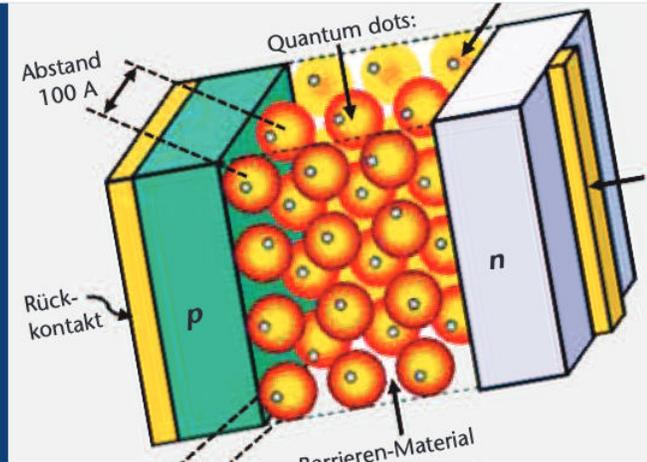


Symposium ■ ForschungsVerbund Sonnenenergie



Nanotechnologie für eine nachhaltige Energieversorgung

29.–30.11.2007 in Berlin



ForschungsVerbund Sonnenenergie

Symposium

Nanotechnologie für eine nachhaltige Energieversorgung

29.–30.11.2007 in Berlin

Herausgeber:

Prof. Dr. Martha C. Lux-Steiner

Dr. Thomas Hannappel

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie



FVS • Symposium 2007

Veranstalter: Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

Inhalt

Vorwort	3
Funktionsprinzipien und Einsatz der Technologien für die Energieversorgung	5
Visionen	13
Lösungskonzepte	21
Nationale und internationale Forschungs- und Entwicklungstrends	26
Vorhandene Stärken und Expertise	29
Anforderungen und Erfolgsfaktoren	31
Die größten Herausforderungen	34
Prioritäten und effiziente Umsetzung	37
Themenübergreifende Synergien	42
Verzeichnisse	
Symposiumsteilnehmer	44
Standorte der Mitgliedsinstitute FVS	47
Anschriften der Mitgliedsinstitute FVS	48
Impressum	49

Nanotechnologie für eine nachhaltige Energieversorgung

Forschungsagenda aus Sicht der Industrie und der (außer-)universitären Forschungsinstitutionen mit Expertise in Nanotechnologie und Technologien für eine nachhaltige Energieversorgung

Vorwort

Die Nanotechnologie stellt eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts dar, die für unterschiedlichste Prozesse auf außerordentlich kleinen Dimensionen eingesetzt wird. Sie bezieht sich auf funktionale räumliche Strukturen unterhalb eines Zehnmillionstel Meters (100 nm), in welchen viele grundsätzlich neue Prozesse und Perspektiven in vielen Bereichen eröffnet werden. Dazu gehören hochentwickelte Materialien und Anwendungen, die ganz entscheidend zur nachhaltigen Energieversorgung und zur effizienteren Nutzung von Energiesystemen beitragen können.

Im Hinblick auf neue Materialien spielen Entdeckungen in den Nanowissenschaften eine überaus wichtige Rolle. Die Nanotechnologie ist eine migrierende Technologie, die nicht erst seit kürzester Zeit in verschiedenste Gebiete vordringt. Gleichwohl gibt es noch ein riesiges Potenzial, welches sich durch die in jüngster Zeit immer präzisere Präparation und Kontrolle von maßgeschneiderten Nanostrukturen aufgetan hat. Die Implementierung dieses Know-hows ist angesichts der langen Reinvestitionszyklen im Energiebereich von allerhöchster Priorität. Um das Potenzial auszuschöpfen, gilt es das vielleicht größte Zukunftsproblem der Menschheit, die nachhaltige Energieversorgung, mit neuen Lösungsansätzen zu bewältigen. Um ein nachhaltiges Energiesystem zu schaffen, müssen die Materialflüsse, die mit dem Verbrauch von Energie durch den Menschen

einhergehen, zu geschlossenen Kreisläufen umgewandelt werden. Die Auswirkungen der Energietechnologien auf die Umwelt stellen daher ein zentrales Thema dar. Am fernen Horizont stehen selbstorganisiert erzeugte, nanoskalige Systeme für kombinierte Funktionen, wie die Konversion von Sonnenlicht und die Erzeugung von Brennstoffen. Diesen weiten Weg, den die Natur mit der Photosynthese seit über 3 Milliarden Jahren eingeschlagen hat, gilt es ins Visier zu nehmen.

Deutlich wird das Potenzial, Energieerzeugung nachhaltig zu gestalten, mit dem Gedanken, dass der derzeitige Primärenergieverbrauch der Erdbevölkerung weniger als einem Zehntausendstel der auf die Erde auftreffenden Sonnenenergie entspricht. Und der akute Bedarf verstärkt sich neben den aktuellen Klimaveränderungen durch die steigende Nachfrage an Energie, insbesondere auch durch die Entwicklung der sogenannten Schwellenländer – diese Nachfrage kann nur durch die Entwicklung nachhaltiger Energieversorgung gedeckt werden. Rohstoffmangel stellt eine weitere Herausforderung dar. Systeme zur Stromerzeugung und Speicherung, zum Transport, zur Umwandlung und zur effizienten Nutzung geeigneter Energieformen können höchst komplex sein, da sie verschiedene Verfahren und Komponenten miteinander verbinden, deren Dimensionen und Zeitskalen sich über viele Größenordnungen hinweg unterscheiden. Dabei ist insbesondere

der Beitrag der Grundlagenforschung ein Prozess, der langen Atem braucht und dem oft weniger Beachtung zuteil wird als kurzfristige Lösungen des alltäglichen Lebens.

Die Formulierung einer Forschungsagenda unter Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette, ausgehend von den Visionen der fundamentalen Forschung bis zu den Anforderungen der Komponentenhersteller und der Industrie, wurde Ende 2007 auf der Tagung „**Nanotechnologie für eine nachhaltige Energieversorgung**“ motiviert, als sich rund 100 Experten aus Wissenschaft und Industrie in Berlin trafen und über Möglichkeiten diskutierten, wie die Nanotechnologien für die Energieversorgung der Zukunft genutzt werden können. In den folgenden fachspezifischen **Workshops** ging es insbesondere um das Potenzial durch Einsatz von nanotechnologischen Komponenten, den Aufbau neuen Wissens (Erweiterung der wissenschaftlichen Grenzen) und die internationale Wettbewerbsfähigkeit und die darauf aufbauende, mögliche Verbesserung und Kostenreduktion entscheidender Glieder in der Kette eines nachhaltigen Energiesystems:

- Solarzellen
- elektrische Energiespeicher
- Wärmespeicherung und Wärmetransformation
- Wärmedämmung
- Brennstoffzellen

Gewichtiger Bestandteil der Diskussionen war es, die technischen **Risiken** zu evaluieren sowie die Toxizitätspotenziale und unerwünschte Wirkungen auf Mensch und Umwelt zu diskutieren.

In diesem Ergebnispapier werden einheitliche Themengebiete und Leitfragen auf die fachspezifischen Themen der Workshops abgebildet. Diese Leitfragen adressieren Visionen und das Potenzial der Nanotechnologien, den gegenwärtigen technisch-wissenschaftlichen Stand, nationale und internationale Trends, vorhandene Stärken und Expertise, Anforderungen und Erfolgsfaktoren, die größten Herausforderungen, themenübergreifende Synergien und die Frage nach Prioritäten und einer effizienten Umsetzung.

Matthias Machnig, Staatssekretär im Bundesumweltministerium formulierte die Botschaft auf dem Symposium:

„Deutschland ist als Innovationsstandort auf dem Feld der Nanotechnologie mit an der Weltspitze. Diese Spitzenposition müssen wir auch zur gezielten Weiterentwicklung von Energietechnologien nutzen.“

„Die Nutzung von Nanotechnologien ist Teil der ökologischen Industriepolitik. In ihr stecken echte Zukunftschancen für die Schonung von Ressourcen und für die Steigerung der Energieausbeute bei erneuerbaren Energien“.

Funktionsprinzipien und Einsatz der Technologien für die Energieversorgung

Photovoltaik

Für die Nutzung der Solarenergie spielt insbesondere die Photovoltaik eine entscheidende Rolle in den Energieszenarien der Zukunft. Zur technologischen Erschließung des nahezu unbegrenzten Energiereservoirs der Sonne ist die Umwandlung in elektrische Energie mittels des photovoltaischen Effekts der direkteste und einer der erfolgversprechendsten Wege. Die Photovoltaikbranche hat sich in den letzten Jahren weltweit bemerkenswert entwickelt und stellt gerade in Deutschland einen zunehmend bedeutenden Industriezweig dar. Weit über 90 % der heute weltweit verkauften Photovoltaikmodule basieren gegenwärtig auf Silizium-solarzellen, deren Modulwirkungsgrade im Bereich von 15 % liegen. Obwohl die Kosten für die Module in den letzten Jahren kontinuierlich gesenkt werden konnten, ist Solarstrom noch immer teuer. Aus diesem Grund zielen die Forschungsaktivitäten für Solarzellen sowie Konzepte der nächsten Generationen im Wesentlichen in zwei Richtungen: Kostenreduktion und Steigerung der Effizienz.

Die Nutzung von Nanostrukturen für die Photovoltaik ist sowohl im forschungsstrategischen Sinne als auch im energiepolitischen Kontext ein hochaktuelles Thema. Das gesteckte Ziel ist es, Solarzellen mit hoher Materialersparnis (z. B. durch Dünnschichtzellen, Hybridsolarzellen oder organische Solarzellen) bzw. sehr hohen Wirkungsgraden bei niedrigen Systemkosten zu entwickeln. Die Nanotechnologie findet eine immer stärker in verschiedene Bereiche migrierende Anwendung und so gibt es auch heute bereits Solarzellen, welche sich verschiedene nanostrukturierte Komponenten zunutze machen: Beispiele sind organische Polymer-Solarzellen (kurze Transportwege), „Grätzel-

Solarzellen“ (Oberflächenvergrößerung), Stapel-solarzellen (Tunneldioden) etc. Bei anderen Konzepten dagegen muss zum Teil noch der experimentelle und theoretisch untermauerte Nachweis für die Machbarkeit erbracht werden. Die Lösungsstrategien sind vielfältig. Zentrale Punkte sind Materialersparnis, Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien, Stabilität und Wirkungsgraderhöhung.

Darüber hinaus kann die Nanotechnologie bei der Steuerung und dem Design der optischen Eigenschaften von Solarzellen eingesetzt werden: Dielektrische Spiegel, Ausnutzung von Interferenzeffekten und dielektrische Nanokomposite zur spektral selektiven Absorption sind einige Anwendungsbeispiele des sogenannten Photonmanagements. Organische Solarzellen bzw. Hybridsolarzellen, deren nanotechnologische Komponenten weniger starke Anforderungen an die Ordnung und Perfektion der Materialien stellen, zielen auf sehr niedrige Kosten. Für die organischen Solarzellen sind bisher Wirkungsgrade im Bereich von 5 % erreicht. Die Stabilität und Versiegelungskonzepte (Barrierschichten) sind weitere essentielle Gesichtspunkte.

Auch die Hocheffizienz-Nanotechnologie bietet ein hohes Innovationspotenzial. In konzentrierenden Photovoltaikanlagen, welche die flächenproportionalen Kosten der Photovoltaik-Systeme reduzieren, werden zwei Ziele kombiniert: Halbleitermaterial-Ersparnis durch den Einsatz eines optischen Konzentrators und Wirkungsgraderhöhung durch den Einsatz hocheffizienter Solarzellen. Bisher ist es in Form von III-V-Stapelzellen gelungen, Solarzellen zu etablieren, die prinzipiell und real die sogenannte Shockley-Queisser-Limitierung des Wirkungsgrades (ca. 30 %) überschreiten konnten.

Diese Limitierung berücksichtigt unvermeidbare Konversionsverluste, die bei einem Zweiniveausystem, wie z. B. einer Einzelsolarzelle mit nur einem Absorbermaterial, unter Berücksichtigung der Ladungsträgerthermalisierung auftreten: Licht mit einer Energie kleiner als der Bandlückenenergie wird nicht absorbiert und Licht mit einer höheren Energie als der Bandlückenenergie verliert die entsprechende Überschussenergie.

Mittels Nanostrukturen, welche Quantenphänomene nutzen, wie z. B. Quantenpunkte, Nanodrähte und Quantentöpfe, können entweder weitere elektronische Niveaus geschaffen werden (Mehrphotonenprozesse, Auf- und Abkonversion) oder die Thermalisierung verlangsamt werden (sog. hot carrier Solarzellen). Solche innovativen Hocheffizienz-Dünnschichtkonzepte versprechen höchste Effizienzen bei deutlich niedrigerem Materialeinsatz, benötigen aber noch grundlegende Untersuchungen zum Nachweis ihrer Funktionalität.

tige Nutzung von regenerativen Energien (wie z. B. Sonne und Wind) zur Vermeidung von CO₂ bei der Stromerzeugung hängt entscheidend von der Möglichkeit einer effizienten Speicherung der elektrischen Energie.

Hierbei kann zum einen eine zentrale oder dezentrale effiziente stationäre elektrische Energiespeicherung zur Nutzung der temporären witterungsbedingten Überkapazitäten z. B. bei Wind und Sonne bzw. zum Ausgleich von Überlastspitzen eine wesentliche Rolle spielen.

Zum anderen sind mobile elektrische Energiespeicher von entscheidender Bedeutung, um CO₂-minimierende Hybridantriebe bzw. rein elektrische Antriebe in der (automobilen) Praxis zum Durchbruch zu verhelfen.

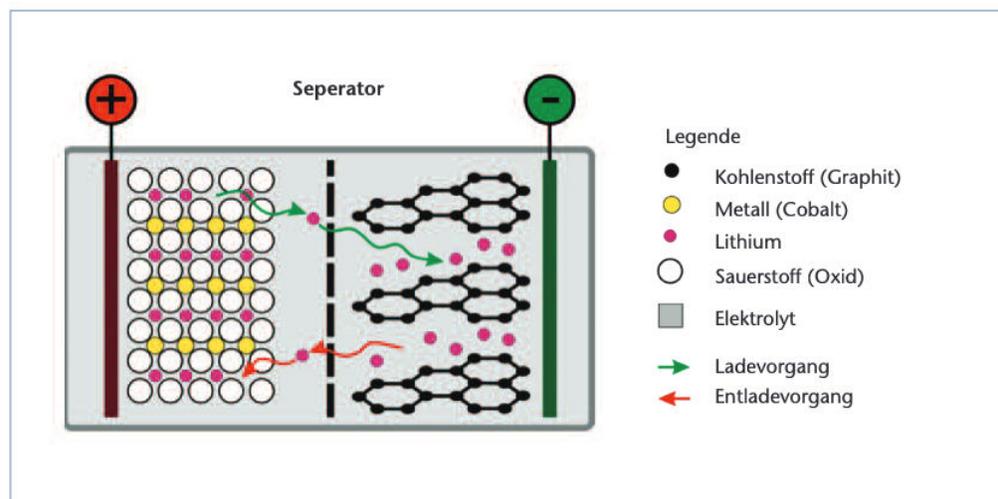
Aus heutiger Sicht der Technik ist die bei der Verbraucherelektronik bereits bewehrte Lithium-Ionen Batterietechnologie ein viel versprechender Ansatz, um die Herausforderungen sowohl bei den stationären als auch bei den mobilen elektrischen Energiespeichersystemen mit hoher Energie- und Leistungsdichte sowie bei entsprechendem Sicherheitsniveau angehen zu können.

Bei Li-Ionen-Batterien (zum Funktionsprinzip *Abbildung 1*) sind der durch einen Elektrolyten vermittelte Transport von Li⁺-Ionen zwischen einer durch eine Separatorfolie getrennten Anode

Elektrische Energiespeicher

Der rasch fortschreitende Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen unserer Welt in der heutigen Zeit dar. Die Reduzierung von zivilisationsbedingten CO₂-Emissionen ist ein wesentlicher Faktor bei Verlangsamung der klimatischen Änderungsprozesse. Die nachhal-

Abbildung 1
Wesentliche Funktionselemente einer Lithium-Ionen-Zelle sind: der durch einen Elektrolyten vermittelte Transport von Li⁺-Ionen zwischen einer durch eine Separatorfolie getrennten Anode und Kathode, der Einbau der Li-Atome in die Kristallgitter der Elektroden sowie der Elektrolyt-Festkörper-Übergang (aus Wikipedia / Skizze von Cepheiden)



und Kathode, der Einbau der Li-Atome in die Kristallgitter der Elektroden sowie der Elektrolyt-Festkörper-Übergang wesentliche eigenschaftsbestimmende Funktionselemente der Technologie.

Die Nanotechnologie selbst kann als ein Tool bzw. als ein „Werkzeugkasten“ angesehen werden, mit deren Hilfe sich die einzelnen Strukturelemente maßgeschneidert gestalten lassen, um eine Optimierung der Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen der Li-Ionen-Batterie zu erreichen.

Dabei kann die Nanotechnologie eine gezielte Variation der Eigenschaftsspektren ermöglichen, mit der die Anforderungen von jeweils unterschiedlichen Anwendungsgebieten, d. h. von verschiedenen Wertschöpfungsketten mit gleichem Technologieursprung erfüllt werden können.

Neben den Li-Ionen-Batterien als aktuellste Technologie gibt es weitere elektrische Energiespeicherkonzepte (Supercaps, Superconducting Magnetic Energy Storage, ...), die im Rahmen des Workshops jedoch nicht diskutiert wurden.

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

Beim Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung stellen sich vielfache Aufgaben der Wärmespeicherung: Fossile Großkraftwerke zur Stromerzeugung, die große und vor Ort nicht nutzbare Abwärmemengen erzeugen, werden z. B. ersetzt durch kleine, dezentrale Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), deren Stromerzeugung im Netzverbund als „virtuelles Kraftwerk“ gesteuert wird, um die schwankende Nachfrage im Stromnetz zu decken. Bei solch einer stromgeführten Betriebsweise von KWK-Anlagen muss die Wärme zwischengespeichert werden, um zeitliche Verschiebungen zwischen Strom- und Wärmebedarf ausgleichen zu können.

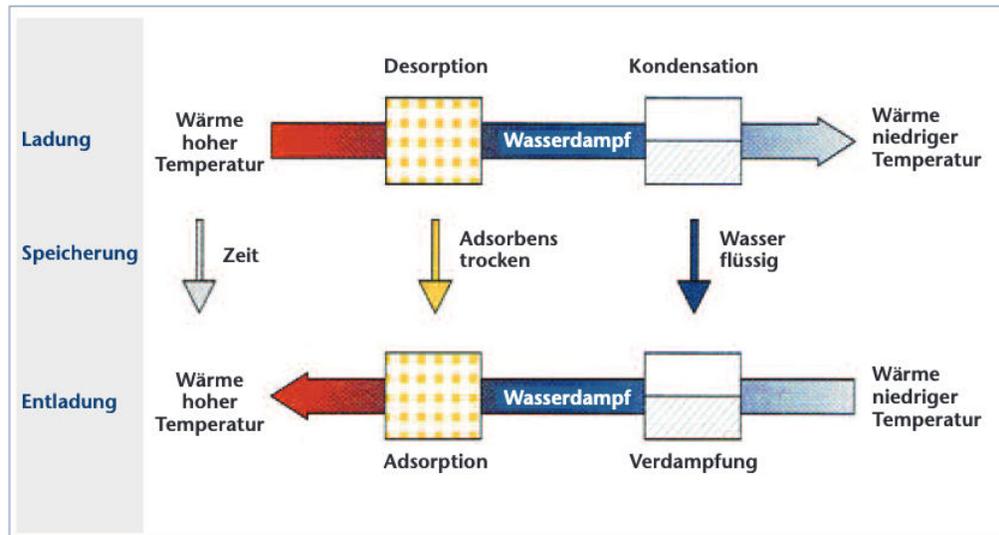
Bei der Wärmeerzeugung mit Solarkollektoren ist der Speicherbedarf offensichtlich. Heute

werden thermische Solaranlagen vor allem zur Brauchwassererwärmung und zur Heizungsunterstützung eingesetzt. Die heute üblichen Warmwasserspeicher in Anlagen für Ein- oder Mehrfamilienhäuser können höchstens den Wärmebedarf einiger Tage überbrücken, wobei die Speicherverluste maßgeblich von der Qualität der Wärmedämmung abhängen (der bei diesem Symposium ein eigener Workshop gewidmet wurde). Langzeit-Wärmespeicher sind heute nur in größeren Einheiten für ganze Wohngebiete mit solarer Nahwärmeversorgung sinnvoll realisierbar (wegen des günstigeren Verhältnisses Speichervolumen zu -oberfläche bei großen Speichern).

Da für die Heizung mit Solarwärme vor allem ein saisonaler Speicherbedarf besteht (sommerliches Solarenergieangebot/winterlicher Heizwärmebedarf), werden Wärmespeichermaterialien mit hoher Energiedichte gesucht, die es erlauben, kompakte saisonale Wärmespeicher für einzelne Gebäude zu entwickeln. Arbeiten hierzu haben sich vor allem auf die Adsorption von Wasser in mikroporösen Feststoffen wie Zeolithen und Silikagelen konzentriert (*Abbildung 2* zum Prinzip von Sorptionswärmespeichern). Durch eine Modifikation der Feststoffe auf der Nanoskala (Porenweiten im Bereich 1 nm) lässt sich die Bindungsstärke des Wassers so einstellen, dass die nutzbare Energiedichte des Speichers (abhängig von den Be- und Entladetemperaturen) erhöht wird.

