

*Das NanoEnergieTechnikZentrum ermöglicht in seinen „Linked Facilities“ die integrierte Synthese und Weiterverarbeitung von Nanopartikeln und -materialien für energietechnische Anwendungen in einer Prozesskette – in direkter Zusammenarbeit von Chemikern, Physikern und Ingenieuren aus Wissenschaft und Industrie.*

# VerNETZungen

Integrierte Nanopartikel-Synthese und  
-Verarbeitung im NanoEnergieTechnikZentrum

Von Hartmut Wiggers, Stefan Haep, Jochen S. Gutmann,  
Stephan Barcikowski, Philipp Wagener,  
Nils Hartmann und Mathias Ulbricht

**N**anomaterialien haben ein riesiges Anwendungspotenzial, das bislang lediglich in ersten Ansätzen erschlossen ist. Die Basis dafür sind vor allem spezielle, von der Größe abhängige physikalische Eigenschaften von Nanopartikeln. Darüber hinaus führen nanoskopische Materialien – auch wegen ihres sehr großen Verhältnisses zwischen Oberfläche und Volumen – zu besonderen Effekten. Deshalb haben Nanopartikel neben größenabhängigen elektrischen, optischen und magnetischen auch besonders interessante katalytische Eigenschaften. Im Idealfall lassen sich diese Eigenschaften und Effekte durch eine gezielte Variation der chemischen Zusammensetzung, der Festkörper-

struktur sowie der Partikelgröße und -form nach Wunsch einstellen.

Zur Herstellung von Nanopartikeln stehen zahlreiche Möglichkeiten zur Verfügung. Einerseits gibt es so genannte „Top-down“-Verfahren, bei denen Nanopartikel aus größeren Partikeln zum Beispiel durch Zermahlen erhalten werden, andererseits können mit „Bottom-up“-Verfahren Nanopartikel aus einzelnen Atomen und Molekülen aufgebaut werden. Die „Bottom-up“-Verfahren lassen sich nach der Phase unterscheiden, in der die Reaktion zu Nanopartikeln stattfindet. In flüssiger Phase kann eine große Vielfalt von Bausteinen und chemischen Reaktionen in Kombination mit einer Kontrolle von Partikelbildung und -wachstum

durch stabilisierende Kolloideffekte genutzt werden, wobei die Stabilisierung durch Anlagerung oder chemische Bindung von Molekülen an die Partikeloberfläche erfolgt. Ein besonders wichtiges Beispiel sind so genannte Sol-Gel-Verfahren; exemplarisch werden diese später im Artikel für die Beschichtung von textilen Materialien erläutert. Synthesen in der Gasphase hingegen eignen sich hervorragend zur Herstellung von Partikeln im Größenbereich zwischen 10 bis 200 Nanometern mit einem hohen Reinheitsgrad, da stabilisierende Moleküle nicht benötigt werden. Die Gasphasensynthese ist ein seit Jahrzehnten etabliertes Verfahren zur Erzeugung von Nanopartikeln, die schon längst



Mathias Ulbricht. Foto: Timo Bobert

in vielfältigste Anwendungen des täglichen Gebrauchs Einzug gehalten haben. Die mit Abstand größten Mengen an Nanopartikeln aus Gasphasenreaktoren werden in Form von Ruß und pyrogener Kieselsäure (nanoskaliges Siliziumdioxid,  $\text{SiO}_2$ ) hergestellt, wesentlich sind auch Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) und Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Die Mengen an industriell hergestellten Nanomaterialien liegen im Bereich von einigen Millionen Tonnen pro Jahr. Industrieunternehmen wie Cabot, Cristal, DuPont, Evonik und Ishihara erwirtschaften mit Materialien aus diesen Verfahren in Summe über 15 Milliarden US-Dollar im Jahr.<sup>1</sup> Pyrogener Kieselsäure findet beispielsweise Verwendung als Zusatzstoff für Kunststoffe, um deren mechanische Eigenschaften wie Abriebfestigkeit und Rutschfestigkeit zu verbessern. Das Material wird auch als Zuschlagstoff zu Flüssigkeiten und Lacken zur Verbesserung der Fließeigenschaften eingesetzt. Ohne Ruß-Nanopartikel wären weder heutige Autoreifen noch Toner für die schwarze Druckfarbe herstellbar. Neben diesen Massenprodukten gibt es jedoch zunehmend Interesse an Nanopartikeln, die für besondere Anwendungen hochspezifische Eigenschaften aufweisen müssen. So entwickelt sich seit einiger Zeit ein Bedarf an druckbaren Nanopartikeln für elektronische Anwendungen – sei es als gedruckte Leiterbahn oder aber als transparente, leitfähige Schicht für Displays und Solarzellen. Ein nächster Schritt wird die Herstellung gedruckter Halbleiter auf Basis von Nanopartikel-Tinten sein. Darüber hinaus gibt es insbesondere in der Energietechnik eine Reihe von weiteren attraktiven Anwendungen, zum Beispiel in der Photo- und Elektrokatalyse, in der Batterie- und Brennstoffzellentechnik, der Photovoltaik oder der Thermoelektrik. Die dafür erforderlichen Herstellverfahren für spezifische Nanomaterialien haben jedoch häufig nur wenig mit den etablierten Gasphasensynthesen für Ruß und  $\text{SiO}_2$  gemeinsam.

Für neue Anwendungen ist man daran interessiert, dass neben der Zusammensetzung und der Struktur auch die Partikelgröße genau eingestellt werden kann. Darüber hinaus soll aber auch eine Zusammenlagerung (Agglomeration) bereits gebildeter Partikel verhindert werden. Insbesondere die Ausbildung von festen Bindungen zwischen Nanopartikeln („harte“ Agglomeration) ist in der Regel unerwünscht, weil dadurch im Grenzfall die größen-spezifischen Eigenschaften verloren gehen und weil sich solche aggregierten Nanopulver bei einer weiteren Verarbeitung zu Dispersionen in flüssigen Medien nicht ohne Weiteres wieder aufbrechen lassen. Für die Applikation von speziellen Nanopartikeln, beispielsweise in Druckverfahren, ist die Herstellung von definierten, flüssigen Dispersionen oder Pasten jedoch in vielen Fällen essenziell. Darüber hinaus bilden Dispersionen von Nanopartikeln auch wichtige Vorstufen für die weitere Verarbeitung zu Nanokompositen, zum Beispiel in Kombination mit synthetischen Polymeren, Kohlenstoff oder anderen anorganischen Materialien. Deshalb besteht ein besonders großes Interesse an der direkten Kopplung von Gasphasensynthesen mit einer Abscheidung von nicht agglomerierten Nanopartikeln in Flüssigkeiten.

Im Folgenden werden zunächst die Möglichkeiten zur Herstellung von wohldefinierten Nanopartikeln mit spezifischen Eigenschaften in Gasphasenreaktionen beschrieben, die am Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) der UDE entwickelt wurden und am Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA) in Duisburg-Rheinhausen, einem An-Institut der UDE, in den Technikumsmaßstab übertragen wurden. Danach wird exemplarisch gezeigt, wie die weitere Verarbeitung solcher Nanopartikel zu interessanten Funktionsmaterialien führen kann. Der erste Schritt ist die direkte Abscheidung von Nanopartikeln aus Gasphasenreaktoren in geeignete

flüssige Medien; an neuen Methoden und Apparatekonzepten wird am IUTA in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Technische Chemie II (TCII) an der UDE gearbeitet. Anschließend werden Wege zu funktionalisierten Filtermaterialien auf Basis synthetischer Polymere skizziert, die am Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West (DTNW) in Krefeld, ebenfalls einem An-Institut der UDE, realisiert werden. Abschließend wird an zwei Beispielen illustriert, wie Laser für die Funktionalisierung beziehungsweise Verarbeitung von Nanomaterialien genutzt werden können; diese Projekte laufen am Lehrstuhl für Technische Chemie I (TCI) beziehungsweise in der Physikalischen Chemie (PC) der UDE. Aktuelle Arbeiten konzentrieren sich darauf, Synthese und Verarbeitung genau aufeinander abzustimmen und, wenn notwendig, zu integrieren. Hierzu sind vor allem im Projekt Nano-EnergieTechnikZentrum (NETZ), gefördert vom Land Nordrhein-Westfalen und der Europäischen Union, bereits wichtige und wesentliche Fortschritte gemacht worden. Auf Basis von Ergebnissen im Labor und Technikumsmaßstab wird ab 2013 im gleichnamigen Forschungsgebäude am Standort Duisburg in den „Linked Facilities“ eine integrierte Synthese und Verarbeitung von Nanopartikeln in einer Prozesskette realisiert werden.

### **Nanopartikelsynthesen in Gasphasenreaktoren**

#### *Einfluss von Synthese- und Prozessbedingungen*

Grundsätzlich besteht bei nahezu allen Syntheseverfahren für Nanopartikel – sei es aus der Gasphase oder aus der Flüssigphase – eine starke Abhängigkeit der Materialeigenschaften des fertigen Nanopartikels sowohl von der Syntheseroute als auch von der Prozessführung. Da diese die Materialeigenschaften in erheblichem

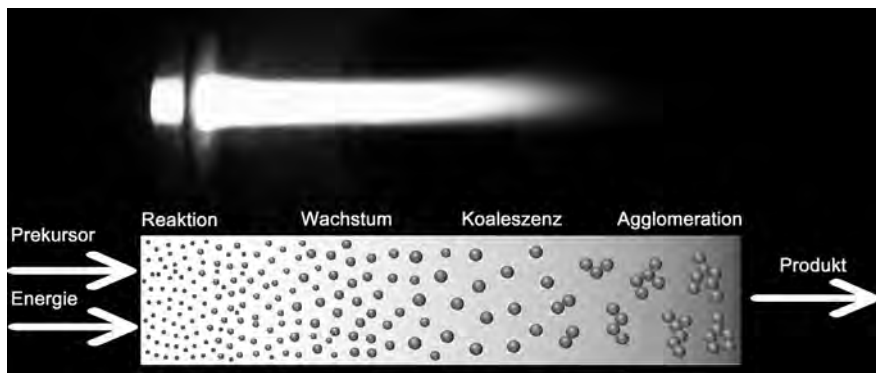
Maße beeinflussen, ermöglichen sie aber auch eine gezielte Synthese mit Blick auf gewünschte Eigenschaften durch exakte Abstimmung der entscheidenden Parameter. Herausforderungen sind hier insbesondere sowohl eine genau einstellbare Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung als auch die exakte Einstellung der Partikelzusammensetzung oder seiner Kristallstruktur. Das prinzipielle Verfahren zur Herstellung von Nanopartikeln durch Gasphasensynthese ist in Abbildung (1) gezeigt.

Ein verdampfbares Ausgangsmaterial (Prekursor, typischerweise

ten Teilchen, so genannten Nukleationskeimen, in kurzer Zeit Partikel von einigen Nanometern Größe. Entscheidend für die äußere Form des Produktes ist dabei das zum Abschluss des Partikelbildungsprozesses vorliegende Temperaturprofil. Durch Agglomeration, das heißt einfaches Zusammenstoßen der Partikel, entstehen zunächst lose Verbünde einzelner Partikel, so genannte „weiche“ Agglomerate, die lediglich über Punktkontakte zwischen den Partikeln verfügen. Findet diese Agglomeratbildung jedoch zu einem Zeitpunkt statt, an dem die

sind Abkühlraten in der Größenordnung von  $10^5$  bis  $10^6$  Kelvin pro Sekunde erforderlich, das heißt die Abkühlung von 1.200 auf 200 °C muss innerhalb von ein bis zehn Millisekunden erfolgen. Bei großen Massenströmen bedeutet dies, dass innerhalb kürzester Zeit eine enorme Wärmemenge aus dem System abgeführt werden muss, was technisch gar nicht einfach machbar ist. Eine häufig gewählte Möglichkeit ist die – auch bei der Herstellung von Ruß genutzte – Eindüsung von Wasser, welches innerhalb kürzester Zeit verdampft und dabei den gewünschten Abkühleffekt bringt. Solche Maßnahmen sind jedoch nur begrenzt einsetzbar, da beispielsweise das Wasser mit dem Produkt reagieren oder aber dessen Oberflächenzusammensetzung verändern kann.

