

**NanoDialog**  
der Bundesregierung

## **Chancen und Risiken der Anwendung von Nanotechnologien im Automobilsektor**

26./27. September 2017

Zusammenfassung der Diskussion

Autoren: Antonia Reihlen, Till Zimmermann & Dirk Jepsen

Impressum:

ÖKOPOL GmbH  
Institut für Ökologie und Politik

Nernstweg 32–34  
D – 22765 Hamburg

[www.oekopol.de](http://www.oekopol.de)  
[info@oekopol.de](mailto:info@oekopol.de)

Tel.: ++ 49-40-39 100 2 0  
Fax: ++ 49-40-39 100 2 33

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Hintergrund</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Ablauf</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Regulierung</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Nutzen- und Risikoaspekte</b> .....	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Anwendungsbereiche und Produktbeispiele</b> .....	<b>8</b>
5.1	Übersicht .....	8
5.2	Luftfilter .....	9
5.3	Sol-Gel Beschichtungen .....	10
5.4	Sensorik, Vernetzung und Steuerung .....	10
5.5	Beleuchtung .....	11
5.6	Lithiumionen Batterien .....	12
<b>6</b>	<b>Beispiele für Lebenszyklus- und Risikobetrachtungen</b> .....	<b>12</b>
6.1	Umweltexposition und -risiken .....	12
6.2	Ökobilanz von CNT im Leichtbau .....	13
6.3	Umweltwirkungen von Batterien .....	14
<b>7</b>	<b>Mobilität in der Zukunft</b> .....	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>16</b>

## 1 Hintergrund

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit organisiert seit 2006 einen Stakeholderdialog zu Chancen und Risiken der Anwendung von Nanotechnologien. Der Dialog fand zunächst in Form einer regelmäßig tagenden Kommission statt, die zu ihrer Unterstützung Arbeitsgruppen einsetzte. Seit 2011 wird die Diskussion im Rahmen zweitägiger FachDialoge durchgeführt.

Im Juni 2016 begann die 5. Dialogphase mit einer Konferenz, auf welcher zehn Jahre Diskussion reflektiert und Themen für die aktuelle Dialogphase gesammelt wurden. Unter anderem wurde die Anwendung von Nanomaterialien im Automobilbereich als Thema vorgeschlagen und mit dem hier beschriebenen FachDialog umgesetzt.

## 2 Ablauf

Nach einer kurzen thematischen Einführung gaben zwei Referenten einen Überblick über aktuelle und sich in Entwicklung befindliche Nanotechnologeanwendungen im Automobil. Zudem skizzierten sie Trends für die Mobilität insgesamt, insbesondere in Bezug auf das „Autonome Fahren“. Zwei Stakeholder präsentierten ihre Sicht auf die Herausforderungen der Anwendung von Nanotechnologien im Automobil. Danach wurden gesetzliche Anforderungen zur Verwendung von Chemikalien im Automobilbereich hinsichtlich der Möglichkeiten, die Verwendung von Nanomaterialien zu regulieren, erläutert. Im Anschluss wurden zwei konkrete Anwendungen vorgestellt: Nanofasern zur Luftfiltration und nanotechnologische Sol-Gel Beschichtungen. Zum Abschluss des ersten Tages wurden erste Ergebnisse eines Projektes zur Modellierung von Exposition und möglichen Umweltrisiken durch die Verwendung von Nanomaterialien, unter anderem als Diesel-Additive, in Abgaskatalysatoren und in Reifen vorgestellt.

Der zweite Tag des FachDialogs begann mit einer Zusammenfassung des Vortages und der Vorstellung von ökobilanziellen Lebenszyklusbetrachtungen für die Verwendung von Kohlenstoffnanoröhrchen (**C**arbon **N**ano **T**ubes; CNT) im Automobil. Anwendungen von Nanotechnologien zur Erhöhung der Fahrsicherheit (Sensorik/Steuerung) sowie der Verbesserung der Beleuchtung (LED) wurden als Produktbeispiele im Bereich der Mikroelektronik präsentiert. Zwei weitere Anwendungsbeispiele beschäftigten sich mit den Möglichkeiten, Batterien mit nanoskaligem Silizium zu verbessern, bzw. untersuchten die möglichen Umweltentlastungen von nanotechnologisch verbesserten Energiespeichern. Zum Abschluss des FachDialogs wurden die Entwicklungen im Automobilsektor und die Rolle der Nanotechnologien zusammenfassend dargestellt und diskutiert.

Die Inhalte der Vorträge und Diskussionen beim FachDialog sind in dieser Zusammenfassung thematisch gruppiert dargestellt. Die [Vortragsfolien](#) finden Sie im Internet.

### 3 Regulierung

Das Inverkehrbringen und die Entsorgung von Automobilen sind gesetzlich in der EG-Altfahrzeugrichtlinie<sup>1</sup> und in der EG-Typengenehmigung<sup>2</sup> geregelt.

Ziel der Altfahrzeugrichtlinie ist die Verringerung von Umweltgefährdungen und die Erhöhung des Recyclings von Wertstoffen. Sie stellt daher aus der Abfallperspektive Anforderungen an das Design von Fahrzeugen. Die Richtlinie formuliert ein allgemeines Minderungsgebot für die Verwendung gefährlicher Chemikalien (Verringerung des Aufkommens gefährlicher Abfälle). Zudem beschränkt sie den Gehalt von vier Schwermetallen in Fahrzeugen, wobei hier spezifische Ausnahmen definiert sind. Nanomaterialien sind nicht spezifisch adressiert, fallen aber, wenn sie gefährliche Eigenschaften haben, unter das Minderungsgebot.

