

viele chemische Produktionsprozesse zukünftig durch nanotechnologiebasierte verfahrenstechnische Innovationen beeinflusst werden.

Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf einem Gutachten des Fraunhofer-Instituts für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FhG-INT 2003).

5.1 Automobilindustrie

Die Automobilindustrie gilt als der Motor der deutschen Volkswirtschaft schlechthin. Im Jahr 2001 wurden dort mehr als 17 % des industriellen Gesamtumsatzes erzielt, und jeder achte in der Industrie Beschäftigte arbeitete in diesem Bereich. Außerdem entfiel 2001 ein Fünftel der gesamten Industrieinvestitionen in Deutschland auf die Automobilbranche. Auch im internationalen Rahmen ist eine steigende Bedeutung des Automobils festzustellen.

Hinzu kommt, dass die Automobilindustrie eine „High-Tech-orientierte“ Branche ist, die Spitzentechnologien relativ schnell auch einem breiten Kundenkreis zugänglich macht und, um wirtschaftlich bestehen zu können, machen muss. Daraus erklärt sich, dass gerade hier dem Bereich Forschung und Entwicklung besondere Anstrengungen gelten. Diese sind Voraussetzung sowohl für den Erfolg am Markt als auch dafür, die wachsenden sicherheitstechnischen, umweltpolitischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Automobil zu erfüllen. Mit über 14 Mrd. Euro erreichten die FuE-Aufwendungen der deutschen Automobilindustrie im Jahr 2001 knapp ein Drittel der gesamten FuE-Aufwendungen der deutschen Wirtschaft. Auf dieser Basis zählt die Automobilbranche zu den innovativsten Industriezweigen in Deutschland. Ein Indiz dafür ist auch die hohe Zahl von ungefähr 3.000 Patenten, die aus dem Automobilsektor pro Jahr angemeldet werden. Damit liegt Deutschland im Bereich von etwa einem Drittel aller weltweiten Patente auf diesem Sektor und nach wie vor deutlich vor allen anderen Staaten der Welt (VDA 2002).

Diese Dominanz sowohl in wirtschaftlicher und gesellschaftlicher als auch in technischer Hinsicht macht das Automobil zu einem besonders interessanten Untersuchungsobjekt im Hinblick auf die Entwicklung und Durchsetzung einer neuen Hochtechnologie wie der Nanotechnik.

Heute reicht das Spektrum nanotechnologischer Innovationsbemühungen im Automobilbau von bereits eingesetzten Komponenten oder Teilsystemen (z.B. reflexionsfreie Instrumentenbeschichtungen) über konkrete Entwicklungsaktivitäten (z.B. beschlagfreie Scheiben) bis hin zu visionären Produktideen mit einer allenfalls langfristigen Realisierbarkeit (z.B. selbstgestaltende Karosserien). Insgesamt erhofft man sich von der Nanotechno-

logie Verbesserungen im Hinblick auf alle für die weitere Entwicklung des Automobils relevanten Kriterien, von der Ökologie über die Sicherheit bis hin zum Komfort. Dabei ist teilweise bereits kurz- oder mittelfristig mit Fortschritten zu rechnen.

Zum Teil sind damit grundlegende neue Entwicklungen mit weit reichenden Auswirkungen auf das Produkt verbunden, zum Teil handelt es sich um Weiterentwicklungen in Teilbereichen, die, wenn überhaupt, nur zu marginalen Änderungen im Nutzwert des Automobils führen werden. Eine Bewertung der sich bietenden Möglichkeiten aus übergeordneter Sicht führt zu dem Ergebnis, dass nanotechnologische Kompetenz im Automobilbau der Zukunft zu den Kernfähigkeiten gehören wird, die zum Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit unbedingt erforderlich sind.

In der Diskussion um die erforderlichen Beiträge des Verkehrssystems zu einer nachhaltigen Entwicklung spielen ökologische Aspekte eine grundlegende Rolle, gerade auch mit Blick auf die im internationalen Maßstab zu erwartende wesentliche Steigerung der Verkehrsdichte und die damit verbundene Verschärfung der Probleme des Schadstoffausstoßes. Es zeigt sich, dass es bezüglich aller für den Kraftstoffverbrauch relevanten Kriterien Verbesserungspotenziale durch innovative nanotechnologische Entwicklungen gibt.

Gestützt werden die nanotechnologischen Entwicklungen im Automobilbau durch die ausgeprägte Querschnittlichkeit sowohl der Technik selbst als auch des Anwendungsgebietes. Auf nanostrukturierten Materialien basierende Entwicklungen gibt es z.B. auch im Maschinenbau, in der Chemie, der Elektronik oder der Energietechnik. Alle diese Technikfelder wiederum finden sich im Automobilbau wieder. Damit verbunden ist die Erwartung ausgeprägter Spin-off-Effekte, insbesondere auch von der „Lead-Industrie“ Automobilbau in andere Branchen hinein.

Insgesamt gibt es eine Vielzahl von Einzelvorschlägen zur Realisierung technischer Innovationen im Automobilbau auf der Grundlage nanotechnologiebasierter neuer Materialien. Die tiefer gehende inhaltliche Beschäftigung mit diesem Thema bedarf einer sinnvollen Einteilung des Gesamtgebietes. Hier bietet sich zunächst eine tabellarische Sortierung nach Einsatzmöglichkeiten in einzelnen Komponentengruppen oder Subsystemen des Automobils an (Abschnitt 5.1.1). Für die detaillierte Beschreibung ist eine Zusammenfassung der Einzeltechnologien zu bestimmten Anwendungsschwerpunkten sinnvoll (Abschnitt 5.1.2 bis 5.1.4).

5.1.1 Nanotechnologiebasierte Automobil-Komponenten und -Subsysteme

Die in dieser Untersuchung gewählte Gliederung der Subsysteme des Automobils unterteilt in die Einzelsektoren Fahrwerk, Triebwerk/Antrieb, Karosserie und Ausrüstung/Ausstattung. Tabelle 5.1 zeigt beispielhaft einige der wesentlichen Unterkategorien dieser Hauptbereiche.

