zellisolierung ist ein Gerät, dessen Kerntechnologie auf einem Silizium-Wafer-Ventil beruht, welches die Abtrennung fluoreszenzmarkierter Zellen aus einem Strom von Zellen ermöglicht. Das Ventil wird durch einen Impuls gesteuert, der durch das Fluoreszenzsignal der Zielzellen ausgelöst wird. Die Ventil-Öffnungszeiten müssen dabei im μ s-Bereich liegen, um ca. 100 Mio. Zellen pro Stunde sortieren zu können. Im Gegensatz zu herkömmlichen Zellanalyse im Durchflussverfahren werden die Zellen bei dieser Technik keinen hohen Drücken ausgesetzt. Dies wirkt sich positiv auf die Lebensfähigkeit und Funktionalität der Zellen aus.



Die paramagnetischen Nanopartikel auf der Zelloberfläche haben eine Größe von ca. 50 nm. (Quelle: Prof. Groscurth, Zürich).

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Nanotechnologieforschung betrifft mittlerweile nahezu sämtliche medizinischen Anwendungsbereiche. Einen Schwerpunkt bildet die Nanomedizin auch innerhalb des 7. Europäischen Forschungsrahmenprogramms. Im Zeitraum 2007 bis 2013 sind rund 100 Projekte zur Nanomedizin gefördert worden. Darunter sind auch große Projektverbünde mit einem Förder volumen von mehr als 10 Mio. €, die folgende Forschungsthemen adressieren:

- **Hochspezifische und -sensitive Testsysteme zur Früherkennung von Krebs.** Geforscht wird an Schnelltestplattformen, die photolumineszente, plasmonische, magnetische und nicht linear optische Eigenschaften von Nanomaterialien für die Früherkennung von Krebs nutzen (Laufzeit bis 2014,

weitere Infos unter www.namdiatream.eu).

- **Nanooptimierte Diagnose und Therapie von Bauchspeicheldrüsenkrebs:** Geforscht wird an Nanopartikeln zur Diagnose mittels MRT/PET sowie zur Therapie mittels Transportkapseln für die nichtklassische Tumorstoffe (z. B. si-RNA) (Laufzeit bis 2015, weitere Infos unter <http://fp7-saveme.com>).
- **Verbesserte Verfahren zur DNA-Sequenzierung und -analyse:** Entwickelt werden kostengünstige und schnelle Verfahren zur DNA-/RNA-Analyse auch mit Hilfe neuer Ansätze der Einzelmolekülanalyse unter Einsatz von Nanoporen und -röhren (Laufzeit bis 2013, weitere Infos unter www.cng.fr/READNA).
- **Ultraschall aktivierbare Drug-Delivery-Systeme:** Erforscht wurden wirkstoffbeladene Nanocarrier, die im erkrankten Gewebe mit Ultraschall aktiviert werden können und ihre Wirkstofffracht gezielt abgeben (Laufzeit bis 2012, weitere Infos unter www.sonodrugs.eu).
- **Diagnose und Therapie von Alzheimer-Erkrankungen:** Entwicklungsziel sind nanopartikuläre Systeme, die die Blut-Hirn-Schranke passieren können und weitere Verbindungen enthalten, die schädliche Protein-Ablagerungen erkennen und beseitigen können (Laufzeit bis 2013, weitere Infos unter www.nadproject.eu).
- **Biophotonische Diagnostik:** Neue Lichtquellen sollen die Möglichkeiten biophotonischer Screening- und Abbildungs-Verfahren für die medizinische Diagnostik von subzellulärer bis zur Organebene erweitern. Als Hauptanwendungsfeld wird die Augenheilkunde und Krebsvorsorge adressiert (Laufzeit bis 2016, weitere Infos unter <http://www.famos-fp7.eu>).

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Das Gesundheitssystem in Deutschland steht aufgrund verschiedener gesellschaftlicher Entwicklungen großen Herausforderungen gegenüber. Dazu zählt der demographische Trend einer alternden Gesellschaft, verbunden mit einem starken Anstieg altersbedingter Krankheiten, aber auch der zunehmende Bedarf an individuellen und personalisierten Verfahren der medizinischen Diagnose und Therapie. Auch das wirtschaftliche Umfeld der Pharmabranche ist herausfordernd. Bis zum Jahr 2015 läuft der Patentschutz von Medikamenten mit einem Jahresumsatz von 130 Milliarden US-Dollar aus.^[54] Die Neuentwicklung von Wirkstoffen ist mit immensen Kosten und hohen wirtschaftlichen Risiken verbunden. Der Ansatz, mit nanoskalierten

Trägersystemen die Effizienz bekannter Wirkstoffe zu verbessern, erscheint daher auch aus wirtschaftlicher Sicht aussichtsreich. Auch die Erweiterung der Indikationsfelder bereits bestehender nanomedizinischer Entwicklungen bietet Potenziale, wie Beispiele der hyperthermischen Krebstherapie^[55] oder dem nanopartikelulären Medikament Abraxane^[56] zeigen.

Die Nanomedizin bietet Lösungspotenziale für zahlreiche Problemstellungen im Gesundheitsbereich. Allerdings treten mit zunehmender Verbreitung nanotechnologischer Verfahren in der Medizin auch Fragestellungen der Sicherheit sowie der Regulierung und Standardisierung in den Vordergrund. Ein Problem stellt sich darin, dass bei nanotechnologischen Entwicklungen oftmals die Grenzen der klassischen Regulierungsbereiche von Pharmaka, Medizintechnik oder Nahrungsergänzungsmitteln/ Kosmetika (sog. Nutraceuticals/Cosmeceuticals) verschwimmen. Dies ist beispielsweise bei Implantaten der Fall, die mit Wirkstoffen funktionalisiert sind. Für derartige Kombinationsprodukte müssen die anzuwendenden Regularien noch genauer definiert werden. Auch bezüglich Sicherheitsfragen und möglichen Nebenwirkungen nanomedizinischer Anwendungen besteht noch weiterer Forschungsbedarf, bevor Patienten von solchen Produkten oder Methoden profitieren können.

Gastbeitrag: Nanomedizin aus Sicht des Bundesverbandes der Pharmazeutischen Industrie

Dr. Pablo Serrano, Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie

Definition

Der Begriff der Nanomedizin lässt sich nicht eindeutig definieren. Ein Diskussionspunkt ist oftmals die von der ISO definierte Größengrenze von 100 nm für die Definition von Nanoobjekten. Untersuchungen zeigen, dass eine scharfe Grenze größenabhängiger Materialeigenschaften in der Biologie und der Medizin nicht gezogen werden kann. Ein gutes Beispiel dafür sind Liposomen. Es handelt sich dabei um membranbildende Moleküle aus der Stoffklasse der Lipide, die einen medizinisch relevanten Wirkstoff umschließen und ihn somit durch den Körper an seinen Wirkort transportieren können. Untersuchungen mit Liposomen einer Größe von 150 bis 200 nm haben gezeigt, dass sie

gegenüber kleineren Versionen (<70 nm) eine höhere Aufenthaltszeit in der Blutbahn aufweisen.

Anwendungsgebiete

Die Einsatzgebiete von Nanopartikeln in der Medizin sind vielfältig. Eine detailliertere Einteilung liefert eine kürzlich erschienene Übersichtsstudie zur Nanomedizin^[57]. Die Autoren identifizierten unter anderem mehr als 300 Anwendungen (bereits auf dem Markt und im Erprobungsstatus) und teilten diesen in eine therapeutische und eine medizintechnische Gruppe ein.

Zwei Drittel der therapeutischen Anwendungen macht der Bereich Krebs aus, gefolgt vom Einsatz der Nanotechnik im Kampf gegen Infektionskrankheiten. Der Rest verteilt sich gleichmäßig auf Hepatitis, Anästhetika, Herz-Kreislauf-Beschwerden, Entzündungs- und Immunkrankheiten, chronische Verschleißerkrankungen sowie Störungen von Drüsensfunktionen. Der Einsatz von Nanotechnologien in der Medizintechnik erstreckt sich von in-vivo-Tests über in vivo-Bildgebungsverfahren, in-vivo-Beschichtungen, Nano-Bio-Separation, Knochen- und Zahnersatz, Krebsbehandlung mittels Erhitzung von Nanopartikeln, Operations-Hilfsmittel, zielgerichteter Wirkstofftransport und Trägersysteme sowie Gewebezüchtung („Tissue Engineering“).

Die eingesetzten therapeutisch relevanten Produkte in diesem Gebiet der Medizin werden gerne in sogenannte „harte“ und „weiche“ Nanopartikel eingeteilt. „Harte“ Partikel bestehen meist aus Eisenoxid, Gold, Silber oder Keramik. Neuere Partikel, die in Kürze in klinischen Studien erprobt werden sollen, sind aus Kohlenstoff oder Hafniumoxid.

Zu den sogenannten „weichen“ medizinischen Nanomaterialien werden Liposomen, Mizellen, Emulsionen, Dendrimere sowie andere Polymere und Protein-Nanostrukturen gezählt.

Marktbedeutung

Derzeit hält die USA die größte Anzahl von Patenten auf dem Gebiet der Nanotechnologie. Dies ist vor allem auf die frühe Kommerzialisierung einiger Nano-Produkte durch US-Unternehmen zurückzuführen. Europa ist der zweitgrößte Markt für medizinisch relevante Nanotechnologien. Frankreich, Deutschland und

Großbritannien sind dabei europäische Entwicklungs- und Vermarktungszentren. Im Rahmen des EU-Projektes Nanomed 2020, an dem rund 200 Akteure aus Universitäten, Forschungsinstituten, Kliniken und öffentlichen Gesundheitseinrichtungen, kleinen und mittelgroßen Unternehmen sowie kleinen und großen Branchenorganisationen beteiligt waren, wurden Empfehlungen erarbeitet, wie Europa zu einem Zentrum für nanomedizinische Forschung, Entwicklung und Umsetzung entwickelt werden kann.^[58]

Ausblick

Die Nanomedizin bietet schon jetzt eine Fülle von Möglichkeiten und Hilfsmitteln an, die medizinische Versorgung von Patientinnen und Patienten zu verbessern und zu erweitern. Vieles steckt zwar noch in den Kinderschuhen und man wird sicherlich auf die Besonderheiten von Nanostrukturen bei deren Einsatz im Kampf gegen Krankheiten mit Bedacht eingehen müssen. Unter anderem sind Verweildauer oder Anreicherung im Körper, Stoffwechselumwandlung, Langzeitwirkung und weitere Einflussmöglichkeiten auf die Funktionen des Organismus genauestens zu beobachten und fortlaufend zu dokumentieren – übrigens auch wie bei „konventionellen“ Arzneimitteln und Medizinprodukten. Aber die bereits am Markt befindlichen Nanomedizinprodukte haben gezeigt, dass deren Einsatz eine Bereicherung der Gesundheitsversorgung darstellen.

3.3 Chemie

Branchenentwicklung

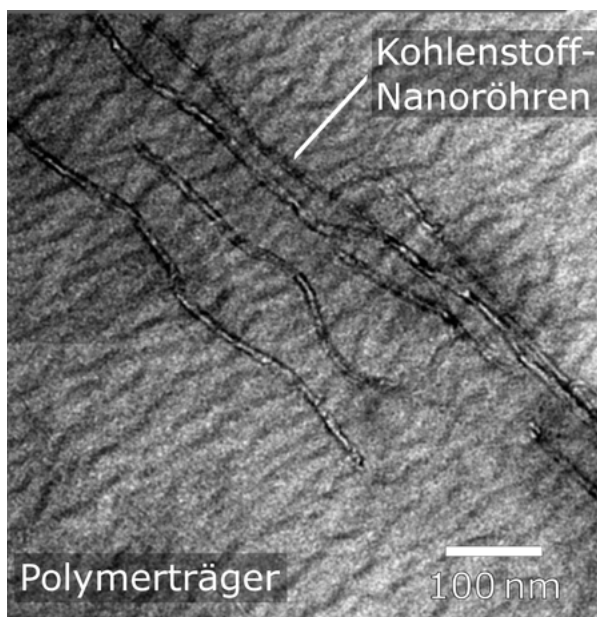
Nach den Aufholeffekten der Chemiewirtschaft seit der Weltwirtschaftskrise 2009 hat sich das Wachstum der Branche mittlerweile abgeschwächt. In 2012 lag der Umsatz des drittgrößten Industriesektors in Deutschland bei 186 Mrd. €. Während im ersten Halbjahr 2013 ein stagnierender Umsatz verzeichnet wurde, rechnet der VCI für das Gesamtjahr mit einem Umsatzwachstum von 1,5 %, das vor allem durch den Export getragen wird. Aktuell sind rund 430.000 Mitarbeiter in Deutschland in der chemischen Industrie beschäftigt.^{[59],[60]} Die Forschungsausgaben der chemisch-pharmazeutischen Industrie sind in den letzten Jahren weiter angestiegen und lagen nach Angaben des VCI im Jahr 2012 bei rund 9 Mrd. €.^[61]

Nanotechnologie spielt in der chemischen Industrie bei der Herstellung und Verarbeitung von Nanomaterialien eine wichtige wirtschaftliche Rolle. Der weltweite Gesamtmarkt von Nanomaterialien, der sich aus den Segmenten Nanopartikel, -hohlkörper, -fasern, -komposite, und -beschichtungen zusammensetzt, wird vom amerikanischen Marktforschungsunternehmen BCC für das Jahr 2012 auf 15,9 Mrd. \$ geschätzt. Bis 2017 wird ein Anstieg auf 37,3 Mrd. \$ bei einer jährlichen Wachstumsrate von 19 % prognostiziert.^[62] Zu den stark wachsenden Marktsegmenten innerhalb der Nanomaterialien zählen u. a. Kohlenstoffnanomaterialien, Quantenpunkte, Nanoschäume und Polymerkomposite. Eine eindeutige Abgrenzbarkeit von Nanomaterialien innerhalb der Produktklasse chemischer Produkte ist aufgrund von Schwierigkeiten bei der Definition sowie deren analytischer Überprüfbarkeit allerdings nicht gegeben (vgl. Abschnitt 4.4). Gemäß eines Definitionsvorschlages der europäischen Kommission betrifft der Begriff Nanomaterialien alle Materialien, die mehr als 50 % nanoskalige Teilchen (sog. Nanoobjekte) bezogen auf die Gesamtzahl aller Materialbestandteile aufweisen.^[159] Unter diese Definition können auch konventionelle Produkte wie anorganische Pigmente fallen, bei denen die Nanoskalierung nicht das Ergebnis einer gezielten Funktionsverbesserung darstellt, sondern auf eine entsprechende Größenverteilung bei pulverartigen Materialien zurückzuführen ist. Der vorliegende Report zielt hingegen auf Entwicklungen, bei denen die Nanostrukturierung gezielt für die Funktionsoptimierung des Materials eingesetzt wird.

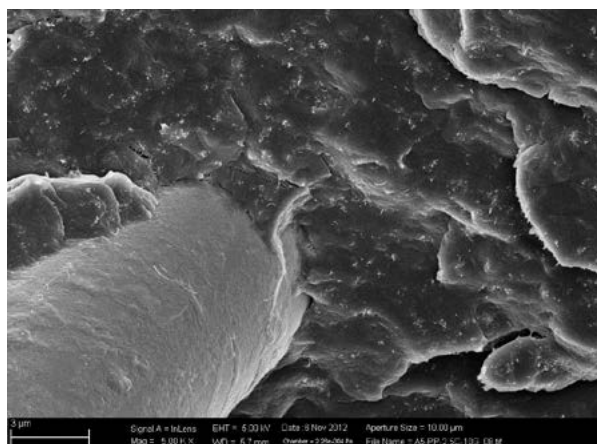
BMBF-Forschungsaktivitäten

Einen Schwerpunkt der BMBF-Förderaktivitäten für Nanotechnologieentwicklungen innerhalb der chemischen Industrie stellen funktionelle Beschichtungen und Oberflächenfunktionalisierungen durch den Einsatz von Nanopartikeln und Nanobeschichtungstechnologien dar. Speziell in diesem Anwendungsfeld zeigt sich die funktionelle Vielseitigkeit der Nanotechnologie, da ein sehr umfangreiches Eigenschaftsspektrum in Abhängigkeit der eingesetzten Nanopartikel, Beschichtungsverfahren und Substrate erzielt werden kann. In den aktuellen Förderaktivitäten betrifft dies vor allem antimikrobielle und biozide Eigenschaften (z. B. durch den Einsatz von Silber-, Titandioxid- oder Zinkoxid-Nanopartikel), mechanische Eigenschaften (Kratz- und Verschleißschutz), chemische Eigenschaf-

ten (Schmutzabweisung, Klebhaftung, Stofftrennung) oder elektrische Eigenschaften (z. B. elektrische Leitfähigkeit von Kunststoffen durch Nanokohlenstoffzusätze). Für jedes spezifische Anwendungsfeld ist in der Regel eine gezielte Optimierung hinsichtlich Beschichtungssubstrat und -Verfahren erforderlich.



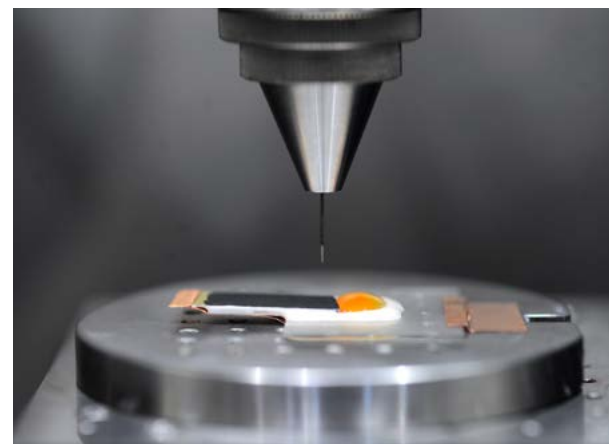
TEM-Aufnahme ausgerichteter Kohlenstoffnanoröhren in einer Polymermatrix. (Quelle: Universität Jena, Foto: AG Jandt).



Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Polypropylen (PP) / Carbon Nanotube (CNT) / Glasfaser (GF) Komposits. Der Komposit vereint elektrische Leitfähigkeit aufgrund der CNTs mit guten mechanischen Eigenschaften aufgrund der Glasfasern. (Quelle: Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie).

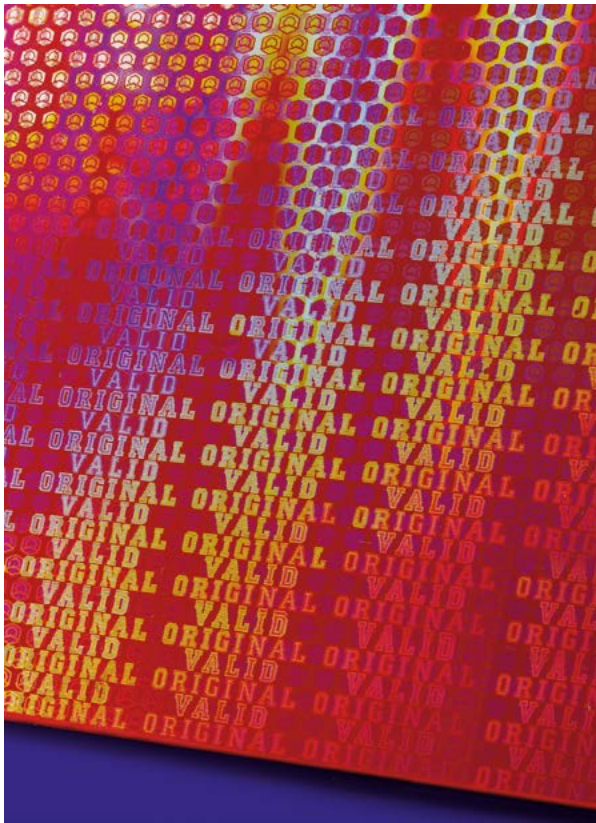
Weitere Schwerpunkte bilden die Entwicklung polymerer Nanokomposite und die Materialforschung im Bereich der organischen Elektronik. Durch umfangreiche Fördermaßnahmen sind mittlerweile große Fortschritte bei der Integration nanostrukturierter Kohlenstoffmaterialien wie Kohlenstoffnanoröhren und Graphen zur Eigenschaftsoptimierung von Polymerkompositen erzielt worden.

Nanotechnologieforschung liefert auch Ansätze für innovative Precursor-Verbindungen, mit denen organische und anorganische Schichten bei geringeren Prozesstemperaturen abgeschieden werden können. Darüber hinaus werden im Rahmen der BMBF-Förderung komplexere Fragestellungen wie multifunktionale Schichten mit graduell einstellbaren Oberflächeneigenschaften, schaltbare Funktionen, materialintegrierte Sensorik/Aktorik oder Selbstheilung adressiert.



Am Max-Planck-Institut für Eisenforschung werden selbstheilende Korrosionsschutzschichten auf Basis elektrisch leitfähiger Polymer-Nanokapseln erforscht. Mit Hilfe einer Kelvinsonde lässt sich die Wirksamkeit der Korrosionsschutzschichten genau untersuchen. (Quelle: Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Foto Christian Niehlinger).

Nanotechnologische Innovationen werden auch im Hinblick auf die Optimierung klassischer Chemieprodukte wie Folien, Membranen, Katalysatoren, Lacke, Pigmente und Schmierstoffe vorangetrieben. Zudem erweitert die Nanotechnologie die Möglichkeiten bei der Nutzung regenerativer Rohstoffe und Energieträger durch chemische Stoffumwandlung und Bioverfahrenstechnik durch nanostrukturierte Katalysatoren, Stofftrennverfahren oder Substratträger.



Nanostrukturierte Lackoberflächen für den Plagiatschutz (Bildquelle: Fraunhofer IFAM).

Ein sehr wichtiger Bereich der Förderaktivitäten des BMBF ist die Erforschung potenzieller Auswirkungen beim Einsatz synthetischer Nanomaterialien auf die Gesundheit und die Umwelt. Seit 2006 werden im Rahmen von BMBF-Projekten die Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber Nanomaterialien sowie toxikologische und ökotoxikologische Wirkungen erforscht und zuverlässige, qualitätsgesicherte sowie praktisch handhabbare Verfahren für die Einschätzung möglicher Risiken entwickelt (vgl. Abschnitt 4.4). Damit werden wesentliche Beiträge für einen sicheren und verantwortungsvollen Umgang mit synthetischen Nanomaterialien geliefert.

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Wichtige Impulse für die Nanomaterialforschung in Deutschland liefert die europäische Forschungsförderung. Innerhalb des 7. Forschungsrahmenprogramms wurden im Zeitraum von 2007 bis 2013 rund 80 Projekte mit direktem Anwendungsbezug in der chemischen Industrie initiiert. Dabei wird ein breites Themenspek-

trum klassischer Nanotechnologieanwendungen wie Oberflächenfunktionalisierung oder Katalyse neben neueren Forschungsansätzen wie Selbstorganisation, multifunktionale Hybridmaterialien oder auch Querschnittsthemen, wie z. B. die Multiskalen-Modellierung von Nanomaterialien, adressiert. Einen Schwerpunkt stellt die Entwicklung organischer Materialien für die Elektronik und Photonik dar, für die allein im Verbundprojekt „ONE-P“ ein Fördervolumen von rund 18 Mio. € bereitgestellt wird.^[63] Mit hoher Intensität werden in der europäischen Forschungsförderung auch Fragen der Sicherheit von Nanomaterialien und deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt erforscht. Das Fördervolumen für die Nanorisikoforschung im FP7 beläuft sich auf über 100 Mio. € verteilt auf 34 Projekte.^[64]

In Deutschland leisten neben dem BMBF auch andere für die Bereiche Umwelt-, Arbeits-, und Verbraucherschutz zuständigen Bundesressorts und deren nachgeordnete Bundesbehörden wichtige Beiträge zur Nanorisikoforschung. Im Zeitraum von 2007 und 2011 wurden mehr als 80 Einzelprojekte zur Erforschung der Risikoaspekte von Nanomaterialien durchgeführt.^[65]

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Folien, Membranen	Nanofluidische Aluminium-Oxid-Membran zur Separation von Fettsäuren aus wässrigen Medien	13N11391-2
Funktionelle Beschichtungen und Oberflächenfunktionalisierungen	Antimikrobiell wirkende Schichten (Ag, TiO ₂) auf Oberflächen über Nano-Filme mittels Gasphasenprozessen für Textilien und die Medizintechnik	03WKBR7A-G, 13N11353, 03X0095A-C
	Beschichtungen zur Vermeidung von biologischen Anhaftungen auf ZnO Nanostrukturbasis	03X0096A-B
	Metall-Polymer-Nanokompositschichten durch Atmosphärendruck-Plasma-Jet-Quellen für Schmutzabweisung und elektromagnetische Anwendungen	03X0119A-B
	Oberflächenfunktionalisierung von Bio-Kunststoffen durch den Einsatz von anorganischen Nanopartikeln zur Verbesserung von UV-Schutz, Witterungsbeständigkeit, Gasdichtigkeit, Kratzfestigkeit oder Schmutzabweisung	03X2517A-E
	Nanopartikel-Harzbeschichtungen zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften von Papier	01DJ12044
	Transparente und elektrisch leitfähige Schichten mit einwandigen CNT-Hybriden, CNT für intelligente, flächige Temperaturüberwachung von Elektronikbauteilen in explosionsgeschützten Geräten	03X0202A-H, 03X0116A-B
	Multifunktionale graduell einstellbare Oberflächeneigenschaften durch nanoskalige Hybridpolymerschichten	03X0099A-D
	Beschichtungen mit schaltbaren Klebeigenschaften auf Basis funktionalisierter Polymere und Nanopartikel	03X2515A-C
	Abscheidung funktioneller Metalloxidschichten aus gelösten metallorganischen Ausgangsstoffen bei niedrigen Prozesstemperaturen für organische Solarzellen	13N11777
	Nanoschichten als hocheffiziente Trennmedien in der chromatographischen Stofftrennung	13N11030-1
	Entwicklung von löslichen Polysilanen als Ausgangsstoffe zur Bildung von halbleitenden Siliziumdünnschichten	13N11345-7
Katalysatoren	Stickstoffdotierte Kohlenstoffnanoröhrchen für die Chlor-Alkali-Elektrolyse	03X0207A-D
	Einsatz von CNT als Katalysator und Katalysatorträger	03X0204A-D
	Photokatalytische Schichten zur Aufbereitung von Abwässern aus der Zellstoffproduktion	17N0310
	Ressourceneffiziente AlkanSelektivOxidation unter Einsatz kristalliner Borophosphate	033R028A-E
	Multifunktionale Metallopolymere als effiziente Katalysatoren in kontinuierlichen Reaktionsprozessen	13N11313
	Nanostrukturierte Metallnitrid-Elektroden zur (photo-)elektrokatalytischen Wasserstoffentwicklung	03SF0353A-E
Lacke, Pigmente	CNT-modifizierte Lacke für verbessertes Entladungsverhalten in der Luftfahrt, Windkraft und Elektrotechnik	03X0203A-E
	Nanopartikel basierte Lacksysteme mit innovativen Eigenschaften (aktiver Korrosionsschutz, Detektierbarkeit von Materialschäden, Selbstheilung von mechanischen Defekten oder der Kratzschutz)	03X0074A-D
	Elektrisch leitfähige Druckfarben auf der Basis von Nanopartikeln für Massendruckverfahren	13N10653-5
	Umweltfreundliche Sol-Gel-Korrosionsschutzlacke	03X0073A-B
Nutzung alternativer Rohstoffquellen für chemische Grundstoffe und Energiespeicher	Solar-thermochemische Erzeugung chemischer Produkte aus H ₂ O und CO ₂ mittels nanoporöser und nanopartikulärer Metallkomposite	01RC1103A-C
	Photokatalytische CO ₂ -Reduktion mit Farbstoff-sensibilisierten Halbleitern zur Methanolverwertung	13N11791-4
	Photokatalytische Spaltung von Wasser zu Wasserstoff	03IS2071A-G

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Bioverfahrenstechnik	Beschichtete nano-/mikroporöse Enzym-Träger für großindustrielle Prozesse	0316063A-E
	Magnetpartikel-Technologie zur Enzymimmobilisierung für die industrielle Biokatalyse	0315815
Polymerkomposite, Makromoleküle	Elektrisch und thermische leitfähige Kunststoffe auf Basis von CNT, expandiertem Graphit, Graphenen oder Graphenoid-Lagen	03X0206A-G, 01DG12046,
	Elastomerkomposite auf Basis von Graphenen z. B. für Automobilreifen	03X0111A-D, 03X0110A-B, 03X0108A-C
	Entwicklung von sensorischen und adaptiven Systemen auf Basis von Elastomeren mit magnetischen Nanopartikeln	16SV3763
	Flexible Elektroden für miniaturisierte dielektrische Elastomer-Aktoren auf der Basis von leitenden Nanopartikeln	16SV5370
	Polymerverkapselte magnetische Nanopartikel für Anwendungen in den Lebenswissenschaften	17PNT025
	Hydrophile gasdurchlässige SiO ₂ /Polyacrylat-Nanokomposite für biokompatible Kontaktlinsen	13N10756-7
	Lithium-Gelpolymerelektrolyte für Li-Ionen-Batterien basierend auf neu synthetisierten Homo- und Block-Copolymeren	03SF0390
	Neue Materialien für OLEDs aus Lösung	13N10614-22
	Morphologie und elektronische Struktur von Organik/Organik- und Organik/Metalloxid-Hybridsystemen	13N10721-5
Schmierstoffe	Kunststoffgleitlager mit funktionalisierten CNT für optimierte Schmierstoffwechselwirkung	03X0205A-E
	Tribologische Innovation mit Graphenen: Ansätze zur extremen Reibminderung für die Mikrosystemtechnik	03X0107A-D
	Selbstkonditionierende Kunststoffoberflächen für Wasserschmierung	13N10645-7
Risikoforschung zu Nanomaterialien • Auswirkungen auf den Menschen	Sicherheits-, Gesundheits- und Qualitätsaspekte im Umgang mit CNT und Screening-Verfahren zur Untersuchung eines möglichen krebserzeugenden Potentials	03X0043A-D, 03X0109A-B
	Vorhersage humantoxikologischer Wirkung synthetischer Carbon Black Nanopartikel	03X0093A-E
	Resonanzsensoren zur Nanopartikelwägung für personenbezogene Messungen von Nanopartikel-Expositionen	03X0098A-B
	Nanosilberpartikel – Wirkmechanismen und Untersuchungen ihrer möglichen Interaktionen mit Geweben, Zellen und Molekülen	03X0103A-E
	Nanostrukturierte Materialien – Gesundheit, Exposition und Materialeigenschaften	03X0105A-O
• Auswirkungen auf die Umwelt	Mobilität synthetischer Nanopartikel im wassergesättigten und variabel wassergesättigten Untergrund	03X0077A-C
	Untersuchung des Lebenszyklus von Nanopartikeln anhand von ¹⁴⁵ TiTiO ₂ und ¹⁰⁵ AgAg ⁰	03X0078A-C
	Abschätzung der Umweltgefährdung durch Silber-Nanomaterialien – vom chemischen Partikel bis zum technischen Produkt	03X0091A-H
	Materialeigenschaften, Freisetzung und Verhalten in der Umwelt von CNT-Materialien	03X0114A-E

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

Beispiel für europäische Forschungsinitiativen: ERA-NET SIINN – Forschungsförderung und Vernetzung in der Sicherheit von Nanotechnologie

Dr. Rainer Hagenbeck, Projektträger Jülich

ERA-NETs (ERA = European Research Area) sind von der EU Kommission finanziell geförderte Projekte zur Vernetzung nationaler Forschungsprogramme und -aktivitäten. Das europäische ERA-NET Projekt SIINN zur Nanosicherheit startete im August 2011. SIINN steht für „Safe Implementation of Innovative Nanoscience and Nanotechnology“. Das ERA-NET SIINN befasst sich mit der Sicherheit und möglichen Risiken beim Einsatz von künstlich hergestellten Nanomaterialien. Unter der Federführung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des beauftragten Projektträgers Jülich (PtJ) haben sich im SIINN-Projekt 20 europäische Organisationen aus 14 Ländern zusammengefunden. Hauptziel dieses Projektes ist die Vorbereitung und Durchführung gemeinsamer transnationaler Förderinitiativen zur Nano-Risikoforschung.

Das ERA-NET SIINN ergänzt die nationalen und europäischen Fördermaßnahmen zur Erforschung von Sicherheit und evtl. Risiken industriell hergestellter Nanomaterialien und darauf basierender Nanotechnologien und Nanoprodukte. SIINN ermöglicht dabei im Rahmen international abgestimmter Fördermaßnahmen die Zusammenarbeit deutscher Unternehmen, ggf. in Kooperation mit deutschen Forschungseinrichtungen, mit akademischen und industriellen Partnern der beteiligten Länder und Regionen im europäischen Ausland in FuE-Projekten, die nur durch internationale Zusammenarbeit zum Erfolg zu führen sind.

Im Juni 2013 wurden die ersten transnationalen Förderprojekte gestartet, von denen nachfolgend einige Beispiele aufgeführt werden.

nanoIndEx (Assessment of Individual Exposure to manufactured nanomaterials by means of personal monitors and samplers)

In diesem Projekt sollen kürzlich verfügbar gewordene personenbezogene Messinstrumente hinsichtlich ihrer Genauigkeit, Vergleichbarkeit und Praktikabilität untersucht werden. Dabei handelt es sich um Geräte, welche die Belastung durch auf dem Luftwege über-

tragene synthetische Nanopartikel im Mund- und Nasenbereich an entsprechenden Arbeitsplätzen erfassen können. An diesem Projekt beteiligen sich Forschungspartner aus Deutschland, Frankreich, der Schweiz und Großbritannien. Projektkoordinator ist das Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. aus Duisburg.

NanOxiMet (Assessment of the use of particle reactivity metrics as an indicator for pathogenic properties and predictor of potential toxicological hazard)

Ziel dieses Projektes ist ein Beitrag zur vereinfachten Vorhersagbarkeit krankheitserregender Eigenschaften von künstlich hergestellten Nanopartikeln. Hierzu wird eine Gruppierung verschiedener Typen von Nanopartikeln angestrebt. Diese Gruppierung soll auf tiefgehenden Untersuchungen der physikalischen Eigenschaften ausgewählter Nanopartikel und ihrer toxischen Auswirkungen auf menschliche Zellen basieren. Die Studie wird sich auf die nach momentanem Wissensstand am besten geeigneten Messgrößen zur Vorhersage toxischer Eigenschaften von Nanopartikeln konzentrieren – Größe und Struktur der Nanopartikel-Oberflächen und Potenzial zur Erzeugung von Oxidanten. An diesem Projekt beteiligen sich Partner aus Deutschland und Frankreich. Koordinator ist auch hier das Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. aus Duisburg.

Nanoheter (Fate of engineered nanoparticles in the water column under natural conditions. Role of the heteroaggregation with naturally occurring suspended matter)

Dieses Projekt befasst sich mit dem Verbleib synthetischer Nanopartikel in Oberflächengewässern wie z. B. Flüssen. In diesem Zusammenhang soll die Rolle von Aggregationsmechanismen mit natürlich vorkommenden mineralischen und organischen Schwebstoffen untersucht werden.

Das ERA-NET SIINN wird im Rahmen des 7. Europäischen Forschungsrahmenprogramms gefördert (Grant Agreement No. 265799). Nähere Informationen im Internet unter www.siinn.eu.

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die Rahmenbedingungen für den Einsatz der Nanotechnologie in der chemischen Industrie sind weiterhin geprägt von einer politischen und gesellschaftlichen Diskussion um eventuelle Risiken für die Gesundheit und die Umwelt sowie regulatorische Maßnahmen bei der industriellen Anwendung von Nanomaterialien. Die EU Kommission ist bei der Überprüfung des bestehenden Rechtsrahmens zu dem Schluss gekommen, dass das bestehende Regelwerk der Chemikalien auch für Nanomaterialien anwendbar ist und dass eventuelle Gefährdungen Einzelfall- und Anwendungs-spezifisch geregelt werden sollten. Die bisherigen Methoden der Risikobewertung seien anwendbar, wenn auch teilweise spezifisch anzupassen.^[66] In einzelnen Regulierungsbereichen hat es bereits Anpassungen gegeben wie beispielsweise die Kennzeichnungspflicht bei Kosmetika, Lebensmitteln und Bioziden. Über weitere Anpassungen wie etwa im Bereich der Chemikaliengesetzgebung oder die Einführung verpflichtender Produktregister zu Nanomaterialien wird auf politischer Ebene und in der Fachszene kontrovers diskutiert (vgl. Abschnitt 4.4). Die Unsicherheit bezüglich weiterer regulatorischer Restriktionen sowie möglicher zusätzlicher Kosten bei der Anmeldung und Registrierung von Nanomaterialien kann sich als Innovationsbarriere bei der Kommerzialisierung von Nanomaterialien speziell bei KMU auswirken. Auch bedingt durch eine verstärkte Risikokommunikation in den Medien und eine evtl. dadurch wachsende Risikowahrnehmung in der Bevölkerung positionieren sich einige Unternehmen der chemischen Industrie derzeit eher zurückhaltend im Kontext der Nanotechnologie. Die weitere Entwicklung wird stark von den Ergebnissen der Nanorisikoforschung abhängen. Als Fazit der Forschungsergebnisse der letzten Jahre kann festgehalten werden, dass Nanomaterialien nicht generell gefährlicher einzustufen sind als gröber strukturierte Materialien, sondern dass die Bewertung vom spezifischen Material und Anwendungsbereich abhängt (vgl. Abschnitt 4.4).

Neben den Risikoaspekten stellen nach wie vor technische und wirtschaftliche Fragestellungen wesentliche Herausforderungen bei der Kommerzialisierung von Nanomaterialien dar. Aufgrund von Problemen bei der Herstellung im industriellen Maßstab, der Weiterverarbeitung und Integration von Nanomaterialien in bestehende Wertschöpfungsketten sowie

oftmals Kostennachteilen gegenüber bestehenden Lösungen konnten die Potenziale der Nanotechnologie in der chemischen Industrie bislang nur ansatzweise ausgeschöpft werden.

3.4 Metall- und Keramikwerkstoffe

Branchenentwicklung

Die wirtschaftliche Entwicklung im Metall- und Keramiksektor in Deutschland ist momentan leicht rückläufig. In der Metallerzeugung und -bearbeitung wurde 2012 ein Umsatzrückgang um 7 % auf 109 Mrd. € verzeichnet, während die Beschäftigung weitgehend stabil bei 254.000 Mitarbeitern lag.^[67] Negativ betroffen ist vor allem die Stahlindustrie mit derzeit rund 88.000 Beschäftigten (2012) und Umsatzerlösen von 46 Mrd. € in Deutschland, was einem Rückgang um ca. 7 % gegenüber 2011 entspricht.^[68] Auch im Bereich der Nichteisenmetalle mit rund 109.000 Beschäftigten und einem Jahresumsatz von 50 Mrd. € in 2012 ist ein leichter Abwärtstrend zu beobachten, der vor allem auf eine schwächere Nachfrage aus dem südeuropäischen Ausland zurückzuführen ist.^[69] Eine positive Entwicklung mit leichten Umsatzsteigerungen verzeichnete die keramische Industrie in Deutschland, die 2011 rund 33.000 Mitarbeiter in Deutschland beschäftigte und einen Jahresumsatz von 5,4 Mrd. € erzielte. Der Bereich der Technischen Keramik, der in erster Linie für nanotechnologische Entwicklungen relevant ist, umfasst mit ca. 3.000 Mitarbeitern und einem Jahresumsatz von 530 Mio. € etwas weniger als 10 % der Gesamtwirtschaftsleistung der Keramikbranche.^[70]

Wirtschaftlich relevante Nanotechnologieentwicklungen betreffen im Keramiksektor den Bereich keramischer Hochleistungsbeschichtungen und nanoskalige keramische Pulver. Das Marktvolumen keramischer Hochleistungsbeschichtungen wird für Nordamerika auf 1,4 Mrd. \$ geschätzt, bei einem prognostizierten jährlichen Wachstum von 7 % bis 2016.^[71] Bei nanoskaligen keramischen Pulvern soll der Umsatz in Nordamerika bei einem jährlichen Wachstum von 16 % auf 1,2 Mrd. \$ in 2016 ansteigen.^[72]

Der Umsatz durch metallische Nanopartikel für leitfähige Tinten, Kleber, antibakterielle Zusätze etc. wird für das Jahr 2017 weltweit auf 2 Mrd. \$ geschätzt.^[73]

BMBF-Forschungsaktivitäten

Innerhalb der Nanotechnologieforschung des BMBF betrafen im Zeitraum ab 2011 nur vereinzelte Projekte unmittelbar den Bereich der Metall- und Keramikwerkstoffe. Forschungsaktivitäten befassten sich beispielsweise mit dem Einsatz von CNT zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von keramischen Verbundwerkstoffen und Aluminiumwerkstoffen. Weitere Entwicklungsziele sind Serienproduktionstechniken zur Herstellung von verschleißbeständigen Nano-Komposit-Schneidkeramiken durch Plasma- und Feld-aktivierte Sinterungstechniken sowie der Ersatz von Blei in piezokeramischen Werkstoffen. Im Bereich der Metallumformung werden nanopartikuläre Randschichten zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit von Umformwerkzeugen entwickelt. Beschichtungssysteme mit Metalloxid-Nanopartikeln werden erforscht, um Stahlbleche vor der Hochtemperaturkorrosion beim Freiformschmieden zu schützen. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Medizintechnik beim Einsatz von Nanobeschichtungen zur Verbesserung der Biokompatibilität von Titanimplantaten.