Die Altfahrzeugrichtlinie definiert quantitative Ziele für das Recycling von Altfahrzeugen. In diesem Zusammenhang stellten verschiedene Teilnehmende die Frage, ob und inwieweit Nanomaterialien im Kreislauf geführt werden können bzw. ob sie das Materialrecycling verhindern. Dies wurde insbesondere aufgrund der zunehmenden Verwendung von Kunststoffen im Automobil (Leichtbau) sowie der großen Mengenströme als wichtige Fragestellung hervorgehoben, die in der Diskussion jedoch nicht beantwortet werden konnte. Bezüglich der im Leichtbau vorherrschenden Komposite wurde jedoch berichtet, dass hier überwiegend mikroskalige Carbonfasern und (bislang) eher selten CNT verwendet werden. Eine weitere Problematik im Abfallbereich sahen einige Stakeholder darin, dass viele Altfahrzeuge nicht in Deutschland, sondern in anderen Regionen der Welt verwertet werden. Somit werden auch mögliche (Arbeitsschutz-)Risiken durch Nanomaterialien in Fahrzeugen exportiert.

Die Typengenehmigung ist im Wesentlichen ein Verfahren zur Überprüfung, ob ein neuer Fahrzeugtyp alle einschlägigen Normen einhält. Sie formuliert keine eigenständigen (nanospezifischen) stofflichen Anforderungen an Automobile, sondern referenziert u. a. auf Standards zur Sicherheit oder zu Emissionsgrenzwerten.

---

<sup>1</sup> Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge.

<sup>2</sup> RICHTLINIE 2007/46/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge.

Die Richtlinie zur Beschränkung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS-Richtlinie)<sup>3</sup> betrifft nur elektrische und elektronische Produkte, die nicht speziell für die Nutzung im Automobil konzipiert sind. In dieser Richtlinie werden Nanomaterialien jedoch explizit als mögliche Kandidaten für Verwendungsverbote in Elektrogeräten benannt. Vor dem Hintergrund zunehmender elektronischer Ausstattung von Fahrzeugen kritisierten einige Stakeholder, dass die RoHS-Richtlinie hier keine Gültigkeit hat.

Die REACH-Verordnung<sup>4</sup> regelt die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Verwendung von Chemikalien, einschließlich Nanomaterialien, auf dem europäischen Markt. Mögliche Risiken durch Nanomaterialien in Automobilen könnten prinzipiell im Rahmen verschiedener Mechanismen beherrscht werden. Dies sind unter REACH z. B. die Stoffsicherheitsbeurteilung und die Empfehlung von Risikomanagementmaßnahmen der Hersteller von Nanomaterialien, die Beschränkungen nach Anhang XVII oder eine Kommunikations- und ggf. Zulassungspflicht. Diese Mechanismen können dann greifen, wenn Nanomaterialien gefährlichen Eigenschaften haben und diese auch identifiziert bzw. bekannt sind. Im Vortrag wurde dargelegt, dass ein nanospezifisches Risikomanagement unter REACH schwer möglich ist, weil

- eine Definition für Nanomaterialien im REACH-Text fehlt;
- die Tonnageschwellen für die Registrierung (1t/a) bzw. Stoffsicherheitsbeurteilung (10t/a) von Nanomaterialien zu hoch sind;
- die Anforderungen an die chemisch-physikalische Charakterisierung von Nanomaterialien im Rahmen der Registrierung nicht ausreichen und
- die geforderten (öko-)toxikologischen Tests ebenfalls nicht ausreichen und die Testvorschriften teilweise nicht an Nanomaterialien angepasst sind.

Einige Nanomaterialien<sup>5</sup> wurden bereits oder werden in Zukunft von Behörden der Mitgliedsstaaten im Rahmen der EU-Stoffevaluation untersucht. Hieraus könnten sich weitere Maßnahmen ergeben.

Es wurde verschiedentlich darüber diskutiert, dass Nanopartikel auch durch Abrieb oder Alterung sowie die Prozesse der Behandlung von Altfahrzeugen entstehen können. Im Gegensatz zu gezielt hergestellten Nanomaterialien, für die (Produkt-)Verantwortlichkeiten für mögliche Risiken eindeutig zugeordnet und Verwendung direkt

---

<sup>3</sup> RICHTLINIE 2011/65/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Neufassung)

<sup>4</sup> VERORDNUNG (EG) Nr. 1907/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)

<sup>5</sup> SiO<sub>2</sub> und Ag (Niederlande), TiO<sub>2</sub> (Frankreich) und ZnO, CeO<sub>2</sub> sowie MWCNT (Deutschland)

adressiert werden können, sind unbeabsichtigt freigesetzte Partikel beispielsweise über die Arbeitsschutz- oder Emissionsgesetzgebung geregelt.