Tabelle 5.1 Subsysteme des Automobils (FhG-INT 2003)

Fahrwerk	Triebwerk/Antrieb	Karosserie	Ausrüstung/ Ausstattung
Räder, Achsen mit Rad- aufhängungen, Federung, Bremsystem, Lenksystem, Chassis	Motor, Einspritzsystem, Motorsteuerung, Abgasanlage, Treibstoffsystem, Starter/Licht- maschine, Batterie, Kupplung, Getriebe, Gelenkwelle, Ausgleichsgetriebe, Antriebswellen	tragende Struktur, Scheiben, Türen/Klappen, Ausbauteile	Sicherheits- ausstattung, Beleuchtung, Antennen, Spiegel, Lackierung, Schließsystem, Klimatisierung/ Belüftung, Audio-/ Navigationssystem, Kommunikations- system, Bedienungselekt- ronik/-elektrik, Displays/Anzeigen, Sitze, Innenraum- verkleidung

Eine stichwortartige Zuordnung der einzelnen in der Literatur im Zusammenhang mit der technischen Ausstattung des Automobils genannten nanotechnologiebasierten Materialien zu den nach dieser Untergliederung sortierten Subsystembereichen gibt Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2 Zuordnung nanotechnologischer Anwendungen zu Subsystemen bzw. Komponenten (FhG-INT 2003)

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	Nanotechnologische Anwendung	Technischer Reifegrad
Fahrwerk	Felgen, Achsen mit Radaufhängungen	hochfeste und gleichzeitig sehr gut verformbare leichte Stähle	Erprobungsphase
	Lagerelemente in Achsen mit Radaufhängungen	abriebfeste bzw. verschleißschützende Schichten mit maßgeschneiderten tribologischen Eigenschaften	Entwicklungsphase (teilweise ist derzeit noch der Preis problematisch)
	Reifen	Nanopartikel als Füllstoff in Gummimischungen (Verbesserung von Haftung, Verschleiß und Lebensdauer)	etabliert, werden weiterentwickelt
	Produktionstechnik Reifen	Nanopartikel auf den Innenwänden von Reifenformen (bessere Ablösbarkeit des Reifens aus der Form)	Zukunft
	Radaufhängung	Nanofluide in Vibrationsdämpfern	in Stoßdämpfern bereits realisiert
Triebwerk/ Antrieb	bewegte Motorteile (Kurbel- oder Nockenwelle), Verteilereinspritzpumpen	abriebfeste bzw. verschleißschützende Schichten mit maßgeschneiderten tribologischen Eigenschaften	Entwicklungsphase (teilweise ist derzeit noch der Preis problematisch)
	Motoraufhängung	Nanofluide in Vibrationsdämpfern	Zukunft
	Motor	katalytische Beschichtung der Zylinderwände	Forschungsstadium
	Motor	Einspritzsysteme mit feinsten Löchern (Nanojets)	Forschungsstadium
	Motor	Nanospitzen für Feldemissionsschalter in Zündanlagen	werden bereits hergestellt

Tabelle 5.2 Fortsetzung

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	Nanotechnologische Anwendung	Technischer Reifegrad
Triebwerk/ Antrieb	verschiedene Aggregate	thermoelektrische Elemente zur Nutzung der Abwärme	Zukunft
	Treibstoffsystem	katalytische Nano- partikel als Zusatz im Kraftstoff	Forschungsstadium
	Kühlflüssigkeiten	Zusatz von Kupfer- Nanopartikeln oder Kohlenstoff-Nano- röhren (zur Erhöhung der Wärmeleitung und -kapazität)	Forschungsstadium
	Schmiermittel	Verschleißreduzierung z.B. durch Zusatz von Kupfer-Nanopartikeln	etabliert, Weiterentwicklung
	Glühkerzen Dieselmotor	Erhöhung der Haltbar- keit durch Verwendung Si-basierter nicht oxi- discher Keramik	Prototypenstadium
	Abgasanlage Dieselfahrzeuge	elektrostatische Filter zur Abgasreinigung	Verbesserungs- potenzial
	Abgasanlage	katalytische Nano- partikel in Katalysatoren	bereits seit Jahr- zehnten praktiziert, werden weiter- entwickelt
	Abgasanlage	nanoporöse Filter gegen Partikelemission	Zukunft
	Kraftstofftank	nanopartikelverstärkte Polymere/Nanofüllstoffe in Polymeren (Reduktion der Kohlenwasserstoff- Emissionen)	Zukunft
	elektr. Antrieb	Brennstoffzellen- Komponenten (Kataly- satoren, Membranen, Wasserstoffspeicher, Reformer)	Entwicklungs- stadium

Tabelle 5.2 Fortsetzung

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	Nanotechnologische Anwendung	Technischer Reifegrad
Triebwerk/ Antrieb	elektr. Antrieb	nanotechnologisch ver- besserte Batterien oder Kondensatoren	Forschungsstadium
Karosserie	tragende Struktur, Türen/Klappen	hochfeste und sehr gut verformbare Stähle	Erprobungsphase
	tragende Struktur, Türen/Klappen	nanopartikelverstärkte Metalle (zur Gewichts- einsparung)	Entwicklungsphase
	tragende Struktur	leichte Verbundwerk- stoffe mit Nanoröhren	Zukunft
	Ausbauteile oder Abdeckhauben oder Elektrogehäuse	nanopartikelverstärkte Polymere (Leichtbau)	zum Teil bereits realisiert
	äußere Struktur	transparente Leichtbau- werkstoffe	langfristig
	äußere Struktur	adaptive Materialien (zur Beeinflussung der Umströmung des Fahr- zeuges)	allenfalls langfristig
	äußere Struktur	adaptive Materialien („sich selbst gestaltende Karosserie“)	allenfalls sehr langfristig
	Struktur insgesamt	Antikorrosionsschichten (anorganisch/organische Hybridschichten)	Zukunft
	Struktur insgesamt	nanotechnologisch modi- fizierte Klebetechniken und Haftvermittler	realistisch bzw. in Entwicklung
	Scheiben	beschichtete Kunststoffe	realisiert
	Scheiben	IR-reflektierende Schichten	realisiert
	Scheiben	Antireflex- beschichtungen	realisiert
	Scheiben	heizbare Frontscheiben (durch großflächige Nanoschichten)	realisiert