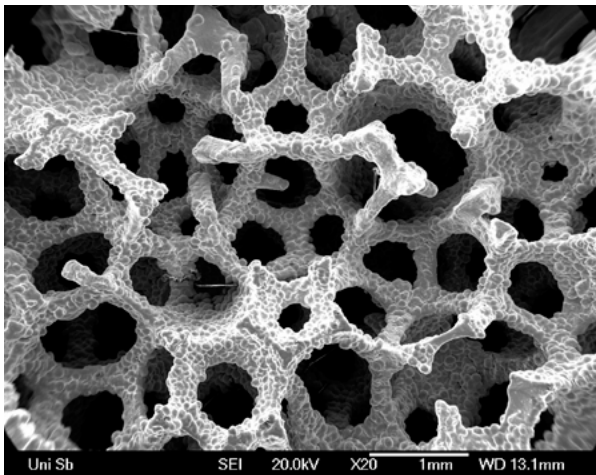
Die mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Metallschäumen werden erforscht. Hieraus ergeben sich neue Anwendungspotenziale für Applikationen, bei denen konventionelle Aluschäume bislang zu weich und instabil waren. Eine Saarbrücker Materialforscherin ist für die Entwicklung des mittlerweile zum Patent angemeldeten Beschichtungsverfahrens mit dem Deutschen Studienpreis 2013 ausgezeichnet worden.^[74]

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

An der Universität Saarbrücken wird die Anwendung nanokristalliner Nickelbeschichtungen zur Verbesse-

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Keramische Werkstoffe	CNT-verstärkte keramische Verbundwerkstoffe durch Ausbildung eines atomar gebundenen CNT-Netzwerkes innerhalb der Keramikmatrix	03X0084A-C
	Serienproduktionstechnik facettierter keramischer Nano-Komposit-Schneidkeramikeinsätze mit Hilfe der FAST/SPS (Field Assisted Sintering Technique / Spark Plasma Sintering)	01QE1122A-B
	Struktur-Eigenschaftsbeziehungen bleifreier piezokeramischer Materialien in Multischichtsystemen für Stellglieder und wärmeempfindliche Widerstände	17PNT014
Metallische Werkstoffe	Steigerung der Verschleißbeständigkeit von Schmiedegesenken für die Warmmassiumformung durch nanopartikulär verstärkte Randschichten	03X0118A-H
	Verbesserung der Energieeffizienz beim Aluminiumguss durch nanostrukturierte Oxide und Additive	01LY1108A-F
	Einsatz nanoskaliger Beschichtungssysteme zur Verminderung der Hochtemperaturkorrosion beim Wiedererwärmen von Vormaterial beim Freiformschmieden	03X0088A-C
	Hochleistungswerkstoffe auf Aluminiumbasis mittels Kombination von CNT in der Leichtmetallmatrix.	03X0057A-H
	Biomedizinische Eigenschaften von nanostrukturiertem und beschichtetem Titan	01DJ12064

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).



Elektronenmikroskopische Aufnahme eines mit nanokristallinem Nickel beschichteten Aluminiumschaums. Durch nanokristalline Beschichtungen lassen sich neben mechanischen Eigenschaften, wie der Tragfestigkeit und dem Energieabsorptionsvermögen, auch Oberflächeneigenschaften wie die Korrosionsstabilität und die Hochtemperaturbeständigkeit von Metallschäumen verbessern. (Bild: Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Technische Mechanik).

Beispiel aus der Grundlagenforschung: Nanoanalytik zur Aufklärung von Korrosionsprozessen

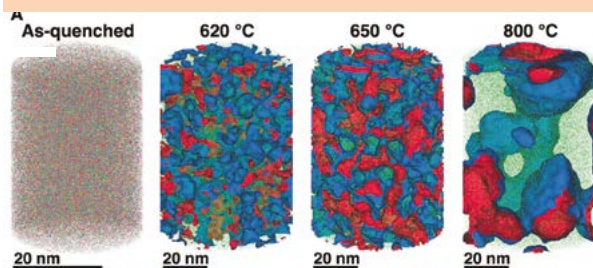
Frank Uwe Renner, Jazmin Duarte, Julia Klemm,
Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH,
Düsseldorf

Korrosion (umgangssprachlich Rost) und damit verbundener Materialverschleiß sind ein schwerwiegendes Problem der heutigen Zeit. Dabei ist der Einsatz vielfältiger Metalllegierungen und Stähle Grundlage für unzählige Anwendungen des täglichen Lebens, zum Beispiel in den Bereichen Infrastruktur, Mobilität und Energie.

Nanoanalytische Untersuchungen, um die Korrosion bis auf die atomare Ebene zu verstehen und somit Wege zu finden sie einzudämmen oder sogar auszunutzen, sind bisher nur selten zu finden. Die Mikrostruktur mit dem Werkstoffverhalten eines Materials in Verbindung zu setzen, würde nicht nur im Kampf gegen den Verschleiß helfen, sondern auch Wege aufzeigen, neue Materialien mit innovativen Prozesstechnologien herzustellen.

Frank Renner und seiner Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Eisenforschung ist es nun

erstmals im Detail gelungen, die Mikrostruktur mit dem Korrosionsverhalten des metallischen Glases Fe₅₀Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆ in seiner amorphen, teil- und voll nanokristallinen Form miteinander in Verbindung zu setzen.^[75] Die Zusammensetzung des Werkstoffes ähnelt einem rostfreien Stahl, metallische Gläser sind aber Legierungen, die auf atomarer Ebene keine kristalline (geordnete), sondern eine amorphe (ungeordnete) Struktur aufweisen. Diese für Metalle ungewöhnlich ungeordnete Atomanordnung führt zu einzigartigen Eigenschaften wie beispielsweise einem hohen Härtegrad oder exzellenter Korrosionsbeständigkeit.



Mikrostrukturanalyse des metallischen Glases Fe₅₀Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆ mittels Atomsondentomographie. Gezeigt ist die Abhängigkeit der Nanostruktur von der Temperatur. Das amorphe metallische Glas wird durch Temperaturbehandlung erst teilkristallin und dann bei 800 °C voll nanokristallin, zu sehen an der Bildung geordneter großflächiger Strukturen im Gegensatz zum fein durchmischten Ergebnis im amorphen Zustand (links). Grün: Eisen, Blau: Chrom, Rot: Molybdän (Quelle: Max-Planck-Institut für Eisenforschung).

Die Untersuchung der Mikrostruktur mithilfe einer modernen tomographischen Atomsonde zeigt unterschiedliche Verteilungen der Elemente während der Kristallisation des Materials. Elektrochemische Untersuchungen zeigen, dass diese ungleiche Verteilung einen starken Effekt auf die Korrosion hat. Das amorphe und teilkristalline Material ist korrosionsbeständiger als das voll nanokristalline Material. Unter Verwendung einer Durchflusszelle mit konstantem Elektrolytstrom (Rasterdurchflusszelle) gekoppelt mit Massenspektrometrie kann in Echtzeit die Auflösung der einzelnen Elemente des Werkstoffes analysiert werden. Hier zeigt sich, dass es einen Zusammenhang zwischen der Chrom-Verteilung und dem Korrosionsschutz gibt. Chrom ist im amorphen Material an der Oberfläche angereichert und bietet dadurch einen besseren Schutz vor Korrosion als das nanokristalline

Material, in dem korrosionsanfällige Molybdän-Phasen neben Chrom-Phasen vorliegen.

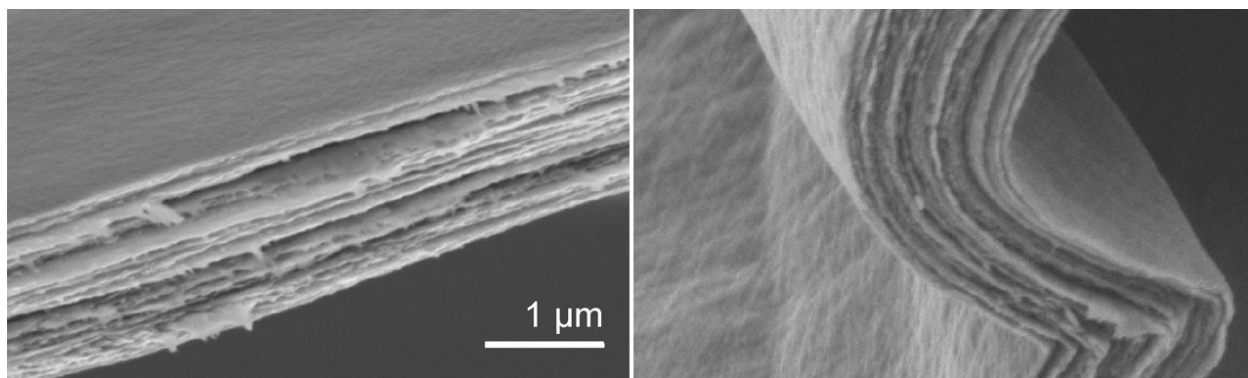
Die neu gewonnenen Erkenntnisse hat das Forscherteam direkt für die Entwicklung eines neuen Werkstoffs verwendet. Dieses Material besitzt elektrochemisch erzeugte poröse Strukturen und eignet sich als Membran für Filter oder als Trägermaterial für Katalysatoren.

Im Bereich der Keramikwerkstoffe bieten sich durch eine gezielte hierarchische Anordnung von Nanostrukturen Potenziale, um neuartige und für Keramiken ungewöhnliche Materialeigenschaften zu realisieren wie eine hohe Bruchfestigkeit und mechanische Flexibilität. Die Nachahmung dieser bei Biokeramiken wie Perlmutter oder Knochen bekannten Eigenschaften kann durch den Einsatz nanotechnologischer Verfahren zur Herstellung hierarchisch strukturierter Kompositmaterialien erreicht werden. Im Rahmen eines DFG-Projektes gelang es Forschern der Universität Stuttgart, des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme und des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung, aus leitfähigen Nanofasern von Vanadiumpentoxid ein viellagiges keramisches Papier herzustellen. Aufgrund der besonderen Struktur und Anordnung der Nanofasern in einer Matrix mit Wassereinschlüssen ist das Material sehr elastisch bei einer gleichzeitigen hohen Festigkeit und elektrischer Leitfähigkeit. Anwendungspotenziale könnten sich als Elektrodenmaterial in Akkus, in flachen, flexiblen Gassensoren oder Stellglieder in künstlichen Muskeln ergeben.

Forschungsarbeiten im Rahmen der EU-Forschungsförderung adressieren die Entwicklung von CNT für hochfeste und elektrisch leitfähige Kompositmaterialien, die beispielsweise in der Luftfahrt für den Einsatz in Flugzeugstrukturen von Interesse sind. Im Rahmen eines mit mehr als 2 Mio. € geförderten EU-Projektes wurden CNT-Kompositmaterialien zur Reparatur von Flugzeugstrukturen erforscht. Mit dem Material sollen der Reparaturprozess für Aluminiumstrukturen vereinfacht, die Schadens- und Ermüdungstoleranz verbessert und gleichzeitig eine Detektion von Schäden durch Veränderungen in der Leitfähigkeit des Materials schnell und ohne aufwendige Untersuchungen ermöglicht werden.^[76]

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Wesentliche Treiber für Nanotechnologieentwicklungen bei Metall- und Keramikwerkstoffen sind Anforderungen im Bereich der Ressourcen- und Energieeffizienz. Nanooptimierte Werkstoffe erweitern Einsatzmöglichkeiten im Leichtbau, im Korrosions- und Verschleißschutz oder beim Ersatz seltener oder toxischer Rohstoffe. In den Fokus der Forschungsanstrengungen rücken dabei zunehmend multifunktionale Werkstoffe mit integrierten sensorischen, aktorischen und selbstheilenden Eigenschaften. Ähnlich wie im Bereich der chemischen Industrie liegt auch im Metall- und Keramiksektor eine wesentliche Herausforderung beim sicheren Umgang mit nanopartikulären Materialien, die beispielsweise trocken als Pulver oder mit Flüssigkeiten gemischt verarbeitet werden. Aspekte des Arbeits- und Umweltschutzes sind hierbei in besonde-



Biegsames Keramik-Papier: In den Aufnahmen eines Rasterelektronenmikroskops sind die übereinander gestapelten Lagen des Verbundmaterials aus Vanadiumpentoxid und Wasser zu erkennen. Das Material ist so elastisch und bruchfest, dass es sich knicken lässt (Quelle: Advanced Materials / Universität Stuttgart).

rem Maße zu berücksichtigen. Ebenso muss weiter an der Wirtschaftlichkeit und Serientauglichkeit von Verfahren zur Herstellung keramischer und metallischer Nanokomposite gearbeitet werden.

3.5 Elektronik

Branchenentwicklung

Der Weltmarkt für Halbleiter konnte den Einbruch von 2008/2009 bereits im Jahr 2010 wieder aufholen und belief sich 2012 auf etwa 290 Mrd. \$. Bis 2017 wird ein Jahreswachstum von etwa 5 % auf ein Gesamtvolumen von 366 Mrd. \$. erwartet. Die weltweit größte Produktionskapazität weist mit einem Anteil von über 20 % an der Waferfertigung nach wie vor Japan auf. Deutschland kommt in diesem Bereich auf 2,7 %. Das stärkste Segmentwachstum entfällt auf Halbleiter für Kommunikationstechnologien, rückläufige Anteile verzeichnet der traditionelle Computerbereich. In Deutschland weisen Halbleiter für den Automobilbereich den stärksten Zuwachs auf.

Aufgrund des starken Gesamtmarktwachstums in Asien betrug der europäische Anteil am Weltmarkt im Jahr 2012 nur noch 11,4 % im Vergleich zu 12,5 % im Vorjahr. Der deutsche Anteil fiel von 4,8 % auf 4,3 %.^[77] In absoluten Zahlen behielt der deutsche Markt für Elektronik und IuK sein moderates jährliches Wachstum zwischen einem und zwei Prozent bei und belief sich 2012 auf 151 Mrd. €. Für 2013 werden gut 153 Mrd. € erwartet. Den Großteil nehmen Telekommunikation, Software und IT-Services ein, während die Elektronik mit IT-Hardware und Konsumelektronik gut 33 Mrd. € beiträgt.^[78] Der Industrieverband BITKOM erwartet für 2013 erstmals mehr als 900.000 Arbeitsplätze in der Branche, entsprechend einem Zuwachs von 12.000 Beschäftigten gegenüber dem Vorjahr. Stark wachsen wird auch der Markt für druckbare Elektronik und entsprechende Fertigungsverfahren in Rolle-zu-Rolle-Technik. Er soll sich von derzeit knapp 11 Mrd. \$ bis 2017 auf über 22 Mrd. \$ mehr als verdoppeln.^[79]

Im Elektronikbereich gehen die Miniaturisierung der Strukturen und die damit verbundene Erhöhung der Integrationsdichte unvermindert weiter. Grundlegende Komponenten wie Transistoren haben längst nanoskalige Dimensionen erreicht. Aktuelle Prozessoren

weisen Strukturgrößen von 35 nm und teilweise schon von 22 nm auf. Zudem richten sich umfangreiche F&E-Anstrengungen weltweit auf die Entwicklung neuer Elektronikkonzepte jenseits siliziumbasierter CMOS-Technologien. Grundlage dieser neuen Ansätze sind vielfach Nanomaterialien und Strukturen wie Quantenpunkte, Nanodrähte, Nanoröhren oder Graphen.

Nanotechnologie verbessert jedoch nicht nur integrierte Schaltkreise, sie eröffnet auch neue Potenziale in anderen Anwendungsbereichen der Elektronik. So werden zur Datenspeicherung neuartige, nanoskalige nicht-flüchtige Speicherstrukturen als Alternative zu RAM-, Flash- und Festplattenspeichern entwickelt. In der Displaytechnik eröffnet sie neue Möglichkeiten zur Herstellung transparenter, leitfähiger und flexibler, also biegsamer Displays. Dies erscheint wirtschaftlich attraktiv, da der globale Markt für Touchscreens von derzeit knapp 1 Mrd. \$ auf fast 5 Mrd. \$ im Jahr 2019 wachsen soll.^[80] Das BMBF fördert mit seinen Forschungsprojekten zahlreiche solcher nanobezogener Aktivitäten.

BMBF-Forschungsaktivitäten

F&E-Aktivitäten zu Aufbau und Fertigung von Chips und Halbleiterschaltkreisen fokussieren sich stark auf die CMOS-kompatible Herstellung von Strukturgrößen im 30 nm Bereich. Dabei sind Robustheit und vor allem Energieeffizienz der nanoelektronischen Strukturen und Materialsysteme sowie der Fertigungstechnologien wesentliche Zielstellungen. Mit noch kleineren Strukturen um 20 nm und darunter soll die Integrationsdichte weiter erhöht werden. Nanolithographische Verfahren auf der Basis von Projektionsoptiken für extremes UV-Licht werden hierzu entwickelt. Entscheidend ist die Weiterentwicklung der EUV-Lithographie, auf der Basis einer Lichtwellenlänge von unter 20 nm. Licht in diesem kurzwelligen Bereich ist jedoch schwierig zu erzeugen und zu handhaben.

Auch im Bereich der Datenspeicher spielt die Erhöhung der Speicherdichte eine zentrale Rolle. Erforscht werden hier Bit-Strukturen aus Quantenpunkten auf Basis von Verbindungshalbleitern.

Die Nutzung von Nanoeffekten und Nanostrukturen wird zudem durch die Nanosystemintegration adressiert. Hier werden mikro- und nano-elektrome-

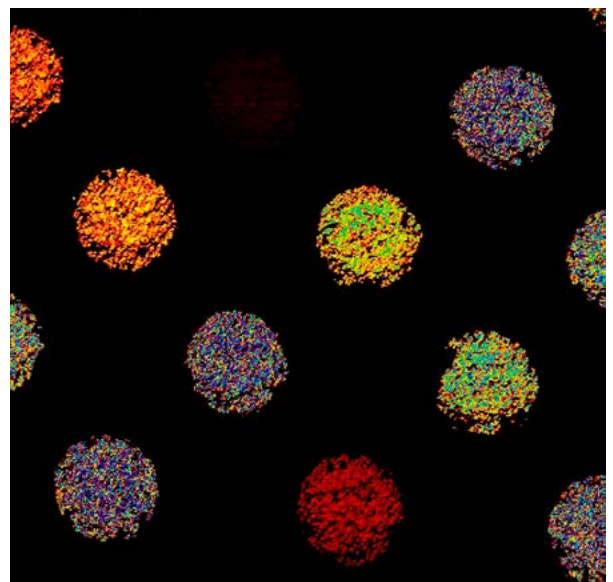
chanische Systeme (MEMS/NEMS), materialintegrierte Sensoren und nanostrukturierte Grenzflächen für eine zukünftige Elektronik entwickelt. Nanoelektronische Innovationen sollen insbesondere auch Mobilfunksysteme im Hinblick auf Anwendungen der Mensch-Technik-Interaktion zur Unterstützung älterer Menschen erweitern, einem Geschäftsfeld, dem aufgrund der alternden Gesellschaften in den Industriestaaten große ökonomische Potenziale zugeschrieben werden.



EUV-Beleuchtung (Quelle: Carl Zeiss SMT GmbH).

Neue nanoskalige Materialsysteme für Anwendungen in der Elektronik werden vielfach untersucht und sollen die mikroelektronische Kontaktierungs- und Verbindungstechnik optimieren, neue Isolationstechnologien ermöglichen oder die Effizienz leistungselektronischer Komponenten verbessern. Neben Verbindungshalbleitern und Supraleiter-Materialien liegt ein Schwerpunkt auf nanoskaligem Kohlenstoff, wie CNT oder Graphen. Sie werden für Anwendungen in der Nanoelektronik aber auch hinsichtlich neuer, hocheffizienter Elektronenquellen oder hochauflösender Elektrodenhalter beispielsweise für die medizinische Diagnostik erforscht. Nano-Kohlenstoff gilt zudem als aussichtsreiches Material für transparente, leitfähige Schichten, wie sie in zunehmendem Maße etwa für Touchscreen-Displays gebraucht werden. Insbesondere CNT-Strukturen könnten das in diesem Bereich umfangreich eingesetzte, aber auf dem knappen Rohstoff Indium basierende ITO ersetzen.

Zahlreiche Aktivitäten der BMBF-Forschungsförderung beziehen sich auf die Entwicklung von Materialsystemen und Strukturen für die organische Elektronik. Im Mittelpunkt stehen u. a. Drucktechnologien zur Herstellung von Schaltungen und Speicherelementen. Methoden der Nanostrukturierung und der Einsatz nanoskaliger Materialien sind häufige Voraussetzung für die präzise Funktionalität der elektronischen Komponenten.



Integration von Kohlenstoff-Nanoröhren (CNTs) in Kupfer-Damascene-Interconnects: Strom-Spannungs-Rasterkraftmikroskopie-aufnahmen an CNT-gefüllten vertikalen elektrischen Verbindungen (VIA) nach dem chemisch-mechanischen Polieren – verschiedene Farben verkörpern unterschiedliche Ströme in den einzelnen CNT (Quelle: H. Fiedler in Kooperation mit M. Toader/Prof. M. Hietschold, Institut für Physik, TU Chemnitz).



Transparente und leitfähige PolyTC®-Folie in einer Maschine von PolyIC (Quelle: PolyIC GmbH & Co. KG).

Anwendungsperspektiven für eine zukünftige Quanteninformationstechnologie zeichnen sich aus heutiger Sicht erst längerfristig ab. Dennoch unterstützt das BMBF auch hier eine Reihe technologischer Entwicklungen. Auch im Bereich der Quantenkommunikation spielen nanoskalige Komponenten eine wichtige Rolle. So basieren verschiedene F&E-Ansätze auf nanoskaligen Oberflächenstrukturen, Halbleiter-Quantenpunkten oder auf integrierten nano-elektromechanischen Systemen zur Speicherung von

Quantenbits als kleinsten Informationseinheiten. Weitere Forschungsansätze sehen die Darstellung und Verarbeitung solcher Quantenbits auf Basis gespeicherter Ionen oder ultrapräzise positionierter Farbzentren in Diamant vor.

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Chip- und Halbleiterdesign und Fertigung	Forschung für eine zukünftige CMOS Technologie zur Herstellung von IC mit 32/28 nm-Strukturen	01M3089A-B, 01M3089E-F
	Entwurf von hocheffizienten Hochfrequenzschaltungen in 28nm CMOS Technologie	13N11484-86
	Energieeffiziente Nanosystemintegration und Entwicklung von Fertigungstechnologien zur Erzeugung nanoskaliger reaktiver Materialsysteme (RMS) als reaktive Funktionsschicht	13N11231-34
	Entwurf von dreidimensionalen, kompakten und energieeffizienten Nanoelektronik-Systemen	01M3090A-F
	Entwurf robuster nanoelektronischer Systeme	01M3087A-F
	Simulation neuer Halbleiterstrukturen in der Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik	03MS613A-G
	Entwicklung innovativer nano-elektronischer Komponenten und Systeme für Mensch-Technik-Interaktionen auf Mobilfunkplattformen	16SV5607, 16SV4056-63
	Modellierung von Schottky Barrieren basierten Vielfachgatter-Feldemissionstransistoren mit Strukturgrößen unter 30 nm	1779X09
Datenspeicher	Entwicklung von hochfunktionalen Speichern auf Basis von selbstorganisierten Quantenpunkten aus GaSb-, InAs- und GaP- Verbindungshalbleitern	16V0196
Elektroden und Feldemitter	Entwicklung integrierter hochauflösender nanomodifizierter Multi-Elektroden-Gitter auf Basis von nanoporösem Iridiumoxid und eines CNT-„Nanorasens“	16SV5322K, 16SV5323
	Entwicklung von CNT- und Graphen-Systemen für hocheffiziente Feldemitter	03X0201A-C
Isolationstechnologien	Optimierung spezieller Isolierstoffe für elektronische Baugruppen mit nanoskalig gefüllten Beschichtungsstoffen und Härtung durch Mikrowellentechnologie	03X0106A-F
Kontaktierungen und Verbindungen	Entwicklung und Einsatz nanobeschichteter Cu- und Ni-Drähte für die mikroelektronische Verbindungstechnik	03X0117A-F
	Entwicklung neuartiger Josephsonkontakte auf Basis von Supraleiter-Isolator-Supraleiter-Kontakten mit variablem quantenmechanischen Durchlaßvermögen	01DK12026
Leistungselektronik	Leistungswandler in GaN-Technologie zur Erschließung ungenutzter Energiepotenziale	16N10906-13
Lithographie	Nanolithographie – Entwicklung von EUV-Projektionsoptiken für 14 nm und 22 nm Strukturen	13N12256-60, 13N10567-72, 13N11303, 13N11314
Neue elektronische Materialien und Strukturen	Erforschung neuer Materialien (Graphen, topologische Isolatoren, Ti-Supraleiter-Nanostrukturen) und ihrer Anwendungen in der Nanoelektronik	01DJ12029
	Nanosystemintegration; Entwicklung nanoskaliger Materialsysteme, NEMS/MEMS-Systemintegrationen, materialintegrierter Sensoriken und nanostrukturierter Grenzflächen zur Nutzung von Nanoeffekten in der zukünftigen Elektronik	03IS2011A-I, 03FO3292

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Organische und druckbare Elektronik	Gedruckte organische Schaltungen und Speicher, Entwicklung von Verfahrenstechniken und Herstellung funktionaler Präzisionsschichten von elektronischen Funktionsmaterialien mit Methoden der Nanostrukturierung	13N10204-14, 13N11384, 13N12083-91, 13N10296-98, 13N12126-28, 13N11901-04
	Elektrisch leitfähige Druckfarben auf der Basis von Nanopartikeln für Massendruckverfahren	13N10653-55
	Morphologiekontrolle für effiziente und stabile Bauelemente in der organischen Elektronik	13N11701-06
Quantenkommunikation	Entwicklung integrierter Systeme von supraleitenden Quantenbits und nanomechanischen Resonatoren	01DK12019
	Erforschung des topologischen Quantencomputings an nanoskaligen Oberflächenstrukturen	01BM0900
	Entwicklung neuer Methoden der Quanteninformationsverarbeitung auf Basis quantenmechanischer Wechselwirkungen von gespeicherten Ionen in hochangeregten (Rydberg) Zuständen	01BQ1101, 01BQ1102
	Erforschung eines Quantenkommunikationsnetzwerkes auf Basis von Halbleiterquantenpunkten	01BQ1103
	Nutzung nanoskaliger Strukturen – u. a. Halbleiter-Quantenpunkten – für die Entwicklung von Quanteninformationskomponenten	01BQ1030-42, 01BQ1000-14, 01BQ1110, 01BQ1107, 01BQ1108
	Entwicklung eines nanoelektromechanischen Sensors zur Integration in ein Quanten-Interferometer oder ein künstliches Atom (supraleitendes Fluss-Quantenbit)	01DJ12013
	Nanometergenaue Positionierung von Farbzentren in Diamant zur Nutzung als Komponenten für einen skalierbaren Quantenprozessor	01BQ1104, 01BQ1105
Transparente leitfähige Schichten	Entwicklung von leitfähigen transparenten und flexiblen CNT-Komposit-Materialien	03X0200A-B
	Charakterisierung von in ZnO Volumenmaterial und ZnO Nanostrukturen eingebrachten Defekten zur Optimierung von Transparenz und Leitfähigkeit	01DG12036, 01DG12037
	Transparente und elektrisch leitfähige Schichten mit einwandigen CNT-Hybriden	03X0202A-H

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Nanoelektronische Aspekte werden mittlerweile über die gesamte Breite des Elektronik-Bereiches adressiert, und die Mikroelektronik wandelt sich immer mehr zur Nanoelektronik. Auch im Europäischen Forschungsrahmenprogramm FP 7 wurden und werden zahlreiche Entwicklungen in mehr als 70 größeren Projekten gefördert, von denen die größten ein Fördervolumen von über 10 Mio. € aufweisen. Im Mittelpunkt der F&E-Aktivitäten stehen:

- **Die Weiterentwicklung der CMOS-Technologie zu noch kleineren Strukturgrößen von 22 Nanometern und darunter sowie die weitere Erhöhung der Integrationsdichte.**^[81]
- **Die Entwicklung neuer elektronischer Konzepte unter dem Schlagwort „beyond CMOS“.** Hier werden insbesondere folgende Ansätze erforscht:
 - **Nano-Kohlenstoff-basierte Konzepte** für mikro- bzw. nanoelektronische Komponenten wie Feldeffekttransistoren, Kondensatoren, Leitungsverbindungen etc. Eine entscheidende Rolle spielen hier die elektronischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhren und von Graphen^[82]
 - **Quanteninformationskonzepte.** Gearbeitet wird an Nanomaterial-basierten Möglichkeiten der Herstellung und Handhabung von Quantenbit-Strukturen^[83]
 - **Spintronik-Konzepte**, die nicht die elektrische

Ladung, sondern den Drehimpuls definierter molekularer, atomarer oder elektronischer Strukturen zur Informationsverarbeitung nutzen^[84]

- **Die Optimierung und Weiterentwicklung organischer und druckbarer Elektronik. Im Mittelpunkt stehen deren großtechnische Fertigung sowie die Realisierung integrierter großflächiger Schaltkreise.**^[85]

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

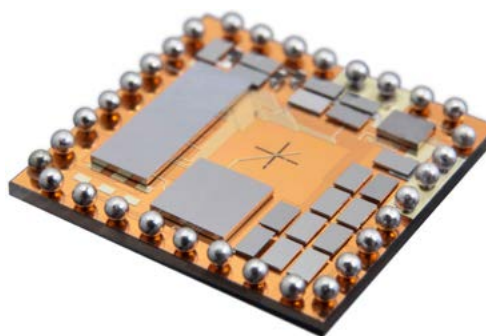
Politisch administrative Rahmenbedingungen betreffen Nanotechnologieentwicklungen in der Elektronik beispielsweise im Hinblick auf die Richtlinie über die Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS). So wurde im Jahr 2010 seitens des europäischen Parlamentes im Zuge der Neuverhandlung der RoHS-Richtlinie ein Entschluss gefasst, um die Liste verbotener Substanzen auch auf Kohlenstoffnanoröhren und Nanosilber zu erweitern. Dieser Verstoß wurde in der Neufassung der RoHS-Richtlinie vom 8. Juni 2011 allerdings nicht berücksichtigt.^[86] Auf der anderen Seite liefert die Richtlinie auch Impulse für nanotechnologische Entwicklungen, um Alternativen für verbotene Stoffe wie bleihaltige Lotpasten oder halogenhaltige Flammschutzmittel zu etablieren. Im Bereich der Informationstechnologien stehen vor allem Datenschutzaspekte und die informationelle Selbstbestimmung im Vordergrund. Hier besteht die Befürchtung, dass mit der schnell fortschreitenden Digitalisierung Persönlichkeitsrechte Einzelner durch staatliche Stellen in Zukunft immer weniger adäquat geschützt werden können.

Beide Bereiche, IuK und Elektronik, sind laut Branchenverbandsangaben in erheblichem Umfang von einem Fachkräftemangel betroffen, der sich in Zukunft noch weiter verschärfen wird. So droht sich der derzeitige Bedarf von 43.000 IT-Fachkräften zu einem Wachstumshemmnis zu entwickeln.

Gastbeitrag: Nanoelektronik & Smart Systems – eine Chance für Europa

Prof. Dr. Hubert Lakner, Joachim Pelka, Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik

Weltweit vollzieht sich gerade ein Wandel zur sog. »Wissensbasierten Gesellschaft«. Diese Gesellschaftsform ist durch Erzeugung und Nutzung forschungsintensiver Schlüsseltechnologien gekennzeichnet und wird vor allem durch einen wachsenden Bedarf an Elektronik charakterisiert sein. »Mikro- bzw. Nanoelektronik« und die damit eng verbundene »Mikrosystemtechnik« werden dadurch zu dominierenden Schlüsseltechnologien, ohne die in Wirtschaft und Gesellschaft (fast) nichts mehr geht.



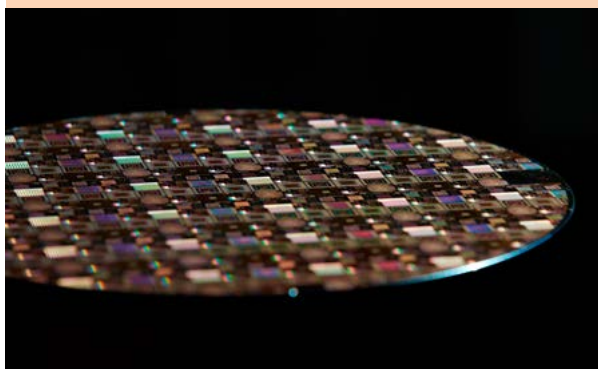
Heterointegration von verschiedenen Nanoelektronikkomponenten und Sensoren zu Smart Systems: Wafer Level System-In-Package (SiP) zur Nahfeld-Positionsbestimmung von Objekten (Foto: Fraunhofer IZM)

»Smart Systems« heißt das Schlagwort, mit dem heute die allgegenwärtige Elektronik, die schon längst alle Bereiche der Gesellschaft durchdrungen hat, charakterisiert wird. Die klassische IC Technologie für digitale Signalverarbeitung wird durch Sensoren und Aktuatoren, durch Hochfrequenz- und Leistungselektronik ergänzt. Auf Waferebene integriert, verschmelzen elektronische und mikrosystemtechnische Komponenten zu kompletten, hochgradig miniaturisierten Systemen, den »Smart Systems«.

Diese »Smart Systems« finden wir heute in allen Bereichen des täglichen Lebens. Sie sind nicht nur zu einem täglichen Begleiter geworden, sondern sie entwickeln sich zunehmend zu einem wichtigen Werkzeug, um auch den großen gesellschaftlichen

Herausforderungen begegnen zu können. Sie helfen Energie und andere Ressourcen zu sparen, Waren und Verkehrsströme zu lenken; sie erleichtern den Arbeitsalltag und unterstützen Alte und Kranke. Auch machen sie die Umwelt sicherer. Egal, wofür sie eingesetzt werden, sie bestehen aus hochkomplexer Nanoelektronik, Sensoren und Aktuatoren, Energieversorgung, Kommunikationsschnittstellen und Software.

Nachdem die digitale IC-Industrie weitgehend in den asiatischen Raum abgewandert ist, liegt Europas Stärke in der Beherrschung dieser komplexen Systemtechnik und in der Entwicklung vollständiger Systemlösungen. Um dieses System-Know-how nicht aus der Hand geben zu müssen, ist es aber erforderlich, sowohl auf More-Moore-Technologien als auch auf More-than-Moore-Technologien zugreifen zu können.



Silizium Verbindungstechnik (Dicke 100µm) mit Cu-gefüllten Through-Silicon-Vias (TSV) und integrierten passiven Komponenten als Basis für ein 3D System-in-Package (Quelle: Fraunhofer IZM-ASSID).

More-Moore beschreibt dabei die Skalierung in der klassischen digitalen IC-Technologie, More-than-Moore dagegen die funktionelle Diversifizierung und Integration nicht digitaler Komponenten. Die bisher gern propagierte Trennung dieser beiden Technologiezweige muss als überholt angesehen werden, da fortgeschrittene »Smart Systems« längst eine Kombination von Miniaturisierung und Funktionalität darstellen.

Als Basis für einen nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg ist somit auch in Europa bzw. Deutschland eine langfristig gesicherte, breite Technologiebasis erforderlich, die eine fortgeschrittene Nanoelektronik mit einschließt. Die langfristige Entwicklung im Hightech-

nologiebereich darf somit nicht zugunsten der kurzfristigen, bedarfsgesteuerten Anwendungsorientierung vernachlässigt werden. Einer solchen Entwicklung kann realistisch nur auf europäischer Ebene in direkter Kooperation zwischen den großen europäischen »Research and Technology Organizations« (RTOs) und der europäischen Halbleiterindustrie Rechnung getragen werden.

Nach einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum um 5 % seit 2000 hat die europäische Elektronikindustrie ungeachtet aller Abwanderungstendenzen 200 000 direkt Beschäftigte, bildet indirekt die Grundlage für eine Million Arbeitsplätze und benötigt weitere qualifizierte Fachkräfte. Mindestens 10 % des BIP hängen von Elektronikprodukten und -diensten ab. Diese wirtschaftliche Bedeutung ist von der Vizepräsidentin der Europäischen Kommission Neelie Kroes klar erkannt worden: »Ich möchte, dass sich unsere Chip-Produktion auf ~20 % der Weltproduktion verdoppelt. Ich möchte, dass Europa mehr Chips in Europa produziert als die Vereinigten Staaten im eigenen Land.«

Eine europäische Nanoelektronik-Strategie sollte sich daher auf drei entscheidende Säulen stützen:

- **Höhere und besser koordinierte Investitionen in R&D** – Maximierung der Wirkung durch verstärkte grenzübergreifende Zusammenarbeit (Invest-Aufteilung 70 % EU-Staaten, 30 % EU)
- **Ausbau der drei europäischen Weltklasse-Elektronik-Cluster** Dresden (DE), Eindhoven (NL) / Leuven (BE) & Grenoble (FR)
- **Fokus auf billigere** (450-mm-Si-Wafern), **schnellere** („More Moore“) und **intelligendere Chips** („More than Moore“)

Daneben sind Akzeptanz und Toleranz durch die Gesellschaft grundlegende Voraussetzungen dafür, dass sich technische Visionen mit entsprechendem Markterfolg entwickeln können. Veränderung wird zum »Normalzustand« werden, technische Entwicklungen müssen daher den Menschen in den Mittelpunkt stellen. Dazu ist neben den technischen Entwicklungen auch Fachausbildung sowie konsolidierte Information für die Öffentlichkeit nötig, denn inzwischen leben wir in einem Umfeld, für das gilt: Mikroelektronik ist nicht alles – aber ohne Mikroelektronik wäre (fast) alles nichts.

3.6 Optik/Photonik

Branchenentwicklung

Die Photonik bietet zahlreiche Potenziale für Herausforderungen der Zukunft. Optische Technologien kommen beispielsweise im IuK-Sektor, aber zunehmend auch in modernen industriellen Fertigungstechniken oder in den Bereichen Energieerzeugung, Energiespeicherung und Energieeffizienz zum Tragen. Zudem steigt ihre Bedeutung in Gesundheit, Umweltschutz und Sicherheit. Die Photonik ist für zahlreiche Anwendungsbereiche von großer Bedeutung entlang weiter Teile der Wertschöpfung. Experten vermuten, dass 20-30 Prozent der europäischen Wirtschaft und etwa zehn Prozent der europäischen Beschäftigten aufgrund der Hebelwirkung dieser Schlüsseltechnologie von der Photonikbranche abhängen.^[87]

Auf die deutsche Photonikindustrie entfallen etwa acht Prozent des globalen und etwa 40 % des europäischen Photonikmarktes. Mit über zehn Prozent Weltmarktanteil lagen die Kernbereiche Produktionstechnik, Bildverarbeitung und Messtechnik, Optische Komponenten und Systeme sowie Medizintechnik und Life Science noch deutlich über diesem Durchschnitt.^[88] Die Branche verzeichnete auch in den vergangenen zwei Jahren eine erfolgreiche ökonomische Entwicklung. So stieg die Inlandsproduktion im Jahr 2012 auf knapp 28 Mrd. €. ^[89] Gegenüber dem Wert von 16,3 Mrd. €, der 2005 erreicht wurde, bedeutet dies ein jährliches Wachstum von etwa acht Prozent. Experten erwarten bis 2020 eine weitere Produktionssteigerung auf etwa 44 Mrd. €, was einem leicht verlangsamt jährlichen Zuwachs von 5,6 Prozent entspricht.

Die Exportquote der produzierten Güter lag 2012 bei 66 Prozent und kennzeichnet die Photonikbranche weiterhin als stark außenhandelsorientierten Wirtschaftszweig. Einschließlich der Zulieferer lag die Zahl der Beschäftigten 2011 bei 134.000 Mitarbeitern. Dies bedeutet ein Plus von 30.000 Arbeitsplätzen gegenüber 2005. Bis 2020 soll die Beschäftigtenzahl auf rund 165.000 steigen.^[90]

Nanotechnologische Innovationen werden im Photonik- und Optiksektor vielfältig angewandt. So spielen nanoskalige Strukturen wie z. B. Quantenpunkte, optische Beschichtungen, plasmonische Oberflä-

chenstrukturen etc. für zahlreiche Anwendungen eine entscheidende Rolle. Dennoch ist der nanotechnologische Anteil an photonisch-optischen Produkten oft schwierig zu ermitteln. Nach einer Studie des Marktforschungsunternehmens BCC lag der globale Umsatz nanophotonischer Komponenten wie nano-basierter Leuchtdioden, organischer Leuchtdioden, holografischer Speicher, optischer Schaltungselemente, photonischer Kristalle oder plasmonischer Bauelemente im Jahr 2011 bei 2,5 Mrd. \$ und soll bis 2016 auf knapp 11 Mrd. \$ ansteigen. Dies entspricht einer erwarteten jährlichen Steigerung von über 30 %. Der Hauptanteil dieses Marktes entfällt dabei mit 97 % auf nanophotonische Leuchtdioden.^[91] Diese Wachstumsraten, die erheblich über denen der Gesamtbranche liegen, können als Indiz für die weiterhin steigende Bedeutung der Nanotechnologie innerhalb der optischen Technologien gewertet werden.



Nanokristalle aus Silizium ermöglichen die Herstellung Siliziumbasierter Leuchtdioden: Durch Änderung der Größe der Silizium-Nanokristalle lässt sich die Farbe des ausgesandten Lichts variieren. (Quelle: F. Maier-Flaig, KIT/LTI).