Zahlreiche Stakeholder bedauerten, dass die EU-Kommission bislang nur wenige Aktivitäten unternommen hat, um die Defizite der REACH-Verordnung zu beheben. Die langjährige Verzögerung einer Diskussion und Entscheidung über die Änderung der REACH-Anhänge sowie den noch nicht begonnenen Start der Konsultation zur Empfehlung der EU-Kommission für eine Nanodefinition bezeichneten viele Teilnehmende als wesentliche Quelle rechtlicher Unsicherheiten. Auch deswegen würde das zentrale Kommunikationsinstrument der Automobilindustrie über Chemikalien in Fahrzeugen - das Internationale Materialdatenmanagementsystem (IMDS) - nicht für Nanomaterialien konkretisiert.

In seiner Stellungnahme betonte der Vertreter des Bundes für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND), dass über die o. g. Anpassungen bestehender Regulierungen hinaus mehr Transparenz über die Verwendung von Nanomaterialien geschaffen werden sollte, z. B. mittels eines Produktregisters oder Deklarationspflichten für die Hersteller. Dies sei auch notwendig, um das Management zukünftiger Altprodukte effizient und sicher gestalten zu können.

## **4 Nutzen- und Risikoaspekte**

Die Nutzen der Verwendung von Nanotechnologien im Automobil können unter anderem durch einen Beitrag zur Sicherheit der Fahrzeuginsassen (und ggf. auch der Umgebung), einen gesteigerten Fahrkomfort und eine Umweltentlastung, z. B. durch mögliche Ressourceneinsparungen oder die Vermeidung des Einsatzes toxischer Stoffe entstehen.

In einigen Diskussionsbeiträgen wurde die Meinung vertreten, dass bei allen Innovationen hinterfragt werden müsse, ob ein Nutzen auch gesellschaftlich sinnvoll sei und/oder ob ein bestimmter Nutzen anders besser erreichbar ist. Der Einsatz von Nanotechnologien zur Emissionsminderung im Verkehr sei zum Beispiel sinnvoll, aber in der Vergangenheit wenig vorangetrieben worden. Hingegen wurde der gesellschaftliche Sinn von „optisch verbesserten Oberflächen“ infrage gestellt.

Des Weiteren betonten einige Teilnehmende, dass ganzheitliche Bewertungen von Innovationen im Fahrzeugbereich notwendig seien. Neben Lebenszyklusanalysen und Fragestellungen der Recyclingfähigkeit von nanobasierten Werkstoffen und Bauteilen im Automobil seien auch ethische und wirtschaftliche Betrachtungen anzustellen.

Mögliche Risiken der Anwendung von Nanomaterialien mit für die Umwelt oder den Menschen gefährlichen Eigenschaften werden dann vermutet, wenn

- eine Exposition im Herstellungsprozess von Automobilen und ihren Teilen auftritt (Arbeitsschutz);
- Nanopartikel als solche (z. B. in Lösung als Kraftstoffadditive oder in Schmierstoffen) verwendet oder gebundene Nanopartikel durch Alterung oder Abrieb in der Nutzungsphase freigesetzt werden (Umweltexposition);
- Matrixgebundene Nanopartikel in der Entsorgung freigesetzt werden und/oder wenn Materialströme durch Nanomaterialien verunreinigt werden.

Ob und inwieweit durch die oben genannten Fälle relevante Risiken für Mensch und Umwelt entstehen könnten, ist derzeit nur punktuell erforscht.

In verschiedenen Beiträgen wurde betont, dass Nanomaterialien per se nicht problematisch sind, sondern nur dann, wenn sie (öko-) toxisch wirken. Die Ermittlung der (Öko-)Toxizität sei allerdings dadurch erschwert, dass teilweise standardisierte und an Nanomaterialien angepasste Testvorschriften fehlen und die Materialien in sehr unterschiedlichen Formen und Funktionalisierungen verwendet werden, die wiederum unterschiedlich auf Mensch und Umwelt wirken können.

## **5 Anwendungsbereiche und Produktbeispiele**

### **5.1 Übersicht**

In seinem Überblicksvortrag stellte Herr Haas (Fraunhofer Allianz Nano und Fraunhofer-Institut für Silicatforschung) dar, dass Nanomaterialien und Nanostrukturen durch (die Kombination) ihre(r) teilweise neuen Eigenschaften die Entwicklung neuer Werkstoffe ermöglichen. Nanomaterialien sind bereits heutzutage essenzielle Bestandteile der Karosserie, des Motors, der Reifen, der elektrischen und elektronischen Bauteile sowie der im Fahrzeug eingesetzten Flüssigkeiten.

Herr Haas zeigte in einer Übersicht, dass die durch Nanotechnologien erzielten Werkstofffunktionalitäten von einer erhöhten Festigkeit über vergrößerte oder reaktive Oberflächen hin zu optischen Effekten und veränderten thermischen, magnetischen oder elektrischen Eigenschaften reichen. Zielsetzungen der Anwendung von Nanotechnologien seien unter anderem:

- Reduzierung des Treibstoffbedarfes bzw. der Schadstoffemissionen durch verringerte Reibung (Motor und Reifen), effizientere Verbrennung (Treibstoffadditive, Katalysatoren), verbesserte Wärmedämmung oder -leitung oder die Nutzung weiterer Energiequellen (Solardünnschichten);



- Verlängerung der Lebensdauer durch stabilere Werkstoffe (verstärkte Kunststoffe, festere Beschichtungen), Verringerung des Verschleißes (Schmierstoffe), Korrosionsschutz (Beschichtungen);
- verbesserte Reinigungsleistung von Materialien, unter anderem durch den Einsatz von Nanofasern auf Luftfiltern, easy-to-clean Oberflächenbeschichtungen, photokatalytische Lacke etc.;
- Erhöhung der Fahrsicherheit durch Sensoren und elektronische Steuerungssysteme;
- Verbesserung des Komforts, der Optik und Haptik sowie der Ausstattung des Innenraums im Allgemeinen.