Ein Potenzial neuer nanotechnologischer Materialien für die Langzeit-Wärmespeicherung ist also technisch prinzipiell vorhanden, allerdings ist die Wirtschaftlichkeit dieser Anwendung aufgrund der geringen Wärmegestehungskosten konkurrierender Systeme sehr fraglich (die Speichermaterialien müssten selbst bei hoher Energiedichte deutlich unter 1 €/kg kosten). Bei kürzeren Speicherzeiten erhöht sich die über die Lebensdauer des Systems erreichte Zyklenzahl, so dass sich auch teurere Materialien amortisieren können. Ein Potenzial für neue nanotechnologisch verbesserte Speichermaterialien besteht daher vor allem für Wärmespeicheranwendungen mit typischen Speicherzeiten im Bereich von einigen Stunden bis einigen Tagen, insbesondere in Temperaturbereichen, in denen Warmwasserspeicher weniger geeignet sind.

Abbildung 2
Prinzip des Sorptionswärmespeichers.
Während der Speicherzeit werden die beiden Komponenten Adsorbens (trocken) und Arbeitsmittel (Wasser) durch ein geschlossenes Ventil in der Anlage getrennt gelagert, so dass der Speicher sich nicht entladen kann. Dieses Grundprinzip findet sich auch bei thermochemischen Speichern.



Um mindestens eine Größenordnung höhere Zyklenzahlen als bei Wärmespeichern lassen sich mit thermisch angetriebenen Wärmepumpen erreichen, die auf demselben thermodynamischen Zyklus basieren. Hierbei entfällt die Speicherzeit, der Zyklus wird so schnell durchlaufen, wie Wärme- und Stofftransportbarrieren es zulassen.

Anders als beim Sorptionswärmespeicher ist bei der Wärmepumpe die einzusetzende Materialmenge nicht durch die zu speichernde Energiemenge bestimmt, sondern durch Intensivierung des Wärme- und Stofftransports und durch Verkürzung der Zykluszeit kann die einzusetzende Materialmenge bei gleichbleibender Leistung der Wärmepumpe verringert werden. Durch Prozessintensivierung mit Methoden der Mikroreaktortechnik und Mikrofluidik können sich hier auch kostenintensive nanotechnologisch hergestellte Materialien amortisieren. Die Teilnehmer des Workshops sehen daher in diesem Anwendungsbereich ein großes Potenzial für die Nanotechnologie. Im Folgenden werden thermisch angetriebene Wärmepumpen und Kältemaschinen hier unter dem Oberbegriff „Wärmetransformation“ beschrieben.

Es müssen daher Konzepte und Technologien für ein Energiesystem, das ohne den Neubau fossiler Großkraftwerke in Ländern wie Deutschland auskommt, entwickelt werden. Eine Vision hierfür ist, dass „virtuelle Kraftwerke“ aus KWK-

Anlagen im Netzverbund das schwankende Stromangebot der erneuerbaren Energien ausgleichen und die Netzqualität sichern. In diesem nachhaltigen Szenario besteht ein großer Bedarf an Wärmespeicherung, um die in den KWK-Anlagen anfallende Wärme bis zum Zeitpunkt ihrer Nutzung zwischenspeichern zu können. Die Wärmespeicherung erfolgt bevorzugt auf dem Temperaturniveau, auf dem die Wärme anfällt (z. B. 130°C – 250°C für Abwärme von Mikrogasturbinen und Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerken der Typen HT-PEM und PAFC). Wenn der Nutzwärmebedarf bei 35°C – 55°C liegt (Heizung energieeffizienter Gebäude, Warmwasser-Bereitstellung), kann die Exergie der gespeicherten Wärme noch in einem Wärmetransformationsprozess ausgenutzt werden. Damit kann die gespeicherte Wärme auch zur Kälteerzeugung zum gewünschten Nutzungszeitpunkt eingesetzt werden.

Auch unabhängig vom oben genannten Szenario bietet die Wärmetransformation sehr große Potenziale der Primärenergieeinsparung und CO₂-Minderung. Das größte Einsparpotenzial liegt in der Gebäudeheizung, nämlich im Einsatz thermisch angetriebener Wärmepumpen als Ersatz von Öl- und Gas-Heizkesseln, Brennwärtekesseln und elektrischen Wärmepumpen. Bei Nutzung der Entwicklungsmöglichkeiten der Sorptionstechnologie bieten sich folgende Hauptvorteile gegenüber strombetriebenen Kompressionswärmepumpen:

- Die primärenergetische Effizienz kann wesentlich höher sein, da keine Wärmeverluste im Kraftwerk anfallen.
- Aufgrund der absolut gesehen niedrigeren Arbeitszahl wird bei gleicher Nutzwärmeleistung weniger Niedertemperatur-Wärme benötigt, d. h., die Umweltwärmequelle kann kleiner dimensioniert werden. Dies spart Systemkosten und verringert den Flächenbedarf (z. B. für Erdwärmesonden). Insbesondere für die energetische Modernisierung des Gebäudebestandes ist dies von Vorteil.
- Solarwärme und Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung kann direkt eingebunden werden. Die Exergie dieser Wärmequellen wird dann effizient genutzt, statt sie durch „heruntermischen“ auf Anwendungstemperatur zu vernichten.

Auch thermisch angetriebene Kühlung kann in einer nachhaltigen Energieversorgung eine wichtige Rolle spielen, allerdings besteht hier nicht automatisch ein primärenergetischer Vorteil gegenüber der etablierten Kompressionstechnik wegen der im Vergleich zum Heizfall ungünstigeren Verhältnisse der Arbeitszahlen (COP: Coefficient of Performance).

Die Wärmespeicherung mit Phasenwechselmaterialien (phase change materials, PCM) ist vor allem dann sinnvoll, wenn es auf Wärme- oder Kältespeicherung in engen Temperaturbereichen ankommt. Beispielsweise können PCM-Mikrokapseln im Wandverbund die thermische Masse von Leichtbau-Gebäuden im gewünschten Temperaturbereich (um 25°C) erhöhen und so in Verbindung mit Nachtlüftungskonzepten die sommerliche Überhitzung von Räumen verhindern (*Abbildung 3*). In Kombination mit einer energieoptimierten Architektur ermöglichen solche Konzepte, auf eine aktive Klimatisierung von Bürogebäuden zu verzichten und somit einen hohen Nutzungskomfort mit deutlich verringertem Primärenergieeinsatz zu erreichen.

Als Pufferspeicher in Kältenetzen, die mit geringer Temperaturspreizung betrieben werden, können PCM zur Deckung von Kühllastspitzen genutzt werden (peak-shaving), wodurch das Gesamtsystem nicht mehr auf die Spitzenlast

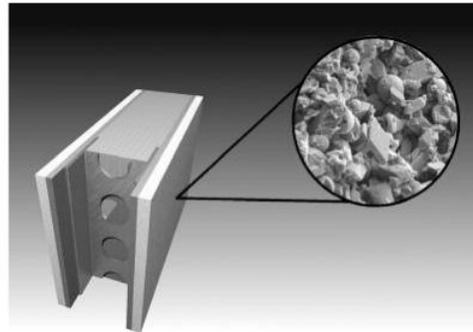


Abbildung 3
 Beispiel für Einsatzgebiet von Phasenwechselmaterialien: Putz mit mikrokapseltem Paraffin (BASF) zur Erhöhung der thermischen Masse einer Leichtbauwand zur Vermeidung von Überhitzung des Raumes. Die Wärmeabfuhr aus dem PCM-Speicher erfolgt durch Nachtlüftung. Während für die hier gezeigten Paraffine als PCM die Mikroverkapselung bereits entwickelt ist, besteht zur Mikroverkapselung anorganischer PCM (die höhere Schmelzwärmen aufweisen) noch F&E-Bedarf.

ausgelegt werden muss und effizienter werden kann. Für Prozesswärmeanwendungen oberhalb 100°C sind anorganische PCM als Alternative zu Druckwasserspeichern oder anderen sensiblen Wärmespeichern interessant.

Nanotechnologische Verbesserungen an PCMs sind vor allem beim Einsatz von Additiven denkbar (z. B. Nano-Schichten als Wandmaterial für die Mikroverkapselung von PCM oder Nanopartikel als Keimbildner).

Wärmedämmung

Die deutliche Steigerung der Energieeffizienz ist erklärtes Ziel der EU und insbesondere der Bundesrepublik Deutschland. In *Abbildung 4* ist der Primärenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland nach Bedarfsarten differenziert dargestellt. In nahezu allen Bereichen können durch den Einsatz von hocheffizienten Wärmedämmungen deutliche Energieeinsparungen erreicht werden. Besonders hervorzuheben ist dabei der Bereich der Raumwärme, für die ein wesentlicher Beitrag des Primärenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland anfällt. Dabei benötigt der Gebäudebestand, welcher vor der 1. Wärmeschutzverordnung errichtet worden ist und mit 85 % einen überwiegenden Anteil der vorhandenen Bausubstanz darstellt, 95 % des Gesamtheizwärmebedarfs. Hier ist also ein enormes Energieeinsparpotenzial vorhanden, welches sich durch effiziente Wärmedämmungen erschließen lässt (*Abbildung 5*).

Abbildung 4
Primärenergieverbrauch nach Bedarfsarten in Deutschland für das Jahr 2001
[Quelle: FFE Forschungsstelle für Energiewirtschaft]

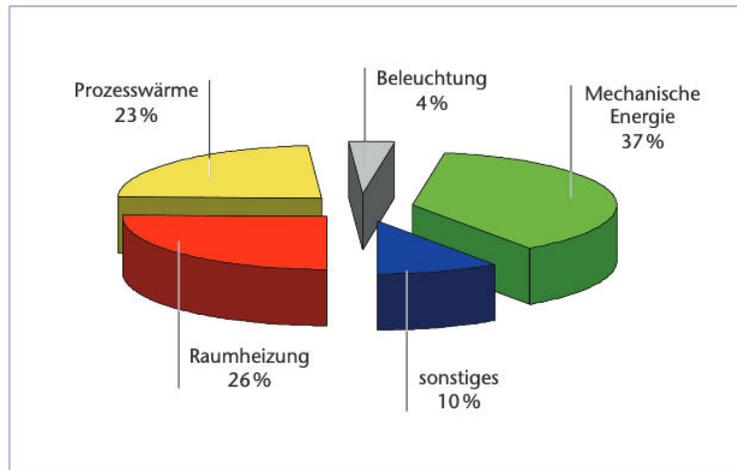
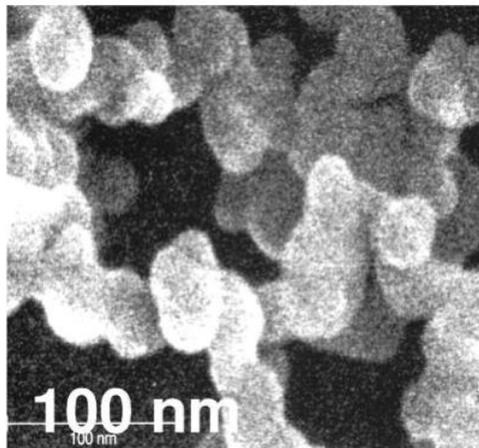


Abbildung 5
Thermografieaufnahme eines hocheffizient wärmegeämten Gebäudes im Vordergrund im Vergleich zu einem thermisch nicht sanierten Altbau im Hintergrund
[Quelle: ZAE Bayern]



Quelle: BINE Projektinfo 3/00). In den Bereichen mechanische Energie, welche überwiegend dem Kraftfahrzeugverkehr entspricht, kann beispielsweise durch effiziente Wärmedämmung von Kühlfahrzeugen die Energieeffizienz gesteigert werden. Wärme- und Kälteversorgungsnetze sowie der Hausgerätebereich sind weitere Anwendungsfelder, bei denen eine effiziente Wärmedämmung von entscheidender Bedeutung für die Energieeffizienz ist.

Abbildung 6
Struktur einer pyrogenen Kieselsäure
[Quelle: Wacker-Chemie GmbH]



Wärmedämmstoffe bestehen aus einem porösen Festkörpergerüst (z. B. Fasern, Pulver, Schaum) mit einer meist sehr geringen Wärmeleitung über die Festkörperstruktur. Bei konventionellen Dämmstoffen, wie Schäumen oder Mineralfasern, ist die Wärmeleitung über die Gasphase voll ausgeprägt und trägt im Falle von Luft bei Raumtemperatur als Porengas mit $0,026 \text{ W/(mK)}$ maßgeblich zur Gesamtwärmeleitfähigkeit bei. Der nicht an einen Stoff gebundene Transport in Form von Wärmestrahlung wird durch die Struktur, Dichte und die chemischen Bestandteile des Dämmmaterials bestimmt, indem hier Absorptions- und Streuprozesse den Infrarot-Strahlungstransport behindern.

Abbildung 6 zeigt die Struktur eines mikroporösen Wärmedämmstoffes aus pyrogenen Kieselsäure. Man erkennt die stark verzweigte Festkörperstruktur von Silica-Agglomeraten, die als Pulver in Hochtemperatur-Wärmedämmungen und als Füllmaterialien für Vakuumisulationspaneele (VIP) eingesetzt werden.

Ebenso ergeben sich merkliche Energieeinsparpotenziale im Bereich der Prozesswärme durch die Reduzierung von Wärmeverlusten bei Industrieöfen (40% des industriellen Endenergieverbrauchs wird bei Industrieöfen umgesetzt,

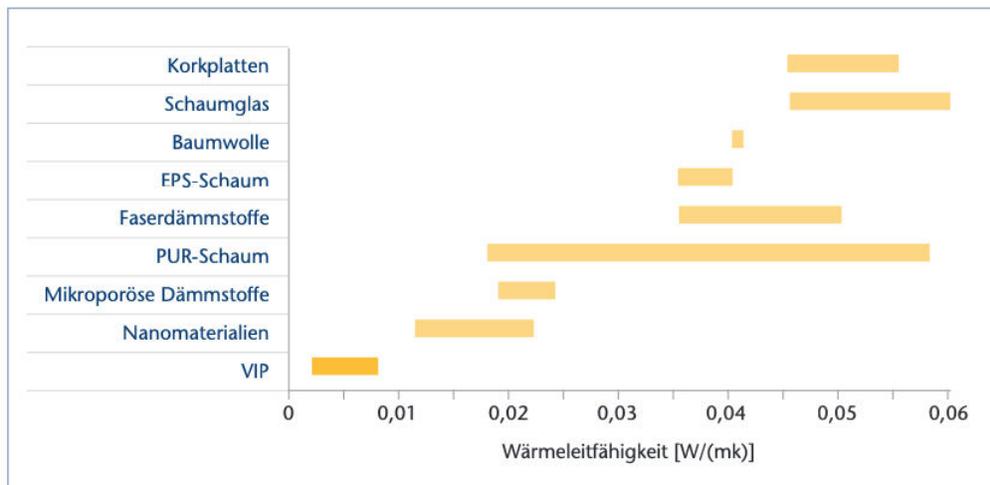


Abbildung 7
Übersicht über die Wärmeleitfähigkeiten, die durch verschiedene Wärmedämmstoffe bei Raumtemperatur und Normalatmosphäre abgedeckt werden können (VIP: Vakuumisoliationspaneel)

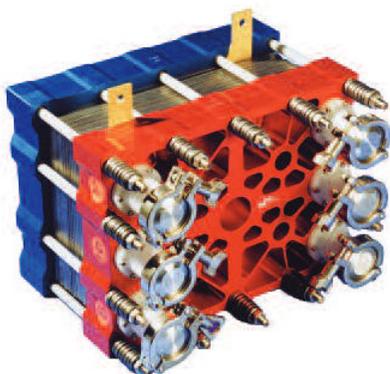
Eine Übersicht über existierende Wärmedämmmaterialien und -systeme ist in *Abbildung 7* dargestellt.

Brennstoffzellen

Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde im Jahr 1839 von Grove in England und zeitgleich von Langbein in Deutschland entdeckt. Obwohl Langbein das Wirkprinzip der „Gasbatterie“ richtig erkannt hatte, setzte sich erst nach 1890 die Erkenntnis durch, dass großflächige nanostrukturierte Elektroden notwendig sind, um bei der Umwandlung von chemischer in elektrische Energie durch eine „kalte“ Verbrennung von z. B. Wasserstoff und Sauerstoff in einem elektrochemischen Prozess möglichst hohe Ströme zu erzielen. Dafür werden Katalysatoren benötigt, auf deren Oberflächen – die im Vergleich zur geometrischen Fläche der

Elektrode durch eine feine Verteilung der Katalysatorpartikel auf einem ebenfalls nanoskaligen Trägermaterial um mehrere Größenordnungen größer ist als die geometrische – die elektrochemischen Elementarprozesse ablaufen.

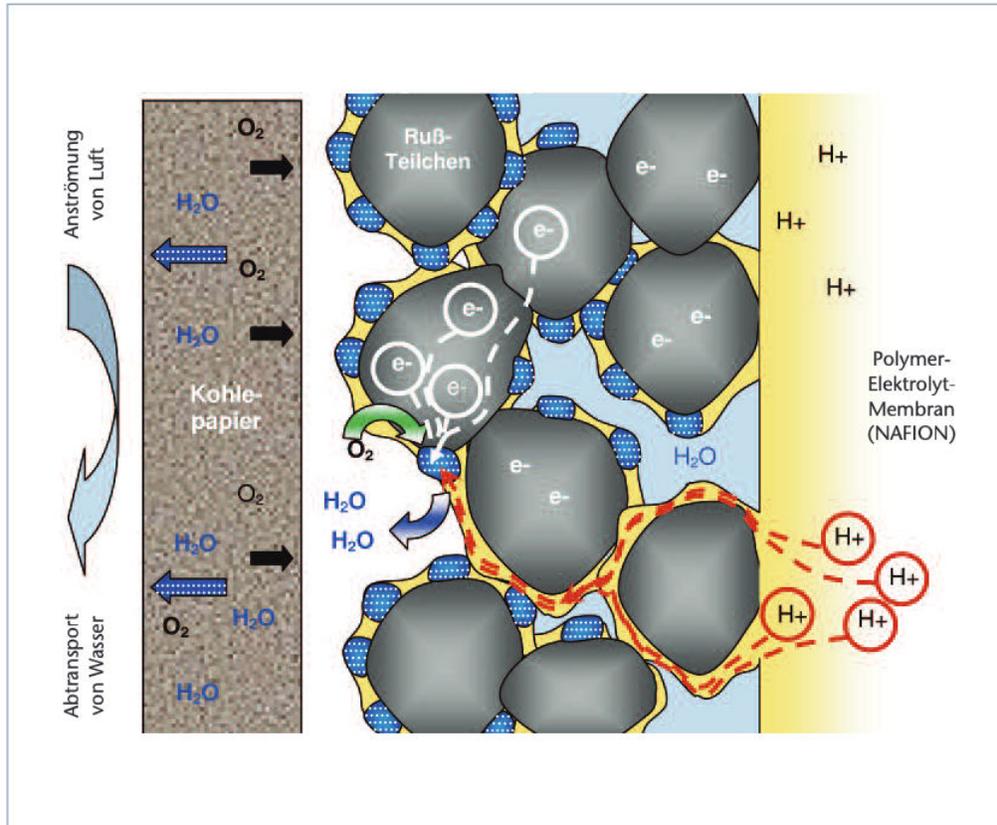
Nach Entwicklung der alkalischen Brennstoffzelle durch F. T. Bacon stellten Grubb und Niedrach 1958 die erste Niedertemperaturbrennstoffzelle mit Platinteilchen als Katalysator vor. Einen wesentlichen Auftrieb erhielt die Niedertemperaturbrennstoffzelle (*Abbildung 8*) durch die Entwicklung einer Protonenleitenden Membran auf Fluorkohlenstoffbasis mit integrierten Sulfonsäuregruppen. Technische Ruße fanden als Materialien für die Trägerung nm-großer Katalysatorpartikel Verwendung, so dass sich für eine Niedertemperatur-Brennstoffzelle der in *Abbildung 9* wiedergegebene Aufbau ergibt. In der Abbildung sind schematisch die Abläufe bei der Sauerstoffreduktion an der Kathode der Brennstoffzelle wiedergegeben.



Untersuchungen zur Alterung von sogenannten PEM-BZ haben gezeigt, dass irreversible Veränderungen besonders an der Kathode auftreten, die unter anderem mit einem merklichen Wachstum der Platin-Katalysatorpartikel nach etwa 1.000 Stunden Betriebszeit verbunden sind. Für mobile Anforderungen ist eine Betriebszeit von mindestens 4.000 C erforderlich. Dazu sind die Katalysatorpartikel auf dem Rußträger zu verankern, um ein Wandern der Teilchen auf den Kohlenstoffoberflächen zu verhindern. Eine andere Einschränkung zur groß-

Abbildung 8
Niedertemperaturbrennstoffzelle
[Quelle: ZSW]

Abbildung 9
 Schema der Kathodenseite einer Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle: Katalysatorteilchen (blau) sind verteilt auf Rußteilchen (grau) zu erkennen, die auf der Oberfläche einer Membran aufgebracht sind. Der Transport der Protonen (H^+ -Teilchen) erfolgt von der Anodenseite durch die NAFION-Membran (rechts) über die Rußteilchen umschließende NAFION-Schichten zu den Katalysatorteilchen, wo sie mit Elektronen aus dem äußeren Stromkreis und Sauerstoff, der über gasdurchlässiges Kohlepapier anströmt, zu Wassermolekülen reagieren.



flächigen Anwendung von PEM-Brennstoffzellen stellt der ständig steigende Platinpreise dar. Deshalb muss auch nach alternativen Katalysatoren gesucht werden. Eine weitere Herausforderung ist in der Entwicklung neuer oxidationsfester Trägermaterialien zu sehen, um Ruß, der bei Lastwechsel in der Zelle zu CO_2 oxidiert werden kann, durch eine anderen Träger zu ersetzen.

