

Dieter Seeliger

Über einige qualitative und quantitative Fortschritte der praktischen Nutzung von Nanotechnologie bei der Energieumwandlung

1 Einleitung: Begriffe, Definitionen und grundlegende Eigenschaften

Ihre rasante Entwicklung in den vergangenen Jahren, die bis in die Gegenwart reicht und voraussichtlich weiter anhalten wird, führte die Nanotechnologie in die erste Reihe der großen technologischen Entwicklungslinien, welche den Umbau zur Wissensgesellschaft prägen. Auch dieses Gebiet lässt sich nicht auf seine ökonomischen und technologischen Aspekte reduzieren, sondern betrifft neben interdisziplinärer Wissenschaft gleichermaßen Aspekte von Umwelt, Gesundheit, Bildung sowie Recht und greift damit in viele Bereiche der Gesellschaft ein. Es ist gekennzeichnet durch alle Merkmale von Ambivalenzen, wie sie bereits auf dem 4. Symposium des Arbeitskreises „Allgemeine Technologie“ für unterschiedliche Gebiete des technologischen Fortschritts herausgearbeitet wurden.

Um dieses Gebiet in seiner Entwicklung zu beschreiben, betrachten wir zunächst einige Begriffe und Definitionen: Unter Nanoteilchen (Nanopartikel) werden meist Verbände von einigen wenigen bis einigen Tausend Atomen oder Molekülen, mit einer typischen Größe im Bereich von 1 bis 100 Nanometern¹ bezeichnet. Nanoteilchen kommen entweder in Naturprodukten vor oder lassen sich gezielt mit besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften synthetisch herstellen. Unter der immensen Vielfalt sind besonders die praktisch bedeutsamsten Klassen von Nanoteilchen hervorzuheben, welche folgende Stoffgruppen umfassen:

- Kohlenstoffhaltige Nanopartikel (Fullerene, Graphene, Nanoröhren, Rußpartikel);
- Metall- und Halbleiteroxide (Si-, Ti-, Al-, Fe-, Zn-Oxide und Zeolithe);
- Halbleiter (Cd-Tellurid, Cd-Selenid, Si und weitere);
- Metallsulfide;

¹ 1 nm = 10⁻⁹ m = 10⁻⁶ mm; Definition siehe <http://de.wikipedia.org/eiki/Nanoteilchen>

- Polymere.¹

Nanopartikel zeichnen sich im Vergleich zu kompaktem Material mit gleicher chemischer Zusammensetzung durch ganz besondere chemische und physikalische Eigenschaften aus, stark abhängig von der Größe der Teilchen, d.h. von der Zahl von Atomen oder Molekülen, die im den Teilchen jeweils enthalten sind. Dies ist atomphysikalisch verständlich als Folge des Übergangs von isolierten Energieniveaus einzelner Atome zu kontinuierlichen Energiebändern im Festkörper. Die Hinzufügung einzelner Atome oder Moleküle zum Verbund kann so die Struktur der Energiezustände und damit die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Nanoteilchen verändern. Daraus ergeben sich, kurz gefasst, folgende gravierenden Veränderungen bei den praktisch bedeutsamen Eigenschaften der Materialien:

- Beim Übergang von Kompaktmaterial zu Nanopartikeln mit gleicher Masse erfolgt ein immenser Anstieg der spezifischen Oberfläche,² woraus sich wiederum ein Anstieg der chemischen und physikalisch-chemischen Reaktivität sowie ein größerer Einfluss von Oberflächenkräften (van-der-Waals) ergeben. Dies wirkt sich u.a. auf die katalytische Aktivität des Materials aus.
- Infolge des geringen Krümmungsradius der Oberfläche von Nanoteilchen können sich an der Oberfläche extrem hohe Feldstärken elektromagnetischer Felder ausbilden, Oberflächenladung und -ströme sowie Magnetfelder gewinnen größere Bedeutung im Vergleich zu kompaktem Material. Dies hat entscheidende Bedeutung u.a. für die Wechselwirkung von Photonen (Licht) mit Nano-Beschichtungen.
- Im Verbund von aktuell hochentwickelten Methoden zur Berechnung der Energiezustände von Atomen, Molekülen und deren Verbänden mit den modernen Methoden zum Aufbau von Festkörperstrukturen (Implantation, Bedampfen, Epitaxie u.a.) ist die „gezielte Komposition“ von Nanoteilchen mit gewünschten, insbesondere optischen Eigenschaften heute bereits Realität geworden und wird häufig mit dem Begriff „Bandstrukturengineering“ bezeichnet (vgl. Abstreiter 2014).
- Gewünschte photo-physikalische, katalytische oder andere Effekte lassen sich durch Einsatz von Nanoteilchen in der Regel mit wesentlich ge-

1 Polymere Folien aus Nanomaterialien wurden im Rahmen des 4. Symposiums des Arbeitskreises „Allgemeine Technologie“ der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften behandelt – vgl. Kohlert 2011.

2 Der Anstieg der aktiven Oberfläche kann bis zu 10^7 betragen!

ringerem Materialeinsatz der betreffenden Elemente oder chemischen Verbindungen erzielen, was in einer deutlich verbesserten Materialökonomie und folglich Schonung von Ressourcen, aber gegebenenfalls auch zu möglichen Substitutionen kostenintensiver Rohstoffe führt.