Abgesehen von den Anwendungen in Flüssigkeiten, wie Treibstoff oder Schmierstoffen, in denen Nanopartikel frei vorliegen, werden in der Hauptsache Nanokomposite bzw. in Materialmatrices gebundene Nanomaterialien im Fahrzeugbau genutzt. Die Relevanz der Anwendungsbereiche und -Komponenten, die durch Nanotechnologien verbessert werden, hat sich in den letzten Jahren in Richtung der elektronischen Bauteile, dem Leichtbau sowie der Batterietechnik verschoben.

## 5.2 Luftfilter

Herr Neumann (MANN+HUMMEL GmbH) stellte in seinem Beitrag Luftfilter für den Motor- und den Automobilinnenraum vor, in denen nanoskalige Endlosfasern eingesetzt werden. Die Herstellung erfolgt durch Electrospinning. Beim Electrospinning werden Polymere aus einer Lösung ausgesponnen und direkt auf dem Filtermedium mittels Klebstoffen fixiert.

Der Einsatz der Nanofasern führt im Vergleich zu konventionellen Filtern zu höheren Abscheidegraden für verschiedene Partikelgrößen und einer höheren Staubspeicherkapazität der Filter. Werden diese Filter zur Reinigung der Motoransaugluft eingesetzt, können Schäden des Motors durch Reibung / Verschleiß verringert und Störungen des Luftmassenmessers durch Partikel vermieden werden. Im Vergleich zu anderen konventionellen Varianten können diese Filter auch die Innenraumluft im Auto in einem höheren Maß von ultrafeinen Partikeln (UFP) reinigen.

Die nanoskaligen Fasern sind „endlos“ und elastisch. Daher ist es unwahrscheinlich, dass kurze Fasern oder Partikel während der Nutzung des Filters entstehen. Zudem sind die Fasern mit Klebern auf dem Filtermedium fixiert. Daher ist davon auszugehen, dass keine Freisetzung von Nanopartikeln in der Nutzungsphase stattfindet. Dies wird im Rahmen der Qualitätssicherung firmenseitig überprüft. Am Ende ihrer Nutzungsdauer werden die Filter von Reparaturwerkstätten ausgetauscht und thermisch entsorgt.

### 5.3 Sol-Gel Beschichtungen

Verschiedene Anwendungen von Sol-Gel Beschichtungen im Automobil wurden von Herrn Wagner (Nano Tech Coatings GmbH) vorgestellt. Diese Art von Oberflächenbeschichtungen wird unter anderem an der Karosserie, aber auch an Teilen des Motors (Turbolader) verwendet. Die Beschichtungsstruktur härtet in industriellen Prozessen auf der Oberfläche aus und hat daher sehr gute Hafteigenschaften, weswegen eine Vorbehandlung, z. B. mit Chrom, entfallen kann.

Im Vergleich zu konventionellen Beschichtungen können in Sol-Gel Beschichtungen die Funktionalitäten „Schutz der Oberfläche“ und „easy-to-clean“ in verbesserter Qualität und Kombination erzielt werden. Zudem sind die Schichten sehr dünn (geringerer Ressourcenverbrauch) und auch bei extremen pH-Werten, wie sie z. B. in Waschanlagen vorkommen, beständig und abriebfest.

Nach Aussage eines Teilnehmers wurde die Umweltentlastung durch die Verwendung von Schutzlacken mit Sol-Gel Technologie in einer Studie untersucht: Durch die Verwendung geringerer Mengen an Beschichtung und Lösemitteln sowie einer Einsparung an Kraftstoffen wird im Vergleich zu konventionellen Beschichtungen insgesamt ein Umweltnutzen erreicht.

### 5.4 Sensorik, Vernetzung und Steuerung

Fahrzeuge werden zunehmend mit elektrischen und elektronischen Bauteilen ausgestattet. Diese erfüllen unter anderem Funktionen der Vernetzung und digitale Dienstleistungen (z. B. Navigation, Konnektivität mit Clouds etc.). Zudem unterstützen sie Grundfunktionen des Automobils (Beleuchtung etc.) sowie Elemente des „Autonomen Fahrens“ (z. B. Einparkhilfe).

Herr Hellenthal (Audi AG) erläuterte, dass die ausdifferenzierte elektronische Ausstattung eines Automobils, auch im Bereich der Vernetzung und Kommunikation, zunehmend von den Kundinnen und Kunden erwartet wird. Er erwartet, dass sich dieser Trend insbesondere im Zusammenhang mit dem „Autonomen Fahren“ noch verstärken wird.