Visionen

Welche Visionen existieren für die Nanotechnologie?

Photovoltaik

Eine Solarzelle mit höchsten Wirkungsgraden erfordert nicht zwangsläufig neue nanotechnologische Komponenten. Notwendig ist lediglich eine Mehrfachsolarzelle aus Halbleitermaterialien mit abgestufter Bandlücke, mit jeweils hoher Absorptionskonstanten und hinreichend hoher Mobilität. Die III-V Klasse von Halbleitermaterialien erfüllt diese Anforderungen nahezu perfekt. Entsprechend sind (Vierfach-)Tandem-Solarzellen mit Wirkungsgraden größer als 40 % aus diesem Materialsystem derzeit schon verfügbar, im Wesentlichen ohne die Verwendung jeglicher Nanotechnologie.

Der Mehrwert, den eine visionäre Solarzelle durch die Verwendung der Nanotechnologie

liefern muss, besteht demnach in ihrem (viel) niedrigeren Preis und der (viel) höheren Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien verglichen mit den Möglichkeiten der oben dargestellten, etablierten III-V Technologie. *Abbildung 10* zeigt die etwas spekulative Vision einer genuin nanotechnologischen Solarzelle, die eine Reihe von Elementen aus den Kategorien 2 bis 4 (*Tabelle 1*, S. 21) benutzt. Kernstück ist die Lichtabsorption durch Quantendots (Kategorie 4), die durch Reduktion der Elektron-Phonon Wechselwirkung die Thermalisierung von hochenergetischen elektronischen Anregungen soweit minimieren, dass eine Trennung der durch Elektron-Elektron-Wechselwirkung entstehenden Multiexzitonen noch vor ihrer Thermalisierung erfolgen kann. Diese Ladungstrennung erfolgt auf einer sehr kleinen Längenskala (Kategorie 2) und wird

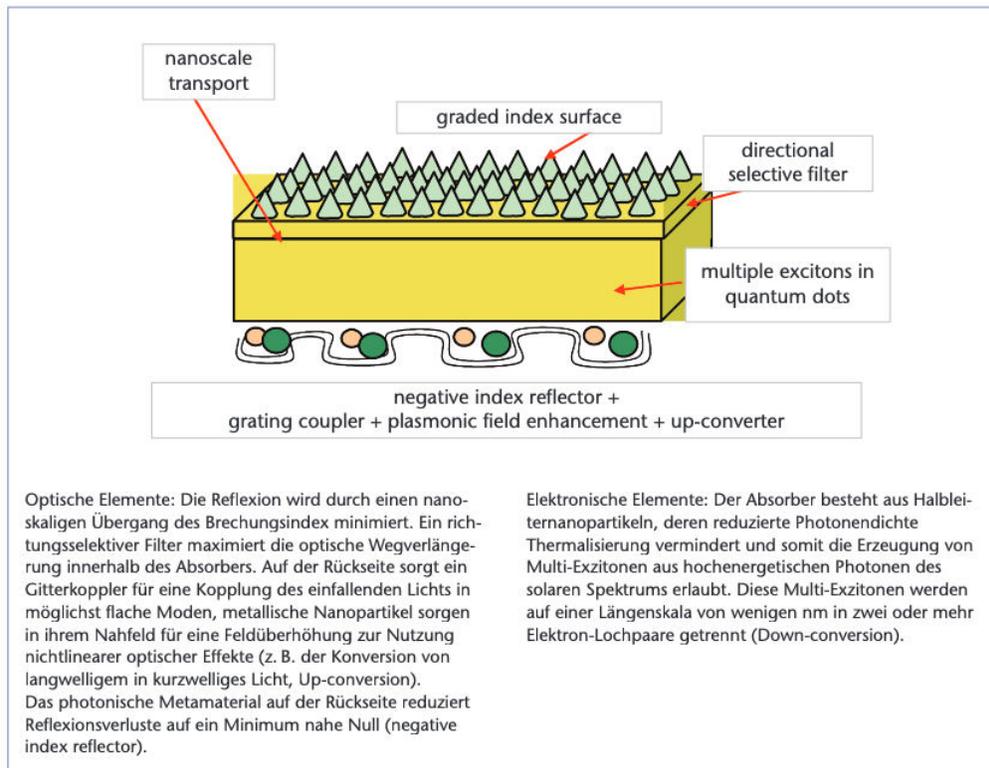


Abbildung 10
Spekulative „All-nano“-Solarzelle zur Illustration einiger möglichen nanotechnologischen Elemente für die Photovoltaik.

erleichtert durch die optimierte Lichteinkopplung (Kategorie 3), so dass die gesamte Absorberdicke auf ein Minimum reduziert werden kann.

Schließlich werden die noch nicht genutzten Photonen aus dem langwelligen Bereich des Sonnenspektrums in höherenergetische Photonen umgewandelt, die wieder in den Absorber eingespeist und in elektrische Energie umgewandelt werden. Grundsätzlich kann eine solche Solarzelle Wirkungsgrade oberhalb von 40 % erreichen. Wesentliche physikalische Schlüsselfunktionen dieser Solarzelle wie die Trennung von Multiexzitonen oder die substantielle Konversion von langwelligen in kurzwellige Photonen (up-conversion) sind jedoch experimentell nicht verifiziert.

Konkretere Ziele lassen sich durch – teilweise immer noch visionäre – Teilkomponenten der in *Abbildung 10* gezeigten Zelle realisieren. Diese Teilkomponenten setzen in der Regel auf existierenden Photovoltaiktechnologien auf. Ein sehr anspruchsvolles Ziel mit einem längeren Zeit horizon ist eine Tandem- oder Dreifachsolazelle auf der Basis von Materialien, die mit der derzeit beherrschenden Siliziumwafertechnologie kompatibel sind. Hier kann die Nutzung echter Quanten-size-Effekte, z. B. von Si/SiO₂ Quantenstrukturen, zur Einstellung der geeigneten Bandlücken benutzt werden. Das Ziel von Wirkungsgraden größer als 30 % erfordert jedoch maßgeschneiderte Materialeigenschaften, um die eigentlich widersprüchlichen Anforderungen an eine effiziente Ladungstrennung mit der für die Quanteneffekte notwendigen Lokalisierung zu vereinbaren. Eine ähnliche Herausforderung ergibt sich auch bei einer möglichen Nutzung von Quantenpunkten zur Erzeugung von Multi-Exzitonen aus hochenergetischen Photonen.

Die in *Abbildung 10* gezeigten optischen Komponenten lassen sich im Wesentlichen additiv für beliebige Solarzellentechnologien verwenden. Sie können es zum einen ermöglichen, die notwendige Absorberdicke auf ein Minimum zu reduzieren. Dies ist notwendig bei kostengünstigen Materialien mit niedriger Beweglichkeit aber auch bei den oben besprochenen

neuen Absorberkonzepten mit reduzierter Möglichkeit zur Ladungstrennung. Zum anderen dient die Up- und Downkonversion der besseren energetischen Nutzung von lang- bzw. kurzwelligen Photonen. In diesem Bereich kann die Nanotechnologie Schlüsselkomponenten wie z. B. metallische Nanopartikel liefern.

Zeitnahe Visionen ergeben sich für die Technologien der zweiten Kategorie: Organische bzw. Hybridsolarzellen, deren nanotechnologische Komponente weniger starke Anforderungen an Ordnung und Perfektion stellen. Hier soll innerhalb der nächsten fünf Jahre ein technologischer Stand innerhalb der für Solarzellen wichtigsten Parameter „**Lebensdauer**“, „**Effizienz**“ und „**Kosten**“ von $T \geq 3a$, $h \geq 6\%$ und $c \leq 1 \text{ €/Wp}$ erreicht werden. Innerhalb weiterer 10 Jahre soll die Effizienz und Lebensdauerlücke zu den klassischen Technologien geschlossen werden (von $T \geq 20a$, $h \geq 15\%$) und der Kostenvorteil weiter ausgebaut werden ($c \leq 0.25 \text{ €/Wp}$). Eine wichtige Komponente dieser (und anderer) Technologielinien ist die Herstellung flexibler Solarzellen mit einer In-freien transparenten Elektrode.

Insgesamt beherrschen wir eine große Reihe von nanotechnologischer Komponenten (wie z. B. Quantentröge, photonische Kristalle, oder die bislang nicht angesprochenen Zeolithe). Für die meisten dieser Komponenten ist jedoch die nützliche Einbringung in ein photovoltaisches Bauelement noch nicht gezeigt.

Elektrische Energiespeicher

Li-Ionen-Batterien sind heute aus dem Alltag wie z. B. aus dem Bereich der konsumentennahen Elektronik (Laptops, Mobiltelefone, Digitalkamera, ...) nicht mehr wegzudenken.

Diese bereits etablierten Anwendungen zeigen jedoch die technologischen Grenzen dieser Systeme. Erhöhte Energiedichten führen zu Problemen bei der intrinsischen Sicherheit der Batterien, die sogar zu diversen Rückrufaktionen geführt hatten. Die Gewährleistung von höchsten intrinsischen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsstandards der Li-Ionen-Zellen ist daher

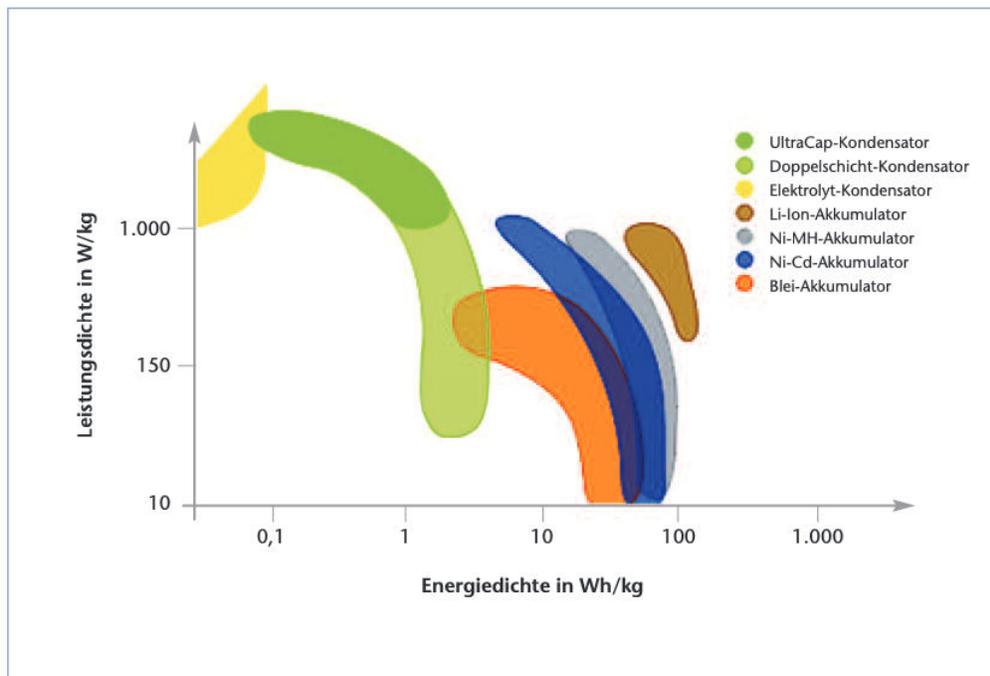


Abbildung 11
Veranschaulichung
der systemimmanen-
ten Kopplung von
Leistungs- und
Energiedichte bei
verschiedenen
elektrischen Energie-
speichern [Quelle:
Wikipedia]

eine dringende und zwingende Notwendigkeit, ohne die eine weitere Verbreitung der Li-Ionen-Technologie in mobilen wie auch in stationären Speichersystemen nicht möglich sein wird.

Die Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte (*Abbildung 11* aus Wikipedia zur Veranschaulichung der systemimmanenten Kopplung von Leistungs- und Energiedichte bei verschiedenen elektrischen Energiespeichern) sowie die Verlängerung der Lebensdauer bzw. Steigerung der Zahl von Lade- und Entladezyklen bei erhöhter intrinsischer Systemsicherheit und vertretbaren Kosten sind grundsätzliche Entwicklungsziele und Visionen für die Li-Ionen-Technologie. Dabei sind Lebensdauer sowie Energiedichte bei stationären Systemen und die Kombination von Energie- und Leistungsdichte sowie Zyklenzahl bei mobilen Anwendungen (z. B. im Automobilbereich) in erster Linie relevant.

Visionäre nanotechnologische Lösungsansätze können prinzipiell bei allen wichtigen Eigenschaften bzw. bei deren Kombinationen genutzt werden: Eine Erhöhung der Energie- bzw. Leistungsdichte erscheint durch optimierte nanoskalige, nanostrukturierte Kristallstrukturen in den Elektrodenmaterialien mit jeweils maß-

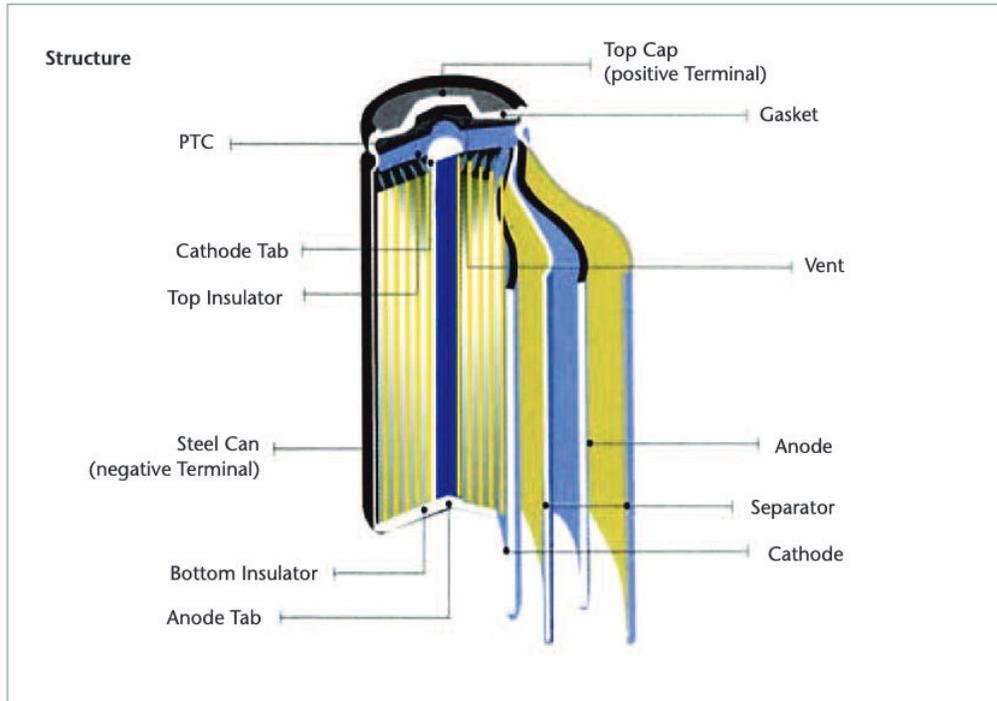
geschneiderter chemischer Zusammensetzung prinzipiell erreichbar.

Ebenso kann eine Nanostrukturierung der Elektrolyte in Kombination mit einer geeigneten Materialauswahl (nicht brennbare fluorfreie Materialien) zu einer Erhöhung der intrinsischen Sicherheit und auch Umweltverträglichkeit beitragen. Zur Steigerung der intrinsischen Sicherheit und Umweltverträglichkeit können weiterhin optimierte nanostrukturierte durchschmelzsichere keramische oder hybridartige Separatorfolien beitragen.

Eine erhöhte Reversibilität in den Li-Ionen-Systemen könnte durch eine Nanostrukturierung in Kombination mit morphologischer Optimierung bei Verwendung von Nanowires, Nanotubes, Nanoflakes, Nanotripods auch in Nanokompositen als Elektrodenmaterialien erfolgen.

Auch prozessuale Verbesserungen durch optimierte Verfahren bei nanoskaligen Beschichtungen sowie die Gestaltung der Festkörper-Elektrolyt Übergangsschichten (design of solid-electrolyte interphases).

Abbildung 12
 Höhere Lebensdauer, Energiedichte, Leistungsdichte und Sicherheit durch vollständige neue Materialien und Konzepte
 - Energiedichte über Kristallstrukturen/ Zusammensetzung/ Nanostrukturierung, Morphologieoptimierung Maßschneidern
 - Nanostrukturierte Elektrolyte (Polymer, Keramik, Glas, Hybrid, Fluor-frei, nicht brennbar)
 - Selbstorganisation – Kristallisation
 - Erhöhte Reversibilität durch Nanostrukturierung, morphologische Optimierung (z. B. nanowires, -tubes, -flakes, tripods, Anodenentwicklung)
 - Nanostrukturierte Komposite als Elektroden
 - Niedertemperaturbeschichtung
 Solid Elektrolyte
 Interphase-Design



Durch die obigen nanotechnologischen Lösungsansätze könnten bisherige systemimmanente Grenzen überwunden werden und auch die gleichzeitige entkoppelte Optimierung einzelner (mit bisherigen klassischen Ansätzen miteinander gekoppelte) Prozess- und Produktparameter erscheint erreichbar.

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

Nanomaterialien haben das Potenzial Wärmespeicherungs- und Wärmetransformationsanwendungen deutlich zu verbessern hinsichtlich:

- Leistungs- und Energiedichte
- Gebrauchseigenschaften
- Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit
- Ressourcen- und Kosteneffizienz

Hauptziel aus Sicht der Workshop-Teilnehmer ist die Entwicklung Energie- und kosteneffizienter Lösungen für die Wärmespeicherung und Wärmetransformation. Die Vision für die Nanotechnologie ist, durch ein gezieltes Design von Materialien und Komponenten auf verschiede-

nen Skalen bis herunter zur Nanoskala die Effizienz, die Prozessintensität (Leistungsdichte) und die Langlebigkeit von Anlagen zur Wärmetransformation und Wärmespeicherung deutlich zu erhöhen. Durch die Miniaturisierung von Komponenten können die Lösungen auf Basis nanotechnologischer Materialien zugleich auch kosten- und ressourceneffizient sein.

Bei den Basismaterialien für die Wärmetransformation geht es um das gezielte Design hierarchischer Porenstrukturen zur Intensivierung des Stofftransports und zur Optimierung der thermodynamischen Eigenschaften für die spezifischen Anwendungsfälle (z. B. Temperaturniveaus von Antriebswärme, Nutzkälte und Rückkühlung). Durch Einstellung der Wechselwirkungstärken in den nanoskaligen Poren (diese Poren mit Porenweite < 2 nm werden in der IUPAC-Nomenklatur Mikroporen genannt), und durch Anpassung der Porengrößen und -morphologie kann die Zahl der funktionalen Plätze pro Volumen erhöht werden. Als Beispiel für eine hochporöse Struktur mit sehr günstigen Adsorptionseigenschaften für Wassermoleküle wird in *Abbildung 13* das metallorganische Gerüstmaterial Cu-BTC dargestellt).

Ein neuartiger Ansatz für verbesserte Adsorptionsmaterialien, der als nanotechnologisch bezeichnet werden kann, besteht in der Nutzung des hydrophil/hydrophob-Phasenübergangs für die Wärmetransformation und Wärmespeicherung. Durch Einbringung von thermosensitiven Polymeren in Mesoporen eines starren Trägermaterials (z. B. auf Kieselgel-Basis) entsteht ein poröses Nanokomposit-Material, dessen Porenoberflächen temperaturabhängig von hydrophil auf hydrophob schalten (Abbildung 14). Aus theoretischen Untersuchungen der Universität Dortmund (AK Geiger) lässt sich vorhersagen, dass es in solchen Materialien auch bei einer relativ breiten Porenradienverteilung des Trägermaterials zu einer großen Beladungsänderung des adsorbierten Wassers in einem engen Temperaturbereich kommt. Dieses Adsorptionsverhalten ermöglicht – wenn solche Nanokomposite experimentell realisiert werden können – eine Erhöhung der Energiedichte bei der Wärmespeicherung und hocheffiziente neue Verfahrensführungen bei Adsorptionswärmepumpen und -kältemaschinen.

Ein wichtiges Ziel bei Materialentwicklungen für die Wärmespeicherung und Wärmetransformation ist die Verbesserung der Alterungsbeständigkeit von Materialien und Komponenten. Hier gilt es, zunächst ein detailliertes Verständnis von Alterungsprozessen (z. B. Defektchemie der

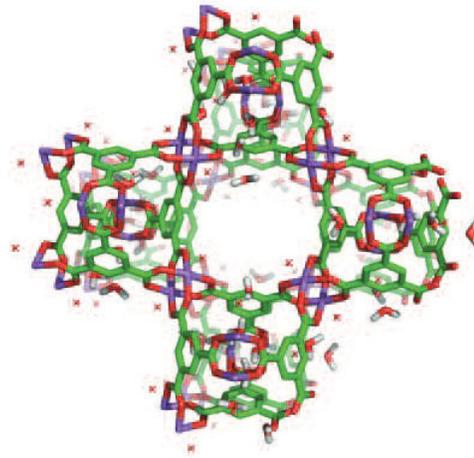


Abbildung 13
Struktur des metall-organischen Gerüstmaterials Cu-BTC (Kupfer-Benzoltricarboxylat). Das Cu-Atom ist magenta-farben dargestellt, Kohlenstoff grün, Sauerstoff rot und Wassermoleküle im Porenraum rot-weiß.