Ein Beispiel für die gezielte Bildung von „weichen“ und „harten“ Agglomeraten zeigt Abbildung (2). Aus Monosilan hergestellte Silizium-Nanopartikel lassen sich sowohl als Aggregat („harte“ Agglomerate) als auch als redispergierbare „weiche“ Agglomerate herstellen. Dabei kommen zwei unterschiedliche Syntheseverfahren zum Tragen. Die punktförmig miteinander verbundenen Nanopartikel wurden in einem Mikrowellen-Plasmareaktor hergestellt, der sehr hohe Abkühlraten in der Größenordnung von  $10^5$  Kelvin pro Sekunde ermöglicht. Darüber hinaus wurde ein Effekt genutzt, der zu einer elektrostatischen Abstoßung von Partikeln während des Entstehungsprozesses führt: Die hohe Konzentration und Mobilität von elektrisch geladenen Teilchen in Plasmen, den Elektronen, sorgen dafür, dass die Oberflächen der einzelnen Partikel negativ aufgeladen werden und diese sich aufgrund der Abstoßungseffekte gleichnamig geladener Teilchen nicht in dem Maße zusammenlagern, wie es im Fall ungeladener Partikel passiert. Die im rechten Bild dargestellten Aggregate sind das Ergebnis einer Synthese von Silizium-Nanopartikeln in einem Heißwandreaktor



(1) Synthese von Nanopartikeln mittels Hochtemperatur-Gasphasenreaktion.

ein Gas oder eine verdampfbar metallorganische oder eine halogenhaltige Verbindung) wird in einen Reaktor eingeblasen und dort schlagartig innerhalb weniger Millisekunden erhitzt, um eine chemische Reaktion zu starten. Die erforderliche Energie kann dabei auf unterschiedliche Weise zugeführt werden: in Form einer Flamme oder eines Plasmas, durch geheizte Reaktorwände oder auch durch Bestrahlung mit Laserlicht. In Folge der Energiezufuhr kommt es zu einer Zersetzung des Prekursors, und es entsteht ein übersättigter Dampf eines kondensierbaren Materials, der zur Bildung erster Partikelkeime, beispielsweise eines Metalloxids, führt. Im Anschluss an den initialen Entstehungsprozess wachsen die Partikel in Folge von interpartikulären Stößen, Verschmelzung, Sinterung und Oberflächenwachstum. Dabei entstehen aus den anfänglich wenige Atome umfassenden kleins-

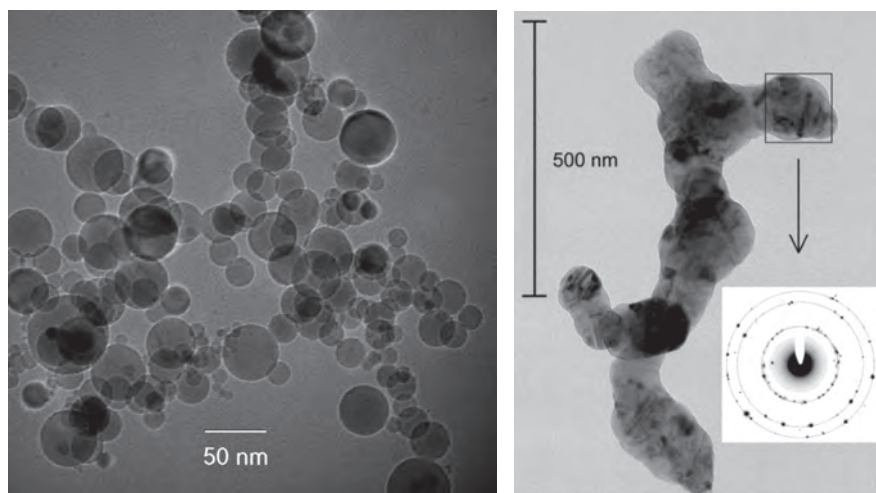
Temperatur im Reaktor hoch genug ist für ein (partielles) Versintern, bilden sich aus den „weichen“ so genannte „harte“ Agglomerate, die im Sprachgebrauch der Partikeltechnologie auch als Aggregate bezeichnet werden. Typische industrielle Gasphasen-Syntheseverfahren mit hohem Massendurchsatz sind nicht geeignet, gezielt „weiche“ und damit auch redispergierbare Agglomerate herzustellen. Eine solche Redispergierbarkeit ist jedoch ein entscheidender Punkt bezüglich der Weiterverarbeitung von Nanopartikeln, beispielsweise zu Tinten und Dispersionen für die druckbare Elektronik. Die Kontrolle des Agglomerationsverhaltens geschieht im Wesentlichen über das Temperatur-Zeitprofil, das sich zum Ende der Partikelbildung im Reaktor einstellt beziehungsweise gezielt gesteuert wird.<sup>2</sup> Um die Bildung von Aggregaten, das heißt miteinander versinterten Partikeln, erfolgreich zu unterbinden,



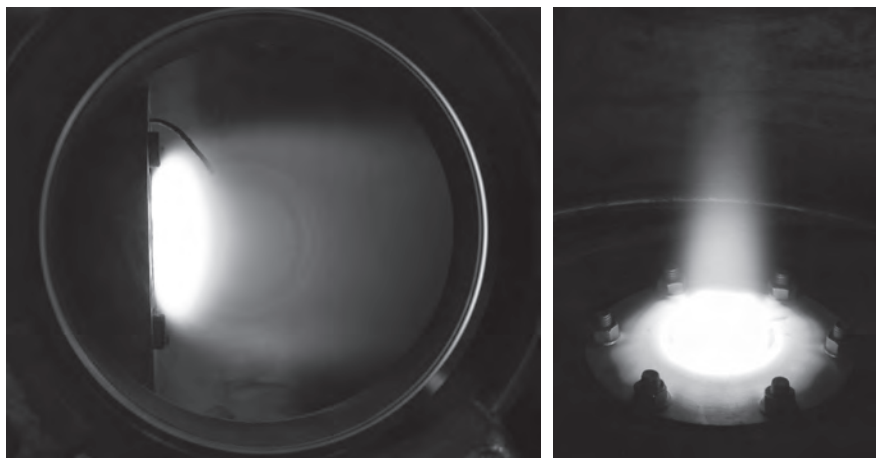
(im Wesentlichen ein Rohrofen), der aufgrund seines Funktionsprinzips der Heizung von außen in der Regel nur geringe Abkühlraten ermöglicht. Diese führen dazu, dass intermediär gebildete Agglomerate, wie sie im linken Bild zu sehen sind, miteinander versintern und so die rechts gezeigten Aggregate bilden. Dabei entscheidet die gewählte Temperatur im Reaktor maßgeblich über die Größe der einzelnen Kristallite, die diese Agglomerate bilden. Wie die Einfügung im rechten Foto, ein so genanntes Beugungsbild, erkennen lässt, handelt es sich bei dem Aggregat selbst in kleinen Bereichen um ein polykristallines Material, das heißt ein Material, das aus vielen kleinen Einzelkristallen aufgebaut ist. Dies lässt sich daran erkennen, dass hier viele einzelne Punkte zu erkennen sind, das heißt die Nanostrukturierung bleibt trotz der Versinterung der einzelnen Nanopartikel erhalten, was beispielsweise für die Verwendung der Nanopartikel in thermoelektrischen Generatoren von entscheidender Bedeutung ist. Hier ist es wichtig, dass die Partikelgröße eine Grenze von einigen zehn Nanometern nicht überschreitet (s. Artikel von Gabi Schiering, Roland Schmelch und Dietrich Wolf in diesem Heft). Dies wird, wie oben geschrieben, durch die gezielte Einstellung der Ofentemperatur erreicht.

### *Einstellung der Nanopartikelgröße*

Neben der Beherrschung der Agglomeratbildung ist oft auch die Kontrolle der Partikelgröße und der Partikelgrößenverteilung von großem Interesse. So ist – wie im Fall der Thermoelektrik – das Unterschreiten einer bestimmten Partikelgröße wichtig oder auch die gezielte Einstellung einer bestimmten Partikelgröße. Für optoelektronische Anwendungen, zum Beispiel für die einstellbare Lumineszenz von Nanopartikeln auf Basis des Quanten-Größeneffektes, ist eine extrem enge Größenverteilung zwingend erforderlich, wenn Licht eines



(2) Silizium-Nanopartikel-Agglomerat (links) und versintertes Silizium-Nanopartikel-Aggregat (rechts). Der Pfeil im rechten Bild zeigt auf das Beugungsdiagramm des gezeigten Ausschnitts, das durch Beugung der Elektronen an den einzelnen Gitterebenen verschiedener Silizium-Kristallite entsteht.



(3) Links: Vorgemischter, laminarer Niederdruck-Flammenreaktor zur Synthese von Metalloxid-Nanopartikeln. Rechts: laminar durchströmter Plasmareaktor, der neben der Synthese von Metalloxiden auch für die Herstellung von Element-Nanopartikeln sowie nitridischen oder carbidischen Nanopartikeln eingesetzt werden kann. Eine laminare (schichtartige) Strömung zeichnet sich dadurch aus, dass keine Verwirbelungen auftreten. Damit lassen sich die in Abbildung (1) schematisch gezeigten, zeitabhängigen Prozesse besser steuern.

bestimmten Wellenlängenbereichs emittiert werden soll. Dabei entscheidet die Größe der Partikel über die emittierte Wellenlänge und die Breite der Größenverteilung über den Bereich. Für eine enge Größenverteilung ist es erforderlich, dass die eingesetzten Prekursor-Moleküle ein möglichst identisches Temperatur-Zeit-Profil durchlaufen, so dass in Bezug auf das Produkt nahezu gleiche Verweilzeiten resultieren. Ein dafür erforderliches homogenes Strömungsfeld lässt sich am einfachsten durch eine laminare Gasführung

erzielen, wie sie in vielen unserer Laborreaktoren, wie beispielsweise dem Niederdruck-Flammenreaktor oder dem Plasmareaktor, realisiert sind (Abb. 3).