Herr Hellenthal stellte die Vorteile einer differenzierten Sensorik und autonomen Fahrzeugreaktion für die Unfallprävention und die Minderung der Unfallfolgen vor. Außerdem zeigt er ein System zur Detektion von Fahrbahnunebenheiten und entsprechender Stoßdämpfung, um Fahrkomfort und Straßenhaftung zu verbessern. Die elektronischen Sensoren und Aktuatoren bestehen unter anderem aus Nanostrukturen und werden zunehmend kleiner und höher integriert. Des Weiteren werden unter anderem seltene Rohstoffe genutzt.

Von den Teilnehmern des Dialogs wurde angemerkt, dass Innovationen, welche primär auf eine Steigerung des Fahrkomforts abzielen, von solchen, die zu erhöhter Sicherheit und Effizienz beitragen, zu unterscheiden sind.

Bei den Teilnehmenden am FachDialog bestand Einigkeit darüber, dass von elektronischen Bauteilen im Automobil in der Nutzungsphase kaum (öko)toxische Risiken für Mensch und Umwelt zu erwarten sind, da in der Regel keine Freisetzung von Nanopartikeln stattfindet. In der Herstellung der elektronischen Komponenten könnten Risiken am Arbeitsplatz durch die Handhabung von Nanomaterialien in Pulverform (Staubproblematik) entstehen. Es konnte hingegen nicht geklärt werden, ob nanospezifische Risiken in der Abfallphase entstehen könnten, z. B. durch eine Freisetzung von Materialien in der Vorbehandlung und thermischen Verwertung.

Verschiedene Teilnehmende äußerten sich bezüglich der möglichen Rückgewinnung von Rohstoffen und fragten, ob speziell Nanomaterialien in den Komponenten einer Kreislaufführung von Materialien im Wege stehen. Die Reparatur hochintegrierter elektronischer Komponenten wurde nahezu ausgeschlossen und bei einem Ausfall sei ein vollständiger Austausch notwendig. Erfahrungen einiger Teilnehmer aus dem Bereich der elektronischen Geräte und Elektrogeräte zeigen, dass hier keine ausreichende Ressourcenrückgewinnung stattfindet.

## **5.5 Beleuchtung**

Herr Hiller (Osram) erläuterte in seinem Vortrag, dass sämtliche Beleuchtung und Displays im Automobil auf Halbleitertechnologien beruhen; in einem Automobil befinden sich durchschnittlich 200 LEDs. Durch Kombination unterschiedlicher Halbleitermaterialien, Puffer- und Grenzschichten können alle Lichtfarben und Lichtstärken erzeugt werden. Die Einsatzbereiche schließen Displays, optische Sensoren und „klassische“ Beleuchtung, wie Scheinwerfer und das Innenraumlicht in Automobilen ein.

Ein ökobilanzieller Vergleich von Glühlampen, Kompaktleuchtstofflampen (CFL) und LED-Lampen aus dem Jahr 2009 zeigt, dass bereits damals LED-Lampen die geringsten Umweltlasten hatten, wobei hier die Toxizität der CFL durch deren Quecksilbergehalt noch nicht berücksichtigt ist.

Herr Hiller stellte ein System zur Adaptierung der Frontscheinwerfer vor, welches eine optimale Ausleuchtung der Straße unter Vermeidung von Blendwirkungen entgegenkommender Fahrzeuge und Fußgänger erreichen soll. Hierfür werden LEDs mit elektronischen Steuerungseinheiten und Sensoren kombiniert, integriert und als „Platte“ bereitgestellt.

In der Diskussion wurde kritisch angemerkt, dass durch die LED-Technologie das Glas der Scheinwerfer nicht mehr separat getauscht werden kann, wenn diese kaputt gingen. Allerdings sind die Frontscheinwerfer so konzipiert, dass sie nicht zerstört werden können.

## 5.6 Lithiumionen Batterien

Herr Koller (Varta) zeigte in seinem Vortrag die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von siliziumbasierten Nanopartikeln als Speichermedien in Lithiumionen Batterien auf.

Eine grundlegende Herausforderung bei der Verwendung von Li-Ionen sind die Volumenänderungen des Speichermaterials von teilweise mehr als 50 % beim Laden und Entladen durch die Bildung von Li-Metall-Phasen. Siliziumbasierte Nanomaterialien könnten als Speichermaterial anstelle von Graphit eingesetzt werden, da durch die Einlagerung der Li-Metall-Phasen die absolute Volumenänderung begrenzt werden könnte. Tests mit unterschiedlichen Formen, Nanoschichten, -partikeln und -drähten aus nanoskaligen Silikaten zeigten jedoch verschiedene Nachteile, unter anderem höhere Kosten, Sicherheitsrisiken und geringere erzielbare Ladungsdichten.

Untersuchungen mit silikonbeschichteten Graphitnanopartikeln als Speichermedien zeigen zwar, dass bei einem hohen Silikongehalt, höhere Ladungsdichten erzielt und die Volumenänderungen in der Batterie beherrscht werden können. Allerdings hat diese Technologie Einbußen in der Anzahl der Ladezyklen zur Folge, da die Korrosionsschicht, welche für die Funktionsfähigkeit der Batterie wichtig ist, schneller geschädigt wird und somit schlechter wirkt. Zudem sind die Kosten, welche mit der Produktion von Batterien, die diese Partikel enthalten verbundenen sind, sehr hoch.

