

thema

F O R S C H U N G



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

2/2006



Intelligente Materialien

Heiße Mischung

Organische Komposite für
effizientere Solarzellen

Seite 4

Hohe Spannung

Elektroaktive Polymere
– so gut wie Muskelgewebe

Seite 68

FRAGENANWORTEN

Harter Wettbewerb

Navigations-Technologie
Galileo: Zukunft des Verkehrs

ab Seite 84

Liebe Leserin, lieber Leser,



die Fähigkeit zur Entwicklung neuer und verbesserter Materialien zählt sicherlich in zunehmendem Maße zu den Schlüsselkompetenzen einer modernen Industrie- und Wirtschaftsnation. Um es aber gleich zu sagen: einen Intelligenztest mit Günther Jauch würden die hier vorgestellten Materialien bestimmt nicht bestehen. Trotz der begrifflichen Unschärfe der Adjektive „intelligent“ oder „smart“ im Zusammenhang mit Materialien bezeichnet man so in durchaus treffender Weise Materialien, die die Fähigkeit besitzen, auf verschiedene Umwelteinflüsse unterschiedlich zu reagieren. Ein bekanntes Beispiel, das Brillenträger vielleicht auf der Nase sitzen haben, sind sogenannte phototrope Gläser, die sich bei großer Helligkeit tönen und in Dunkelheit aufhellen: Das Material reagiert in „intelligenter“ Weise auf die jeweils vorherrschenden Lichtverhältnisse. Ein weiteres prominentes Beispiel sind sogenannte Formgedächtnislegierungen, die sich an ihre geometrische Gestalt „erinnern“ können. Verformt man eine solche Legierung bei einer bestimmten Temperatur, so nimmt sie bei einer höheren Temperatur wieder ihr ursprüngliches Aussehen ein. Zwar wissen die wenigsten Menschen, dass hier eine martensitische Phasenumwandlung stattfindet, erfreulich ist aber, dass Infarktgefährdeten Personen mit einer Stütze aus einer solchen Formgedächtnislegierung die Herzkranzgefäße lebensrettend aufgeweitet werden können.

Dass Wissenschaftler der TU Darmstadt auf dem Gebiet der intelligenten Materialien forschen, ist nicht nur eine Reverenz an Athene, die Schutzpatronin unserer Universität und griechische Göttin der Weisheit und Intelligenz. Natürlich wollen die Materialwissenschaftler der TU Darmstadt sich auch an den Bemühungen beteiligen, unsere Zukunft durch leistungsfähige und intelligente Materialien zu verbessern. In diesem Heft versuchen wir, Ihnen aktuelle Ergebnisse im Bereich moderner Materialforschung aus über zehn Fachgebieten und vier Fachbereichen der TU Darmstadt anschaulich zu machen.

Einen breiten Raum nehmen dabei piezoelektrische Materialien ein, die mechanischen Druck in elektrische Spannung und umgekehrt übersetzen können. In der Elektrotechnik ist man an intelligenten Dielektrika und Halbleitern interessiert, die unsere mobilen Kommunikationsmöglichkeiten weiter optimieren werden. Und in der chemischen Materialwissenschaft arbeitet man an smarten Polymeren, Kunststoffen und Katalysatoren. Nanomaterialien fehlen ebenso wenig wie magnetische Materialien, in denen man den Spin der Elektronen nutzen möchte, sowie Materialien, die man aus der Tintenstrahlpatrone gleich in einen Schaltkreis drucken kann. Ein weiterer an der TU Darmstadt betriebener, zukunftsweisender Ansatz ist die Untersuchung von intelligenten Komposit- und Hybridwerkstoffen, hier am Beispiel der Energiegewinnung durch Photovoltaik. Wenn schon einzelne Materialien das Attribut „intelligent“ erhalten haben, was können wir dann erst bei einer Verbindung mehrerer dieser Materialien erwarten?

Damit bleibt mir nur noch, Ihnen eine unterhaltsame und vor allem bildende Lektüre zu wünschen – und vielleicht sehen Sie dann an der einen oder anderen Stelle in Ihrem Alltag, sei es beim Autofahren, beim Telefonieren oder beim Arztbesuch, klarer, wo „intelligente“ Materialien jetzt schon Ihr Leben verbessern.

Prof. Dr. rer. nat. Lambert Alff

Inhaltsverzeichnis

Organisch/anorganische Komposite für die Photovoltaik

Thomas Mayer/Eric Mankel/Ulrich Weiler/
Maxime Monnoyer/Wolfram Jaegermann

Lassen sich die spezifischen optoelektronischen Vorteile organischer Pigmente und anorganischer Halbleiter in einem Kompositmaterial vereinen? Erste Schritte auf dem Weg zu Solarzellen aus organisch/anorganischen Kompositen.

Seite 4

Entwicklung neuer oxidischer Piezowerkstoffe

Klaus Seifert/Thorsten Schlegel/Jürgen Rödel

Piezoelektrische Werkstoffe erfordern intensive Forschung, um neuen Anwendungen sowie gesetzlichen Bestimmungen gerecht zu werden.

Seite 10

Nadelförmige Speicherleuchtstoffe für die medizinische Diagnostik

Jörg Zimmermann/Sabine Hesse/
Heinz von Seggern

Röntgenaufnahmen verbessern bei möglichst geringer Strahlenbelastung? Nadelförmige Bildplatten könnten es möglich machen...

Seite 14

Schadensüberwachung mit Wandlermaterialien

Roland Platz/Andreas Büter/Dirk Mayer/
Holger Hanselka

Schadensüberwachung durch Wandlermaterialien in mechanischen Leichtbaustrukturen: Nicht nur das Fliegen wird sicherer.

Seite 20

Agil und flexibel: Neue Materialien für die Kommunikation von morgen

Rolf Jakoby/Yuliang Zheng/Alexander Gäbler

Immer mehr Informationsübertragung in der Zukunft durch agile Funktionswerkstoffe in der Hochfrequenztechnik.

Seite 28

Keramische Materialien mit integrierter Sensorik

Ralf Riedel/Liviu Toma/Ralf Hauser

Nanoskaliger Werkstoffaufbau in modifizierten Siliconen: Wie ein Heizelement seine Temperatur selber messen könnte.

Seite 34

Breit- und engbandige Halbleitermaterialien

Dimitris Pavlidis

Breit- und engbandige Halbleitermaterialien für Terahertz-Anwendungen in Kommunikation und Biomedizintechnologie: Mit Nanotechnologie von der Herstellung zum Bauteil.

Seite 38

Die spinnen, die Oxide: Neue Materialien für die Spintronik

Lambert Alff

In der Spintronik nutzt man nicht nur die Ladung, sondern auch den Spin der Elektronen: Die Vision einer spinbasierten Elektronik der Zukunft.