Tabelle 5.2 Fortsetzung

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	Nanotechnologische Anwendung	Technischer Reifegrad
Karosserie	Scheiben	hydrophile Oberflächenschichten (als Anti-beschlagschichten)	Entwicklung
	Scheiben	hydrophobe Oberflächenschichten (als wasser- bzw. schmutzabweisende Schichten)	Forschung
	Scheiben	Oberflächen mit gesteuert (regenerativen) hydrophilen/hydrophoben Eigenschaften	allenfalls langfristig
	Scheiben	elektrochrome Schichten (für gesteuerte Abdunkelung)	Forschung
Ausrüstung/ Ausstattung	Spiegel	elektrochrome Schichten (für gesteuerte Abdunkelung)	realisiert
	Spiegel oder Instrumententafeln/ Displays	Antireflexbeschichtungen	realisiert
	Scheinwerferabdeckscheiben	hydrophile Oberflächenschichten (als Anti-beschlagschichten)	Zukunft
	Scheinwerfer	Scheinwerferreflektorschichtungen	realisiert
	Lackierung	mit verbesserter Kratzfestigkeit, Beständigkeit	es gibt erste Entwicklungen
	Lackierung	mit verbesserter Farbbrillanz bzw. -wirkung	zum Teil realisiert
	Lackierung	hydrophobe Oberflächenschichten (als wasser- bzw. schmutzabweisende Schichten)	Zukunft
	Lackierung	Zusatz von Kohlenstoff-Nanoröhren zur Verbesserung elektrostatischer Eigenschaften (Vorteile beim Aufbringen der Lackierung)	Zukunft

Tabelle 5.2 Fortsetzung

Subsystem	Komponenten (beispielhaft)	Nanotechnologische Anwendung	Technischer Reifegrad
Ausrüstung/ Ausstattung	Lackierung	mit schaltbaren Farben	allenfalls langfristig
	Lackierung	mit Selbstheilungseffekt (z.B. durch Selbstorga- nisation)	allenfalls langfristig
	Glas- oder Kunst- stoffoberflächen	ohne Oberflächenver- schleiß verschiebbare, aber trotzdem gut haf- tende Folien (z.B. für variablen Sonnenschutz)	Zukunft
	Autodächer oder gesamte Fahrzeugstruktur	Dünnschichtsolarzellen oder organische Zellen (z.B. zur Versorgung von Klimaanlagen)	auf Dächern gibt es erste Realisierungen (auf gesamter Struktur langfristig)
	Klimaanlage	antibakteriell wirksame Wärmetauscher	Zukunft
	elektrische Grund- versorgung des Fahrzeugs	nanotechnologisch ver- besserte Batterien oder Kondensatoren	Zukunft
	Sitze, gesamter Innenraum	nanostrukturierte Textilien (hydrophil oder hydrophob)	Zukunft
	Innenraumver- kleidung	nanopartikelverstärkte Polymere (Leichtbau)	zum Teil bereits realisiert
	gesamter Innenraum	nanotechnologisch modifizierte Klebe- techniken und Haft- vermittler	realistisch bzw. in Entwicklung

5.1.2 Nanobasierte Konstruktionswerkstoffe

Das wichtigste übergreifende Ziel bei der Entwicklung neuer Automobile ist die Erhöhung der Energieeffizienz und damit die Einsparung von Kraftstoff und die Reduzierung der Abgasemissionen. Im Bereich der Konstruktionswerkstoffe richten sich die wesentlichen diesbezüglichen Bemühungen auf die Verringerung der Gewichte und der Reibungsverluste.

Nanopartikelverstärkte Polymere werden bereits vereinzelt eingesetzt. Sie versprechen ein großes Potenzial als Konstruktionswerkstoffe. Der Schwerpunkt der Bemühungen liegt dabei auf der möglichst kostengünstigen Herstellung nicht agglomerierender Nanopulver. Anwendungsmöglichkeiten gibt es überall, wo bisher konventionelle Kunststoffe eingesetzt werden. Hierzu zählen z.B. Teile der Innenausstattung, Abdeckungen im Motorraum und Gehäuse von Elektrobauteilen. Aber auch an die Substitution ganzer Baugruppen aus metallischen Werkstoffen wird gedacht. Kraftstofftanks aus nanopartikelverstärkten Polymeren können zur Minimierung der Kraftstoffemissionen beitragen. Hier wird der Diffusionsweg der Kraftstoffmoleküle erheblich vergrößert, da sie um eingelagerte plättchenförmige Nanosilikate herum diffundieren müssen (Hohenberger 2000; König 2002; VDI 2002).

Die Nutzung von Rußpartikeln als Füllstoffe in Autoreifen ist heute Stand der Technik. Erst dadurch erhalten die Reifen die gewohnten Eigenschaften und dabei vor allem ihre gute Haltbarkeit. Durch die Einführung nanoskaliger Ruße lassen sich diese Eigenschaften weiter verbessern. Die großen Oberflächen der Nanostrukturruße führen zu erhöhten Wechselwirkungen mit den Kautschuken und damit zu einer Erhöhung des Verstärkungseffektes im Reifen. Das führt im Betrieb zu einer Reduzierung des Rollwiderstandes und zu einer Erhöhung der Haltbarkeit. Diese beiden Eigenschaftsverbesserungen gelingen unter Beibehaltung des guten Verhaltens der Reifen auf nassen Straßen. Eine weitere Verbesserung des Bremsverhaltens bei Nässe ist durch Zusatz nanoskaliger Kieselsäuren in der Lauffläche zu erreichen, der inzwischen ebenfalls zum Stand der Technik gehört (Freund/Niedermeier 1999; Rügheimer/Schiller 2002; Vilgis/Heinrich 2001; Vollrath 2002).

Auch die Eigenschaften von Metallen lassen sich durch das Einbringen nanoskaliger Phasen verbessern. Das kann durch Nanophasensegregation während einer Wärmebehandlung geschehen. So entstehen z.B. Stähle mit besonders hohen Festigkeiten bei gleichzeitig sehr guter Warmumformbarkeit. Derartige im Karosserie-Leichtbau einsetzbare Werkstoffe werden vom japanischen Stahlhersteller NKK entwickelt und befinden sich heute in der Erprobungsphase (Materials World 2001).

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Metallen soll in Zukunft durch das direkte Einbringen von nanoskaligen Teilchen aus anderen Materialien, v.a. Keramiken, z.B. in die metallischen Schmelzen erreichbar sein. In so erhaltenen nanopartikelverstärkten Metallen ist das Durchlaufen von Rissen bzw. Versetzungen erschwert. Sie sind daher bruchfester und resistenter gegenüber thermischen Wechselbeanspruchungen. Das Versetzen von Aluminium mit oxidischen Nanopartikeln beispielsweise verdoppelt die Zugfestigkeit gegenüber kon-

ventionellen Al-Mg-Si-Legierungen. Damit sind an gleicher Stelle dünnere Metallteile einsetzbar, wodurch ein weiterer wesentlicher Beitrag zum Leichtbau geleistet werden kann (König 2002; VDI 2002).