Diese Reaktoren ermöglichen aufgrund der gleichförmigen Strömung eine über den Reaktorquerschnitt nahezu gleichzeitig stattfindende Prekursor-Zersetzung sowie die daran anschließende homogene Partikelbildung. Da das weitere Partikelwachstum, das im Wesentlichen durch Partikel-Partikel-Stöße erfolgt, einem statistischen Koll-

sionsprozess folgt, bildet sich im weiteren Verlauf eine so genannte selbsterhaltende Partikelgrößenverteilung. Diese zeigt eine logarithmische Normalverteilung, was nichts anderes ist als eine Gauß'sche Verteilung mit dem Unterschied, dass die Bezugsgröße (also die Partikelgröße) in diesem Fall nicht linear, sondern logarithmisch aufgetragen wird. Unter Gleichgewichtsbedingungen stellt sich eine geometrische Standardabweichung von ungefähr 40 Prozent ein. Ist eine noch gleichmäßigere (engere) Größenverteilung erforderlich, lässt sich durch gezielte Einstellung einer Nicht-Gleichgewichtsbedingung, zum Beispiel durch besonders schnelle Partikelbildung innerhalb weniger Millisekunden, die geometrische Standardabweichung deutlich bis in einen Bereich von unter 20 Prozent reduzieren. Dies geschieht vor allem durch eine schlagartige Veränderung der Gasströmung. Im Labor werden dabei im Wesentlichen zwei Verfahren angewendet: Absaugen des Partikel-Gas-Gemisches durch eine Düse, was zu einer starken Veränderung des Druckes führt, oder die Zumischung eines Verdünnungsgases. Beide Methoden führen dazu, dass sich der mittlere Partikelabstand deutlich verringert und dadurch die Anzahl der Stöße zwischen den Partikeln deutlich reduziert wird. In Kombination mit einer Abkühlung führt dies dazu, dass sich sowohl Partikelgrößen als auch Partikelgrößenverteilungen gezielt „einfrieren“ lassen. Verbunden mit der Tatsache, dass insbesondere zu Beginn der Partikelsynthese keine Gleichgewichtsverhältnisse vorliegen, führt dies dazu, dass sich besonders die kleinen Partikel mit Größen um zehn Nanometer und kleiner mit vergleichsweise geringer Größenverteilung herstellen lassen. Das ist besonders für Materialien interessant, die spezifische Eigenschaften auf Basis des Quanten-Größeneffektes aufweisen. So wurden zum Beispiel auf diese Weise im

Plasmareaktor leuchtende Silizium-Nanopartikel mit Durchmessern um fünf Nanometer mit einstellbarem Lumineszenzspektrum sowie im Niederdruck-Flammenreaktor superparamagnetische Eisenoxid-Nanopartikel mit kontrollierbaren magnetischen Eigenschaften hergestellt. Das Verfahren wurde auch auf viele andere, vor allem halbleitende Metalloxid-Nanopartikel wie Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ), Zinndioxid ( $\text{SnO}_2$ ), Germanium oder Zinkoxid übertragen.<sup>3</sup>

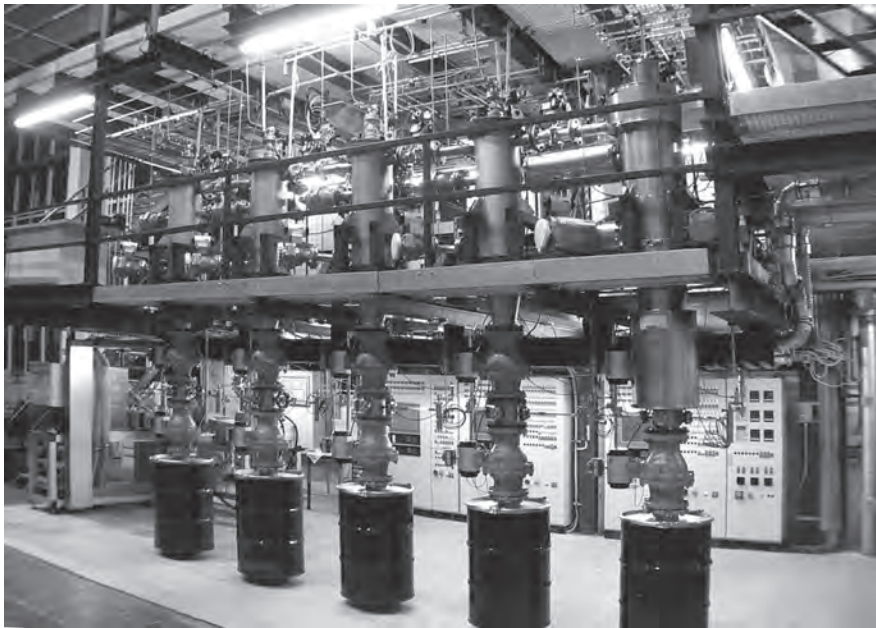
#### *Einstellung von Zusammensetzung und Struktur spezifischer Nanopartikel*

Ein weiterer wichtiger Punkt mit Blick auf die Verwendung der hergestellten Stoffe in spezifischen Anwendungen, besonders auch im Bereich der druckbaren Elektronik, ist die geeignete Dotierung zu p- oder n-leitenden Materialien. Für die Oxide kann dabei festgestellt werden, dass eine effiziente Dotierung meist nur in Form des n-Leiters erfolgreich möglich ist. Die Ursache liegt darin begründet, dass aufgrund des Hochtemperatur-Herstellungsverfahrens im oxidischen Partikel Sauerstoff-Defekte auftreten, die zu einer Freisetzung von Elektronen und damit zur n-Leitfähigkeit führen. Dieser Effekt lässt sich durch die Prozessführung einstellen und dadurch zur Herstellung von Partikeln mit einstellbarer Leitfähigkeit nutzen. Wird beispielsweise Zinndioxid im Flammenreaktor mit einem vierfachen Sauerstoff-Überschuss hergestellt, entsteht reines, isolierendes  $\text{SnO}_2$ . Eine Verringerung des Sauerstoff-Überschusses führt dazu, dass zusehends weniger Sauerstoff in das Kristallgitter eingebaut wird, bis schließlich bei einer gerade noch ausreichenden Menge an Sauerstoff kein  $\text{SnO}_2$  mehr hergestellt werden kann. Stattdessen entsteht ein Material mit der Struktur von Zinnoxid, das bei einer langsamen Synthese nicht herstellbar wäre, wohl aber durch den schnellen Syntheseprozess im

Gasphasenreaktor. Parallel lässt sich beobachten, dass die Leitfähigkeit der hergestellten Pulver systematisch in Abhängigkeit des abnehmenden Sauerstoffgehaltes zunimmt. Dieses Herstellungsverfahren lässt sich auch auf andere Materialien wie Titandioxid  $\text{TiO}_2$ , Wolframoxid ( $\text{WO}_3$ ), Germaniumdioxid ( $\text{GeO}_2$ ) oder Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ) übertragen.

Eine zweite, etablierte Möglichkeit der Dotierung von Nanopartikeln besteht in der gezielten Zugabe von Fremdatomen, die anstelle der regulären Atome in das Kristallgitter eingebaut werden. Für das klassische Halbleitermaterial Silizium ist dies seit Jahrzehnten etabliert und funktioniert nach dem gleichen Prinzip auch für Silizium-Nanopartikel. Da es sich bei den schnellen Gasphasenprozessen häufig jedoch um einen Nicht-Gleichgewichtsprozess handelt, besteht hier im Unterschied zum Volumenmaterial die Möglichkeit, das Silizium mit Dotierstoff zu übersättigen, das heißt mehr Dotierstoff in den Partikeln einzubauen als diese es im Volumenmaterial ermöglichen. Im Fall des Siliziums wurden auf diese Weise Nanopartikel hergestellt, die bis zu einigen Prozenten Dotierstoff enthielten und erfolgreich für thermoelektrische Anwendungen eingesetzt wurden. Neben der Dotierung des Halbleitermaterials Silizium mit Elementen der Gruppen 13 und 15 ist eine entsprechende Dotierung auch bei Metalloxiden möglich, wobei gute Ergebnisse bisher nur erreicht werden, wenn sie die n-Leitfähigkeit des Oxids fördern. Dies ist möglich mit Elementen, die eine Sauerstoffdefizitäre Zusammensetzung stabilisieren, wie beim Indium- oder Aluminium-dotierten Zinnoxid.

Um die verschiedenen Bereiche des NanoEnergieTechnikZentrums mit ausreichenden Materialmengen für die Erprobung der unterschiedlichen Anwendungsfelder zu versorgen, wurden die am IVG entwickelten Reaktorkonzepte so weit skaliert, dass sich in Abhängigkeit vom Syntheseverfahren und der Pro-



(4) Anlagencluster zur Synthese größerer Mengen hochspezifischer Nanopartikel am Institut für Energie- und Umwelttechnik, IUTA e.V. Abscheidung von Nanopartikeln aus Gasphasenreaktoren für eine gezielte weitere Verarbeitung.

zessführung Nanopartikelmengen von einigen zehn bis zu einigen tausend Gramm pro Stunde herstellen lassen. Dazu wurde am IUTA ein Anlagen-Cluster aufgebaut, der die drei hier vorgestellten Reaktorkonzepte – Heißwand-, Flammen- und Plasmareaktor – beherbergt und in der Lage ist, Materialien mit der gleichen Qualität herzustellen, wie dies an den Laborreaktoren möglich ist (siehe Abb. 4).

#### **Abscheidung von Nanopartikeln aus Gasphasenreaktoren für eine gezielte weitere Verarbeitung**

Wie bereits oben beschrieben, können während der Gasphasensynthese durch interpartikuläre Wechselwirkungen Aggregate und Agglomerate aus Nanopartikeln entstehen. Um die kleinen Nanopartikel mit einer engen Partikelgrößenverteilung und hoher Reinheit aus der Gasphase zu gewinnen, ist es daher notwendig, neue, innovative Verfahren zur Abscheidung der Nanopartikel zu entwickeln. Dabei besteht die Zielsetzung insbesondere darin, eine mögliche Agglomeration oder gar Aggregation der Nanopartikel zu verhindern und

diesen Zustand über einen möglichst langen Zeitraum aufrechtzuerhalten. Dies kann durch Überführung der Partikel in die flüssige Phase, zum Beispiel ihre Stabilisierung in einem Tensid-haltigen, wässrigen Dispersionsmedium geschehen. Die Nanopartikel-Suspension, das heißt das Flüssig/Feststoff-Gemisch soll dann bis zur Weiterverarbeitung aufbewahrt werden können, ohne dass es zu einer Veränderung der Eigenschaften durch Alterung oder Agglomeration kommt. Prominentes Beispiel für solche stabilen Suspensionen sind Farben und Lacke, die Pigmente auf Basis anorganischer Feststoffe enthalten. Im Unterschied zu den hier vorgestellten Materialien enthalten solche Lacke jedoch in der Regel Partikel mit einer Größe im Mikrometer-Bereich, bei denen interpartikuläre Anziehungskräfte eine viel geringere Rolle spielen als bei Nanopartikeln.

Für die Überführung der Nanopartikel aus der Gasphase in die flüssige Phase stehen unter anderem Waschverfahren zur Verfügung. Es können ferner elektrostatische oder thermo-phoretische Kräfte zur Abscheidung genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht

in der Kombination der genannten Prinzipien mit heterogener Kondensation, das heißt wie bei der Bildung von Regentropfen. Diese Form der Abscheidung basiert auf der Kondensation eines übersättigten Dampfes auf der Nanopartikel-Oberfläche und der daraus folgenden Bildung größerer Teilchen als Tropfen. Ähnliche Verfahren sind für die Abgasreinigung durchaus bekannt, müssen jedoch für die gezielte Herstellung von definierten Dispersionen kleiner Nanopartikel angepasst oder völlig neu etabliert werden.

Die Entwicklungen im Rahmen des NETZ-Projektes zur Abscheidung von Nanopartikeln auf Basis eines möglichst effektiven Transfers der Nanopartikel in die flüssige Phase in Kombination mit der Auswahl der geeigneten Waschflüssigkeit/Dispergiermittel und der optimalen chemisch-physikalischen Stabilisierung sind mittlerweile weit vorangeschritten. Ergebnis soll ein chemisch-technisches Baukastensystem sein, das es ermöglicht, den jeweiligen Anwendern maßgeschneiderte Materialien – wahlweise trockene Pulver oder flüssige Nanopartikel-Dispersionen – zur direkten Weiterverarbeitung und Anwendung, zum Beispiel für Beschichtungsprozesse, zur Verfügung zu stellen. Abbildung (5) zeigt die Grundstruktur des Baukastensystems, das neben den Neuentwicklungen nach wie vor auch die klassischen Abscheidungsverfahren als parallele Prozesslinie enthält.