Eine große praktische Bedeutung haben in den vergangenen Jahren bestimmte Typen von Kohlenstoff-Nanoteilchen gewonnen, deren ganz besondere Eigenschaften hier kurz erwähnt werden sollen:

- Kohlenstoff-Nanoröhren³ können sowohl Eigenschaften eines Leiters wie auch eines Halbleiters annehmen, wobei sie als Leiter eine bessere Stromleitung als Kupfer aufweisen. Ihre Belastbarkeit ist 50- bis 100-fach höher als von Stahl und ihre Wärmeleitung besser als die von Diamant!
- Graphen,⁴ eine zweidimensionale Struktur aus Kohlenstoffatomen, ist ein hervorragender Leiter auch bei hohen Temperaturen, besitzt eine mechanische Festigkeit fast wie Diamant und eine Zugfestigkeit, welche der 180-fachen von Stahl entspricht. Graphen ist darüber hinaus noch flexibel und transparent (vgl. Seyller 2013).

Nicht so einstimmig und offenbar von den partiellen Interessen bestimmter Institutionen und Verbände geleitet ist derzeit die Definition der verbreiteten Begriffe Nanotechnologie und Nanomaterial. Der Disput darüber ist derzeit noch nicht abgeschlossen (vgl. BMBF 2013). Die Europäische Union verabschiedete im Jahr 2011 eine sehr weit reichende Definition von Nanomaterialien, die auch natürliche Materialien (wie Pigmente, Farbstoffe, Ruß usw.) erfasst:

„Nanomaterial ist ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder als Agglomerat enthält, und bei dem mindestens 50% der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 bis 100 nm haben“ (zitiert nach BMBF 2013, S. 102).

Die ISO und der Deutsche Verband für Nanotechnologien gehen von einer stark auf die Anwendung orientierten zweiteiligen Definition aus, die (hier gekürzt) lautet:

„Das Verständnis und die Kontrolle von Substanzen oder Prozessen auf der Nanoebene, die typischer Weise [...] unterhalb von 100 nm liegen und durch ihre

3 1991 von Sumio Iijima (Japan) entdeckt.

4 Vgl. Novoselov et al. 2004; Konstantin Sergejewitsch Novoselov und Andre Konstantin Geim erhielten 2010 den Nobelpreis.

größenabhängigen Effekte [...] neue Anwendungen hervorbringen. Die Nutzung von Eigenschaften nanoskaliger Materialien, die sich von den Eigenschaften einzelner Atome, Molekül und Bulk-Materialien unterscheiden und dadurch verbesserte Materialien, Anwendungen und Systeme erzeugen, die diese Eigenschaften anwenden.“⁵

2 Anwendungsfelder von Nanotechnologie

Die Nanotechnologie hat in den letzten Jahren zahlreiche Anwendungsfelder erschlossen und in diesen zu einem bedeutenden Innovationsschub geführt (vgl. NTEC 2012, 2013, 2014). Gemäß einer Umfrage⁶ im Auftrag des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter 173 Unternehmen und Einrichtungen auf diesem Gebiet nach der Bedeutung der Nanotechnologie für derzeitige Anwendungen ergibt sich folgende Reihenfolge in der Bewertung (vgl. BMBF 2013): Elektronik, Medizin und Pharmaindustrie, Automobilbau, Optik, Geräte- und Maschinenbau, Chemie, Energie, Umwelttechnik, Bauwesen, Raum- und Luftfahrt, Textilindustrie, Sicherheitstechnik sowie Haushaltsgeräte und -mittel. Bereits aus der Breite dieser Palette von Industriezweigen wird die enorme Bedeutung der Nanotechnologie für die gesamte Wirtschaft deutlich. Dem entspricht, dass die Zahl von Unternehmen, die sich mit dem Einsatz der Nanotechnologie in Bereichen der Forschung und Entwicklung sowie der Herstellung und Vermarktung kommerzieller Produkte und Dienstleistungen befassen und im Kompetenzatlas Nanotechnologie erfasst sind ständig steigt und im Jahr 2013 bereits die Zahl 1.135 erreicht hat.

Eine gleichzeitig erfolgte Befragung von 159 Forschungsinstitutionen nach den Anwendungsfeldern, welche voraussichtlich in den kommenden fünf bis zehn Jahren am stärksten von den Forschungsergebnissen zur Nanotechnologie profitieren werden, ergab folgende Reihenfolge in der Bewertung: Medizin und Pharmaindustrie, Elektronik, Energie, Chemie, Optik, Umwelt, Maschinenbau, Mobilität und Transport, Sicherheitstechnik, Verbraucherprodukte, Ernährung, Sonstige, Textilindustrie, Bauen und Wohnen. Bemerkenswert ist, dass die Spitzenpositionen auch künftig von Elektronik und Medizin/Pharma eingenommen werden, daneben jedoch der Bereich Energie voraussichtlich stark an Bedeutung gewinnt und sich die Anwendungsbreite vermutlich weiter erhöhen wird.

5 <http://www.dv-nano/print/infoportal> [20.02.2015].

6 Diese Umfrage erfolgte 2013 durch das VDI Technologie-Zentrum Düsseldorf.

Die rasant steigende ökonomische Bedeutung der Nanotechnologie lässt sich auch anhand der in Tabelle 1 aufgeführten derzeitigen und künftig prognostizierten Werte der weltweit hergestellten Nanotechnologie-Produkte ableiten, die von keiner der führenden Wirtschaftsregionen unbeachtet bleiben kann. Der technische Fortschritt erfolgt in diesem Fall nicht in Form eines eigenständigen neuen Technikzweiges, sondern hauptsächlich in Folge von Innovationen innerhalb der traditionellen Anwendungsrichtungen, wie Elektronik, Maschinenbau, Chemie etc.