Durch die Einbeziehung solcher nanopartikelverstärkter Metalle in Beschichtungssysteme verspricht man sich wesentliche Fortschritte im Verschleißschutz von Bauteiloberflächen. Ein wichtiger Aspekt ist die deutliche Erhöhung der Beanspruchbarkeit von Oberflächen insbesondere in Motoren, Getrieben oder Turboladern. Hier sind wesentlich längere Standzeiten der Aggregate zu erwarten. Diese Entwicklung kann langfristig bis hin zu vollkommen schmierstofffreien Systemen führen („ölfreier Motor“). Konkrete Bemühungen gibt es heute z.B. um die Nutzbarmachung von Multischichten aus Nitriden für den Schutz hochbelasteter Teile in Verteilereinspritzpumpen und Pumpe-Düse-Einheiten von Dieselmotoren. Hier strapazieren Temperaturen von bis zu 250°C und Drücke von bis zu ca. 2.200 bar das Material. Entwickelt werden kostengünstig und effizient herzustellende Multischichten, die aus mehreren jeweils nur wenige Nanometerdicken Lagen aus amorphem Siliziumnitrid bestehen, in welche nanokristalline Titanitrid-Körner eingebettet sind. Bereits eingesetzt werden nanodispersionsgehärtete Chromschichten im Bereich des Ventiltriebes von Dieselmotoren. Hier werden Reibungsverluste und Verschleiß schon heute signifikant reduziert (König 2002; König et al. 2001; Langenfeld 2002; Reinhold 2001; Repenning 1999; Von der Weiden 2002).

Von besonderer Bedeutung für die Funktionserhaltung der für Konstruktionszwecke eingesetzten Werkstoffe sind die Maßnahmen zum Korrosionsschutz. Auch hier spielen Beschichtungssysteme eine wichtige Rolle. Eine wesentliche nanotechnologische Entwicklung in diesem Bereich wären praktikable Verfahren zur Applikation von anorganisch-organischen Hybrid-schichten. Diese würden die Flexibilität organischer Beschichtungen mit der Diffusionssperrewirkung bestimmter anorganischer Materialien kombinieren und chemisch mit dem Grundmaterial verbindbar sein. Damit wäre der Ersatz herkömmlicher, schwermetallhaltiger Korrosionsschutzsysteme möglich.

Von besonderer Bedeutung im Konstruktionsbereich sind auch nanotechnologisch modifizierte Klebetechniken und Haftvermittler. Mit diesen lassen sich Energie bei den Fügeprozessen sparen (Kleben statt Schweißen), umweltbelastende Klebemittel ersetzen und Recyclingprozesse vereinfachen. Eine interessante Anwendung könnte sich durch Klebstoffe ergeben, die mit magnetischen Nanopartikeln modifiziert sind. Die Hafteigenschaften dieser Klebstoffe können von außen durch elektromagnetische Strahlung gesteuert werden, indem die auf diese Weise eingekoppelte thermische Energie chemische Reaktionen oder ein thermisches Aufschmelzen bewirkt. Derartige Anwendungen werden von der Firma Sustech GmbH in Darmstadt entwickelt (VDI/FhG-INT 2002).

Visionäre Konzepte zur Nutzung der Nanotechnologie für den strukturellen Leichtbau insbesondere von Karosserie und Fahrwerk beinhalten z.B. die Nutzung von Nanoröhren als Teil von Verbundwerkstoffen. Man erhofft sich Verbunde mit erheblicher mechanischer Festigkeit, bei deutlich kleinerem spezifischen Gewicht im Vergleich zu Stahl (König 2002; König et al. 2001).

Weit reichende Auswirkungen für den Fahrzeugbau sind auch von neuen großflächigen Verschiebungskonzepten zu erwarten. Hier geht es um die Entwicklung transparenter Leichtbauwerkstoffe mit geringer Dichte, hoher Steifigkeit und Schlagzähigkeit. Neben einer verbesserten Rundumsicht durch Verzicht auf A-, B- und C-Säule hätte dieser visionäre Ansatz auch Vorteile bezüglich des Karosserie-Leichtbaus.

Weniger visionär als derartige Konzepte sind Überlegungen, die konventionellen Autoscheiben durch im Nanometerbereich beschichtete Kunststoffe zu ersetzen. Entsprechende Beschichtungen werden bereits seit einiger Zeit bei Kunststoffbrillengläsern eingesetzt. Sie verleihen z.B. Polycarbonaten die Gebrauchseigenschaften und insbesondere die Kratzfestigkeit von Mineralglas. Dadurch wird der Einsatz als Automobilverglasung möglich. Diese Entwicklung hat u.a. zur Gründung eines Joint Venture zwischen der Bayer AG und General Electric, der Exatec GmbH, geführt, welches das Ziel hat, in den nächsten Jahren auf breiter Basis kratzfest beschichtete Kunststoffe im Automobil-Sichtbereich einzuführen.

Dabei spielt nicht nur der Schutz vor mechanischem Abrieb, sondern auch der Schutz vor vergilbenden UV-Strahlen eine wichtige Rolle, um die Funktionalität über die Lebensdauer eines Fahrzeugs garantieren zu können. Dazu können sowohl gängige organische UV-Absorber als auch anorganische Nanopartikel wie Ceroxid oder Titandioxid in die Schicht integriert werden (Jonschker 2001; König 2002; VDI 2002).

5.1.3 Nanobasierte Werkstoffe für Antriebe und Energieversorgung

Eine Vielzahl von Entwicklungsbemühungen und Konzeptvorschlägen zur Nutzbarmachung von Nanotechnologien im Automobil betrifft den Bereich Energieversorgung/Antrieb. Die Überlegungen reichen hier von der Verbesserung konventioneller Komponenten z.B. im Bereich nanotechnologisch optimierter Batterien und Kondensatoren oder optimierter Schmiermittel (z.B. durch Zusatz von Kupfer-Nanopartikeln zum Motoröl) bis hin zur großflächigen Bedeckung des Fahrzeugs mit Solarzellen oder zur Nutzung vollelektrischer Antriebe auf Basis der Brennstoffzellentechnologie.