Nach einer optionalen Oberflächen-Funktionalisierung der Nanopartikel bereits in der Gasphase können diese je nach Weiterverarbeitungsbedarf auf unterschiedliche Weise abgeschieden werden. Zum einen können Nanopartikel wie bisher via Filtration aus dem Gasstrom abgetrennt werden. Das Pulvermaterial besteht in diesem Fall aus den lose gebundenen Nanopartikel-Agglomeraten, die entweder direkt oder aber nach zusätzlicher mechanischer Deagglomeration in einer Hochleistungsmühle weiterverar-

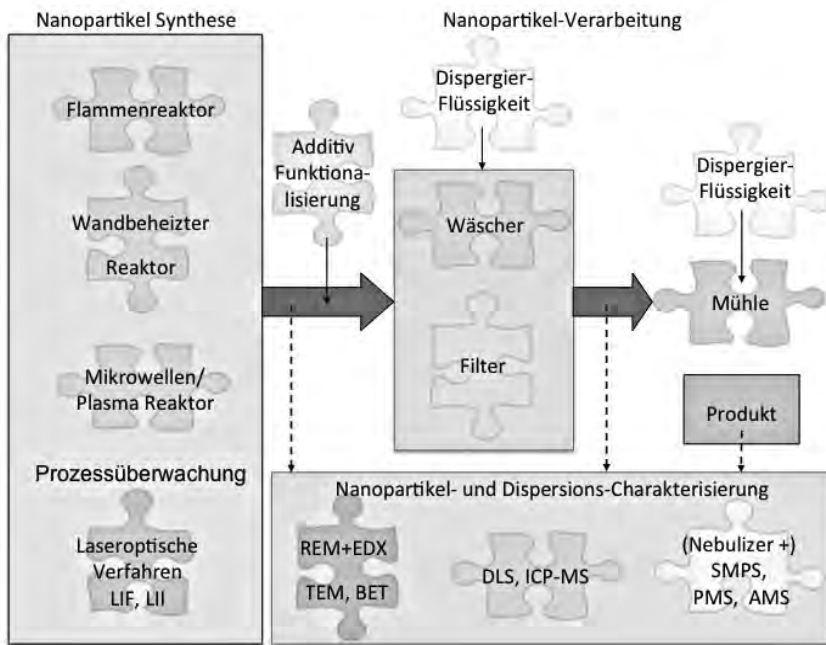


beitet werden können. Zum anderen besteht die Möglichkeit, einen In-line-Waschprozess durchzuführen, der sowohl die Partikel-Agglomeration unterbindet als auch als direktes Abtrennverfahren arbeitet. Prozessbedingungen (Temperatur, Druck), Nanopartikelmaterial sowie die spätere Anwendung bestimmen die Zusammensetzung der eingesetzten Waschflüssigkeit, die in der Regel auch als Dispersionsmittel dient. Im einfachsten Fall kann reines Wasser eingesetzt werden, wobei zur Vermeidung der Partikel-Agglomeration in der Flüssigphase gegebenenfalls geeignete chemische Agentien unter Nutzung sterischer, elektrosterischer oder elektrostatischer Effekte zur Stabilisierung zugesetzt werden. Die Zugabe muss jedoch für Waschprozesse mit Kreislaufführung der Waschflüssigkeit geregelt werden, um zum Beispiel Schaumbildung oder die Entstehung von Mizellen zu vermeiden. Weitere Routen mit alternativen Transferprozessen (Nut-

zung thermophoretischer und/oder elektrostatischer Effekte) und der Einsatz von Dispersionsmedien mit geringem Dampfdruck, zum Beispiel ionische Flüssigkeiten, sind ebenfalls Gegenstand laufender Forschungsarbeiten.<sup>4</sup> Als Instrumente stehen jedoch bereits jetzt standardisierte Prozeduren für die Qualitätsüberwachung der Pulver und Dispersionen zur Verfügung (laseroptische Methoden, Elektronenmikroskopie, Partikelmassenspektrometrie, Oberflächencharakterisierung und dynamische Lichtstreuung).

Ein wesentlicher Bestandteil des Baukastensystems ist die Auswahl der geeigneten Dispersionsflüssigkeit. Diese muss hinsichtlich ihrer Wechselwirkung mit dem Partikelmaterial und seiner Prozessierbarkeit sorgfältig bewertet werden. Die benötigten Informationen liefert ein computergestütztes Werkzeug, mit dem die so genannten Hansen-Parameter als Indikatoren für die optimale Formulierung des Dis-

pensionsmediums ermittelt werden können. Die Hansen-Parameter liefern eine quantitative Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen gelösten oder dispergierten Teilchen und dem Lösungsmittel, wobei auch die unterschiedlichen Beiträge zu diesen Wechselwirkungen (polar, dispersiv, Wasserstoffbrücken), die auf molekularen Strukturen basieren, erfasst werden. Dieses Konzept hat sich bislang vor allem bei der quantitativen Bewertung und Vorhersage der Löslichkeit von Polymeren in Lösemittelsystemen bewährt. In Studien der TCII konnte demonstriert werden, dass auch die Eigenschaften von Lösungsmitteln beziehungsweise Lösungsmittelgemischen als Dispergiermedium für unterschiedliche Nanopartikel mit den Hansen-Parametern quantitativ beschrieben werden können.<sup>5</sup> Die Qualität und die Stabilität von Nanopartikel-Dispersionen, die unter analogen Bedingungen hergestellt wurden, werden dafür mithilfe der dynamischen Lichtstreuung quantitativ bewertet. Anhand der Ergebnisse für einen Satz von ungefähr 20 unterschiedlichen Lösungsmitteln mit systematisch variierten Eigenschaften erhält man Hansen-Parameter für die Nanopartikel. Einerseits beschreiben diese die Beiträge unterschiedlicher Wechselwirkungen mit dem Lösungsmittel und liefern somit eine indirekte Oberflächencharakterisierung der Nanopartikel. Andererseits lassen sich anhand der Hansen-Parameter bislang nicht getestete Lösungsmittel oder -gemische mit besonders guten Eigenschaften als Dispergiermedium für die speziellen Nanopartikel vorhersagen. Auch weitere erwünschte Lösungsmiteleigenschaften wie Siedetemperatur oder Viskosität können dabei berücksichtigt werden. Damit ist ein wichtiger Fortschritt bei der Auswahl von geeigneten Dispergiermedien, potenziell aber auch für die Identifizierung von spezifischen Waschflüssigkeiten für die Abscheidung von Nanopartikeln aus der Gasphase, geleistet worden.



(5) Baukastensystem zur Herstellung und Verarbeitung von hochspezifischen Nanopartikeln in Pulverform oder in flüssigen Medien (LIF: Laserinduzierte Fluoreszenz; LII: Laserinduzierte Inkandescenz; REM: Rasterelektronenmikroskopie; EDX: Energiedispersive Röntgenspektroskopie; TEM: Transmissionselektronenmikroskopie; BET: Analyse der spezifischen Oberfläche aus Gasadsorption nach Brunauer, Emmet und Teller; DLS: dynamische Lichtstreuung; ICP-MS: Massenspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma; SMPS: Mobilitätsbasierter Partikelanalysator, PMS: Partikelmassenspektroskopie; AMS: Aerodynamischer Partikelgrößenanalysator).



Die Projektergebnisse sind für alle Bereiche relevant, bei denen die Funktion wesentlich von Ober- und Grenzflächen mitbestimmt wird; insbesondere in Bereichen, in denen die Nanotechnologie bereits mit Erfolg Verwendung findet, zum Beispiel bei der Herstellung von Lacken und Beschichtungsmaterialien. Durch die Überführung der Nanopartikel mit neuartigen Eigenschaften in prozessierbare und bekannte Flüssigkeiten wird die Herstellung neuer, innovativer Produkte ermöglicht und vereinfacht. Durch geeignete Drucktechniken können diese Nanopartikel-beladenen Flüssigkeiten kostengünstig und in großer Menge auf Oberflächen zur Nutzung in den Bereichen „druckbare Elektronik“, „Oberflächenbeschichtung“ oder „Photokatalyse“ appliziert werden.

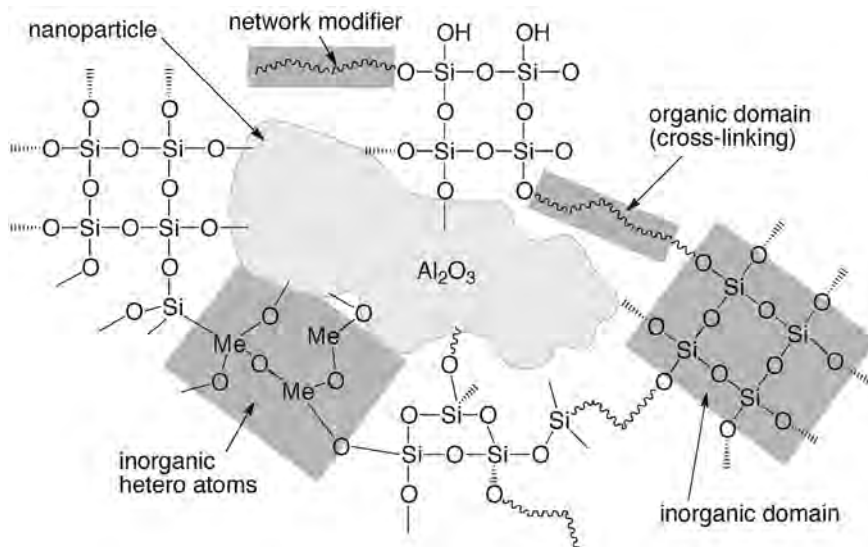
#### Mit Nanopartikeln funktionalisierte textile Filtermedien

Die Überführung der Nanopartikel in funktionale Strukturen und Systeme ist ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt im Rahmen des universitären Profilschwerpunktes „Nanowissenschaften“. Im Zentrum für Filtrationsforschung und funktionalisierte Oberflächen in NRW (ZF<sup>3</sup>) werden grundla-