## 6 Beispiele für Lebenszyklus- und Risikobetrachtungen

### 6.1 Umweltexposition und -risiken

Herr Giese (Universität für Bodenkultur, Wien) stellte vorläufige Ergebnisse einer Modellierung möglicher Expositionen gegenüber Nanomaterialien aus unterschiedlichen Nanoanwendungen im Automobil vor. Für nanoskaliges Cerdioxid und Siliziumdioxid wurden Emissionsmengen aus allen bekannten Anwendungen, einschließlich als Kraftstoffadditive und Katalysatoren ( $\text{CeO}_2$ ) sowie in Reifen ( $\text{SiO}_2$ ), berechnet. Für die Expositionsmodellierung wurden zwei Szenarien gebildet: Minimale Exposition unter Annahme, dass die Nanomaterialien degradieren und maximale Exposition bei einer Akkumulation der Partikel in der Umwelt. Der Vergleich der modellierten Umweltexpositionen mit Toxizitätsdaten zeigte, dass in ca. 30 Jahren für  $\text{SiO}_2$ -Nanomaterialien ein Risiko durch Freisetzungen aus der Gesamtheit ihrer Anwendungen, von denen die Anwendungen im Automobilbereich

nur einen Teil darstellen, erreicht werden könnte. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die der Modellierung zugrunde liegenden Annahmen und Daten mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Ein Abgleich der Modellierungsergebnisse mit Messungen von Umweltkonzentrationen ist unter anderem aufgrund der natürlichen Hintergrundkonzentration dieser Partikel nur schwer möglich.

In der Diskussion um Freisetzungen von Nanomaterialien aus dem Automobil wurde für CeO<sub>2</sub>-Nanomaterialien das „end-of-life“ als zentraler Schritt im Lebenszyklus identifiziert. Hier wurden die bedeutendsten Potenziale zur Emissionsminderung gesehen. In der Abfallvorbehandlung kann z. B. das Schreddern von Automobilen zu Staubentwicklung führen. Diese Stäube bestehen aus den Materialmatrices, in denen die Nanomaterialien gebunden sind. Es werden nach Aussage einiger Teilnehmer, die sich auf Studien zu dieser Thematik bezogen, jedoch keine einzelnen Nanopartikel freigesetzt. Aus dem FachDialog zu Chancen und Risiken von Nanotechnologien im [Abfallbereich](#) wurde berichtet, dass Titandioxid in der Abfallverbrennung einerseits in der Schlacke und andererseits in den Abluftfiltern gut zurückgehalten wird. Bei CNTs wird davon ausgegangen, dass sie aufgrund der hohen Temperaturen zerstört werden. Über das Verhalten von Nanomaterialien in Deponien gab es zu diesem Zeitpunkt keine Untersuchungen. Materialbestandteile können zudem z. B. durch Abrieb in die Umwelt gelangen. Wenn die Materialmatrices altern und zerfallen, könnten darin enthaltene Nanomaterialien möglicherweise (wieder) frei in der Umwelt vorliegen. Im Fall von sehr persistenten Nanomaterialien, wie z. B. CNTs, könnten hierdurch Umweltrisiken entstehen.

## 6.2 Ökobilanz von CNT im Leichtbau

Herr Steinfeldt (Universität Bremen) stellte Ergebnisse ökobilanzieller Untersuchungen zum Ersatz von Carbon Black durch CNT in Kunststoffen (Leichtbau) vor. In den Analysen wurden Annahmen über die notwendige Konzentration von Carbon Black und CNT in der Kunststoffmatrix getroffen sowie über das Gewicht der Bauteile im Automobil. Der Ressourceneinsatz und die Emissionen pro zurückgelegter Strecke wurden bilanziert und die Effekte auf die verschiedenen Umweltwirkungskategorien der Ökobilanz quantifiziert. Aufgrund der geringen Eignung der Ökobilanz zur Darstellung toxischer und ökotoxischer Wirkungen wurden diese nicht abgebildet.

Aufgrund des hohen Energieaufwandes für die Herstellung von CNT wirkt sich laut Herrn Steinfeldts Analysen die Verwendung von CNT nur dann positiv auf die Umwelt aus, wenn hierdurch das Gewicht des Autos reduziert und dadurch Kraftstoff in der Nutzungsphase eingespart werden kann. Allerdings sei entscheidend, mit welchem Prozess die eingesetzten CNTs hergestellt würden, da z. B. der Energieeinsatz zwischen 87 und 90.000 MJ-Äquivalente / kg Material für einwandige CNT (SWCNT) betragen kann. Der Energieaufwand erhöht sich auch mit zunehmender Reinheit und Qualität der CNT.

In der Diskussion wurde berichtet, dass es mittlerweile deutlich weniger energieaufwendige Herstellungsverfahren für CNT gebe, wobei dies in der Hauptsache für Materialien mit geringeren Reinheitsgraden erzielbar sei. Zudem seien bestimmte CNT-Kunststoffkomposite aufgrund ihrer antistatischen Eigenschaften besser kreislauffähig und könnten prinzipiell gut rezykliert werden.

### 6.3 Umweltwirkungen von Batterien

Herr Weil (Karlsruher Institut für Technikfolgenabschätzung (KIT)) stellte Ergebnisse aus Lebenszyklusbetrachtungen von Batterien vor. Der Bedarf an Batterien für elektronische Geräte sowie Elektroautos steigt laut Herrn Weil seit Jahren kontinuierlich an. Zudem werden immer höhere Energiedichten bezogen auf die Masse / das Volumen von Batterien gefordert. Derzeit sind unterschiedliche Batteriesysteme in der Entwicklung, in denen auch Nanomaterialien zum Einsatz kommen.