Zeolithe) und von Korrosionsprozessen in den relevanten Systemen zu gewinnen. Basierend auf solchen Erkenntnissen kann z. B. die hydrothermale Stabilität von Adsorbens/Wärmeübertrager-Verbundschichten verbessert werden. Eine Vision für den Einsatz von Nanotechnologie ist hierbei die Entwicklung selbstheilender Materialien und Beschichtungen (z. B. für den Korrosionsschutz in Absorptionswärmepumpen).

Bei den Additiven und Trägermaterialien für Wärmetransformation und -speicherung bieten sich weitere Einsatzmöglichkeiten für Nano-

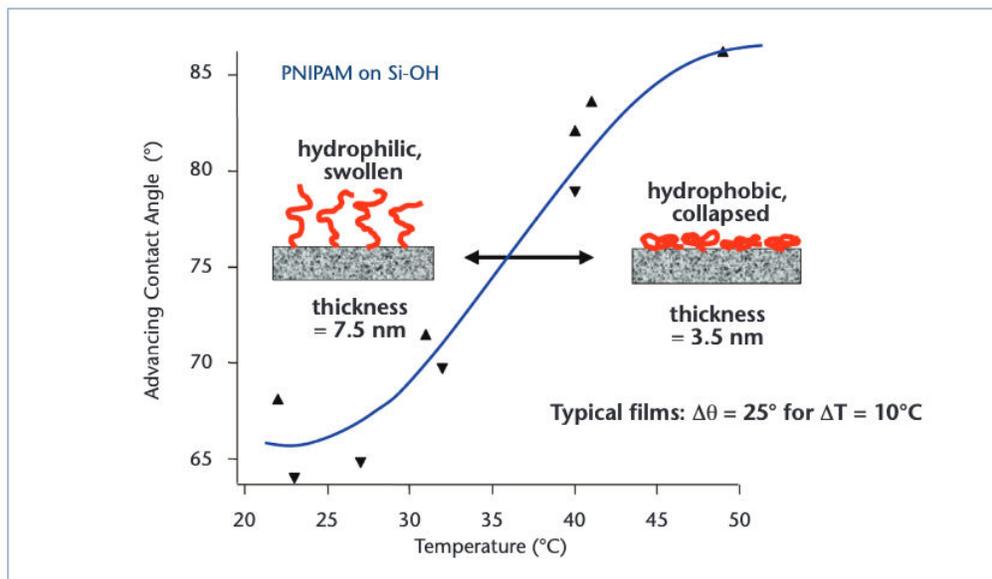


Abbildung 14
Änderung des Kontaktwinkels von Wasser mit der Temperatur für eine mit dem Polymer PNIPAM (Poly(N-Isopropyl-Acrylamid)) beschichtete Oberfläche (Quelle: I. Brovchenko/ A. Oleinikova, Univ. Dortmund)

Materialien. Der bereits genannte Korrosionsschutz stellt nach Einschätzung der Workshop-Teilnehmer ein Schlüsselthema für den Markterfolg der Absorptions- und Adsorptionstechnologien dar. Bei den Phasenwechselmaterialien ist ein detailliertes Verständnis der Keimbildung zu entwickeln, um die Problematik der Unterkühlung zu lösen, die heute dem Praxiseinsatz einiger PCMs mit hoher Schmelzenthalpie entgegensteht. Geeignete Nanopartikel als Keimbildner könnten die Unterkühlung herabsetzen, ohne sich negativ auf die Schmelzenthalpie auszuwirken.

Für die Adsorptionstechnologie wird eine hierarchische Porenstruktur zur Minimierung der Stofftransportwiderstände nicht nur für die sorptionsaktiven Basismaterialien, sondern auch für deren Trägerstrukturen (z. B. poröse Metalle oder Keramiken) benötigt. Zugleich wird eine möglichst gute thermische Ankopplung an einen Wärmeübertrager benötigt, d. h. an ein auf der anderen Seite einer vakuumdichten Grenzfläche strömendes Wärmeträgerfluid. Eine Vision ist die Entwicklung von Nanokompositen, die das Sorptionsmaterial als Submikrometer-Schicht auf der inneren Oberfläche einer hochporösen Keramik (oder eines Metallschaums) enthalten. Idealerweise sollte der Wärmeübertrager direkt in dieses Kompositmaterial integriert sein und ein hierarchisches, dreidimensional verzweigtes Kanalsystem für das Wärmeträgerfluid aufweisen. Die Bionik kann wichtige Impulse zur Realisierung dieser Vision liefern. Die hierarchischen Strukturen für Blutströmung und Stofftransport in Fischkiemen oder der menschlichen Lunge können Vorbild für technische Mikroreaktoren für die Wärmetransformation sein.

Um den Wärme- und Stofftransport in Absorbieren und Adsorbieren weiter zu intensivieren, können Nanofluide eine wichtige Rolle spielen, also kolloidale Suspensionen von Nanopartikeln in Basis-Fluiden. Eine außergewöhnliche Eigenschaft einiger Nanofluide ist, dass sie bereits bei geringer Konzentration der Nanopartikel einen stark erhöhten Wärmeübergangskoeffizienten bei erzwungener Konvektion aufweisen (gegenüber dem Basis-Fluid). Für Fallfilm-Absorber wurde zudem bereits ein durch Nanofluide deutlich verbesserter Stofftransportkoeffizient

nachgewiesen. Eine weitere Eigenschaft von Nanofluiden, die für die Erhöhung der Verdampfungs-Leistungsdichte in Sorptionswärmepumpen von Interesse ist, ist die Verbesserung der Benetzungseigenschaften von Oberflächen in Verdampfungsprozessen. Während des Verdampfungsvorgangs einiger Nanofluide scheidet sich eine dünne Schicht von Nanopartikeln auf der Verdampferoberfläche ab, die z. B. zu einer deutlichen Erhöhung der kritischen Verdampfungsleistung (also der maximalen Wärmeabgabe der Verdampferoberfläche) führt.

Wärmedämmung

Die Nanotechnologie wird bereits seit einiger Zeit erfolgreich bei der Realisierung effizienter Wärmedämmkomponenten eingesetzt (*Abbildung 15*). Durch die Verwendung von hochporösen, nanostrukturierten Festkörpern lässt sich die Beweglichkeit von Gasmolekülen in den Poren des Materials soweit einschränken, dass nicht mehr die volle Wärmeleitfähigkeit des freien Gases zum Tragen kommt. Bei Raumtemperatur wird dieser Effekt ab Porengrößen $< 1 \mu\text{m}$ signifikant. Dies ist sowohl bei feinteiligen Kieselsäuren (Pyrogene Kieselsäure, Fällungskieselsäure) als auch bei Aerogelen (z. B. Silica-Aerogelen) feststellbar. Hier nimmt bei Normalatmosphäre (20°C , 1000 mbar Gasdruck) die Gaswärmeleitfähigkeit und damit die Gesamtwärmeleitfähigkeit mit kleiner werdenden Strukturen kontinuierlich.

Pyrogene Kieselsäuren werden derzeit in Hochtemperatur-Wärmedämmungen für technische Anwendungen und in Vakuum-Isolationspaneelen, so genannten VIPs, als Kernmaterialien eingesetzt. Bei Vakuumisolationen ist als eine mögliche Variante ein offenporöser nano- oder mikrostrukturierter Kern in eine möglichst gasundurchlässige Folienhülle eingelegt. Nach der Evakuierung des Kerns wird die Hülle durch eine thermische Verschweißung verschlossen. Damit kann die Gaswärmeleitfähigkeit in diesen Systemen vernachlässigt werden. Gas-Leckagen können jedoch nie ganz ausgeschlossen werden. Durch den Einsatz nanostrukturierter Kernmaterialien erfolgt jedoch erst bei relativ hohen Gasdrücken im VIP ein merklicher Anstieg der Gaswärmeleitfähigkeit.

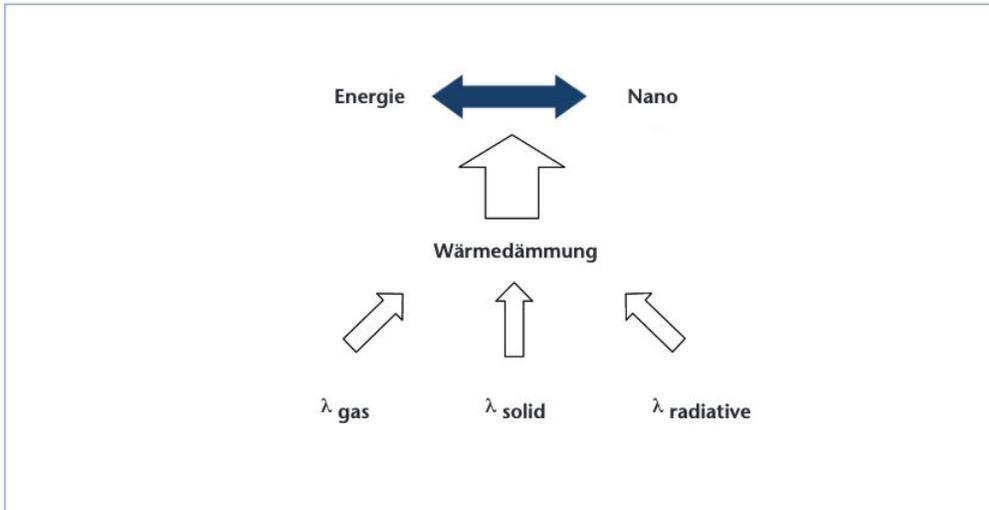


Abbildung 15
Durch Verwendung nanostrukturierter Materialien lassen sich der Beitrag des Porengases zum Wärmetransport, der Wärmestrahlungs-transport und die Wärmeleitung über die Festkörperphase eines porösen Dämmstoffs minimieren. Alle drei Komponenten bilden in der Regel in der Summe die Gesamtwärmeleitfähigkeit eines nanostrukturierten Wärmedämmstoffes.

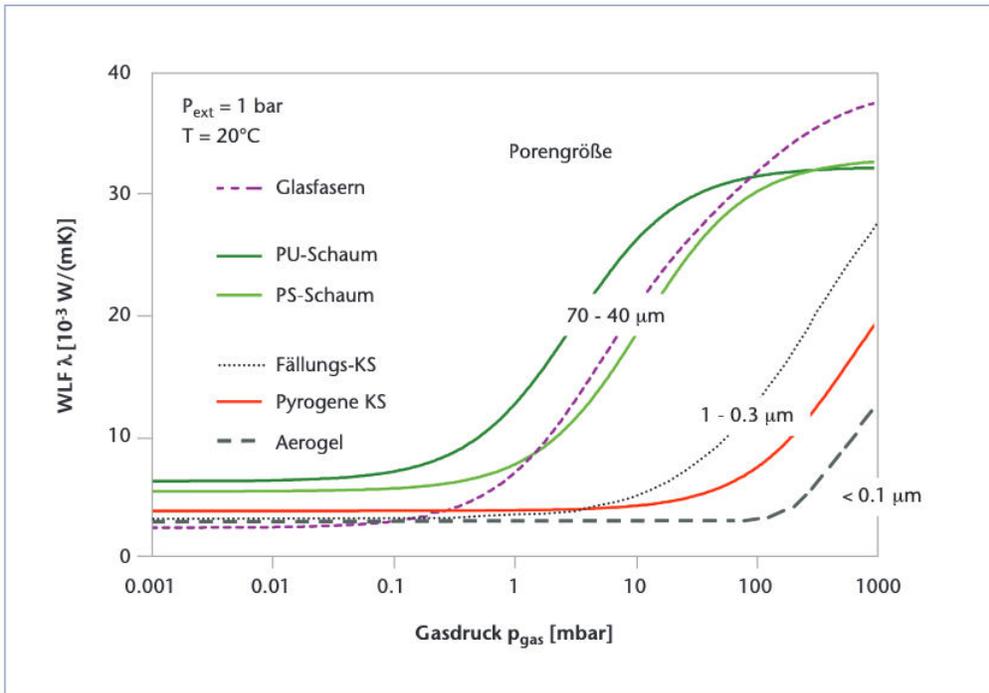


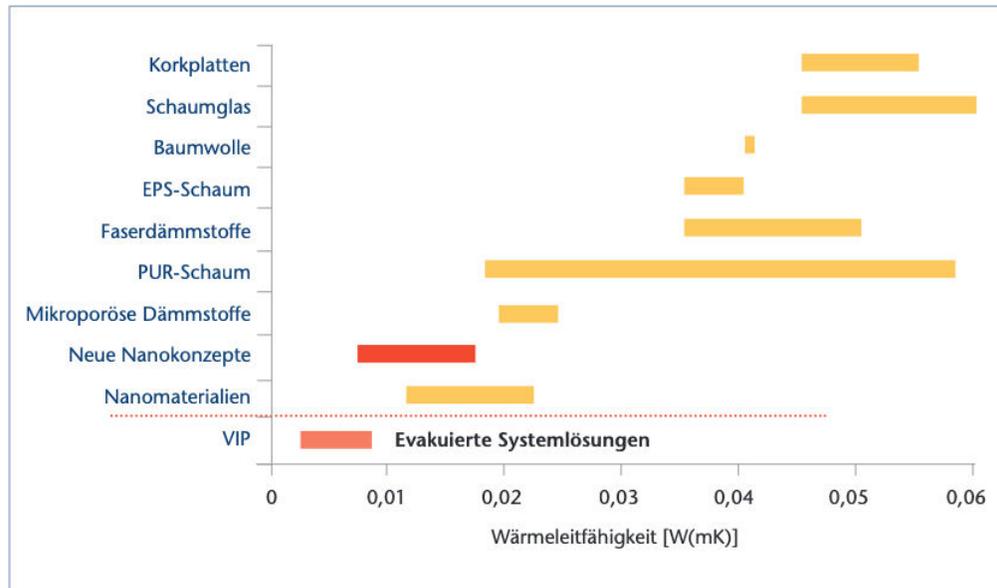
Abbildung 16
Darstellung der Gasdruckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit für verschiedene poröse Dämmstoffe mit unterschiedlichen mittleren effektiven Porenradien (KS = Kieselsäure). Der Sockel der S-förmigen Kurve entspricht der Summe aus der Wärmeleitfähigkeit des Festkörpergerüsts und des Wärmestrahlungsbeitrages [ZAE Bayern].

Nur so ist es möglich, lange Funktionsdauern bis zu mehreren Jahrzehnten bei vorgegebener Gasdurchlässigkeit der Umhüllungsfolie zu realisieren. Silica-Aerogele finden auf Grund ihrer Lichtdurchlässigkeit und sehr guten Wärmedämmeigenschaften als granulares Schüttgut in so genannten Transparenten Wärmedämmungen (TWD) Anwendung. Die Wärmeleitfähigkeit des Aerogel-Schüttgutes liegt dabei aber aufgrund der Zwischenräume zwischen den

Granulatpartikeln mit ca. 0,025 W/(mK) deutlich über dem Wert von monolithischem Silica-Aerogel ($\approx 0,01$ W/(mK)).

Der Wärmestrahlungstransport innerhalb von Wärmedämmmaterialien lässt sich durch das Einbringen von sogenannten Infrarot-Trübungsmitteln in das Dämmmaterial wirksam reduzieren. Infrarot-Trübungsmittel absorbieren und/oder streuen elektromagnetische Strahlung im

Abbildung 17
Vision: mit neuen Nanokzepten lassen sich Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von $0,007 \text{ W}/(\text{mK})$ bis $0,018 \text{ W}/(\text{mK})$ unter Normalatmosphäre bei Raumtemperatur erzielen.



spektralen Bereich der Wärmestrahlung aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und Struktur. Theoretisch lassen sich diese Wechselwirkungsprozesse an Einzelteilchen durch die Mie-Streutheorie sehr gut beschreiben.

Nanopartikel werden auch bei der Schaumstoffherstellung zur Funktionalisierung und zur besseren Prozessierung der Schäume verwendet.

Als Zielgrößen der Wärmeleitfähigkeit für zukünftige F&E-Aktivitäten zur Realisierung innovativer nanostrukturierter Wärmedämmstoffe ist ein Wärmeleitfähigkeitsbereich von ca. $0,007 \text{ W}/(\text{mK})$ bis ca. $0,018 \text{ W}/(\text{mK})$ für Materialien in Normalatmosphäre bei Raumtemperatur vorstellbar (Abbildung 17, neue Nanokzepten). Idealerweise werden bei zukünftigen Entwicklungen die hervorragenden thermischen Eigenschaften von nanostrukturierten Wärmedämmstoffen durch weitere Funktionalitäten ergänzt, wie z. B. erhöhte mechanische Festigkeit. Wünschenswert ist es ebenso, wenn eine „Schäumung vor Ort“, durchgeführt werden könnte um damit eine höhere Prozessintegration zu erreichen und um Transportkosten zu vermeiden (Dämmstoffe bestehen zu einen überwiegenden Maße aus Hohlräumen!).

Brennstoffzellen

- Eine Vision zielt auf spezifisch synthetisierte Nanopartikel und nanostrukturierte Materialien, um langlebige und wettbewerbsfähige Brennstoffzellen produzieren zu können. Insbesondere im Bereich der automobilen Anwendung werden hier Beiträge zur signifikanten Verbesserung der Katalysatoraktivität und -stabilität erwartet, aber auch ein einfacheres Wassermanagement auf Grund verbesserter Transporteigenschaften in der Membran-Elektroden-Einheit.
- Darüber hinaus wird eine kostengünstigere Wasserstoffspeichereinheit mittels Nanotechnik als visionär machbar gesehen.
- Eine Weiterentwicklung des bestehenden, allerdings selektiv eingesetzten Korrosionsschutzes für Bipolarplatten zu einem umfassenden Korrosionsschutzkonzept durch Nanobeschichtung könnte mittelfristig realisiert werden.
- Die Industrialisierung des nanotechnologischen Ansatzes durch Entwicklung kostengünstiger Herstellungsverfahren ist bei weitem noch nicht ausgereift und wird eher mittel- bis langfristig realisiert werden können. Anzumerken ist dabei, dass die klassischen Katalysatoren als Ausnahme zu betrachten sind, da diese Komponente per se eine Nanostruktur aufweist.

Lösungskonzepte

Welche nanotechnologischen Lösungskonzepte werden bereits realisiert, welche benötigen wir noch?

Photovoltaik

Zur Beantwortung dieser Frage erfolgt hier zunächst eine Definition, in welchen Bereichen und unter Zuhilfenahme welcher der vielfältigen Sparten der Nanotechnologie eine Verbesserung von photovoltaischen Bauelementen überhaupt denkbar ist.

Es werden vier Kategorien identifiziert (Tabelle 1), an welchen derzeit auf der Forschungs- und Entwicklungsebene gearbeitet wird.

Die erste Kategorie betrifft die eher gelegentliche Nutzung von Nanotechnologie an der Peripherie der Solarzelle, z. B. zur Kontaktherstellung aber auch bei der Herstellung von Absorbermaterialien aus Nanopartikeln. Diese Anwendungen zielen in erster Linie auf Kostensenkung während der Herstellung und werden in vielen Fällen derzeit schon angewendet. Für die Kategorien 2 bis 4 ist die Notwendigkeit zur Verwendung der Nanotechnologie durch das jeweilige Konzept vorgegeben.

Die Nutzung von photovoltaischen Absorbermaterialien mit niedriger Beweglichkeit (Kategorie 2) macht die Ladungsträgertrennung auf einer Längenskala von typischerweise zehn nm zu einer Notwendigkeit. Zudem erlaubt die meist hohe Absorptionskonstante dieser Materialien effektive Absorberdicken in der Größenordnung von 100 nm. Organische Absorbermaterialien sind ein typisches Beispiel für diese zweifache Einschränkung der Geometrie der Solarzellen auf die nm Skala. Aber auch amorphes Silizium gehört durch die geringen Ladungsträgerbeweglichkeiten und mit Absorptionslängen von wenigen 100 nm an das obere Ende dieser Kategorie.

Die dritte Kategorie nanotechnologischer Optionen betrifft die Optik der Solarzelle. Jedwede Manipulation des einfallenden Sonnenlichts zur Verbesserung der Lichteinkopplung und zur Verlängerung des optischen Weges jenseits der geometrischen Optik erfordert Strukturen von der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts und somit eine

Tabelle 1

Vier Kategorien für die Anwendung von Nanotechnologie in der Photovoltaik, ihr Anwendungspotenzial, die typische Längenskalen und der Zeitrahmen, in dem industrielle Anwendungen zu erwarten sind. Der Handlungsbedarf für die ersten beiden Kategorien besteht in der Demonstration ihrer Skalierbarkeit auf industrielle Prozesse bei geringen Kosten und relevanten Wirkungsgraden. Bei den Kategorien 3 und 4 muss zunächst die physikalische Machbarkeit des Konzepts selbst gezeigt werden. Großer Handlungsbedarf besteht in allen Kategorien bei einer geeigneten Analytik und quantitativer Modellierung der Elementarprozesse sowie der Bauelemente.

Kategorie	1. Unterstützende Nanotechnologie	2. Nanogeometrie	3. Photonenmanagement (Photonik)	4. Quantentechnologie
Anwendung	Periphere Elemente, Herstellung	Low- μ Absorber	Verbesserung der Lichteinkopplung (Add-on)	Absorber mit sehr hoher Effizienz
Physikalische Längenskala	-	Diffusionslänge	Wellenlänge Photon	Wellenlänge Elektron
Ordnungsgrad	→	→	→	→
Ziel	Kostensenkung, Erhöhung von η	$\eta \sim 10-15\%$	Erhöhung von η	$\eta > 20\%$
Zeitraumen	derzeit	5-15 Jahre	5-15 Jahre	> 10 Jahre
Handlungsbedarf	Analytik und Modellierung			
	Skalierbarkeit	Proof of Concept		

nanotechnologische Herangehensweise. Die meisten dieser Konzepte zeichnet aus, dass sie additiv sind, d. h. vor oder hinter einer Solarzelle platziert werden und somit mit den elektronischen Prozessen im eigentlichen Absorbermaterial oder mit seiner Herstellung nicht negativ wechselwirken. Jedoch sind auch integrierte Konzepte denkbar.