Ein möglicher Weg, zusätzliche Energie nutzbar zu machen, ist der Einsatz von thermoelektrischen Wandlern. Diese könnte man an heißen Modulen wie Zylinder im Motor oder an der Abgasanlage einschließlich des Katalysators anbringen, um zumindest einige Prozent der bisher „verschwendeten“ thermischen Energie zu gewinnen. Konkrete Überlegungen in diesem Zusammenhang gehen vom Einsatz nanokristalliner Schichten aus Halbleitern mit niedrigen Bandabständen wie InGaAs, GaSb oder SiGe aus. In diesen kommt es zu einer ausgeprägten thermoelektrischen Umwandlung, abhängig von der jeweiligen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit und basierend auf dem Seebeck-Effekt. Besonders hohe Umwandlungseffektivitäten konnten in letzter Zeit mit nanoskaligen Schichtsystemen aus Bi_2Te_3 und Sb_2Te_3 erreicht werden (König 2002; VDI 2002; Venkatasubramanian 2002).

Die wesentliche Technik zur Verminderung des Schadstoffausstoßes ist der Katalysator im Abgasstrom. Seine Wirkung beruht bereits seit seiner Einführung wesentlich auf dem Einsatz nanoskaliger Edelmetallpartikel. Jedoch gibt es auch hier neue Entwicklungen, insbesondere durch die zunehmende Bandbreite, in der man entsprechende Strukturen gezielt und kostengünstig herstellen kann. Darüber hinaus denkt man darüber nach, dem Kraftstoff direkt katalytische Nanopartikel zuzusetzen, damit bei der Verbrennung gar nicht so viele Schadstoffe entstehen. Einen ähnlichen Effekt könnte möglicherweise eine katalytisch wirksame Nanobeschichtung der Zylinderwände im Motor haben (Vollrath 2002).

Eine ebenfalls direkt im Motor wirksame Technologie zur Schadstoffminimierung wäre die Erzeugung so genannter Nanojets durch spezielle Düsensysteme im Bereich der Kraftstoffeinspritzung. Bei den hier diskutierten Abmessungen sind nicht mehr die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Hydrodynamik wirksam. Sie werden abgelöst durch eine Molekular-Dynamik. Dadurch soll eine homogene und großflächige Zerstäubung des Kraftstoffs und damit die Optimierung des Verbrennungsvorganges erreicht werden (König 2002).

Weitere Anwendungen in diesem Bereich sind Nanospitzen für Feldemissionsschalter in Zündanlagen. So werden bereits piezokeramische Nanospitzen hergestellt, die mechanische Bewegungen wesentlich effizienter in elektrische Energie umwandeln als mikrostrukturierte Piezokeramiken. Dadurch wird eine hohe Frequenz von Zündfunken und damit eine effizientere Kraftstoffnutzung möglich. Diese Technologie führt letztendlich ebenfalls zu einer Reduktion der Abgasemissionen (VDI/FhG-INT 2002).

Eine weitere anvisierte Technologie zur Schadstoffminderung sind nanoporöse Filtersysteme zur Minimierung der Emission von Partikeln im Nanometerbereich, die sowohl im Otto- als auch vor allem im Dieselmotor

entstehen und denen ein kanzerogenes Potenzial zugesprochen wird. Die geeigneten Nanoporen können z.B. durch Ätzverfahren hergestellt werden. Ihre Wirkung beruht auf der rein mechanischen Absperrung des Durchgangs für Partikel oberhalb einer bestimmten Größe und/oder der katalytischen Umwandlung derselben an den entsprechend beschichteten Innenseiten der Poren. Die Nanotechnologie bietet darüber hinaus die Möglichkeit, effektivere elektrostatische Filter zur Abgasreinigung in Dieselfahrzeugen zu realisieren (König 2002).

Wesentliche Bedeutung für den Kraftstoffverbrauch eines Autos hat seine aerodynamische Gestaltung. Hier könnten nanotechnologische Komponenten sowohl in der Sensorik als auch in der Aktorik eine feinfühligere Anpassung der Umströmung des Fahrzeuges an die jeweilige Fahrsituation ermöglichen. Derartige Verfahren würden auch zu einer deutlichen Reduktion der Fahrgeräusche beitragen und als miniaturisierte „elektronische Spoiler“ eine adaptive Fahrdynamikregelung erlauben. Technisch haben die hier angedachten Möglichkeiten Ähnlichkeit mit dem aus der Natur bekannten Haihaut-Effekt. Für die Sensorik ist dabei z.B. an hochempfindliche Nano-Silizid-Systeme und für die Aktorik an so genannte Nanomuskeln aus Kohlenstoff-Nanoröhren gedacht. In utopischen Konzeptvorschlägen werden letztere sogar für eine adaptive Karosserie vorgeschlagen, deren Form sich auch makroskopisch je nach Fahrsituation oder Kundenwunsch umgestalten lässt (König 2002; König et al. 2001).

Bereits heute sind mit Solarzellen bestückte Schiebedächer als Sonderausstattung für Fahrzeuge verschiedener Hersteller bestellbar. Sie dienen im Wesentlichen zur aktiven Belüftung während des Parkens, z.B. wenn das Auto in der prallen Sonne steht. Eine Nutzung des Dachbereichs könnte weitere Anwendungen eröffnen, z.B. die Notstromversorgung nach einem Unfall. Bei Beschichtung ganzer LKW-Dächer sind Leistungen im Kilowatt-Bereich und damit die Einspeisung überschüssiger Energie in das Batterie-System denkbar. In diesem Zusammenhang wird natürlich eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades der einsetzbaren Dünnschicht-solarzellen angestrebt. Hier könnte die Nanotechnologie erhebliche Beiträge leisten, z.B. durch das gezielte Einbringen so genannter Germanium-Nanodots in eine Silizium-Schicht oder durch das Aufbringen ultradünner Antireflexionsbeschichtungen.