BMBF-Forschungsaktivitäten

Im Beleuchtungssektor fokussieren die Forschungsaktivitäten auf die Entwicklung organischer Leuchtdioden (OLED). OLED werden hinsichtlich neuer Materialsysteme, Optiken, Strukturen und massenproduktionsstauglicher Herstellungsverfahren in Drucktechniken und Rolle-zu-Rolle-Fertigung erforscht. Die Herstellung funktionaler Schichten im Nanometerbereich sowie nanoskaliger Strukturierungen sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Bauteile. Dies gilt auch für Leuchtdioden auf anorganischer Halbleiterbasis (LED). Auch sie werden hinsichtlich

Zusammensetzung und Fertigung für Beleuchtungsanwendungen optimiert. Zusätzlich werden effiziente, im UV-Bereich emittierende LEDs entwickelt, die dazu beitragen, Fertigungsprozesse in der organischen Elektronik zu optimieren.

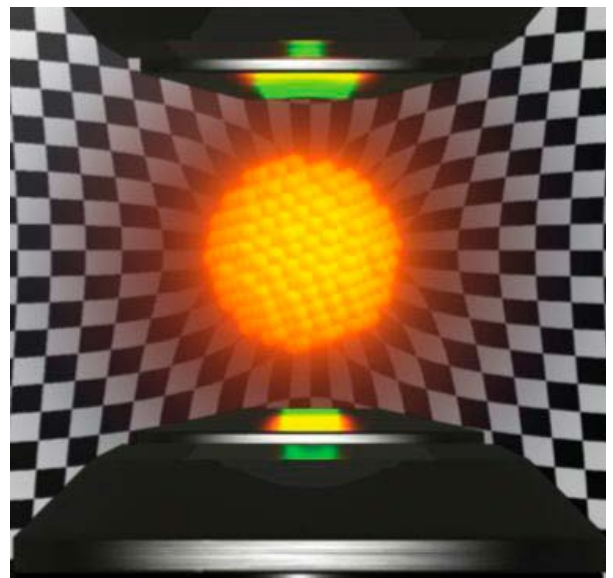


OLED-Pendelleuchte für die Allgemeinbeleuchtung (Quelle: Novaled AG).

Im Mittelpunkt der Entwicklungen in der Optoelektronik stehen Bauelemente für die optische Daten- und Telekommunikation. Hierbei stehen sowohl die Strahlführung und Strahlpräparation durch Fasern, Freiformoptiken, abstimmbare optische Filter, Strahlableiter und Wellenleiter als auch die Lichterzeugung und Modulation aus elektronischen Signalen, z. B. durch optimierte Oberflächenemitter (VCSEL) sowie die Integration photonischer Komponenten in Siliziumstrukturen im F&E-Fokus. Erforscht werden in diesem Kontext nanoskalige Kristall-, Komposit- und Schichtsysteme. Neben den VCSEL werden im Laserbereich schmalbandige Laserdioden für die Spektroskopie und fasergekoppelte Diodenlaser für die Industrie entwickelt. Erforscht werden auch neuartige photonische Materialien wie etwa Metamaterialoptiken für den THz-Bereich, plasmonische Strukturen, photonische Nanomaterialien für die Lithographie, Optokeramiken, nanostrukturierte Diamant- und Kohlenstoffoptiken oder die Entwicklung von Graphenlagen als transparente leitfähige Beschichtungen. In der optischen Analytik stehen die Vermessung optischer Oberflächen und die Qualitätskontrolle von Halbleiter-Nanostrukturen im Vordergrund.



Im vom BMBF geförderten Kompetenznetzwerk für Nanosystemintegration „nanett“ werden empfindliche optische Sensoren entwickelt, die anzeigen können, welche mechanischen Belastungen auf Materialien wirken. Das Bild zeigt einen Probekörper, der mit winzigen, d.h. nanometer-großen Halbleiter-Partikeln beschichtet ist. Wenn die winzigen Halbleiter-Partikel mit UV-Licht angeregt werden, beginnen sie zu fluoreszieren. Welche Farbe das ausgesendete Licht hat, hängt von der Größe der Partikel ab. Wirkt an manchen Stellen eine mechanische Spannung auf das Material, stoppt diese Fluoreszenz. (Quelle: Fraunhofer ENAS, Foto Hr. Thieme).



Impression zur photothermischen Mikroskopie von Goldnanopartikeln. Die photothermische Mikroskopie ermöglicht es, Goldnanopartikel unterhalb der optischen Auflösungsgrenze sichtbar zu machen. Die Nanopartikel werden mit einem Laser leicht aufgeheizt und die mit dem umgebenden Material entstehenden Wechselwirkungen können mit Hilfe eines zweiten Lasers detektiert werden. Anwendungspotenziale ergeben sich für die optische Datenverarbeitung bis hin zur Tumorthherapie (Quelle: Uni Leipzig, Abbildung: Markus Selmke).

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Allgemeinbeleuchtung und neue Lichtquellen für verschiedene Anwendungen	Erforschung und Weiterentwicklung von OLED-Anwendungen (Materialien, Optiken und äußere Strukturen) und massenproduktionsgeeigneten OLED-Materialsystemen und Produktionstechniken im Beleuchtungsbereich für Allgemein- und Kfz-Beleuchtung unter Nutzung auch von Nanostrukturen und nanoskaliger Materialsysteme	13N10526-36, 13N10610-12, 13N10740-44, 13N11235-37
	Erforschung und Charakterisierung neuer Materialsysteme für lösungsbasierte organische Leuchtdioden	13N10614-22, 13N11452
	Entwicklung druckbarer organischer Leuchtdioden (OLED) auf Basis funktionaler Schichten mit Dicken unter 100 nm für Beleuchtungs- und PV-Anwendungen	13N10758-62, 13N12279-81, 13N12309
	Rolle-zu-Rolle Fertigung hocheffizienter organischer Bauelemente, vor allem organischer Leuchtdioden und Solarzellen, auf flexiblen Substraten u. a. mittels Nanostrukturierungs- und Nanobeschichtungsmethoden	13N11053-63
	Entwicklung effizienter, kostengünstiger InGaN-LED auf Silizium-Substraten für die Allgemeinbeleuchtung unter Nutzung nanoskaliger Strukturen und Strukturierungsverfahren und Entwicklung automatisierter Prozessketten für die Fertigung	13N10251-55, 13N10555-56, 13N10558-59, 02PK2188-91
	Entwicklung skalierbarer Hochleistungs UV-LED Module für die Produktion und Versiegelung von organischer und gedruckter Elektronik mit flexiblen Schutzlacken	03WKBT01A-D, 03WKBT02A-D, 03WKBT04A-D
	Realisierung hocheffizienter UV-LEDs im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 350 nm und UV-Photodetektoren mit Mikro- und Nanobeschichtungsprozessen sowie Entwicklung von Materialsystemen und Prozessanalytiken hierfür	03WKBT05A-B, 03WKBT06A-B, 03WKBT08A-C
Laser	Entwicklung fasergekoppelter hochbrillanter Diodenlaser bis zur Erreichung von Industriestandards u. a. durch Nanostrukturierungen und Optimierung der Quantentopf-Strukturen	03IPT613A-D
	Entwicklung schmalbandig emittierender Laserdioden bei 435,9 nm für spektroskopische Anwendungen	03WKBT03A-C
Neuartige photonische Materialien	Entwicklung photonischer Nanomaterialien und Nanostrukturen für optische Anwendungen	03IS2101A-F
	Entwicklung photonischer Nanomaterialien für die Lithographie	03IS2101B, 03IS2101E
	Entwicklung optokeramischer Materialien und Komponenten aus nanoskaligen Pulverwerkstoffen für lichttechnische und optosensorische Anwendungen	13N10802-05
	Neuartige elektronisch und optisch abstimmbare Metamaterialoptiken für die THz-Technologie	13N11905
	Anwendung der Nanostrukturierung zur Herstellung plasmonischer Strukturen	01DQ12034
	Design komplexer mikro- und nanostrukturierter photonischer Bauelemente basierend auf Diamant- und Kohlenstoffoptiken und Entwicklung von Fertigungstechnologien	03Z1HN31, 03Z1HN32
	Entwicklung großflächiger elektrisch leitfähiger Graphenoid-Lagen als flexible optisch transparente Beschichtungsmaterialien	03X0108A-C
Optoelektronik, Silizium-Photonik, photonische Bauelemente	Monolithisch-integrierbare Silizium-basierte photonische Bauelemente für Daten- und Telekommunikation	01BL080, 01BL1009, 01BL1010
	Organische-anorganische Nanokomposit- und Multischichtsysteme für fortgeschrittene Anwendungen in der Optoelektronik	01DK12024
	Entwicklung und Herstellung von GaN-Kristallen als energieeffiziente Materialien für den Telekommunikationssektor unter Einsatz von Nanostrukturierung und Nanoanalytik	01BM1200-05
	Entwicklung nanostrukturierter Oberflächen für steuerbare optische Komponenten und Mikrosysteme (abstimmbare Filter, variable Abbildungselemente, Strahlblenker etc.) mit neuen Funktionalitäten	16SV5372-77

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
	Weiterentwicklung langwelliger Oberflächenemitter (VCSEL) mit optimierter optischer Leistung, neuen Wellenlängen und reduzierten Kosten unter Einsatz von Nanobeschichtungsverfahren	16N10447, 16N10448
	Entwicklung Seltenerd-dotierter Fasern für Hochleistungsanwendungen	01DQ12066
	Untersuchung der optoelektronischen Eigenschaften von ZnS Nanostrukturen	01DO12033
	Entwicklung ultrapräziser Silizium Optiken und optischer Bauelemente auf bearbeitbaren Siliziumschichten mit Strukturgrößen und Rauheiten im nanoskalierten Bereich	03WKP11A-D
	Entwicklung präziser Freiformoptiken aus Glas und neuartigen Werkstoffen bis in den Schichtdickenbereich um 100 nm für opto-elektronische Anwendungen oder zur Erhöhung der Strahlqualität in VCSEL-Hochleistungslasern	13N10823-28, 13N10837-42, 13N10849-52, 17098A10-C10
Optische Beschichtungen	Farbneutrale Entspiegelungstechniken mit organischen Nanostrukturen	13N12155-60
	Erforschung neuartiger Nanokomposit-Werkstoffe für Kontaktlinsen und nanotechnologisches Material-Design zur Verbesserung der Verträglichkeit und des Tragekomforts	13N10756, 13N10757
	Erzeugung verlustarmer hochbrechender Oxidschichten für die Präzisionsoptik	13N12124, 13N12125
Optische Analytik und Sensorik	Terahertz Laser-Spektroskopie von Halbleiter-Nanostrukturen	01DJ12001
	Metallorganische Gasphasenabscheidung und Charakterisierung von InGaN Schichten für quantitative Analytik	03WKBT06C
	Entwicklung multiskaliger Messtechniken für optische Freiformen und Detektion von Nanostrukturen, -defekten und -rauheiten an optischen Oberflächen mit unterschiedlichen Geometrien	13N10853-59, 13N11120

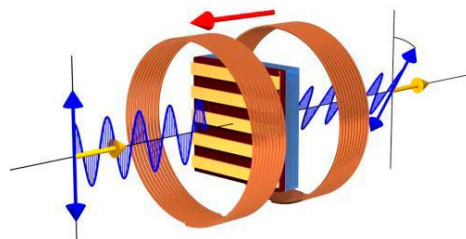
Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Photonik ist ein Wachstumsmarkt und das weltweite Forschungsengagement ist umfangreich. Auf europäischer Ebene werden zahlreiche Forschungsprojekte im Bereich Optik/Photonik gefördert. Die größten erreichen Fördervolumina von 3 bis über 10 Mio. €. Sie befassen sich mit

- portablen Niedrig-Preis-Lasern auf Quantenpunkt-Basis,^[92]
- abstimmbaren Mikrolinsensystemen nach natürlichem Vorbild,^[93]
- nano-strukturierten Halbleitern für Beleuchtungszwecke,^[94]
- Massenfertigungsverfahren für licht-emittierende Komponenten,^[95]
- der Entwicklung optisch anwendbarer Metamaterialien,^[96]
- der Entwicklung nicht beugungslimitierter optischer Verfahren für die Datenspeicherung,^[97]
- der Entwicklung neuer opto-elektronischer Komponenten für die Telekommunikation.^[98]

Weitere Forschungsaktivitäten auf nationaler und europäischer Ebene untersuchen u. a. neuartige photonische Materialien, plasmonische Strukturen oder quantenoptische Systeme für die Quanteninformatonsverarbeitung.



Forscher der Universität Stuttgart haben eine neuartige Nanostruktur aus Gold entwickelt, mit denen sich die Polarisationsrichtung von Licht drehen lässt (Faraday-Effekt). Die Abbildung zeigt Aufbau und Geometrie des Dünnschicht-Faradayrotators. Die Magnetfeldspulen sind um die Probe herum angeordnet. Der rote Pfeil stellt das Magnetfeld dar. Erkennbar sind Gold-Nanodrähte in Gelb und die magneto-optische Dünnschicht in Rot. Die elektromagnetische Lichtwelle ist in blau gezeigt. (Quelle: Universität Stuttgart).

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die deutsche Photonikbranche zeigt sich im internationalen Wettbewerb gut aufgestellt. Dies ist nicht zuletzt auf langjährige, kontinuierliche Innovationsanstrengungen zurückzuführen. Die F&E-Quote der Branche liegt durchschnittlich mit neun Prozent auf einem anhaltend hohen Niveau. Gefährdungen werden punktuell in administrativen Regelungen des europäischen Umweltrechts gesehen. So verbietet die Richtlinie über die Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS) die Verwendung von u. a. Blei und Cadmium. Hiervon betroffen ist auch optisches Glas, das diese Schwermetalle für bestimmte funktionale Eigenschaften enthalten kann. Zudem fordert die europäische Chemikalienrichtlinie REACH für Unternehmen umfangreiche Informationsbeschaffung und -weitergabe bezüglich der in Produkten enthaltenen Stoffe. Der damit für die Photonikbranche verbundene administrative Aufwand wird als sehr hoch eingeschätzt.^[99]

3.7 Energie

Branchenentwicklung

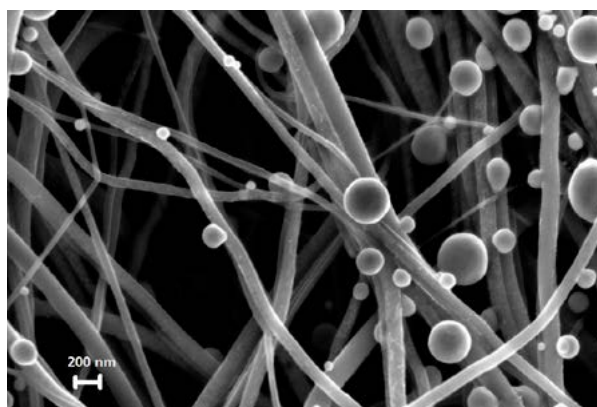
Der Energiesektor in Deutschland ist geprägt durch die Energiewende, die eine wachsende Versorgung aus regenerativen Energiequellen vorsieht. So konnten 2012 bereits 11,6 % des Primärenergieverbrauchs von 3790 TWh in Deutschland aus erneuerbaren Energiequellen bestritten werden.^[100] Der Anteil regenerativer Energien an der Brutto-Stromerzeugung stieg 2012 auf 23 Prozent (2010: 17 %; 2011: 20 %) und erreichte 135 Mrd. Kilowattstunden. Damit setzte sich der kontinuierliche Wachstumstrend seit Beginn des Jahrhunderts weiter fort und folgt dem Energiekonzept der Bundesregierung, das bis 2020 einen Anteil von 35 Prozent und bis 2030 sogar 50 Prozent vorsieht. Der Großteil der regenerativ erzeugten Energie wird durch das EEG gefördert. Die EEG-Auszahlungen werden sich 2013 auf vermutlich 19 Mrd. € erhöhen (2011: etwa 17 Mrd. €; 2012: etwa 18 Mrd. €).^[101] Die Zahl der im Bereich erneuerbarer Energien beschäftigten Personen in Deutschland ist zwischen 2004 und 2012 um 135 Prozent auf etwa 378.000 Personen angestiegen. Gleichwohl war zwischen 2011 und 2012 ein leichter Rückgang um etwa 3.500 Beschäftigte zu verzeichnen, der wesentlich auf die derzeitige Krise der Solarwirtschaft

zurückzuführen ist. Dort ging die Beschäftigtenzahl im Vergleich zum Vorjahr um 20 Prozent zurück, während sie bei Windenergie (plus 17 %) zulegte und in anderen Bereichen wie Biomasse, Geothermie, Wasserkraft, Forschung und Verwaltung eher stagnierte.^[102]

Nanotechnologische Innovationen sind in nahezu jedem Bereich des Energiesektors zu finden und tragen zur Energieeffizienzsteigerung sowie zu verbesserter Energiewandlung, -speicherung und -übertragung bei. Nanotechnologie bietet als Schlüssel- und Querschnittstechnologie vielfältige Optimierungspotenziale, um regenerativen Energien zum Durchbruch zu verhelfen. Im Energiebereich sind Nanotechnologien vor allem bei Solarzellen, elektrochemischen Energiespeichern, Brennstoffzellen, Thermoelektrika und energieeffizienten Werkstoffen relevant.

BMBF-Forschungsaktivitäten

Einen wesentlichen Förderschwerpunkt des BMBF bilden elektrochemische Energiespeicher. Adressiert werden insbesondere Lithium-Ionen-Batterien und deren Optimierung durch nanoskalige Materialien wie Graphen oder neuartige Nanokomposite für Elektroden und andere Zellkomponenten.



Zinnkohlenstoffnanofasern aus dem Projekt KoLiWiIn. In dem vom BMBF geförderten Projekt wurden neue Material- und Technologieansätze der Projektpartner für Lithiumionenbatterien am Fraunhofer ISC evaluiert (Quelle: Hanne Andersen, Fraunhofer ISC).

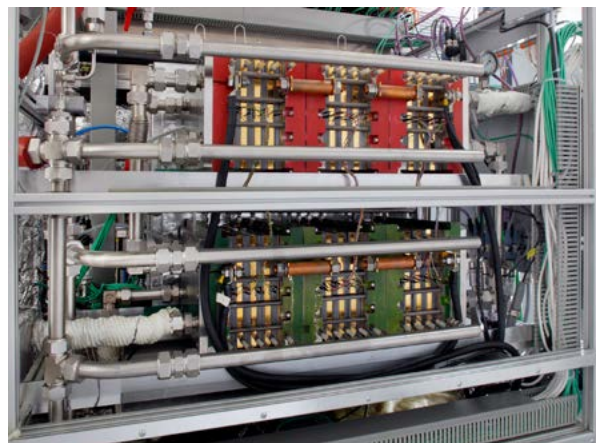
Höhere Energiedichten sollen durch sog. „Hochvoltsysteme“ mit Zellspannungen bis 5 Volt erreicht werden. Ein weiterer Fokus liegt auf der Betriebssicherheit, für die vor allem sichere Elektrolyt- und

Membransysteme entscheidend sind. Jenseits konventioneller Li-Ionen-Systeme werden weitere viel versprechende elektrochemische Materialkonzepte erforscht. Insbesondere Alkali-Schwefel-Batterien, vor allem Lithium-Schwefel-Systeme, lassen erheblich größere Speicherkapazitäten erwarten. Noch höhere Energiedichten versprechen Lithium-Luft-Zellen, bei denen die Kathode durch Luft ersetzt und der für die Reaktion benötigte Sauerstoff aus der Umgebungsluft entnommen wird. Hohe Leistungsdichten, wie sie etwa während Beschleunigungsphasen von Elektrofahrzeugen benötigt werden, lassen sich dagegen nur mit Superkondensatoren erreichen. Das BMBF fördert deren Optimierung u. a. auf der Basis von Nanopartikeln oder Graphen sowie nanostrukturierten Systembauteilen.



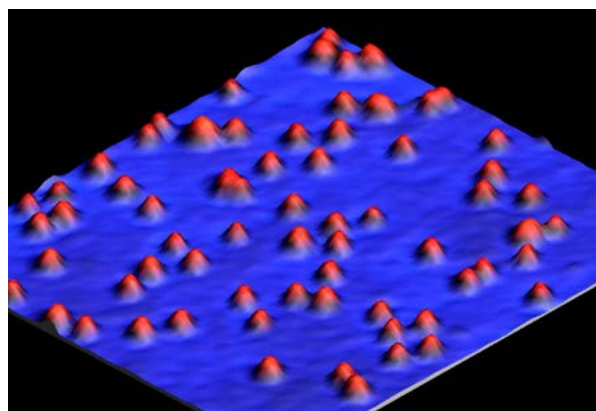
Beschichtung der Elektroden von Lithium-Schwefel-Batterien im Rolle-zu-Rolle-Verfahren. (Quelle: Jürgen Jeibmann/Fraunhofer IWS).

Nanostrukturierte und insbesondere Graphen- und CNT-basierte Materialien spielen auch eine zentrale Rolle in BMBF-Aktivitäten zur Förderung der Brennstoffzellentechnologie, mit der Elektrizität direkt aus energiehaltigen Gasen wie Wasserstoff oder Methan erzeugt wird.



Stapel mit Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (Quelle: Forschungszentrum Jülich).

Der umgekehrte Prozess, die Erzeugung von Wasserstoff aus temporärer regenerativer Überschuss-Elektrizität gilt unter dem Schlagwort „Power-to-Gas“ als aussichtsreiche Möglichkeit der Energiespeicherung. Das BMBF unterstützt hier die Entwicklung effizienter und flexibel betreibbarer Elektrolyseure. Ebenso wird die Wasserstofferzeugung durch lichtinduzierte Spaltung von Wasser an photokatalytisch wirkenden, nanostrukturierten Oberflächen untersucht. Für die Wasserstoffspeicherung werden nanoporöse Metall-Kohlenstoff-Materialien erforscht. Im Bereich der Energieübertragung wird die Herstellung optimierter Hochtemperatur-Supraleiter adressiert.



Rasterkraftmikroskopie-Aufnahme nanoskaliger Kupfer-Partikel, die in einer Ionenquelle erzeugt, als Teilchenstrahl größenselektiert und anschließend auf Glas abgeschieden wurden. Die besonderen optischen Eigenschaften der Nanopartikel beeinflussen die photokatalytische Wasserspaltung. (Quelle: Universität Rostock).

In der Photovoltaikforschung steht die Verbesserung des Wirkungsgrades von Solarzellen im Vordergrund. Insbesondere wird die Weiterentwicklung von CIGS-, sowie siliziumbasierten Dünnschichtsolarzellen erforscht. Hier spielen neuartige Konzepte für hocheffiziente Absorbermaterialien auf der Basis nanoskaliger Strukturen eine wesentliche Rolle. Weitere Aktivitäten adressieren organische Solarzellen sowie organisch-anorganische Hybridsysteme auf der Basis von Nanostrukturen und Nanopartikeln. Nanostrukturen

sind ebenfalls Schlüsselemente für Thermoelektrika. Im Fokus steht die Gewinnung von Elektrizität aus Abwärme von Industrieanlagen und vor allem aus den Abgassträngen von Automobilen. Das BMBF fördert die Entwicklung innovativer, effizienter Materialsysteme für den Einsatz im Hochtemperaturbereich sowie die Entwicklung druckbarer thermoelektrischer Generatoren auf Basis von Hybridsystemen aus Polymeren und anorganischen Nanopartikeln.

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Batterien, Superkondensatoren, Brennstoffzellen	Materialkonzepte für Alkali-Schwefel-Batterien	03X4618A, 03X4618B
	Einsatz von Graphenen in Lithiumbatterien und Brennstoffzellen	03X0112A—D
	Entwicklung einer Lithium-Schwefel-Batterie für die Elektromobilität auf Basis nanostrukturierter Siliziumanoden	03X4627A-C
	Metall-Luft-Akkumulatoren: Entwicklung (nano-)strukturierter bzw. nanoporöser Elektroden insbesondere für Lithium-Luft-Batterien mit optimierter Leistung	03X4620A, 03X4620B
	Entwicklung effizienter Luft- bzw. Sauerstoffelektroden für Lithium-Luft-Batterien als zukünftige Hochenergiespeichersysteme	03X4624A-E
	Entwicklung wiederaufladbarer Lithium-Luft-Zellen mit glasbasierten Festkörperelektrolyten und geschützten Anoden für zukünftige Anwendungen in Elektrofahrzeugen	03X4623A-E
	Entwicklung neuer Elektroden und Elektrolyte für Hochenergie-Lithiumionen-Batterien und Entwicklung neuer Typen von Lithiumbatterien (insbesondere Li/Luft und Li/Schwefel)	03X4612M, 03X4612O, 03EK3005, 03SF0390
	Entwicklung sicherer Elektrolytsysteme für Lithium-Ionen-Polymer-Batterien mit optimierter Langzeitstabilität auf der Basis neuer Molekülstrukturen	03X4607C
	Entwicklung einer neuen Generation von Lithium-Ionen-Batterien auf Basis neuartiger nanoskaliger Kompositmaterialien.	03X4613A-F, 03SF0344A-B, 03SF0343A-H, 16V0213
	Untersuchung und Optimierung neuer nanoskaliger Elektrodenmaterialien für (Lithium-Ionen-)Batterien	03SF0397, 13N11930, 03EK3008, 03EK3004, 13N11930
	Entwicklung neuartiger elektrischer Energiespeicher Systeme (Doppelschichtkondensatoren) auf Basis dreidimensionaler Nanostrukturierung	03EK3013
	Neue Superkondensatoren auf Basis ferroelektrischer Nanoteilchen als Energiespeicher	03FO3262
	Entwicklung innovativer elektrochemischer Superkondensatoren u. a. durch Verwendung von Graphen als neuartiges Elektrodenmaterial	03EK3010D
	Optimierte Herstellung von PEM-Brennstoffzellen im Spritzguss durch Verwendung von CNT-Polymer-Kompositmaterialien	03X0048A-F
	Untersuchung von Defektbildungsmechanismen bei der Synthese von Nanostrukturen in Elektroden und Elektrolyten von Feststoffoxid-Brennstoffzellen	01DK12017
Elektrolyse	Entwicklung neuer Membran-Elektroden-Einheiten für alkalische PEM-Elektrolyse zur flexiblen Wasserstoffherzeugung aus regenerativen Energien mit häufigen Lastwechseln	03EK3012A-B
Gebäudeheizung	Entwicklung nanostrukturierter Keramikbeschichtungen mit hoher Beständigkeit zum Betrieb bei hohen Temperaturen und zur Optimierung der Brennereffizienz von Öl-Heizbrennern	03X0089A-C

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Hochtemperatur-Supraleitung	Entwicklung optimierter Hochtemperatursupraleiter auf Basis verbesserter chemischer Abscheidungsverfahren zur Erzeugung nanoskaliger Schichtsysteme.	03X0090A, 03X0090C
Solarzellen	IR-optische Nanostrukturen für die Photovoltaik zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Solarzellen	03SF0401A-D
	Nanoskalige III-V- / Silizium Heterostrukturen für hocheffiziente Solarzellen	03SF0404A-E
	Neue Absorbermaterialien aus unbegrenzt verfügbaren Rohstoffen für Dünnschichtsolarzellen unter Verwendung von Nanopartikeln	03SF0402A-E
	Entwicklung von Dünnschichtsolarzellen mit neuen hochabsorbierenden Verbindungshalbleitern u. a. unter Nutzung von Nanostrukturierungen	03SF0358A-F
	Entwicklung neuartiger organischer Solarzellen mit Fullerenen als Elektronenempfänger	01LY0820B
	Entwicklung und Charakterisierung siliziumbasierter, nanostrukturierter Dünnschichtmaterialien für hocheffiziente Solarzellen	03SF0352A-G
	Entwicklung nanopartikulärer Dünnschicht-Solarzellen	03SF0363A-F
	Entwicklung druckbarer Dünnschicht-Photovoltaik auf Basis organisch-anorganischer (CIGS) Hybridsysteme unter Einsatz von Nanostrukturen und Nanopartikeln	13N10745-9
	Ausbau des Kompetenzzentrums Dünnschicht und Nanotechnologie für Photovoltaik Berlin	03IS2151A-G
	Herstellung, (Nano-)strukturierung und Charakterisierung dünner CIS- und CIGS-Schichten sowie optimierte optische Konzepte und Strahlformungen für eine maßgeschneiderte Photovoltaik	13N11783-90
Thermoelektrika	Industrialisierungskonzepte und neuartiger Materialien für hochtemperaturtaugliche thermoelektrische Generatoren zur Abgaswärmenutzung im Automotive-Bereich	03X3551A-E
	Hochtemperaturgeneratoren für die Abwärmenutzung in Fahrzeugen und Industrieanlagen	03X3548A-H
	Innovative Materialien und Generatoren für die thermoelektrische Energiegewinnung aus dem Abgasstrang von Automobilen	03X3555A-G
	Entwicklung effizienter thermoelektrischer Dünnschichtbauelemente auf Silizium- und Germaniumbasis durch Nanostrukturierung	03X3541A-F
	Entwicklung druckbarer organischer thermoelektrischer Generatoren u. a. auf Basis von Hybridmaterialien aus organischen Polymeren und anorganischen Nanopartikeln	13N12026
	Entwicklung von nanostrukturierten, oxidischen Thermoelektrik-Werkstoffen	01DQ12068
	Entwicklung von Hochtemperatur-Thermogeneratoren mit hoher Effizienz für den Kraftfahrzeugeinsatz u. a. auf Basis von oxidischen Nanopartikeln	03X3547B
	Entwicklung hocheffektiver thermoelektrischer Halbleiter mit niedrigkonzentrierten Zusätzen auf der Basis selbstorganisierender Nanostrukturen in komplexen Chalkogeniden	03X3540A-D
Wasserstoffherzeugung und -speicherung	Entwicklung leichter, stationärer und mobiler Wasserstofftanks mit hoher Betriebssicherheit, Energieeffizienz und Speicherkapazität auf Basis neuartiger, nanoporöser Metall-Kohlenstoff-Komposite	01DJ12071
	Nanostrukturen zur lichtinduzierten Wasserstoffentwicklung aus der photokatalytischen Spaltung von Wasser	03IS2071A-G, 03SF0353A-E
	Entwicklung großflächiger drei-dimensionaler Nanostrukturierungstechniken zur Realisierung von Hochleistungs-Nano-Bauelementen für Tandem-Solar-Brennstoffzellen, Super-Kondensatoren, optischen Sensoren und organische nichtflüchtige Speicher	03Z1MN11

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Energieforschung wird derzeit weltweit stark betrieben. Sie betrifft alle Formen der Energiegewinnung, -speicherung und -übertragung. Nanotechnologische Innovationen tragen in vielfältiger Weise bei. In Europa liegt ein Schwerpunkt der nanotechnologischen Aktivitäten auf regenerativen Energien und Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen. Im Rahmen des Europäischen Forschungsrahmenprogramms haben derzeit über 60 größere Energieforschungs-Projekte einen Bezug zur Nanotechnologie. Einige von ihnen werden mit mehr als 5 Mio. € seitens der Europäischen Kommission gefördert. Sie befassen sich überwiegend mit dem Themenbereich der Photovoltaik und adressieren Effizienzsteigerungen durch Konzentratorzellen^[103] sowie die Entwicklung und Massenfertigung von Dünnschicht-Solarzellen, sowohl auf Silizium^{–[104],[105]} als auch auf Verbindungshalbleiterbasis (CIGS).^{[106],[107]} Im Rahmen des Projektes NANOHEX dagegen werden neuartige, energieeffiziente Wärmetauscher auf der Basis nanofluidischer Kühlmittel entwickelt.^[108]

Das mit über 12 Mio. € am stärksten geförderte Projekt „SUPRA-BIO“ adressiert die nachhaltige Produktion von Kraftstoffen, Werkstoffen und chemischen Substanzen aus Biomasse.^[109] Neben gentechnischen Ansätzen liegt ein Projektschwerpunkt auf der Entwicklung nanokatalytischer Verfahren.

Weitere Aktivitäten befassen sich mit der Verbesserung von Thermoelektrika, CO₂-Abscheidung, dem Ersatz kritischer Rohstoffe wie z. B. Seltener Erden für Permanentmagnete durch Nanomaterialien, sowie einer Vielzahl von Energiespeicherungs- und -wandlungsverfahren. Letzterem kann auch die Entwicklung von Materialien, Architekturen und Fertigungsverfahren für bestimmte Supraleiter zugeordnet werden. So werden im Rahmen des EU-Projektes „EUROTAPES“ supraleitende Bänder mit Längen bis zu mehreren Hundert Metern hergestellt. Eingesetzt werden sollen sie für energieeffiziente Leistungselektroniken und Hochleistungsmagnete.^[110]

Rahmenbedingungen

Die Marktentwicklung insbesondere von Solarzellen und elektrochemischen Speichern wird auch in näherer Zukunft stark von politischen und legislativen Rahmenbedingungen abhängen. So ist eine Verbesserung

der Batterien hinsichtlich Reichweite, Ladegeschwindigkeit, Lebensdauer, Sicherheit, Kostenreduktion und zuverlässigem Betrieb unerlässlich, um die Kundenakzeptanz zu erhöhen und die Ziele des nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität zu erreichen, der bis 2020 in Deutschland die Markteinführung von einer Million Elektrofahrzeugen vorsieht. Parallel hierzu werden stationäre Batteriespeicher immer wichtiger, um die fluktuierende Netzeinspeisung regenerativer Quellen auszugleichen. Die Verbreitung dezentraler Batteriesysteme als Ergänzung häuslicher PV-Anlagen wird von der Bundesregierung seit Mai 2013 mit einer Investitionshilfe gefördert. Entsprechende Systeme werden zunehmend kommerziell angeboten. Die Markterwartungen sind hoch. So soll der weltweite Markt für Solarstromspeicher zwischen 2012 und 2017 von 200 Mio. \$ auf 19 Mrd. \$ wachsen.^[111] Für den Photovoltaikbereich wird zudem das EEG entscheidend bleiben, das die vorrangige Netzeinspeisung regenerativ erzeugten Stromes regelt.

3.8 Umwelttechnik

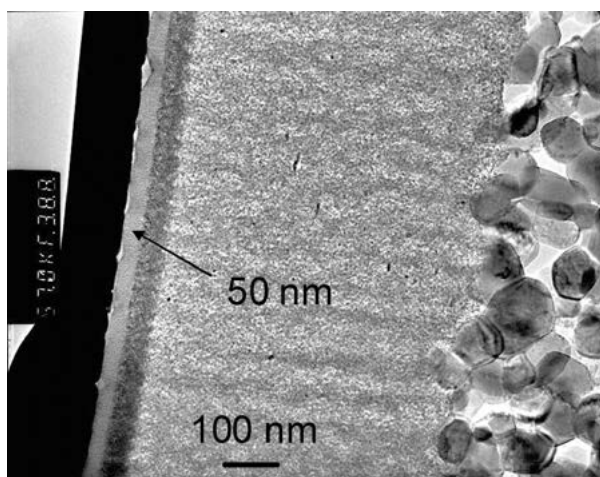
Branchenentwicklung

Die Umwelttechnik stellt einen relativ heterogenen Wirtschaftszweig dar, dessen Hauptanwendungsfelder die Bereiche Klimaschutz, Luftreinhaltung, Gewässerschutz, Abfallwirtschaft und Lärminderung umfassen. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes sind im Bereich Waren, Bau und Dienstleistungen für den Umweltschutz rund 216.000 Beschäftigte tätig in fast 9.000 Unternehmen mit einem Gesamtumsatz von 61 Mrd. € (Stand 2010).^[112] Die Exportquote liegt bei rund 40 %. Rund zwei Drittel des Umsatzes wurden im Bereich Klimaschutz generiert, zu dem auch die Photovoltaik als größter Teilbereich zählt. Die Photovoltaikbranche in Deutschland mit rund 110.000 Mitarbeitern unterliegt derzeit einem Strukturwandel aufgrund des starken Preisverfalls für Solarmodule durch asiatische Konkurrenz (vgl. Abschnitt 3.7).^[113]

Die Nanotechnologie hat in der Umwelttechnik vor allem in den Bereichen Aufbereitungs- und Sanierungstechnologie, Umweltsensorik und Ressourceneffizienz wirtschaftliche Relevanz. Der Weltmarkt für nanotechnologische Anwendungen in der Umwelttechnik wird für das Jahr 2014 auf 21,8 Mrd. \$

geschätzt.^[114] Wichtige Anwendungsmärkte für nano-optimierte Produkte sind hierbei die Membranfiltration und die Umweltkatalyse. Dem Gesamtmarkt für Membranfiltration wird ein Wachstum auf 16 Mrd. \$ in 2017^[115] und dem Gesamtmarkt der Umweltkatalyse einen Anstieg auf 14,6 Mrd. \$ in 2015^[116] prognostiziert. Weiterhin adressiert ein großer Anteil des Weltmarktes für Nanobeschichtungen, der für 2017 auf 7,6 Mrd. \$^[117] geschätzt wird, Anwendungen im Umweltbereich wie selbstreinigende Oberflächen, Photokatalyse, Verschleiß- und Korrosionsschutz.

beispielsweise zum Nachweis von Pestiziden oder gasförmigen Schadstoffen profitiert von nanooptimierten Sensoren mit hoher Selektivität und Nachweisempfindlichkeit. Aktuelle Forschungsthemen betreffen den Ersatz seltener Rohstoffe und Recyclingaspekte sowie die Nutzung von Sekundärrohstoffen (s. Kasten zu BMBF-Fördermaßnahme MatRessource). Im Rahmen der Fördermaßnahme NanoNature wurden Lebenszyklusaspekte beim Einsatz von Nanomaterialien sowie mögliche ökotoxikologische Wirkungen untersucht.



Keramische Nanofiltrationsmembranen (links in elektronenmikroskopischer Aufnahme) werden zur effektiven und umweltschonenden Abwasserreinigung und Produkttrennung eingesetzt (Quelle: Fraunhofer IKTS).

BMBF-Forschungsaktivitäten

Der Umwelt- und Ressourcenschutz zählt zu den zentralen gesellschaftlichen Bedarfsweldern der Hightech-Strategie der Bundesregierung. Innerhalb der Nanotechnologieforschung des BMBF wird der Bereich Umwelttechnik breit adressiert. Ein Entwicklungsziel ist hierbei die Verbesserung der Ressourceneffizienz von Produkten und Prozessen. Durch verbesserte schmutzabweisende und Biofilm reduzierende Beschichtungen können umweltbelastende Reinigungsmittel und Energie eingespart werden. Nanostrukturierte Katalysatoren werden für Ressourcen sparende Produktionsverfahren in der chemischen Industrie entwickelt, aber auch für eine effiziente Umwandlung von Schadstoffen in der Umweltkatalyse. Die Reinhaltung von Luft und Wasser durch nanooptimierte Stofftrennung und Membrantechnik ist ein weiterer wichtiger Forschungsbereich. Die Umweltsensorik,

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Verbesserung der Ressourceneffizienz von Produkten und Prozessen durch Oberflächenfunktionalisierung und Katalyse	Nanolacke für schmutzabweisende Schichten mit verbesserter Reinigungsfähigkeit	03X0115A-B
	Biozidfreie Biofilm reduzierende Fassadensysteme	1793X09
	Harte Werkstoffe und Verschleißschutzschichten erhöhter Lebensdauer auf der Basis von neuartigen und recycelten Nanomaterialien	03X3573A-C
	Nanokomposite für den Leichtbau durch Tandem-Katalyse, kompartmentierte Multizentren-Katalysatoren und Nanostempeltechniken	03X3565A-D
Umweltkatalyse/ Schadstoffumwandlung	Entwicklung von ressourceneffizienten Autoabgaskatalysatoren mit deutlich reduziertem Gehalt an Edelmetall und Seltenerdmetall	03X3563A-C
	Entwicklung von nanoskaligen SCR-Katalysatoren für die kombinierte NOx- und Ruß-Minderung bei Dieselmotoren	03X0079A-D
	Eisenbasierte Nanopartikel und Nanokompositstrukturen zur Schadstoffentfernung aus Grund- und Abwässern	03X0097A-H, 03X0082A-G, 03X0085A-E
	Nanomodifizierte Diamantelektroden für eine prozessintegrierte Desinfektion in unterschiedlichen Einsatzgebieten	03X0087A-H
	Neue photokatalytisch aktive Verbundmaterialien zur Eliminierung von pharmazeutischen Reststoffen	03X0094A-I
	Neuartige Filter zur simultanen Abtrennung von partikulären und gasförmigen Luftbestandteilen durch Beschichtung von Glasfasergeweben mit photoaktiven Nanomaterialien	03X0065A-D
	Mikrobielle Synthese und Recycling von Hybrid Palladium-Nanokatalysatoren und ihre Anwendung für die Behandlung von persistenten Umweltschadstoffen	03X3571A-E
Umwelt-/Biosphärenschutz	Biosensorplattform auf Basis monoklonaler Antikörper zur Speziesidentifikation z. B. zur Überprüfung der Einhaltung von Fangquoten in der Fischerei	01DG12055
Schadstofferkennung/ Umweltsensorik	Optische Pestizidschnelltests auf Basis nanoporöser Membranen in Mikrofluidikchips	16SV5595-600
	Nanotechnologische Rezeptorschichten auf Feldeffekttransistor-Gassensoren zur verbesserten Spurengasdetektion	16SV5477
	Selektive Messung von Spurengasen mit nanoporösen Sensoren	13N11138-9
	Nanobalancedetektor für personenbezogene Messungen von Nanopartikel-Expositionen	03X0098A-B
	Untersuchungen von mikrobiell katalysierten Stoffflüssen im Ökosystem Ostsee mit Hilfe der NanoSIMS Technologie	03F0626A
Stofftrennung/ Membrantechnik	Biofilm- und Chlor-resistente Umkehrosmose-Membranen auf Basis Nanopartikel funktionalisierter Polymerbeschichtungen	01DH12008
	Nanoporöse keramische Membranen zur nachhaltigen Wasser- und Lösemitteleinsparung durch Kreislaufschließung	03X0080A-L
	Nanopartikulär stabilisierte polymere Filtermembranen für die Ultrafiltration mit optimiertem Eigenschaftsprofil für technische Anwendungen	17N1610
	Nanoskalige Komposit-Mikrosiebe in Kombination mit UV-LED-Dekontamination zur Wasser- und Abwasserbehandlung	03X0083A-F
	Kompositmembranen für die organophile Nanofiltration zur energieeffizienten Stofftrennung	01RC1001A-D
Recycling/ Nutzung von Sekundärrohstoffen	Nanoskaliger Kieselsäureschlamm – Technologieentwicklungen zur Verwertung in mineralischen Baustoffen mit dem Ziel der Verbesserung der Werkstoffeigenschaften	03X0081A-J
Ersatz seltener Rohstoffe	Nanoskalige Seltenerd-freie Magnete und Magnetkomposite	03X3582A-D
	Substitution von Wolfram in Verschleißschutzschichten	03X3584A-H

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Analyse des Lebenszyklus und Umweltgefährdungspotenzialen von Nanomaterialien	Materialeigenschaften, Freisetzung und Verhalten in der Umwelt von CNT-Materialien	03X0114A-E
	Abschätzung der Umweltgefährdung durch Silber-Nanomaterialien	03X0091A-M
	Erforschung der Mobilität synthetischer Nanopartikel im Boden und im Grundwasser	03X0077A-C
	Untersuchung des Lebenszyklus von Nanopartikeln anhand von ^{105}Ag und ^{45}Ti -TiO ₂	03X0078A-C

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).