Seite 42

Herstellung und Charakterisierung von Nanodrähten

Wolfgang Ensinger/Reinhard Neumann

Nanodrähte sind wichtige Komponenten für Systeme in der Nanotechnologie, die auf intelligenten Materialien basieren.

Seite 48

Größe entscheidet – Magnetische Nanopartikel in der Computersimulation

Karsten Albe/Michael Müller

Magnetische Nanopartikel sind faszinierende Objekte mit hohem Anwendungspotenzial. Atomistische Computersimulationen helfen beim Verständnis der größenabhängigen Eigenschaften.

Seite 52

Impressum

thema Forschung 2/2006

Herausgeber: Präsident der TU Darmstadt

Redaktion: Jörg Feuck

Moderation: Prof. Dr. rer. nat. Lambert Alff

Verlag: Verlag für Marketing und Kommunikation GmbH & Co. KG, Faberstraße 17, 67590 Monsheim, Tel. 0 62 43/90 90

Layout: Kirberg Design, Hünfelden

Druck: VMK Druckerei, Monsheim

Maßgeschneiderte Katalysatoren im Baukastensystem

Christina Roth/Marian Mazurek/Nathalie Benker

Katalysatoren maßschneidern im Do-it-yourself-Verfahren ähnlich dem Lego-Baukastensystem: Katalysatordesign aus der Perspektive der Anwender.

Seite 58

Druckbare Intelligenz?

Roland Schmechel/Gabi Schierning

Materialien, die sich wie Tinte verdrucken lassen, aber darüber hinaus eine elektronische Funktionalität aufweisen, sind schwierig zu realisieren. Aber es gibt Fortschritte ...

Seite 64

Muskeln unter Hochspannung – Antriebe mit elektroaktiven Polymeren

Helmut F. Schlaak/Peter Lotz/Marc Matysek

Lautlose Antriebe durch Festkörperaktoren: Funktionswerkstoffe, die sich durch elektrische Stimulation verformen und natürlichem Muskelgewebe entsprechen.

Seite 68

Smarte Kunststoffe und neue Entwicklungsmethoden

Martin Moneke/Marta Lucka-Gabor/Sergül Acikalin Gülmüs/Shilpa Khare

Kombinatorisches Compounding: eine Erfolg versprechende Methode zur Entwicklung und Optimierung von Kunststoff-Werkstoffen für Medizintechnik, Automobilbau und andere innovative Branchen.

Seite 74

Mehr aus weniger

Torsten Finnberg/Bernd-Joachim Jungnickel/Sergej Zhukov/Heinz von Seggern

Filme aus expandierten Polymeren sind eine neuartige Materialklasse für Aktoren und Sensoren, die auf dem Piezoeffekt beruhen.

Seite 80

Navigation mit Galileo – Neue Perspektiven für Verkehrsanwendungen

Matthias Becker/Stefan Leinen

Galileo wird auf Basis neuester Technologie neue Anwendungsfelder und Dienste eröffnen. Der Beitrag gibt eine Einführung zu Galileo und stellt die neuen Möglichkeiten für Verkehrsanwendungen dar.

Seite 84

Bessere Lichtsignalanlagen mit System

Manfred Boltze/Achim Reusswig

Weniger Unfälle und weniger Staus an Lichtsignalanlagen: Wie das geht, steht in einem Leitfaden, der an der TU entwickelt wurde.