Für die vierte Kategorie wurde im Workshop der Name „Quantentechnologie“ geprägt. In diese Kategorie fällt die Nutzung echter Quanten-size Effekte im photovoltaischen Absorbermaterial. Diese Konzepte zielen in aller Regel auf sehr hohe Wirkungsgrade jenseits der klassischen Shockley-Queisser-Grenze. Der Einsatz von Quanten-size Effekten erlaubt das gezielte Design der elektronischen Eigenschaften von Absorbermaterialien z. B. das Einstellen einer effektiven Bandlücke für Tandemsolarzellen oder die Minimierung von Elektron-Phonon Wechselwirkung.

Elektrische Energiespeicher

Es haben sich bereits einige nanotechnologische Lösungsansätze im Bereich der elektrischen Energiespeicher, im Besonderen bei Li-Ionen-Systemen etabliert. Nanostrukturierte keramische Separatorfolien befinden sich bereits in Li-Ionen-Batterien in der Erprobungsphase an der Schwelle zur kommerziellen Nutzung entsprechender Systemkomponenten.

Ebenso ist eine nanoskalige Kohlenstoffbeschichtung der sub-mikro strukturierten Partikeln in den Elektroden technologisch wie auch nanoskalige Kristallite in den Partikeln der Elektroden sind bereits realisiert.

Die bereits genannten visionären nanotechnologischen Lösungsansätze erfordern ein grundlegendes, umfassendes und interdisziplinäres Verständnis der einzelnen Funktionsprinzipien und das des Zusammenwirkens verschiedener Funktionselemente in verschiedenen Systemteilen sowie im Gesamtsystem. Dabei ist die zeitnahe Übertragung des detaillierten Grundlagenwissens aus dem Bereich der nanotechnologischen Lösungsansätze in die prozess- und produktorientierte Praxisentwicklung entlang der gesamten Wertschöpfungskette notwendig.

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

Als Hintergrund zu den Ausführungen in diesem Abschnitt ist festzuhalten, dass wir bezüglich der Wärmetransformation noch am Anfang der Wertschöpfungskette stehen. Es gibt ein großes Potenzial zur Primärenergieeinsparung durch Wärmetransformation, aber bisher nur Nischenmärkte im großen Leistungsbereich (industrielle Abwärmennutzung), in denen sich diese Technologie bisher durchgesetzt hat. Die Erschließung kleinerer Leistungsbereiche (z. B. für solare Kühlung oder Heizung einzelner Gebäude mit Sorptionswärmepumpen) steht noch am Anfang, die entsprechenden Geräte befinden sich noch in der Entwicklungs- oder Erprobungsphase.

Da die meisten dieser Geräteentwicklungen mit sehr begrenzten Ressourcen vorangetrieben wurden (z. B. von Heizungstechnik-Firmen), wurde bisher nur wenig systematische Materialforschung und -optimierung betrieben. Insofern ist zu erwarten, dass bereits durch weitere systematische Materialforschung und Weiterentwicklung vorhandener Lösungsansätze noch deutliche Verbesserungen bzgl. Leistungsdichte und Effizienz der Apparate möglich sind. Nanotechnologische Ansätze können dann zu weiteren Verbesserungen führen, es soll aber hier nicht der Eindruck erweckt werden, alle anderen Verbesserungsmöglichkeiten seien bereits ausgereizt.

Der relativ geringe Umfang der Forschungsaktivitäten zur Wärmetransformation (verglichen z. B. mit der Brennstoffzellen-Forschung) hängt vor allem mit den bisher geringen Wärmepreisen zusammen. Die Hürde, eine wirtschaftlich betreibbare Sorptionswärmepumpe auf den Markt zu bringen, war dadurch bisher sehr hoch. Steigende Wärmepreise und wachsender politischer Druck zur Reduktion von Treibhausgasemissionen führen zu einer wachsenden Attraktivität der Wärmetransformation auf verschiedenen Märkten und zu einem wachsenden Interesse an einer systematischen Materialforschung auf diesem Gebiet.

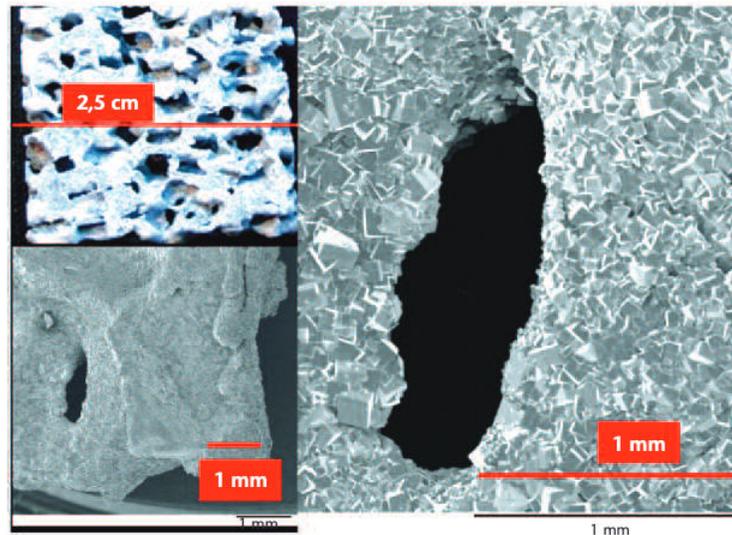


Abbildung 18
 Beispiel für durch in-situ Kristallisation von Sorptionsmaterialien auf porösen Substraten hergestellte Kompositmaterialien (hier: Zeolith auf Aluminiumschwamm, SorTech AG / Univ. Erlangen). Das Kompositmaterial verbindet die Eigenschaften des Aktivmaterials (Adsorptionskapazität) mit den guten Wärmeleitungs- und Stofftransporteigenschaften der Trägerstruktur. Die im rechten Bild erkennbaren Kristallite des Zeolithen sind ca. 10-50 μm groß, die Porenstruktur des Zeoliths ist mit Porengrößen um 1 nm etwa vier Größenordnungen kleiner und hier nicht zu erkennen. Eine nanotechnologische Weiterentwicklung dieses Ansatzes hin zu wesentlich feinporeneren Substraten und dünneren Zeolithschichten erscheint aussichtsreich.

Bereits vorhandene Lösungsansätze

Es existieren:

- Simulationswerkzeuge für das Materialdesign und die Modellierung von Energie- und Stofftransport
- Syntheserouten für nano-skalige Funktionsmaterialien unterschiedlicher Art
- Methoden für die Kopplung von Sorptionsmaterialien an unterschiedliche Träger (z. B. Metall- und Keramikschwämme)
- Methoden zur Herstellung nano-skaliger Morphologie
- mesostrukturierte Oxide

Varianten existierender Lösungskonzepte

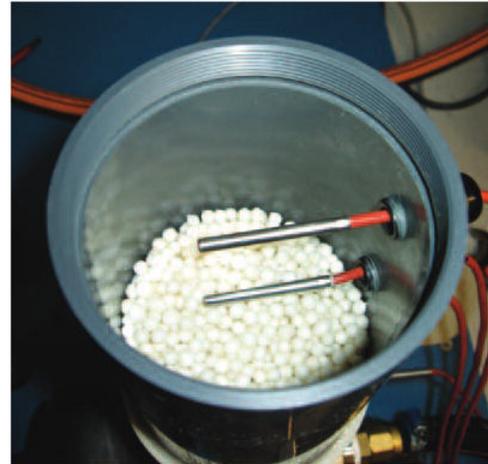
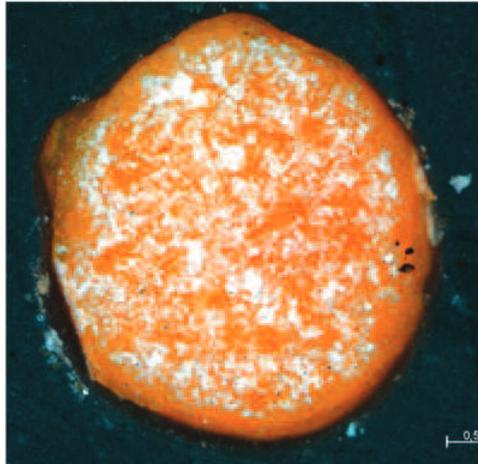
Wärmespeicher lassen sich allgemein klassifizieren in sensible, latente und thermochemische Speicher, wobei die letzte Kategorie auch die Sorptionsspeicher beinhaltet. Für die sensible Wärmespeicherung spielen Nano-Materialien sicher keine Rolle als Speichermaterialien selbst, sondern allenfalls als Additive (z. B. Korrosionsschutz).

Bei der Latentwärmespeicherung mit PCM lassen sich verschiedene Speicherkonzepte danach unterscheiden, ob das PCM mit dem

Wärmeträgerfluid umgewälzt wird oder nicht. Im klassischen Fall befindet sich das PCM ortsfest in einem Speicherbehälter, der mit einem Wärmeträgerfluid durchströmt wird. Dabei findet eine Wärmeübertragung zwischen PCM und Wärmeträgerfluid statt, wobei der Wärmefluss durch die zur Verfügung stehende Austauschfläche bestimmt wird. Je kleinteiliger das PCM verkapselt ist, desto größer ist die Austauschfläche und die dem Speicher zuführbare oder entnehmbare Wärmeleistung. Marktvorgänger sind PCM-Makrokapseln (z. B. Fa. Cristopia). Geforscht wird an PCM-Kompositmaterialien (PCCM), bei denen das PCM in einen porösen Träger eingebettet und durch diesen fixiert wird. Dadurch lassen sich deutlich kleinere Kapselgrößen (immer noch im Millimeterbereich) erreichen als mit anderen Makroverkapselungs-Ansätzen.

PCM-Mikrokapseln sind am Markt bisher nur als Baustoff-Zusatz verfügbar, wie [Abbildung 19](#) gezeigt. Neue Einsatzgebiete von PCM-Mikrokapseln werden in Zusammenhang mit Speicherkonzepten untersucht, bei denen das PCM mit dem Wärmeträgerfluid durch ein Wärme-/Kälteverteilnetz gepumpt wird (als sogenannter PCM-Slurry). Die Herausforderungen liegen hier

Abbildung 19
Beispiele für Phase Change Composite Materials (PCCM): links: Schliffbild von mit angefärbtem Polyethylenglykol-impregniertem Blähglas rechts: Speicherbehälter teilweise befüllt mit PCCM-Granulat auf Cordieritbasis (ILK Dresden)



in der Langzeitstabilität der Mikro kapseln und der Auswahl oder Entwicklung geeigneter Pumpen, die die Kapseln nicht zerstören und die von diesen nicht verstopft werden.

Eine Alternative zu PCM-Slurries sind PCM-Emulsionen, bei denen ein Emulgator die feinen PCM-Tröpfchen stabilisiert und somit die Wand der PCM-Mikro kapseln ersetzt. Hier besteht die technologische Herausforderung im Auffinden von Emulgatoren, mit denen sich eine langzeitstabile Tropfengrößenverteilung erreichen lässt. Auch eine Separation der Emulsion bei längeren Speicherstandzeiten soll durch Auswahl des Emulgators und Einstellung von PCM-Konzentration und Tröpfchengröße (wodurch u. a. die Viskosität der Emulsion beeinflusst wird) unterdrückt werden.

Für die Wärmetransformation im Temperaturbereich oberhalb 250°C bieten sich Kombinationen von Metallhydriden (z. B. Magnesiumhydrid mit Alkalimetall-Alanaten) an. Hierzu gibt es bisher nur vereinzelte Forschungsarbeiten, in Deutschland v. a. am MPI für Kohleforschung, Mülheim. Größte technologische Herausforderung ist die Verbesserung der Kinetik der Wasserstoffabsorption, ein wichtiger Ansatz dazu besteht in der Dotierung der Alkalimetall-Alanate mit geeigneten Nanopartikeln.

Wärmedämmung

Wärmedämmung ist in vielen Fällen, zum Beispiel im Bauwesen und in der Anlagentechnik, eine Zukaufkomponente, die kostengünstig verfügbar und einfach anwendbar sein muss. Spitzentechnologie wird in diesen Fällen in der Regel nicht mit dem Produkt Wärmedämmung assoziiert. In der Vergangenheit wurden Neuentwicklungen im Bereich der Wärmedämmung überwiegend für anspruchsvolle technische Anwendungen, wie z. B. Raumfahrt, aufgrund von technischen Notwendigkeiten durchgeführt oder aufgrund von restriktiveren gesetzgeberischen Maßgaben bzgl. des Wärmeschutzes.

Derzeitige Konzepte zur Realisierung von nanostrukturierten Wärmedämmstoffen leiden unter der aufwändigen Prozess- und Anwendungstechnik. Hinzu kommen die Entwicklung von Wärmedämmstoffen begleitenden aufwändigen Charakterisierungsverfahren und die hohe Komplexität hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen, zusätzlich gewünschten Funktionseigenschaften des Wärmedämmmaterials (z. B. thermisch, mechanisch, chemisch, usw.). Gleichzeitig gibt es bisher nur wenige Beispiele von verzahnten Entwicklungen, d. h., in vielen Fällen werden Wärmedämmstoffe nicht mit Hinsicht auf einen

konkreten Einsatzbereich konzipiert; dies trifft vor allem auf technische Wärmedämmungen zu. Verzahnte Entwicklungskonzepte hätten den Vorteil, dass der Dämmstoff in der Zielanwendung optimiert eingesetzt werden kann und unter Umständen sogar noch weitere Funktionen übernehmen könnte.

Konkrete nano-technologische Lösungskonzepte basieren derzeit auf folgenden Materialansätzen:

- Aerogele, wie Silica-Aerogele, organische Aerogele und Kohlenstoff-Aerogele als Pulver, Granulat oder monolithischer Formkörper
- Pulver auf der Basis von Kieselsäuren (z. B. pyrogene Kieselsäuren oder Fällungskieselsäuren)
- Fasern: Nanopartikel können beispielsweise die Spinnbarkeit beeinflussen.
- Komposit-Systeme, z. B. aus einer Mischung von Fasern und Pulvern oder Aerogelen und Fasern und
- Vakuumisulationspaneele, die als eine Variante nanostrukturierte Kieselsäuren als Füllkern besitzen.

Brennstoffzellen

Konventionelle Herstellungsrouten sind lediglich für einige Klassen von Katalysatoren und Membranen bekannt. Um aber neue Ansätze für wettbewerbsfähige Brennstoffzellentechnologien realisieren zu können, müssen zunächst einige grundlegende Voraussetzungen erfüllt sein.

Voraussetzungen sind

- ein grundlegendes und umfassendes Verständnis von Nano-Strukturen und den daraus resultierenden Eigenschaften zu generieren.
- die Fähigkeit, reproduzierbar gezielte Nanostrukturierung zu erstellen.
- eine Modellbildung auf verschiedenen Zeit- und Größenskalen (Hardware) einschließlich der Analyse und eines dazugehörigen „Up-Scaling“

Neue Ansätze für mobile und stationäre BZ-Technologien sind

- neuartige, optimal adaptierte Materialien
- neuartige Ansätze zur Katalysatorherstellung wie z. B. von Core-Shell-Systemen, deren Kern aus einem unedlen Metall gebildet wird und nur die katalytisch aktive Oberfläche ein Edelmetall ist, oder verringerte Katalysatorbeladung durch eine verbesserte Ausnutzung des eingesetzten Trägermaterials, was beispielsweise durch Nanostrukturierung des Kohlenstoffträgers erreicht werden kann.
- neue, kostengünstige Werkstoffe, Ausnutzung von Teilchengrößeneffekten und eine gezielte Optimierung der Aktivität, Stabilität und Transporteigenschaften
- gezielte 3D-Strukturierung der Elektroden in einer MEA
- und ein **verbessertes Wassermanagement**.

Dazu ist eine

- Reduktion der unkontrollierten „Membranschwellung“ durch anorganische Nano-Füllstoffe wie z. B. nano-ZrO_{2-x} notwendig sowie
- nanostrukturierte Elektrolytmaterialien (Kompositmaterialien, Block-Copolymere)
- und optimierte Elektroden- und Porenstrukturen (z. B. Aerogele, Hydrophobierung durch nano-beschichtete Fasern)
- Gasdiffusions-Barrierschichten (für H₂, CO₂, Methanol, etc.) und
- gezielte, auch 3-dimensionale Funktionalisierung von Oberflächeneigenschaften zu schaffen.

Komponenten, die dafür benötigt werden sind:

- Nanomaterialien für die SOFC (Defekt-Ionenleiter)
- Wasserstoffspeicher aus stabilen Hochoberflächenmaterialien mit einer optimierten Speicherdichte, Metal Organic Frameworks (MOF) und porösen Polymere
- Korrosionsschutzschichten, die auf elektrisch leitenden Nanomaterialien basieren.
- reversibel und schaltbare Wasserstoff-Speicher sowie
- Optimierung funktioneller Eigenschaften von Gasdiffusionslagen

Nationale und internationale Forschungs- und Entwicklungstrends

Wo liegen nationale und internationale Forschungs- und Entwicklungstrends? Woraus resultieren unterschiedliche Prioritäten?

Photovoltaik

Die allgemeinen Trends lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen. Aus Sicht der Industrie gibt es drei nennenswerte Richtungen: die konventionellen, Wafer-basierten Solarzellen, die Dünnschichtsolarzellen und die Hoch-effizienz-Solarzellen für kraftwerksähnliche Photovoltaik-Einheiten. Im Bereich der Forschung kommt dazu noch die sogenannte „3rd Generation“-Photovoltaik und die „low cost“-Solarzellen, die mit neuen, noch nicht etablierten, neuen Konzepten entweder auf kostengünstige hocheffiziente Solarzellen zielt oder die Solarzellen, die auf ganz preiswerte Photovoltaik für Konsumer-Produkte abzielt.

Die Nutzung der Nanotechnologie für die Photovoltaik wird international, insbesondere in den USA, in allen Bereichen stark vorangetrieben. Dies betrifft insbesondere stark innovative Ansätze mit hohem Forschungs- und Entwicklungsrisiko im Segment möglicher höchster Wirkungsgrade (*Tabelle 1*, siehe S. 21, Kategorien 3 und 4). Obwohl auch in Deutschland, u. a. in europäischen Verbänden, Forschung und Entwicklung in diesen stark innovativen Bereichen stattfinden, wurde hier ein gewisser Nachholbedarf festgestellt.

Auch die Forschung an organischen und organisch-anorganischen Hybrid-Solarzellen (Kategorie 2) ist international ein sehr wichtiges Thema mit starken Forschungsaktivitäten in den USA, Japan, und in anderen europäischen Ländern. Durch die jüngste Initiative des BMBF ist die deutsche Forschung in diesem Bereich ebenfalls sehr gut aufgestellt. Im Bereich der höchsten (Rekord-)Konversions-Effizienzen und

auch im Bereich der Konzentration-Photovoltaik für kraftwerksähnliche Photovoltaik-Einheiten sind die Aktivitäten in den USA sicher stärker fokussierter und stärker, sowohl in Forschung als auch in der Industrie, verglichen mit Deutschland bzw. Europa.

Elektrische Energiespeicher

Die technologische Zielsetzung für elektrische Energiespeicher besteht – wie bereits in Kapitel *Visionen* auf Seite 13 ausgeführt – in der Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte sowie die Verlängerung der Lebensdauer bzw. Steigerung der Zahl von Lade- und Entladezyklen bei erhöhter intrinsischer Systemsicherheit und vertretbaren Kosten.

Wie aus der *Abbildung 11* auf Seite 15 ersichtlich war, sind die Li-Ionen-Systeme eine viel versprechende Technologie zur gleichzeitigen Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte.

Insofern gehen die globalen Trends in Richtung der Optimierung dieser Technologie, wobei neben den Leistungs- und Lebensdauermerkmalen die signifikante Erhöhung der intrinsischen Sicherheit im Vordergrund steht.

Aufgrund des dominierenden technologischen Trends zu Li-Ionen-Batterien, wurde im Rahmen des Workshops das Potenzial der Nanotechnologie bei elektrischen Energiespeichern fast ausschließlich mit Bezug auf Li-Ionen-Systeme diskutiert.

Die technologische Weiterentwicklung wird zur Zeit aus dem asiatischen Raum dominiert,

wobei in Europa und speziell in Deutschland verstärkt Anstrengungen unternommen werden, um die zur Zeit vorhandenen Defizite aufzuholen (siehe hierzu auch die BMBF Ausschreibung zum Thema Li-Ionen-Batterien im Rahmen der High-Tech-Strategie der Bundesregierung).

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

Insgesamt ist für das Themengebiet der Wärmetransformation festzustellen, dass eine systematische Materialforschung und -entwicklung bisher erst in Ansätzen erkennbar ist und dass deutliche Verbesserungen bzgl. Effizienz und Leistungsdichte der Prozesse bereits durch weitere systematische F&E-Arbeiten, z. B. ein Zusammenführen mit Arbeiten zur Mikroreaktortechnik, erwartet werden können. Erst dann können nanotechnologische Verbesserungen der Materialien voll zum Tragen kommen. Aus diesen Gründen wird im Folgenden nicht nur auf den nanotechnologischen Forschungsbedarf im engeren Sinn eingegangen, sondern auch auf notwendige Zwischenschritte der Prozessintensivierung ausgehend vom heutigen Stand der Technik.