Nanomembranen finden Einsatz bei der Wasseraufbereitung im Tagebau. Die Aufbereitungsanlage kann einen großen Teil des Bergbauabwassers reinigen. Damit wird der Prozess der Erzgewinnung umweltfreundlicher. Eine Pilotanlage für die neue Reinigungstechnik ist in einer Kupfermine in Chile installiert (Quelle: Siemens).

Beispiel für BMBF-Fördermaßnahmen: MatRessource Dr. K. Otten, Projektträger Jülich

Die Weltbevölkerung wächst, Energie- und Materialverbrauch steigen, die Rohstoffvorkommen aber sind begrenzt – Gründe, um mit den vorhandenen Ressourcen weitsichtiger umzugehen. Die verfügbaren Ressourcen effizient zu nutzen ist aber nicht nur aus Nachhaltigkeits-, sondern auch aus Kosten- und Wettbewerbsgründen eine Zukunftsaufgabe, der sich die Bundesregierung gestellt hat. Mit weniger mehr erreichen: Diese Faustregel unterstützt den Weg hin zu einer ressourceneffizienten, umweltfreundlichen Industrie und Gesellschaft. Vor diesem Hintergrund fördert das BMBF in der Maßnahme „MatRessource – Materialien für eine ressourceneffiziente Industrie und

Gesellschaft“ seit 2012 ausgewählte Forschungsthemen zur besseren Nutzung von Ressourcen durch neue Materialien. In 34 Förderprojekten arbeiten mehr als 130 Unternehmen, sowie über 80 Forschungseinrichtungen drei Jahre lang gemeinsam an der Entwicklung von neuen Materialien, mit denen die Ressourceneffizienz deutlich verbessert werden kann. Die insgesamt rund 50 Mio. € Fördermittel aus dem BMBF werden durch weitere ungefähr 30 Mio. € aus der Industrie ergänzt. In allen Verbundprojekten soll die Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Materialinnovationen dazu beitragen, die Abhängigkeit von Rohstoffimporten dauerhaft zu verringern, die internationale Wettbewerbsfähigkeit durch Senkung der Energie- und Materialkosten zu verbessern und die Umwelt zu entlasten. Fünf Projekte der MatRessource weisen einen klaren inhaltlichen Bezug zur Nanotechnologie auf. Diese Projekte werden im Folgenden kurz beschrieben.

multiKAT – Das Projekt multiKAT ist auf die Entwicklung ressourceneffizienter Polyethylen-Werkstoffe ausgerichtet. Schlüsselkomponenten sind neuartige hochaktive Multizentren-Katalysatorsysteme und neue Technologien für die prozessintegrierte Erzeugung von vollständig rezyklierfähigem und fest eingebundenem nanoskaligem ultrahochmolekularem Polyethylen, das bisher weder als Nanofüllstoff noch als Nanofaser technisch verfügbar ist. Die neuen Polyethylen-Werkstoffe sollen die Korrosionsbeständigkeit steigern und das Gewicht reduzieren, zum Beispiel von Behältern für Biotreibstoffe, Flüssiggase und Chemikalien.

NanoPOP – Im Projekt NanoPOP werden Konzepte für ein nachhaltiges Recycling und eine ökonomisch wettbewerbsfähige Alternative für die Rückgewinnung

von Edelmetallen aus metallhaltigen Abfällen und Abwässern erprobt. In einem nanobiotechnologischen Verfahren werden Schwermetall-tolerante Bakterien als „recyclbare“ Produzenten genutzt. Bei dem Prozess laufen mikrobielles Wachstum, Metallreduktion und Nanopartikel-Bildung gleichzeitig ab. Die mit Hilfe von Bakterien produzierten Edelmetall-Nanopartikel sollen für die Entfernung von langlebigen Schadstoffen und pathogenen Mikroorganismen eingesetzt werden.

nanoRec – Das Projektziel besteht in der Senkung des spezifischen Bedarfs strategischer Metalle wie Wolfram und Kobalt und der effizienten Nutzung rückgewinnbarer nanoskaliger Werkstoffe. Die Arbeiten sind auf eine Verbesserung des Verschleißschutzes von durch Hartmetalle und Spritzschichten verstärkten Bauteilen ausgerichtet. Abweichend von bekannten Hartmetallen und Hartmetall ähnlichen Verschleißschutzschichten bestehen die Hartstoffkörner im Projekt aber nicht aus Einkristallen, sondern sie stellen aus nanoskaligen Kristalliten bestehende hart zusammengebackene Polykristalle dar.

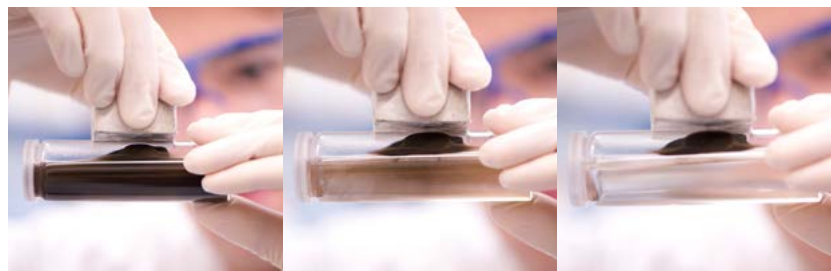
NanoEmission – Im Projekt NanoEmission werden für ausgewählte, häufig verwendete nanopartikelhaltige Produkte aus dem Bereich der kommerziellen Nutzung, das Verhalten und die Abscheidung von Nanopartikeln bei der thermischen Abfallbehandlung untersucht. Dabei wird der gesamte Weg vom Reststoff über die Verbrennung, die Filterung des Abgases, die Freisetzung in die Umwelt bis hin zur toxikologischen Bewertung der Wirkung auf den Menschen und die Umwelt betrachtet.

KomMa – Im Projekt KomMa werden neuartige werkstoffliche Konzepte für Magnetwerkstoffe zum Einsatz in Stromgeneratoren (z. B. für Windkraftanlagen) und Elektromotoren untersucht, mit dem Ziel den Bedarf an Seltenen Erden in diesen Permanentmagneten zu reduzieren. Der Lösungsansatz beruht auf der Entwicklung neuer hartmagnetischer Materialien auf der Basis von Hartferriten und Übergangsmetallen. Dabei sollen hartmagnetische mit weichmagnetischen Materialsystemen im Nanometerbereich nach dem Konzept der Austauschwechselwirkung so kombiniert werden, dass der Anteil an Seltenen Erden vollständig vermieden oder zumindest reduziert werden kann.

Nähere Informationen zur Fördermaßnahme Mat-Ressource und zu allen geförderten Projekten können im Internet nachgelesen werden auf der Seite www.matresource.de.

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Die Umwelttechnik ist ein wichtiger Anwendungsbereich innerhalb der europäischen Forschungsförderung. Ca. 30 Nanotechnologie-Projekte mit einem Fördervolumen von über 80 Mio. € im Zeitraum von 2007 bis 2013 im Rahmen von Maßnahmen der thematischen Bereiche Umwelt und NMP adressieren umwelttechnische Anwendungen. Einen Schwerpunkt bilden hierbei nanotechnologische Entwicklungen zur Aufbereitung von Wasser wie nanofunktionalisierte gegen Biofouling und Porenverstopfung geschützte keramische und polymere Membranen zur Aufbereitung von Trink- und Prozesswasser sowie zur Meerwasserentsalzung. Beispielhaft erwähnt sei das mit rund 4 Mio. € geförderte Projekt „Lbibrane“, das mit Hilfe der Schicht-für-Schicht-Absorptionstechnik regenerierbare Polyelektrolyt-Membranen mit hoher Trennleistung und Lebensdauer entwickelt.^[118] Von deutscher Seite ist hierbei das Berliner Unternehmen Surflay Nanotec beteiligt, das das Know-how seiner patentgeschützten Layer-by-Layer-Technik einbringt.



Magnetische Abtrennung superparamagnetischer Nanokompositpartikel zur Reinigung von Schad- und Wertstoffen aus Abwässern (Quelle: K. Dobberke für Fraunhofer ISC).

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Der wachsende Bedarf an ressourcen- und umweltschonenden Technologien ist ein starker Treiber für nanotechnologische Entwicklungen. Ein großer Teil der öffentlichen Forschungsförderung auf nationaler und europäischer Ebene adressiert umwelttechnische

Anwendungen oder die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz in anderen Anwendungsfeldern wie der Informations- und Kommunikationstechnik oder der Mobilität. Beim Einsatz von Nanomaterialien zählen dabei der sichere Umgang und die Vermeidung möglicher negativer Auswirkungen auf die Umwelt zu den zentralen Herausforderungen. Wichtige Beiträge hierfür liefern die Umwelt bezogene Risikoforschung aber auch internationale Aktivitäten zur Standardisierung von Messtechniken zur Erfassung von Umweltrisiken (vgl. Abschnitt 4.6).

3.9 Sensorik und Messtechnik

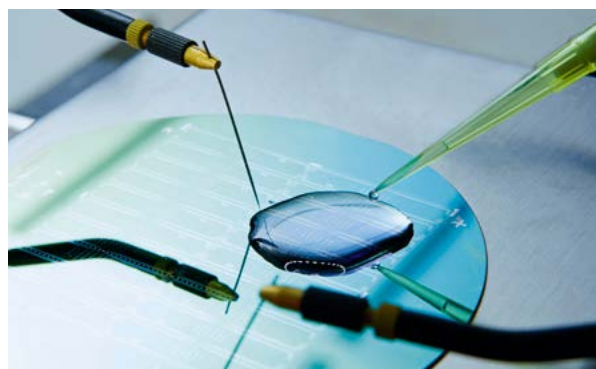
Branchenentwicklung

Die Branche Sensorik und Messtechnik ist weiter auf Wachstumskurs in Deutschland. Umsatz und Beschäftigung konnten 2012 gegenüber dem Vorjahr leicht auf rund 35 Mrd. € Jahresumsatz und ca. 250.000 Mitarbeiter gesteigert werden. Insgesamt 2.000 bis 2.500 Firmen sind im Bereich Sensorik und Messtechnik aktiv. Die Exportquote liegt bei ca. 35-40 %. Die Aussichten für die weitere Entwicklung werden positiv eingeschätzt.^[119]

Nanotechnologische Entwicklungen sind ein starker Innovationstreiber in der Sensorik. Zunehmenden Einsatz finden nanotechnologische Verfahren im globalen Wachstumsmarkt der Mikroelektromechanischen Systeme (MEMS), der bis 2016 um 15 % auf 6,5 Mrd. \$ ansteigen soll. Hierbei spielen Nanobeschichtungen und Aspekte der Nano-/Mikrointegration eine Rolle. Der Markt für nanostrukturierte Sensoren außerhalb des MEMS-Bereiches z. B. für die chemische, biologische oder thermische Sensorik wird nach Prognosen von BCC bis 2016 auf 38 Mio. \$ ansteigen.^[120] Der Weltmarkt für nanomagnetische Materialien in der Sensorik z. B. für magnetoresistive Sensoren und Bioassays wird auf 53 Mio. \$ im Jahr 2012 geschätzt mit einem jährlichen Wachstum von 15 % auf 108 Mio. \$ im Jahr 2017.^[121]

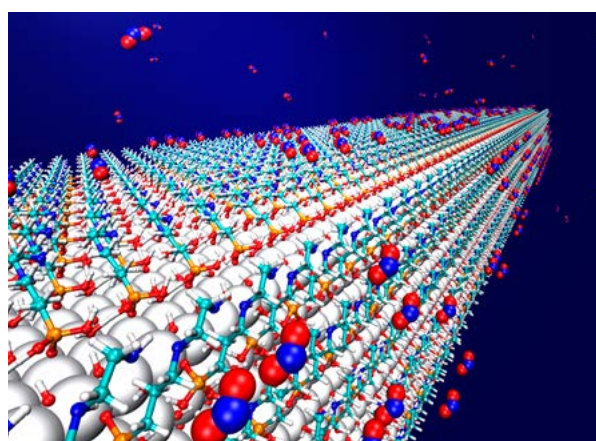
BMBF-Forschungsaktivitäten

Der Bereich Messtechnik und Sensorik wird in der BMBF Nanotechnologieforschung breit adressiert. Eine wichtige Rolle spielt hierbei der Einsatz nanoanalytischer Verfahren zur Grundlagen orientierten Untersuchung nanoskaliger Strukturen und Prozesse. Dabei kommen eine Vielzahl spektroskopischer und



Herstellung eines Nanosensors mit CNT-Sensorelementen: An den nadelförmigen Elektroden liegt eine Spannung an, die Nanoröhrchen aus der Lösung zu Elektroden auf dem Silizium-Wafer dirigiert (Quelle: Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Foto: Axel Griesch).

mikroskopischer Verfahren unter Einsatz verschiedener Strahlungsarten (Synchrotron, Ionen-, Elektronen-, Röntgen-, Terahertz-, Kernresonanz-, Fluoreszenzstrahlung etc.) und -quellen (z. B. FEL, Speicherring) zum Einsatz. Nanosensoren für Schnelltestverfahren in der biomedizinischen Diagnostik und Analytik bilden einen weiteren Schwerpunkt. Zur Anwendung kommen beispielsweise Nanodrähte für markierungsfreie



Schematische Darstellung eines Zinnoxid-Nanodrahtes, der mit einer Monolage sensorischer Moleküle funktionalisiert wurde. Das System stellt einen hochselektiven und hochsensitiven Gassensor für das gesundheitsschädliche NO_2 (dargestellt durch die 3-atomigen rot-blauen Moleküle) dar. Der Widerstand des funktionalisierten Nanodrahtes steigt selbst bei kleinen NO_2 -Konzentrationen im ppb-Bereich stark an (um 2100 % bei 400 ppb) während andere Gase zu keinen oder sehr kleinen Signalen führen (Quelle: Fraunhofer IWM).

Analysen, Nanopartikel als diagnostische Marker oder auch druckbare Sensoren auf Basis der organischen Elektronik. Die chemische Analytik und die Gassensorik profitieren von Nanostrukturen wie Nanopartikeln, -drähten und -poren zum hochempfindlichen und selektiven Nachweis niedermolekularer Verbindungen. Magnetsensoren auf Basis von Magnetowiderstandseffekten (GMR, TMR) werden für Anwendungen in der

Elektronik und Automatisierungstechnik eingesetzt. Ein wichtiges Anwendungsfeld für Nanosensoren ist weiterhin die industrielle Prozess- und Qualitätskontrolle, beispielsweise durch optische und AFM-Verfahren. Entwicklungen für kostengünstige Sensorelemente betreffen drucktechnisch herstellbare Sensoren auf Basis von CNT, metallischen Nanopartikeln und elektroaktiven Polymeren.

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Nanoanalytik in der Grundlagenforschung	Untersuchungen von Wachstum und Struktur von Nanomaterialien mit Synchrotronstrahlung	05K10 -KTB, -KT2, -VH3, -KE2, -HRB, -PM1, -VH4, -GU4, -EBA, -WEC
	Untersuchung technologisch wichtiger nanostrukturierter Materialien mittels hochauflösender Ionenstrahlanalytik	01DK12039
	Entwicklung von AFM-Systemen und leitfähigen AFM-Spitzen für elektrische Messungen	01QE1005, 1759X09
	Entwicklung von NMR-Relaxometrie und -Diffusometrie zur Charakterisierung der Moleküldynamik in biokompatiblen Polymerbläschen	01DN12087
	Erarbeitung der Grundlagen für die GSDIM-Weitfeld-Nanoskopie	13N11066-69
	Grundlagen und Verfahren für die Abbildung von Funktion und Struktur in der Nanoskopie für Biowissenschaften und Gesundheit	13N11401-404
	Kohärente Kurzpulsröntgenquelle für Anwendungsexperimente in der Nanotechnologie	01DR12011
	Kapillaren unterstützte optische Nanodetektion für Kolloid- und Grenzflächenforschung	01DR12011
	Untersuchung des fluidischen Partikel-Transports an Grenzflächen durch aktorisch bewegte Mikrohaare mit schaltbarer Nanostrukturierung	16SV5339-341
	Entwicklung von High-Speed AFM-Modulen zur Detektion dynamischer Vorgänge auf Probenoberflächen	13N12162-64
	Terahertz Laser-Spektroskopie von Halbleiter-Nanostrukturen	01DJ12001
Biomedizinische Analytik und Diagnostik	Erforschung neuer nanomedizinischer diagnostischer Tracer mit Hilfe biotechnologischer Verfahren	13N10264-69
	Erforschung von neuartigen Glucosesensoren auf Basis der Organischen Elektronik	13N10790-93
	Nanobiosensoren für die rasche Identifizierung von Fischarten für nachhaltige Fischerei und Einhaltung von Fangquoten – Ozean der Zukunft	01DG12055
	Hochauflösende Fluoreszenz-Mikroskopie von Malaria-Parasiten mit einer Auflösung von ca. 20 nm	01DG12058
	Entwicklung von nanostrukturierten ZnO Biosensoren für den Nachweis sehr geringer Konzentration von Analyten in biomedizinischen Anwendungen	01DN12092
	Nanodraht-basierte parallele Bioanalytik	16SV5386-387
	Nanodrahttransistoren als Marker freie, voll-elektronische Immunsensoren	17042X11
	Mikrocartridge-integriertes schnelles, hochsensitives, markierungsfreies DNA-Detektionsverfahren auf Basis von Mikro- und Nanopartikeln	16SV5427
Chemische Analytik	Miniaturisierte Raman-Spektroskopie auf basis enzymatisch generierter Silbernanopartikel als SERS-Substrat für den Nachweis niedermolekularer Substanzen	03IPT513A-D
	Integration von Nanodraht- Heterostrukturen mit optischen Mikrosystemen für innovative chemische Sensoren	16SV5383K-385

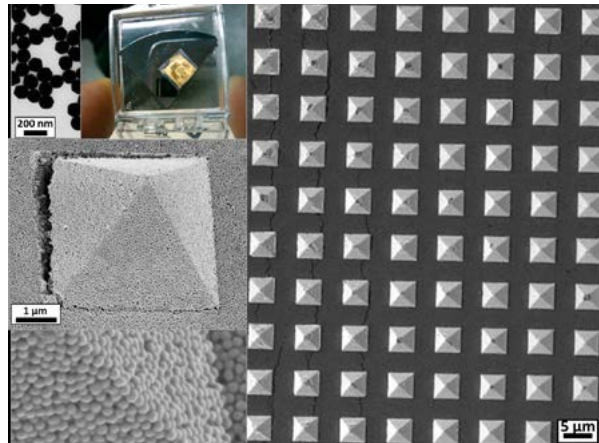
Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Gassensorik	Niedrigenergie-Schichtsensoren für die Gassensorik	03WKP15A-C
	Nanotechnologische Rezeptorschichten zur verbesserten Spurengasdetektion	16SV5379-82, 16SV5378K, 16SV5477
	Nanosensor-System für intelligente Gassensorik	16SV5591-593
	Selektive Messung von Spurengasen mit nanoporösen Sensoren	13N11138, 13N11139
	3-Dimensionale Mikro-Nano-Integration für die Gasflusssensorik	16SV5476
	Optische Gassensorik auf Nanotechnologiebasis; Erforschung neuartiger nanoplasmonischer Wasserstoffsensoren-Elemente	13N12201, 13N12202
	Entwicklung eines katalytischen Gassensors mit geringem Energieverbrauch und hoher Resistenz gegenüber Katalysatorgiften auf Basis chemisch hochwirksamer Nanopartikel	16SV5324
	Entwicklung mikrotechnischer Taupunktsensoren mit nanostrukturierten Kondensationskeimen zur schnellen Bestimmung minimaler Feuchteanteile in Gasen	16SV5345K-354
Drucksensoren/Wägetechnik	Entwicklung von sensorischen und adaptiven Systemen auf Basis von Elastomeren mit magnetischen Nanopartikeln	16SV3757-64
	Neuartige Sensoren durch nanopartikelbasierte Funktions- und Fügeschichten auf ultradünnen keramischen DMS-Trägern	13N10919-22
Magnetsensoren	Materialien und Fertigungstechnologien zur Erzeugung mikrostrukturierter magnetischer Bauteile und Systeme und mikrosensorischer Komponenten	16SV3849-52
	Innovative TMR-Sensor-Elemente in monolithischer Verbindung mit ICs	16SV5757
	Integration ultradünner Magnetfeldsensoren in intelligente Automatisierungskomponenten	16SV3732-36, 16SV4069
	Entwicklung eines flexibel skalierbaren GMR-Absolutgebersystems	16SV3720-22
Temperatursensorik	Nanokompositschichten für die intelligente, flächige Temperaturüberwachung von Elektronikbauteilen in explosionsgeschützten Geräten	03X0116A-B
	Hochauflösende Infrarot-Niedertemperatur-Thermometrie auf der Basis von III/V Halbleitersensoren	13N10880-82
Positionssensorik	Elektromechanische Sensoren mit eindimensionalen Nanoobjekten für die mehrachsige Sensorik zur Positions- und Winkelmessung	16SV5475
Prozessanalytik/Prozesskontrolle/Funktionsüberwachung/Qualitätskontrolle	Neuartige hochauflösende Metrologie an hochleistungsfähigen Fotomasken für energieeffiziente Nanoelektronik	13N11495-500
	Aufbau von Systemen mit nanomodifizierten Oberflächen für Automobil- und Industrie-Sensorik	16SV5328K, 16SV5469, 16SV5329-34
	Entwicklung eines rastersondenmikroskopischen Analysemoduls zur Charakterisierung organischer Feldeffekttransistoren in gedruckten Schaltungen	1759X09
	Risserkennungs- und Rissverfolgungsverfahren zur Charakterisierung multi- und nanoskalendominierter Schädigungsmechanismen	13N11926-28
	Entwicklung Nanotechnologie-basierter Mikrosysteme zur prozessintegrierten Überwachung von Strömungsprozessen	16SV5339K-341
	Optische in-situ-Prozess-Sensorik für die hochproduktive Fertigung optischer Vielschichtsysteme	13N11004-5
	Multiskalige Messtechnikplattform für die Qualitätssicherung optischer Freiformen	13N10853-59, 13N11120
Druckbare Sensoren	Gedruckte Nanomaterialien (CNT, Metallnanopartikel) für die Mikrosensorik und -aktorik	16SV5325-327, 16SV5388-393, 16SV5342-344

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Der Bereich Sensorik und Messtechnik zählt zu den wichtigsten Anwendungsfeldern innerhalb der Nanotechnologieforschung im FP7. Im Zeitraum von 2007 bis 2013 sind mehr als 60 Projekte mit einem Fördervolumen von rund 200 Mio. € gefördert worden. Darunter befinden sich auch größere Projekte mit einem Fördervolumen von mehr als 5 Mio. € zu folgenden F&E-Themen:

- **Hochpräzise Sensoren zur Messung von Frequenzüberlagerungen (Interferometer)** mit hoher Auflösung und Scangeschwindigkeit für die prozessintegrierte Qualitätskontrolle und Defekterkennung von großflächigen Foliensubstraten z. B. bei Solarzellen. (Laufzeit bis 2015, weitere Infos unter <http://nanomend.eu>)
- **Laserabsorptionsspektroskopie zur Schadstoffdetektion:** Entwickelt werden Quantenkaskadenlaser mit einstellbaren Frequenzen im mittleren Infrarotbereich zur selektiven Erfassung von Spurengasen durch Laser-Absorptionsspektroskopie. (Laufzeit bis 2016, weitere Infos unter www.mirifisens-project.eu)
- **Nanopartikelmessgeräte für den Arbeitsschutz:** Entwicklungsziel sind neue Konzepte und Verfahren zur Personen gebundenen Expositionsmessung luftgetragener Nanopartikel am Arbeitsplatz (Laufzeit bis 2013, weitere Infos unter www.nano-device.eu)
- **Nanosensor-Systeme zur intelligenten Umfelderkennung (Ambient Intelligence):** Das Projekt zielt auf die Entwicklung verlässlicher Nanosensor-Systeme zur intelligenten Erfassung von Umgebungsparametern. Adressiert werden die Anwendungsfelder Biochips, aktive Implantate, Infrarot-Bildgebung, Ultraschallsonden und intelligente Gassensorik (Laufzeit bis 2013, weitere Infos unter www.e-brains.org)
- **Verbesserte Verfahren zur DNA-Sequenzierung und -analyse:** Entwickelt werden kostengünstige und schnelle Verfahren zur DNA-/RNA-Analyse auch mit Hilfe neuer Ansätze der Einzelmolekülanalyse unter Einsatz von Nanoporen und -röhren (Laufzeit bis 2013, weitere Infos unter www.cng.fr/READNA).



Mit Pyramiden aus Goldnanopartikeln lassen sich Spurengase mittels der oberflächenverstärkten Raman-Streuung (SERS) hochempfindlich detektieren. Rechts: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Gold-Nanopyramiden. Oben links: Einzelne Gold-Nanopartikel in einer TEM-Aufnahme; daneben rechts: Foto eines handlichen SERS-Sensors, bestehend aus einer Quadratzentimeter großen Fläche, auf der die beschichteten Gold-Nanopyramiden angeordnet sind. Links Mitte: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Pyramide; Links unten: Nahaufnahme der kugelartigen Nanopartikel an einer Kante der Pyramide. (Quelle: Uni Bayreuth, Bild: Dr. N. Pazos Pérez).

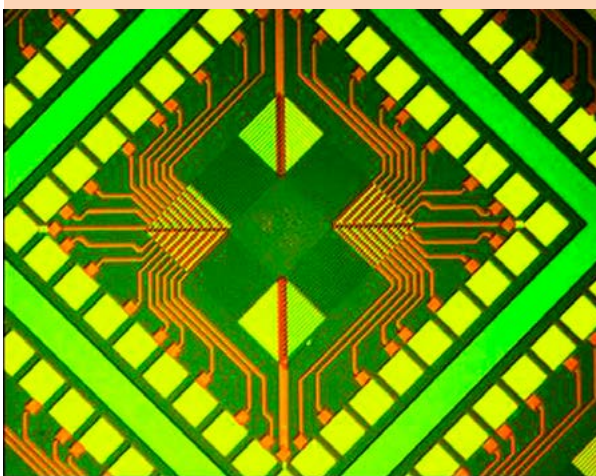
Gastbeitrag: Innovationspotentiale für die Sensorik und Messtechnik durch Nanotechnologien

Prof. Dr. Andreas Schütze (Universität Saarland),
Vorsitzender Wissenschaftsrat, AMA Fachverband für Sensorik

Sensorik und Messtechnik zählen zu den Schlüsseltechnologien, die technologischen Fortschritt ermöglichen und Lösungen für die gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit unterstützen. Nanotechnologien verbessern die Funktionalität der Sensorik und erweitern somit das Spektrum der verfügbaren Messgrößen.

Derzeit wichtigste Anwendungsfelder, gemessen an Stückzahlen, sind die Automobilindustrie und der Konsumgüterbereich. Jedes Smartphone ist mit mehreren Sensoren ausgestattet. Es erkennt die eigene Lage mit einem Lagesensor, gibt Orientierung mit einem elektronischen Kompass, das Mikrofon funktioniert mit einem akustischen Sensor, die Kamera mit einem optischen Sensor usw. Sensorik und Messtechnik als Querschnittstechnologien ermöglichen immer neue Anwendungen und Nanotechnologien verstärken deren Innovationspotentiale.

Beispiele aus der Praxis: Nanotechnologische Beschichtungen, z. B. in Durchflusssensoren, verbessern die Abriebfestigkeit und Verschmutzungsresistenz, nanoskalige Schichten in der Aufbau- und Verbindungstechnik ermöglichen Fügeprozesse auch bei niedrigen Temperaturen. Neuartige Dehnungsmessstreifen für die Kraft- und Drucksensorik mit nanostrukturierten Funktionsschichten bieten höhere Empfindlichkeit und durch die einstellbaren Temperaturkoeffizienten eine erweiterte Anpassung an unterschiedliche Anwendungen. GMR-/TMR-Effekt befähigen hochempfindliche und extrem kleine Magnetfeldsensoren für die Datenspeicherung und erschließen neue Anwendungen, z. B. in der Weg- und Winkelmessung. Für die optische Sensorik schafft Nanotechnologie neue Anti-Reflex-Beschichtungen bzw. funktionale Farbstoffschichten. In der medizinischen Anwendung dienen Nano-Beschichtungen zur Verbesserung der Biokompatibilität und Langzeitstabilität implantierter Sensoren. In der chemischen Sensorik ermöglichen Nanodrähte und -partikel die kontrollierte Präparation von Sensorschichten mit extrem großer aktiver Oberfläche, in der Biosensorik das Markieren von Biomolekülen und ermöglichen damit z. B. eine verbesserte DNA-Diagnostik. Aktuell erforscht werden Potenziale von Kohlenstoffnanoröhrchen und Graphenschichten als sensitive Schichten für die Kraftsensorik bzw. für (bio-)chemische Sensoren. Diese wenigen Beispiele



In modernen Multiturn-Sensoren werden nanostrukturierte magnetische Leiterbahnen genutzt, um gleichzeitig die Drehzahlinformation in Form von Domänenwänden zu speichern und durch den Riesenmagnetowiderstandseffekt (GMR-Effekt) auszulesen (Quelle: Sensitec GmbH).

verdeutlichen die großen Innovationspotentiale, die die Sensorik und Messtechnik durch Nanotechnologien erfährt.

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Der Umsatz der deutschen Sensorikbranche hat sich trotz eines Einbruches durch die Weltwirtschaftskrise in den letzten zehn Jahren verdoppelt. Auch für die künftige Entwicklung ist ein dynamisches Wachstum zu erwarten. Das Schlagwort „Smart Systems“, das wesentlich auf der Nutzung miniaturisierter, integrierter und vernetzter Sensorikkomponenten basiert, betrifft mittlerweile fast alle wirtschaftlichen Anwendungsfelder (Smart Home, Smart Textiles, Smart Grid, Smart City etc.) und Branchen wie die Automobil-, Sicherheits-, Produktions-, Energie oder Medizintechnik. Durch die Weiterentwicklung der Nano-/Mikrointegration sensorischer und aktorischer Komponenten zu intelligenten Systemen ergeben sich enorme Marktpotenziale aber auch gesellschaftliche Herausforderungen, beispielsweise im Hinblick auf Aspekte wie Sicherheit, Datenschutz und informelle Selbstbestimmung. Auch der Bereich Normierung und Standardisierung spielt eine wachsende Rolle, beispielsweise auch bei der Etablierung von Referenzverfahren für die Nanoanalytik (vgl. Kapitel 4.6).

3.10 Automobil

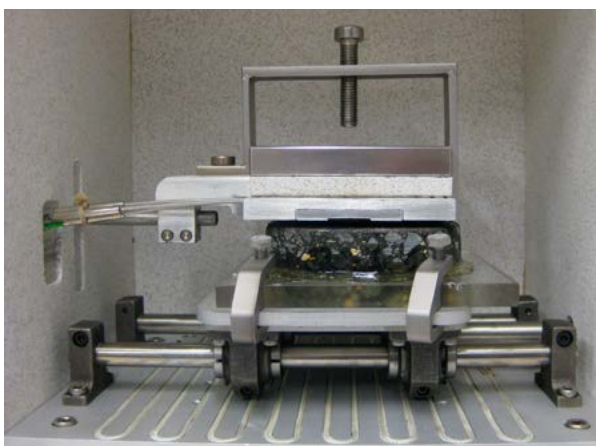
Branchenentwicklung

Die deutsche Automobilindustrie erzielte 2012 einen Gesamtumsatz von 357 Mrd. € und verzeichnete mit 1,6 % ein leichtes Plus gegenüber dem Vorjahr. Der Inlandsumsatz belief sich auf 128 Mrd. €, der Auslandsumsatz lag mit 229 Mrd. € erheblich höher. Insgesamt waren im Jahresdurchschnitt 2012 742.000 Mitarbeiter beschäftigt, 3,1 % mehr als 2011. Die Ausgaben für Forschung und Entwicklung verzeichneten ein Plus von 2,1 % gegenüber dem Vorjahr und erreichten 16,1 Mrd. € entsprechend einer F&E-Quote von 4,5 %.

Deutsche Hersteller produzierten 2012 mehr als 13,6 Mio. PKW gegenüber knapp 13 Mio. im Jahr 2011. Im Inland wurden 5,4 Mio., im Ausland 8,2 Mio. Fahrzeuge produziert. Während die Inlandsproduktion um 3,7 % fiel, nahm die Auslandsproduktion um 11,5 %

gegenüber 2011 zu. Die Exportquote der im Inland produzierten Fahrzeuge lag bei 77 % entsprechend 4,1 Mio. PKW. Hauptabnehmer, wenn auch stark rückläufig, waren die Länder der EU. Zuwächse waren in Asien und Amerika zu verzeichnen.^[122]

Zahlreiche Innovationen im Automobilbereich sind auf nanotechnologische Entwicklungen zurückzuführen. Hier sind nano-imprägnierte Sitzpolster genauso zu nennen wie Displaytechnologien im Fahrzeug internen Multimediasystem oder LED- und OLED-basierte Beleuchtungssysteme. Fahrzeuglacke erhalten eine bessere Kratzfestigkeit durch beigemischte nanoskalige Quarzpartikel. Weitergehende Entwicklungen sehen selbstheilende Lacke auf Basis nanoskaliger Materialkomponenten vor, die kleine Kratzer von selbst schließen. Nanostrukturierte schmutzabweisende Beschichtungen auf Spiegeln oder neuartige Folien zur Verminderung einfallender Wärmestrahlung für Fahrzeugscheiben sowie Beschichtungen zum Flamm-, Korrosions- und Abrasionsschutz werden ebenfalls entwickelt. Nanobeschichtungen für automobiler Anwendungen erzielten 2011 ein globales Marktvolumen von 125 Mio. \$. Dieser Markt soll sich bis 2015 auf 310 Mio. \$ mehr als verdoppeln.^[123]



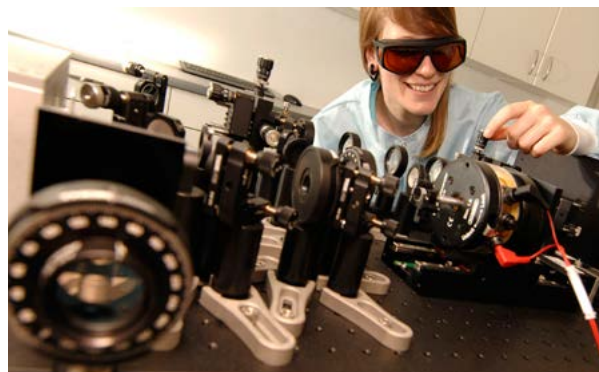
Jülicher Wissenschaftler untersuchen mit einer speziell entwickelten Apparatur Mechanismen der Reifenhaftung auf Asphaltoberflächen. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten die tatsächliche Kontaktfläche ausschlaggebend ist. Auf mikroskopischer Ebene bestimmt dabei eine Art Schmierfilm aus abgeriebenem Material und Flüssigkeitsresten die Gummireibung. Aus den Erkenntnissen lassen sich Ansatzpunkte zur weiteren Optimierung von Reifengummimischungen ableiten. (Quelle: Forschungszentrum Jülich).

Weitere automobiler Anwendungen ergeben sich beispielsweise für Nano-Füllstoffe. In Autoreifen machen etwa Materialien wie Silica und Carbon Black mittlerweile rund 30 % der Gummimischung aus und tragen zu optimierten Haftungs-, Verschleiß- und Verbrauchseigenschaften bei.

BMBF-Forschungsaktivitäten

Mit seiner Projektförderung unterstützt das BMBF zahlreiche nano-inspirierte Entwicklungen, die dem Fahrzeugbereich zugutekommen. Gleichwohl sind die meisten dieser Innovationen allerdings originär anderen, dem Automobilbereich vorgelagerten Technologiebereichen zuzuordnen. Zentrale automobiler Anwendungsbereiche sind jedoch die Abgasreinigung, in der die katalytische Wirkung nanoskaliger Partikel intensiv erforscht wird, sowie die Reibungsminderung zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs in Motor und Antriebsstrang. Hier werden neuartige verschleißfeste Materialsysteme für innermotorische Bauteile entwickelt.

Im Karosseriebereich werden neue Korrosionsschutzsysteme und witterungsbeständige, nanotexturierte UV-Schutz-Beschichtungen entwickelt. Im Bereich der Automobilelektronik liegt der Fokus auf der Entwicklung vor allem leistungselektronischer Systeme für die Elektromobilität. Nanoelektronischen



Nanomaterialien bilden die Basis zur Entwicklung hochtemperaturtauglicher thermoelektrischer Generatoren zur Abgaswärmenutzung in Automobilen. Temperatur bedingte Verspannungen und Verformungen können zum Materialversagen des Moduls führen. Mit Hilfe eines Laser-basierten optischen Messsystems lassen sich kleinste Verformungen der Oberfläche detektieren. (Quelle: Hochschule Rhein-Waal, Foto: Michael Bergmann).

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Abgasreinigung	Entwicklung von nanoskaligen SCR-Katalysatoren für die kombinierte NOx- und Ruß-Minderung bei Dieselmotoren	03X0079A-D
	Entwicklung von ressourceneffizienten Autoabgaskatalysatoren mit deutlich reduziertem Gehalt an Edelmetallen und Seltenerdmetallen	03X3563A-C
Automobilelektronik	Nanoelektronik für intelligente und zuverlässige Antriebesstränge von Elektrofahrzeugen basierend auf neuen Elektromotoren, neuartiger Leistungselektronik und neuartigen Fertigungstechnologien	13N11476-83
	Entwicklung innovativer nanoelektronisch-basierter Systemkomponenten für energieeffiziente Elektroautos (e ³ CAR-Anwendungen)	13N10393-98
Karosserie	Entwicklung neuartiger Korrosionsschutzsysteme für höchstfeste Warmformstähle	03X3560A-D
	Herstellung großflächiger, transparenter, witterungsbeständiger Beschichtungen mit integriertem UV-Schutz durch Nano-Texturierung	13N10520-24
Thermoelektrika	Industrialisierungskonzepte und neuartiger Materialien für hochtemperaturtaugliche thermoelektrische Generatoren zur Abgaswärmenutzung im Automotive-Bereich	03X3551A-E
Verschleißfeste Materialien für den Motorenbau	Nano-Ferro Beschichtung für Zylinderlaufbahnen in Hochleistungsmotoren	03X3536A-E
	Entwicklung neuartiger nanokristalliner Aluminiumwerkstoffe für hochbelastete Zylinderkopfschrauben und Verschraubungen in der Lagergasse	03X0101

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

Bauteilen kommt hier eine zunehmend wichtige Bedeutung zu. Ein umfangreicher Forschungsgegenstand ist auch die Rückgewinnung von Energie aus der Hitze des Abgasstranges. Hier werden hochtemperaturtaugliche thermoelektrische Generatoren auf der Basis neuartiger Materialsysteme entwickelt.

Gastbeitrag: Nanotechnologie im Automobil

Stefan Wöhr, Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), Berlin

Die deutsche Automobilindustrie verdankt ihre weltweite Führungsposition ihrer anerkannten hohen Innovationskraft. Werkstoffe wirken als treibende Kraft für innovative, industrielle Produktentwicklungen. Sie prägen die technologische Leistungsfähigkeit der Automobilindustrie und steigern die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen.

Nanomaterialien sind heute in vielfältigen Bereichen des Lebens in Anwendung. Aus Sicht der Automobilindustrie lassen sich beim Bau von Teilen und Fahrzeugen die Eigenschaften von Nanopartikeln nutzen, um Techniken zu optimieren und den Alltag zu erleichtern. Im Vordergrund stehen Produktdiffe-

renzierung im internationalen Wettbewerb und der Kundennutzen unter den Aspekten Sicherheit, Umwelt und Komfort.