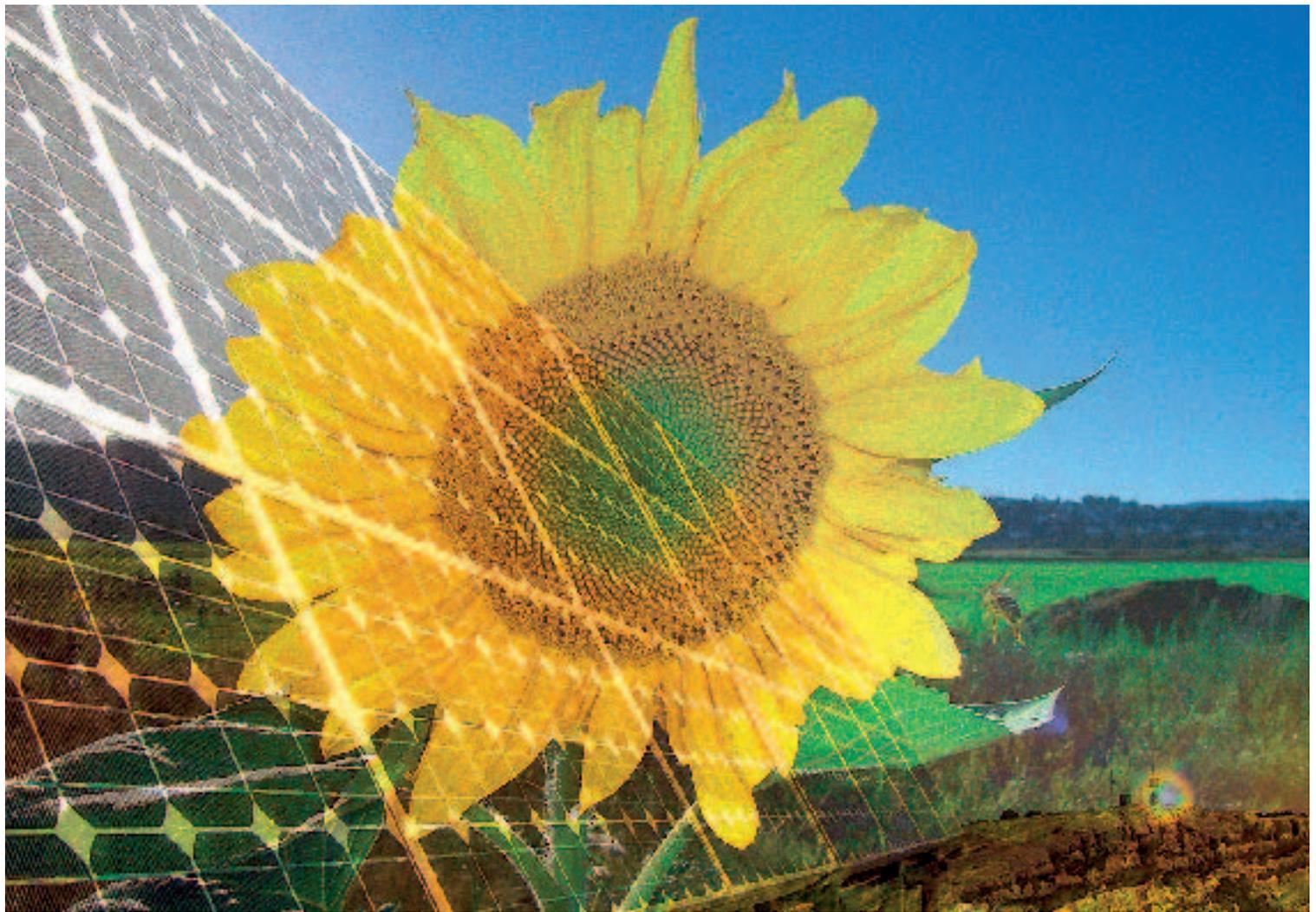
Seite 88

CargoScoreCard

Hans-Christian Pfohl/Ralf Elbert/Philipp Gallus/Moritz Gomm

Welche Potentiale gibt es, um den Verkehr sinnvollerweise von der Straße auf die Schiene zu verlagern? Ein Konzept zu Identifikation, Berechnung und Kommunikation gibt Aufschluss.

Seite 96



Organisch/anorganische Komposite für die Photovoltaik

Thomas Mayer/Eric Mankel/Ulrich Weiler/Maxime Monnoyer/Wolfram Jaegermann

Die Verbindung unterschiedlicher Materialklassen zu funktionellen Kompositen soll den Gestaltungsspielraum z.B. der optoelektronischen Materialeigenschaften erweitern. Wir untersuchen in zwei Projekten, inwieweit sich organische Farbstoffmoleküle in anorganischen Halbleiterschichten als zusätzliche Absorber von Sonnenlicht eignen. Dadurch könnte zum einen die benötigte Dicke und damit der Materialeinsatz verringert werden. Perspektivisch soll zum anderen der ausgenutzte Spektralbereich erweitert werden. Hohe theoretische Wirkungsgrade bei geringem Materialeinsatz motivieren die ersten Schritte auf dem Weg zu Solarzellen aus organisch/anorganischen Kompositen.

***Organic/inorganic composites for photovoltaic application** combining different material classes to functional composites shall open a wide range of tuning e.g. optoelectronic material properties. In two projects we investigate the possibilities of incorporating organic dye molecules into inorganic semiconductors as additional absorber centres of sunlight. Thereby the required film thickness and therewith material usage shall be reduced. On the other hand, as future prospect, the exploited range of the sun spectrum shall be expanded. High theoretical efficiencies at little material usage motivate the first steps on the way to solar cells mad of organic/inorganic composites.*

Synergie durch Materialkombination

Silizium ist als sogenannter indirekter Halbleiter eigentlich ein schlechter Lichtabsorber, daher benötigt man für Solarzellen mehrere hundert Mikrometer dicke Schichten, um das wirksame Licht komplett in elektrische Energie umzuwandeln. Dennoch werden Solarzellen fast ausschließlich aus Silizium hergestellt, weil es industriell hochrein dargestellt wird und – wiederum aufgrund der indirekten Energielücke – die angeregten Elektron-Loch-Paare lange genug überleben, um zu den Kontakten zu wandern, ohne vorher durch Rekombination verloren zu gehen. Verwendet man einen direkten Absorber, so reichen schon zwei Mikrometer aus, um das wirksame Licht vollständig zu absorbieren, aber die angeregten Elektron-Loch-Paare rekombinieren rasch. Hier untersuchen wir in einem bislang von der VolkswagenStiftung finanzierten Projekt [1], ob hochabsorbierende Farbstoffe in eine Siliziumschicht eingebaut und so die guten Transporteigenschaften des Siliziums mit den guten Absorptionseigenschaften organischer Pigmente in einem Kompositmaterial kombiniert werden können (Abb. 1). Damit die organischen Pigmente wie z.B. Zinkphthalocyanin (Abb. 2a) beim Wachsen der Composite nicht zerstört werden, scheiden wir Silizium in einem Niedertemperaturverfahren als mikrokristalline Schicht ab. Die Pigmente werden verdampft und im Wechsel mit dem Silizium auf einem Substrat kondensiert. Um den Ladungstransfer zu ermöglichen, müssen die höchsten besetzten (HOMO) und niedrigsten unbesetzten (LUMO) Valenzzustände der Pigmente an die Lage der Halbleiter-Energielücke angepasst werden (Abb. 2b).

In einem zweiten Projekt untersuchen wir, ob organisch/anorganische Komposite einen Weg eröffnen, das Sonnenspektrum besser auszunutzen zu können. Denn schon bei der Umwandlung der Energie eines Lichtquants in ein angeregtes Elektron-Loch-Paar im Halbleiter, dem ersten Schritt des photovoltaischen Prozesses, gehen 70% der Sonnenenergie verloren. Photonen mit z geringerer Energie können keine Ladungsträger über die Energielücke des Halbleiters anregen, sie werden nicht absorbiert. Photonen mit hoher Energie, größer als die Energielücke des Halbleiters, regen zwar Elektron-Loch-Paare an, aber der überschüssige Anteil geht verloren, er wird in Wärme umgewandelt. Ein weiterer thermodynamisch nicht vermeidbarer Verlustprozess ist die strahlende Rekombination. Hier sollen sogenannte Solarzellen der dritten Generation Abhilfe schaffen [2]. Als erste Generation werden nach dieser Beschreibung Solarzellen aus kristallinen Siliziumscheiben bezeichnet, die zweite Generation bilden Dünnschicht solarzellen mit aufgedampften Absorberschichten z.B. aus mikrokristallinem Silizium, Kadmiumtellurid oder Kupferindiumselenid. Bei Solarzellen der ersten beiden Generationen wird jeweils ein einzelnes Halbleitermaterial mit seiner spezifischen Energielücke zur Absorption eingesetzt. Theoretische Wirkungsgrade bis zu 63% erhält man, wenn drei Energielücken verwendet werden. Das ist das Konzept der Solarzellen der dritten Generation. Bisher wurden Tandem- und Tripelzellen entwickelt, bei denen Halbleiter mit wachsender Energielücke übereinander gestapelt sind. Nun will man mehrere Energielücken in einer