Tabelle 1: Marktsegmente und Marktprognosen für einige Anwendungsbereiche der Nanotechnologie

Marktsegment	Wert bisher Mrd. US\$ – Bezugsjahr	Wert künftig Mrd. US\$ – Bezugsjahr
Nanomaterialien	15,9 – 2012	37,3 – 2017
Nanobeschichtungen	9,3 – 2011	14,9 – 2016
Nanoanalytik	2,7 – 2011	3,4 – 2016
Nanostrukturierung	4,8 – 2012	11,4 – 2017
Medizin	43,2 – 2011	96,9 – 2016
Verbindungshalbleiter-Elektronik	27 – 2012	47,4 – 2017
Photonik	350 – 2011	615 – 2020
Energie und Umwelt	2,5 – 2012	5,8 – 2017
flexible Elektronik	10,8 – 2012	27 – 2017

Quelle: Die Zahlenangaben wurden einer wesentlich ausführlicheren Tabelle in Kapitel 3 von NREP 2013 entnommen

3 Aktuelle nanotechnologische Anwendungen auf dem Energiesektor

Nanotechnologische Innovationen sind in fast allen Bereichen des Energiesektors zu finden und tragen zu Steigerung der Energieeffizienz sowie zur verbesserten Energiewandlung, wie auch der Energiespeicherung und dem Energietransport bei. Die Zielstellungen werden im Folgenden kurz (und bei weitem nicht vollständig) charakterisiert (vgl. auch Schaf 2014).

3.1 Energiegewinnung und -wandlung

Im Zuge des beschleunigten Übergangs zur Nutzung erneuerbarer Energien soll Nanotechnologie dazu beitragen, den Wirkungsgrad von Photovoltaik-Systemen zu verbessern, deren Herstellungskosten zu senken und neue Materialien für die Photokatalyse zu entwickeln. Um den stärkeren Einsatz von Brennstoffzellen voran zu treiben, soll mittels Nanotechnologie eine wesentliche Erhöhung des Wirkungsgrades dieser Anlagen erreicht werden, der flexible Einsatz von Brennstoffen (Wasserstoff oder Methan) erreicht und Edelmetallkatalysatoren eingespart werden. Die direkte Umwandlung von chemisch gebundener Energie in elektrische Energie durch Brennstoffzellen hat das Potenzial, in Zukunft wesentlich zur Energieversorgung beizutragen. Dabei erscheinen elektrische Wirkungsgrade bis zu 60% und Gesamtwirkungsgrade über 90% im Fall der Kraft-Wärme-Kopplung realisierbar.

Als besonders aussichtsreich werden hierbei Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit Festoxid-Elektrolyten (solid oxid fuel cells – SOFC) angesehen, da sie sowohl mit Wasserstoff wie auch mit Kohlenwasserstoff sowie ohne Edelmetalleinsatz betrieben werden können und eine hohe Toleranz gegenüber Gasverunreinigungen besitzen.

Ein erhebliches Potenzial für Energieeinsparung mittels Nanotechnologie liegt in der Nutzung von Wärme oder Abwärme zur Elektroenergieerzeugung. Das betrifft sowohl die Wärme-Strom-Umwandlung in Solarkraftwerken, wie auch Wärme-Kraft-Maschinen sowie Transportmittel, inklusive Senkung des Treibstoffverbrauchs von PKW. Um elektrische Energie direkt aus Abwärme zu gewinnen, braucht man effiziente thermoelektrische Werkstoffe. Spezifische Materialien und Materialstrukturen werden hierfür entwickelt, die stark variierende Anwendungsbereiche hinsichtlich Temperaturbereich und Temperaturdifferenz abdecken können.

Der Temperaturbereich für Thermoelektrische Generatoren reicht bei Hochtemperaturanwendungen von 1.000⁰C, die bei solarthermischen Anlagen auftreten, über Werte im Bereich von einigen Hundert Grad, die typisch für Wärme-Kraft-Maschinen sind, bis zu Umgebungstemperaturen für das sogenannte „energy harvesting“. Um kostengünstige Lösungen zu finden, gehören hierzu auch preisgünstige Synthese- und Depositionsverfahren. Auch bei Windkraftanlagen sind Innovationen infolge des Einsatzes von Nanotechnologie zu erwarten, das betrifft einerseits die Entwicklung von Hochleistungswerkstoffen für die Generatoren und Steuerung, andererseits verbesserte Beschichtungen der Rotorblätter. Besonders Rotorblätter für Off-shore-Anlagen, die bis über 100 Meter lang, und täglich hoher, stark wech-

selnder Beanspruchung durch Sturmböen und Seeklima ausgesetzt sind, müssen extrem korrosionsbeständig sein. Im Fokus der Werkstoffentwicklung stehen daher die Weiterentwicklung von High-Tech-Stählen und Beschichtungen für Rotoren, Getriebekomponenten und Lager.

3.2 Energiespeicherung

Die Unregelmäßigkeit ihrer Erzeugung macht erneuerbarer Energien schwer kalkulierbar und birgt die Gefahr von Versorgungslücken oder kurzzeitigen Leistungsüberschüssen. Neue oder verbesserte Lösungen zur Energiespeicherung sollen zeitliche und/oder örtliche Diskrepanzen zwischen Bereitstellung und Bedarf von Energie überbrücken. Energiespeicher stellen damit eine wesentliche Komponente bei der Entwicklung künftiger effizienter energie-technischer Systeme dar. Hohe Erwartungen hinsichtlich der Optimierung von Speicherdichte, Speicherleistung und -effizienz sowie deren Kostensenkung bei Speichern von Elektroenergie sind ebenfalls an die Nanotechnologie gerichtet. Das betrifft insbesondere die Lithium-Ionenbatterien, welchen eine tragende Rolle bei der künftigen Elektromobilität zukommt. Derzeit haben diese Speicher immer noch zu viel Volumen und Gewicht. Das hängt davon ab, welche Menge von Li-Ionen im jeweiligen Elektrodenmaterial eingelagert werden kann. Zu den Elektrodenmaterialien mit der höchsten Kapazität gehört Silizium. Dieses Element kann aber in der Praxis bisher nicht eingesetzt werden, da es sich bei Einlagerung von Lithium stark ausdehnt (bis zu 300% des ursprünglichen Volumens) und damit mechanisch schnell instabil wird. Das Ziel besteht daher, auf Basis nanoporöser Siliziumstrukturen, neue Systeme für die Energiespeicherung zu entwickeln, welche die Volumenänderung bei Einlagerung von Lithium innerhalb einer relativ „lockeren“ Si-Struktur auffängt.