Die Nanotechnologien haben bereits seit Jahren in der Automobilindustrie einen festen Platz. Einer der ersten Anwendungsbereiche war der kratzfeste Lack. Durch Nanoteilchen, die fest im Lack eingebunden sind, kann die Kratzfestigkeit um das bis zu Dreifache verbessert werden. Zudem ist auch der Glanz selbst nach jahrelanger Nutzung noch deutlich brillanter.

Die Fahrzeugsicherheit ist ein hohes Gut, die sich durch Nanotechnologie noch deutlich steigern lässt. So verhindern abblendbare Spiegel, dass der Fahrer geblendet wird, darüber hinaus sind blendfreie Instrumente sowie Wärmeschutzverglasungen Beispiele für den Einsatz von Nanomaterialien. Eine weitere Anwendung sind die so genannten „Antibeslagbeschichtungen“ von Scheiben. Durch Nanotechnologie ist es möglich, dass die Scheiben weitgehend beschlagfrei bleiben. Ein weiterer Einsatzbereich für Nanomaterialien liegt in der Verbindung zwischen Fahrzeug und Straße. Mit Hilfe von Nanopartikeln haften Reifen auf den unterschiedlichen Straßenbelägen und Straßenzuständen besser, ein wesentlicher Sicherheitsgewinn.

Das Automobil der Zukunft zeigt mit Hilfe der Nanotechnologien Visionen von der intelligenten Reaktion auf Umweltreize und Fahrerverhalten. Scheiben und Spiegel werden sich den äußeren Lichtverhältnissen anpassen und zahlreiche Sensoren vorausschauend den Fahrzustand bei Änderung der Wetterlage oder bei Kollisionsgefahr erfassen.

Gerade bei Fahrzeugantrieb und Komponenten haben die Nanotechnologien erhebliches Optimierungspotenzial im Hinblick auf die weitere Verbrauchs- und Emissionsreduzierung. Da der Verschleiß von Komponenten funktionale Eigenschaften des Fahrzeugs, wie Lebensdauer, Verbrauch, Emission und Geräusche beeinflusst, werden durch Nanotribologie neue Potenziale erschlossen. Durch optimale nanotechnologische Beeinflussung der Werkstoffoberflächen gelingt es, die Verschleißbeständigkeit zu erhöhen. So können Zylinderlaufbahnen durch Nanoteilchen beschichtet werden und somit eine höhere Lebensdauer erreichen.

Der Einsatz neuer Technologien birgt möglicherweise auch Risiken. Diese sind in der Grundlagenforschung zu hinterfragen und müssen beantwortet sein, wenn die jeweiligen Projekte von der Prinzip- zur Konzepttauglichkeit geführt werden. Partnerschaften mit Forschungszentren weltweit sind hier von größter Bedeutung. Die heute bei freien Nanoteilchen diskutierten Risiken werden den Automobilnutzer nicht betreffen, da Nanoteilchen im Automobil in der Regel fest in Matrices eingebunden sind. Auch durch Abrasion werden keine Nanoteilchen entstehen. Bei der Produktion werden die Werker in der Automobilindustrie durch Arbeitsschutzvorgaben geschützt.

Der Einsatz der Nanotechnologien stärkt und fördert die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie am Standort Deutschland. Politik und Wissenschaft sind aufgefordert, gemeinsam mit der Automobilindustrie den Nanotechnologien zum Durchbruch zu verhelfen.

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Europa gehört zu den weltweiten Innovationsführern im Automobilbereich und beheimatet zahlreiche namhafte Hersteller und Zulieferer. Die Automobilwirtschaft wird seitens der EU durch vielfältige Innovationsförderung unterstützt. Dabei profitiert

der Automobilsektor auch von nanotechnologischen Entwicklungen, die von der Ausrichtung her eher anderen Bereichen zuzuordnen sind. Dennoch stehen einige größere Förderprojekte mit Nano-Bezug des 7. Forschungsrahmenprogrammes der EU im automobilen Kontext. Unter der EU-Projektförderung entwickelt werden vor allem

- **selbstheilende Lacke und Beschichtungen auf der Basis von Nanostrukturen,**^[124]
- **eingebettete, nichtflüchtige on-Chip-Datenspeichersysteme,**^[125]
- **intelligente und energieautarke, farbveränderliche, flexible Dünnschichten zur Regelung des Licht und Wärmeeinfalls im Auto sowie großflächige Fertigungsverfahren,**^[126]
- **Abgaskatalysatoren auf der Basis von Übergangsmetall-Nanopartikeln,**^[127]
- **neue mikro- und nanokristalline, metall-keramische Werkstoffe für thermisch und mechanisch hochbelastete Komponenten in Abgasstrang, Antrieb und Bremssystemen,**^[128]
- **neuartige On-Chip Energieversorgungen für die Automobilelektronik.**^[129]

Weitere Aktivitäten adressieren unter anderem Biomasse-basierte Kompositmaterialien (Biopolymere, Nanozellulose etc.) mit Nano-Füllstoffen^[130], die Entwicklung reibungsoptimierter innermotorischer Oberflächen^[131] und rollwiderstandsoptimierter Reifen^[132].

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die Automobilbranche ist derzeit stark geprägt durch die Klima- und Energiediskussion. Politisch administrative Vorgaben vor allem seitens der Europäischen Union aber auch durch die Bundesregierung beeinflussen die automobilen Entwicklungsrichtungen erheblich.

Eine zentrale Rolle zum Erreichen der Klimaschutzziele spielt der CO₂-Ausstoß pro Fahrzeug. Die entsprechenden europäischen Vorgaben zu erreichen, stellt insbesondere für die deutschen Hersteller, mit ihrer starken Marktstellung bei Mittel- und Oberklassefahrzeugen, eine besondere Herausforderung dar. Marktnachteile gegenüber der eher auf Kleinwagen fokussierten europäischen Konkurrenz werden in der Branche befürchtet.

Als anspruchsvoll gilt auch das Ziel der Bundesregierung, bis 2020 eine Million zugelassener Elektrofahrzeuge zu erreichen. Vor dieser Zielstellung fließen große Innovationsanstrengungen in die Entwicklung der Elektromobilität. Gearbeitet wird an rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen, aber auch an Brennstoffzellen- und Hybridsystemen.

3.11 Maschinenbau

Branchenentwicklung

Der Maschinen- und Anlagenbau gilt traditionell als eine der tragenden Säulen der deutschen Volkswirtschaft. Wurde die Branche durch die Finanzkrise 2008/2009 erheblich in Mitleidenschaft gezogen, erholte sie sich seither gut und trug insbesondere durch ihre Exportstärke und ihren in weiten Teilen mittelständischen Charakter wesentlich zur im internationalen Vergleich guten wirtschaftlichen Lage Deutschlands in der gegenwärtigen europäischen Wirtschafts- und Währungskrise bei.

Der weltweite Branchenumsatz stieg 2012 gegenüber dem Vorjahr um etwa zehn Prozent auf ein Rekordniveau von 2.250 Mrd. €. Auf den deutschen Maschinenbau entfielen hiervon mit 250 Mrd. € gut elf Prozent. Damit nimmt Deutschland in dieser Branche nach China, den USA und Japan den vierten Platz im Branchenumsatz ein.^[133] Der Export stieg um fünf Prozent auf knapp 150 Mrd. € an. Die Beschäftigung nahm 2012 um 30.000 auf 978.000 Stellen zu.^[134]

Nanotechnologie trägt im Maschinenbau wesentlich zu verbesserten Produkten und Prozessen bei. Im Fokus stehen dabei vor allem die mechanischen Eigenschaften. So lassen sich durch gezielte Nanostrukturierungen und nanoskalige Beschichtungen von Oberflächen etwa durch Kohlenstoff-, Hartmetall- oder Keramikwerkstoffe Reibung und Verschleiß beweglicher und belasteter Komponenten signifikant vermindern. Ähnliches gilt für den Schutz vor Korrosion und Verschmutzung. Daraus resultieren längere Betriebsdauern und verminderter Energieverbrauch. Weitere Aspekte, die durch nanotechnologische Innovationen adressiert werden, sind Leichtbaukonzepte durch stabile Kompositwerkstoffe, die Einarbeitung nanoskaliger Sicherheitsmerkmale gegen Fälschungen und Produkt-

piraterie oder die Entwicklung präziser Stellglieder für mechatronische Bauteile.

BMBF-Forschungsaktivitäten

Reibungsminderung und Verschleißschutz stehen auch im Fokus einer Reihe durch das BMBF geförderter F&E-Projekte. Hier werden Materialsysteme für mechanisch hoch belastete Oberflächen entwickelt. Sie tragen zur Optimierung unterschiedlicher Anwendungen wie Werkzeugoberflächen, Dichtungen, Pumpen, Lager, Turbinen, Umformwerkzeugen, Düsen etc. bei.

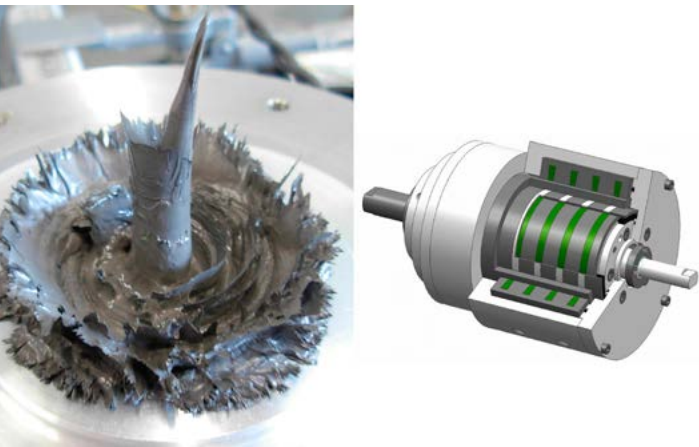


Turbinenschaufel-Bearbeitung mittels nanoskaliger Hartmetall-Fräswerkzeuge mit extrem hohen Standzeiten (Quelle: Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme).

Eine wesentliche Rolle spielt auch die Entwicklung von Verfahren und Produktionstechniken zur Nanostrukturierung, -beschichtung und Funktionalisierung von Oberflächen und Materialien. Spezifisch adressiert werden u. a. thermisches Spritzen, plasmatechnische Verfahren, Nanoimprinttechnologien oder die Herstellung Nanoröhren-modifizierter technischer Textilien.

Ultrapräzise Stellglieder spielen eine immer wichtigere Rolle in der Mikrosystemtechnik und bei zahlreichen mechanischen Prozessen. Das BMBF fördert in diesem Zusammenhang die Entwicklung neuer, effizienter Aktoren insbesondere auf Piezo- und Membranbasis.

Magnetflüssigkeiten, die ihre Fließ- und Viskositätseigenschaften unter Einwirkung magnetischer Felder



Eine magnetorheologische Flüssigkeit erstarrt im magnetischen Feld zu einem Festkörper. In der Antriebs- und Bremstechnik werden auf dieser Basis neuartige Kupplungssysteme entwickelt. Der Kraftschluss erfolgt durch flexible Aktivierung eines Magnetfeldes. (Quelle: Hochschule Ostwestfalen-Lippe).

verändern, kommen auch als aktorische Komponenten in Frage. Ihr Anwendungspotenzial insbesondere in mechanischen Antriebssträngen sowie in der Brems-technik wird ebenfalls erforscht.

Sonstige Aktivitäten und Anwendungsbeispiele

Der Maschinen- und Anlagenbau repräsentiert eine sehr innovative Branche mit hohem Anwendungsbezug. Umgesetzt und angewandt werden häufig Innovationen aus dem Werkstoff-, Chemie-, Sensorik- oder Produktionsbereich. Dort ist auch der Hauptteil der Innovationsförderung angesiedelt, die dem Maschinenbau zugutekommt. Auf internationaler Ebene ist es allerdings häufig schwierig, F&E-Aktivitäten originär dem Maschinenbau zuzuordnen. Eine Förderung mit Nanobezug findet unter diesem Stichwort beispielsweise auf EU-Ebene nicht statt. Allerdings gibt es einige

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Antriebs- und Brems-technik	Innovative Wellenabdichtungsanwendungen mit neuartigen Magnetflüssigkeiten	03X0092A-B
	Hochlast- und Lebensdauerbremsen auf Basis magnetorheologischer Flüssigkeiten	1713X09
Aktoren	Neue energieeffiziente Stellglieder auf Basis des piezoelektrischen Effekts	01QE1136B
	Virtuelle Membranaktoren auf Nanostrukturen in Mikro-Pumpen	16SV5368
Nanobasierte Verfahren in der Oberflächenstrukturierung und Produktionstechnik	Intelligentes Produktionssystem für nanostrukturierte Beschichtungen durch thermisches Spritzen	02PJ1220-21
	Nanoprägetechniken zur Erzeugung von Strukturen mit hohem Aspektverhältnis (Verhältnis Höhe/Breite) für die Mikrosystemtechnik	03FPF00041
	Effiziente Produktion ultrapräziser innovativ strukturierter funktioneller Oberflächen mittels adaptiver Plasmatechnik	13N12147-51
	Erforschung und Realisierung eines „Energiefilter(s) für Ionenimplantationsanlagen“	17N0411
	Entwicklung von CarbonNanoTube(CNT)-modifizierten Einzelfasern für den Einsatz in Textilien zur Papierherstellung und andere Anwendungen	03X0061A-D
Tribologie und Verschleißschutz	Nano-Dynamik tribologischer Paarungen auf plasmastrukturierten Oberflächen und deren Herstellung	02PO2480-85
	Entwicklung von nano-keramischen Sprühdüsen für abrasive Hochdruckbedingungen	01DJ12049A-B
	Demonstration des Einsatzes von bei der Herstellung strukturierten diamantähnlichen Schichten in der Dichtungs-, Pumpen- und Lagertechnik	01RI0906A-E
	Neuartige nanodisperse Ni-Schichten für Verschleißschutz- und abrasionsoptimierte Werkzeugoberflächen im Hartstoffzuschnitt	03X0120A
	Anwendung hoch ionisierter Plasmen zur Abscheidung schadenstoleranter nanolaminierter Dünnschichtsysteme zum Verschleißschutz von Umformwerkzeugen	03X0122A-B
	Oberflächenbeschichtungen für reibbeanspruchte Turbinen- und Pumpausrüstungen	RUS10B53

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

EU-Projekte, die sich mit nano-inspirierten Reibungs- und Oberflächenaspekten oder Füge-techniken befassen.

So werden im Rahmen des mit fast zwei Mio. € geförderten Projektes „STEELPROST“ neue Lösungen zur Realisierung hitze- und feuerfester Oberflächen leichter Stähle entwickelt.^[135]

Die wichtigste Füge-technik, das Schweißen, wird mit dem Projekt „MINTWELD“^[136] adressiert und mit 3,5 Mio. € gefördert. Entwickelt werden neue, verfeinerte Methoden der Schweiß-technik zur Vermeidung mikroskopischer Schwachstellen im Fügebereich.

Reibungsminderung ist die Zielstellung in verschiedenen Projekten, in denen z. B. neuartige Flüssigschmiermittel auf Basis nanoskaliger Additive^[137] entwickelt und Mechanismen der Reibung bzw. der Interaktion zwischen Oberflächen und Schmiermitteln untersucht werden.^[138]

Messtechnik für nanoskalige Fertigungsverfahren wird im Projekt „AIM4NP“ mit 3,2 Mio. € gefördert. Ziel ist es, Messverfahren für Schlüsselparameter wie Topographie, Morphologie, Rauheit, Härte und Adhäsionskraft von Oberflächen in der Fertigungsumgebung und während des Produktionsprozesses zu bestimmen.^[139]

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

In der Maschinen- und Anlagenbau-Branche spielen verlässliche politisch-regulatorische Rahmenbedingungen eine große Rolle. Die Branche ist zu einem erheblichen Teil mittelständisch geprägt; oft handelt es sich um Familienunternehmen. Branchenvertreter betonen in diesem Zusammenhang die Wichtigkeit steuerpolitischer Verlässlichkeit und weisen auf negative Auswirkungen von Vermögensbesteuerungen auf die Investitionsfähigkeit der Betriebe hin.

Zudem wird auch der Maschinen- und Anlagenbau stark durch die Energiewende beeinflusst. Die Profitabilität konventioneller Kraftwerke und das zukünftige Zusammenspiel fossiler und erneuerbarer Energien weisen derzeit perspektivische Unsicherheiten auf, die Einfluss auf die Investitionstätigkeit im Kraftwerksbau haben können. Ein zunehmendes Problem vor allem für kleinere und mittlere Unternehmen abseits der Me-

tropolen stellt der Fachkräftemangel dar. Die Branche versucht durch Informations- und Unterstützungsprogramme und gezielte Zusammenarbeit mit Hochschulen insbesondere der im Ingenieursbereich sehr hohen Studienabbrecherquote gezielt entgegenzuwirken.^[140]

Ein zunehmend relevantes Branchenthema ist der Schutz des Know-hows über Prozesse, Produkte, Kunden und Märkte. So entsteht durch Wissens-Diebstahl ein Schaden in Milliardenhöhe. Die Unternehmen nehmen sich dieses Themas verstärkt an, verfolgen dabei jedoch überwiegend individuelle Vorgehensweisen. Die Mehrheit der Unternehmen kennt dabei keine Normen und Standards, die sie beim Know-how-Schutz unterstützen. Zielführender wären branchenweit vereinheitlichte Maßnahmen zur Feststellung des Schutzbedarfs und zur Umsetzung entsprechender Maßnahmen.^[141] Die Nanotechnologie bietet eine Vielzahl technologischer Ansätze, um wirksame Sicherheitsmerkmale für den Produktschutz zu etablieren.^[142]

3.12 Sonstige Anwendungsfelder

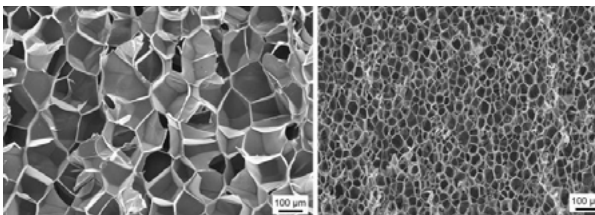
Bautechnik

Die wirtschaftliche Entwicklung im Bausektor in Deutschland ist weitgehend unverändert gegenüber dem Vorjahr. Im Bauhauptgewerbe wurden im Jahr 2012 ca. 93 Mrd. € umgesetzt. In 2013 wird mit leichten Zugewinnen gerechnet. Die Zahl der Beschäftigten im Bauhauptgewerbe wird 2013 im Jahresdurchschnitt mit 745.000 ungefähr auf Vorjahresniveau liegen.^[143]

Wirtschaftlich relevant im Bauwesen sind vor allem Nanobeschichtungen für Anwendungen im Bereich Selbstreinigung, Verschmutzungsschutz, Antifouling sowie Kratz- und UV-Schutz, denen ein Anstieg des Weltmarktvolumens auf 400 Mio. € bis zum Jahr 2015 prognostiziert wird.^[144] Ebenfalls ein hohes Marktwachstum wird nanoporösen Schäumen für die Schall- und Wärmeisolierung von Gebäuden prognostiziert. Im Bereich Aerogele wird ein Anstieg des Weltmarktes von 175 Mio. \$ in 2012 auf 1,4 Mrd.\$ im Jahr 2017 erwartet.^[12]



Nanotechnologie basierte Folien als Sonnenschutz für Gebäudeverglasungen. Die ca. 60 µm dicken, transparenten Sonnenschutzfolien bestehen aus 200 übereinandergelegten nanoskaligen Filmen aus Acryl und Polyester. Durch die Struktur der Folien wird ein großer Teil der Wärme- und UV-Strahlung des Sonnenspektrums herausgefiltert, während sichtbares Licht kaum beeinträchtigt wird (Quelle: 3M).



Mittels Graphenen lassen sich die Wärmedämmeigenschaften von Polystyrolschäumen verbessern. Links: Polystyrol-Schaum mit einem herkömmlichen Talk-Füllstoff, rechts mit Graphenen als Zusatz. Die Kohlenstoff-Riesenmoleküle verkleinern die Zellen im Schaum erheblich. Sie machen ein Prozent des Gewichts des Polystyrol-Schaums aus. (Quelle: Lehrstuhl Polymere Werkstoffe, Universität Bayreuth).

Beispiele aus der BMBF-Förderung: Nanotechnologie im Bauwesen

Dr. Ralf Fellenberg, VDI Technologiezentrum GmbH

Die zunehmende Urbanisierung vor dem Hintergrund von notwendiger Ressourcen- und Energieeffizienz erfordert gezielt neue Werkstoffe und Technologien zu erforschen, die für das zukünftige Bauen und Wohnen und damit zusammenhängende Infrastrukturen wichtig sind. In diesem Kontext ist es dringend geboten, neue Werkstoffe und Materialien zu erarbeiten, um Wohn- und Arbeitsgebäude sowie die Verkehrs- und anderen notwendigen Infrastrukturbauten effizienter zu gestalten bzw. zu sanieren. Die Themenvielfalt für diese Zukunftsmärkte reicht dabei von den Bereichen

Bauplanung, Gebäudetechnik über die dezentrale Energieversorgung und die intelligente Energienutzung bis hin zu Verkehrsinfrastrukturen.

Durch innovative Entwicklungen der Nanotechnologie kann diese Querschnittstechnologie für den gesamten Bausektor genutzt werden. Das BMBF hat hierzu die Fördermaßnahme „Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture“ durchgeführt mit dem Ziel der Entwicklung neuer oder deutlich verbesserter Baustoffe, Materialien, Produkte sowie Verfahren durch die Anwendung von Nanotechnologien. Die thematischen Schwerpunkte der Forschungsarbeiten betrafen folgende Felder:

- **Erhöhung der Haltbarkeit von Gebäudeelementen (z. B. Fassade, Fenster, Türen, Dächer)**
- **Reduzierung des Energiebedarfs durch nanotechnologische Effekte**
- **Verbesserung von Raumklima, Wohnkomfort und Sicherheit**
- **Verbesserung der Energieeffizienz und Langlebigkeit zementgebundener Werkstoffe**
- **Verbesserung der Beständigkeit von Straßenbelägen**

Im Zeitraum von 2008 bis 2013 wurden durch das BMBF 12 Verbundprojekte mit 56 Partnern mit ca. 16 Mio. € gefördert.

Erfolgreich konnte z. B. ein Projekt zur nanoskaligen Aktivierung von Hüttensand und Portlandzement mittels eines innovativen Mahlverfahrens abgeschlossen werden. Der dadurch erreichte Hochleistungs-



Hergestelltes Brückenelement bei der Fa. Runkel (Quelle: Zoz GmbH).

bzw. Ultrahochleistungsbeton mit verbesserten Eigenschaften wurde nach dem Projekt als Demonstrator für ein Brückenelement einer zukünftigen Geh- und Radwegbrücke eingesetzt.

Ebenfalls erfolgreich war das Projekt HelioClean. Dieses beinhaltete die Entwicklung nanotechnologisch funktionalisierter Baustoffe zur solarkatalytischen Luft- und Oberflächenreinigung. Durch eine katalytische Zersetzung von Luftschadstoffen mittels nanotechnologisch funktionalisierter Baustoffoberflächen konnte Sonnenlicht so ausgenutzt werden, dass ein Selbstreinigungseffekt erzielt wird und die Bildung von Biofilmen und die damit verbundene Biokorrosion von Baustoffen verhindert wird. Nach Projektende wurde dazu ein Feldversuch für eine Schallschutzwandbeschichtung an der A1 bei Osnabrück zur NO_x-Reduzierung gemeinsam mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gestartet.



Feldversuch zu photokatalytischer Schallschutzwandbeschichtung (Quelle: Remmers Baustofftechnik GmbH).

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, eine multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton zu gestalten, die deutliche Vorteile aufweist. Diese hoch tragfähige, lärmarme, ressourcenschonende und dauerhafte Betonfahrbahn aus ultrahochfestem Beton (UHPC) könnte die Lebenszykluskosten für Bau, Erhaltung und Nutzung um bis zu 55 % senken. Gleichzeitig lässt sich eine Lärminderung um – 6 Dezibel erreichen, was wirksamer als eine 4 m hohe Lärmschutzwand ist.



Mit Nanopartikeln optimierter UHPC-Feinmörtel mit eingepprägter lärmreduzierender Textur für eine Betonfahrbahn-Nutzschicht (Quelle: Universität Kassel).

Anwendungsfeld	Nanotechnologie-F&E-Aktivitäten	Beispiele von BMBF-Projekten (FKZ)
Bautechnik		
Selbstreinigende Oberflächen	Nanotechnologisch funktionalisierte Baustoffe zur solarkatalytischen Luft- und Oberflächenreinigung (Abbau von Luftschadstoffen und Biofilmen durch dotierte Titandioxid- und Zinkoxidnanopartikel)	03X0069A-H
	Biozidfreie biofilmreduzierende Fassadensysteme durch IR-aktive Farben, Titan- bzw. Siliziumdioxid-Beschichtungen auf keramischen Oberflächen und PCM-Zusätze in Beschichtungen von faserbewehrten Fassadenelementen	1793X09
	Titandioxidmodifizierte Feinbetonrezepturen für Schadstoffabbau und Selbstreinigung von Textilbeton	13N10735-9
Nanooptimierte Polycarbonat-Baustoffe	Dünnschichtsysteme mit nanoskalig vertikalem Schichtaufbau für glasartigen Kratzschutz mit guter Haftung und gutem UV-Schutz bei Polycarbonatplatten	13N10520-4
Zustandsüberwachung von Baustoffen/Bauwerken	Reaktives Markersystems zur Prüfung der Qualität von Tiefenhydrophobierungen nanoporöser, zementgebundener Werkstoffe	13N10648-52
Nanooptimierter Beton und Bindemittel	Nanoskalierte Bindemittelmatrixen mit Hilfe der Suspensionsbetontechnologie, um den Anteil der Zementklinker herabzusetzen und Energie- und CO ₂ einsparen zu können	13N10365-8
	Futur-Zement – Nanoskalige Aktivierung von Hüttensand und Portlandzement mittels eines innovativen Mahlverfahrens zur Erzeugung von Hochleistungs- und Ultrahochleistungsbeton mit verbesserten Eigenschaften	03X0068A-C
	Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton	13N10492-500
Thermische Isolierung	Entwicklung von Wärmedämmsystemkomponenten und -oberflächen auf der Basis von nanoskaligen Hochleistungs-IR-Trübungsmitteln zur Reduzierung des Wärmestrahlungstransports in Dämmsystemen sowie von Pigmenten mit nanoskaligen Beschichtungen für niedrig-emittierende Farben	03X0071A-D
Textiltechnik		
Oberflächenfunktionalisierung von Garnen und Textilien	Permanente antimikrobielle Schichten auf Garnen und textilen Flächen	03WKBR7A-G
	Funktionalisierung und Strukturierung einer Textiloberfläche mit Nanopartikeln zur gezielten Abweisung von Trockenschmutz und Verbesserung der Abreinigungseigenschaften	17PNT029
	Funktionalisierung von technischen Textilien mit wasserbasierten nanoskaligen Beschichtungssolen	03X0121A-F
	Funktionalisierung von technischen Textilien mit wasserbasierten nanoskaligen Beschichtungssolen	03X0121A-F
Textilmembranen und -filter	Neuartige atmungsaktive Membranen auf Basis von Elastomeren und nachwachsenden Biomaterialien wie Zellulose und Lignin	01QE1010
	Nanostrukturierte Textilfasersysteme als Hochleistungsreaktivgas- und Flüssigkeitsfilter	03X0126A-D
Textilintegrierte Elektronik	Korrosionsstabile textilbasierte Solarzellen	16SV4042-5
	Technologieplattform für textilbasierte organische Lichtquellen und adressierbare Leuchtextilien	16SV4038-41

Übersicht zu Forschungsthemen im Rahmen der nanotechnologiebezogenen Verbundprojektförderung des BMBF (Projektende nach 2011), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen. Weitere Infos im Förderkatalog des Bundes (<http://foerderportal.bund.de/foekat>) z. B. unter Angabe des Förderkennzeichens (FKZ).

Textiltechnik

Die Textilbranche in Deutschland besteht aus rund 1200 Unternehmen, die vom Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V. repräsentiert werden. Die wirtschaftliche Entwicklung ist in den

letzten Jahren weitgehend unverändert. Die Branche beschäftigte im Jahr 2012 rund 120.000 Mitarbeiter und erzielte einen Umsatz von 28 Mrd. €. Die deutsche Textilindustrie ist führend in Europa und weist eine Forschungsquote von ca. 2,5 % auf.

Gastbeitrag: Nanotechnologie-Anwendungen in der Textiltechnik

J. Beringer, T. Hammer, Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH; V. v. Arnim, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf; K. Jansen, Forschungskuratorium Textil

In den letzten zwei Jahren fand in punkto Anwendung von Nanomaterialien in Textilien eine gewisse Konsolidierung statt. Auf dem Markt haben sich mittlerweile nur solche Produkte durchgesetzt, die einen klar vorhandenen und ausreichend haltbaren nanoeffekt aufweisen sowie ökonomisch sinnvoll sind. Die Anwendungsfelder der Nanotechnologie umfassen heute hochwertige funktionalisierte Bekleidungstextilien wie auch technische Textilien.

Bei Bekleidungstextilien sind schmutzabweisende Kleidung (z. B. Krawatten, Oberbekleidung) auf Basis nanotechnologischer Beschichtungen/Imprägniermitteln sowie hygienische, antibakterielle Eigenschaften auf Basis eingearbeiteter Nanosilberpartikel (z. B. für Socken, Sportunterwäsche, Heimtextilien etc.) die Hauptanwendungen.

Im Bereich der hochinnovativen technischen 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 antibakteriellen Eigenschaften auf Basis von Silber-Nanobeschichtungen oder in der Umwelttechnik durch hocheffiziente Filtermedien für Umweltschadstoffe. Auch Markisen mit superhydrophober nanostrukturierter Oberflächenmodifizierung sind ein weiteres aktuelles Anwendungsfeld.

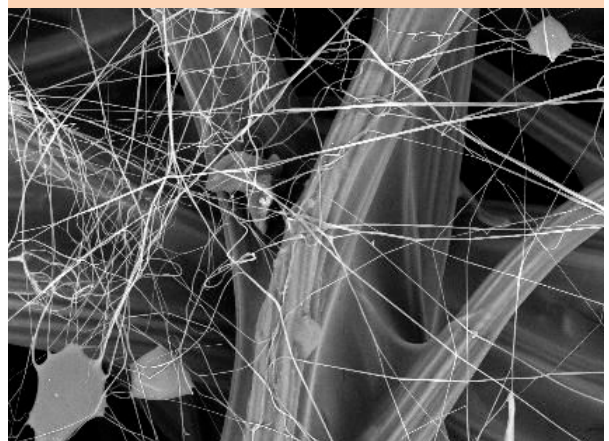
In laufenden Forschungsarbeiten werden u. a. nanoskalige Füllstoffe untersucht, durch die sich Textilfasern mit spezifischen Funktionen ausstatten lassen, wie beispielsweise elektrisch leitfähige und antistatische Textilfasern durch Einarbeitung von nano-Kohlenstoffmodifikationen oder die Abschirmung elektromagnetischer Strahlung (IR-/Mikro-/Radiowellen) durch transparente leitfähige Schichten (z. B. auf Basis von ITO-Nanopartikeln).



Superhydrophobes nanostrukturiertes Textil. (Quelle: Hohenstein Institut).

Beispiele aus der BMBF-Fördermaßnahme NanoTextil

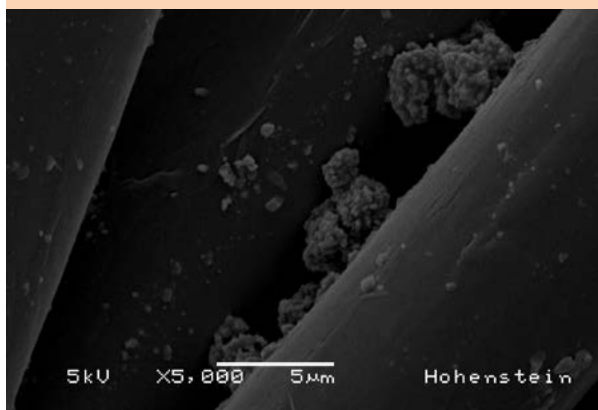
In der Fördermaßnahme „Nanotextil – Nanotechnologien für textile Anwendungen“ des BMBF wurde ein Forschungsschwerpunkt auf faserbasierte Werkstoffe gesetzt. Unter anderem wurden nanostrukturierte Emulsionsfilter für effizientere Dieselmotoren und Abwasseraufbereitungsanlagen entwickelt. Waschbeständige, ökologisch unbedenkliche Flammenschutzsysteme für Textilien wurden auf Sol-Gel-Basis erprobt. Für wirksamere Luftfilter wurden neue Verfahren zur Feinstfaserherstellung entwickelt. Verlängerte Nutzungsdauern hoch abrasiv beanspruchter Gewebe wurden durch neue nanopartikuläre Beschichtungssysteme erzielt.



PAN Nanofasern auf Cellulosevlies als Filtermedium. (Quelle: ITV Denkendorf).

Beispiele aus der BMBF-Fördermaßnahme NanoNature

Die Fördermaßnahme „NanoNature: Nanotechnologien für den Umweltschutz – Auswirkungen synthetischer Nanomaterialien auf die Umwelt“ legte einen seiner Schwerpunkte auf die Erforschung möglicher Auswirkungen synthetischer Nanomaterialien auf die Umwelt. Das in diesem Programm geförderte Projekt „UMSICHT – Abschätzung der Umweltgefährdung durch Silber-Nanomaterialien: vom chemischen Partikel bis zum technischen Produkt“ untersuchte u. a. Verhalten, Verbleib und Wirkung von Silbernanopartikeln aus Abrieb und Wäsche von Textilien in der Umwelt. Im Vorhaben arbeitete ein größeres Konsortium aus Universitäten, Forschungsinstitutionen und Industrievertretern entlang der gesamten textilen Kette zusammen. Ziel war es, klare Empfehlungen für die Entwicklungen nanosilberhaltiger Textilien abzugeben. Diese sollen dazu führen, dass die Produkte zum einen den gewünschten Zweck dauerhaft erfüllen, zum anderen eine Beeinträchtigung von Mikroorganismen und ihren nachgeschalteten Nahrungsnetzen in der Umwelt mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

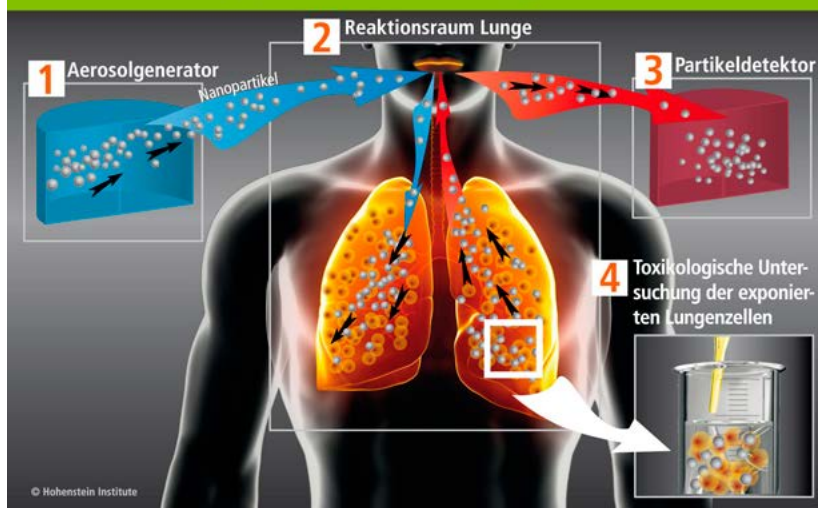


Nanosilber Agglomerate auf Textilfasern. (Quelle: Hohenstein Institut).

Weitere Förderinitiativen

Im Forschungsprojekt „TechnoTox“ – vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft des Land Baden-Württemberg auf Initiative der Allianz Faserbasierte Werkstoffe e. V. gefördert – wurde die Sicherheit textiler Nano-Produkte untersucht. Dabei wurden Daten zum Verhalten, Verbleib und zur biologischen Wirkung

Prinzip des Technotox Lungenmodells



Lungenmodell Forschungsprojekt Technotox (Quelle: Hohenstein Institut).

nano-funktionalisierter faserbasierter Werkstoffe in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen erarbeitet und eine exemplarische Risikoabschätzung durchgeführt. Dabei kamen modernste Untersuchungsmethoden der Human- und Ökotoxikologie zum Einsatz, unter anderem ein eigens entwickeltes Lungenmodell zur Simulation der Exposition über die Atemluft. Die Forscher gaben klar Entwarnung, da bei den untersuchten Proben keine Anhaltspunkte gefunden werden konnten, die ein erhöhtes Risiko für Mensch und Umwelt belegen.

Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Die Nanotechnologie eröffnet für die Textilbranche weiterhin 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 mehr denn je im sicheren Umgang mit Nanomaterialien. Begleitende Untersuchungen zu human- und ökotoxikologischen Sicherheitsaspekten sind bei allen Neuentwicklungen und Forschungsprojekten zu nano-Textilien hinsichtlich der gesellschaftlichen Akzeptanz notwendig und somit ein fester Bestandteil nachhaltiger Entwicklungen der Forschungsinstitute und Hersteller. Die potentiellen

Einflüsse von Nanosilbermaterialien als antibakterieller Wirkstoff im Textilbereich auf den Menschen und die Umwelt wurden in den letzten Jahren im Rahmen der oben aufgeführten Forschungsprojekte detailliert untersucht.

Eine anhaltende Herausforderung liegt in der weiteren Etablierung von positiv besetzten nano-Qualitätssiegeln, die die Funktionalität und Haltbarkeit nanotechnologischer Entwicklungen nach objektiven Prüfkriterien messbar machen, 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 wird über den DIN ein Normungsantrag zur Entwicklung eines Prüfkonzepes für Textilien mit Nanokompositausrüstung gegenwärtig in die ISO Normung eingebracht.

Weitere Beispiele für BMBF-Fördermaßnahmen: „Nano-Textil – Nanotechnologien für textile Anwendungen“ und „NanoMat-Textil – Technische Textilien für innovative Anwendungen und Produkte“

Dr. Andrea Geschewski, Projektträger Jülich

Technische Textilien haben bereits heute den größten Anteil an der Textilproduktion in Deutschland, und dieser Markt wächst! Innerhalb von Europa nimmt Deutschland im Marktsegment technische Textilien eine Spitzenstellung ein. Diese Position soll durch die Entwicklung neuer oder deutlich verbesserter technischer Textilien gestärkt und weiter ausgebaut werden. Dazu können Schlüsseltechnologien, zu denen auch die Nanotechnologie gehört, zielführend eingesetzt werden. Die Nanotechnologie als Schlüssel- und Querschnittstechnologie eröffnet somit attraktive Marktpotenziale für deutsche Textilunternehmen, deren Erfolg am Markt entscheidend von der Innovationskraft ihrer Produkte abhängt. Um dies zu unterstützen, wurde vom BMBF im Jahr 2007 die Fördermaßnahme „Nano-Textil – Nanotechnologien für textile Anwendungen“ gestartet.

In der Fördermaßnahme wurden industrielle Verbundprojekte gefördert, die zur Entwicklung von neuen oder deutlich verbesserten Textilien und Verfahren

führten. Dabei wurde gleichzeitig ein sicherer Umgang mit der Nanotechnologie gewährleistet. Im Vordergrund standen dabei die Bereiche Medizintechnik, Automobil, textile Architektur, Bauwesen, Gesundheit, Hygiene, Funktionsbekleidung sowie Umwelt- und Sicherheitstechnologien. In der Fördermaßnahme wurden insgesamt 12 Verbundvorhaben mit einem Förder volumen von etwa 13 Mio. € gefördert. Eingebunden in die Projekte waren 67 Partner, davon 27 Großunternehmen, 18 KMU und 22 Forschungseinrichtungen, die neue Wege beschreiten, um Nanotechnologien für textile Anwendungen nutzbar zu machen.

Im Jahr 2012 wurde die Fördermaßnahme „Nano-Textil“ durch die Förderinitiative „NanoMatTextil“ als Bestandteil der Hightech-Strategie der Bundesregierung weiter entwickelt. Mit dieser Fördermaßnahme soll die Entwicklung neuer Fasermaterialien, Textilausrüstungen und Oberflächenfunktionalisierungen sowie Textilstrukturen unterstützt werden. Dabei stellt das hohe wirtschaftliche Potenzial der neu erarbeiteten Lösungen die Motivation für das Engagement dar. In der Fördermaßnahme wurden 58 Vorschläge eingereicht, von denen 15 Vorschläge ausgewählt und zur Antragstellung aufgefordert wurden. Von diesen wurden im Jahr 2013 acht Verbundprojekte gestartet. Alle anderen Vorhaben werden im Jahr 2014 zur Bewilligung geführt.