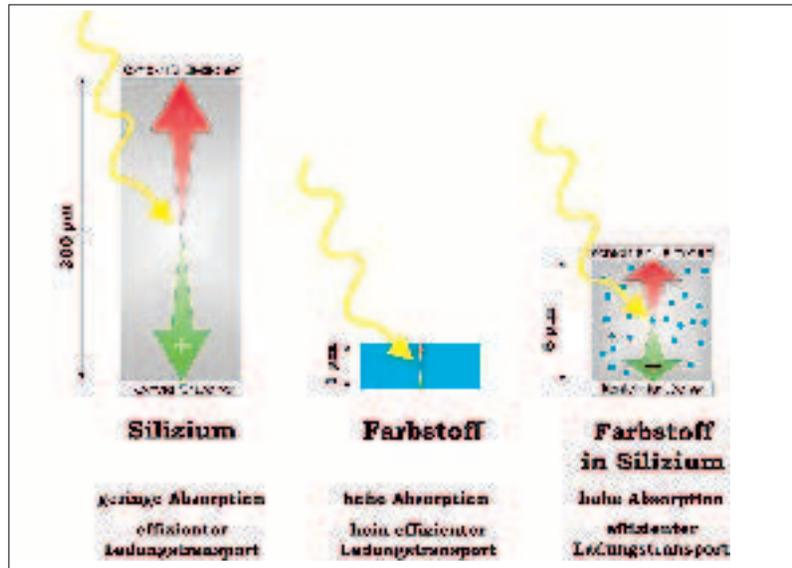


Abb. 1 Durch die Kombination der guten Licht absorbierenden Eigenschaften von Pigmenten mit den guten elektrischen Transporteigenschaften von Silizium werden bei geringer Schichtdicke hohe photovoltaische Wirkungsgrade erwartet.

High photovoltaic efficiency is expected by combining the high absorptivity of organic pigments with the excellent electronic properties of silicon.

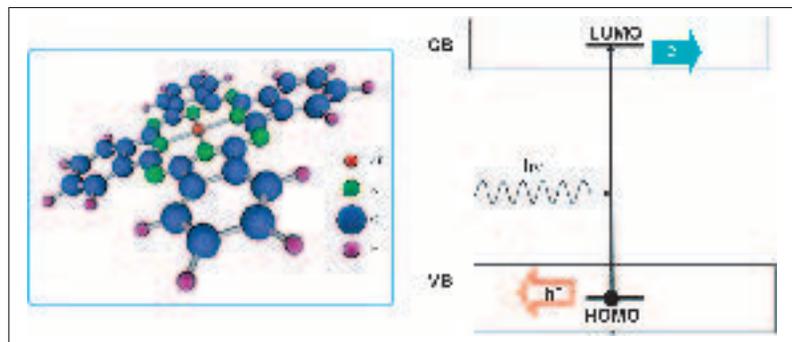


Abb. 2a Molekulare Struktur der organischen Komponente ZnPc

Molecular structure of the organic component.

Abb. 2b Schema der Lage der Elektronischen Valenzzustände HOMO und LUMO der Pigmente gegenüber Valenzband (VB) und Leitungsband (CB) der Silizium Matrix.

Schematic lineup of pigment frontier orbitals HOMO and LUMO versus silicon valence and conduction band.

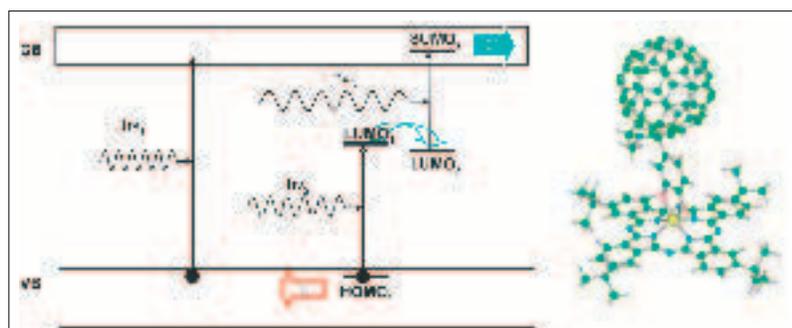


Abb. 3a Durch Einbau von Farbstoffmolekülen sollen neben Photonen mit Energien größer als die Energielücke ($h\nu_1$) auch Photonen mit geringerer Energie ($h\nu_2$, $h\nu_3$) in einem Zweistufenprozess Elektron-Loch-Paare im Halbleiter erzeugen.

Two step electron-hole pair generation is attempted by incorporating dye molecules that absorb photons of energy $h\nu_2$ and $h\nu_3$, each lower than the energy gap.

Abb. 3b Beispiel eines zu einer Dyade gekoppelten Donor-Akzeptormoleküls.

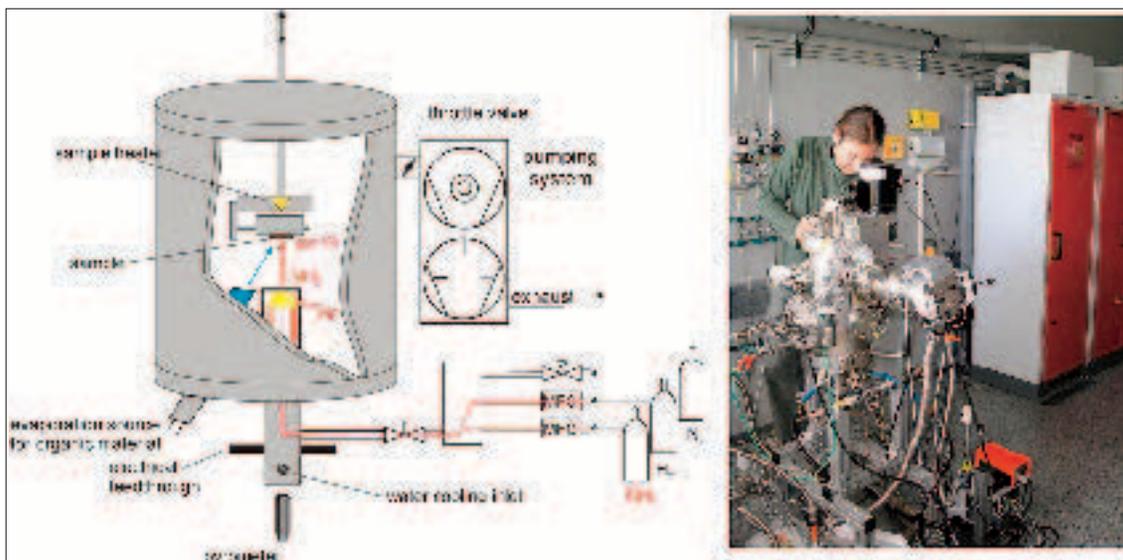
Example of dyad-coupled donor-acceptor molecule

Abb. 4a
Reaktor mit abgeschirmter Silan(SiH₄)-Quelle und Verdampferquelle für organische Pigmente.

Schematic of the reactor with hot wire silane-source shielded by a water cooled shroud from the organic pigment evaporation source.

Abb. 4b
Photografie der Depositionanlage für Komposite aus $\mu\text{-Si}$ und organischen Pigmenten.