Qualitative Expositions-betrachtungen des KIT ergaben, dass Emissionen aus Batterien hauptsächlich an deren Lebensende auftreten: Hier wird das normalerweise geschlossene System „Batterie“, teilweise unter unkontrollierten Bedingungen („Recycling“ in Ländern ohne entsprechende Entsorgungsinfrastruktur) geöffnet. Nanomaterialien können dann aus den Batterien freigesetzt werden, z. B. in Verbrennungsprozessen oder bei einer Entsorgung in Deponien.

Für eine LiFePO<sub>4</sub> Batterie wurde untersucht, wie sich der kumulierte Energieaufwand (KEA) für eine bestimmte Fahrleistung verändert, wenn diese durch den Einsatz von CNT optimiert werden. Herr Weil erklärte, dass sich der KEA für die CNT-optimierte Batterie nur dann wesentlich verringert, wenn sich zusätzlich zur Leistungsdichte auch die Lebensdauer der Batterie erhöht. Wie auch im Leichtbau (s. o.) ist der Energieaufwand zur CNT-Herstellung für die Bilanz entscheidend. Der Einfluss weiterer Faktoren auf den KEA wurde geprüft und die Lade- und Entladeeffizienz in der Nutzungsphase als weiterer wichtiger Parameter zur Umweltentlastung identifiziert. Diese Ergebnisse wurden den Produktentwicklern der Batterie präsentiert, um entsprechende Optimierungen anzuregen. Herr Weil betonte, dass die Methode der „konstruktiven Technologiebewertung“ (constructive technology assessment (CTA)), bei der unter anderem entsprechende Bilanzierungen und Bewertungen durchgeführt werden, hilfreich ist, um den Produktentwicklern zu verdeutlichen, welche (Umwelt-)Folgen mit bestimmten Produktvarianten einhergehen und welche Parameter aus Umweltsicht optimiert werden sollten.

## 7 Mobilität in der Zukunft

Herr Hellenthal (Audi AG) stellte die Vision seines Unternehmens zur Mobilität in der Zukunft vor. In diesem Szenario übernehmen Autos zunehmend eigenständig das Fahren („Autonomes Fahren“). Die Fahrzeuginsassen nutzen die Fahrtzeit für

Infotainment, Kommunikation oder Entspannung. Dafür ist der Fahrzeuginnenraum in deutlich höherem Ausmaß als heutzutage mit Bildschirmen und interaktiven Oberflächen ausgestattet. Bereits jetzt haben die Konnektivität und elektronische Ausstattung von Automobilen als Kaufkriterien gegenüber der bislang hauptsächlich nachgefragten Motorleistung an Bedeutung gewonnen. Herr Hellenthal erläuterte, dass sich unter anderem die Logistik, Pflege und Auslastung von Fahrzeugen durch das in der Vision zukünftiger Mobilität andere Nutzungsverhalten („PKW als Dienstleistungsunternehmen auf Abruf“) grundlegend wandeln würden. Voraussetzung für diese Entwicklungen seien die Nutzung redundanter, hochintegrierter und leistungsfähiger elektronischer Komponenten, Sensoren und Steuerungselektronik im Automobil. Diese müssen komplexe Verkehrssituationen erfassen und in intelligentes Fahren umsetzen können.

Die Umsetzung der Vision des „Autonomen Fahrens“ und der skizzierten „Mobilität der Zukunft“ aus Sicht von Audi setzt voraus, dass insbesondere im Bereich der Mikroelektronik sowie der Infrastruktur zur Vernetzung und Kommunikation zwischen den (Fahrzeug-)Systemen noch große Technologiesprünge stattfinden. Hierin spielen auch der Einsatz von Nanostrukturen und -materialien eine Rolle. Die Einführung des „Autonomen Fahrens“ sei jedoch zumindest in wenig komplexen Verkehrssituationen wie auf der Autobahn, bereits in kürzerer Zeit möglich, wenn eine entsprechende Netzinfrastruktur vorhanden sei.

Bereits jetzt seien die Entwicklungen so schnell, dass z. B. im Bereich der Halbleitertechnologien die Wertschöpfungsketten nicht schnell genug arbeiteten und die Automobilhersteller daher zunehmend direkt mit den Halbleiterherstellern kooperieren.

Herr Kolaric (Fraunhofer IPA - Institut für Produktionstechnik und Automatisierung), der in seinem Vortrag mögliche zukünftige Entwicklungen in der Automobilindustrie skizzierte, bestätigte die Zunahme an Elektronik im Automobil. Zudem würde sich auch die Fertigungstechnik dahin gehend entwickeln, dass menschliche Arbeit lediglich zur Kontrolle automatisierter Prozesse notwendig würde. Er stellte auch dar, dass viele Herstellungsschritte sowie die Technologieentwicklung nicht in Deutschland, sondern in Asien stattfinden. Es sei unklar, wie sich die deutsche Automobilindustrie in Zukunft auf den globalen Märkten behaupten wird.