Eines der bewilligten Verbundprojekte trägt den Namen „Entwicklung von nanoadditivierten Polyamid-Vliesstoffverbünden zur Erhöhung der Laufzeit und Verbesserung der Energieeffizienz am Beispiel von abrasionsbeständigen Pressenfilzen – HighReF“. In dem Verbundvorhaben sollen nanomodifizierte Kunststoff-Fasern zur Herstellung von Pressenfilzen für den Einsatz in Papiermaschinen mit verbesserter Abrasionsbeständigkeit und verringertem Energiebedarf im Endeinsatz entwickelt werden. Dazu sind neue Nanoverbundmaterialien zu entwickeln, die als Ausgangsmaterial zur Faserherstellung eingesetzt werden können. Anhand eines Demonstrators ist der Nachweis zu erbringen, dass sich aus den Fasern geeignete Vliesstoffe als Pressenfilze herstellen lassen. Auf dem Weltmarkt haben deutsche Pressenfilze für den Pressen-Teil von Papiermaschinen große Bedeutung. Die kontinuierliche Weiterentwicklung dieser Besspannungen und die Verbesserung der Produktperformance sind der

Schlüssel zum Erhalt und Ausbau dieser Marktposition. Durch die zu entwickelnden neuen Materialien werden die Produktlaufzeiten der textilen Bspannungen in den Papiermaschinen erhöht und zusätzlich wird der Energieverbrauch verringert. Die Projektergebnisse sind allgemein auf andere Vliesstoffe übertragbar, so dass mit einer hohen Hebelwirkung für die deutsche Textilindustrie zu rechnen ist.

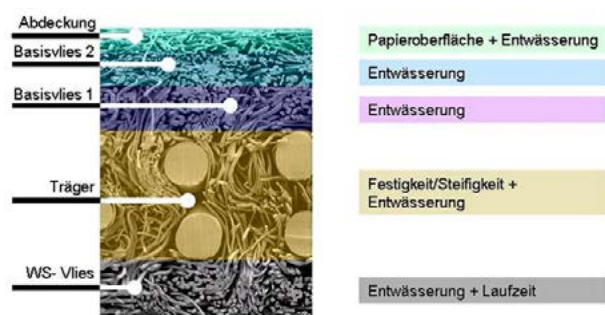


Abbildung: Prinzipieller Aufbau eines Pressenfilzes (Quelle: Heimbach GmbH & Co. KG).

4 Sozioökonomische Rahmenbedingungen

Der Markterfolg nanotechnologischer Innovationen hängt in hohem Maße von den sozioökonomischen Rahmenbedingungen auf nationaler und internationaler Ebene ab. Wesentliche Faktoren sind hierbei die öffentliche Forschungsförderung in Deutschland und in Europa, Netzwerkbildung und Kooperationen, die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, der sichere Umgang mit Nanomaterialien durch Risikoforschung, Risikomanagement und Regulierung, die Information und Kommunikation mit der Öffentlichkeit sowie die internationale Abstimmung und Standardisierung. In den folgenden Abschnitten werden aktuelle Entwicklungen in den Bereichen durch Beiträge ausgewiesener Experten im jeweiligen Fachgebiet dargestellt.

4.1 Nationale Forschungsförderung

Öffentliche Forschungsförderung der Nanotechnologie in Deutschland

Dr. Gerd Bachmann, VDI Technologiezentrum GmbH

Förderaktivitäten der Bundesregierung

Im Jahr 2006 startete die Bundesregierung die High-Tech-Strategie, um Beiträge zur Lösung globaler Herausforderungen zu leisten, aber u. a. auch, weil Deutschland als exportorientiertes Land mit wenig eigenen natürlichen Ressourcen auf industrielle Konkurrenzfähigkeit auf den zukünftigen globalen Märkten angewiesen ist. Diese HighTech-Strategie zielt auf eine koordinierte F&E-Politik und auf Innovationen in gesellschaftlich wichtigen Bereichen wie Medizin, Klima, Energie, Umwelt, Mobilität und Kommunikation. Da im HighTech-Bereich die Nanotechnologie zunehmende Bedeutung erlangt und um die bestehenden Potenziale für Deutschland besser zu nutzen sowie die Wertschöpfungsketten innovationsorientiert auszurichten, wurde ebenfalls ab 2006 die Arbeit von acht Bundesministerien im Rahmen des „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“ fokussiert und vorangetrieben. Unter der Federführung des Bundesministeriums

für Forschung und Technologie (BMBF) sind an der Umsetzung des Aktionsplans die Bundesministerien für Arbeit und Soziales (BMAS), Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Gesundheit (BMG), Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Verteidigung (BMVg) und Wirtschaft und Technologie (BMWi) beteiligt. Der Aktionsplan vereint unter einem gemeinsamen Ansatz verschiedene Aktivitäten zur KMU-Förderung, zu neuen Leitinnovationen, zur Risikoforschung und zum umfassenden Dialog mit der Öffentlichkeit zu den Chancen und Auswirkungen der Nanotechnologie.

Anfang 2011 hat die Bundesregierung durch eine weitere koordinierte Aktivität ihres Ressortkreises in Fortführung der guten und verantwortlichen Zusammenarbeit aller Akteure aus Forschung, Bildung, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft den „Aktionsplan Nanotechnologie 2015“ vorgelegt, um im Rahmen einer gemeinsamen Plattform die Chancen der Nanotechnologie auch weiterhin durch eine sichere, nachhaltige und erfolgreiche Nutzung zu gewährleisten. Darin sind die wirtschaftliche Verwertung, der verantwortliche Umgang mit Material und Technik, die Verbesserung der Rahmenbedingungen und die öffentliche Diskussion die hauptsächlich adressierten Faktoren. Die zugehörigen Förderaktivitäten werden von den individuellen Arbeitseinheiten der Ministerien eigenverantwortlich durchgeführt. Im Rahmen des Ressortkreises findet ein regelmäßiger Informationsaustausch über diese Aktivitäten statt, gemeinsam durchführbare Strategien werden diskutiert und der jeweils aktuelle Stand der Regulierungsdiskussion wird erörtert. Auf Basis der Ergebnisse der Nanorisikoforschung ist die Politik gefordert, angemessene regulatorische Rahmensetzungen zu schaffen, um einen sicheren und verantwortlichen Umgang mit Nanomaterialien zu gewährleisten, ohne dabei Innovationen und die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Industrie über das notwendige Maß hinaus einzuschränken. Neben dem Ressortkreis hat sich ein Länderkreis Nanotechnologie als weiteres Diskussions- und Informationsaustauschnetz gebildet. Darin sind Forschungsförderer der Bundesländer eingebunden, welche die Bundesregierung und sich

untereinander über ihre Aktivitäten informieren, aber auch ausloten, welche Potenziale für ein gemeinsames Vorgehen bestehen, bspw. bei internationalen Messeauftritten, zukünftiger Abstimmung von Fördermaßnahmen oder bei Bund-Länder abgestimmten Förderstrategien.

Förderaktivitäten des BMBF

Die Nanotechnologieforschung und -entwicklung wird durch das BMBF schon seit mehr als 20 Jahren gefördert. Waren zu Beginn der Förderung die Vorhaben noch stark grundlagenlastig, so konnte mit zunehmender Förderung eine stärker werdende Anwendungsrelevanz festgestellt werden. Mit den Verbundprojekten wurde die Vernetzung der Industrie, vornehmlich KMU, mit der Wissenschaft gestartet, um auf kurzen Wegen FuE-Ergebnisse in Anwendungen zu transferieren. Bereits seit 2006 wird die Nanorisikoforschung verstärkt gefördert. Zur Erforschung der Auswirkungen von synthetischen Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt arbeiten Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Industrie interdisziplinär zusammen. Schwerpunkte der Projekte sind umfassende Untersuchungen zur Wirkung synthetischer Nanomaterialien auf den Menschen und die Umwelt sowie die Forschung für einen verantwortungsvollen Einsatz der Nanotechnologie. Nach 2006 sind als neues Förderinstrument Innovationsallianzen mit Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik gegründet worden, welche Bereiche mit globaler Marktperspektive adressieren und durch eine strategisch angelegte Langfristperspektive eine maßgebliche volkswirtschaftliche Hebelwirkung erzielen sollen. Solche Innovationsallianzen mit Bezug zur Nanotechnologie wurden für die Themen Organische Leuchtdioden (OLED), organische Photovoltaik (OPV), Carbon-Nanotubes (Inno.CNT), Lithium-Ionenbatterien (LiB2015) und molekulare Bildgebung (MoBi-Tech) gestartet. Das BMBF-Förderportfolio ergänzend werden auch Spitzen- und Exzellenzcluster gefördert, welche teilweise nanotechnologische Fragestellungen bearbeiten.

Neben der Forschungsförderung sind für eine erfolgreiche Innovationspolitik auch themenangepasste Begleitmaßnahmen von Wichtigkeit. Diese werden bereits von Beginn der Themenadressierung an, also bereits seit Anfang der 90er Jahre, in Form von Technologiefrüherkennung, Innovations- und Technika-

analysen sowie innovationsbegleitenden Maßnahmen durchgeführt. Darunter fallen Förderaktivitäten wie der nanoTruck, die Erstellung allgemein verständlicher Broschüren und Informationsportale oder auch Vortragsgespräche mit Bürgern und Interessensvertretern. Weiterhin werden Querschnittaktivitäten zur gezielten Unterstützung von KMU (KMU-innovativ Nanotechnologie, früher NanoChance) und zur Förderung von Nachwuchswissenschaftlern (NanoMatFutur, früher NanoFutur) durchgeführt. Verschiedene Begleitmaßnahmen befassen sich mit Sicherheitsfragen von Nanomaterialien und mit der Vermittlung von Fachinformationen. So können Bürger sich im nanoTruck oder auf der DaNa-Webseite (www.nanopartikel.info) über Chancen und Risiken der Nanotechnologie informieren. Dieses Internetportal stellt auch dem Laien allgemeinverständliche Informationen zur Verfügung und ermöglicht den Austausch mit Wissenschaftlern. Ein weiterer Teil der Begleitmaßnahmen ist die Arbeit der Nationalen Kontaktstelle (NKS) Nanotechnologie, die im Auftrag des BMBF deutsche Antragsteller in EU-Ausschreibungen berät.

Die Forschungsförderung des BMBF belief sich in 2011 auf ca. 222 Mio. € in der Projektförderung, inklusive der innovationsbegleitenden Maßnahmen. Insgesamt waren 26 BMBF-Referate quer über alle Abteilungen an der Förderung von etwa 1700 Einzelvorhaben beteiligt. 43 % der Fördermittel gingen an die Industrie, 57 % an öffentliche Forschungseinrichtungen. Der Bereich Neue Werkstoffe und Nanotechnologie stellte mit fast 40 % Förderanteil den größten Teil dieser Fördersumme. Von den Fördermitteln wurden in 2011 etwa 18 Mio. € für ca. 170 Vorhaben der Vorsorge- und Begleitforschung bei NanoCare, NanoNature und zu innovationsbegleitenden Maßnahmen des BMBF eingesetzt.

Gesamtdarstellung der deutschen Förderinvestitionen in die Nanotechnologie

Neben den bereits spezifizierten Fördermitteln des BMBF in Höhe von fast 222 Mio. € in 2011 gaben die anderen am Ressortkreis beteiligten Bundesressorts im gleichen Jahr etwa 45 Mio. € für nanotechnologische F&E aus. Damit wurden von den Bundesressorts in 2011 insgesamt etwas mehr als 266 Mio. € zur Unterstützung von Nanoprojekten aufgewendet. Darin enthalten sind etwa 26 Mio. € Ausgaben für Vorsorge- und

Risikoforschung sowie Begleitmaßnahmen, was fast 10 % der Fördersumme der Bundesressorts entspricht.

Fördermittel in Mio. €	Jahr 2009	Jahr 2010	Jahr 2011
Gesamt Bundesressorts	247,6	252,8	266,3
BMBF	212	215,5	221,6
Weitere Bundesressorts	35,6	37,3	44,7
Bundesländer	59,1	67,1	79,9
Institutionelle Förderer	178,4	250,2	279,3
Sonstige (VW-Stiftung)	5	5	5
Gesamt Deutschland	490,1	575,1	630,5

Entwicklung der öffentlichen Fördermittel der Nanotechnologie in Deutschland im Zeitraum 2009 bis 2011 (Quelle: VDI TZ).^[160]

Zur Gesamtdarstellung der Nanotechnologieförderung Deutschlands kommen auch die Aktivitäten der Bundesländer hinzu. Alle Bundesländer zusammen haben in 2011 etwa 80 Mio. € für landesbezogene Förderaktivitäten zur Nanotechnologie aufgewendet. Desweiteren werden von Bund und Ländern gemeinsam F&E-Einrichtungen auch über die institutionelle Förderung unterstützt. Dabei ist die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Feld der Nanotechnologie die größte Förderorganisation. Weiterhin werden über die institutionelle Förderung die Forschungsgemeinschaften von Helmholtz und Leibniz sowie die Max-Planck- und die Fraunhofer-Gesellschaft finanziert. 2011 wurden ca. 279 Mio. € im Bereich der institutionellen Förderung für nanobezogene Aktivitäten verausgabt. Zudem kann als relevanter Vertreter der bundesweiten Stiftungen die Volkswagen-Stiftung mit 5 Mio. € angeführt werden.

Zusammen genommen ergibt sich somit für Deutschland eine Gesamtsumme der Nanotechnologieförderung der öffentlichen Hand für 2011 von etwa 630 Mio. €. Für die Förderentwicklung in 2012 und 2013 kann angenommen werden, dass die Ausgaben für die Nanotechnologie mindestens in gleicher Höhe fortgeführt werden.

4.2 Netzwerkbildung und Kooperationen



Leibniz Netzwerk Nano – Ein Netzwerk von Leibniz-Instituten mit Aktivitäten in der Nanotechnologie

Dr. Mario Quilitz, INM Saarbrücken,
Koordinator des Leibniz-Netzwerk Nano

In den 86 Institutionen der Leibniz-Gemeinschaft beschäftigen sich viele Institute mit Forschungsthemen aus dem Bereich der Nanotechnologie. Dies legte die Gründung eines Leibniz Netzwerkes Nano nahe, das das Know-how und die diesbezüglichen Aktivitäten in der Leibniz-Gemeinschaft bündeln sollte. Das Koordinationsbüro des Netzwerkes sitzt am INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien in Saarbrücken. Der Sprecher des Netzwerkes, in dem zur Zeit 15 Institute mitarbeiten, ist Prof. Dr. Eduard Arzt, die Koordination liegt bei Dr. Mario Quilitz.



Partnerinstitute im Leibniz-Netzwerk Nano (Quelle: INM).

Die in den Partnerinstituten untersuchten Themen sind bereits jetzt ausgesprochen vielfältig: Oberflä-

chen mit besonderen funktionellen Eigenschaften ermöglichen zum Beispiel schaltbare Haftung oder spezielle katalytische Wirkung. Auf den Gebieten der Nanoelektronik, Nanosensorik und Nanooptik werden neue Lösungen beispielsweise in gedruckter Elektronik, in chemischen oder magnetischen Sensoren, oder in Halbleitermodulen mit speziellen elektronischen Eigenschaften entwickelt. Ebenfalls ein wichtiges Gebiet stellt die Betrachtung analytischer Methoden und ihrer Leistungsfähigkeit für Untersuchungen im Nanometerbereich dar. Weitere prominente Schwerpunkte liegen schliesslich in der Nanomedizin, Nanobiologie und Nanosicherheit.



Herstellung nanoskaliger Schichten im Pilotmassstab (Quelle: INM, Uwe Bellhäuser, das bilderwerk).

Ein zentrales Ziel des Leibniz Netzwerks Nano besteht darin, die Sichtbarkeit der Aktivitäten und Akteure in der Nanotechnologie innerhalb der Leibniz-Gemeinschaft zu erhöhen. Mehr noch ist es jedoch von Bedeutung, dass das Netzwerk auch für Partner und Interessenten ausserhalb der Leibniz-Gemeinschaft zum zentralen Ansprechpartner für alle „Nano“-Themen in der Gemeinschaft wird.

Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Sammlung von Informationen über die im Netzwerk gebündelten Kompetenzen, die Erstellung einer „Kompetenzmatrix“ und ihre Vermittlung an interessierte Parteien. Dazu

gehört auch die Vermittlung potenzieller Projektpartner innerhalb des Verbundes und nach außen.

Last but not least kann das Netzwerk gemeinsame Aktivitäten initiieren oder organisieren. Hier wären Workshops, Seminare, gemeinsame Messebeteiligungen und Ausstellungen zu nennen.

Das gemeinsame Interesse an Fragen zur Nanosicherheit führte 2013 zur Gründung eines Forschungsverbunds Nanosicherheit, in dem sich sechs Institute zusammengefunden haben. Sie versuchen Fragen zu beantworten wie: Wie sicher sind Nanomaterialien im Kontakt mit menschlichen Zellen, Geweben und Organen? Wie werden die Partikel gegebenenfalls in Zellen aufgenommen? Werden die Zellen geschädigt oder sterben sie? Welche Lehren lassen sich ggf. für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien ziehen?



Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie

Prof. Dr. Günter Tovar, Fraunhofer IGB

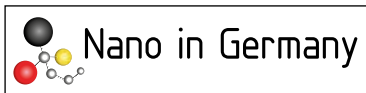
Sprecher der Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie

Die Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie (Fraunhofer NANOTECH) wird als Kooperationsplattform von 20 Fraunhofer-Instituten mit unterschiedlichen Kompetenzen gemeinsam betrieben. Fraunhofer ist die größte Organisation für anwendungsorientierte Forschung in Europa. Unsere Forschungsfelder richten sich nach den Bedürfnissen der Menschen: Gesundheit, Sicherheit, Kommunikation, Mobilität, Energie und Umwelt.

Fraunhofer NANOTECH deckt die gesamte Wertschöpfungskette von der anwendungsorientierten Forschung bis zur industriellen Umsetzung ab. Hierbei werden zum Beispiel multifunktionale Schichten für optische Anwendungen, den Automobilbau und die Elektroindustrie entwickelt. Metallische und oxidische Nanopartikel, Kohlenstoff-Nanoröhren und Nanokomposite werden in Aktuatoren, strukturellen Werkstoffen und biomedizinischen Anwendungen eingesetzt. Die Kompetenzen der Allianz sind in folgender Grafik abgebildet.

Fraunhofer-Institute die sich an der Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie beteiligen und deren Arbeitsfelder	Nanomaterialien/Nanochemie	Nanopartikel/Nanofluid	Dünnschichten/Grenzflächen	Nanooptik/Nanoelektronik	Nanobiotechnologie	Querschnittsthemen		
						Modellierung/Simulation	Analytik, Werkzeuge, Sicherheit	Produktionstechnologien, Technologietransfer, Beratung
Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS), Chemnitz								
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart								
Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP), Golm								
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfinztal								
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen								
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF), Magdeburg								
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB), Stuttgart								
Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB), Erlangen								
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologie und Strukturkeramik (IKTS), Dresden								
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Aachen								
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart								
Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung (ISC), Würzburg								
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg								
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe								
Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM), Hannover								
Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV), Freising								
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM), Halle/Freiburg								
Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS), Dresden								
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Saarbrücken/Dresden								
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF), Darmstadt								

Fraunhofer NANOTECH ist ein aktiver Teilnehmer an Dialogprozessen zur Nanotechnologie (Nanodialog), organisiert Messeauftritte der Allianz, erarbeitet Handlungsempfehlungen im Umgang mit Nanomaterialien, veranstaltet Industrieworkshops zu aktuellen Themen der Nanotechnologie und beteiligt sich aktiv an der Nachwuchsförderung. Weitere Informationen zur Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie im Internet unter www.nano.fraunhofer.de.



Initiative „Nano in Germany“

Prof. Dr. Andreas Leson, Fraunhofer IWS, Dresden,
Sprecher der Initiative „Nano in Germany“

Die Nanotechnologie zeichnet sich dadurch aus, dass eine Vielzahl der klassischen Disziplinen, wie beispielsweise die Physik, die Chemie, die Biologie und auch die Ingenieurwissenschaften, involviert sind. Dieser hohe Grad an Interdisziplinarität macht die Nanotechnologie einerseits spannend, da neue Entwicklungen gerade auch an den Schnittstellen entstehen. Auf der anderen Seite erfordert dies auch eine besonders intensive Zusammenarbeit und Kooperation aller an der Wertschöpfungskette beteiligten Akteure, um zielgerichtet zu neuen Innovationen zu kommen und diese zu vermarkten.

Nicht zuletzt aus diesem Grunde wurden in der Startphase der Nanotechnologie die Kompetenzzentren gegründet und gefördert, die sich um die gezielte Stärkung der interdisziplinären Kooperation und Vernetzung kümmern, und die zum großen Teil auch heute noch aktiv sind. Zudem haben sich eine Vielzahl weiterer Initiativen auf regionaler wie auch Landesebene gegründet, um diesen Zielen Rechnung zu tragen.

Mit der Absicht, diese vielfältigen Aktivitäten unter einem Dach auf nationaler Ebene zu bündeln, wurde 2012 die Initiative „Nano in Germany“ gegründet. Diese hat sich zum Ziel gesetzt, den Akteuren in Deutschland ein gemeinsames Sprachrohr sowie eine neutrale und objektive Plattform zu bieten, mit der durch ein gemeinsames Handeln eine bessere Sichtbarkeit auf nationaler wie internationaler Ebene erzielt werden soll. Auch geht es der Initiative darum, relevante und verlässliche Informationen zu erheben und aufzuarbeiten, und damit die Mitglieder zu unterstützen. Zudem soll eine erhöhte Akzeptanz der Nanotechnologie in der öffentlichen Wahrnehmung erreicht werden.

Zu den Gründungsmitgliedern der Initiative gehören die Unternehmen Beiersdorf GmbH und die Agentur RunKom, die Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie und der IVAM Fachverband für Mikrotechnik,

der Verein Deutscher Ingenieure mit seinem Fachbereich Nanotechnik sowie der VDI Technologiezentrum GmbH und der Deutsche Verband Nanotechnologie. Die Geschäftsstelle der Initiative ist beim Verein Deutscher Ingenieure angesiedelt. Aktuell haben sich mehr als 100 Mitglieder aus Industrie, Forschung und Wissenschaft der Initiative angeschlossen. Besonderes Augenmerk liegt auf der Entwicklung und Durchführung gemeinsamer Marketing-Aktivitäten wie beispielsweise mit der „World of Nano“ zur Hannover-Messe Industrie sowie der Strategieentwicklung für die technologischen Herausforderungen der nächsten zehn Jahre.



Deutscher Verband Nanotechnologie e. V.

Dr. Ralph Nonninger, Präsident des DVNano

Die Perspektive für den Standort Deutschland liegt im ökologischen Umbau der Industriegesellschaft. Dieser wird wesentlich durch Nanotechnologien angetrieben. Exzellente Forschung, effizienter Technologietransfer, weitsichtige Wirtschafts- und Bildungspolitik und Unternehmergeist in den Hochtechnologiefeldern sichern die Arbeitsplätze von heute und schaffen die Arbeitsplätze der Zukunft.

Von diesen Überzeugungen geleitet wurde der Deutsche Verband Nanotechnologie e. V. (DV Nano) 2011 in Saarbrücken gegründet. Er ist der Fachverband für alle Menschen, die in den Nanotechnologien arbeiten oder sich für ihre Förderung engagieren. Gleichzeitig ist der Verband insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen offen.

Der DV Nano hat sich zum Ziel gesetzt, die Nanowissenschaften und -technologien überall dort zu fördern, wo sie Lösungen für die gesellschaftlichen Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft anbieten. Dazu zählt der Verband Forschungs- und Anwendungsfelder in Themen wie „Umwelttechnik und Energie“, „Medizintechnik und Pharmazeutik“, „Mobilität“ oder „Information und Kommunikation“.

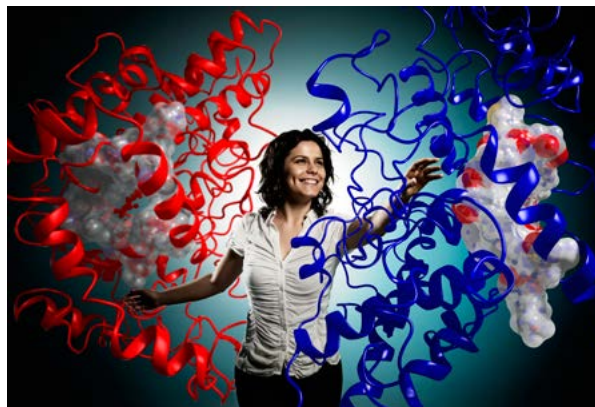
Umwelt- und Verbraucherschutz genießen höchste Priorität und sind deshalb in der Satzung des Verbandes verankert. Der Verband zeigt Wege eines verantwortungsvollen Umganges mit einer Hochtechnologie auf, fördert den Beitrag der Nanotechnologien für eine postnukleare und postfossile Energieversorgung und kommuniziert nanotechnologische Lösungen für sauberes Trinkwasser oder Durchbrüche im Kampf gegen Krankheiten.

Der Verband bündelt die Kompetenzen seiner Mitglieder in Fragen rund um die Nanotechnologien, formuliert dazu seine Positionen und vertritt diese. Weil er unabhängig von politischen und wirtschaftlichen Interessen ist, kann der DV Nano als Ansprechpartner für alle gesellschaftlichen Interessengruppen dienen: Er ist Informations- und Beratungsinstanz für Politiker auf Landes- oder Bundesebene, für Entscheider an Hochschulen und in Unternehmen, aber auch Gesprächspartner für die Öffentlichkeit, für Journalisten und Nichtregierungsorganisationen.

Beraten, kommunizieren, vernetzen – Kern der Verbandsarbeit

Der DV Nano steht als kompetenter Ansprechpartner in allen relevanten Gremien von Ministerien und Behörden bei der Formulierung von Richtlinien und Entscheidungsvorlagen zur Verfügung, etwa im Behörden-dialog oder in den FachDialogen Nanotechnologien der NanoKommission. Der Verband kommuniziert die Chancen, die Potenziale und die tatsächlichen Vorzüge von Nano-Anwendungen und beteiligt sich an der Diskussion über mögliche Risiken und neu aufgeworfene ethische Fragen.

Der Verband vernetzt seine Mitglieder, um ihnen die Möglichkeit zu geben, Technologie- oder Forschungspartner zu finden oder über ihr persönliches Engagement die Zukunft der Nanotechnologien mitzubestimmen. Mit seinen Organen – der Mitglieder-versammlung „Deutscher Nanotag“, dem Vorstand und dem Erweiterten Vorstand – sowie seinen Arbeitskreisen und regionalen Geschäftsstellen verfügt der Deutsche Verband Nanotechnologie über die Strukturen, um die Nanotechnologie Deutschlands zu repräsentieren. Mehr Informationen über den Verband unter www.dv-nano.de



Der Deutsche Verband Nanotechnologie: Für Menschen, die Zukunft gestalten. (Quelle: Uwe Bellhäuser/DV Nano).

4.3 Nachwuchsförderung

NanoMatFutur: Nachwuchsförderung in der Nanotechnologie und den Materialwissenschaften

Dr. Marc Awenius, VDI Technologiezentrum GmbH,
Dr. Hans-Jörg Clar, Projektträger Jülich

Hochqualifizierte und kreative Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler tragen mit ihren Innovationen dazu bei, Unternehmenserfolg zu sichern und eröffnen rohstoffarmen Ländern wie Deutschland die Möglichkeit, im globalen Wettbewerb bestehen zu können. Dies trifft im besonderen Maße auf die Querschnittstechnologien Nanotechnologie und Materialwissenschaften zu, die aufgrund ihrer breiten Anwendung in mehreren Schlüsselbranchen, wie z. B. Chemie- und Automobilindustrie und ihrer Hebelwirkung für neue Technologiefelder eine besondere Bedeutung besitzen. Jedoch erschweren der demographische Wandel und der zunehmende globale Wettbewerb um die besten Köpfe die Gewinnung hochqualifizierter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und stellen für den Wissenschafts- und Industriestandort Deutschland ein ernst zu nehmendes Risiko dar. Die Förderung exzellenter Nachwuchskräfte ist daher von zentraler Bedeutung für die Sicherung sowie den Ausbau einer wissensorientierten Gesellschaft und daher ein wesentlicher Schwerpunkt in der HighTech-Strategie der Bundesregierung.

Fördermaßnahme

Seit 2002 fördert das BMBF gezielt die Gewinnung exzellenter Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler. Mit der 2011 veröffentlichten Exzellenzmaßnahme „NanoMatFutur“ wurde das Themenspektrum der vorhergehenden, auf Nanotechnologie begrenzten Fördermaßnahme „NanoFutur“ (siehe nano-DE-Report 2011), um das wichtige Feld der Werkstoffforschung erweitert. In drei Ausschreibungsrunden fördert das BMBF jedes Jahr bis zu sieben Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler und ermöglicht ihnen den Aufbau einer unabhängigen Nachwuchsgruppe. Die Förderung der Nachwuchsgruppen erfolgt über vier Jahre, kann jedoch nach erfolgreicher Zwischenevaluierung des Projekts auf bis zu sechs Jahre verlängert werden.

Im Fokus der Maßnahme steht die Förderung exzellenter Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler mit neuen interdisziplinären Forschungsansätzen in den Nano- oder Werkstofftechnologien. Neben Grundlagenaspekten müssen geförderte Projekte zusätzlich einen klar erkennbaren Bezug zur industriellen Umsetzung im Bereich Energie, Umwelt/Klima, Mobilität, Gesundheit oder Informations-/Kommunikationstechnik aufweisen. Im Sinne einer Exzellenzförderung eröffnet „NanoMatFutur“ dem wissenschaftlichen Nachwuchs bestmögliche Startbedingungen, schafft neue Anreizeffekte für Rückkehrwillige aus dem Ausland und sichert den dauerhaften Verbleib kreativer Köpfe in Deutschland.

Zwischenstand

Als Ergebnis der ersten beiden Ausschreibungsrunden wurden von 66 Bewerbern insgesamt 14 Nachwuchswissenschaftler und Nachwuchswissenschaftlerinnen für eine Förderung empfohlen. Für die Etablierung einer eigenen Arbeitsgruppe an einer deutschen Universität oder Forschungseinrichtung stellt das BMBF insgesamt 22 Mio. € zur Verfügung. Eine dritte Ausschreibungsrunde läuft seit Oktober 2013. Aktuelle Informationen zur Fördermaßnahme sind unter der Webseite www.nanomatfutur.de oder auf der Homepage des BMBF www.bmbf.de zu finden.



NanoFutur: Eine Erfolgsgeschichte am Beispiel von Prof. Dr. Stefan Kaskel

Kurzprofil

Geboren: 1969 in Bonn

Fachgebiet: Anorganische Chemie

Position: Professor Lehrstuhl für Anorganische Chemie I an der TU Dresden (2004);

Abteilungsleiter Chemische Oberflächen- und Reaktionstechnik, Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahltechnik, Dresden (2008)

Förderung: NanoFutur 2004-2008

Thema: Nanokomposite und Hybridmaterialien

Internetlink: <http://www.chm.tu-dresden.de/ac1/bmbf/index.shtml>

Interview

Herr Professor Kaskel, an welchen wissenschaftlichen Fragestellungen arbeiten Sie derzeit?

Prof. Kaskel: Der Fokus meiner Arbeiten liegt zur Zeit im Bereich der nanoporösen Materialien. Besonders interessiert mich dabei, wie man an unterschiedlichen chemischen Materialsystemen Porengrößen gezielt so einstellen kann, dass die Materialien neue Funktionalitäten erhalten. Im Mittelpunkt steht hier die Aufnahme von Gasen, oder auch die Aufnahme von Flüssigkeiten, Schadstoffen, Enzymen, aber auch die Immobilisierung von Enzymen und Stofftrennung. Damit können poröse Materialien sogar in Batteriesystemen wie zum Beispiel der Lithium-Schwefel-Batterie eingesetzt werden.

Was fasziniert Sie an der Nanotechnologie?

Prof. Kaskel: Generell faszinieren mich Materialien, deren Eigenschaften durch ihre enormen Oberflächen definiert werden. So konnten wir Materialien realisieren, die spezifische Oberflächen von über 5000 m²/g aufweisen. Derartige grenzflächendominierte Ma-

terialien nehmen eine Schlüsselstellung in unterschiedlichen technologischen Konzepten ein, wie z. B. der Katalyse, Batterietechnologien, Adsorption und Speicherverfahren.

Beschreiben Sie bitte ihre berufliche Situation vor der Teilnahme an der BMBF-Fördermaßnahme NanoFutur. Wo stehen Sie heute?

Prof. Kaskel: Zu dieser Zeit war ich Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung und hatte bereits eine kleine Gruppe dort aufgebaut. Zwar waren die Arbeitsbedingungen ausgezeichnet, jedoch konnte ich aus dieser Karrieresituation heraus nur einen begrenzten Themenkreis relevanter Forschungsarbeiten vorantreiben. Heute leite ich sowohl das Institut für Anorganische Chemie an der TU Dresden als auch die Abteilung Chemische Oberflächen- und Reaktionstechnik am Fraunhofer-Institut. Die Kombination von Grundlagenforschung, welche im universitären Bereich durchgeführt werden kann, mit der Integration der von uns entwickelten Materialien in Anwendungen am Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik ermöglicht mir heute, eine Vielzahl unterschiedlicher Schwerpunkte zu setzen. Neugierde und Kreativität ist die Voraussetzung, um wissenschaftlich hochrangige Publikationen voranbringen zu können. Andererseits ermöglicht das Fraunhofer-Institut die Aufskalierung neuartiger Materialien und die Integration in Systeme durch skalierbare Produktionstechniken.

Was waren aus Ihrer Sicht die wesentlichen Erfolgsfaktoren für Ihren Karriereweg?

Prof. Kaskel: Die Gruppenleiterposition am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr war ein ideal geeignetes Startbrett, um eine wissenschaftliche Karriere zu beginnen. Die Tradition des Institutes, Patente in kommerziell erfolgreiche Applikationen zu überführen, war prägend. Die Mentorenschaft durch Ferdi Schüth war für mich hier ebenfalls wegweisend. Darüber hinaus ermöglichte mir jedoch die BMBF-Fördermaßnahme NanoFutur, ein vollkommen eigenständiges Forschungsprofil zu entwickeln, welches eine hohe Attraktivität für innovative Hochschulen bot. Mit dem Transfer des Projektes nach Dresden war zudem der Grundstein für eine erfolgreiche Karriere in Dresden gelegt.

Was können Sie angehenden Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern auf dem Gebiet der Nanotechnologie mit auf den Weg geben?

Prof. Kaskel: Nachwuchswissenschaftler sollten den Mut haben, wirklich neue Themen anzugreifen, die sich deutlich vom Umfeld der Dissertation und, wenn möglich, auch vom Umfeld des Postdocs abheben.

4.4 Sicherer Umgang mit Nanomaterialien

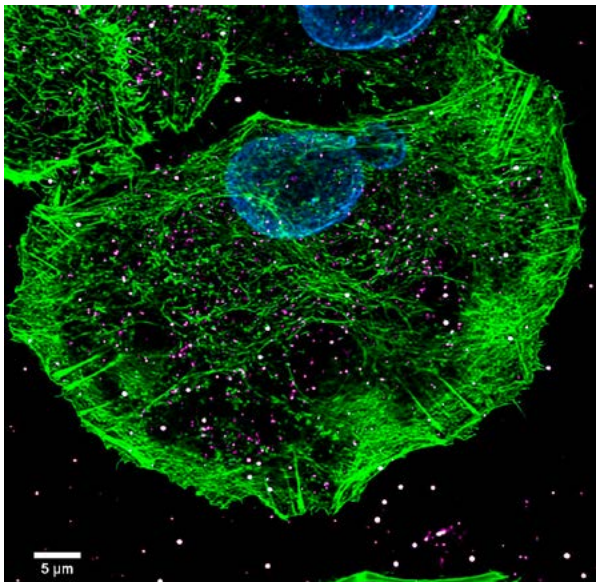
Risikoforschung zu Nanomaterialien

Prof. Dr. Harald F. Krug, Empa, Schweiz

Vor 10 Jahren wurde der erste Bericht in deutscher Sprache herausgegeben, der sich mit der Nanotechnologie als auch mit den Chancen und Risiken dieser neuen Technologie befasste.^[145] Erst ein Jahr später erschien der Beitrag der Royal Society in London, der in aller Welt für aufgeregte Diskussionen sorgte, da hier sehr kritisch zu den Problemen der Sicherheit für Mensch und Umwelt durch synthetische Nanomaterialien Stellung genommen wurde.^[146] Mittlerweile gibt es in nahezu allen Industrieländern einen Aktionsplan Nanotechnologie, in denen auch die Fragen zu den möglichen unerwünschten Folgen der Nanomaterialien meist als nationale Forschungsprogramme enthalten sind. Deutschland nimmt dabei eine Führungsposition ein, da mit der Förderung der ersten großen Projekte im Jahr 2006 frühzeitig Leitplanken für eine koordinierte Risikoforschung zu Nanomaterialien gesetzt wurden. Dabei wurde das Projekt „NanoCare“ zu einem Leuchtturm in Sachen Qualität und Aussagekraft.^[147]

Als Folge der internationalen Diskussion, die sich auch in den Rahmenprogrammen der EU niederschlug, hat es in Deutschland innerhalb des WING-Programms und der HighTech-Strategie weitere Initiativen gegeben. Die wichtigste ist dabei die Neuauflage eines Förderprogrammes zur Erforschung von Nutzen und möglichen Risiken einer Exposition von Mensch und Umwelt gegenüber Nanomaterialien: In den beiden Teilprogrammen „NanoCare“ und „NanoNature“ werden seit 2009 mittlerweile 20 Projekte mit einem Gesamtvolumen von ca. 36 Mio. € gefördert. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist dabei, dass hier akademische Forschungseinrichtungen mit Industriepartnern zu-

sammenarbeiten, um auch marktfähige Produkte oder deren Ausgangsstoffe eingehend bearbeiten zu können. Vier dieser Projekte sind inzwischen abgeschlossen, einige mehr befinden sich in der Schlussphase der Auswertung. Noch bevor alle Projekte beendet werden, hat das BMBF bereits die zweite Runde der Förderung ausgeschrieben; die neuen Projekte werden zur Zeit gestartet.



Aufnahme von Nanopartikeln in Zellstrukturen: (Quelle: INM).

Die bisher publizierten Ergebnisse kommen zu einer beruhigenden Schlussfolgerung: die Nanomaterialien sind nicht einfach giftig, nur weil sie so klein sind. Es gibt demnach keinen generellen Bezug zwischen Teilchengröße (oder Kleinheit) und ihrer biologischen Wirkung. Eine Vielzahl von Studien – nicht nur diejenigen, die vom BMBF gefördert werden – kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen. Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass eine Aufnahme sehr kleiner Teilchen über die Lunge zu Problemen führen kann, auch wenn dies wahrscheinlich nur bei höheren Expositionen der Fall ist. Daher kommen die Projektkonsortien meist zu dem Schluss, dass eine Arbeitsplatzüberwachung angeraten ist und auch die Partikelgröße dabei erfasst werden sollte. Die Frage ob und inwieweit ein Grenzwert für Nanomaterialien unabhängig von den bisherigen Staubschwellenwerten festgelegt werden sollte, benötigt noch weitere Abklärungen. Die gerin-

ge Toxizität, die bisher für die Materialien bestimmt wurde, lässt aber aktuelle Grenzwerte als ausreichend erscheinen. Sicher gibt es Nanomaterialien mit Anlass zu größeren Bedenken, vor allem wenn es sich um Materialien handelt, die nachweislich toxische Stoffe enthalten (z. B. Quantendots aus Cadmiumselenid) oder eine bestimmte Geometrie besitzen, die eine mechanische oder physikalische Wirkung entfalten kann (z. B. Kohlenstoffnanoröhrchen in ihrer hochagglomerierten und rigiden Form).

Die Resultate der Projekte, aber auch aufbereitete Daten aus der internationalen Literatur, werden in einem ebenfalls vom BMBF geförderten Projekt der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Unter www.nanopartikel.info sind diese Informationen nachzulesen, auch ein direkter Kontakt mit Experten ist möglich. Wer sich objektiv und authentisch über Nanomaterialien informieren möchte, ist hier gut aufgehoben.

Die Risikoforschung zu Nanomaterialien hat in den vergangenen 10-15 Jahren enorme Früchte getragen. Der Umgang mit der Nanotechnologie wird dadurch sicherer, eine Abschätzung der möglichen Gefährdung ist mittlerweile möglich und die publizierten Daten geben keinen Anlass für erhebliche Bedenken gegenüber der Nutzung von Nanomaterialien. Dennoch ist es wichtig, dass aktuell und in naher Zukunft neu entwickelte Materialien mit gleicher Sorgfalt untersucht werden, um deren industrielle Herstellung und die Nutzung durch die Verbraucher sicher zu gestalten. Eine technologie-begleitende Sicherheitsforschung ist immer notwendig. Nur sie führt zu einer nachhaltigen Entwicklung neuer Technologien zum Wohle aller Beteiligten.

Sicherer Umgang mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz
Dr. Rolf Packroff, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

Die Nanotechnologie war von Beginn an mit der Besorgnis verbunden, dass sich künstlich hergestellte Nanopartikel aufgrund ihrer extrem geringen Größe nach Aufnahme im Organismus verteilen und zu bislang nicht bekannten Gesundheitsgefahren führen können. Darüber hinaus gab es die Befürchtung, dass faserförmige Nanomaterialien ein mit Asbest vergleichbares Krebsrisiko aufweisen können. Diese Risiko-

vermutungen waren der Startpunkt für eine Vielzahl zumeist öffentlich geförderter Forschungsprojekte, die sich mit der Sicherheit von Nanomaterialien auseinander gesetzt haben. Sie ermöglichten Empfehlungen zum Arbeitsschutz bei Tätigkeiten mit innovativen Materialien in einem frühen Entwicklungsstadium, in dem mögliche gefährliche Eigenschaften nur unzureichend bekannt sind. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) hat daher gemeinsam mit dem Verband der Chemischen Industrie e. V. bereits 2007 einen Leitfaden für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz veröffentlicht.