Auch das traditionelle Gebiet der *Wasserelektrolyse* gilt als ein Schlüssel zur sicheren, schnellen und effizienten Energiespeicherung für elektrische Leistungen bis in den GW-Bereich. Diese seit langem bewährte Technologie soll durch Einsatz von Nanotechnologie hinsichtlich des Wirkungsgrades verbessert und in ihren Kosten gesenkt werden. Im Zusammenhang mit der Energiewende sind von besonderem Interesse Elektrolysatoren, die kurzzeitig Leistungen im Gigawatt-Bereich aufnehmen, in Wasserstoff umwandeln, welcher – gasförmig, flüssig oder chemisch gebunden – gespeichert und in energetisch nutzbares klimaneutrales Industriegas verwandelt oder vollständig methanisiert („Power to Gas“) und für Heizzwecke genutzt werden kann. Somit könnten anfallende Stromspitzen aus Solar- und Wind-

kraft ökonomisch sinnvoll verwertet werden. Als Gegenstück zu der oben genannten SOFC lässt hierfür die Hochtemperatur-Elektrolysezelle (Solid oxide electrolysis cell – SOEC) eine besonders hohe Energieeffizienz erwarten.

3.3 *Energietransport*

Die Effizienz des Energietransports bei der Strom- oder Wärmeverteilung wird durch Beschaffenheit und Eigenschaften der Werkstoffe bestimmt. Die Anforderungen reichen von Isolationsmaterialien für Hochspannungsanwendungen über supraleitende Netzkomponenten bis zu nanostrukturierten Wärmeleitern oder Wärmeisolatoren. Auch beim Energietransport kann Nanotechnologie beträchtliche Verbesserungen bringen, das betrifft einerseits Stromleiter, bei denen durch geeignete Materialsubstitution oder Beschichtung erhöhte Leitfähigkeit und/oder Festigkeit, verringerter Kontaktwiderstand und Korrosion sowie Kostenreduzierungen und leichtere Integrierbarkeit neu entwickelter Leitermaterialien in bestehende Systeme angestrebt werden. Eine weitere bedeutsame Entwicklungsrichtung betrifft supraleitende Netzkomponenten, die in Hochleistungsschalten, -transformatoren und -reglern zum Einsatz kommen, darunter auch in Windkraftanlagen.

Nicht unerwähnt bleiben sollen Entwicklungen verbesserter Isolierwerkstoffe zur Senkung von Energieverlusten auf der Grundlage neuer, nanoporöser Materialien, die z.B. als Spezialdämmstoffe im Hochtemperaturbereich und darüber hinaus in Zukunft auch für die Gebäudetechnik im Blickfeld sind. Viele Netzkomponenten wie Schalter, Transformatoren oder Leistungsregler sollen künftig auf Supraleitern basieren. Vorteilhaft ist, dass für deren Kühlung, statt teils giftiger oder brennbarer Stoffe, flüssiger Stickstoff zum Einsatz kommt. Solche Systeme ermöglichen nicht nur höhere Stromdichten sondern vermeiden auch bei Havarie Brände und andere Folgeschäden.

Isolierwerkstoffe haben die Aufgabe, Wärmeverluste zu minimieren, dabei müssen sowohl der Leitungstransport als auch der konvektive und Strahlungswärmetransport berücksichtigt werden. Die Ansätze für nanotechnologische Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet sind anwendungsbezogen: Im Raumtemperaturbereich, beispielsweise für die Gebäudetechnik, stehen Alternativsysteme sowie Stabilitäts- und Dichtenaspekte im Vordergrund. Im Hochtemperaturbereich für Prozesstechnik und Abgassysteme sollen die Wärmeleitfähigkeit verringert und der Strahlungstransport minimiert werden.

3.4 Förderschwerpunkte

Diese Zielstellungen spiegeln auch die seitens des BMBF gesetzten Förderschwerpunkte wider (vgl. BMBF 2013), die nachfolgend mit beispielhafter Nennung geförderter F/E-Themen beschrieben werden und die immense Breitenwirksamkeit der Nanotechnologie für die Energietechnik zeigen.