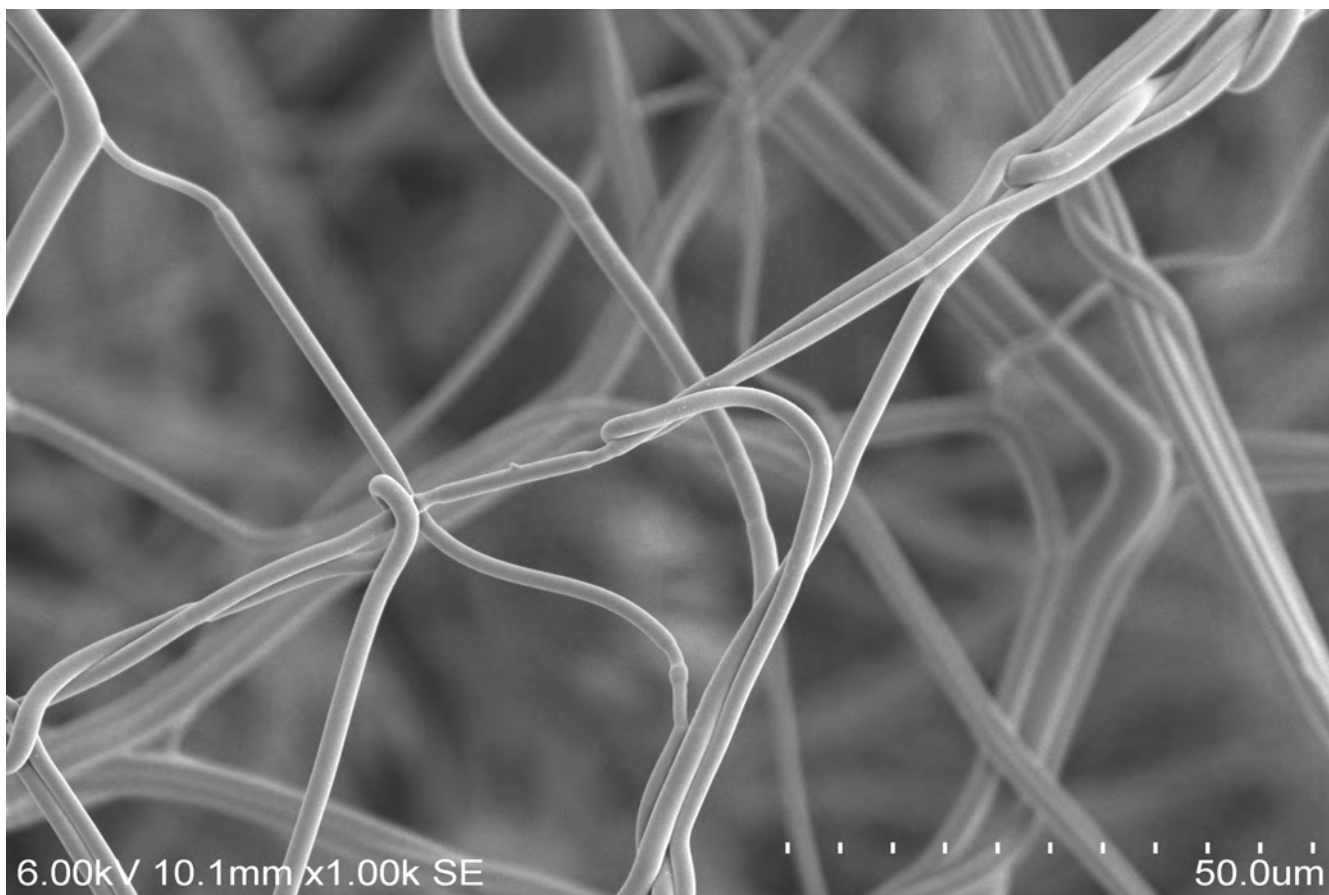
genorientierte Forschung, ingenieurwissenschaftliche Expertise und Prüfeinrichtungen gebündelt, um in diesem für kleine und mittlere Unternehmen bedeutenden Segment die Herstellung, Charakterisierung und Prüfung von Filtern mit neuartigen Eigenschaften – unter anderem basierend auf Nanopartikeln des IUTA und des IVG – zu ermöglichen. Aufbauend auf eine fundierte Grundlagenforschung in der Gas- und Partikelfiltration mit funktionalisierten Medien sowie deren anwendungsbezogener Entwicklung ergibt sich die Möglichkeit zur Erschließung neuer Absatzmärkte mit neuartigen Produkten. Die breite Basis des Projektes ist durch die Zusammenarbeit des IUTA, des IVG, des Lehrstuhls Thermische Verfahrenstechnik der UDE, und des DTNW gegeben. Schwerpunkt der Arbeiten des DTNW ist dabei die Funktionalisierung textiler Filtermedien. Ziel derartiger Modifizierungen ist es, die Eigenschaften von Filtermedien über eine von der Partikelgröße abhängige Abscheideleistung hinauszuführen. Im Fokus stehen die Selektivität, eine antibakterielle Wirkung oder eine katalytische Wirkung. Zwei Ansätze werden im Folgenden exemplarisch vorgestellt.

Als eigenständiges Verfahren zur Oberflächenmodifizierung wurde das Sol-Gel-Verfahren evaluiert, das zur Ausrüstung textiler Flächengebilde mit nanokompositären Strukturen, vor allem aber auch als Technologie zur Deposition funktioneller Nanopartikel, seit Langem am DTNW untersucht wird. Die Idee bei der Sol-Gel-Technik ist es, leicht applizierbare Hybridpolymersysteme zu entwickeln, die aufgrund des modularen Aufbaus der Systeme mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgestattet werden können. Hierfür werden Nanopartikel durch Reaktion von molekularen Vorstufen in flüssiger Phase erzeugt; die endgültige Struktur wird durch eine thermische Nachbehandlung erzeugt. Die folgende Abbildung (6) zeigt die wichtigsten Strukturelemente, aus denen ein Sol-Gel-basiertes Hybridpolymer aufgebaut sein kann.

Über die Zusammensetzung der einzelnen Elemente lassen sich die Eigenschaften der Systeme variieren. Die Möglichkeiten dieses Konzepts demonstrieren die folgenden Beispiele. So wurden Systeme, die in den anorganischen Domänen Silbernanopartikel enthalten, auf Filter appliziert. Eine entsprechende Modifizierung erzielt eine antibakterielle Wirkung, was für den Einsatz in verschiedenen Filtern, wie zum Beispiel Luftfiltern interessant ist, da hier bei langen Standzeiten eine Ausbreitung von Bakterien problematisch werden kann. Andere Sole wurden mit Eisenoxid-Nanopartikeln modifiziert und appliziert. Eisenhaltige Verbindungen sind in der Lage, schwefelhaltige Komponenten zu binden. Vor diesem Hintergrund wird untersucht, inwieweit sich durch die Herstellung entsprechender Komposite Filtermedien realisieren lassen, die in der Lage sind, zum Beispiel Sulfide aus Gasströmen zu entfernen. Entsprechende Partikel wurden vom Kooperationspartner IVG via Gasphasensynthese hergestellt. Als letztes Beispiel sei die Herstellung katalytisch aktiver Oberflächen genannt.



(6) Wichtige Strukturelemente in einem anorganisch-organischen Hybridpolymer, das durch Sol-Gel-Synthese erhalten werden kann.



(7) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von elektrogesponnenen Fasern, die durch Dispersion von Eisenoxid-Nanopartikeln in die Spinnlösung des Polymers funktionalisiert wurden.

Vanadium(V)-oxid ist eine hochreaktive, katalytisch wirksame Verbindung, die in verschiedenen industriellen Prozessen eingesetzt wird, so zum Beispiel auch in der Rauchgasentschwefelung. Im Rahmen der Arbeit wurden Wege gesucht, Vanadium(V)-oxid-Nanopartikel aus verschiedenen Prekursoren zu synthetisieren. Durch die Applikation hiermit konzipierter Sole können katalytisch wirksame Filtermedien hergestellt werden.

Weiterhin wurde die Integration funktionalisierter Feinstfasern in komplexe Filtermaterialien untersucht. Zur Herstellung derartiger „Nanofasern“ kam das Elektrosponnenverfahren zum Einsatz. In Zusammenarbeit mit dem IVG wurde dabei der Weg beschritten, die Feinstfasern durch direktes Einspinnen von Nanopartikeln zu funktionalisieren. In der Entwicklung moderner Filtermedien spielen Fasern mit kleinem Durchmesser

eine zunehmende Rolle. Fasern mit Durchmessern kleiner als  $1\ \mu\text{m}$  werden gewöhnlich als Feinst- oder „Nanofasern“ bezeichnet und besitzen eine ausgeprägte Labyrinthwirkung. Diese ist insbesondere für die impaktions- und diffusionsgetriebenen Abscheideprozesse wichtig. Denn das Trägermedium – Gas oder Flüssigkeit – wird zu einer komplexen Strömungsgeometrie mit langen Wegen gezwungen. So werden auch solche Partikel, die sehr viel kleiner sind als die charakteristische Porengröße, aus dem Fluss des Trägermediums herausgetragen und treffen auf Filterfasern.

Die nanoskalige Dimension bietet hinsichtlich der Funktionalisierung von Filtermedien eine interessante Perspektive. Während herkömmliche Filterfasern mit Durchmessern zwischen  $5$  und  $20\ \mu\text{m}$  vorteilhafter durch eine reine Oberflächenmodifizierung funktionalisiert werden, ist es aufgrund des

extrem großen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses der Nanofasern durchaus sinnvoll, organische oder anorganische Additive direkt einzuspinnen und so auf möglicherweise aufwendige Nachbehandlungen zu verzichten. Insbesondere ist dieser Weg für die Einbettung funktionalisierter Nanopartikel interessant und wurde im ZF<sup>3</sup>-Projekt konkret untersucht.

Zur grundsätzlichen Herstellung nanoskaliger Feinstfasern werden sowohl in wissenschaftlichen Arbeiten als auch in technischen Umsetzungen verschiedene Spinnverfahren beschrieben. Neben dem Meltblown-Verfahren ist dies insbesondere das Elektrosponnen, das auch in den Untersuchungen am DTNW eingesetzt wurde. Im Elektrosponnenprozess wird eine Polymerlösung beziehungsweise -schmelze den elektrostatischen Kräften in einer elektrischen Anordnung aus zwei oder mehreren Elektroden, zwischen

denen Hochspannung herrscht, ausgesetzt. Hierdurch werden starke elektrische Kräfte auf die Polymerlösung ausgeübt, die die Beschleunigung eines so genannten Polymerjets zur Gegenelektrode bewirken. Die Faserbildung (Verfestigung des Polymerjets) wird durch das Verdampfen des Lösemittels während der Beschleunigungsphase zur Gegenelektrode bestimmt. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden Versuche zum Einspinnen von funktionalisierten Nanopartikeln vorgenommen, wobei die Nanopartikel unmittelbar in eine standardmäßige Spinnlösung aus Polyethersulfon (PES) in N-Methylpyrrolidon

ersponnenen Flächengebilde besitzen eine gelbliche Färbung, die den Eisen-Gehalt widerspiegelt.

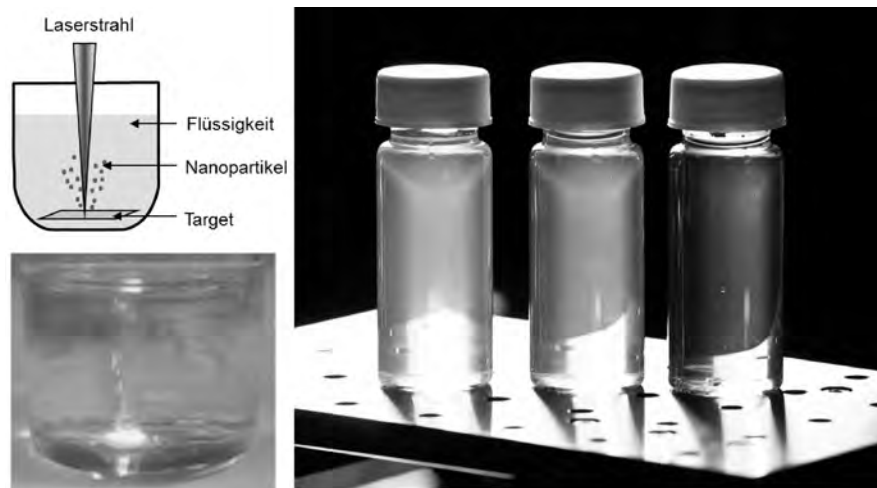
### Funktionalisierung mit lasergenerierten Nanopartikeln

Die Integration von Nanopartikeln folgt der Idee, neue Funktionen in ein Material einzubringen und somit Hybridmaterialien mit kombinierten Eigenschaften herzustellen. Von besonderer technischer Bedeutung ist es, Nanopartikel als katalytisch aktive Zentren einzusetzen. Katalysatoren auf der Basis von geträgerten Nanopartikeln, also typischerweise hitzebeständigen

zugänglich und reaktiv ist. Mit konventionellen, nasschemischen Synthesemethoden ist die Nanopartikeloberfläche jedoch häufig mit Hilfs- und Stabilisierungsreagenzien, den Liganden, bedeckt und dadurch deaktiviert. Die Aktivierung muss nachträglich durch aufwendige Reinigungs- oder Kalzinierungsprozesse erfolgen.