Photograph of the reactor for the composites.



Absorberschicht vereinen, sodass verschiedene Anteile des Sonnenspektrums in einer Kompositstruktur optimal genutzt werden [3]. Bisher gibt es nur ganz wenige experimentelle Strategien hierzu [4, 5].

Unser Ansatz ist der Einbau von Pigmenten mit unterschiedlicher Energielücke, die durch Absorption von zwei Photonen niedrigerer Energie die Anregung eines Elektron-Loch-Paares in einem Wirtshalbleiter mit größerer Energielücke ermöglichen. Das Prinzip ist in Abb. 3a dargestellt: Zusätzlich zur Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren durch Absorption eines Photons der Energie $h\nu$, werden in einem Zweistufenprozess durch Absorption zweier Photonen geringerer Energie Elektron-Loch-Paare erzeugt. Wichtig ist der Übergang des angeregten Elektrons auf Pigment 1 in einen stabilen Zwischenzustand wie er beispielhaft durch den LUMO des Pigments zwei dargestellt wurde. Um diesen Übergang zu optimieren streben wir den Einsatz von gekoppelten Molekülen, sogenannten Dyaden (Abb. 3b) an.

Neben den erhofften Synergieeffekten liegen die Risiken klar auf der Hand. A: Zunächst muss geklärt werden ob es organische Pigmente gibt, die den aggressiven Wachstumsbedingungen der anorganischen

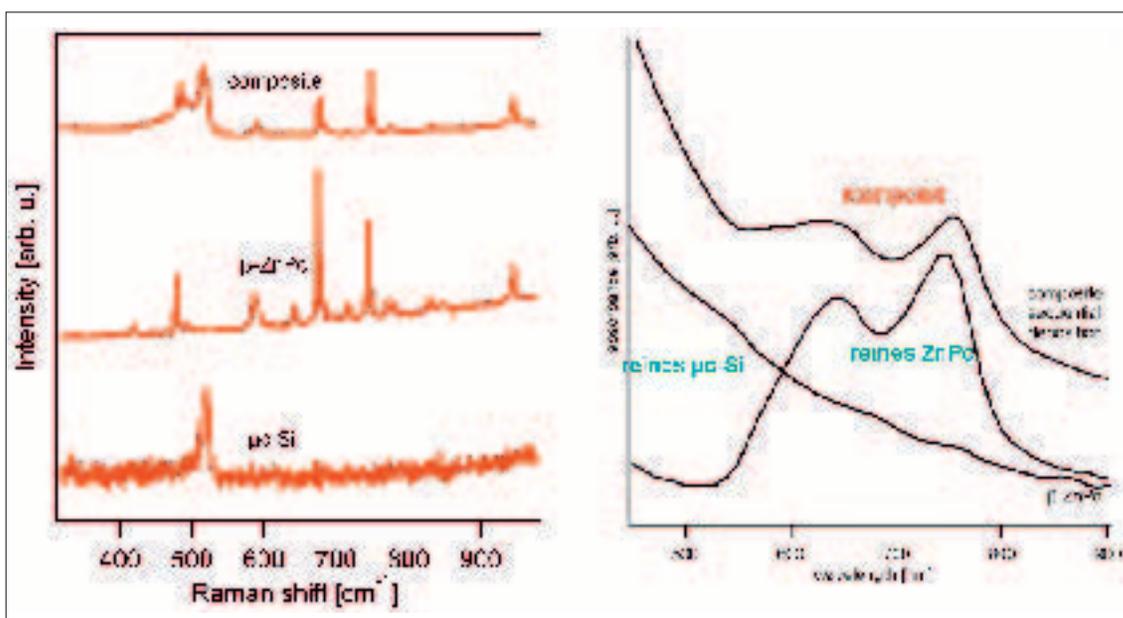
Schichten standhalten. B: Weiter muss erforscht werden, ob die Lage der elektronischen Zustände von Gastpartikeln und Wirtsmatrix zueinander z.B. durch Variation von Liganden (Fluorsubstitution) der Pigmente so eingestellt werden kann, dass der Transfer der Elektron-Loch-Paare möglich ist. C: Um einen kontinuierlichen photovoltaischen Prozess zu erreichen, gilt es zu zeigen, dass sowohl das angeregte Elektron als auch das Loch von den Pigmenten in die Halbleitermatrix übertragen werden. D: Für die Herstellung von Bauelementen muss gezeigt werden, dass unter den eingeschränkten Parameterbereichen (niedrige Substrattemperatur, sonst kondensieren die Pigmente nicht mehr) geschlossene Schichten des Kompositmaterials gewachsen werden können und nicht kleinste Löcher, sogenannte pinholes, zu Kurzschlüssen zwischen den Kontaktelektroden führen. E: Schließlich muss sich am Bauelement zeigen, ob wirklich hohe Wirkungsgrade erreicht werden und nicht etwa aufgrund der in die Matrix eingebrachten Pigmente Störstellen entstehen, die den Gewinn an zusätzlichen Elektron-Loch-Paaren durch erhöhte Rekombination zunichte machen. Bisher konnten wir positive Ergebnisse zu den Punkten A und B [6] zei-

Abb.5a
Ramanspektrum von reinem $\mu\text{-Si}$, reinem ZnPc und einem Kompositfilm. In einem engen Substrattemperaturbereich kann $\mu\text{-Si}$ und ZnPc sequentiell kodelponiert werden. Die für die Molekülstruktur charakteristischen Schwingungsbanden bleiben dabei erhalten.

Raman spectra of pure $\mu\text{-Si}$, pure ZnPc, and a composite. Sequential codeposition of $\mu\text{-Si}$ and ZnPc is possible in a narrow substrate temperature range. The Raman lines specific to the molecular structure are preserved.

Abb.5b
Absorptionsspektren von reinem $\mu\text{-Si}$, reinem ZnPc und einem Kompositfilm.

Absorbance of pure $\mu\text{-Si}$, pure ZnPc, and a composite.



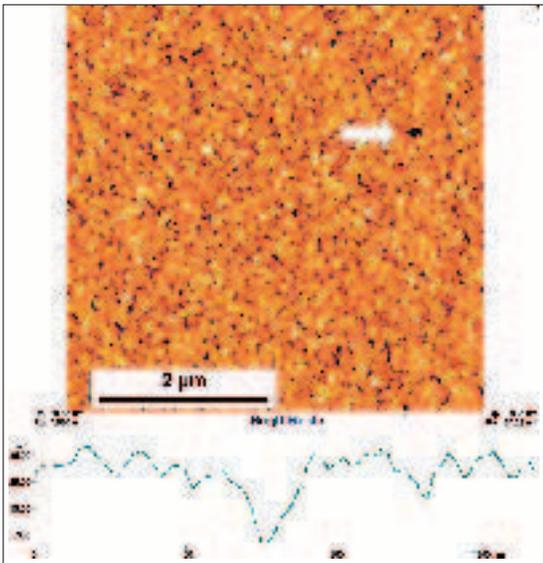


Abb. 6
ZnPc/ μ c-Si Schicht im Raster-Kraft-Mikroskop. Pinholes (Pfeil und Profil) führen noch zu Kurzschlüssen.