Inzwischen zeichnen die Ergebnisse einer großen Zahl abgeschlossener Projekte zur Sicherheitsforschung ein deutlich differenzierteres Bild möglicher Risikoaspekte von Nanomaterialien. Die Befunde aus toxikologischen Untersuchungen zeigen zwar keine neuartigen Risiken, stützen und verfeinern aber die wissenschaftlichen Hypothesen zur den schädlichen Wirkungen eingeatmeter Partikel. Sie erlauben inzwischen eine Bildung von Gruppen, die auch für die Gefährdungsbeurteilung am Arbeitsplatz hilfreich ist.

Eingeatmete synthetisch hergestellte Nanoteilchen können, wie auch unbeabsichtigt erzeugte oder natürlich vorkommende Nano- und Mikropartikel z. B. aus Dieselmotoremissionen und Schweißrauchen, bei entsprechender Dosis zu Entzündungsreaktionen in der Lunge und zu Atemwegserkrankungen führen. Entscheidend für die Ausprägung dieser Wirkungen ist eine Schwer- oder Unlöslichkeit der Partikel in der Lungenflüssigkeit, die auch als „Biobeständigkeit“ bezeichnet wird. Auf Vorschlag der Senatskommission der DFG zur Prüfung gesundheitsschädlicher Stoffe („MAK-Kommission“) bereitet der Ausschuss für Gefahrstoffe derzeit eine deutliche Absenkung des Arbeitsplatzgrenzwertes für lungengängige, biobeständige Stäube („GBS“) vor. Dieser stellt die früher als inert, also reaktionsträge bezeichneten Stäube für den Arbeitsschutz auf eine Stufe mit gesundheitsschädlichen Gefahrstoffen. Unterschiede in der Wirkungsstärke von nano- und mikroskaligen Partikeln sind nach derzeitigem Kenntnisstand vorhanden, aber nicht gravierend.

Im Fall der Kohlenstoffnanoröhren bestätigt die Forschung für den Fall rigider, also starrer Fasern die ursprünglichen Befürchtungen. Die schädlichen Wir-

kungen wenig biegsamer faserförmiger Partikel war besonders ausgeprägt, wenn ihre Gestalt mit der von Asbest vergleichbar war. Für diese erscheinen daher strenge Maßnahmen zum Arbeitsschutz notwendig, um die Gesundheit derjenigen zu schützen, die mit solchen Materialien in Forschung, Entwicklung, Produktion oder Recycling arbeiten.

Die dritte aus Sicht des Arbeitsschutzes relevante Gruppe sind Materialien, die – ggf. auch in Kombination mit den Partikelwirkungen – eine spezifische „chemische“ Toxizität aufweisen. Diese kann z. B. durch Freisetzung von Schwermetallionen aus aufgenommenen Partikeln verursacht sein, die im Körper vergleichbare toxische Wirkungen auslösen kann, wie der in direkt gelöster Form aufgenommene chemische Stoff. Aber auch katalytische Effekte oder chemisch-funktionelle Gruppen an Partikeloberflächen können mit spezifischen Wirkungen verbunden sein. Bei solchen Nanomaterialien ist eine Einzelfallbewertung der Risiken für Mensch und Umwelt unerlässlich.

Der Ausschuss für Gefahrstoffe hat im Mai 2013 die Bekanntmachung BekGS 527 „Hergestellte Nanomaterialien“ veröffentlicht, die sich auf die aktuellen Erkenntnisse aus der Sicherheitsforschung stützt. Sie enthält auf Grundlage der Gefahrstoffverordnung Empfehlungen zur Informationsermittlung und Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien. Sie richtet sich insbesondere an Forschungseinrichtungen und Start-up-Unternehmen, die vor der Frage stehen, wie sie mit Werkstoff- und Materialinnovationen gesundheitsgerecht arbeiten können. Ein wichtiger Schlüssel sind hierbei emissionsarme Nanomaterialien, die ein für die Gesundheit günstiges Staubungsverhalten aufweisen. Viele kommerzielle Nanomaterialien setzen in Verstaubungstests nur relative geringe Mengen an lungengängigen Partikeln frei, bei den Kohlenstoffnanoröhren gibt es hingegen eine große Spannbreite. Die staubarme Gestaltung im Sinne von „Safety-by-Design“ ist hier eine Herausforderung für eine zukunftsfähige Nanotechnologie, die immer auch die Gesundheit der Beschäftigten im Blickfeld haben muss.



Prüfstand der BAuA zur Ermittlung des Staubungsverhaltens von Nanomaterialien (Shakerverfahren) (Bild: BAuA/Fox).

Regulatorische Rahmenbedingungen für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien

Dr. Hans-Jürgen Klockner, Verband der Chemischen Industrie

Derzeit werden in der EU die entscheidenden Weichen bei den gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Nanotechnologie gestellt. Dabei geht es auch um eine sachgerechte Balance zwischen Vorsorgeprinzip und Innovationsfreundlichkeit.

EU-Nanomaterial-Definition weit gefasst

Die EU-Kommission ist mit ihrer Empfehlung vom Oktober 2011 den Forderungen des Europäischen Parlaments, vieler EU-Mitgliedstaaten und der wissenschaftlichen Beratungsgremien gefolgt: Sie hat eine in den verschiedenen Rechtsbereichen anwendbare und aus Vorsorgegründen weit gefasste Definition des Begriffs Nanomaterial vorgelegt: „Nanomaterial“ ist

danach ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder als Agglomerat enthält, und bei dem mindestens 50 Prozent der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 Nanometer bis 100 Nanometer haben. Zudem sind Fullere, Graphenfloken und einwandige Kohlenstoff-Nanoröhrchen mit einem oder mehreren Außenmaßen unter 1 Nanometer als Nanomaterialien zu betrachten. Unter diese sehr weit gefasste Definition fallen auch viele feinteilige Pulver und Dispersionen aus industrieller Produktion und natürlichen Mineralvorkommen und somit Pigmente und Füllstoffe, die teilweise schon seit Jahrhunderten verwendet werden. Deshalb betont die Kommission nachdrücklich: Die ausschließlich größenbasierte Definition heiße nicht, dass als Nanomaterial definierte Produkte per se gefährliche Eigenschaften haben.

Rechtspflichten ergeben sich nur dann, wenn die Definition – gegebenenfalls modifiziert – in Gesetze und Verordnungen aufgenommen wird. Das ist bei der neuen Biozid-Verordnung der Fall. Ältere, vom EU-Parlament festgelegte Nanomaterial-Definitionen finden sich in der europäischen Kosmetik-Verordnung und der EU-Lebensmittelinformations-Verordnung. Es wird derzeit geprüft, diese älteren Definitionen an die neue EU-Definitionsempfehlung anzupassen. Für REACH ist die Definition noch nicht rechtsverbindlich, aber nach Aussagen der EU-Kommission „relevant“. Eine Messmethode, um festzustellen, ob es sich bei einem Stoff um ein Nanomaterial handelt, muss noch entwickelt und für verbindlich erklärt werden.

Gesetze zum Schutz des Menschen und der Umwelt

Im Oktober 2012 hat die EU-Kommission ihre zweite Überprüfung der Rechtsvorschriften für Nanomaterialien veröffentlicht. Der Bericht wurde ergänzt durch ein Begleitdokument mit Angaben zu den auf dem Markt befindlichen Nanomaterialien, ihren Verwendungen und ihrer Sicherheit.

Die EU-Kommission betont, dass vielfältige wissenschaftliche Studien gezeigt hätten, dass Nanomaterialien unter Sicherheitsaspekten wie „normale“ Chemikalien zu behandeln seien. Mögliche Risiken seien mit bestimmten Nanomaterialien und spezifischen Verwendungsarten verbunden. Daher sei, wie

bei anderen Chemikalien auch, eine Risikobewertung einzelfallbezogen angezeigt. Die derzeit verfügbaren Methoden der Risikobewertung seien anwendbar. Als größte Herausforderung sieht die Kommission das Vervollständigen von Informationen über gegebenenfalls von Nanomaterialien ausgehenden Gefahren und die Entwicklung von Methoden für die Messung und Bewertung der Exposition an.

Die Reaktion auf die Schlussfolgerungen und geplanten Aktionen der EU-Kommission ist differenziert. Einige EU-Mitgliedstaaten sowie Umwelt- und Verbraucherverbände kritisieren eine mangelnde Orientierung am Vorsorgeprinzip. Die Industrie hält das Vorgehen der EU-Kommission für sachgerecht und im Einklang mit den Ergebnissen der Sicherheitsforschung und den Überlegungen der OECD.

Die EU-Chemikalienverordnung REACH bezeichnet die EU-Kommission als Kernregulierung zur sicheren Herstellung und Verwendung von Nanomaterialien. Denn REACH liefere die Stoffdaten auch für sektorale und mediale Regelungen. Für Nanomaterialien seien Klarstellungen und Präzisierungen in den Anhängen der REACH-Verordnung erforderlich – nicht jedoch im Kerntext der Verordnung. So sieht die EU-Kommission keine Erfordernis für die Änderung von Registrierfristen und Mengenschwellen und für eine eigene Stoffidentität für Nanomaterialien. In der ersten Jahreshälfte 2014 will die EU-Kommission einen Vorschlag zur nanospezifischen Anpassung der REACH-Anhänge vorlegen. Sie hat dazu eine Stakeholder-Konsultation initiiert, bei der Behörden der Mitgliedstaaten, darunter die zuständigen deutschen Bundesoberbehörden, sowie Umweltorganisationen und Industrieverbände ihre Vorschläge eingebracht haben.

In Deutschland hat der beim Bundesarbeitsministerium angesiedelte Ausschuss für Gefahrstoffe im Mai 2013 die Bekanntmachung „Hergestellte Nanomaterialien“ verabschiedet. Sie dient dem Schutz der Beschäftigten bei Tätigkeiten mit hergestellten Nanomaterialien.

Produktregister und Verbraucherinformation

Damit Behörden und Konsumenten informiert sind, fordern viele EU-Mitgliedstaaten sowie Verbraucher- und Umweltorganisationen mehr Transparenz über

den Einsatz von Nanomaterialien in verbrauchernahen und umweltoffenen Produkten.

Die EU-Kommission wird zunächst eine Web-Plattform zu „Nano-Produkten“ einrichten. Diese soll Hinweise auf alle verfügbaren Informationsquellen, darunter auch nationale oder branchenbezogene Register, enthalten. Zudem hat die Kommission eine Studie in Auftrag gegeben, um die am besten geeigneten Mittel für eine weiter verbesserte Transparenz zu ermitteln. In dieser Studie werden auch jene Nanomaterialien berücksichtigt, die derzeit nicht in den Anwendungsbereich geltender Vorschriften zur Meldung, Registrierung oder Zulassung von Produkten fallen. Anfang 2015 will die Kommission entscheiden, ob sie einen Gesetzgebungsvorschlag für weitere Transparenzpflichten vorlegen will.

Vorschläge für die Ausgestaltung eines europaweiten Nano-Produktregisters sind von einigen Behörden der Mitgliedstaaten ausgearbeitet worden, darunter vom deutschen Umweltbundesamt. Einige Mitgliedstaaten sehen auch einen Nutzen von maßgeschneiderten nationalen Registern – wie Frankreich, Belgien und Dänemark. Bei diesen nationalen Registern werden teilweise substantielle Einschränkungen der Nanomaterial-Definitionsempfehlung der EU-Kommission vorgenommen, damit die Register handhabbar werden und keine doppelten Meldepflichten entstehen.

Bei Produkten mit körpernahen Anwendungen fordern Verbraucherorganisationen Hinweise zur Verwendung von Nanomaterialien auf der Verpackung. Dies ist mittlerweile im Kosmetikbereich und in Zukunft auch bei Bioziden und bei Lebensmitteln rechtlich vorgeschrieben.

Die Industrie unterstützt die Pläne der EU-Kommission für eine bessere Markttransparenz. Sie plädiert dafür, die bereits bestehenden stoffbezogenen und sektoralen Datenbanken für die geplante europäische Internet-Plattform über den Einsatz von Nanomaterialien zu nutzen. Ein generelles sektorübergreifendes Nano-Produktregister lehnt die Industrie jedoch ab. Eine Kennzeichnung sollte aus Sicht der chemischen Industrie weitgehend auf Produkte, die Inhaltsstoffe mit gefährlichen Eigenschaften haben, begrenzt bleiben.

Nachweis von Nanomaterialien in Produkten für regulatorische Anforderungen

Dr. Hermann Stamm, European Commission, JRC Ispra

Auf dem Markt werden immer mehr Produkte, die Nanomaterialien (NM) enthalten, angeboten. Vor dem Hintergrund ungeklärter Auswirkungen von NM auf Gesundheit und Umwelt haben mehrere Institutionen und Organisationen wie das Europäische Parlament, einige EU Mitgliedstaaten sowie verschiedene Nicht-regierungs- und Verbraucherorganisationen gefordert, Verbraucher besser über die Verwendung von NM in Produkten zu informieren und mehr Transparenz zu deren Nachverfolgbarkeit auf dem Markt zu schaffen. Dies kann im Prinzip durch eine Kennzeichnung von Produkten, die NM enthalten, oder durch die Schaffung von Produktregistern erzielt werden. Um hierzu notwendige gesetzliche Vorschriften durchsetzen zu können wie sie derzeit bereits für Nahrungsmittel, Kosmetika und Biozide existieren oder geplant sind, werden jedoch analytische Messverfahren benötigt, die den Nachweis von NM in den betroffenen Produkten gestatten.

Nanomaterial Definition

Die spezielle Regulierung und die explizite Erwähnung von NM in der Gesetzgebung erfordert eine Definition des Begriffs „Nanomaterial“. Die Europäische Kommission hat im Oktober 2011 eine Empfehlung für eine allgemeine Definition von NM herausgegeben, die es erlaubt, bereits bestehende Definitionen, z. B. in der Regulierung für Kosmetika und für Nahrungsmittel, zu vereinheitlichen und zu harmonisieren. Eine klare und durchsetzbare Definition wird auch benötigt, um die in Produkten verwendeten Inhaltsstoffe entsprechend zu klassifizieren und bei fertigen Produkten zu überprüfen, ob eine Kennzeichnung gemäß den gesetzlichen Vorgaben erfolgt ist. Hierzu sind analytische Verfahren notwendig, die es erlauben die Eigenschaften zu bestimmen, die einem NM durch die Definition zugeschrieben sind, und auf der Basis gemessener Werte eine Klassifizierung als NM vorzunehmen. Für Kontrollen werden darüber hinaus validierte analytische Methoden benötigt, die es ermöglichen, NM in einer komplexen Matrix nachzuweisen wie sie typischerweise z. B. in Kosmetika oder Nahrungsmitteln vorliegen.

Methoden und Strategien

Derzeit stehen drei verschiedene Klassen von analytischen Methoden zur Verfügung, die für den Nachweis von NM in Produkten in Frage kommen. Diese Methoden basieren auf bildgebenden Verfahren, Lichtstreuung und Trennungungsverfahren.

- Bildgebende Verfahren wie Raster- und Transmissions-Elektronenmikroskopie zählen zu den zuverlässigsten Methoden für die Charakterisierung von NM. Sie zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit aus, insbesondere im Falle metallischer Nanoteilchen, und können auch für Mischungen von NM unterschiedlicher Größe herangezogen werden. Diese Messverfahren sind anspruchsvoll und teuer und verlangen eine sorgfältige Probenauswahl und aufwändige Probenpräparation.
- Es gibt mehrere Verfahren, die auf Lichtstreuung basieren, z. B. dynamische Lichtstreuung (DLS), winkelaufgelöste Lichtstreuung (MALS) oder „Particle Tracking Analysis (PTA)“. Diese Methoden sind recht einfach, schnell und relativ preiswert, geben aber nur für Nanoteilchen homogener Größe gute Ergebnisse. DLS und MALS basierte Verfahren ergeben für Mischungen mit unterschiedlicher Teilchengröße irreführende Ergebnisse hinsichtlich der Größenverteilung.
- Als Trennungungsverfahren für NM werden meist Zentrifugationsmethoden (centrifugal particle sedimentation, analytische Ultrazentrifugation) sowie die Feld-Fluss-Fraktionierung angewendet. Im Vergleich zu Verfahren basierend auf Lichtstreuung zeichnen sie sich dadurch aus, dass Mischungen unterschiedlicher Teilchengrößen genauer analysiert werden können. Dies gilt insbesondere für die vielversprechende Methode der Feld-Fluss-Fraktionierung, mit der Teilchen bis zu einer unteren Grenze von 1 nm separiert und die verschiedenen Teilchengrößenfraktionen für weitere Untersuchungen abgetrennt werden können.

Zur Zeit werden auch eine Reihe neuerer Methoden z. B. massenspektroskopische oder poren-basierte Teilchenzählverfahren entwickelt. Um eine Überwachung der gesetzgeberischen Maßnahmen zu gewährleisten und um sicherzustellen, dass in staatlichen Kontrolllaboratorien der EU-Mitgliedstaaten einheitliche Ergebnisse erzielt werden, müssen die für NM in Frage kommenden Methoden validiert werden. Hierzu hat das JRC einen ersten Ringversuch für den Nachweis

von Silbernanoteilchen in wässriger Dispersion gestartet, an dem mehrere Laboratorien aus der EU und Japan beteiligt sind.

Forschungsbedarf

Der derzeitige Forschungsbedarf besteht einerseits darin, vorhandene Methoden weiterzuentwickeln bzw. so zu kombinieren, dass Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren ausgeglichen werden können. Dies ist wichtig, um die spezifischen Schwierigkeiten des Nachweises von NM in einer komplexen Matrix zu überwinden. Dazu zählen u. a. die Nachweisgrenzen bzgl. Größe und Konzentration zu verbessern, Nanoteilchen in einer Matrix mit nanoskaliger Struktur nachzuweisen, analytische Artefakte auszuschließen, Mischungen von NM verschiedener chemischer Zusammensetzung zu separieren und Eigenschaften der NM in der spezifischen Matrix zu bestimmen. Andererseits ist eine zuverlässige Validierung und Standardisierung der Verfahren notwendig. Dies erfordert auch die Verfügbarkeit von geeigneten Referenzmaterialien, um die Anwendungsbereiche der Methoden einzugrenzen.

4.5 Information der Öffentlichkeit

Die Initiative „nanoTruck – Treffpunkt Nanowelten“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Porträt

Christine Beringer, Flad & Flad Communication GmbH

Um die Spitzenstellung Deutschlands in der nanotechnologischen Grundlagenforschung zu sichern und die Entwicklung international marktfähiger Produkte konsequent auszubauen, muss die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis stärker verzahnt und vor allem die Ausbildung qualifizierter Fachkräfte gefördert werden. Gleichzeitig soll das Interesse und die Beschäftigung mit der Nanotechnologie durch proaktive Information gestärkt und die Auswirkungen dieses Technikfeldes auf Mensch und Umwelt mit der Öffentlichkeit transparent diskutiert werden.

Die bundesweite Informationsinitiative zur Nanotechnologie „nanoTruck – Treffpunkt Nanowelten“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) leistet dazu einen wichtigen Beitrag: Mit einem umfassenden Angebot ebenso umfassender wie allge-

mein verständlicher Informationen über den Status quo nanotechnologischer Forschung und Praxis sowie einer Vielzahl interessanter Begleitveranstaltungen. Sie richtet sich an interessierte Verbraucherinnen und Verbraucher ebenso wie an Schülerinnen und Schüler, Studierende, Lehrkräfte und kleinere und mittlere Unternehmen, die Interesse an der Erforschung und Nutzung der Nanotechnologie haben.

Im nanoTruck weisen große Schautafeln und interaktive Exponat-Stationen den Weg durch die Themenvielfalt nanotechnologischer Forschung und Anwendung. Faszinierende Produktinnovationen, revolutionäre Verfahren und neue Therapien spielen dabei die gleiche wichtige Rolle wie die Vorstellung von Projekten und Initiativen der begleitenden Risikoforschung. Doch nicht nur Themenwelten und interaktive Exponate bieten im nanoTruck nützliche Informationen über die „Winzlinge mit dem Zeug zum Großen“. Eine ganze Reihe bewährter Experimente und Mitmach-Angebote helfen dabei, die Chancen und potenziellen Risiken der Nanotechnologie besser zu verstehen. Im Rahmen spezieller Schülerworkshops können Jugendliche zum Beispiel mithilfe eines mobilen Rasterelektronenmikroskops die Nano-Strukturen selbst mitgebrachter Materialien und Substanzen untersuchen oder in sogenannten „Ideenworkshops“ an der eigenen Nano-Innovation tüfteln.



Der nanoTruck zu Gast auf der Hannover-Messe 2013
(Quelle: Flad&Flad).

Zahlen, Daten, Fakten

Der nanoTruck des Bundesministeriums für Bildung und Forschung besucht an rund 220 Einsatztagen jährlich circa 100 Orte 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 und die nanoTruck-Facebook-Page unter www.facebook.com/nanoTruck.

DaNa – Die Wissensplattform zu Nanomaterialien – wissenschaftlich fundiert und leicht verständlich

Dr. Christoph Steinbach, Dechema e. V.

Deutsche Forscher haben in den vergangenen Jahren eine herausragende Kompetenz im Bereich der Nanotechnologie und der synthetischen Nanomaterialien aufgebaut. Diese Technologie ist an vielen Stellen bereits auf dem Weg in die praktische Umsetzung oder schon in Anwendungen angekommen. Mittlerweile spielen Nanopartikel nicht nur als Katalysatoren in der Verfahrenstechnik eine Rolle. Sie haben auch Einzug in unseren Alltag gehalten. Wir finden sie in Pflegeprodukten, Medikamenten und Nahrungsmitteln wieder. Auch in Textilien, Wand- und Fassadenfarben sowie in PET-Flaschen und vielen anderen Gegenständen des täglichen Gebrauchs begegnen sie uns. Daher hat in den letzten Jahren die Diskussion zu potenziellen Risiken von Nanomaterialien in den Medien und bei Verbraucherverbänden stetig zugenommen. Viele Akteure haben jedoch Schwierigkeiten, die Eigenschaften von Nanomaterialien und vor allem deren Sicherheitsaspekte richtig einzuschätzen. Insbesondere Verbraucher sind durch die unübersichtliche Informationslage in den Medien oftmals verunsichert und wissen nicht, wem oder was man glauben soll.

Aus diesem Grund fördert das BMBF seit 2009 das Projekt DaNa. Dies stellt nationale und internationale Forschungsergebnisse aus den Bereichen synthetischer Nanomaterialien sowie Erkenntnisse zu Toxikologie und Risiken auf seiner Website allgemeinverständlich dar.

Die Internet-Plattform www.nanopartikel.info bietet der Öffentlichkeit die Möglichkeit, sich fundiert und wertfrei über synthetische Nanomaterialien und deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu informieren. Die Bewertung der aktuellen Forschungsergebnisse für die DaNa-Wissensbasis erfolgt dabei auf der Grundlage sorgfältiger wissenschaftlicher Vorgehensweise anhand eines eigenen, öffentlich einsehbaren Kriterienkatalogs. Dadurch wird sichergestellt, dass alle ausgewerteten Studien eine gute Qualität u. a. im Hinblick auf realistische Expositionsbedingungen und -mengen als auch ausreichende Charakterisierung der untersuchten Materialien haben.

Derzeit bietet die DaNa-Wissensbasis – verfügbar in deutscher und englischer Sprache – Informationen zu 25 Materialien, die in den gängigsten verbrauchernahen Anwendungen eingesetzt werden. Kurztexte sowie ausführliche Artikel informieren nicht nur über Eigenschaften der grobkörnigen und nanoskaligen Materialien, sondern auch, ob und wie Nanomaterialien freigesetzt werden können und welche Auswirkungen sich dadurch für Mensch und Umwelt ergeben.

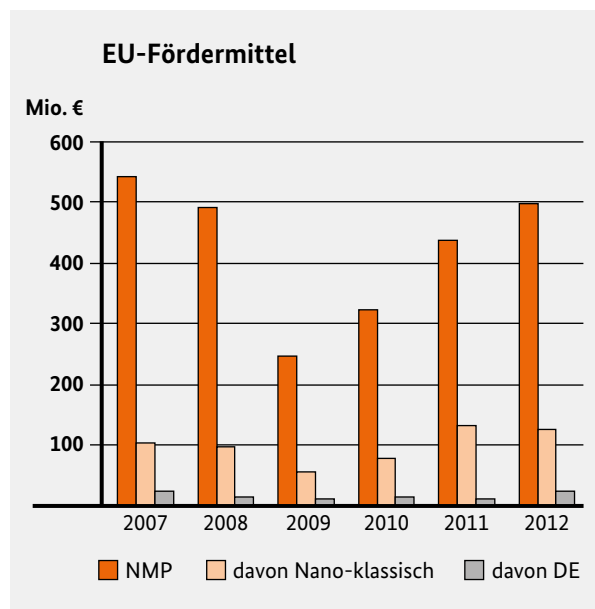
Eine Besonderheit der DaNa-Wissensbasis ist die sogenannte „Slot-Machine“, die in einer dreispaltigen Anordnung mögliche Nanomaterialien mit aktuellen Anwendungen und weiterführenden Informationen verknüpft. Wählt man zunächst eine Anwendung aus, so werden im nächsten Schritt die hierfür eingesetzten Nanomaterialien hervorgehoben. Wählt man jetzt ein Nanomaterial aus, dann werden in einer weiteren Spalte mögliche weiterführende Informationen aufgelistet. Das Besondere ist, dass sich diese Informationen direkt auf die gewählte Material-Anwendungs-Kombination beziehen. Neben dieser speziellen Anwendungs-Unterscheidung bietet die „Slotmaschine“ noch weitere Vorteile für den Besucher. Der Besucher kann hier mit den Anwendungen und Materialien „spielen“ und erkunden, wo „Nano“ überall enthalten ist. Die Internetplattform bietet zusätzlich eine Übersicht und Informationen zu den einzelnen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekten zur Nanorisikoforschung und deren Ergebnissen.

4.6 Internationale Aktivitäten

Europäische Förderung im Bereich Nanotechnologie – vom 7. zum 8. Rahmenprogramm

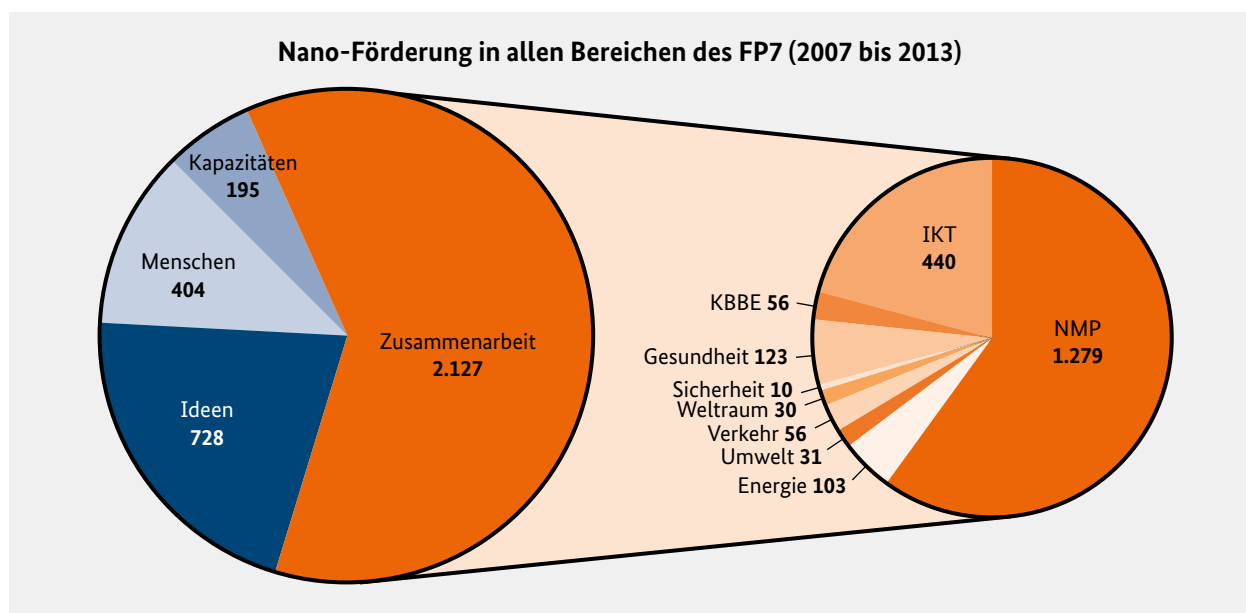
Dr. Christian Busch, Nationale Kontaktstelle Nanotechnologie, VDI Technologiezentrum GmbH

Neben den deutschen Fördermaßnahmen stellt die europäische Forschungsförderung im zu Ende gehenden 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7, 2007-2013) eine zweite, wichtige Säule der F&E-Förderung für deutsche Antragsteller dar. Bis zum Ende des Rahmenprogramms werden aus allen beteiligten Bereichen der Kommission voraussichtlich 3,5 Mrd. € in die Nanotechnologieforschung investiert sein, davon im Bereich der industriellen Technologien knapp 1,8 Mrd. €. Speziell in diesem Bereich ist während des gesamten Rahmenprogramms eine hohe Beteiligung von 18 % und eine gute Erfolgsquote deutscher Antragsteller zu verzeichnen. Dabei sind 22 % der Fördermittel – gemessen an der Gesamtfördersumme – nach Deutschland geflossen. Deutsche Antragsteller nehmen damit weiterhin die Spitzenposition im Wettbewerb um europäische Fördergelder ein. Die Einrichtung der drei „Public-Private-Partnerships“ (PPP) Factories of the Future (FoF), Energy-efficient Buildings (EeB) und European Green Cars (GC) ab der 5. Ausschreibungs-



Entwicklung des Budgets im Bereich NMP und Nanotechnologien. Mit Einführung der PPPs ab 2010 konnten die klassischen Themen nicht in gleichem Maße von der Gesamtsteigerung profitieren (Quelle: NKS Nanotechnologie).

runde führte jedoch speziell im Bereich der Nanotechnologien zu einer deutlichen Zäsur in der Höhe und Zuteilung der Fördermittel. Während das Budget für Nanotechnologie, neue Werkstoffe und Produktions-



Verteilung der EU-Nanotechnologiefördermittel (Angaben in Mio. Euro). Die meisten Nano-Fördermittel sind in Verbundprojekte (Bereich „Zusammenarbeit“) geflossen. Innerhalb dieser Gruppe sind NMP- und IKT-Projekte führend (Quelle: NKS Nanotechnologie).

technologien (NMP) insgesamt deutlich stieg, ein Teil davon jedoch den neuen PPPs zugeschlagen wurde, in denen Nanoaspekte nur unterdurchschnittlich vorkamen, blieb für die „klassischen Ausschreibungen“ im Bereich Nanotechnologien deutlich weniger übrig. Dies betraf umso mehr die für die Anwendungen und kurz- bis mittelfristige Umsetzung relevanten Förderinstrumente LARGE (große Verbundvorhaben) und SME (auf KMU zugeschnitten).

Darüber hinaus prägten die Empfehlungen des zweiten Durchführungsberichts zum europäischen Nano-Aktionsplan^[148] zur Beseitigung von Hürden auf dem Weg zum Markt die vergangenen Ausschreibungen. So nimmt bei der Auswahl von Projekten die glaubhafte Darstellung der Auswirkungen des Projektes auf Wirtschaft und Gesellschaft (sog. impact) inzwischen einen fast gleich hohen Stellenwert ein wie die wissenschaftlichen und technischen Inhalte. Vor allem in Fragen der Sicherheit, Toxikologie, Normierung und Standardisierung (EHS: environment, health, safety) werden vermehrt ganzheitliche Forschungsansätze eingefordert. Alle geförderten EHS-Projekte haben sich dem EU Nanosafety Cluster anzuschließen sowie eng mit relevanten Stellen bei ISO/CEN abzustimmen. So z. B. im Projekt NanoReg, welches mit einem pragmatischen und realistischen Risiko-Bewertungssystem für künstliche Nanopartikel zukünftige Abstimmungen zwischen Gesetzgeber, Industrie und Wissenschaft erleichtern soll. Ein anderes Projekt der letzten Ausschreibungsrunde wird sich bereits mit der Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes zur Unterstützung der Kommission bei der Umsetzung der empfohlenen Definition von Nanomaterialien befassen. Aber auch bei anderen Themen haben sich geförderte FP7-Projekte untereinander auszutauschen, um eine möglichst breite und ungehinderte Übertragbarkeit der Resultate zu gewährleisten.

Im kommenden EU-Rahmenprogramm für Forschung und Innovation „Horizont 2020“ bildet der Innovationsbegriff eine zentrale Rolle. Es wird aus den drei Säulen 1) Wissenschaftsexzellenz, 2) Führende Rolle der Industrie und 3) Gesellschaftliche Herausforderungen gebildet sein. Nanotechnologie soll im Wesentlichen in der zweiten Säule unter dem Schwerpunkt Führende Rolle bei grundlegenden und industriellen Technologien anzutreffen sein. Dort bildet sie

gemeinsam mit der Nano- und Mikroelektronik, den Fortgeschrittenen Werkstoffen, Biotechnologie und Produktionstechniken die sogenannten Schlüsseltechnologien oder KETs (key-enabling technologies). Denkbar sind jeweils mehrjährige Arbeitsprogramme mit Multi-KET-Ausschreibungen.

In diesem Kontext hat die Technologieplattform „Nanofutures“ in 2012 eine umfangreiche Roadmap der europäischen Nanotechnologie für die Jahre 2013–2025 vorgestellt^[149] und im Anschluss für die öffentliche Konsultation durch möglichst viele Stakeholder geöffnet. Sie könnte ebenfalls Beiträge für zukünftige Arbeitsprogramme leisten.

Stand der internationalen Standardisierung der Nanotechnologie

Prof. Dr. Georg Reiners, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Historie

Ende 2005 beziehungsweise Anfang 2006 wurden auf internationaler Ebene die Ausschüsse ISO/TC 229^[150], IEC/TC 113^[151] und CEN/TC 352^[152] zur Bearbeitung von Themen der Nanotechnologie gegründet. Zeitnah wurden dann die zur Mitarbeit notwendigen deutschen Spiegelausschüsse DIN NA 062-08-17 (spiegelt ISO/TC 229 und CEN/TC 352) und DKE K 141 (spiegelt IEC/TC 113) ins Leben gerufen.

Aktueller Stand der internationalen Normung

Die Abbildung zeigt Struktur und Zusammenwirken der wichtigsten internationalen Normungsgremien im Bereich der Nanotechnologie. Zwischen IEC und ISO gibt es zwei Joint Working Groups, die eine direkte Kooperation bei der Erarbeitung von Normen ermöglicht. ISO, IEC und CEN haben ihren Informationsaustausch über Liaisons organisiert. ISO/TC 229 hat darüber hinaus eine Liaison mit der OECD, die auf internationaler Ebene anerkannte Organisation zur Erarbeitung von Richtlinien und Regeln in den wichtigen Bereichen Arbeitsschutz, Umweltschutz, Gesundheit, toxikologischer Wirkung von Chemikalien, etc.

Nach wie vor hat ISO/TC 229 eine hohe politische Bedeutung erkennbar an der weiterhin hohen Teilnehmerzahl (typisch 150 Experten), 34 stimmberechtigten Nationen und der politischen und finanziellen

Unterstützung der Meetings in den verschiedenen Teilnehmerländern. ISO/TC 229 hat zum Informationsaustausch und zur Abstimmung der Themen 30 ISO-interne und 9 externe Liaisons mit anderen TC's oder Organisationen. IEC/TC 113 bearbeitet Normungsthemen, die vorwiegend in der Elektrotechnik und Elektronik relevant sind. CEN/TC 352 hat eine hohe Bedeutung für die Europäische Union, da dieser Ausschuss in 2010 ein Mandat (M/461) der europäischen Kommission erhalten hat, europäische Normen in der Nanotechnologie zu entwickeln. Dieser Auftrag wird in einzelnen Projekten finanziell von der Kommission unterstützt.

Dokumente ISO/TC 229

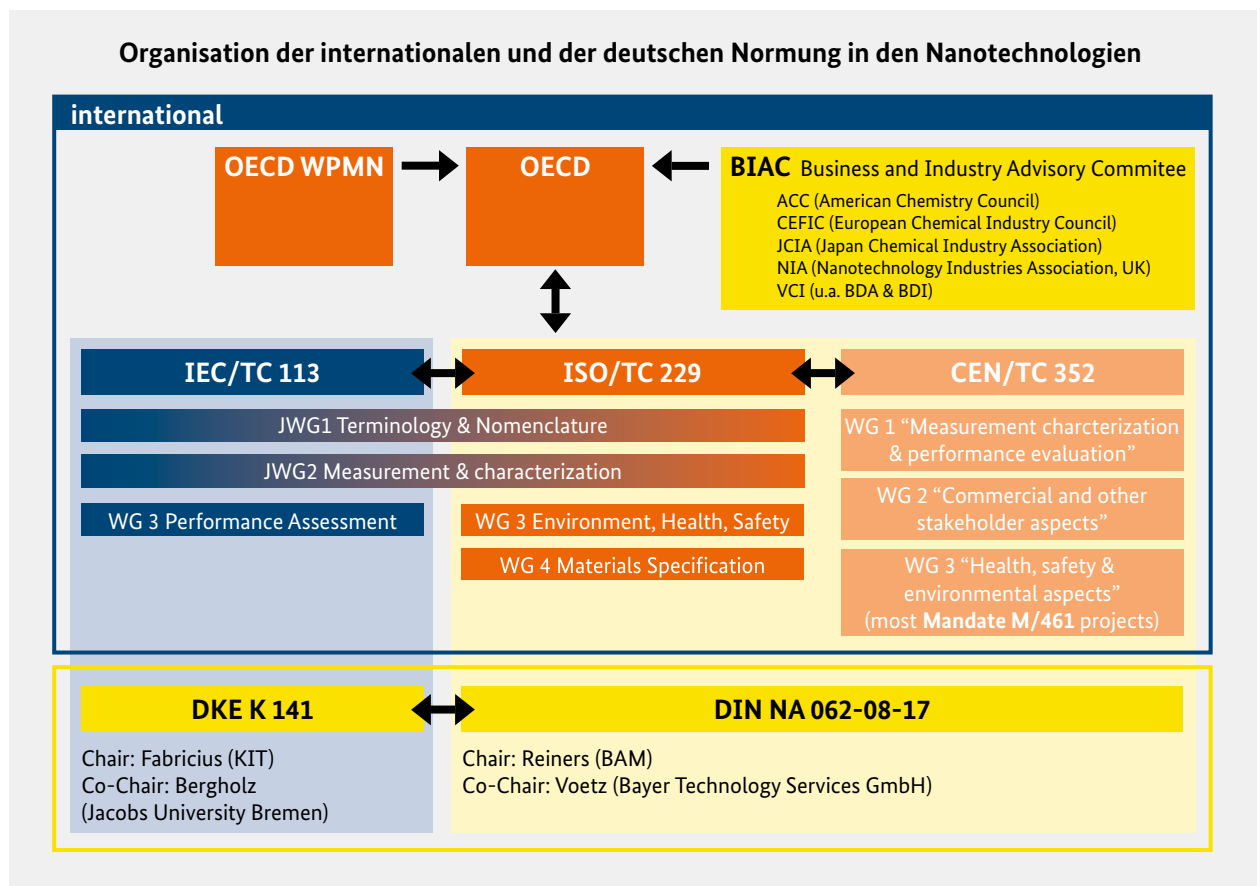
Mit Stand August 2013 wurden 35 Dokumente publiziert. Im Bereich der Terminologie wurde eine mit der IEC gemeinsame Reihe „ISO/IEC 80004 Nanotechnologies—Vocabulary series“ aufgelegt, die zur Zeit aus 12

Teilen besteht, von denen bereits sechs publiziert sind und die anderen sich in unterschiedlichen Bearbeitungszuständen befinden.

Ein wichtiges Ergebnis der Arbeit des ISO/TC 229 ist die Festlegung des Bereichs „nanoskalig“ auf den Bereich von 1 nm bis 100 nm, die Definition des Begriffs Nanomaterial sowie die Entwicklung des Oberbegriffs „Nano-objekt“ für die Gruppen Nanopartikel, Nanofasern und Nanoplättchen.

Im Bereich der Messverfahren wurden bereits 12 Dokumente publiziert, die vor allem die Charakterisierung von Nanopartikeln und Carbon Nanotubes beschreiben.

In der WG3 werden Dokumente für die Bereiche Umwelt, Gesundheit und Sicherheit entwickelt. Die WG4 fokussiert auf Dokumente, die die Zusammen-



Organisation der internationalen und der deutschen Normung in den Nanotechnologien (Quelle: BAM).

setzung, Eigenschaften und Charakteristika gezielt produzierter Nanomaterialien definieren.

IEC Dokumente

Mit Stand August 2013 wurden zusätzlich zu den oben genannten gemeinsam mit der ISO publizierten Dokumenten sechs eigene Dokumente veröffentlicht.

CEN Dokumente

Mit Stand August 2013 wurden fünf Dokumente publiziert. Dabei handelt es sich jeweils um Dokumente, die aus der Arbeit des ISO/TC 229 übernommen und als CEN-ISO-Dokument publiziert wurden. Zur Zeit sind vier Themen aus dem von der Europäischen Kommission vergebenen Mandat begonnen worden. Weitere Themen stehen zur Ausschreibung an.