Auf dem Gebiet der *elektrochemischen Speicher* werden insbesondere Lithium-Ionen-Batterien und deren Optimierung durch nanoskalige Materialien wie Graphen oder neuartige Nanokomposite für die Elektroden und andere Zellkomponenten finanziert. Höhere Energiedichten sollen durch sogenannte Hochvoltsysteme mit Zellspannungen bis fünf Volt erreicht werden. Weitere Schwerpunkte bilden die Erhöhung der Betriebssicherheit von Elektrolyt- und Membransystemen. Neben den konventionellen Li-Ionen-Systemen werden neue elektrochemische Materialkonzepte erforscht, insbesondere Alkali-Schwefel-Systeme, von denen wiederum Lithium-Schwefel-Systeme am erfolgversprechendsten hinsichtlich erhöhter Speicherkapazität sind. Noch höhere Speicherdichten versprechen Lithium-Luft-Zellen, bei denen die Kathode durch Luft ersetzt und der für die Reaktion benötigte Sauerstoff aus der Umgebungsluft bezogen wird. Einige der geförderten Forschungsthemen auf diesem Gebiet lauten:

- Materialkonzepte für Alkali-Schwefel-Batterien;
- Einsatz von Graphen in Lithiumbatterien und Brennstoffzellen;
- Entwicklung einer Lithium-Schwefel-Batterie für die Elektromobilität auf der Basis nanostrukturierter Siliziumanoden;
- Entwicklung nanostrukturierter bzw. nanoporöser Elektroden für Lithium-Luft-Batterien mit optimierter Leistung;
- Entwicklung sicherer Elektrolytsysteme für Lithium-Ionen-Polymer-Batterien mit optimierter Langzeitstabilität auf der Basis neuer Molekülstrukturen;
- Entwicklung einer neuen Generation von Lithium-Ionen-Batterien auf Basis neuartiger nanoskaliger Kompositmaterialien.

Höchste Leistungsdichten, wie sie während der Beschleunigungsphasen von Elektrofahrzeugen erforderlich sind, lassen sich nur mit Hilfe von sogenannten *Superkondensatoren* erreichen, deren Optimierung auf der Basis von Nanopartikeln, Graphen oder nanostrukturierten Bauteilen ebenfalls gefördert werden. Auch hierfür einige Beispiele für F/E-Themen:

- Neue Superkondensatoren auf Basis ferroelektrischer Nanoteilchen als Energiespeicher;
- Entwicklung neuartiger elektrischer Energiespeicher-Systeme (Doppelkondensatoren) auf Basis dreidimensionaler Nanostrukturierung;
- Entwicklung innovativer elektrochemischer Superkondensatoren u.a. durch Verwendung von Graphen als neuartiges Elektrodenmaterial.

Nanostrukturierte Systembauteile, insbesondere auf Basis von Graphen oder Kohlenstoff-Nanoröhrchen, sollen auch in der *Brennstoffzellentechnologie* zum Einsatz gebracht werden, um Elektrizität direkt aus Wasserstoff oder Methan zu erzeugen. Beispielhafte Themen sind:

- Optimierte Herstellung von PEM⁷-Brennstoffzellen im Spritzguss durch Verwendung von Graphen als neuartiges Elektrodenmaterial;
- Untersuchung von Defektbildungsmechanismen bei der Synthese von Nanostrukturen in Elektroden und Elektrolyten von Feststoffoxid-Brennstoffzellen.

Für den umgekehrten Prozess, die Verwertung von temporär überschüssiger Elektroenergie aus regenerativen Quellen auf dem Wege der Konversion „Power-to-Gas“, sind vor allem effiziente und flexibel betreibbare *Elektrolyseure* und *Wasserstoffspeicher* erforderlich, deren Entwicklung mittels Nanomaterialien ebenfalls ein Förderschwerpunkt ist. Themenbeispiele hierfür lauten:

- Entwicklung leichter, stationärer und mobiler Wasserstofftanks mit hoher Betriebssicherheit, Energieeffizienz und Speicherkapazität auf der Basis neuartiger, nanoporöser Metall-Kohlenstoff-Komposite;
- Entwicklung neuer Membran-Elektroden-Einheiten für alkalischen PEM-Elektrolyse zur flexiblen Wasserstofferzeugung aus regenerativen Energien mit häufigen Lastwechseln;
- Entwicklung großflächiger drei-dimensionaler Nanostrukturierungstechniken zur Realisierung von Hochleistungs-Nano-Bauelementen für Tandem-Solar-Brennstoffzellen, Superkondensatoren, optische Sensoren und organische nichtflüchtige Speicher.

Ein alternativer Weg zur Erzeugung von Wasserstoff als Energieträger ist die ebenfalls geförderte *photo-katalytische Spaltung von Wasser* an nanostrukturierten Oberflächen. In diesem System werden die besonderen opti-

7 PEM – Polymer-Elektrolyt-Membran.

schen Eigenschaften der Nanopartikel dazu genutzt, Sonnenlicht direkt in den Energieträger Wasserstoff umzuwandeln, welcher später in Brennstoffzellen zur Stromerzeugung oder direkt in chemischen Prozessen verwertet werden kann. Themenbeispiele hierfür sind:

- Solar-thermochemische Erzeugung chemischer Produkte aus H_2O und CO_2 mittels nanoporöser und nanopartikulärer Metallkomposite;
- Nanostrukturen zur lichtinduzierten Wasserstoffentwicklung aus der photokatalytischen Spaltung von Wasser.

In der *Photovoltaik* steht die Verbesserung des Wirkungsgrades von Solarzellen und deren Kostensenkung im Vordergrund. Einige ausgewählte F/E-Themen auf diesem Gebiet sind:

- Infrarot-optische Nanostrukturen für die Photovoltaik zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Solarzellen;
- Nanoskalige III-V / Silizium Heterostrukturen für hocheffiziente Solarzellen;
- Neue Absorbermaterialien aus unbegrenzt verfügbaren Rohstoffen für Dünnschichtsolarzellen unter Verwendung von Nanopartikeln;
- Entwicklung neuartiger organischer Solarzellen mit Fullerenen als Elektronenempfänger;
- Entwicklung druckbarer Dünnschicht-Photovoltaik auf Basis organisch-anorganischer (CIGS)⁸ Hybridsysteme unter Einsatz von Nanostrukturen und Nanopartikeln.