Scanning force micrograph of a ZnPc/ μ c-Si layer and profile of the pinhole marked by an arrow.

gen. Es konnten aber noch keine Schichten frei von pinholes (D) gewachsen werden, sodass nur indirekte Messungen auf den Ladungstransfer (C) schließen lassen.

Erste Ergebnisse

Beispiel 1: Zinkphthalocyanin in μ c-Si

Die Deposition von Siliziumschichten erfolgt aus der Gasphase in einem evakuierten Reaktor (Abb. 4a, b). Die einfachste Methode ist die Zersetzung von Silan (SiH_4) verdünnt in Wasserstoff (H_2) an einem 1700°C heißen Wolfram-Draht und Deposition auf einem mäßig heißen Substrat. Je nach Wahl der Abscheidebedingungen entstehen amorphe oder mikrokristalline (μ c) Schichten. Dabei wächst der Anteil des gewünschten μ c-Si mit höheren Substrattemperaturen. Die Zinkphthalocyaninmoleküle (ZnPc) werden aus einem geheizten Tiegel verdampft und kondensieren auf dem Substrat. Um die organischen Moleküle nicht zu gefährden, wurde der heiße Wolframdraht mit einer wassergekühlten Manschette abgeschirmt (Abb. 4a). In einem engen Substrattemperaturfenster um 260°C konnten die gewünschten μ c-Si Schichten mit unterschiedlichem Pigmentanteil gewachsen werden [7]. Bei niedrigeren Temperaturen entsteht amorphes Si, bei höheren kondensiert der Farbstoff nicht mehr. Raman-Spektroskopie ist geeignet, sowohl amorphes von mikrokristallinem Silizium zu unterscheiden, als auch den Erhalt der Molekülstruktur der Pigmente zu überprüfen (Abb. 5a). Optische Spektroskopie (Abb. 5b) zeigt im spektralen Absorptionsbereich des reinen ZnPc auch Strukturen im Komposit.

Bei den bisher abgeschiedenen Schichtdicken von ca. 100nm treten noch pinholes auf, wie die AFM-Aufnahmen (atomic force microscopy) in Abb. 6 zeigen. Das Aufdampfen von Metallkontakten führt daher zu Kurzschlüssen, weshalb keine Photoströme gemessen werden konnten. Hier muss die künftige Entwicklungsarbeit ansetzen. Erste Hinweise auf den La-

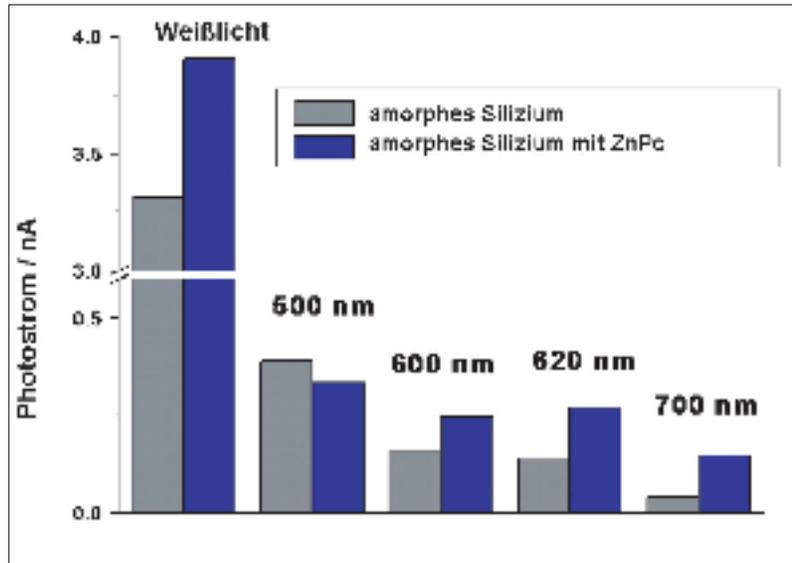


Abb. 7
Photostrom einer Schicht aus amorphem Silizium ohne und mit ZnPc Schicht. Für Weißlicht und für Wellenlängen im Absorptionsbereich von ZnPc zeigt sich ein erhöhter Photostrom.

Comparison of the photocurrent of amorphous silicon with and without ZnPc decoration. In the absorbance range of the dye the photocurrent is slightly enhanced.

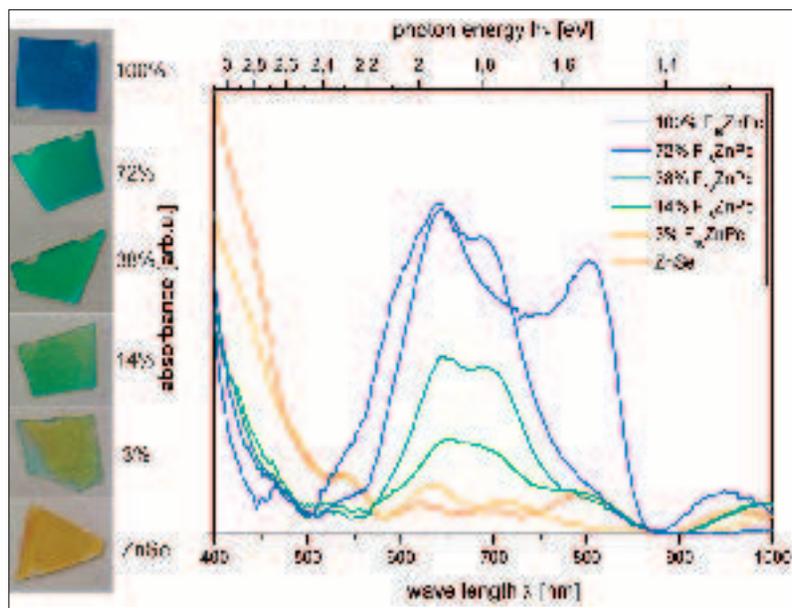
dungstransfer liefert aber der Vergleich von Photoströmen, die an einer amorphen Silizium-Schicht vor und nach Bedampfen mit ZnPc gemessen wurden (Abb. 7).