Als Alternative zur Erzeugung hochreiner Nanopartikel in flüssigen Dispersionen hat sich in den letzten Jahren der Laser als vielseitiges Werkzeug etabliert.<sup>6</sup> Das Verfahren ist in Abbildung (8) illustriert: Ein gepulster Laserstrahl wird auf ein Substrat (Target) im flüssigen Medium fokussiert, trägt dieses ab und erzeugt dadurch Nanopartikel in der Lösung. Die freigesetzten Nanopartikel werden von der Trägerflüssigkeit stabilisiert, vor Agglomeration geschützt und sind optimal zur Weiterverarbeitung vorbereitet. Diese rein physikalisch hergestellten Nanopartikelkolloide sind frei von Kontaminationen durch nicht umgesetzte Ausgangsstoffe, und es kann vielfach auf potenziell toxische und deaktivierende Stabilisatoren verzichtet werden. Diese Reinheit ist für anspruchsvolle Anwendungen oftmals von Vorteil. Wenn Nanopartikel durch Laserabtrag in Flüssigkeit direkt aus Festkörpern hergestellt werden, sind diese vollkommen frei von Liganden und daher hochaktiv. Abbildung (8) (links) zeigt eine Auswahl lasergenerierter Nanopartikel in kolloidaler Lösung. Kolloidale Nanopartikel sind für die weitere Verarbeitung besonders gut und sicher zu handhaben, da das Lösungsmittel und die Partikeladung eine Agglomeration oder Ausfällung verhindern und für den Anwender durch den sicheren Einschluss der Nanopartikel im Lösungsmittel keine Gefährdung hervorgeht.

In einem folgenden Verarbeitungsschritt werden die lasergenerierten Nanopartikel durch einen Adsorptionsprozess auf oberflä-



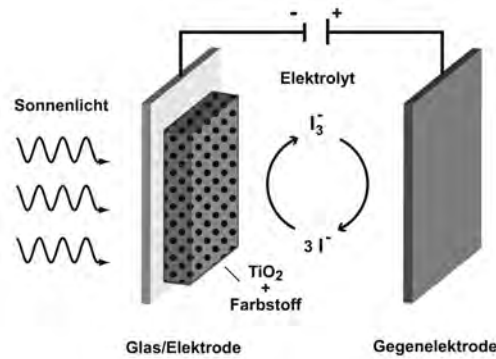
(8) Laserbasierte Herstellung von Nanopartikeln in Flüssigkeit und lasergenerierte Nanopartikel aus Silber (gelb), Titan (blau) und Gold (rot; von links).

(NMP) dispergiert wurden. Hierfür wurden auch Erfahrungen aus den Arbeiten des Kooperationspartners TCII genutzt. Als Modellsysteme dienten wiederum Eisenoxidpartikel, die auf dem Weg der Gasphasensynthese beim Kooperationspartner IVG hergestellt wurden. Die Kolloide wurden so mit PES/NMP gemischt, dass sich eine PES-Konzentration von 22 Prozent ergab und eine Partikelkonzentration von ungefähr einem Gewichtsprozent. Rechnerisch ergibt sich hieraus im Idealfall ein Gehalt an fünf Gewichtsprozent Nanopartikeln in der Faser. Entsprechende Fasern zeigt beispielhaft die REM-Mikrographie in Abbildung (7). Die

Oxidpulvern, die mit metallischen Nanopartikeln beladen sind, spielen eine bedeutende Rolle in der Energiewandlung und der chemischen Industrie. Beispielsweise kommen etwa 90 Prozent aller chemischen Produkte mindestens einmal in ihrer Herstellungsphase mit einem Katalysator in Kontakt. Zur Herstellung solcher Katalysatoren werden katalytisch aktive Nanopartikel, häufig aus Edelmetallen wie Platin, Palladium oder auch Gold, auf einen Träger aufgebracht. Für diese Nanomaterialien ist Reinheit ein wichtiger Gesichtspunkt. Die katalytische Aktivität eines Nanopartikels hängt in besonderem Ausmaße davon ab, ob deren Oberfläche



chenreiche Trägermaterialien aufgebracht, die zuvor durch Gasphasensynthese hergestellt wurden. Die Abwesenheit einer Ligandenschicht wirkt sich dabei positiv auf die Affinität der Nanopartikel zur Trägeroberfläche aus. In bisherigen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Adsorptionseffizienz von Silbernanopartikeln direkt von der Ligandenbedeckung abhängt, durch derartige Reststoffe förmlich blockiert wird und bei komplett ligandenfreien Nanopartikeln um bis zu eine Größenordnung erhöht ist.<sup>7</sup> Somit lässt sich die Funktionalisierung der gasphasensynthetisierten Trägermaterialien mit lasergenerierten Nanopartikeln prinzipiell in einen kontinuierlichen Prozess umsetzen: Nach Lasergenerierung der kolloidalen Nanopartikel werden diese mit dem Trägermaterial vermischt, nach vollständiger Adsorption vom Lösungsmittel abgetrennt und getrocknet (Abb. 9). Dieser Prozess kann flexibel variiert werden, neben verschiedenen Trägermaterialien kann eine breite Auswahl an Nanopartikeln oder auch Legierungsnanopartikeln eingesetzt werden, die sich durch die entspre-

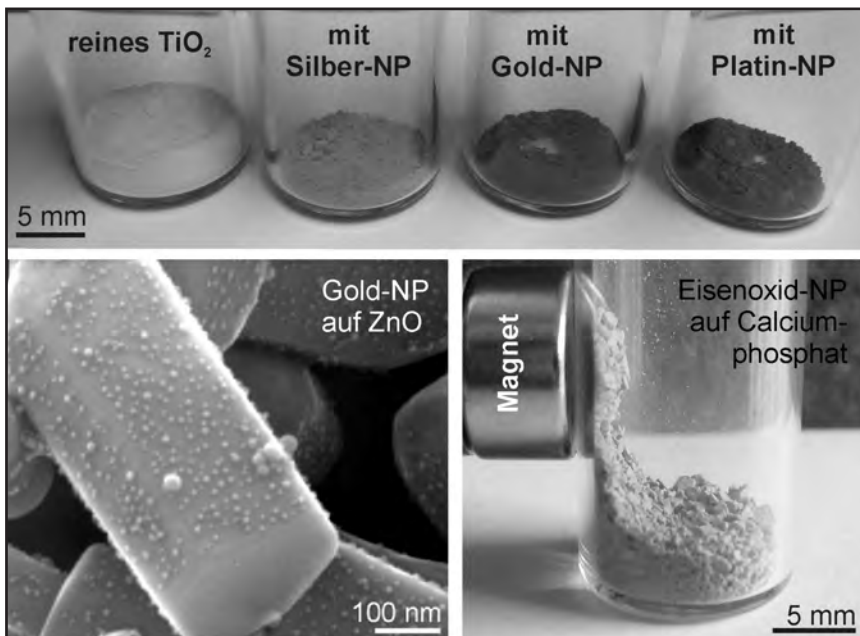


(10) Schematischer Aufbau (links, Seitenansicht) und Foto (rechts, Draufsicht) einer Farbstoff-Solarzelle. Die Beschreibung im Text bezieht sich auf die Glas/Titandioxid-Elektrode auf der linken Seite im schematischen Aufbau.

chende Wahl des Ablationstargets festlegen lassen. Diese Strategie kann neben der Funktionalisierung von gasphasensynthetisierten Trägermaterialien auch auf andere Materialklassen wie Polymere angewendet werden. Das Einbringen ligandenfreier Nanopartikel unter Verzicht auf Polymermatrixbinder erlaubt die hochreine Herstellung von Nanopartikel-Polymer-Kompositen (Nanokompositen), die ein großes Anwendungspotenzial beispielsweise in der Wasserstoffspeicherung oder Energiewandlung besitzen.

### Nanopartikel mit Licht vernetzen

Die Anwendungsmöglichkeiten von Nanopartikeln in Form eines pulverförmigen Materials sind trotz ihrer einzigartigen Eigenschaften nur sehr begrenzt. Viele innovative Anwendungen erfordern Verfahren, die es erlauben, Nanopartikel untereinander und mit anderen Komponenten zu verbinden. Nicht zuletzt, um ein mechanisch stabiles Material zu erhalten und sie kontaktieren zu können. Insbesondere aber auch, um ihre besonderen Eigenschaften weiter zu optimieren. Ein schönes Beispiel sind Halbleiteroxid-Nanopartikel aus Titandioxid. Diese Materialien werden zum Aufbau von Elektroden für den Einsatz in Farbstoffsolarzellen verwendet, um aus Sonnenlicht elektrischen Strom zu generieren (Abb. 10). Die aus den Nanopartikeln hergestellte Elektrodenoberfläche ist hierzu mit einer dünnen Farbstoffschicht bedeckt, in der durch das Sonnenlicht Elektronen angeregt werden. Diese energiereichen Ladungsträger werden über die Elektrode abgeleitet und generieren so den Strom. Das Prinzip ist ähnlich wie in der Photosynthese der Pflanzen, die den grünen Blattfarbstoff Chlorophyll verwenden, um die Energie der Sonnenstrahlung nutzen zu können. Natürlich mit dem Unterschied, dass die energiereichen Ladungsträger in den Blättern der Pflanzen verwendet werden, um aus Wasser und Kohlendioxid Zucker aufzubauen.



(9) Oben: Lasergenerierte Silber-, Gold- und Platinanopartikel, immobilisiert auf einem Träger aus Titandioxid als heterogener Katalysator. Unten links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Goldnanopartikeln auf Zinkoxidträger. Unten rechts: Neue magnetische Eigenschaften des Trägermaterials durch Eisenoxid-Nanopartikel.

Aufgrund der günstigen Ausgangsmaterialien und des einfachen Aufbaus bieten Farbstoffsolarzellen ein großes Potenzial in der zukünftigen Energietechnik. Hierzu muss deren Aufbau allerdings noch weiter optimiert werden. Problematisch ist etwa die geringe Effizienz, die gewöhnlich deutlich unter zehn Prozent liegt und damit wesentlich schlechter ist als die von herkömmlichen Silizium-Solarzellen. Um den Lichteintrag und damit die Effizienz von Farbstoffsolarzellen zu erhöhen, ist eine weitere Optimierung der Elektrodenstruktur notwendig. Grundsätzlich muss die Elektrode zwei konkurrierende Eigenschaften erfüllen. Zum einen muss sie elektrisch gut leitend sein. Zum anderen muss die Elektrodenoberfläche aber auch möglichst groß sein, so dass eine große Belegungsdichte mit dem Farbstoff erreicht und damit ein hoher Strom generiert werden kann. Das nanopartikuläre Ausgangsmaterial besitzt naturgemäß eine hohe Oberfläche. Durch die fehlende Verbindung zwischen den Nanopartikeln ist das Material allerdings sehr schlecht elektrisch leitend. Um bei gleichbleibend großer Oberfläche eine bessere elektrische Leitfähigkeit zu erreichen, werden die Nanopartikel daher erhitzt, so dass die Atome an der Oberfläche mobil werden und eine Verbindung zwischen den Nanopartikeln entsteht. Das ist ähnlich wie bei kleinen Eisstückchen in einem Glas, die in der Sonne warm werden und an den Berührungspunkten miteinander verschmelzen. Den Prozess bezeichnet man als Sintern. Als Ergebnis erhält man ein Material, das man sich in der Struktur als festen Schwamm vorstellen kann, allerdings mit Poren, deren Größe im Nanometerbereich liegen, das heißt in der Größenordnung von einem milliardstel Meter.