Auf dem Gebiet der Entwicklung von *Thermoelektrika* liegt im Schwerpunkt die Nutzung der Abwärme aus Industrieanlagen und vor allem auch der Automobile, mit Themen wie:

- Entwicklung effizienter thermoelektrischer Dünnschichtbauelemente auf Silizium- und Germaniumbasis durch Nanostrukturierung;
- Entwicklung druckbarer organischer thermoelektrischer Generatoren u.a. auf Basis von Hybridmaterialien aus organischen Polymeren und anorganischen Nanopartikeln;
- Entwicklung von Hochtemperatur-Thermogeneratoren mit hoher Effizienz für den Kraftfahrzeugeinsatz auf Basis oxidischer Nanopartikel;
- Entwicklung hoch effektiver thermoelektrischer Halbleiter mit niedrig konzentrierten Zusätzen auf der Basis selbstorganisierender Nanostrukturen in Chalkogeniden.

8 CIGS – Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid.

Auch das Gebiet der *Hochtemperatursupraleiter* wird ebenfalls von der Nanotechnologie entscheidend profitieren – ein Themenbeispiel: Entwicklung optimierter Hochtemperatursupraleiter auf Basis verbesserter chemischer Abscheideverfahren zur Erzeugung nanoskaliger Schichtsysteme.

Das Vorstehende ist – wie bereits erwähnt – nur eine Auswahl der vom BMBF im Jahr 2013 geförderten Themen mit Bezug zur Energietechnik. Zieht man in Betracht, dass neben dem BMBF auch andere öffentliche Einrichtungen zur F/E-Förderung und Finanzierung auf Bundes- und Länderebene, auf privatwirtschaftlicher Basis sowie aus Stiftungen bestehen und aktiv genutzt werden, dass weiterhin die Energietechnik bei weitem nicht die umfangreichste Anwendungsrichtung für Nanotechnologie darstellt (siehe z.B. Tabelle 1), so erhält man einen Eindruck vom immensen Umfang und Breite des Innovationspotenzials, dessen Wirkung für die gesamte Wirtschaft und insbesondere auch auf dem Gebiet der Energietechnik in den kommenden zu erwarten ist.

Die wichtigsten nationalen Fördereinrichtungen und Netzwerke der Nanotechnologie in Deutschland sind (vgl. BMBF 2013):

- Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie weitere Bundesressorts;
- Bundesländer;
- Institutionelle Förderer;
- Leibniz Netzwerk Nano (mit 86 Institutionen);
- Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie (mit 20 FhG-Instituten);
- Initiative Nano in Germany (mit 100 Mitgliedern aus Forschung, Industrie und Wissenschaft);
- Deutscher Verband Nanotechnologie (breiter Kreis von Nutzern, Produzenten und Forschern);
- Stiftungen und Sonstige (z.B. VW-Stiftung).

Hinzu kommt eine beträchtliche Förderung international abgestimmter Projekte auf Ebene der Europäischen Union mit Relevanz zur Energietechnik. Insgesamt sind in den vergangenen Jahren abgestimmt in der EU 60 Nanotechnologieprojekte zu regenerativen Energien, insbesondere zu Photovoltaik, Dünnschicht-Solarzellen, Konzentratoren und anderen Themen gelaufen. Hinzu kamen solche energietechnisch relevanten Komplexthemen wie:

- NANOHEX, zur Entwicklung von Wärmetauschern mit fluiden Kühlmitteln;

- SUPRA-BIO, zur Entwicklung nanokatalytischer Verfahren für Werkstoffe, Kraftstoffe, Herstellung chemischer Produkte aus Biomasse;
- EUROTAPES, zur Technologie für die Herstellung langer supraleitender Bänder für die Leistungselektronik und Hochleistungsmagnete.

4 Risiken der Nanotechnologie

Im Jahr 2003 analysierte ein erster Bericht die Chancen und Risiken sowie die Sicherheit für Mensch und Umwelt aus der Nanotechnologie (vgl. Pasche et al. 2003), ein Jahr später erschien in der Royal Society London ein weiterer Bericht, der sehr kritisch zu den Problemen der Sicherheit für Menschen und Umwelt durch synthetische Nanoteilchen Stellung bezog. Heute gibt es in allen Industrieländern nationale Aktionspläne Nanotechnologie, in denen auch die Risiken und der sichere Umgang mit Nanotechnologie eine zentrale Rolle spielen und meist als nationale Forschungsprogramme enthalten sind, so hat das Projekt NanoCare (vgl. Kuhlbusch et al. 2009) Maßstäbe hinsichtlich Aussagekraft auf diesem Gebiet gesetzt. Auch zur Erforschung von Risiken für Mensch und Umwelt wurden seit 2009 bisher 20 Projekte innerhalb der beiden Teilprogramme NanoCare und NanoNature durch das BMBF gefördert, wobei insbesondere die enge Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie dazu diente, marktfähige Produkte hinsichtlich ihrer Risiken zu untersuchen (vgl. BMBF 2003). Die Risikoforschung in den vergangenen zehn Jahren hat den Umgang mit der Nanotechnologie sicherer gemacht und ermöglicht die Abschätzung möglicher Gefährdungen.