Beispiel 2: Fluordotiertes Zinkphthalocyanin in ZnSe

Auch in ZnSe lassen sich die Pigmente unter Erhalt ihrer molekularen Struktur einbauen. Wie die organischen Moleküle kann ZnSe aus einem Tiegel aufgedampft werden. Aufgrund der angepassten Lage der Molekülorbitale verwenden wir Moleküle, bei denen die äußeren Wasserstoffatome durch Fluor ersetzt wurden. Die Konzentration lässt sich in einem breiten Bereich variieren, wie der graduelle Farbverlauf von Gelb für reines ZnSe über Grün und Blaugrün zu Blau der reinen ZnPc Schicht in Abb. 8a zeigt. Der optische Farbeindruck spiegelt sich quantitativ in Absorptionsspektren wieder. Mit zunehmender Konzentration wächst die Pigmentabsorptionsbande (Abb. 8b) an.

Abb. 8a, b
Photografien und Absorptionsspektren von reinem ZnSe, Kompositen mit zunehmendem Pigmentanteil und reinem ZnPc. Die geringere Breite der Absorptionsbande weist auf intakte Moleküle in, gegenüber dem reinen Film abweichender Anordnung.

Photographs and absorbance spectra of pure inorganic ZnSe, composites with increasing organic pigment content, and a pure ZnPc film. The smaller width of the absorption band of the molecules in the composite versus in the pure film can be addressed to the different surrounding.



Verglichen mit der Absorption einer kristallinen ZnPc Schicht ist die Pigmentabsorptionsbande in der festen Lösung schmaler und ähnelt der Bande einer amorphen ZnPc Schicht.

Als nächsten Schritt werden wir zwei Farbstoffe mit unterschiedlicher Energielücke und, den Austausch von angeregten Ladungsträgern ermöglichenden, energetischen Lagen ihrer Orbitale (Abb. 3a) in ZnSe einbauen. Ein mögliches Donor-Akzeptor-Paar sind PTCDA und F_{16} ZnPc. Abb. 9 zeigt die drei Quellen, die zum Einbau in die Depositionskammer auf einen gemeinsamen Flansch montiert sind.



Abb. 9
Verdampferquellen für die Kodeposition der Halbleitermatrix ZnSe (gelb) und der beiden Pigmente F_{16} ZnPc (blau) und PTCDA (rot).
Evaporation sources of the semiconductor matrix ZnSe (yellow) and the two pigments F_{16} ZnPc (blue) and PTCDA (red) combined on a flange for codeposition.

Zusammenfassung und Ausblick

Organische Farbstoffmoleküle wurden unter Erhalt ihrer Molekülstruktur und damit ihrer optischen Eigenschaften in polykristalline Schichten aus anorganischen Halbleitern eingelagert. Die erforderliche Anpassung der Lage der elektronischen Zustände von organischen Pigmente an die Zustände des anorganischen Halbleiters konnte durch einfache Variation der Ligandenatome erreicht werden. Modellexperimente geben erste Hinweise auf den Energietransfer zwischen Pigmentschicht und Halbleitersubstrat. Als nächsten Schritt sind die Depositionsbedingungen zu optimieren, um geschlossene Kompositschichten zu wachsen, die für Bauteile unerlässlich sind. Viele weitere Optimierungsschritte sind erforderlich, um die angestrebte Effizienzsteigerung der organisch/anorganischen Komposite gegenüber reinen Halbleitermaterialien zu erreichen.

Literatur

- [1] Mayer, T., Jaegermann, W., Schlettwein, D., Wohrle, D. and Kunst, M., „Silicon-organic pigment material hybrids for photovoltaic application“, VolkswagenStiftung, Komplexe Materialien: Verbundprojekte der Natur-, Ingenieur- und Biowissenschaften, 2002-2005.
- [2] Green, M.A., „Third Generation Photovoltaics - Advanced Solar Energy Conversion“, Springer, Heidelberg, 2003.
- [3] Luque, A. and A. Marti, „Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels“, Phys. Rev. Lett. 78, 1997, pp. 5014-5017.
- [4] Yu, K.M., W. Walukiewicz, J. Wu, W. Shan, M.A. Scarpulla, O.D. Dubon, J.W. Beeman, and P. Becla, „Diluted ZnMnTe oxide: a multi-band semiconductor for high efficiency solar cells“, Phys Status Solidi B 241 (3), 2004, pp. 660-663.
- [5] Marti, A., N. Lopez, E. Antolin, E. Canovas, C. Stanley, C. Farmer, L. Cuadra, and A. Luque, „Novel semiconductor solar cell structures: The quantum dot intermediate band solar cell“, Thin Solid Films 511, 2006, pp. 638-644.
- [6] Weiler, U., T. Mayer, W. Jaegermann, C. Kelting, D. Schlettwein, S. Makarov, and D. Wohrle, „Electronic energy levels of organic dyes on silicon: A photoelectron spectroscopy study of ZnPc, F_{16} ZnPc, and ZnTPP on p-Si(111): H“, J. Phys. Chem. B 108(50), 2004, pp. 19398-19403.
- [7] Weiler, U., K. Schwanitz, C. Kelting, D. Schlettwein, D. Wohrle, T. Mayer, and W. Jaegermann, „Phthalocyanines incorporated into hot wire-CVD grown silicon“, Thin Solid Films 511, 2006, pp. 172-176.

Das Fachgebiet Oberflächenforschung an der TU Darmstadt

Im Fachgebiet Oberflächenforschung werden Materialien und Materialgrenzflächen elektronischer Bauelemente, insbesondere von Solarzellen und Batterien, entwickelt und analysiert. Die Charakterisierung reicht von der atomaren Skala der Einzelgrenzflächen bis zur Funktionsprüfung des kompletten Bauteils. Ein Kanon von Oberflächenanalysemethoden, insbesondere die Photoelektronenspektroskopie im Ultrahochvakuum (UHV), kommen zum Einsatz. Hier leisten wir Methodenentwicklung bei der Integration von industriell eingesetzten Präparationsschritten mit der Analyseeinheit. Physikalische und chemische Depositionsverfahren bis hin zu nasschemischen Reinigungs- und Abscheideprozessen werden hierzu im Labormaßstab nachgebildet und können ohne störenden Kontakt mit der Umgebung spektroskopiert werden. Neben der Analyse gegenwärtig eingesetzter Materialien und Grenzflächen gewinnen die Synthese und Charakterisierung neuer Materialkombinationen zunehmend an Bedeutung.

Adresse:

Prof. Dr. W. Jaegermann
FG Oberflächenforschung, FB 11, Material- und Geowissenschaft,
Petersenstraße 23, 64287 Darmstadt
Tel.: 06151/16-6304
E-Mail: jaegerw@surface.tu-darmstadt.de • www.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/ofl/Welcome.html



Unsere Energie. Ihr Antrieb.