Zur Herstellung der Elektroden werden Trägermaterialien mit einer Lösung der Nanopartikel beschichtet. Um eine möglichst homogene, dicht gepackte Schicht herstellen zu können, müssen die hierbei verwen-

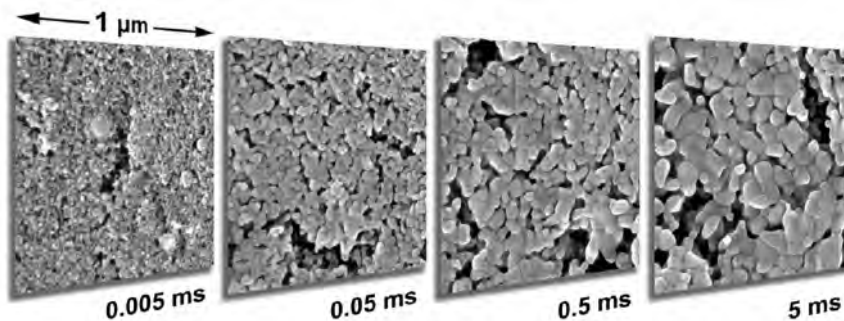


(11) Hochleistungslaser zum definierten Sintern von Nanopartikelschichten.

deten Nanopartikel-Suspensionen optimiert werden (vgl. Abschnitt Abscheidung von Nanopartikeln aus Gasphasenreaktoren für eine gezielte weitere Verarbeitung). Das Trägermaterial muss für sichtbares Licht transparent sein, damit das Sonnenlicht auch in das Elektrodenmaterial eindringen kann (vgl. Abb. 10). Die thermische Verarbeitung kann mit etablierten Verfahren im Temperofen durchgeführt werden. Dabei werden Temperaturen von 450°C erreicht. Daher sind thermisch stabile Trägermaterialien erforderlich; gewöhnlich wird Glas verwendet. Zudem werden die beschichteten Trägermaterialien in Temperöfen komplett prozes-

siert. Eine lokale Prozessierung der Nanopartikelschicht ist im Temperofen nicht möglich. Diese Aspekte schränken die Möglichkeiten bei der Verarbeitung ein. Wünschenswert wäre beispielsweise die Verwendung von polymeren Trägermaterialien, um flexible, rollbare Solarzellen aufzubauen. Eine lokale Bearbeitung erlaubt zudem den Aufbau strukturierter Elektroden-schichten, die einen optimierten Lichteintrag und damit höhere Effizienzen ermöglichen könnten. Im Nano-EnergieTechnikZentrum werden neue Sinterverfahren entwickelt, die es erlauben, diese Ansätze umzusetzen.<sup>8</sup> Dabei kommen moderne,

hochleistungsfähige Laser zum Einsatz (Abb. 11), um das nanopartikuläre Material lokal mittels Licht zu erhitzen. Das grundsätzliche Prinzip kennt jedes Kind, das schon einmal ein Brennglas verwendet hat, um Sonnenstrahlung zu bündeln. Das Licht wird im Fokus vom bestrahlten Material absorbiert und die Energie in Form von Wärme freigesetzt. Man spricht daher auch von einem photothermischen Verfahren (gr., phos: Licht, Helligkeit, thermos: warm).



(12) Durch Lasersintern einstellbare Nano- und Mikrostrukturen von Schichten aus Titandioxid-Nanopartikeln (vgl. Abschnitt „Nanopartikelsynthesen in Gasphasenreaktoren“). Die Angaben beziehen sich auf die Bestrahlungsdauer des verwendeten Laserlichts bei sonst gleichen Bedingungen.

Laserlicht hat bei der Materialbearbeitung viele Vorteile:

1) Es lässt sich mit Optiken besonders gut bündeln und damit fein fokussieren, hinunter bis in den Bereich unterhalb eines millionstel Meters.  
 2) Im Unterschied zur Sonne, die Licht in einem breiten Wellenlängenbereich vom UV- über den sichtbaren bis in den infraroten Bereich abstrahlt, können Laser zudem so eingestellt werden, dass sie nur Licht einer bestimmten Wellenlänge ausstrahlen, beispielsweise grünes oder rotes Licht, wie es bei Laserpointern zum Einsatz kommt. Die Wellenlänge bestimmt die Eindringtiefe in das Material. Fensterglas ist beispielsweise im sichtbaren Wellenlängenbereich transparent, während die Eindringtiefe des Lichts und damit die Transparenz mit abnehmender Wellenlänge im UV-Bereich immer stärker abnimmt. Fensterglas wirkt

in diesem Sinne wie der UV-Schutz einer Sonnencreme.

3) Schließlich können Laser sehr kurze Lichtpulse mit einer Dauer von einer milliardenstel Sekunde und weniger erzeugen.

Diese besonderen Eigenschaften von Laserlicht – die gute Fokussierbarkeit, die definierte Wellenlänge und die kurze Pulslänge – erlauben eine sehr präzise lokale Bearbeitung, in der das Material nur in einem definierten Bereich für sehr kurze Zeit

erwärmt wird. Damit ist es möglich, auch Polymerfolien als Trägermaterial zu verwenden, das heißt flexible, rollbare Solarzellen aufzubauen. Bei der Laserprozessierung wird nur die nanopartikuläre Schicht kurzzeitig erwärmt, während die Wärmelastung des Polymers minimal ist. Durch eine lokale Bearbeitung mit stark fokussierenden Optiken können die Nanopartikel in definierten Bereichen auch stärker gesintert werden. Dadurch entstehen lokal größere Strukturen (Abb. 12). Solche Strukturen streuen das einfallende Licht (ähnlich wie sich Wasserwellen an Steinen brechen), das dadurch einen größeren Weg im Elektrodenmaterial zurücklegt. Der Einbau von Streuzentren kann somit die Anzahl der in der Farbstoffschicht generierten Ladungsträger und damit die Effizienz der Solarzelle erhöhen.

Das hier gewählte Beispiel verdeutlicht die besonderen Möglichkeiten von Lasersinterventuren beim

Aufbau von Farbstoffsolarzellen. Das Verfahren ist aber keineswegs auf diese Anwendung beschränkt. Hochporöse Materialien finden Anwendung in vielen Bereichen der Energietechnik: von der Photovoltaik, Thermoelektrik und Batterietechnik bis hin zur Photokatalyse (vgl. auch die Artikel von Gabi Schierming et al., Frank Marlow et al. und Angelika Heinzl et al. in diesem Heft). In allen diesen Bereichen bieten Lasersinterventuren vielversprechende Perspektiven.

## Ausblick

Auf Basis der sehr erfolgreichen grundlegenden Entwicklungen auf dem Gebiet der Gasphasensynthese spezifischer Nanopartikel an der UDE sind inzwischen entscheidende Schritte in Richtung einer gezielten Entwicklung von Funktionsmaterialien auf Basis von Nanomaterialien gemacht worden. Eine Vielzahl von Materialien kann sehr definiert hergestellt werden, und aktuelle Forschungsarbeiten zielen darauf, diese Palette stetig zu erweitern. Für die praktische Anwendbarkeit ist die Skalierbarkeit der Syntheseverfahren von entscheidender Bedeutung; diese ist in Form des Anlagenclusters am IUTA ebenfalls demonstriert worden. Der nächste Schritt ist die Integration weiterer Verarbeitungsschritte in die Herstellverfahren, damit die im Gasphasenreaktor erzeugten Nanostrukturen auch in einem makroskopischen Material erhalten bleiben. Auch auf diesem Weg sind im Rahmen des NETZ-Projektes bereits große Fortschritte erzielt worden. Im Forschungsgebäude NanoEnergietechnikZentrum gibt es jetzt die Möglichkeit, die in diesem Artikel beschriebenen und auch weitere Technologien in den miteinander verbundenen Laboren der „Synthese-Facility“ zusammenzuführen (Abb. 13). In direkter Nachbarschaft befinden sich Labore mit spezieller Ausrüstung für die Nanoanalytik („Charakterisierungs-Facility“).





(13) Forschungsbau NETZ.  
Foto: Ulrike Bohnsack

In Kooperation zwischen Arbeitsgruppen aus verschiedenen Disziplinen und Fakultäten der UDE sowie weiteren Partnern können so neue Kombinationen von Methoden und Apparaten etabliert werden. Exemplarisch sind anhand der Vorarbeiten bereits Verarbeitungsketten ausgehend vom Synthesereaktor über einen gekoppelten in-line Abscheider für Nanopartikel aus der Gasphase in ein Dispergiermedium in Reichweite. Diese Nanopartikel in kolloidaler Form können in der nächsten Stufe zum Beispiel mit lasergenerierten Nanopartikeln funktionalisiert („dekoriert“) werden. Alternativ oder anschließend ist die weitere Prozessierung der Dispersion zu einer mit Nanopartikeln dotierten Polymerlösung möglich, aus der durch Beschichtung von Trägern oder durch Elektrosponnen makroporöse Folien zugänglich sind. Eine weitere Möglichkeit mit Blick auf Funktionsmaterialien bietet die Verarbeitung von Nanopartikeldispersionen zu Schichten, die durch Lasersintern wahlweise zu porösen oder dichten Schichten prozessiert werden. Darüber hinaus werden auch weitere Verarbeitungstechnologien, wie zum Beispiel Drucken

oder Carbonisieren, im NanoEnergieTechnikZentrum etabliert. Auf dieser Basis können in den kommenden Jahren wesentliche Impulse sowie konkrete Innovationen bei nano-basierten Materialien für die Energietechnik, beispielsweise für die Photo- und Elektrokatalyse, die Batterie- und Brennstoffzellentechnik, die Photovoltaik oder die Thermoelektrik, erwartet werden.

---

### Summary

Nanoparticle-based materials have many promising potential applications. However, a critical problem for materials development is the integration of the steps of synthesis and processing, so that the very interesting, size-dependant properties of the nanoparticles can indeed be used in macroscopic products. In this article, the various methods for gas phase synthesis of well-defined nanoparticles with specific properties are described in detail first. Some of these methods have already been scaled up so that kilograms of nanoparticles per hour can be produced. A next step is the direct transfer of nanoparticles from the gas phase reactor into liquids to enable efficient and safe further processing. Collaborative work is focused on the identification of suitable washing liquids where agglomeration of primary particles can be avoided and on the implementation of adapted methods and apparatuses for in-line preparation of liquid nanoparticle dispersions. Another approach is the coating of textile non-wovens with functional nanoparticles leading to novel filter materials with special adsorber or catalytic properties. Subsequently, two different methods using lasers are introduced. On the one hand, lasers are used to synthesize nanoparticles in situ in liquids by ablation from solid metal or metal oxide targets; these nanoparticles can then be deposited onto other support materials including nano-

particles of different structure. On the other hand, sintering of nanoparticles layers using lasers can lead to macroscopic materials with tailored porosity. Current and future collaborative activities are devoted to the step-wise adjusted or even integrated synthesis and processing of complex nanoparticle-based materials; this will provide tailored methods and modules implemented in linked facilities. From 2013, this is realized in a new research building, the Nanoenergy Technology Centre (“NETZ”). The work of the NETZ consortium will lead to significant innovations in the field of nano-based materials for energy technologies, for instance photo- or electrocatalysis, battery or fuel cell technology, photovoltaics or thermoelectrics.