Eine entscheidende Steigerung solar erzeugbarer Leistung wäre erreichbar, wenn die gesamte Karosserieoberfläche zur Energieversorgung durch Sonnenlicht nutzbar wäre. In derartigen Konzepten spielen Farbstoff-Solarzellen eine grundlegende Rolle. Dabei werden Farbstoffmoleküle und nanoporöse Titandioxid-Partikel mit einem Elektrolyten gemischt und zusammen mit geeigneten Elektroden in die Außenhaut integriert. Die Stromerzeugung ist nur wenig vom Einfallswinkel des Sonnenlichtes ab-

hängig. Farbstoffsolarzellen befinden sich heute im Stadium von Forschung und Entwicklung. Ein Einsatz im Automobilbau ist eher langfristig denkbar (König 2002; König et al. 2001).

In verschiedenen, teilweise bereits sehr weit fortgeschrittenen Projekten zur Energieversorgung einzelner Hilfsaggregate oder sogar des gesamten (dann vollelektrischen) Antriebs spielen Brennstoffzellen die entscheidende Rolle. Diese gehören damit zu den wichtigsten Zukunftsoptionen im Hinblick auf eine umweltfreundliche und nachhaltige Mobilität. Ihre allgemeine, vom Auto zum Teil unabhängige technische Weiterentwicklung wird in den verschiedensten Einzelbereichen durch Fortschritte bei Nanotechnologien gefördert.

Je nach Typ des Brennstoffzellensystems wird ein vorgeschalteter Reformier zur Herstellung von Wasserstoff aus einer fossilen Ausgangssubstanz benötigt. Hier liegen Anwendungsmöglichkeiten für die Nanotechnologie im Bereich der Einspritzung der Wasserstoffträgersubstanz und im Bereich des Katalysators für die Umwandlungsreaktion. Im Bereich der Einspritzung lägen die Vorteile der Nanometerabmessungen in der Erreichbarkeit eines sehr fein verteilten und damit hochreaktiven Tröpfchen-Strahls. Die Wirksamkeit des Katalysators lässt sich durch die Erhöhung der inneren Oberflächen vergrößern. Die hier vorgesehenen Nanoporen sind z.B. mit der Technologie des Selbstorganisierten Ätzens herstellbar.

Wenn man auf den Reformier verzichten will, dann braucht das System eine Komponente zur Speicherung des benötigten Wasserstoffs. Mit einer prognostizierten Speicherfähigkeit von mehr als 10 Gew.-% H_2 galten hier Kohlenstoff-Nanotubes lange Zeit als das aussichtsreichste Material, das ein Zehntel des Bedarfs an Tankvolumen heutiger Drucktanks versprach. Ausführliche Testreihen mit diesem Werkstoff führten aber lediglich zu erreichten Kapazitäten von um die 2 Gew.-% H_2 . Trotzdem wurde die Erforschung von Nanofasern zur Wasserstoffspeicherung nicht aufgegeben.

Auch in der Brennstoffzelle selbst sind entscheidende Verbesserungen durch die Nanotechnologien möglich. Hier geht es um die verschiedensten Maßnahmen, von der Vergrößerung reaktiver Oberflächen bis hin zur weiteren Minimierung benötigter Schichtdicken von Elektroden oder Membranen. Insgesamt sollen so eine Erhöhung des Wirkungsgrades sowie eine Verringerung des Brennstoffverbrauchs, der Emissionen und auch der Kosten von Brennstoffzellen erreicht werden (König 2002; König et al. 2001).

5.1.4 Nanobasierte funktionale Schichten auf kundenrelevanten Flächen

Die für den Nutzer offensichtlichsten Einsatzmöglichkeiten für Nanotechnologien liegen im Bereich der direkt wahrnehmbaren Oberflächen des Autos, von der Lackierung über die Verscheibung bis hin zum Cockpit. Hier gibt es eine Vielzahl von Ideen und zum Teil bereits verwirklichten Anwendungen.

Eine bereits seit längerem praktizierte Standardanwendung sind Scheinwerferreflektorbeschichtungen. Sowohl die hauchdünne Barrieregrundierung des Reflektors als auch die aufgedampfte Aluminium-Reflexionschicht und die Korrosionsschutzoberfläche sind nur einige Nanometer dick. Die wesentlichen Vorteile gegenüber konventionellen Beschichtungen liegen in einem höheren Reflexionsgrad und damit einer höheren Lichtbrillanz sowie in einer längeren Haltbarkeit (Rügheimer/Schiller 2002).

Auch im Bereich von Wärmeschutzverglasungen und beheizbaren Frontscheiben gibt es bereits Lösungen auf der Grundlage der Nanotechnologie. Sie basieren auf der Nutzung nanoskaliger Multilayer-Interferenzbeschichtungen. Eine gleichzeitige Realisierung beider Effekte, also Wärmeschutz und Beheizbarkeit, gelingt durch das Aufbringen einer ultradünnen Beschichtung auf Silberbasis auf die Innenseite der äußeren Verbundglasscheibe. Diese reflektiert die einfallende Wärmestrahlung und gestattet gleichzeitig auf Grund ihrer elektrischen Leitfähigkeit eine flächige Beheizung der Scheibe ohne störende Heizdrähte. Vorteile sind eine verbesserte Sicht durch beschlag- und eisfreie Scheiben sowie ein erhöhter Klimakomfort für die Fahrzeuginsassen (Langenfeld 2002; Rügheimer/Schiller 2002).

Eine ebenfalls bereits realisierte Anwendung ist der Einsatz von Anti-reflexionsbeschichtungen auf Abdeckscheiben im Displaybereich. In der Photoindustrie dienen ähnliche Systeme bereits seit Jahrzehnten zur Herstellung vergüteter Optiken. Allerdings waren für diese Anwendung immer vakuumgestützte Verfahren erforderlich. Dabei kann die Fertigung nur in kleinen Chargen in Bedampfungsanlagen stattfinden und ist relativ teuer. Für einfachere Anwendungen wie die Entspiegelung von Instrumentenabdeckungen im Automobil sind derartige Beschichtungsprozesse zu aufwändig. Deshalb ist hier viele Jahre lang nach Alternativen gesucht worden. Eine Lösung wird heute von der Firma Schott angeboten. Dabei kommen beidseitig im Tauchverfahren aufgebrauchte interferenzoptische Sol-Gel-Schichten zum Einsatz. Diese haben Dicken im Nanometerbereich und bestehen im Wesentlichen aus Siliziumdioxid und Titandioxid. Sie können die Reflexion einer Scheibe von 8 % auf 1 % verringern.