Diese Anstrengungen haben dazu geführt, dass der anfängliche Mythos einer generellen nano-spezifischen Toxizität ausgeräumt werden konnte und eine Beruhigung und Versachlichung der Diskussion eingetreten ist. Anstelle dessen ist die Erkenntnis von der Notwendigkeit getreten, für bestimmte Problemstoffe Grenzwerte beim Umgang und Einsatz festzulegen, eine technologie-begleitende Sicherheitsforschung künftig weiterhin durchzuführen und geeignete Methoden zum Nachweis von Nanoteilchen in verschiedenen Produkten zu entwickeln. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) hat im Jahr 2007 einen Leitfaden für den sicheren Umgang mit Nanomaterialien am Arbeitsplatz veröffentlicht. Der Ausschuss für Gefahrstoffe des Bundesministeriums für Arbeit hat im Mai 2013 in der Bekanntmachung „Hergestellte Nanomaterialien“ auf Grundlage der Gefahrstoffverordnung Empfehlungen zur Informationsermittlung und Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Nanomaterialien publiziert. Daraus ergeben

sich differenzierte Empfehlungen für den Umgang mit den verschiedenen Arten und Zusammensetzung von Nanomaterialien, so wie das für andere Gefahrstoffe seit langem in der Praxis gehandhabt wird.

Schließlich hat auch die Europäische Union im Jahr 2012 ihre zweite Überprüfung der Rechtsvorschriften für Nanomaterial veröffentlicht, ergänzt durch Angaben zu den auf dem Markt befindlichen Nanomaterialien, ihrer Verwendung und Sicherheit.⁹

So kann man heute feststellen, dass sich auch das Gebiet der Nanotechnologie hinsichtlich der hohen Sicherheitsstandards hin zu einem „normalen“ Arbeitsgebiet entwickelt hat, in dem die spezifischen Gefährdungen verschiedener Stoffe klar aufgezeigt, Grenzwerten für den Umgang mit diesen definiert und erforderliche Vorsichtsmaßnahmen zur Vermeidung bzw. Minimierung von Belastungen für Mensch und Umwelt nach dem jeweils neuesten und durch weitere gezielte Forschung sich ständig vertiefenden Stand der Kenntnis getroffen werden.

5 Zu einigen spezifischen Anforderungen an Forschung und Entwicklung

Die Frage nach den Voraussetzungen und Hemmnissen für eine erfolgreiche Entwicklung von Forschung und Produktentwicklung auf dem Gebiet der Nanotechnologie haben in der Branche tätige Institutionen und Unternehmen wie folgt beantwortet (vgl. BMBF 2013): Zu den Erfolgsfaktoren wurden, neben ausreichender finanzieller Förderung, vor allem die Kooperation zwischen Forschung und Industrie sowie die nationale und internationale Forschungsk Kooperation genannt. Darüber hinaus sind Ausbildung und Nachwuchsentwicklung sowie klare regulatorische Vorgaben seitens der Gesetzgebung von Bedeutung. Demgegenüber wurden als Innovationshemmnisse genannt: Mangel an Fachpersonal und unternehmerischem Know-how sowie an Geschäftsmodellen, hohe Investitionskosten, negative Medienberichterstattungen sowie immer noch unzureichend klare regulatorische Vorgaben. Insofern unterscheidet sich die Nanotechnologie heute kaum von anderen neuen, in der Phase aufstrebender Entwicklung befindlichen Technologiebereichen.

Ein entscheidender Unterschied besteht dagegen in der Komplexität der wissenschaftlichen und technologischen Problemstellungen, die von dem

9 Vgl. [http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/second_regulatory_review_on-nanomaterialia_com\(2012\)_572.pdf](http://ec.europa.eu/nanotechnology/pdf/second_regulatory_review_on-nanomaterialia_com(2012)_572.pdf).

Gebiet aufgeworfen werden: Klassische Festkörperphysik, Materialwissenschaften, Chemie, Oberflächenphysik und -chemie gehen fließend über und verschmelzen mit den Problemstellungen, die im Bereich von Quantenphysik und Quantenchemie angesiedelt sind, inklusive der dafür angewandten Untersuchungsmethoden. Neue spezifische Teilgebiete der Forschung entstehen: Nanooptik, Physik hoher elektromagnetischer Felder an der Oberfläche von Nanostrukturen. Bei Dimension in der Nanoebene entstehen neue Verzahnungen mit biologischen und medizinischen Problemen usw. Enorme Fortschritte in der Strukturierung, Manipulation und Analyse bis hinunter auf den atomaren Maßstab (vgl. Abstreiter 2014) haben zu einer Vielzahl neuartiger Entwicklungen bei Quanteninstrumenten, Nanosystemen und Sensoren geführt.

Diese enorme Komplexität soll anhand des Beispiels Zentrum für Licht-Materie Interaction (LISA⁺), Sensoren & Analytik der Universität Tübingen illustriert werden, zu dem sich achtzehn Forschungsgruppen aus Physik und Chemie zusammengeschlossen haben (vgl. NTEC 2012): Die beteiligten Forscher haben sich zum Ziel gestellt, ihre vorhandenen Expertisen in engem Zusammenspiel von Theorie und Experiment sowie durch gemeinsame Nutzung und Erweiterung der experimentellen Techniken und Apparaturen weiter zu bündeln und für die Entwicklung neuer Messmethoden nutzbar zu machen. Das Projekt vereint bereits bestehende Kooperationen aus den Bereichen Center for Collective Quantum Phenomena and their Applications, Center for Light Harvesting and Nanophotonics sowie zu Sensoren. Zu diesem Gesamtkomplex gebündelt tragen 15 Arbeitsrichtungen bei, das sind: Theoretische Festkörperphysik, Quantenchemie, Nano-Atomphysik, Nanooptik, Quanten-Ionen-Interferometrie, Supraleitende & magnetische Schichtstrukturen, Analytische Chemie, Astrophysik, Nano-Biophysik & medizinische Physik, Physik der molekularen & biologischen Materie, Photosynthese & Einzelmolekülspektroskopie, Oberflächen & Grenzflächen, Dünne Schichten, Nanooptik & Spektroskopie einzelner Quantensysteme, Nanostrukturen & mesoskopische Physik, Computational cold atom physics.