Sicherheit von Nanomaterialien – internationale Aktivitäten der OECD

Dr. Klaus Günter Steinhäuser, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Seit sieben Jahren befasst sich die Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN) der OECD mit internationalen Maßstäben für die Sicherheit von Nanomaterialien.^[153] Die Gruppe macht es sich u. a. zur Aufgabe, geeignete Methoden zur Gefahren-, Expositions- und Risikobewertung von Nanomaterialien zu sammeln und zu entwickeln, die wissenschaftsbasiert sind und sich für internationale regulative Ansätze eignen.

Zwischenbilanz

Eine Kernaktivität der vergangenen Jahre war die Prüfung von 13 wichtigen, weltweit verbreiteten Nanomaterialien. Verschiedene Delegationen übernahmen die Verantwortung für die Testung. Inzwischen liegen zu mehreren Nanomaterialien Dossiers vor, die veröffentlicht werden sollen. Ziel dieses so genannten Sponsorship-Programms ist, einen Eindruck von den Gefährdungseigenschaften der untersuchten Materialien zu erhalten und die Eignung der OECD-Testverfahren für die Prüfung von Nanomaterialien zu untersuchen.

Die Working Party zog in einer Zwischenbilanz die Schlussfolgerung, dass die bestehenden Ansätze zur Prüfung und Bewertung von Chemikalien auch für Nanomaterialien geeignet sind, aber – insbesondere in Bezug auf Probenvorbereitung und Dosimetrie – in ei-

nigen Fällen spezifischer Anpassungen und Ergänzungen bedürfen. Es wird nicht erforderlich sein, gänzlich neue Prüf- und Bewertungsansätze zu entwickeln.

Experten-Workshops

Die Anpassung bestehender und – wo im Einzelfall erforderlich – zusätzlicher Testmethoden ist deshalb eine zentrale Aufgabe der Working Party. Um die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse mit den Erfahrungen aus dem Sponsorship-Programm zusammenzuführen, organisiert die OECD so genannte „Horizontal Workshops“, die sich zentralen Themen der experimentellen Prüfung von Nanomaterialien widmen (Tabelle). Die Ergebnisse des Workshops zur Inhalationstoxizität sind bereits veröffentlicht^[154]; die Berichte zu den Expertentreffen zu Ökotoxikologie und Umweltverhalten sowie zu physikalisch-chemischen Eigenschaften werden in Kürze folgen. In den bisherigen Veranstaltungen gelang es, sehr konkreten Entwicklungsbedarf für die Prüfrichtlinien zu identifizieren, der nun gemäß den Regeln des entsprechenden OECD-Programms aufgegriffen wird.

Nanosicherheit global

Das in der OECD gesammelte Wissen ist ein wesentlicher Input für die UN-Aktivität SAICM (Strategic Approach to an International Chemicals Management). In der Internationalen Chemikalienkonferenz ICCM 3 in Nairobi wurde 2012 eine Resolution verabschiedet, Nanotechnologie und Nanomaterialien als „emerging issue“ in den Global Plan of Action (GPA) aufzunehmen.^[155] Unter anderem unterstützt die OECD gemeinsam mit UNITAR mehrere regionale SAICM Workshops, in denen Entwicklungs- und Schwellenländer an das Thema herangeführt werden sollen. Die Resolution fordert ferner die zuständigen Gremien auf, das internationale GHS-System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien dahingehend zu überprüfen, ob es Anpassungen und Ergänzungen bezüglich Nanomaterialien bedarf. In vier Arbeitsfeldern (work areas) sollen im Rahmen des GPA die Fragen der Nanotechnologie weiter betrieben werden, u. a. in Bezug auf die Standardisierung von technischen Richtlinien und Verfahren.

Nanomaterialien und REACH

Die OECD-Aktivitäten bilden aber nicht nur eine wesentliche Grundlage für globale Beratungen zur Sicherheit der Nanotechnologien, sondern sind auch

Basis für Gesetzgebungsaktivitäten der EU. In einigen speziellen Rechtsnormen wie der Kosmetikverordnung oder der Biozidverordnung sind bereits spezielle Bestimmungen zu Nanomaterialien enthalten, nicht jedoch in der zentralen Chemikalienverordnung REACH, mit der die EU 2006 ihr Chemikalienmanagement neu formulierte. Hier sind Nanomaterialien bisher nicht spezifisch adressiert. Zwar sind Nanomaterialien Stoffe wie andere Chemikalien auch und deshalb prinzipiell durch REACH erfasst. Den Besonderheiten, die die OECD in Bezug auf Prüfung und Bewertung von Nanomaterialien feststellt, trägt REACH jedoch noch nicht Rechnung. Danach unterscheiden sich viele Nanomaterialien nicht nur in ihren technischen Charakteristika von größerem Material, sondern auch hinsichtlich ihres toxikologischen und ökotoxikologischen Gefahrenprofils. Zur Frage, ob Nanomaterialien als eigene Stoffe zu betrachten sind, bestehen nach wie vor unterschiedliche Ansichten. Die mangelnde Eindeutigkeit der REACH-Anforderungen – und damit auch der Anpassungsbedarf von REACH – zeigt sich auch an der Tatsache, dass bei der zweiten Registrierungsperiode laut Mitteilung der ECHA vom 03. Juni 2013 nur bei 4 von 2923 Stoffen im Registrierungsossier angegeben wurde, dass es sich um ein Nanomaterial handelt. Viele Registranten wussten offensichtlich nicht, wie sie den Empfehlungen der ECHA Rechnung tragen sollten.

Die deutschen Bundesoberbehörden BAuA, UBA und BfR haben deshalb einen Vorschlag erarbeitet, wie Nanomaterialien in REACH implementiert werden könnten.^[156] Dabei entschieden sie sich dafür, die besonderen Eigenschaften von Nanomaterialien nicht als Merkmale zu betrachten, die die Identität eines Stoffes beschreiben (identifizieren), sondern als Charakteristika eines chemischen Stoffes (charakterisieren), die innerhalb eines Registrierungsossiers anzugeben und einer eigenen Risikobewertung zu unterziehen sind. Das Problem ist allerdings, dass sich nicht nur das makroskalige Material deutlich vom nanoskaligen Material unterscheiden kann, sondern auch verschiedene Nanomaterialien gleicher chemischer Zusammensetzung untereinander. Hinzu kommen noch die Variationen durch Oberflächenmodifikation, die zu sehr unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen führen können. Mit dem Ansatz, jede Nanoform als eigenen Stoff zu betrachten, kann man diese Komplexität nicht bewältigen. Essentiell ist es aber, innerhalb eines Registrierungsossiers jede Nano-

form zu charakterisieren und dann darzustellen, welche Ähnlichkeiten zwischen den verschiedenen Varianten bestehen, die rechtfertigen, auf (bestimmte) Untersuchungen zu den Gefährdungseigenschaften und damit auf eigene Risikobetrachtungen zu verzichten (waiving).

In ihrem Second Regulatory Review on Nanomaterials vom Oktober 2012 hat die EU-Kommission angekündigt, dass eine Anpassung der REACH-Anhänge hinsichtlich Nanomaterialien aus ihrer Sicht angezeigt ist.^[157] Sie bekundet dabei ihre Absicht, Änderungen allein in den Anhängen und nicht im Artikelteil der Verordnung vorzunehmen. Viele Mitgliedstaaten haben dem zugestimmt, da der Beratungsaufwand bei einer Änderung des Artikelteils von REACH sehr hoch wäre. Manche sinnvollen Anpassungen lassen sich allerdings so nicht realisieren – zum Beispiel ist die vielfach diskutierte Senkung der Tonnagegrenzen für Nanomaterialien nur durch Änderung der Verordnung selbst möglich. Gleichwohl lässt sich durch Anpassung der Anhänge – unter Nutzung der fachlichen Resultate der OECD – bereits viel erreichen und manche Unklarheit, die Hersteller, Importeure oder Anwender haben, beseitigen. Dies würde somit auch zur Verbesserung der Sicherheit beim Umgang mit synthetischen Nanomaterialien führen.

Aktueller Stand und Ergebnisse der OECD Working Party on Nanotechnology (WPN)

Dr. Gerd Bachmann, VDI Technologiezentrum GmbH

Die OECD vereinigt 34 Mitgliedsländer auf der ganzen Welt, die sich zu Demokratie und Marktwirtschaft bekennen. Sie nutzt umfassende Daten und Informationen aus verschiedenen Themenbereichen, um Regierungen bei der Förderung von Wohlstand und im Kampf gegen Armut durch wirtschaftliches Wachstum und finanzielle Stabilität zu helfen. Zudem werden die Auswirkungen wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung auf die Umwelt diskutiert. Um die zukünftige Entwicklung gesundheitsverträglich und nachhaltig zu gestalten, ist eine realistische Abwägung der Chancen und Risiken Voraussetzung. Vor diesem Hintergrund wurde in 2006 die „Working Party on Manufactured Nanomaterials“ ins Leben gerufen, welche sich im Rahmen einer internationalen Kooperation mit Sicherheitsfragen bei der Herstellung und Nutzung von Nanomaterialien befasst (siehe oben).

Im Jahr 2007 wurde von der OECD unter dem Dach des Committee for Scientific and Technological Policy (CSTP) eine weitere Arbeitsgruppe zur Nanotechnologie eingerichtet, die „Working Party on Nanotechnology“ (WPN).^[158] Sie fungiert als Politik-Beratungsgremium zu Fragen der verantwortlichen globalen Nanotechnologie-Entwicklung. In der WPN werden die Themen wissenschaftliche und ökonomische Indikatoren, Analyse nationaler Politiken, Identifikation von Innovationsbarrieren und Herausforderungen bei der Ergebnisumsetzung, Beitrag der Nanotechnologie zur Bewältigung globaler Probleme, internationale Zusammenarbeit, Bildung, öffentliche Dialoge sowie Politikforen zu politischen Angelegenheiten mit internationaler Bedeutung diskutiert. Aktuelle Mitglieder der WPN sind Vertreter aus 26 Nationen, sowie von der Europäischen Kommission, der International Organization for Standardization (ISO) und des Business and Industry Advisory Committee (BIAC) der OECD.

Im Laufe der letzten 6 Jahre hat die WPN mehrere Berichte publiziert. Diese umfassen die Themen An Inventory of National Science, Technology and Innovation Policies for Nanotechnology (2008), Nanotechnology: An Overview Based on Indicators and Statistics (2009), The Impacts of Nanotechnology on Companies: Policy Insights from Case Studies (2010), Fostering Nanotechnology to Address Global Challenges: Water (2011), Public Engagement and Outreach in Nanotechnology (2012) und Regulatory Frameworks for Nanotechnology in Foods and Medical Products (2013). Zudem wurden Symposien, Workshops und Runde Tische zu „Nanotechnology and Access to Clean Water“, „Risk Governance“, „Nanotechnology for Sustainable Energy Options“, „Challenges in the Innovation Environment of Nanomedicine“, „Public Engagement“ und „Assessing the Economic Impact of Nanotechnology“ organisiert. Die Berichte und Veranstaltungsinhalte/-ergebnisse sind auf der WPN-Internetseite abrufbar.

Derzeit beschäftigt sich die Arbeitsgruppe mit Möglichkeiten zur Analyse der ökonomischen Wirkung von F&E im Bereich Nano, mit Fragen der Kommerzialisierung durch Politikunterstützung, mit Fallstudien zum Umfeld von Green Growth und mit der Bedeutung von Wissenschafts- und Technologiepolitik anhand der Bereiche verantwortliche Entwicklung sowie Aus- und Weiterbildung in einem zunehmend multidisziplinä-

ren Umfeld. Zukünftig sollen zusätzlich die Themen „Economic Growth“ und auch „Nanotechnology Foresight“ stärkere Beachtung erhalten.

Quellen- und Endnotenverzeichnis

- 1 BITCOM 2013: „Deutscher ITK-Markt wächst um 1,4 Prozent“; BITKOM Pressemeldung, 4. 3. 2013
- 2 Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH 2012: „Mikroelektronik/ IKT in Sachsen“ (http://www.invest-in-saxony.net/set/157/MIKRO_dt_web_2013.pdf)
- 3 VCI 2013: „VCI fordert mehr Tempo in der Forschungspolitik, Forschungsetat der Chemieindustrie steigt auf Rekordniveau“, VCI Pressemitteilung vom 14.08.2013
- 4 Donaldson, K. and Poland, C. A.: „Nanotoxicity: challenging the myth of nano-specific toxicity“, Curr Opin Biotechnol 2013, 24(4):724-34
- 5 BCC 2012: „Nanotechnology: A Realistic Market Assessment“, Markt report abstract (<http://www.bccresearch.com/report/NAN031E>)
- 6 BCC 2012: „Global Markets and Technologies for Carbon Nanotubes“, Markt report abstract (<http://www.bccresearch.com/report/NAN024E.html>)
- 7 Electronics.ca Research Network 2012: „Global Revenues from Carbon Nanotube Production to reach \$527 Million in 2016“, Pressemitteilung vom 23. Juli 2012 (<http://www.electronics.ca/presscenter/articles/1860/1/Global-Revenues-From-Carbon-Nanotube-Production-to-Reach-527-Million-in-2016/Page1.html>)
- 8 VDI TZ 2013: Unternehmensbefragung nano. DE-Report 2013, Juni 2013
- 9 BCC 2012: „Global Markets for Nanocomposites, Nanoparticles, Nanoclays, and Nanotubes“ Markt report abstract (<http://www.bccresearch.com/report/NAN021E.html>)
- 10 BCC 2011: „Advanced Ceramics and Nanoceramic Powders“, Markt report abstract (<http://www.bccresearch.com/report/NAN015F>)
- 11 Transparency Market Research 2012: „Global Magnesium Oxide Nanopowder Market is Expected to Reach USD 31.2 Million in 2018“, Pressemitteilung vom 17.12.2012 (<http://www.prnewswire.com/news-releases/global-magnesium-oxide-nanopowder-market-is-expected-to-reach-usd-312-million-in-2018-transparency-market-research-183747771.html>)
- 12 MarketsandMarkets 2012: „Global Aerogel Market worth \$1,379.6 Million by 2017“, Pressemitteilung vom 2.7.2012 (<http://www.ad-hoc-news.de/marketsandmarkets-global-aerogel-market-worth-1-379-6--/de/News/23755599>)
- 13 Future Markets 2011: „The global market for nanofibers (Alumina, Polymer, Carbon and Cellulose) to 2017“, Marktreport abstract (www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=41:the-world-market-for-nanofibers&catid=1&Itemid=46)
- 14 Electronics.ca 2012: „NanoMarkets Report Projects Rapid Growth in Metallic Nanomaterials Over the Next Eight Years“, Pressemitteilung vom 19.1.2012
- 15 Electronics.ca 2012: „Global Quantum Dots (QD) Market worth of \$7480.25 Million by 2022“, Pressemitteilung vom 21.5.2012 (<http://www.electronics.ca/presscenter/articles/1807/1/Global-Quantum-Dots-QD-Market-worth-of-748025-Million-by-2022/Page1.html>)
- 16 Electronics.ca 2012: „Global Electroactive Polymers Market Trends, Applications and Forecasts“, Marktreport abstract (<http://www.electronics.ca/store/global-electroactive-polymers-market-trends-applications-and-forecasts-ma-ch1055.html>)
- 17 BCC 2013: „BCC Research Projects the Global Nanomagnetic Materials and Devices Market to Reach \$9 Billion by 2017“, Pressemitteilung vom 21.5.2013 (<http://www.prweb.com/releases/2013/5/prweb10757241.htm>)

- 18 BCC 2012: „Global Markets, Technologies and Materials for Thin and Ultrathin Films“, Marktreport abstract (<http://www.bccresearch.com/report/ultrathin-films-markets-technologies-smc057b.html>)
- 19 BCC 2012: „High-Performance Ceramic Coatings: Markets and Technologies“, Marktreport abstract (<http://www.bccresearch.com/report/AVM015F.html>)
- 20 Future Markets 2011: „World market for Nano-coatings to grow by 2017“, Pressemitteilung European Coatings vom 30.12.2011 (<http://www.european-coatings.com/Markets-Companies/Coatings-Market/World-market-for-Nanocoatings-to-grow-by-2017>)
- 21 BCC 2011: „Microscopy: The Global Market“ Marktreport abstract (<http://www.bccresearch.com/market-research/instrumentation-and-sensors/microscopes-global-market-ias017d.html>) (<http://www.giiresearch.com/report/bc208746-microscopy-global-market.html>)
- 22 BCC 2012: „Physical Vapor Deposition (PVD): Global Markets“, Marktreport abstract (<http://bccresearch.com/report/physical-vapor-deposition-pvd-global-markets-mfg015e.html>)
- 23 BCC 2012: „Nanotechnology in Medical Applications: The Global Market“, Marktreport abstract (<http://www.bccresearch.com/report/HLC069B>)
- 24 BCC 2011: „Global Biochip Markets: Microarrays and Lab-on-a-Chip“, Marktreport abstract (<http://bccresearch.com/report/global-biochip-markets-bio049d.html>)
- 25 BCC 2012: „Nanoparticles in Biotechnology, Drug Development and Drug Delivery“, Marktreport abstract (<http://www.bccresearch.com/market-research/biotechnology/nanoparticles-biotechnology-drug-development-delivery-bio113a.html>)
- 26 ZVEI-Fachverband „Electronic Components and Systems; Mikroelektronik-Trendanalyse bis 2017“, April 2013
- 27 Electronics.ca 2012: „Global Compound Semiconductor Component Sales To Reach \$47.4 Billion In 2017“, Pressemitteilung vom 12.9.2012 (<http://www.electronics.ca/presscenter/articles/1924/1/Global-Compound-Semiconductor-Component-Sales-To-Reach-474-Billion-In-2017-/Page1.html>)
- 28 TechNavio 2011: „Global NAND Flash Device Market 2010-2014“, Marktreport abstract (<http://www.reportlinker.com/p0490623-summary/Global-NAND-Flash-Device-Market.html>)
- 29 BCC 2013: „BCC Research Projects the Flexible Devices Manufactured by Roll-to-Roll Technologies to Reach Nearly \$22.7 Billion by 2017“, Marktreport abstract (<http://bccresearch.wordpress.com/2013/05/23/roll-to-roll-technologies>)
- 30 BCC 2013: „Global Markets for Roll to Roll Technologies for Flexible Devices“, Marktreport abstract (<http://www.electronics.ca/store/global-markets-for-roll-to-roll-technologies-for-flexible-devices-gb-smc082a.html>)
- 31 Electronics.ca 2013: „Touch Panel Transparent Conductive Film Market Shares, Strategy, and Forecasts, Worldwide, Nanotechnology, 2013 to 2019“, Marktreport abstract (<http://www.electronics.ca/store/touch-panel-transparent-conductive-film-market.html>)
- 32 IDTechEx 2012: „Conductive Ink Markets 2012-2018: Forecasts, Technologies, Players“, Marktreport abstract (<http://www.giiresearch.com/report/ix235628-conductive-inks-markets-2012-2018.html>)
- 33 SPECTARIS, VDMA, ZVEI, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Photonik Branchenreport 2013; Mai 2013
- 34 BCC 2012: „Nanotechnology for Photonics: Global Markets“, Marktreport abstract (<http://www.bccresearch.com/report/NAN036B.html>)

- 35 NanoMarkets 2012: „NanoMarkets New Report on OLED Lighting Materials Market, Sees \$1.3 billion (USD) Markets by 2018“, Pressemitteilung vom 15.10.2012 (http://nanomarkets.net/news/article/nanomarkets_issues_new_report_on_oled_lighting_materials_market_sees_1.3_bi)
- 36 BCC 2013: „Nanotechnology in Energy Applications“, Marktreport abstract (<http://www.giiresearch.com/report/bc51640-nanotech.html>)
- 37 Future Markets 2011: „Nanotechnology and Nanomaterials for the World Energy Market-Applications, Products, End User Markets, Companies and Revenues“, Marktreport abstract (www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=43:the-world-market-for-nanoenergy&catid=1&Itemid=49)
- 38 Future Markets 2011: „Nanotechnology and Photovoltaics: Market, Companies and Products“, Marktreport abstract (http://www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=46:the-world-market-for-corroion&catid=1&Itemid=53)
- 39 NanoMarkets 2012: „NanoMarkets Issues New Report on ESD and Antistatic Materials and Products in the Electronics Sector“, Marktreport abstract (http://nanomarkets.net/news/article/nanomarkets_issues_new_report_on_esd_and_antistatic_materials_and_products)
- 40 Winter Green Research 2012: „Solid State Thin Film Battery: Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, Nanotechnology, 2013 to 2019“, Marktreport abstract (<http://www.researchmoz.com/solid-state-thin-film-battery-market-shares-strategies-and-forecasts-worldwide-nanotechnology-2013-to-2019-report.html>)
- 41 Future Markets 2011: „Nanomaterials and the World Lithium Ion Battery Market: Applications, Products, End User Markets, Companies and Revenues“, Marktreport abstract (http://www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=45:the-world-market-for-corroion&catid=1&Itemid=52)
- 42 BCC 2012: „Superconductors: Technologies and Global Markets“, Marktreport abstract (<http://www.bccresearch.com/market-research/advanced-materials/superconductors-technologies-applications-markets-avm066c.html>)
- 43 Global Industry Analysts 2011: „Global Membrane Separation Technologies Market to Reach US\$16 Billion by 2017, According to a New Report by Global Industry Analysts, Inc.“, Pressemitteilung vom 14.11.2011 (http://www.prweb.com/releases/membrane_separation/technologies/prweb8953901.htm)
- 44 C&M Research 2012: „Chipless RFID market to grow at a CAGR of 29.3%“, Pressemitteilung vom 30.7.2012 (<http://www.companiesandmarkets.com/News/Information-Technology/Chipless-RFID-market-to-grow-at-a-CAGR-of-29-3/NI4732>)
- 45 Future Markets 2011: „Nanocoatings for the Construction and Exterior Protection Industry“, Marktreport abstract (http://www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=15:nanocoatings-for-the-construction-and-exterior-protection-on-industry&catid=1&Itemid=17)
- 46 BCC 2012: „Global Markets and Technologies for Smart Glass“, Marktreport abstract (<http://www.electronics.ca/store/global-markets-and-technologies-for-smart-glass-gb-avm065b.html>)
- 47 Future Markets 2011: „Nanocoatings for the Automotive Industry“, Marktreport abstract (http://www.futuremarketsinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=14:nanocoatings-for-the-automotive-industry&catid=1&Itemid=16)
- 48 BCC 2013: „BCC Research Projects the Global Nanomagnetic Materials and Devices Market to Reach \$9 Billion by 2017“, Pressemitteilung vom 21.5.2013 (<http://www.prweb.com/releases/2013/5/prweb10757241.htm>)

- 49 SPECTARIS, Fachverband Medizintechnik: Zahlen und Fakten (<http://www.spectaris.de/medizintechnik/zahlen-fakten.html>)
- 50 Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie e. V. (BPI): „Pharma-Daten 2012“, 42. überarbeitete Auflage, Dezember 2012
- 51 Eckensberger, D.: „Kleine Partikel – große Hoffnung“, Nachrichten aus der Chemie| 60 | Juli / August 2012
- 52 Duncan, R., Gaspar, R.: „Nanomedicine(s) under the Microscope“, Mol. Pharmaceutics, 2011, 8 (6), 2101–2141
- 53 Etheridge, M. L., Campbell, S.A., Haynes, C.L., Wolf, S.M., McCullough, J.: „The big picture on nanomedicine: the state of investigational and approved nanomedicine products“, Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, Volume 9, Issue 1, 1-14, Januar 2013
- 54 Accenture GmbH 2010: „Überalternde Sortimente setzen Pharma-Unternehmen unter Druck“, Pressemitteilung vom August 3, 2010 (www.accenture.com/de-de/company/newsroom-germany/pages/pharma-unternehmen-medikamente-patenschutz.aspx)
- 55 Thomsen Reuters: „MagForce vereinbart präklinische Forschungsk Kooperation zur Untersuchung der NanoTherm® Therapie bei Magen- und Darmkrebs Erkrankungen in den USA“, Pressemitteilung vom 22.6.2012 (<http://hugin.info/143761/R/1621461/518165.pdf>)
- 56 Deutsches Ärzteblatt: „Nano-Medikament verlängert Leben bei Pankreaskarzinom“, Pressemitteilung vom 23.1.2013 (www.aerzteblatt.de)
- 57 Michael L. Etheridge et al., „The big picture on nanomedicine: the state of investigational and approved nanomedicines products“, Nanomedicine 9 (2013) 1-14
- 58 White Paper to the Horizon 2020 Framework Programme for Research and Innovation – Recommendations from the Nanomedicine Community, Mai 2013
- 59 Chemiewirtschaft in Zahlen, Verband der chemischen Industrie, Stand Juli 2012 (www.vci.de)
- 60 „Die Zukunft gewinnen mit einer starken Chemie“, VCI-Pressemitteilung vom 11.7.2013 (www.vci.de)
- 61 „Forschung trotz der Krise: Branche gibt 6,5 Prozent mehr aus“, VCI-Pressemitteilung vom 11.9.2012 (www.vci.de)
- 62 BCC 2012: „Nanotechnology: A Realistic Market Assessment“, Marktreport BCC, September 2012 (<http://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology/nanotechnology-market-applications-products-nan031e.html>)
- 63 Nähere Infos unter www.one-p.eu
- 64 Nähere Infos unter www.nanosafetycluster.eu
- 65 BMU 2012: „1. Bilanz zur gemeinsamen Forschungsstrategie der Ressortforschungseinrichtungen des Bundes „Nanotechnologie – Gesundheits- und Umweltrisiken von Nanomaterialien“ (2007 – 2011), download unter www.nano.bam.de/de/nano_medien/ntfo_stra.pdf)
- 66 European Commission: „Second Regulatory Review on Nanomaterials“ COM(2012) 572 final, 3.10.2012
- 67 Quelle: Statistisches Bundesamt 2012
- 68 Wirtschaftsvereinigung Stahl: Stahl in Zahlen (www.stahl-online.de)
- 69 Wirtschaftsvereinigung Metalle Quartalsbericht, Ausgabe 11, Mai 2013 (www.wvmetalle.de)
- 70 IG Bergbau, Chemie, Energie: „Innovationsprozesse in der keramischen Industrie – Möglichkeiten und Grenzen der Mitarbeiterbeteiligung“, Dezember 2012

- 71 BCC 2011: „High-Performance Ceramic Coatings: Markets and Technologies“ Marktreport Juni 2011 (www.bccresearch.com/report/AVM015F.html)
- 72 BCC 2011: „Advanced Ceramics and Nanoceramic Powders“, Marktreport Juni 2011 (www.bccresearch.com/report/NAN015F)
- 73 Electronics.ca 2012: „NanoMarkets Report Projects Rapid Growth in Metallic Nanomaterials Over the Next Eight Years“, Pressemitteilung vom 19.1.2012 (www.electronics.ca)
- 74 „Deutscher Studienpreis für Materialforscherin: Metallschaum für Leichtbau und Aufprallschutz“, Pressemitteilung der Universität des Saarlandes (<http://idw-online.de/de/news545979>)
- 75 M. J. Duarte, J. Klemm, S. Klemm, S. Borodin, K. Mayrhofer, M. Stratmann, A. Romero, M. Madinehei, D. Crespo, J. Serrano, S. Gerstl, P. Choi, D. Raabe und F. U. Renner: „Element-Resolved Corrosion Analysis of Stainless-Type Glass-Forming Steels“, Science, 26. Juli 2013; doi: 10.1126/science.1230081
- 76 <http://www.iapetus.eu>
- 77 ZVEI-Fachverband Electronic Components and Systems; Mikroelektronik-Trendanalyse bis 2017; April 2013
- 78 BITKOM, EITO; ITK-Marktzahlen; März 2013
- 79 BCC 2013: „Global Markets for Roll-to-Roll Technologies for Flexible Devices“, Marktstudie abstract, BCC Research, April 2013
- 80 Wintergreen 2013: „Touch Panel Transparent Conductive Film Market Shares, Strategy, and Forecasts Worldwide, Nanotechnology, 2013 to 2019“, Marktreport abstract (<http://www.electronics.ca/store/touch-panel-transparent-conductive-film-market.html>)
- 81 vgl. EU-FP7-Projekte „MAGIC“ oder „SNM“
- 82 vgl. EU-FP7-Projekte „TECHNOTUBE“, „CONCEPT-GRAPHENE“ oder „GRAND“ (www.grand-project.eu)
- 83 vgl. EU-FP7-Projekte „SIQS“, oder „AQUTE“
- 84 Nähere Infos unter www.ifox-project.eu
- 85 Nähere Infos unter www.one-p.eu oder www.smartronics.eu
- 86 Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Neufassung)
- 87 Photonics 21; The Leverage Effect of Photonics Technologies: The European Perspective; Final Report März 2011
- 88 Optech Consulting; Photonik 2013; Studie, 2013
- 89 SPECTARIS 2013: „Daten und Fakten zur deutschen Industrie für optische, medizinische und mechatronische Technologien“, Mai 2013 (www.spectaris.de)
- 90 SPECTARIS, VDMA, ZVEI, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): „Photonik Branchenreport 2013“, Mai 2013
- 91 BCC 2012: „Nanotechnology for Photonics: Global Markets; Marktstudie abstract, BCC Research, Feb. 2012.
- 92 Nähere Infos unter www.fast-dot.eu
- 93 Nähere Infos unter www.parylens.eu
- 94 vgl. EU-FP7-Projekt „SMASH“ oder EU-FP7-Projekt „NWS4LIGHT“
- 95 Nähere Infos unter www.light-rolls.eu
- 96 Nähere Infos unter www.magnonics.org; EU-FP7-Projekt „NIM_NIL“

- 97 vgl. EU-FP7-Projekt „SURPASS“
- 98 Infos z. B. unter www.fp7-firefly.eu; www.delight-project.eu; EU-FP7-Projekt „ULTRAMAGNETRON“
- 99 SPECTARIS-Spotlight; Die deutsche Photonik-Industrie 2012 (www.spectaris.de)
- 100 Weltenergieat -Deutschland e. V.: „Energie für Deutschland 2013 – Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext“; Mai 2013
- 101 BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: „Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2013)“; Januar 2013
- 102 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2012“; Februar 2013
- 103 Nähere Infos unter www.ngcpv.org
- 104 Nähere Infos unter www.fast-track.eu
- 105 Nähere Infos unter www.silicon-light.eu
- 106 Nähere Infos unter www.scalenano.eu
- 107 Nähere Infos unter www.r2r-cigs.com
- 108 Nähere Infos unter www.nanohehex.org
- 109 Näher Infos unter www.suprabio.eu
- 110 Nähere Infos z. B. unter www.eurotapes.eu
- 111 S. Wilkinson: „PV Storage Market Set to Explode to \$19 Billion in 2017; Germany leads Again“; IMR-Research, Press Release, 25. 04. 2013
- 112 Statistisches Bundesamt 2012: „Umwelt – Umsatz mit Waren, Bau und Dienstleistungen für den Umweltschutz“, Fachserie 19 Reihe 3.3, Juli 2012
- 113 „BMU: Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland im Jahr 2011 – eine erste Abschätzung“, Stand 14. März 2012
- 114 BCC 2009: „Nanotechnology in Environmental Applications: The Global Market“; Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- 115 PRWEB, Pressemitteilung vom 14.11.2011: „Global Membrane Separation Technologies Market to Reach US\$16 Billion by 2017, According to a New Report by Global Industry Analysts, Inc.“ (http://www.prweb.com/releases/membrane_separation/technologies/prweb8953901.htm)
- 116 BCC 2010: „Catalysts for Environmental and Energy Applications“, Marktreport abstract, BCC Research Inc. (www.bccresearch.com)
- 117 European Coatings, Pressemitteilung vom 30.12.2011 „World market for Nanocoatings to grow by 2017“ (www.european-coatings.com/Markets-Companies/Coatings-Market/World-market-for-Nanocoatings-to-grow-by-2017)
- 118 <http://www.lblbrane.eu/>
- 119 AMA Fachverband für Sensorik und Messtechnik: „Branche bleibt stabil und optimistisch“, Pressemitteilung (www.ama-sensorik.de)
- 120 BCC 2012: „MEMS Biosensors and Nanosensors“, Marktreport abstract (www.reportlinker.com/p0461665/MEMS-Biosensors-and-Nanosensors.html)
- 121 PRWEB 2013: „BCC Research Projects the Global Nanomagnetic Materials and Devices Market to Reach \$9 Billion by 2017“, Pressemitteilung vom 21. Mai 2013 (www.prweb.com/releases/2013/5/prweb10757241.htm)
- 122 VDA-Verband der Autoimobilindustrie; Jahreszahlen; 11. 04. 2013 (www.vda.de/de/zahlen/jahreszahlen/allgemeines/index.html)
- 123 FutureMarkets 2011: „Nanocoatings for the Automotive Industry“; FutureMarkets; Marktstudie abstract 2011
- 124 vgl. EU-FP7-Projekt „MUST“

- 125 vgl. EU-FP7-Projekt „ATHENIS“
(www.athenis-fp7.eu)
- 126 vgl. EU-FP7-Projekt „SMART-EC“
(www.smart-ec.eu)
- 127 vgl. EU-FP7-Projekt „NEXT-GEN-CAT“
- 128 vgl. EU-FP7-Projekt „MATRANS“
- 129 vgl. EU-FP7-Projekt „POWERSWIPE“
(www.powerswipe.eu)
- 130 vgl. EU-FP7-Projekt „ECOPLAST“
(www.ecoplastproject.com)
- 131 vgl. EU-FP7-Projekt „2020INTERFACE“
(www.2020interface.eu)
- 132 vgl. EU-FP7-Projekt „LORRY“ (www.lorryproject.eu)
- 133 VDMA 2013: „Weltmaschinenumsatz 2012 erreicht neues Rekordniveau“; VDMA-Meldung, 03. 04. 2013 (<http://www.vdma.org/article/-/article-view/1334599>)
- 134 M. Schäfer; VDMA: „Neue Technologien und Innovationen führen zu weiterem Wachstum im deutschen Maschinenbau“; VDMA-Meldung, 08. 04. 2013
- 135 www.steelconstruct.com/old/steelprost/project.html
- 136 Nähere Infos unter www2.le.ac.uk/projects/mint-weld
- 137 vgl. EU-FP7-Projekt „ADDNANO“
- 138 vgl. EU-FP7-Projekte „MINILUBES“ und „MICROPADS“
- 139 Nähere Infos unter www.aim4np.eu
- 140 Maschinenhaus-Campus für Ingenieure; VDMA-Initiative für Studienerfolg
- 141 VDMA 2013: „Status Quo des Know-how-Schutzes“; VDMA-Studie 2013
- 142 Völcker, T: „Nanotechnologie im Einsatz für Echtheitsprüfung und Fälschungsschutz von Produkt und Verpackung“, Präsentation auf dem BMBF Branchendialog „Nanopackaging - Nanotechnologie und Neue Materialien für die Verpackungsindustrie“ am 16. Mai 2011 in Düsseldorf
- 143 Zentralverband Deutsches Baugewerbe 2013: „Analyse und Prognose 2013“ Bauwirtschaftlicher Bericht 2012/2013, Januar 2013
- 144 Future Markets 2011: „Nanocoatings for the Construction and Exterior Protection Industry“ Market-report abstract (www.futuremarketsinc.com)
- 145 Paschen H, Coenen C, Fleischer T, Grünwald R, Oertel D, Revermann C (2003) „Nanotechnologie“, TAB-Bericht Nr. 92, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin
- 146 Royal Society (2004) „Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties“. Royal Academy of Engineering, London
- 147 Kuhlbusch TA, Krug HF, Nau K (2009) „NanoCare: health related aspects of nanomaterials“. Final Scientific Report, Kuhlbusch TA, Krug HF, Nau K, (eds.), DECHEMA e. V., Frankfurt, Karlsruhe, St. Gallen.
- 148 Nanowissenschaften und Nanotechnologien: Aktionsplan für Europa 2005-2009. Zweiter Durchführungsbericht 2007-2009, KOM(2009)607
- 149 Integrated Research and Industrial Roadmap for European Nanotechnology, (version July 2012). NANO futures Platform (www.nanofutures.eu)
- 150 http://www.iso.org/iso/iso_technical_committee?commid=381983
- 151 http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0::::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1315,25

- 152 <http://www.cen.eu/cen/Sectors/Sectors/Nanotechnologies/Pages/default.aspx>
- 153 <http://www.oecd.org/science/nanosafety>
- 154 [http://www.oecd.org/officialdocuments/displaydocument/?cote=env/jm/mono\(2012\)14&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/displaydocument/?cote=env/jm/mono(2012)14&doclanguage=en)
- 155 http://www.saicm.org/index.php?option=com_content&view=article&id=235:addition-of-new-activities-to-the-global-plan-of-action-on-nanotechnologies-and-manufactured-nanomaterials&catid=215:comments-received&Itemid=473
- 156 <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4327.html>
- 157 [http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/second_regulatory_review_on_nanomaterials_-_com\(2012\)_572.pdf](http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/second_regulatory_review_on_nanomaterials_-_com(2012)_572.pdf)
- 158 www.oecd.org/sti/nano
- 159 Europäische Kommission 2011: „Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial“, 2011/696/EU
- 160 Die Förderzahlen wurden von VDI TZ zusammengestellt. Grundlage waren direkte Befragungen von Förder- und Forschungseinrichtungen im Zeitraum bis einschließlich 2013.

Abkürzungsverzeichnis

AFM	Rasterkraftmikroskopie	GSDIM	Bildgebende Mikroskopie durch Grundzustandsabbau
BIP	Bruttoinlandsprodukt	IC	Integrierte Schaltkreise
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
CAGR	Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate	IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
CEN	Europäische Komitee für Normung	InAs	Indiumarsenid
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid	InGaN	Indiumgalliumnitrid
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid	IR	Infrarot
CMOS	Komplementär Metalloxid-Halbleiter	ISO	Internationale Standardisierungsorganisation
CNT	Kohlenstoffnanoröhren	IT	Informationstechnik
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft	ITO	Indiumzinnoxid
DIN	Deutsches Institut für Normung	IuK	Information und Kommunikation
DLNA	Doppelligand-Nanopartikelmatrix	JRC	Gemeinsame Forschungsstelle
DLS	Dynamische Lichtstreuung	KBBE	Wissensbasierte Bioökonomie
DMS	Dehnungsmessstreifen	KET	Schlüsseltechnologien
DNS	Desoxyribonukleinsäure	KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit	LEIS	Niederenergetische Ionenstreuung
EU	Europäische Union	MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
EUV	Extrem Ultraviolett	MALS	Winkelaufgelöste Lichtstreuung
F&E	Forschung und Entwicklung	MEMS/NEMS	Mikro-/Nanoelektromechanische Systeme
FEL	Freie Elektronen Laser	Mrd.	Milliarden
FKZ	Förderkennzeichen	MRT	Magnetresonanz-Tomographie
FP7	7. Europäisches Forschungsrahmenprogramm	MST	Mikrosystemtechnik
GaN	Galliumnitrid	MWCNT	Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren
GaP	Galliumphosphid	NDIR	Nichtdispersiver Infrarotsensor
GaSb	Galliumantimonid	NGO	Nichtregierungsorganisationen
GHS	Global Harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Gefahrstoffen	NKS	Nationale Kontaktstelle
GMP	Gute Herstellungspraxis	NM	Nanomaterial
GMR	Riesenmagnetowiderstandseffekt	NMR	Kernmagnetresonanz

NMP	Nanotechnologie, neue Werkstoffe und Produktionstechnologien	UHPC	Ultrahochfester Beton
ODS	Oxid-Dispersion verstärkt	UV	Ultraviolett
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit	VC	Risikokapital
OLED	Organische Leuchtdioden	VCI	Verband der Chemischen Industrie
OPV	Organische Photovoltaik	VCSEL	Oberflächen emittierende Diodenlaser
PCR	Polymerase Kettenreaktion	VIS	Sichtbares Licht
PCM	Phasenwechselmaterial	WG	Arbeitsgruppe
PECVD	Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung	WING	Werkstoffinnovation für Industrie und Gesellschaft
PEG	Polyethylenglycol	ZnO	Zinkoxid
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran	ZnS	Zinksulfid
PET	Positronen-Emissions-Tomographie		
ppb	Teile pro Milliarde		
PPP	Öffentlich-private Partnerschaften		
PTA	Partikelanalyse		
PV	Photovoltaik		
PVD	Physikalische Gasphasenabscheidung		
QD	Quantenpunkt		
R&D	Forschung und Entwicklung		
RAM	Datenspeicher mit wahlfreiem Zugriff		
RFID	Radiofrequenz-Identifikation		
RNA	Ribonukleinsäure		
SEM	Rasterelektronenmikroskopie		
SERS	Oberflächenverstärkte Raman-Streuung		
Si-GaAs	Silizium-Galliumarsenid		
siRNA	Kurze interferierende Ribonukleinsäure		
STED	Ausschaltung durch stimulierte Emission		
SWCNT	Einwandige Kohlenstoffnanoröhren		
TEM	Transmissionselektronenmikroskop		
THz	Terahertz		
TMR	Tunnelmagnetowiderstand		
TOF-SIMS	Sekundärionen-Massenspektroskopie		
TWh	Terawattstunden		

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Neue Werkstoffe, Nanotechnologie; KIT
53175 Bonn

Bestellungen

schriftlich an:
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 0918132 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: <http://www.bmbf.de>
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand

Mai 2014

Druck

Bonifatius GmbH, Paderborn

Gestaltung

ecosense – media & communication, Köln

Bildnachweis

Titelbild:© Alessandro Cumbo, Artwork: Martin Oeggerli/
www.micronaut.ch

Redaktion

VDI Technologiezentrum GmbH,
Dr. Wolfgang Luther, Dr. Leif Brand

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