Es besteht ein großes Interesse daran, diese oder eine ähnliche Technologie auch für die Verringerung der Reflexionen an der Windschutzscheibe anzuwenden. Sollte dies gelingen, hätte man wesentlich größere Freiheiten beim Design und vor allem bei der Farbgestaltung des Innenraumes. Selbst ein ausgesprochen helles Armaturenbrett würde dann nicht mehr zu störenden Blendwirkungen an der Frontscheibe führen. Allerdings gibt es hier immer noch grundsätzliche Schwierigkeiten mit der Haltbarkeit der Schichten insbesondere an der Außenseite der Scheibe (Hedderich 2001; Langenfeld 2002; Rügheimer/ Schiller 2002).

Ein weiteres interessantes Feld für Nanotechnologien sind elektrochrome Beschichtungen. Bereits verwirklicht sind derartige Systeme bei automatisch abblendenden Rückspiegeln. Sie basieren auf einem aufgedampften Schichtsystem aus Lithium, Cer und Wolframtrioxid. Eine sich ändernde Intensität des auftreffenden Lichtes wird über zwei Photozellen erfasst. Diese veranlassen eine Änderung der an das Schichtsystem angelegten elektrischen Spannung und damit eine Diffusion von Lithiumionen in die Wolframtrioxid-Schicht hinein oder aus ihr heraus. Eine dort ablaufende reversible chemische Reaktion bewirkt, dass der Spiegel abgedunkelt oder aufgehellt wird. Als besonderer Vorteil dieser Technologie ergibt sich eine Erhöhung der Fahrsicherheit auf Grund der stufenlosen und dabei automatisch, also ohne Ablenkung des Fahrers, ablaufenden Unterdrückung der störenden Blendreflexe.

Auch bei diesem Effekt ist man an einer Übertragung auf die Verschleibung des Fahrzeugs interessiert. Hier verspricht man sich davon eine Reduzierung der Sonneneinstrahlung und damit eine Verringerung der Innenraumerwärmung sowie einen je nach Fahrsituation anpassbaren allgemeinen Blend- und Sichtschutz. Probleme bei der weiteren Entwicklung dieser Technologie gibt es derzeit jedoch noch mit den zu langen Schaltzeiten des Systems, mit dem zu geringen erreichbaren „Hub“, also dem Unterschied zwischen „ganz hell“ und „ganz dunkel“, sowie mit den zu hohen Kosten (Elektronik 2002; Langenfeld 2002; Rügheimer/Schiller 2002).

Wesentlichen Einfluss auf Fahrsicherheit und Komfort haben die Benetzungseigenschaften der Fahrzeugoberflächen gegenüber den allgegenwärtigen Wassermolekülen. Hydrophil beschichtete Oberflächen können für die Herstellung beschlagfreier Scheiben genutzt werden, die von Wasser ohne Tropfenbildung großflächig benetzt werden.

Die hydrophilen Eigenschaften entstehen hier durch Aufbringen einer chemisch modifizierten, einseitig polaren Nanoschicht. Dazu nutzt man eine gezielte Anbindung bzw. Einlagerung von Tensiden bzw. Hydroxyl-Gruppen in den oberflächennahen Bereich des Beschichtungswerkstoffes. Anwendungsmöglichkeiten werden in der Beschichtung der Scheiben-Innenseiten, der Außenspiegel oder der Scheinwerferabdeckscheiben gese-

hen. Neben der Steigerung des Komforts verspricht man sich dadurch eine wesentliche Verbesserung der Fahrsicherheit auf Grund der freien Sicht bzw. der besseren Ausleuchtung der Straße.

Im Bereich der beschlagfreien Scheiben gibt es eine Reihe von Entwicklungsaktivitäten und prototypischen Anwendungen. Eine Serienproduktion ist aber noch nicht in Sicht. Neben den hohen Kosten gibt es Probleme mit den Schichtdicken, die auf Grund des Entstehens optischer Interferenzfarben optimiert werden müssen. Außerdem verfügen derzeit herstellbare Schichten über zu geringe Abriebfestigkeiten und Härten. Auch andere Fragen der Langzeitwirksamkeit sind noch zu klären. Am ehesten ist wohl mit der Einsetzbarkeit auf den Innenseiten der Scheinwerferabdeckscheiben zu rechnen, da hier die mechanische Belastung der Oberfläche relativ gering ist (Langenfeld 2002; Langenfeld et al. 2001; Rügheimer/Schiller 2002).

Als Anwendung wasser- bzw. schmutzabweisender Beschichtungen im Automobilbau wird an eine hydrophobe Beschichtung der Außenspiegel oder der Außenseite der Windschutzscheibe gedacht, wo man möglicherweise ganz auf den Scheibenwischer verzichten und damit zu einer weiteren Gewichts- und Bauraumreduzierung beitragen möchte. Ob man jedoch auf den Scheibenwischer wirklich verzichten kann, ist zumindest umstritten. Probleme gibt es hier insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten, bei Sprühregen oder bei nassem Schnee.

Außerdem gibt es Überlegungen, auch die Lackoberflächen oder die Radfelgen hydrophob zu machen, umso durch Verringerung des Reinigungsaufwandes eine Komfortsteigerung zu erreichen.

Für die Herstellung hydrophober Beschichtungen stehen zahlreiche Prozesstechniken zur Verfügung. Sie können z.B. durch Einreibe- oder Sprühverfahren appliziert werden. Von grundsätzlicher Bedeutung ist dabei die Erzeugung einseitig unpolarer Nanoschichten, die insbesondere durch fluorierte organische Verbindungen gebildet werden können. Solche Schichten sind heute hinsichtlich ihrer wasserabweisenden Eigenschaften erfolgreich getestet. Trotzdem ist vor einem verbreiteten Einsatz im Automobilbau noch eine Vielzahl von Fragen zu lösen. Die Probleme liegen ähnlich wie bei den hydrophilen Systemen, also insbesondere bei den Kosten sowie bei den mangelhaften mechanischen Eigenschaften und der Langzeitwirksamkeit. Auch die angedachte Fähigkeit zur Selbstausheilung bzw. Regeneration im Beschädigungsfall ist noch weit von einer technischen Realisierung entfernt.

Abhängig vom Wetter oder der konkreten Fahrsituation könnte es hilfreich sein, entweder eine hydrophile oder eine hydrophobe Oberfläche, z.B. auf der Windschutzscheibe, zu haben. Damit ist die Frage nach entsprechend schaltbaren Oberflächensystemen angesprochen. Für deren Realisie-

zung gibt es heute aber nur erste Ansätze bzw. Ideen. Ihre Erforschung befindet sich noch in einer sehr frühen Phase (Langenfeld et al. 2001).