In den letzten Jahren gibt es verstärkt Entwicklungsaktivitäten zu kleinen Sorptionswärmepumpen (z. B. Vaillant, Viessmann, Buderus) und zu kleinen Sorptionskältemaschinen (z. B. EAW, Sonnenklima, SorTech, Pink, ClimateWell, Robur, Rotartica). Von japanischen Herstellern wie Toyota/Denso, Mitsubishi und Honda sind zu kleinen Sorptionsgeräten für Heizung und Kühlung (insbesondere auch zur PKW-Klimatisierung mittels Motorabwärme) sehr viele Patente eingereicht worden, bisher sind jedoch kaum konkrete Produktentwicklungen bekannt geworden.

Bezüglich der für die Wärmetransformation eingesetzten Stoffpaare (Sorbens/Sorptiv) setzen die meisten der genannten europäischen Entwicklungen noch auf seit langem bekannte Materialkombinationen. Für die **Absorptionsverfahren** sind dies vor allem Wasser/Ammoniak und Lithiumbromid/Wasser (im Fall von ClimateWell Lithiumchlorid/Wasser), für die

Adsorptionsverfahren sind es vor allem Zeolith/Wasser und Silikagel/Wasser, es sind aber auch Entwicklungsarbeiten zu den Stoffpaaren Aktivkohle/Methanol und Aktivkohle/Ammoniak bekannt. Forschungsaktivitäten zu neuen Materialien gibt es vor allem für die Adsorptionsverfahren. Wie eingangs beschrieben, können hier durch die Wahl der Porenstruktur der Adsorbentien die thermodynamischen Eigenschaften gezielt beeinflusst werden, um die Performance unter jeweils spezifischen Anwendungsbedingungen zu verbessern. Materialklassen, die ein großes Forschungsinteresse auf sich ziehen, sind z. B. Aluminophosphate (Mitsubishi Chemicals), Metallorganische Gerüstmaterialien (BASF, bislang v. a. für Anwendungen der Wasserstoffspeicherung/Kryosorption), Aktivkohlefasern und Kompositmaterialien aus hygroskopischen Salzen in mesoporösen Trägern.

Zur Zeit sind folgende internationale Trends zu beobachten:

- Übergang von Granulaten zu funktionalen Schichten auf Trägern (insbesondere für Wärmetransformation durch Adsorption)
- Zunehmende Diskretisierung der Materialanordnung
- Miniaturisierung von Systemen für mobile Anwendungen
- Verstärkte Modellierung von Wärme- und Stofftransportprozessen, rationales Design von Systemen
- Latentwärme: Mikrokapseln bzw. Mikropartikel (z. B. Emulsion bei Flüssigsystemen, Phase Change Slurries)
- Wärmespeicherung und -transformation wird international vermehrt bearbeitet.

Nationale Trends

In Deutschland wird an allen internationalen Themen gearbeitet, es besteht eine fundierte Basis von der Grundlagenforschung bis zu ersten Produkten.

Abbildung 20
Idealvorstellung eines hoch effizienten wärmedämmenden Nano-Schaums für die Gebäudedämmung
[Quelle: BASF AG]



Abbildung 21
Zukünftige Energie- und Datenversorgungsleitungen könnten auf extrem gut wärmegeämmten Umbilical-Kabeln für den hybriden Transport von kryogenem Wasserstoff, Daten und Strom basieren
[Quelle: LEONI Studer]



International werden vor allem in den USA von verschiedenen Firmen (wie z. B. Aspen Aerogel, Nanopore Inc.) Wärmedämmsysteme auf der Basis von Silica-Aerogelen zu Erhöhung der Energieeffizienz für verschiedene Anwendungen entwickelt.

Brennstoffzellen

International

- Trends zu neuartigen und alternativen Materialien:
 - kostengünstige Polymersysteme
 - neuartige Katalysatoren, z. B.
 - sog. nano-Platin mit Schichtdicken im sub- μm Bereich (3M)
 - edelmetallfreie Systeme
 - Trägermaterialien (Oxide, Graphit-Strukturen made in Japan)
 - Metal Organic Frameworks (MOFs) zur Wasserstoffspeicherung
- Massiver Anstieg der Fördermittel u. a. in China, Korea

National

- Koordinierte Forschungsprogramme unter Einbindung der Grundlagenforschung (Hightech-Strategie der Bundesregierung, NIP Wasserstoff Brennstoffzelle)

Wärmedämmung

Bisher werden nanostrukturierte hochporöse Wärmedämmmaterialien in Form von Formkörpern und Granulaten über den Sol-Gel-Prozess dargestellt.

National gibt es Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Realisierung eines Schäumungsprozesses zur Herstellung von Nanoschäumen auf der Basis von Thermoplaste. Weiterhin gibt es F&E-Aktivitäten im Bereich der Synthese und thermischen Optimierung von Aerogelen (z. B. Silica-, organische und Kohlenstoff-Aerogele) für unterschiedlichste Anwendungsbereiche. Die Entwicklung von optimierten komplexen Kompositsystemen auf der Basis von nanostrukturierter Kieselsäuren und Fasern für tiefe Temperaturen ist ebenfalls Bestandteil eines aktuellen nationalen F&E-Projekts (Abbildung 20).

Vorhandene Stärken und Expertise

Wo sind wir stark?

Welche Institutionen haben welche Expertise?

Welche Expertise fehlt noch? Wo können und müssen wir uns verbessern?

Photovoltaik

Die Stärken der industriellen bzw. der Forschungslandschaft in Deutschland besteht darin, dass wir zunächst eine sehr gut entwickelte Photovoltaikindustrie haben. Die deutsche Industrie ist überdies in den Bereichen Chemie, Verfahrenstechnik und Nanotechnologie sehr gut aufgestellt. Handlungsbedarf besteht in der Verknüpfung der industriellen Partner mit der photovoltaischen Grundlagenforschung vor allem im Kontext neuer explorativer Ansätze. Hier sollten auf der einen Seite spezifische Anforderungen aus der Photovoltaik besser mit den Lösungsansätzen verbunden werden, welche die Nanotechnologie bietet.

Bei fortgeschrittenen Technologien sollten Resultate aus der Forschung schneller vom Labormaßstab zu einer industriell relevanten Technologie weiterentwickelt werden, bzw. sollten sehr frühzeitig industrielle Partner aus der Verfahrenstechnik gefunden werden. „Raus aus dem Labor“ gilt vor allem für den Bereich Organik. Die Notwendigkeit von Markteinführungsprogrammen für neue, noch nicht konkurrenzfähige Technologieansätze wird diskutiert. Es ist schon an dieser Stelle anzumerken (siehe auch Kapitel *Lösungskonzepte*, S. 21 f.), dass es unbedingt nötig ist, ein weites Spektrum an Lösungskonzepten ernsthaft zu verfolgen und das Spektrum an zukunftssträchtigen Solarzellentypen aus Gründen der strategischen Kategorisierung nicht künstlich einzugrenzen.

Elektrische Energiespeicher

Grundlagenwissen und Expertise existiert in Deutschland auf den verschiedensten einzelnen Gebieten der Nanotechnologie in hervorragender Weise. Tiefe Kenntnisse über Synthese, Charakterisierung, Modifikation und Handhabung von Nanopartikeln, Nanostrukturen und deren technologischen Anwendungsmöglichkeiten sind in zahlreichen universitären Einrichtungen, öffentlichen Instituten und innerhalb Industrie breit vorhanden.

Das interdisziplinäre Verknüpfen und Vernetzen des Wissens und die Übertragung in die Anwendungen entlang der Wertschöpfungskette ist jedoch weiterhin eine zu lösende Herausforderung. Dabei ist nicht nur der Transfer des akademischen Grundlagenwissens in anwendungsbezogenes Produkt- und Prozesswissen (d. h. die Überwindung der Hürden bei der Verknüpfung von öffentlicher Forschung an Hochschulen und Instituten mit industrieller Forschung und insbesondere mit industrieller Entwicklung) zu nennen, sondern auch die Überwindung der Hürden an den Schnittstellen zwischen Gliedern innerhalb der industriellen Wertschöpfungskette.

Zudem fehlen noch einzelne technologische Elemente, wie z. B. praxisnahe zeitnahe Testverfahren zur schnellen und aussagekräftigen Charakterisierung von einfachen Teilsystemen und Systemkomponenten.

Ebenso fehlen noch in weiten Bereichen Praxiserfahrungen in den Anwendungen und in der

Systemintegration entlang der Wertschöpfungskette z. Z. bedingt durch die oben erwähnten Hürden bei der Überwindung der Schnittstellen innerhalb der industriellen Wertschöpfungskette.

Eine möglichst quantitative Abschätzung des CO₂-Einsparpotenzials und der Ressourcenschonung durch die Nanotechnologie bei den Li-Ionen-Batteriesystemen würde bei der Verbreitung solcher Systeme und besonders in der Diskussion mit der breiten Öffentlichkeit hilfreich erscheinen.

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

Vorhandene Stärken

- Erfahrungen mit Applikationen, theoretischer Überblick Wärmespeicherung / Transformation
- Kenntnis grundlegender Herstellungsmethoden von relevanten Nanomaterialien
- Methoden zur Fixierung und Charakterisierung von Nano-Partikeln

Es liegen bereits wertvolle Erfahrungen aus der Systementwicklung effektiver Wärmepumpen und Speichersysteme basierend auf Materialien im Mikrometer-Zentimetermaßstab vor. Dieses Wissen kann und muss für nanoskalige Partikel adaptiert werden.

Schwächen

- fehlende Netzwerke für die Koordination der Zusammenarbeit
- zu wenig Grundlagenforschung bei Speicherung
- nicht ausreichend themenspezifische Expertise zur Nutzung der Nanotechnologie bei Wärmespeicherung, -transformation (Materialforschung zu diesen Themen beschäftigt sich noch überwiegend mit Problemen auf größeren Skalen, Link zur Nanotechnologie-Forschungsgemeinschaft noch zu schwach.)
- das Verständnis in der Modellierung der Prozesse und Materialien reicht noch nicht für eine rationale Systemauslegung bis zur Nanoskala.

Wärmedämmung

In Deutschland existiert ein hohes Know-how bezüglich nanostrukturierter Wärmedämmmaterialien in den Bereichen der Materialsynthese, Charakterisierung und Modellierung. Allerdings sind nur wenige industrielle und nicht-industrielle Forschungsstellen mit überkritischen Ressourcen (Personal und Infrastruktur) vorhanden, um F&E-Aktivitäten gezielt vorantreiben zu können. Im Bereich der Schaumherstellung existieren weitestgehend nur industrielle F&E-Know-how-Pools.

Brennstoffzellen

Vorhanden sind

- eine hervorragende Anbindung der Industrie an die Wissenschaft durch Forschungscluster, BMBF-Verbundforschung und industrielle Auftragsforschung
- spezialisierte Komponentenhersteller
- eine differenzierte Chemieindustrie und
- Produktionsanlagen für Dünnschichttechnologien

Fehlend sind

- nanospezifische Kapazitäten an Hochschulen in Ausbildung (Nachwuchs) und Forschung
- Hersteller von Brennstoffzellen-Stacks (Koordination der Komponenten-Entwicklung) und
- mehr unkonventionelle Forschungsansätze auf einer breiteren Materialbasis, weg von Standardvariationen

Anforderungen und Erfolgsfaktoren

Welche Anforderungen stellen die Systemhersteller sowie die Komponenten- und Materialhersteller?

Photovoltaik

Hier ist sicher die Besonderheit der Photovoltaik-Industrie und der Komponentenhersteller zu berücksichtigen: Die Photovoltaik hat sich, wie schon beschrieben, in den letzten Jahren mit außergewöhnlicher Rasananz und enormen Wachstumsraten zu einem signifikanten Industriezweig entwickelt hat, der darüber hinaus ähnliche Zukunftsaussichten verspricht.

Gleichzeitig sind die Solarzellen von heute ganz sicher noch nicht ausgereift und Solarzellen waren bis vor wenigen Jahren noch eher ein stiefmütterlich behandeltes Nebenprodukt der Opto-Elektronik-Technologie. Insbesondere nanotechnologische Komponenten und Aspekte erlauben mannigfaltige Lösungskonzepte auf verschiedensten Ebenen hinsichtlich Prinzip und Ausgereiftheit. Durch diesen besonderen Umstand gilt es auf der einen Seite für die Hersteller Spezifikationen zu erfüllen, die langfristige Gewährleistungen für die Produkte erfüllt, andererseits aber auch genügend Raum für Innovationen zulässt.

Dafür ist eine besonders starke Wechselwirkung zwischen der Industrie und der Forschung nötig und auch eine gewisse Risikobereitschaft hinsichtlich der Markteintrittsbarrieren. Dieser Grat ist natürlich schmal, denn auch einseitige, ungeeignete oder überzogene Erwartungen an wenig ausgereifte Konzepte können die Solarzellen-Branche sicher nachhaltig schädigen. An dieser Stelle muss also mit der nötigen Balance

vorgegangen werden und in kurzen zeitlichen Abständen ein intensiver Abgleich der Bezugspunkte und eine Auswertung der Erfahrungen erfolgen.

Elektrische Energiespeicher

Wie bereits oben in Kapitel *Visionen* auf Seite 13 angesprochen, ist die Gewährleistung von höchsten intrinsischen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsstandards der Li-Ionen-Zellen ist eine dringende und zwingende Notwendigkeit, ohne die – insbesondere aus Sicht der Systemhersteller – eine weitere Verbreitung der Li-Ionen-Technologie in mobilen wie auch in stationären Speichersystemen nicht möglich sein wird.

Die Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte sowie die Verlängerung der Lebensdauer bzw. Steigerung der Zahl von Lade- und Entladezyklen bei erhöhter intrinsischer Systemsicherheit und vertretbaren Kosten sind grundsätzliche Anforderungen seitens der Systemhersteller. Zudem sollten die Zellen möglichst einfach, gut integrierbar und diagnostizierbar gestaltet sein. Zudem wird eine zunehmende Felderfahrung und die Rückübertragung der daraus resultierenden Erkenntnisse in die Weiterentwicklung entlang Wertschöpfungskette und damit entsprechend auch die möglichst ungehinderte Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette seitens der Systemhersteller (wie auch der Material- und Komponentenhersteller) angesehen.

Für den Erfolg der Technologie durch vom Verbraucher angenommene Produkte am Ende der Wertschöpfungskette wird die Herabsetzung von Markteintrittsbarrieren von Systemherstellern als wesentlich erfolgskritisch angesehen.

Für den Erfolg dieser Technologie wird (wie auch für andere technische Bereiche) die Förderung des wissenschaftlichen Umfeldes als essentiell angesehen. Dies beinhaltet insbesondere auch die Ausbildung und Heranführung von technisch wissenschaftlichen Nachwuchskräften, auch im nicht akademischen Bereich und technologiefördernde Maßnahmen, z. B. die Förderung von Modellanwendungen, um anfängliche Markteintrittsbarrieren herabzusetzen.

Da die Komponenten- und Materialhersteller in der Regel am Anfang der Wertschöpfungskette eingeordnet sind, ist für diese Gruppe über die genannten Anforderungen hinaus die Zusammenarbeit innerhalb und Rückspiegelung von Informationen und Erfahrungen vom Ende der Kette zwingend notwendig. Der intensive Austausch innerhalb der Wertschöpfungskette ist daher auch erforderlich, um die technologischen Möglichkeiten von der Materialseite (technology push) und die Marktanforderungen (market pull) effizient abgleichen zu können.

Da Produktentwicklungen entlang der Wertschöpfungskette besonders für Komponenten- und Materialhersteller sehr langwierig sind, ist diese Gruppe stark auf die Zuverlässigkeit der Rahmenbedingungen (auch der politischen) angewiesen.

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

Für Systemhersteller (z. B. von Sorptionswärmepumpen oder Latentwärmespeichern) sind folgende Eigenschaften ihrer Systeme essentiell:

- Wirkungsgrad (COP bei Wärmepumpen/ Kältemaschinen)
- Lebensdauer (Zyklusstabilität)
- Wartungsfreiheit, Zuverlässigkeit
- Herstellungskosten

Da es bisher nur wenige intensive Kooperationen zwischen Materialforschern und Systemherstellern auf dem Gebiet der Wärmetransformation und Wärmespeicherung gibt, ist hier aus selbstkritischer Sicht der Materialforschung zu ergänzen, dass die Zusammenarbeit mit Systemherstellern essentiell ist, um der Materialforschung eine praxisorientierte Richtung zu geben.

Anforderungen stellen Komponenten- und Materialhersteller betreffen vor allem:

- Preiswerte und reproduzierbare Herstellungsverfahren für Komponenten mit nanoskaligen Funktionsschichten und/oder
- Weiternutzung vorhandener Anlagentechnik für nanotechnologische Herstellungsverfahren
- rechtliche Sicherheit und Unterstützung für die Zulassung (REACH) und Inverkehrbringung nanoskaliger Materialien

Wärmedämmung

Wärmedämmungen, auch hochleistende, sollten flexibel und robust (ohne Verlust der Dämmwirkung) in bestehende oder zukünftige Fertigungsabläufe integrierbar sein. Darüber hinaus wären Wärmedämmungen attraktiv, die multifunktional sind, d. h. neben der Wärmedämmwirkung noch andere Funktionen einschließen, und zu marktfähigen Kosten/Preisen zur Verfügung stehen.

Primäres Ziel ist die Erreichung von besonders niedrigen Wärmeleitfähigkeitswerten bei Normaldruck durch die Verwendung von Nanostrukturen. Für den Komponenten- und Materialhersteller ist die Optimierung der Prozesstechnik unter vorgegebenen Rahmenbedingungen (Aufgabenstellung, Kostenstruktur, Energieeffizienz) ein wichtiger Aspekt. Dabei können zusätzliche mitberücksichtigte Funktionen neben einer hervorragenden Wärmedämmwirkung positiv die Rahmenbedingungen beeinflussen. Der Wärmedämmstoff muss auch hier einfach verarbeitbar bzw. in das Endprodukt integrierbar sein.

Brennstoffzellen

- Vergleichbarkeit bestehender Technologien mit der Nanotechnologie herstellen.
- Durchgängige Zertifizierung und Standardisierung gewährleisten (weltweite Zertifizierungsaktivitäten insbesondere in den USA drohen die deutschen Erfolge in Richtung Kommerzialisierung zu gefährden).
- Kostensenkung
- Anforderungen der Komponenten-, Material- und Systemhersteller an nanotechnologische Lösungsansätze
 - gezielte, anwendungsorientierte F&E-Aktivitäten
 - schneller Transfer von der Grundlage zur Anwendung

Die größten Herausforderungen

Was sind die größten Herausforderungen, um die Nanotechnologie nutzen zu können? Schränken Risiken in der Nanotechnologie die Umsetzung ein?

Photovoltaik

Die Herausforderungen sind in den verschiedenen Forschungskategorien aufgrund der unterschiedlichen Zeitskalen unterschiedlich. Während unterschiedliche nanotechnologische Konzepte in den Kategorien 1 und 2 (*Tabelle 1*, siehe S. 21) schon ihre Funktionsfähigkeit bewiesen haben, sind in den innovativen Kategorien 3 und 4 die Konzepte noch nicht etabliert bzw. es fehlen noch grundlegende Schlüsselexperimente, welche die Tauglichkeit dieser Konzepte belegen. Trotzdem lässt sich für alle Kategorien eine Reihung der wichtigsten wissenschaftlich-technologischen Schritte angeben. Das Problem der Ladungstrennung ist insbesondere bei den sehr visionären Konzepten in Kategorie 4 noch nicht befriedigend gelöst.

Von erster Priorität sind daher aussagekräftige Experimente, welche die photovoltaische Relevanz der bislang beobachteten oder postulierten physikalischen Effekte entweder beweisen oder widerlegen. Bei den optischen Konzepten der Kategorie 3 ist ebenfalls noch unklar, ob das theoretisch mögliche Verbesserungspotential für photovoltaische Bauelemente tatsächlich genutzt werden kann. Auch hier sollten Forschung und Entwicklung auf konzeptionelle Experimente abzielen, die Aussagen über die photovoltaische Nützlichkeit ermöglichen. Kriterien sind hier entweder eine Steigerung des Lichteinfangs über das bisher mit konventionellen Mitteln erreichte Maß hinaus oder das Erreichen einer ähnlichen Qualität, aber mit potenziell wesentlich geringerem Aufwand.

Interessanterweise ist das quantitative wissenschaftliche Verständnis der Ladungstrennungskinetik auch bei organischen und Hybridsolarzellen der Kategorie 2 noch nicht hinreichend verstanden. Aufgrund einer verstärkten Forschungsarbeit in den letzten Jahren lassen sich weitere Ziele bei organischen Solarzellen oder Hybrid-Solarzellen jedoch konkretisieren: Erhöhung des Wirkungsgrads durch Verbesserung der Ladungsträgersammlung, Verminderung der Rekombination durch die Entwicklung von neuen Absorbermaterialien mit angepassten elektronischen Niveaus zur besseren Ausnutzung des langwelligen Anteils im Sonnenspektrum. Bei Farbstoffsolarzellen steht eine Verbesserung von Festkörperelektrolyten bzw. Lochleitern, der Einsatz geeigneter Moleküle und angepasste Geometrien im Vordergrund. Mit zunehmender Fertigungsreife dieser Solarzelle werden Gesichtspunkte wie Skalierbarkeit, Kosten und Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien sowie die Möglichkeit einer Roll-to-Roll-Produktion ins Blickfeld rücken. Großer Handlungsbedarf besteht nach wie vor bei der Untersuchung bzw. Verminderung der Stabilität der Zellen und Module.