Die Teilnehmenden teilten die Meinung, dass neue Mobilitätskonzepte für die Zukunft notwendig sind. Verschiedene Aspekte seien notwendig, um eine gesellschaftlich sinnvolle und ressourcenschonende Mobilität sicherzustellen und zu vermeiden, dass Effizienzgewinne durch eine Zunahme an Verkehr kompensiert würden. Einige Teilnehmende betonten daher, dass Verkehrsmittel miteinander kombiniert und vernetzt werden sollten. Zudem seien intelligente Lösungen notwendig, um den zeitlich ungleich verteilten Bedarf an Mobilität zu decken. Würden Automobile in

kurzer Zeit sehr viel genutzt, müssten auch die Betriebszeiten elektronischer Bauteile verlängert werden, da diese bislang auf weniger Betriebsstunden ausgelegt sind.

Wenn die skizzierten Aspekte der Vision zukünftiger Mobilität Realität würden, hätte dies nach Meinung aller Stakeholder weitgehende gesellschaftliche Veränderungen zur Folge. Diese könnten sich von Veränderungen der Qualität und Quantität von Arbeitsplätzen, den gesellschaftlichen Mobilitätsanforderungen und -möglichkeiten bis hin zu wirtschaftlichen Neuordnungen in Deutschland erstrecken. Diese Veränderungen und ihre Auswirkungen auf Forschung, Technologie, Industrie und Gesellschaft wurden in vielen Beiträgen angesprochen, konnten aber nicht in der Tiefe diskutiert werden. Hier bestand der Wunsch, die Diskussion ggf. in einem anderen Kontext fortzuführen.

## 8 Zusammenfassung

Der Einsatz von Nanomaterialien ist bereits heutzutage für die Herstellung von Fahrzeugen essenziell. Allerdings werden in der Werkstoffentwicklung unterschiedliche Ansätze erforscht; somit ist der Einsatz von Nanomaterialien eine von vielen Technologien und Optionen. Nanotechnologien werden insbesondere für Verbesserungen in den Bereichen Sicherheit, Komfort, Treibstoffverbrauch (Batterien) und Schadstoffemissionen sowie der Optik von Fahrzeugen eingesetzt. Sie sind somit in allen Fahrzeugteilen zu finden und erfüllen hier unterschiedliche Funktionen.

Der Einsatz „freier“ Nanopartikel beschränkt sich auf wenige Anwendungen, z. B. als Kraftstoffadditive oder in Schmierstoffen. In den meisten Fällen sind Nanopartikel in Matrices gebunden. Es kann daher von geringen (öko-)toxikologischen Risiken für Mensch und Umwelt in der Nutzungsphase ausgegangen werden. Nanomaterialien können grundsätzlich auch aus Entsorgungsprozessen sowie durch Abrieb oder Alterung von Bauteilen in die Umwelt eingetragen werden. Werden diese „Materialstückchen“, in der Umwelt schneller abgebaut als die darin enthaltenen Nanomaterialien, können diese als separate Partikel in der Umwelt vorkommen. Über Art und Ausmaß möglicher Risiken auf diesen Expositionspfaden liegen derzeit kaum Informationen vor.

Anstelle der bislang dominierenden Diskussion über toxische und ökotoxische Risiken des Einsatzes von Nanotechnologien gewinnt im Automobilbereich die Frage der Rückgewinnung wertvoller Ressourcen und der Recyclingfähigkeit von Materialien ein höheres Gewicht. Einerseits werden - insbesondere in den elektronischen Anwendungen – vielfach kritische Rohstoffe wie z. B. Indium, Gallium oder Seltene Erden verwendet und andererseits sind die Mengenströme im Automobilsektor groß.



Die aktuellen Trends im Fahrzeugbau deuten darauf hin, dass in Zukunft der Anteil elektronischer Komponenten im Automobil stark anwachsen wird. Diese werden weiter verkleinert und höher integriert werden, sodass auf geringem Raum viele Funktionalitäten erfüllt werden können. Dies soll einerseits das „Autonome Fahren“ von Automobilen ermöglichen und andererseits Möglichkeiten schaffen, wie die Insassen ihre hierdurch frei werdenden Kapazitäten nutzen können. Die Steigerung der Anzahl und Bedeutung elektronischer Komponenten im Automobil wurde unter anderem aufgrund einer sinkenden Reparierbarkeit sowie der derzeit nicht erkennbaren Möglichkeiten der Wiedergewinnung von (seltenen) Rohstoffen in diesen Bauteilen kritisch gesehen.

Am Beispiel des vorgestellten möglichen Szenarios zukünftiger Mobilität und des „Autonomen Fahrens“ sowie eines grundlegend veränderten Nutzungsverhaltens von Automobilen wurde erneut deutlich, dass technologische Innovationen neben Fragen nach (öko-)toxischen Risiken und möglichen Umweltauswirkungen, auch gesellschaftliche, ethische und wirtschaftliche Fragen aufwerfen. Diese konnten im Rahmen des FachDialogs nicht erschöpfend diskutiert werden und einige Teilnehmende äußerten den Wunsch, diese Aspekte weiter zu diskutieren. Es wurde auch festgestellt, dass ein ganzheitliches, interdisziplinäres und auch interministerielles Zusammenarbeiten notwendig ist, um die Entwicklungen angemessen begleiten zu können.