Das gezielte Einstellen der Benetzungseigenschaften ist auch für sämtliche im Innenraum des Fahrzeugs eingesetzten textilen Oberflächen von großem Interesse. Hier können nanostrukturierte Textilien den Klimakomfort verbessern, indem sie z.B. einen verbesserten Feuchtigkeitstransport vom Körper der Insassen weg ermöglichen. Auch eine verringerte Anschmutzbarkeit bzw. eine leichtere Schmutzlösbarkeit sind erreichbar. Hydrophobe nanostrukturierte Oberflächen spielen außerdem eine Rolle im Zusammenhang mit der Entwicklung antibakteriell wirksamer Wärmetauscher in Klimaanlageanlagen (König et al. 2001).

Von besonderer Bedeutung für den Markterfolg eines Automobils ist seine äußere Erscheinung. Diese wird auch durch die Farbgebung, also die Lackierung, beeinflusst. Von Bedeutung für den Lackiervorgang könnte hier die Verbesserung der elektrostatischen Eigenschaften des flüssigen Lacks durch Zugabe geladener Kohlenstoff-Nanoröhren werden. Darüber hinaus eröffnet die Nanotechnologie gerade für die fertige Lackierung vielfältige Möglichkeiten zur Erzeugung verschiedener, auch ganz neuartiger Farbeffekte. Diese werden im Wesentlichen dadurch möglich, dass auch die Wellenlänge des Lichtes im Bereich von einigen hundert Nanometern liegt.

Im Vordergrund steht die Herstellung von Effektpigmenten. Diese bestehen aus kleinen Glimmerplättchen, die natürlich gewonnen und mechanisch aufbereitet werden. Inzwischen werden jedoch auch synthetisch hergestellte Plättchen aus Silizium- oder Aluminiumoxid verwendet. Diese werden mit dünnen, nur wenige nanometerdicken Schichten aus Metalloxiden, beispielsweise aus Titan- oder Eisenoxid, beschichtet. Mit Hilfe dieser Pigmente erhält man einen Perlglanzeffekt.

Dieser Effekt entsteht durch das Zusammenwirken von drei unterschiedlichen Wechselwirkungen des Lichtes mit den Pigmentoberflächen. Ein Teil des Lichtes wird direkt an der glatten Oberfläche des Pigments reflektiert, ein anderer Teil an den Phasengrenzen der plättchenförmigen Partikel vielfach reflektiert, so dass man einen Effekt der Tiefe erhält. Außerdem treten Interferenzen auf, wie sie an dünnen Schichten, deren Dicke im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegt, allgemein beobachtet werden. Diese geben der Farbe eine leicht opalisierende Wirkung. Mit Titanoxid beschichtete Glimmerplättchen, deren Farben durch die Dicke der Titanoxidschicht bestimmt werden, sind schon seit 30 Jahren im Einsatz.

Zur weiteren Erhöhung der Produktattraktivität ist es möglich, durch Einbringen so genannter Nanowhisker in den Lack richtungsabhängige Farbeffekte zu erzeugen. Außerdem denkt man daran, Automobillacke mit schaltbaren Farben zu entwickeln. Auch hier könnte die Nanotechnologie einen entscheidenden Beitrag liefern. Allerdings steht man dabei noch am

Anfang der Überlegungen. Das Gleiche gilt für die Entwicklung selbstheilender Lacke, die Kratzer oder Beschädigungen der Korrosionsschutzschicht selbstständig beseitigen sollen. Dabei könnten so genannte selbstorganisierende Nanostrukturen eine Rolle spielen, die Störungen des Systems gezielt durch Reorganisation beheben können (Hilarius 2002; König et al. 2001; Langenfeld 2002; Laser Magazin 3/2002; MINATECH Information Day 2001).

Erste prototypische Anwendungen gibt es dagegen bereits mit superkratzfesten Lacken, die vom Institut für Neue Materialien in Saarbrücken entwickelt worden sind. Diese basieren auf dem Einbringen von nanoskalierten Keramikpartikeln und haben nahezu die Kratzfestigkeit von mineralischem Glas. Außerdem lassen sie sich mit den üblichen Lackierverfahren verarbeiten. Ähnliche Entwicklungen der Firma Degussa basieren auf dem Zusatz nanoskaliger Kieselsäuren zum Lack (Bild der Wissenschaft 9/2002; Degussa o.J.)

5.2 Luft- und Raumfahrt

Nanotechnologiebasierte Materialien werden mittel- bis langfristig erhebliche Anwendungspotenziale in der Luft- und Raumfahrttechnik finden. Nanomaterialien könnten insbesondere dazu beitragen, die Kosten für den Betrieb von Luft- und Raumfahrtssystemen durch den Einsatz leichtgewichtiger, hochfester Strukturwerkstoffe und damit verbundene Gewichts- und Energieeinsparungen deutlich zu senken. Darüber hinaus wären eine Erhöhung der Funktionalität und Zuverlässigkeit von Luft- und Raumfahrtssystemen durch verbesserte Funktionsmaterialien, Sensoren und Instrumente sowie die Realisierung neuer Systemkonzeptionen für Luft- und Raumfahrzeuge denkbar.

Während in der zivilen Luftfahrt leichtgewichtige Strukturwerkstoffe den Schwerpunkt der Anwendungspotenziale von Nanomaterialien bilden, sind deren Einsatzmöglichkeiten in der Raumfahrt wesentlich vielfältiger. Dies liegt zum einen an der Vielzahl unterschiedlicher Technologie- und Anwendungsfelder, die von der satellitengestützten Erdbeobachtung, Telekommunikation und Navigation über die wissenschaftliche Erforschung des Weltraums und die bemannte Raumfahrt bis zum Raumtransport reichen. Zum anderen erfordern die extremen Umgebungsbedingungen (Strahlung, Vakuum, mechanische Stöße und Vibrationen, große Temperaturschwankungen etc.) den Einsatz äußerst widerstandsfähiger und hochbelastbarer Werkstoffe und Komponenten, die durch nanotechnologische Lösungsansätze ermöglicht werden (Luther 2003). Als weiterer Faktor für die Verwendung nanotechnologiebasierter Materialien in der Raumfahrt ist der