Auf der Seite der wissenschaftlichen Methodik besteht ein sehr großer Bedarf, neue analytische Möglichkeiten zu erschließen. Dies impliziert insbesondere quantitative Methoden zur Materialcharakterisierung und zur Analytik der Bauelemente. Eine besondere Herausforderung besteht in der zeitaufgelösten dreidimensionalen Analyse ungeordneter Nanosysteme und der darin stattfindenden Ladungsträgerkinetik. Das geringe Wissen über die elektro-optischen

Elementarprozesse und ihre Wechselwirkung mit ihrer strukturellen Umgebung impliziert auch einen großen Nachholbedarf bei theoretischer Modellbildung und Simulationen.

Elektrische Energiespeicher

Zu den technischen Herausforderungen zählt die fokussierte Erarbeitung von weiterem Grundlagenwissen zu den auf Seite 13 genannten Zielen und Visionen und deren Übertragung in den kommerziellen Maßstab. Das beinhaltet sowohl das Materialverständnis als auch dessen Übertragung in Produkt und aufskalierbares Prozesswissen. Dabei ist insbesondere die Handhabung und Verarbeitung von nanostrukturierter Materialien in den einzelnen Prozessschritten für die Bauelemente (Anode, Kathode, Elektrolyt, Separatorfolie) einer Li-Ionen-Batterie von großer Bedeutung. Ebenso ist die technologische Bereitstellung von aussagekräftigen, schnellen Testverfahren auf Zellebene eine Herausforderung.

Die Berücksichtigung der Sicherheitsaspekte der Nanotechnologie bzw. von Nanopartikeln bezüglich ihrer Wirkungen auf Menschen und Umwelt muss in den F&E-Prozessen sehr frühzeitig erfolgen, um eine Gefährdung von vorne herein nach dem jeweiligen Stand der Technik ausschließen zu können. Da dies auch im Rahmen öffentlich geförderter Projekte wie z. B. NanoCare, Tracer und andere bereits gängige industrielle Praxis ist und gemäß Selbsterklärung zahlreicher Industriezweige (z. B. VCI) auch noch eher weiter verstärkt wird, ist eine Einschränkung in der Umsetzung eher nicht bzw. kaum zu erwarten. Die Betrachtung von Lebenszyklen und die Fragen der Wiederverwertung müssen allerdings zusätzlich in die Sicherheitsuntersuchungen einbezogen werden, um die Umsetzung der Technologie nachhaltig zu ermöglichen.

Im nicht technischen Bereich ist die z. T. sehr unübersichtliche Patentlage bzw. Patentlandschaft als eine große Herausforderung zu nennen, die auch eine Umsetzung von Nanotechnologien für elektrische Energiespeicher zumindest beeinträchtigen kann.

Die Realisierung der Systemintegration und das Senken von Markteintrittsbarrieren für Anwendungen entlang der Wertschöpfungskette ist weiterhin eine organisatorisch systematische Herausforderung, deren Überwindung entscheidend zum Markterfolg der Li-Ionen-Technologie beitragen wird.

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

- Kosten-Nutzen-Relation (insbesondere für Wärmespeicherung)
- Thermische und mechanische Ankopplung der nano-skaligen Materialien an Trägerstrukturen (insbesondere für Wärmetransformation)
- Gezielte Herstellung, Stabilität und Reproduzierbarkeit von Nanomaterialien durch energie- und ressourceneffiziente Verfahren
- Risikoabschätzung zum Umgang mit Nanopartikeln, Lebenszyklusanalysen

Wärmedämmung

Es wird ein vertieftes Materialverständnis für neue nanostrukturierte Materialentwicklungen im Hinblick auf deren Einsatz in Wärmedämmungen zu erarbeiten sein. Eine große Herausforderung stellt vor allem die Entwicklung einer wirtschaftlichen Prozesstechnik für Nanoprodukte dar. Gleichzeitig müssen etablierte Messverfahren zur Charakterisierung von porösen Strukturen auf ihre Anwendbarkeit bei nanostrukturierten Systemen überprüft und schnelle, zuverlässige Messverfahren entwickelt werden. Auch im Bereich der Modellierung von komplexen nanostrukturierten Materialsystemen bzgl. deren thermischen und mechanischen Eigenschaften besteht noch F&E-Bedarf.

Bei der Produktentwicklung sind von den Entwicklungspartnern begleitende Risikoabschätzungen und ggf. entsprechende Studien zu Risiken bezüglich der nanostrukturierten Materialsysteme durchzuführen. Ebenso sind bei den Entwicklungen Fragen der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen. Die Industrie ist hinsichtlich

dieser Fragestellungen sensibilisiert und notwendige Studien werden rechtzeitig vor Markteinführung bearbeitet.

Der Markt wird durch das Investitionsverhalten der Verbraucher bestimmt. Dabei stellt in Europa die hohe Lebensdauer von Gebrauchsgütern (z. B. Kühlschränke, Herde oder auch Gebäude) ein Hindernis dar, Innovationen schnell in den Markt einzuführen. Im Gegensatz dazu ist der Innovationswille in asiatischen Ländern viel ausgeprägter, d. h. zum Beispiel, dass energieeffiziente Produkte zeitnah nach der Markteinführung den Markt durchdringen. Zur Reduktion der wirtschaftlichen Entwicklungsrisiken bei neuen Wärmedämmungen besteht die Herausforderung in Europa folglich darin, zunächst solche Anwendungen zu finden, in denen die erzielte Wertschöpfung besonders hoch ist.

Brennstoffzellen

Auch für die Entwicklung und den Einsatz der Nanotechnologie in Brennstoffzellen wird ein zunehmendes und grundlegendes Verständnis für Machbarkeit und Funktion bei der nanostrukturierten Materialentwicklungen benötigt.

Die Übertragung von Nanoscience in anwendungsspezifische Nanotechnologie ist ein wichtiger Punkt, um generell wettbewerbsfähige Produkte zu schaffen und den Standort Deutschland zu stärken.

Im Bereich der Brennstoffzellen und der nass-chemischen Katalyse ist der Ausbau der Grundlagenforschung im Bereich elektro-chemischer Systeme notwendig. Hier gibt es erheblichen Nachholbedarf, der aus den vergangenen Jahrzehnten resultiert, in welchen dieses Gebiet eher vernachlässigt wurde.

Prioritäten und effiziente Umsetzung

Welche Technologien müssen verfolgt werden?
Welcher konkrete Handlungsbedarf resultiert daraus?

Wie können Forschung und Entwicklung am effektivsten vorangetrieben werden und wie kann eine Prioritätensetzung bei den Themen aussehen?

Photovoltaik

Gegenwärtig ist der Stand, wie auch schon in Kapitel *Lösungskonzepte* auf Seite 21 f. beschrieben, dass alle hier aufgezeigten Ansätze weiterverfolgt werden sollten. Die langfristig angelegten Ansätze (Photonik, Quantenstrukturen) sollten in einem überschaubaren Zeitraum den jeweiligen „proof of concept“ zeigen. Für organische Zellen und Hybridsolarzellen steht die Demonstration industrieller Anwendbarkeit im Vordergrund. In beiden Fällen könnte die Formulierung griffiger, ehrgeiziger Ziele in lang- und mittelfristig angelegten Forschungsprogrammen, wie in den USA praktiziert, helfen, auch anspruchsvolle Ziele schneller zu verwirklichen.

Wichtigste Maßgabe für künftige Forschungsprogramme ist Interdisziplinarität (Physik, Chemie, Verfahrenstechnik) und die Einbindung von industriellen Partnern. Da das Thema Photovoltaik eng mit Themen aus der optoelektronischen Bauelement-Technologie/Mikroelektronik/organischen Elektronik verwandt ist, sind Synergieeffekte hauptsächlich mit diesen Bereichen zu erwarten. Im Bereich der Nanotechnologie selbst sollten aus wirtschaftlichen Gründen sicher Bottom-up-Techniken bzw. selbstorganisierende Systeme bevorzugt in Betracht gezogen werden. Das Spektrum des nötigen Handlungsbedarfs erstreckt sich von der Grundlagenforschung bis zu Unterstützung beim Markteinstieg.

Elektrische Energiespeicher

Gezielte Maßnahmen zur Bearbeitung der technologischen Herausforderungen sollten gefördert werden – wie in Kapitel *Lösungskonzepte* auf Seite 21 und in Kapitel *Visionen* auf Seite 13 genannt. Die Durchführung mittelfristiger Projekte (5–10 Jahre) für die Erarbeitung von Grundlagenverständnis für bestehende und neue Systeme und Materialien mit hinsichtlich Komposition, Kristallstruktur und Nanomorphologie maßgeschneiderten Schichten und Strukturen sowie deren praxisbezogene Umsetzung sollten im Vordergrund stehen. Die Grenzflächensysteme und die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Phasen sollte berücksichtigt werden.

Neben den materialspezifischen Aspekten sollten die Systemintegration von Li-Ionen-Zellen zu Batterien sowie die entsprechend notwendigen aufskalierbaren Prozesstechnologien berücksichtigt werden.

Bei der Förderung sollte stets auf das Erreichen und Überschreiten einer kritischen Mindestmenge bzw. -volumen der Aktivitäten sowie auf die interdisziplinäre Zusammensetzung der Projektteams unter Berücksichtigung der Wertschöpfungskette geachtet werden.

Die oben erwähnte BMBF-Ausschreibung zu Li-Ionen-Batterien deckt bereits einen Teil des Handlungsbedarfes gut ab. Über diese Punkte

hinaus könnte die Stärkung und Intensivierung des interdisziplinären Austausches und der Zusammenarbeit mit allen beteiligten Stakeholdern (Hochschulen, Institute, Industrie und Zuwendungsgeber wie DFG, BMBF, BMU, BMWi, ...) sowohl in strategischer als auch in operativer Hinsicht sinnvoll sein. Dabei könnten Nachfolgeaktivitäten zu diesem Workshop, um die Möglichkeiten der Nanotechnologie für die elektrischen Energiespeichern auch außerhalb der Li-Ionen-Systeme weiter zu diskutieren und daraus weitere Handlungsanweisungen abzuleiten, das zukünftige Vorgehen weiter bestimmen.

Hohe Priorität bei F&E haben die bereits genannten Aspekte der intrinsischen Sicherheit der Li-Ionen-Zellen, wobei die verwendeten nanostrukturierten Materialien für Mensch und Umwelt unbedenklich sein müssen. Darüber hinaus ist die Entwicklung von Systemen mit hoher Energiedichte mit gleichzeitig erhöhter Leistungsdichte durch den Einsatz neuer Materialien mit Nanostrukturierung mit hoher Priorität zu versehen.

Es muss zudem durch Anwendungs- und Felderfahrung Vertrauen in die Li-Ionen-Technologie unter der Nutzung von Nanomaterialien geschaffen werden, wobei die gewonnenen Erkenntnisse mit hoher Priorität in die F&E-Bereiche der Wertschöpfungskette gezielt zurückgeführt werden müssen.

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

Die folgenden fett gedruckten Stichpunkte wurden im Workshop vor allem mit Blick auf Adsorptionsmaterialien für die Wärmetransformation formuliert, sollten aber zugleich allgemeine Gültigkeit haben (die Erläuterungen in Klammern beziehen sich auf die Adsorptionstechnologie).

- **Adaptierte Materialsynthesen mit drucklosen, kontinuierlichen Prozessen:** (anstelle der bisher in der Materialsynthese vorwiegend eingesetzten Batch-Prozesse im Autoklaven)

- **Hilfsstoffarme Herstellungsverfahren:** (Suche nach neuen Synthesewegen für bekannte – oder neue – Sorptionsmaterialien, die ohne teure und/oder toxische strukturdirigierende Templatmoleküle auskommen. Solche Templatmoleküle müssen häufig nach der Synthese in einem aufwendigen Verfahrensschritt entfernt werden).
- **Energieeffiziente Prozesse:**
 - Vermeidung hoher Temperaturen bei den Materialsynthesen und Herstellungsverfahren der Komponenten (insgesamt ist bei der Wärmespeicherung und -transformation die energetische Amortisation der Anlagen im Blick zu behalten).
 - Für die Wärmetransformation: Entwicklung und Optimierung von (Nano-)Kompositen aus Sorptionsmaterial und keramischen oder metallischen porösen Trägerstrukturen; Entwicklung von Syntheseverfahren hierfür (z. B. in-situ-Kristallisation) und von angepassten Coating-Verfahren
 - Für die Wärmetransformation: Realisierung von Wärmeübertragerstrukturen nach biomimetischen Prinzipien und deren Integration in Reaktorkonzepte

Entscheidend für den Erfolg der hier diskutierten Technologien zur Wärmetransformation und -speicherung ist aus Sicht der Workshop-Teilnehmer die Vernetzung von Systemherstellern/Anwendern (z. B. Heizungstechnik) mit Forschungsgruppen im Bereich der Materialherstellung und Modellierung.

Im Einzelnen werden benötigt:

- Angewandte Forschung
 - F&E im Bereich Materialherstellung
 - F&E im Bereich Modellierung
 - F&E im Bereich Charakterisierung und Analytik
 - Netzwerke in geeigneter Form
- Grundlagenorientierte Projekte für längerfristige Materialthemen
- Verbünde mit Industriebeteiligung entlang der Wertschöpfungskette bis zur Produktentwicklung

Eine Prioritätensetzung bei den F&E-Themen könnte folgendermaßen aussehen:

- Bildung von strategischen F&E-Allianzen (Hochschulen, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, Anwender, Hersteller)
- anwendungsbezogene, systemspezifische Herstellungsverfahren nano-skaliger Funktionsmaterialien
- Neuartige Wärmeüberträgerkonzepte (Mikrofluidik, bionische Systeme)
- Querschnittsaufgabe: Nachhaltige Anstrengungen in Aus- und Weiterbildung (Grundlagen und Interdisziplinarität)

Wärmedämmung

Folgende Systemkonzepte bieten ein großes Potenzial für die Entwicklung hocheffizienter Wärmedämmsysteme:

- Sol Gel-basierte Systeme
- Nanoschäume
- Gast-Wirt-Systeme (Nano-Mikro)
- Hochleistungsstrübungsmittel und
- Multifunktionale Systeme

Forschung und Entwicklung ist in diesen Bereichen zu forcieren bzw. neu anzustoßen. F&E-Allianzen entlang der Wertschöpfungskette sind zu initiieren.

Bei den Material- und Systementwicklungen wird ein vertieftes Verständnis für neue nanostrukturierte Materialien hinsichtlich deren Einsatzes in Wärmedämmungen zu erarbeiten sein. Eine große Herausforderung stellt die Entwicklung einer wirtschaftlichen Prozesstechnik für Nanoprodukte dar.

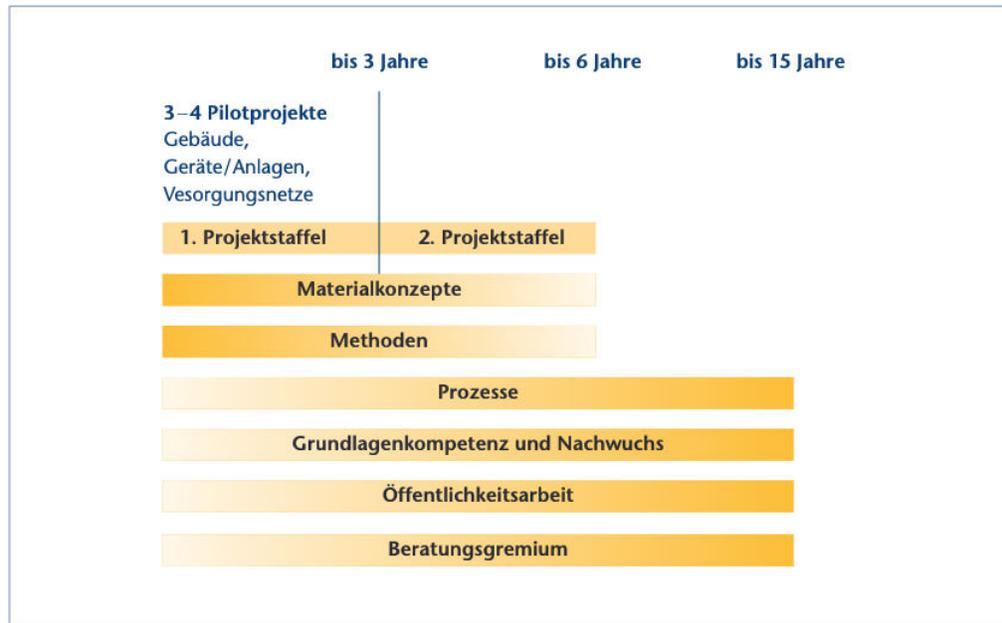
Gleichzeitig müssen etablierte Messverfahren zur Charakterisierung von porösen Strukturen auf ihre Anwendbarkeit bei nanostrukturierten Systemen überprüft werden und schnelle, zuverlässige Messverfahren entwickelt werden; dies ist besonders entscheidend in Hinblick darauf, dass Artefakte oder Fehlinterpretationen von Messdaten eine effiziente Entwicklung der neuen Materialien stark behindern können. Auch im Bereich der Modellierung von

komplexen nanostrukturierten Materialsystemen bzgl. ihren thermischen Eigenschaften in Kombination mit mechanischen Kenngrößen besteht noch F&E-Bedarf. Hier gilt es, Eigenschaften des Mikrosystems mit makroskopischen Eigenschaften zu verknüpfen (Multi-Skalen-Modellierung).

Wesentlich ist die gezielte Stärkung der finanziellen und personellen Ressourcen für F&E-Aktivitäten im Bereich „Hocheffiziente Wärmedämmungen“. Dabei gilt der Nachwuchsförderung zur langfristigen Sicherung der Kompetenzen ein besonderes Augenmerk. Das Potenzial von hocheffizienten Wärmedämmungen muss in der Wahrnehmung der Öffentlichkeit und der Entscheidungsträgern verstärkt werden. Entscheidend ist dabei auch die Darstellung der notwendigen komplexen und anspruchsvollen F&E-Arbeiten, die hier zu leisten sind. Es gilt, das Produkt „Wärmedämmung“ vom irreführenden Image eines ausgereizten, „technisch einfachen“ Produkts zu befreien. Akteure im Bereich der Entwicklung von Hochleistungsdämmstoffen sollten sich in einem Informationsnetz über allgemeine entwicklungsübergreifende Themen regelmäßig austauschen.

Abbildung 22 zeigt die erarbeitete Roadmap für nachhaltige F&E-Entwicklungen im Bereich von hocheffizienten Wärmedämmstoffen. Zunächst sollte eine geringe Zahl von Pilotprojekten für Wärmedämmstoff-Systeme für unterschiedliche Anwendungsbereiche initiiert werden. Im Zuge dieser Projekte sollte eine möglichst breite F&E-Arbeit im Bereich verschiedener Materialkonzepte und Messmethoden angestoßen werden. Mittel- und langfristig sollten damit auch neue Prozessentwicklungen ausgelöst werden. Parallel dazu werden Aufgaben wie Aufbau der Grundlagenkompetenz und Nachwuchsförderung und Öffentlichkeitsarbeit bearbeitet. Alle Aktivitäten sollten durch eine Art Expertengremium beratend unterstützt werden.

Abbildung 22
Roadmap für nachhaltige F&E-Entwicklungen im Bereich von hoch-effizienten Wärmedämmstoffen



Brennstoffzellen

- Stärkere Fokussierung auf anwendungsspezifische Lösungen
- Zeitnahe Übertragung von Nanoscience in Nanotechnologie, um wettbewerbsfähige Produkte zu schaffen und den Standort Deutschland zu stärken.

Anwendungsorientierte Forschung

- Konsortienbildung unter Federführung der Industrie
- Verstärkte Verbundforschung im Rahmen öffentlich geförderter Projektförderung
- Identifikation von „KeyPlayern“ (über die WS-Teilnehmer hinaus)
- Intensiverer Dialog zwischen Wissenschaft, Industrie und Politik

Grundlagenforschung

- Nationaler Koordinationsbedarf in themenorientierter Grundlagenforschung
- Dialog Grundlagenforschung ↔ anwendungsorientierte Forschung ↔ industrielle F&E

Abbildung 23 zeigt einige im Workshop erarbeitete Forschungsschwerpunkte, die im Rahmen von großen Förderprogrammen bearbeitet werden könnten. Die Jahresangabe, sowie die ansteigenden und absteigenden Flanken hierzu sollen einen Hinweis geben, wann maximale Aktivitäten (einschließlich Finanzierung) zu erwarten sind.

Eine erste Umsetzung im Rahmen konkreter Förderprojekte zeigt *Abbildung 24*. Da es hier um Förderprojekte mit konkreten Forschungsinhalten geht, ist der Zeithorizont naturgemäß wesentlich kürzer.