---

### Anmerkungen/Literatur

- 1) W. Y. Teoh, R. Amal, R., L. Mädler, Flame spray pyrolysis: An enabling technology for nanoparticles design and fabrication, *Nanoscale* 2010, 2, 1324–1347.
- 2) S. Tsantilis, S. E. Pratsinis, Soft- and hard-agglomerate aerosols made at high temperatures, *Langmuir* 2004, 20, 5933–5939.
- 3) H. Wiggers, Novel material properties based on flame-synthesized nanomaterials, *KONA-Powder and Particle* 2009, 27, 186–194.
- 4) A. Wittmar, D. Ruiz-Abad, M. Ulbricht, Dispersions of silica nanoparticles in ionic liquids investigated with advanced rheology, *Journal of Nanoparticle Research* 2012, 14, 651–660.
- 5) J. U. Wieneke, B. Kommoß, O. Gaer, I. Prykhodko, M. Ulbricht, Systematic investigation of dispersions of unmodified inorganic nanoparticles in organic solvents with focus on the Hansen solubility parameters, *Industrial Engineering Chemistry Research* 2012, 51, 327–334.
- 6) P. Wagener, N. Bärsch, S. Barcikowski, Herstellung von Nanopartikeln und -materialien durch Laserablation in Flüssigkeiten, *Photonik* 2011 (01), 50–53.
- 7) P. Wagener, A. Schwenke, S. Barcikowski, How citrate ligands affect nanoparticle adsorption to microparticle supports, *Langmuir* 2012, 28, 6132–6140.
- 8) D. Behrenberg, S. Franzka, N. Petermann, H. Wiggers, N. Hartmann, Photothermal laser processing of thin silicon nanoparticle films: on the impact of oxide formation on film morphology, *Applied Physics A* 2012, 106, 853–861.

## Die Autoren

Hartmut Wiggers studierte von 1983 bis 1989 Chemie an der WWU Münster und der TH Darmstadt mit den Schwerpunkten Festkörperchemie und Elektrochemie. Von 1990 bis 1998 war er wissenschaftlicher Assistent am Institut für Anorganische Chemie der Universität Essen. 1993 promovierte Wiggers zu dem Thema „Untersuchung der elektronischen Eigenschaften von mit Silber-Clustern belegten Antimonaten mittels Impedanzspektroskopie“. 1998 wechselte er an die Universität Duisburg und baute den Bereich Nanopartikelsynthese am Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) auf; seit 2001 ist er Leiter der Abteilung Nanopartikelsynthese mit etwa zwölf wissenschaftlichen Mitarbeitern. Hartmut Wiggers war maßgeblich verantwortlich für die Einrichtung und den Aufbau des Bereichs Nano-Energie & Nanopartikelsynthese am Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) in Duisburg und ist seit 2009 wissenschaftlicher Berater am IUTA.

Stefan Haep stammt aus Oberhausen und hat an der Universität Duisburg-Essen Maschinenbau studiert. Hiernach war er zunächst als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energie und Umwelttechnik e.V. (IUTA), einem An-Institut der Universität Duisburg-Essen tätig, bevor er ab 1995 bis Mitte 2007 als Wissenschaftlicher Assistent und später als Oberingenieur am Lehrstuhl Verfahrenstechnik/Umwelttechnik der Universität Duisburg-Essen arbeitete. Seine Promotion erfolgte im Jahr 2000. Ab diesem Zeitpunkt war er auch im Nebenamt in die Geschäftsführung des Instituts für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) eingebunden. Mitte 2007 wurde Stefan Haep zum Vorstandsvorsitzenden und Geschäftsführer des IUTA e.V. bestellt. Weiterhin ist er mitverantwortlich für die Geschäftsführung der AiF-Mitgliedsvereinigung „Umwelttechnik“, die im Jahr 2010 in den IUTA e.V. integriert worden ist. Seit 2007 hat er einen Lehrauftrag im Rahmen der Vorlesung „Air Pollution Control“ am Lehrstuhl Thermische Verfahrenstechnik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Forschungsinteressen umfassen die Gas- und Aerosolfiltration mit dem besonderen Fokus der Bildung und Abscheidung von submikronen bis hin zu nanoskaligen Feststoff- und Flüssigkeitspartikeln durch thermische Trennverfahren, wie beispielsweise in der nassen Rauchgaswäsche. Ein weiterer Schwerpunkt seiner Tätigkeit beim IUTA e.V. gilt dem Aufbau des Zentrums für Filtrationsforschung und funktionalisierte Oberflächen, in dem unter anderem mithilfe nanotechnologischer Ansätze Filter für die Gasreinigung entwickelt werden.

Jochen Gutmann studierte Chemie an der Technischen Hochschule Darmstadt von 1990 bis 1996. Dabei verbrachte er ein Jahr als ERASMUS-Student an der Universität Bristol, wo er zusätzlich mit einem M.Sc. in Kolloid- und Oberflächenwissenschaften abschloss. Von 1997 bis 2000 promovierte er in der Gruppe von Prof. M. Stamm am MPI für Polymerforschung und arbeitete von 2001

bis 2002 als Post Doc am IPF in Dresden und der Cornell University, USA. Von 2002 bis 2010 leitete er eine Arbeitsgruppe am MPI für Polymerforschung in Mainz in der Physikabteilung von Prof. H.-J. Butt. Parallel hierzu wurde er 2005 auf eine Professur für Physikalische Chemie an der Johannes Gutenberg Universität Mainz berufen. Im Jahr 2010 wurde Jochen Gutmann auf eine Professur für Physikalische Chemie an der Universität Duisburg-Essen in Kombination mit der Geschäftsführung des Deutschen Textilforschungszentrums Nord-West (DTNW) in Krefeld berufen.

Philipp Wagener stammt aus Hameln und studierte Chemie an der Georg-August-Universität Göttingen und Lasertechnik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Von 2005 bis 2007 hatte er ein Promotionsstipendium des Verbandes für Chemische Industrie (VCI) inne und promovierte 2008 am Institut für Physikalische Chemie in Göttingen. Nach einer Post-doc-Tätigkeit am Laser Zentrum Hannover e.V. leitete er dort bis 2011 die Fachgruppe Nanomaterialien und ist seitdem am Lehrstuhl für Technische Chemie I (TCI) der Universität Duisburg-Essen und dem Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE) tätig. Seine Schwerpunkte liegen auf der laserbasierten Synthese von ligandenfreien Nanopartikeln und der Nutzbarmachung ihrer herausragenden Eigenschaften in energietechnischen Anwendungen wie der Katalyse.

Stephan Barcikowski stammt aus Salzgitter, studierte Chemie an der TU Braunschweig und der Leibniz Universität Hannover und war anschließend in der Entwicklung für den Laserhersteller Rofin-Sinar Laser AG tätig. Nach seiner Promotion im Maschinenbau im Jahr 2003 erhielt er den „1. Preis für wissenschaftliche Arbeiten“ der Stiftung Industrieforschung. Am außeruniversitären Forschungszentrum Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) baute Stephan Barcikowski die Gruppe Nanomaterialien sowie die Nachwuchs-Forscherguppe „Nanopartikel“ im DFG-Exzellenzcluster REBIRTH auf, zuletzt leitete die Werkstoff-Abteilung des LZH. Für seine Ausgründung Particular GmbH erhielt er zahlreiche Preise. Im Jahr 2011 erfolgte der Ruf auf den Lehrstuhl für Technische Chemie I (TCI) an der Universität Duisburg-Essen. Stephan Barcikowski beschäftigt sich mit dem Einsatz der flüssigkeitsunterstützten Lasermaterialbearbeitung in der Chemie, sein Forschungsgebiet erstreckt sich dabei von der prozesstechnischen Hochskalierung der laserbasierten Synthese bis hin zur Funktionalisierung von Nanopartikeln und Nanokompositen zum Einsatz in der Biotechnologie, Biomedizin und (Energie)Technik.

Nils Hartmann ist gebürtiger Bremer und hat an der Universität Bremen Chemie studiert. Bereits während des Chemiestudiums erfolgten Studien- und Forschungsaufenthalte am Centre de Recherche Paul Pascal in Bordeaux-Pessac/Frankreich und am Fritz-Haber-Institut (FHI) in Berlin. Anschließend

Forschungsarbeiten am FHI in Berlin und an der Universität Hannover schloss er 1997 mit der Promotion an der Freien Universität Berlin ab. Gefördert durch ein Forschungsstipendium der DFG folgte ein Auslandsaufenthalt an die Stanford University in Kalifornien/USA bevor er an die Fakultät für Chemie der Universität Duisburg-Essen wechselte. 2006 habilitierte er sich im Fach Physikalische Chemie (PC). Für seine Forschungsarbeiten im Bereich der Lasernanostrukturierung ultradünner organischer Schichten wurde er 2007 mit dem Gottschalk-Diederich-Baedeker-Preis der G.-D.-Baedeker Stiftung in Essen ausgezeichnet. Seit 2007 ist er Mitglied des Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE) und seit 2009 Mitglied des Nano-EnergieTechnikZentrums (NETZ). Seine aktuellen Arbeiten befassen sich allgemein mit der Entwicklung von neuen Laserverfahren zur Prozessierung von organischen und anorganischen Nanomaterialien. Hierzu gehören insbesondere neue Verfahren zum Aufbau mesoporöser Funktionsschichten aus Nanopartikeln.

Mathias Ulbricht stammt aus Dresden und hat an der Humboldt-Universität zu Berlin Chemie studiert; die Promotion erfolgte 1987. Im Anschluss war er dort als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig, unterbrochen von mehreren Auslandsaufenthalten, von denen ihn der wichtigste 1992 bis 1993 an das Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, New York, USA, führte. Von 1994 bis 1996 hatte er ein Habilitandenstipendium der DFG; die Habilitation für das Fach Organische Chemie schloss er 1998 an der Humboldt-Universität zu Berlin erfolgreich ab. Von 1997 bis Mitte 1999 folgte eine Phase als wissenschaftlicher Mitarbeiter am GKSS Forschungszentrum Geesthacht in Teltow. Im Jahr 1999 gründete Mathias Ulbricht die Firma ELIPSA GmbH in Berlin und war bis 2003 als deren Geschäftsführer tätig. Im Jahr 2001 folgte er einem Ruf auf den Lehrstuhl für Technische Chemie II (TCII) an der Universität Duisburg-Essen. Seit 2005 ist er Mitglied des Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE) und seit 2009 aktiv im Nano-EnergieTechnikZentrums (NETZ). Seine Forschungsinteressen umfassen diverse Aspekte funktionaler Polymermaterialien mit einem besonderen Fokus auf Polymermembranen und Membran-basierte Technologien. Im Rahmen von NETZ arbeitet seine Gruppe an der Abscheidung von Nanopartikeln in Flüssigkeiten sowie der Synthese von Polymer- oder Kohlenstoff-basierten Nanokompositmaterialien.

# DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

ub | universitäts  
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

**DOI:** 10.17185/duepublico/70465  
**URN:** urn:nbn:de:hbz:464-20190821-170652-2

Erschienen in: UNIKATE 43 (2013), S. 26-41

Alle Rechte vorbehalten.