Wie betont, ist das lediglich ein Beispiel für viele andere komplexe Forschungsstrukturen und -kooperationen, die sich herausgebildet haben und es soll zeigen, dass ein besonderes Merkmal der Nanotechnologie nicht nur in der Vielfalt der Anwendungsgebiete sondern auch in der Vielfalt der Forschungsgebiete, ihrer wissenschaftlichen Verzahnung sowie der innewohnenden Potenz zur Geburt immer neuer Forschungszweige im wissenschaftlichen Neuland ist.

6 Kurzes Resümee

Eine physikalische Ursache für ihre besonderen technologischen Eigenschaften geht darauf zurück, dass die Nanotechnologie in Längenskalen vorstößt, bei denen Oberflächeneigenschaften gegenüber den Volumeneigenschaften von Festkörperstrukturen in den Vordergrund treten oder sogar dominieren. Dabei gewinnen spezifische quantenphysikalische und -chemische Effekte eine zunehmende Bedeutung, ebenso wie das bei der weiteren Miniaturisierung der Computertechnik der Fall ist. Neue Erkenntnisse der Quantenphysik und -chemie schlagen schnell um in neue technologische Prozesse mit weitreichenden praktischen Anwendungen – das ist ein Merkmal der modernen Wissensgesellschaft. Der vorliegende Kurzbeitrag zum 6. Symposium für Allgemeine Technologie konnte sich nicht zur Aufgabe stellen, dieses Gebiet mit enormer Breite in auch nur annähernder Vollständigkeit zu beschreiben, sondern lediglich einen Eindruck von dem Innovationspotential der Nanotechnologie für die Wirtschaft, mit dem hier gewählten Schwerpunkt Energietechnik, sowie andere gesellschaftliche Bereiche, insbesondere für die Wissenschaftsentwicklung selbst, zu beleuchten. Die Vorhersage scheint nicht zu hoch gesteckt, wenn man die Erwartung ausspricht, dass durch diese Forschungen im Grenzbereich zwischen Mikro- und Makrokosmos auch künftig gravierende neue wissenschaftliche Erkenntnisse mit weitreichender praktischer Wirksamkeit entstehen werden. Insofern besteht ein eindeutiger Bezug zur Thematik dieses Symposiums, da ein Zusammenhang zwischen den Fortschritten bei der wissenschaftlichen Erkundung und praktischen Implementierung der Nanotechnologie als einem tragenden Element der Wissensgesellschaft und der künftigen Entwicklung der menschlichen Gesellschaft insgesamt besteht, insbesondere hinsichtlich des angestrebten Energiewandels, der Umweltverträglichkeit, Nachhaltigkeit durch Ökonomie der verfügbaren Rohstoffe und Ressourcen sowie der materiellen Absicherung der Bedürfnisse einer weltweit wachsenden Menschheit, inklusive ihres wachsenden Nahrungsmittel- und Energiebedarfs.

Abschließend sei Professor Dr. Martin Strohrmann, Senior Vice President, Material Physics & Analytics, BASF, zu den Perspektiven der Nanotechnologie für die Energiewende in Deutschland zitiert, der diese Erwartungen prägnant fasst:

„Die Nanotechnologie ist aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Sie ist ein starker Investitionstreiber bei der Entwicklung nachhaltiger Lösungen, die wir benötigen um den großen Herausforderungen unserer Zeit zu begegnen. Ihr Potential hat sie noch lange nicht voll entfaltet. Wie wir unsere hoch ge-

steckten Ziele wie zum Beispiel die Energiewende erreichen – ob mit oder ohne nano – wird zwar letztlich egal sein. Ich bin aber sicher, es geht nicht ohne Nanotechnologie“ (zitiert nach BMBF 2013, S. 21).

Literatur

- Abstreiter, G. (2014): Die Dimension macht den Unterschied – niedrigdimensionale Halbleiterstrukturen sind die Basis für viele neue Effekte. In: Physik Journal, Jg. 13, Nr. 8/9, S. 29–34
- Kohlert, Chr. (2011): Nanotechnologie: Vor- und Nachteile der Anwendung für polymere Folien. In: Banse, G.; Reher, E.-O: (Hg.): Ambivalenzen von Technologien. Berlin, S. 117–129 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 112)
- Kuhlbusch, T. A.; Krug, H. F.; Nau, K. (2009): NanoCare: Health Related Aspects of Nanomaterials. Final Scientific Report. Frankfurt am Main u.a.O.
- Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S. V.; Grigorieva, I. V.; Firsov, A. A. (2004): Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. In: Science, No. 306, pp. 666–669
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2014): nano.DE-Report 2013. Status quo der Nanotechnologie in Deutschland. Berlin
- NTEC (2012): nanoTechnologie aktuell, Ausgabe 5. Lampertheim (Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen)
- NTEC (2013): nanoTechnologie aktuell, Ausgabe 6. Lampertheim (Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen)
- NTEC (2014): nanoTechnologie aktuell, Ausgabe 7. Lampertheim (Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen)
- Paschen, H.; Coenen, Chr.; Fleischer, T.; Grünwald, R.; Oertel, D.; Revermann, C. (2003): Nanotechnologie. Berlin (Büro für Technikfolgeabschätzung beim Deutschen Bundestag) (TAB-Bericht Nr. 92)
- Schaaf, P. (2014): Kleine Werkstoffe für die große Energiewende. In: nanoTechnologie aktuell, Ausgabe 7. Lampertheim (Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen), S. 40–44
- Seyller, T. (2013): Graphen – Multitalent unter den Nanomaterialien. In: nanoTechnologie aktuell, Ausgabe 5. Lampertheim (Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen), S. 16–20