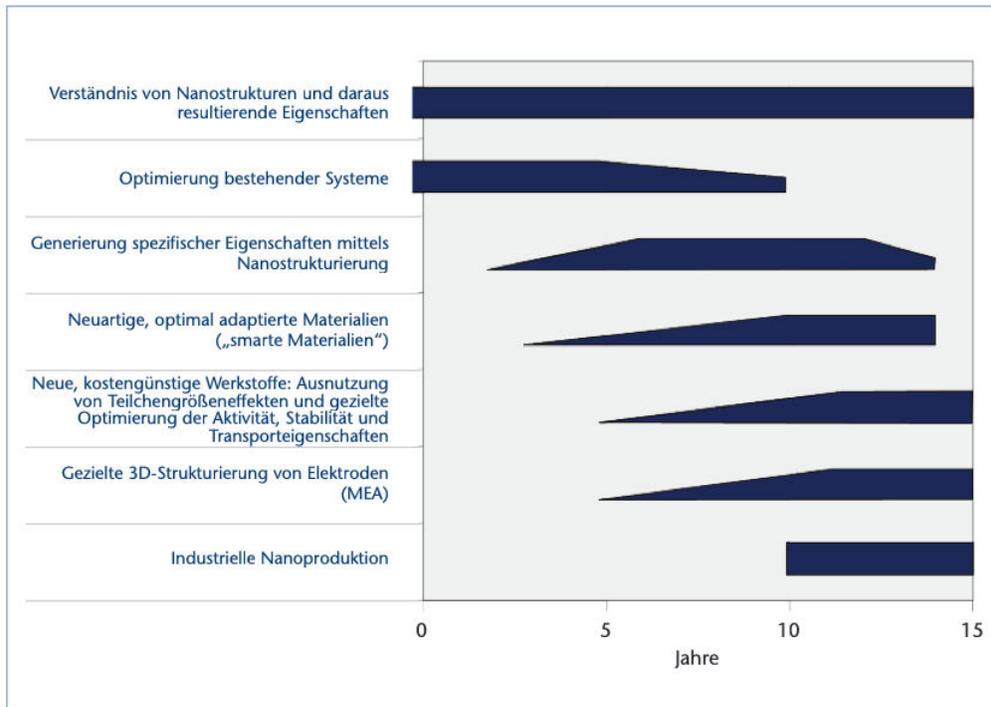


Abbildung 23
Mögliche Schwerpunkte von Förderprogrammen im Bereich Brennstoffzellen

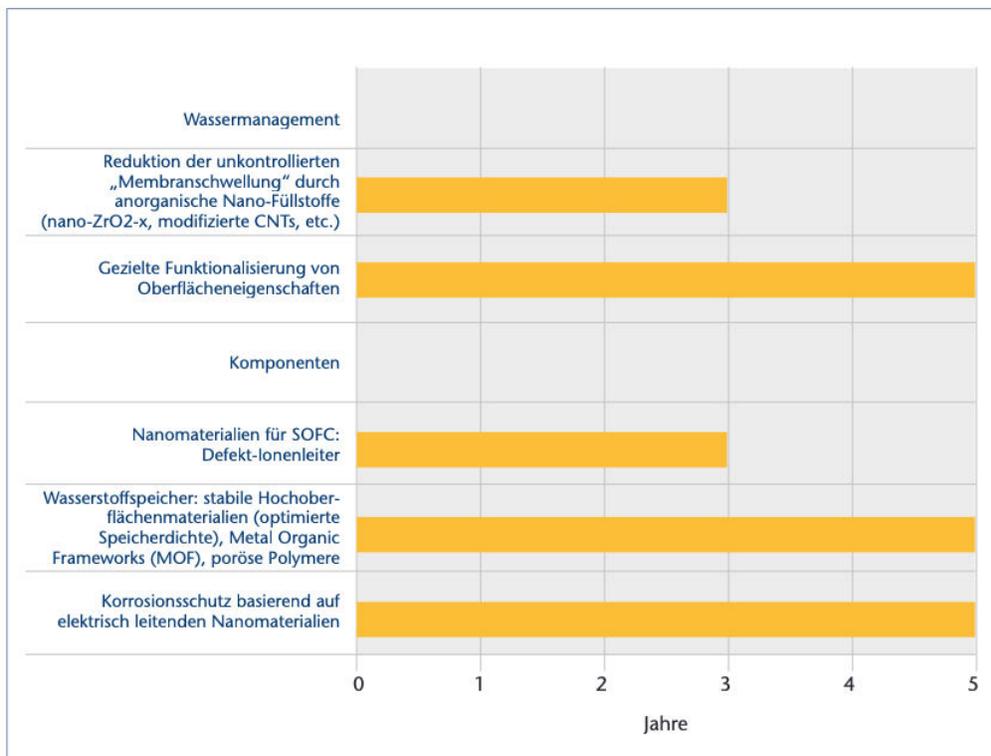


Abbildung 24
Mögliche Schwerpunkte von Förderprojekten in den nächsten Jahren

Themenübergreifende Synergien

Welche themenübergreifenden Synergien können nützlich sein?

Photovoltaik

Themenübergreifende Synergien ergeben sich ganz sicher im Bereich der Brennstoffzellen, elektrischen Energiespeicher bzw. der Katalyse. Ein weit am Horizont stehendes Zukunftsziel, die Konversion von Sonnenlicht und die Erzeugung von Brennstoffen, wie es bei der Photosynthese passiert, impliziert eine direkte Wechselwirkung dieser Disziplinen.

Aber auch die Wärmetransformation beim Einsatz von Konzentratorsolarzellen bzw. Konzentratorsystemen könnte synergetisch wechselwirken. Generell gilt, dass alle Entwicklungen im Bereich der Bottom-up- bzw. selbstorganisierten Nanotechnologie synergetisch zur Photovoltaik beitragen kann, da, wie oben beschrieben, das Anwendungsspektrum der Nanotechnologie in der Photovoltaik äußerst vielfältig ist.

Elektrische Energiespeicher

Die Kombination aus Nutzung von regenerativen Energiequellen, wie z. B. Photovoltaik mit der entsprechend notwendigen Speicherung von elektrischer Energie bzw. die Abstimmung beider Technologien stellt ein möglichst Synergiepotenzial dar. Ebenso haben bestimmte Aspekte bei den verschiedenen Varianten der Energiespeicherung (elektrisch, thermische, chemisch, mechanisch) einen gewissen übergreifenden Charakter.

Zudem ergeben bestimmte Fragestellungen aus Modellierung, Analytik, Charakterisierung, Struktur-Eigenschaftskorrelationen in der Materialentwicklung und Prozesstechnik einen gewissen Plattformcharakter.

Aspekte der Energieumwandlung, der Energiespeicherung, des Energiesparens und des Energietransports haben gewisse Überlappbereiche, wenn sie jeweils als ein Teil einer Gesamtsicht in Richtung globales Energiemanagement betrachtet werden.

Wärmespeicherung und Wärmetransformation

- Wärmedämmung
 - Gezieltes Dämmmaterial-Design für Wärmespeicherungsanwendungen (z. B. Vakuumdämmung bei erhöhter Temperatur, druckfeste oder im Vakuumbereich von Anlagen einsetzbare Dämmmaterialien)
 - Effiziente Gesamtsysteme mit aktiven (z. B. schaltbaren oder transparenten) Dämmmaterialien, die niedrige thermische Verluste haben (z. B. für Integration in Gebäude-Fassaden).
- Brennstoffzellen
 - Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen
 - Wärmespeicherung bei Angebotstemperatur (abhängig vom Brennstoffzellen-System) für spätere Wärmetransformation auf Nutzungstemperatur
 - Kryo-Adsorptionsspeicher (z. B. Wasserstoff)
- Photovoltaik
 - Abwärmenutzung z. B. bei konzentrierender PV (evtl. auch nichtkonzentrierender PV) zum Antrieb von Wärmetransformationsprozessen (z. B. Kältegewinnung aus Abwärme)
 - Nutzung von PV/thermischen Hybridmodulen als Niedertemperatur-Wärmequelle für Sorptionswärmepumpen

Synergien mit Themen außerhalb der Workshop-Themen des Symposiums werden vor allem zur Solarthermie gesehen: Verbesserungen der Kollektortechnologie (selektive Absorberbeschichtungen, Antireflex-Glas, Wärmedämmung) führen zu deutlich höheren Wirkungsgraden bei hohen Kollektortemperaturen, das Potenzial der Ertragssteigerung bei Nutzttemperaturen um 60°C ist aber begrenzt. Somit wird die Exergieausnutzung von Wärme, die bei höherer Temperatur als der Nutzungstemperatur zur Verfügung steht, auch für die thermische Solarenergieernutzung ein immer wichtigeres Thema. Thermisch angetriebene Wärmepumpen können hier ein Potenzial zur deutlichen Steigerung der Nutzwärme-Erträge aus Solarkollektoren erschließen.

In Bezug auf eine nachhaltige Energieversorgung zeigt sich hier eine starke Synergie mit energieeffizienten Gebäuden, insbesondere dem „low exergy“ Ansatz des Heizens und Kühlens mit geringen Temperaturdifferenzen. So erreicht z. B. eine Wärmepumpe mit Carnot-Gütegrad 0,4 bei 150°C Antriebstemperatur einen COP-Wert von 2,0 mit einer Wärmeaufnahme bei 5°C (aus einer Erdwärmesonde) und Wärmeabgabe bei 35°C an eine Fußbodenheizung. Dies entspräche bereits einer Primärenergieeinsparung von 50 % gegenüber einer direkten Gasheizung.

Die Entwicklungsziele von Heizungstechnik-Herstellern, die an thermisch angetriebenen Wärmepumpen arbeiten, sind typischerweise niedriger formuliert. So strebt z. B. Vaillant mit seinem Zeolith-Heizgerät eine Jahresarbeitszahl von 1,35 und eine Primärenergieeinsparung von 20 % gegenüber Gas-Brennwertgeräten an. Dieses niedrigere Ziel ergibt sich vor allem aus dem hohen geforderten Temperaturhub und aus der Beschränkung auf Wasser als Wärmeträgerfluid (bei bis zu 150°C und 6 bar Überdruck). Im Sinne einer Ausschöpfung des thermodynamischen Potenzials sollten aber auch Entwicklungen für höhere Antriebstemperaturen und mit alternativen Wärmeträgerfluiden vorangetrieben werden.

Wärmedämmung

Im Rahmen des Workshops wurden zu folgenden Themen Synergieeffekte identifiziert:

- Wärmespeicherung und Transformation (Kombination von Wärmespeichermaterialien und Wärmedämmung für das thermische Management)
- Brennstoffzellen (Wärmedämmung für das thermische Management) und
- Querschnittsthemen (Analytik, Materialien, Prozesstechnik, ...)

Brennstoffzellen

- Elektrische Energiespeicher, Batterien (Beschichtungstechnik), Katalyse
- Wasserstoffspeicherung und Wärmedämmung
- Heterogene Katalyse
- Beschichtungstechnologien
- Modellbildung, mathematische Modellierung
- Dialog Grundlagenforschung ↔ anwendungsorientierte Forschung ↔ industrielle F&E

Verzeichnisse

Symposiumsteilnehmer

Prof. Dr. Ulrich Buller	Fraunhofer-Gesellschaft
Dr. Thomas Hannappel	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Reinhard Kaiser	BMU – Bundesumweltministerium
Dr. Wolfram Kreisel	FDP – Bundestagsfraktion, Referent für Forschung
Prof. Dr. Martha Lux-Steiner	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Gudrun Maass	BMBF
Matthias Machnig	Staatssekretär BMU
Dr. Gerd Stadermann	ForschungsVerbund Sonnenenergie (FVS)
Mareike Welke	BMU – Bundesumweltministerium, Referat Forschung

Workshop 1: Photovoltaik

Moderatoren

Prof. Dr. Uwe Rau	Forschungszentrum Jülich
Dr. Wolfgang Volz	Bosch-Siemens-Hausgeräte GmbH

Teilnehmer

Dr. Tanja Bauschlicher	Projektträger Jülich
Prof. Dr. Gion Calzaferri	Universität Bern
Dr. Reinhard Carius	Forschungszentrum Jülich
Nikolai Dobrott	Invest in Germany
Dr. Karl Dössel	DuPont Performance Coating
Prof. Vladimir Dyakonov	ZAE Bayern
Dr. Konstantinos Fostiropoulos	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Dr. Andreas Gombert	Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Heinrich Graener	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Dr. Wolfgang Harneit	FU Berlin
Dr. Werner Hoheisel	Bayer Technology Services GmbH
Dr. Jan-Ole Joswig	TU Dresden
Dr. Dietmar Knipp	Jacobs University Bremen
Prof. Alexander Mielke	WIAS Berlin
Joachim Nick-Leptin	BMU
Dr. Andreas Patyk	FZK – Forschungszentrum Karlsruhe
Dirk Reichel	Solarion GmbH
Dr. Moritz Riede	TU Dresden
Dr. Klaus Rode	Clariant Produkte (D) GmbH
Franziska Scheffler	ZAE Bayern
Dr. Klaus Schwarzburg	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Dr. Stefan Schweizer	Universität Halle
Mukundan Thelakkat	Universität Bayreuth
Prof. Daniel Vanmaekelbergh	Debye Institute & Research School, Utrecht University

Workshop 2: Elektrische Speicher

Moderatoren

Dr. Peter Krüger	Bayer Material Science AG
Martin Winter	Universität Graz

Teilnehmer

Prof. Vladimir Dyakonov	ZAE Bayern
Dr. Christian-Herbert Fischer	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Dr. Andreas Gutsch	Evonik Degussa GmbH
Dr. Werner Hoheisel	Bayer Technology Services GmbH
Prof. Dr. Helmut Horn	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Thomas Hülshorst	FEV Motorentechnik GmbH
Arno Kwade	Universität Braunschweig
Sebastian Lehmann	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Andreas Manthey	Bundesverband Solare Mobilität
Dr. Asmus Meyer-Plath	BAM – Bundesanstalt für Materialforschung
Kai-Christian Möller	Fraunhofer ISC – Institut für Silicatforschung
Dr. Gerhard Nuspl	Südchemie
Christian Pade	IÖW – Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Dr. Bernd Schumann	Robert Bosch GmbH
Jurek Vengels	BUND
Prof. Hans-Dieter Wiemhöfer	Universität Münster
Dr. Margret Wohlfahrt	ZSW

Workshop 3: Thermische Speicher

Moderatoren

Dr. Ralph Herrmann	SorTech AG
Dr. Ferdinand Schmidt	Fraunhofer ISE

Teilnehmer

Prof. Dr. Thomas Bein	LMU
Dr. Wayne Daniell	Nanoscape AG
Prof. Vladimir Dyakonov	ZAE Bayern
Prof. Alfons Geiger	Universität Dortmund
Prof. Dr. Hermann Gies	Universität Bochum
Dr. Hans-Martin Henning	Fraunhofer ISE
Dr. Michael Hirscher	Max-Planck-Institut für Metallforschung
Dr. Jochen Jänchen	FHTW Berlin, c/o Zeo Solar e. V.
Dr. Klaus Lips	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Franziska Scheffler	ZAE Bayern
Michael Scheffler	Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Prof. Dr. Wilhelm Schwieger	Universität Erlangen
Prof. Dr. Gerhard Sextl	Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Dieter Sporn	Fraunhofer ISC – Institut für Silicatforschung
Prof. Dr. Helmut Tributsch	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Prof. Dr. Klaus K. Unger	Universität Mainz
Prof. Dr. Felix Ziegler	TU Berlin

Workshop 4: Wärmedämmung

Moderatoren

Dr. Hans-Peter Ebert	ZAE Bayern
Dr. Georg Markowz	Evinok Degussa GmbH

Teilnehmer

Dr. Roland Caps	va-Q-tec AG
Joachim Damrath	Bosch-Siemens-Hausgeräte GmbH
Dr. Holger Hoffschulz	VDI Technologiezentrum GmbH
Dr. Thomas Hübert	BAM – Bundesanstalt für Materialforschung
Prof. Nicola Hüsing	Universität Ulm
Dr. Wolfgang Luther	VDI Technologiezentrum
Dr. Marianne Nofz	BAM – Bundesanstalt für Materialforschung
Dr. Gudrun Reichenauer	ZAE Bayern
Dr. Jan Sandler	BASF
Wolfgang Schnell	Bosch-Siemens-Hausgeräte GmbH
Dr. Katja Stephan	Projektträger Jülich
Dr. Brita Unger	BAM – Bundesanstalt für Materialforschung
Dr. Thomas Unold	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Stefan Wagner	Fraunhofer IZM – Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration
Dr. Hendrick Wust	Projektträger Jülich

Workshop 5: Brennstoffzelle

Moderatoren

Prof. Dr. Werner Tillmetz	ZSW
Dr. Christoph Hartnig	ZSW

Teilnehmer

Prof. Detlef Bahnemann	Universität Hannover
Prof. Dr. Rolf Jürgen Behm	Universität Ulm
Dr. Peter Bogdanoff	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Alexander Bracht	Hessen-Nanotech, Hessen Agentur
Nikolai Dobrott	Invest in Germany
Dr. Sebastian Fiechter	HZB (vormals Hahn-Meitner-Institut)
Dr. Andreas Friedrich	DLR
Dr. Jürgen Fuhrmann	WIAS Berlin
Prof. Dr. Angelika Heinzl	Universität Duisburg-Essen
Prof. Dr. Dieter Jäger	Universität Duisburg-Essen
Dr. Jan-Ole Joswig	TU Dresden
Dr. Falko Mahlendorf	Universität Duisburg-Essen
Dr. Michael Mangold	MPI – Dynamik komplexer technischer Systeme
Dr. Georg Menzen	BMW I
Dr. Asmus Meyer-Plath	BAM – Bundesanstalt für Materialforschung
Dr. Norbert Nicoloso	TU Darmstadt, FB Regenerative Energien
Dr. Goesta Pfundtner	Daimler AG
Dr.-Ing. Christina Roth	Technische Universität Darmstadt
Kornelia Schlenstedt	Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.
Dr. Rittmar von Helmholt	Adam Opel AG
Prof. Dr. Felix Ziegler	TU Berlin

Standorte der FVS-Mitgliedsinstitute



ForschungsVerbund Sonnenenergie • Geschäftsstelle c/o HZB
 Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin • Telefon: 030/8062-1338 • Telefax: 030/8062-1333
 E-Mail: fvs@helmholtz-berlin.de • www.FV-Sonnenenergie.de

Anschriften der FVS-Mitgliedsinstitute



DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft
Zentrum Köln-Porz • 51170 Köln
Prof. Dr. Robert Pitz-Paal:
Telefon 02203/601-2744
E-Mail: robert.pitz-paal@dlr.de
www.dlr.de

Standort Stuttgart
Pfaffenwaldring 38-40 • 70569 Stuttgart

DLR-Projektteam auf der
PSA Plataforma Solar de Almería
Apartado 39 • E-04200 Tabernas (Almería)



Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich
Dr. Angela Lindner:
Telefon 02461/61-4661
E-Mail: a.lindner@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de



Fraunhofer IBP Fraunhofer Institut für Bauphysik
Nobelstr. 12 • 70569 Stuttgart
Rita Schwab:
Telefon 0711/9703301
E-Mail: rita.schwab@ipb.fraunhofer.de
www.ibp.fraunhofer.de

Standort Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 • 83626 Valley



Fraunhofer ISE
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg
Karin Schneider:
Telefon 0761/4588-5147
E-Mail: karin.schneider@ise.fraunhofer.de
www.ise.fraunhofer.de

Weitere Standorte:

PV-TEC
Emmy-Noether Str. 2 • 79110 Freiburg

Labor- und Servicecenter
Auf der Reihe 2 • 45884 Gelsenkirchen

Technologiezentrum Halbleitermaterialien
Am St.-Niclas-Schacht 13 • 09599 Freiberg



GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum
Telegrafenberg • 14473 Potsdam
Franz Ossing:
Telefon 0331/288-1040
E-Mail: ossing@gfz-potsdam.de
www.gfz-potsdam.de



HZB Helmholtz-Zentrum Berlin
für Materialien und Energie
Lise-Meitner-Campus
Glienicker Straße 100 • 14109 Berlin-Wannsee
Dr. Ina Helms:
Telefon 030/8062-2034
E-Mail: info@helmholtz-berlin.de
www.helmholtz-berlin.de

Campus Wilhelm Conrad Röntgen
Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin-Adlershof



ISFH Institut für Solarenergieforschung gGmbH
Hameln/Emmerthal
Am Ohrberg 1 • 31860 Emmerthal
Dr. Roland Goslich:
Telefon 05151/999-302
E-Mail: info@isfh.de
www.isfh.de



ISET Institut für Solare Energieversorgungstechnik
Verein an der Universität Kassel e.V.
Königstor 59 • 34119 Kassel
Uwe Krenzel:
Telefon 0561/7294-345
E-Mail: ukrenzel@iset.uni-kassel.de
www.iset.uni-kassel.de

Standort Hanau
Rodenbacher Chaussee 6 • 63457 Hanau



ZAE Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung e.V.
Am Hubland • 97074 Würzburg
Matthias Groll:
Telefon 0931/70564-51
E-Mail: groll@zae.uni-wuerzburg.de
www.zae-bayern.de

Standort Garching
Walther-Meißner-Str. 6 • 85748 Garching

Standort Erlangen
Am Weichselgarten 7 • 91058 Erlangen



ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg
Gemeinnützige Stiftung
Industriestraße 6 • 70565 Stuttgart
Karl-Heinz Frietsch:
Telefon 0711/7870-206
E-Mail: info@zsw-bw.de
www.zsw-bw.de

Standort Ulm
Helmholtzstraße 8 • 89081 Ulm

Impressum • Symposium

Nanotechnologie für eine nachhaltige Energieversorgung

29.–30.11.2007 in Berlin

Herausgeber

Prof. Dr. Martha C. Lux-Steiner
Dr. Thomas Hannappel
HZB Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

ForschungsVerbund Sonnenenergie (FVS)
Kekuléstr. 5 • 12489 Berlin
Tel.: 030/8062-1338
Fax: 030/8062-1333
E-Mail: fvs@helmholtz-berlin.de
Internet: www.FVS-Sonnenenergie.de

Die Herausgeber danken den Moderatoren des Workshops. Aufgrund ihrer Textbausteine wurde der Tagungsband zusammengestellt.

Veranstalter

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB), vormals Hahn-Meitner-Institut (HMI)

Redaktion

Dr. Klaus Heidler Solar Consulting, Freiburg
Dr. Gerd Stadermann, FVS

Förderung

Der ForschungsVerbund Sonnenenergie wird gefördert vom:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

Gesamtproduktion

Hoch3 GmbH – Design- und Werbeagentur

Berlin, September 2008

ISSN • 0949-1082

Diese Broschüre wurde auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