EnBW Energie Baden-Württemberg AG – dahinter stehen ca. 20.000 Mitarbeiter, die sich für Strom, Gas und energienahe Dienstleistungen stark machen. Heute sind wir Deutschlands drittgrößtes Energieunternehmen und nutzen auch in Mittel- und Südosteuropa unsere Chancen.

Sie brennen darauf, Erlerntes in die Tat umzusetzen? Dann übernehmen Sie bei uns frühzeitig Verantwortung als **Praktikant w/m**, **Werkstudent w/m**, **Diplomand w/m** der Fachrichtungen Wirtschaftswissenschaften, (Wirtschafts-)Ingenieurwesen oder (Wirtschafts-) Informatik. Wir freuen uns auf junge Menschen, die Impulse aufnehmen, aber auch Impulse geben!

Informationen rund um die EnBW als Arbeitgeber, zu unseren vielseitigen Einstiegs- und Förderprogrammen sowie aktuelle Jobangebote finden Sie unter www.enbw.com/karriere.

Mit Energie in Ihre Zukunft. Jetzt!



EnBW

Energie
braucht Impulse

Entwicklung neuer oxidischer Piezowerkstoffe

Klaus Seifert/Thorsten Schlegel/Jürgen Rödel



Piezoelektrische Werkstoffe haben in den letzten Jahren viele neue Anwendungsbereiche erschlossen, beispielsweise in der Medizin bei Ultraschallgeräten oder im Automobilbau in der Kraftstoffeinspritzung beziehungsweise bei Einparkhilfen. Die neuen Anwendungsbereiche sowie eine neue Gesetzgebung und Umweltbedenken führen dazu, dass Materialien mit deutlich verbesserten Eigenschaften und aus gesundheitlich unbedenklichen Stoffen verstärkt gesucht werden.

Development and design of novel oxide piezo ceramics Piezoelectric materials have recently entered a wide range of new applications, e. g. in healthcare ultrasonic imaging devices, in automotive industry fuel injection systems and parking assistance systems. The new applications, environmental concerns as well as a recently introduced legislation require increased research efforts into new materials with enhanced properties which do not pose any health risks.

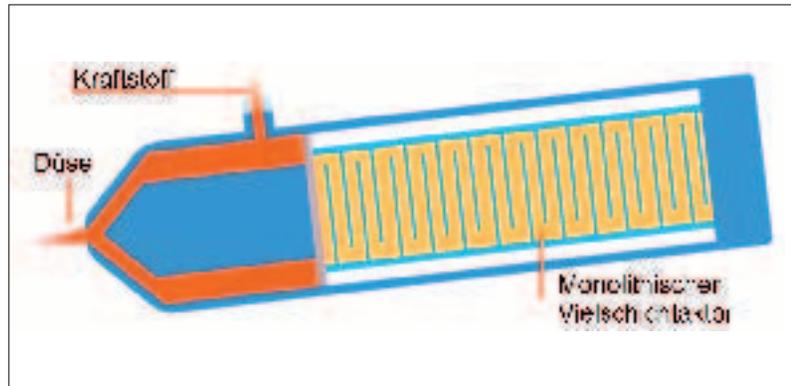
Piezoelektrische Werkstoffe sind Werkstoffe, die unter mechanischer Belastung ein elektrisches Feld erzeugen. Eine alltägliche Anwendung ist die Verwendung in Piezofeuerverzeugen, die durch Betätigung einer Drucktaste einen elektrischen Funken erzeugen, der das Gas entzündet. Dies stellt jedoch nur einen verschwindend geringen Anteil an der kommerziellen Verwendung dar. Der Großteil aller piezoelektrischen Keramiken wird im Automobilbau (Treibstoffeinspritzung, Sonar für Einparkhilfen), in der Medizin (Ultraschallgeräte) sowie in Mikrofonen, Lautsprechern, Quarzuhren, U-Bootsanaren und Drucksensoren in Industrie und Forschung verwendet.

Entdeckung und Geschichte

Der piezoelektrische Effekt wurde zum ersten Mal von Pierre Curie, dem Ehemann von Marie Curie, und von seinem Bruder Jacques Curie im Jahre 1880 anhand von verschiedenen Kristallen beschrieben. Ihre Entdeckung stieß sofort auf großes wissenschaftliches Interesse und innerhalb kurzer Zeit war bekannt, dass Kristalle, um piezoelektrisch zu sein, eine asymmetrische Kristallstruktur aufweisen müssen. Von 1880 bis ca. 1920 wurden alle Kristallklassen ermittelt, die piezoelektrisch aktiv sein können und mathematische Zusammenhänge zwischen verschiedenen physikalischen Größen wie Dehnung, elektrisches Feld und Temperatur erforscht. Ab 1910 wurden piezoelektrische Materialien zur Verwendung in Sonargeräten für U-Boote erforscht und auch kurz vor Ende des Ersten Weltkriegs bis zur Einsatzfähigkeit perfektioniert. Der Erfolg bei den Sonargeräten führte dazu, dass in den nächsten 20 Jahren weitere Anwendungsgebiete erschlossen wurden. Bis 1940 waren piezoelektrische Elemente schon in der Materialprüfung in Form von Ultraschallgeräten, als reaktionsschnelle Drucksensoren zum Beispiel zur Messung von Explosionsdrücken in Verbrennungsmotoren sowie in verbesserten Viskositätsmessgeräten vorhanden. Das heute am häufigsten verwendete Material ist PZT, in welchem Blei den weißen Ionenplatz (Abb. 2) besetzt und Zirkon und Titan sich den schwarzen Ionenplatz teilen. Es wurde um 1950 entdeckt.

Herstellung und Entwicklung

Die meisten interessanten Kristallsysteme, an denen heutzutage geforscht wird, weisen die oben gezeigte Perowskitstruktur auf, da diese Struktur häufig besonders hohe Dehnungen bei niedrigen elektrischen Feldern zeigt. Eine solche Struktur kann mit Hilfe des Goldschmidtschen Toleranzfaktors (Formel 1) vorhergesagt werden. Aufgrund dieser Formel müssen jetzt Metallionen gesucht werden, deren Größenunterschied die Toleranzfaktor-Gleichung erfüllt und deren positive Gesamtladung sich mit der negativen Gesamtladung der Sauerstoffionen exakt aufhebt. Wenn man eine Zusammensetzung gefunden hat, die diese Kriterien erfüllt, wird diese mittels des so genannten Mischoxidverfahrens hergestellt. In diesem Verfahren werden die Metalloxide im richtigen Verhältnis gemischt und unter Zugabe von Ethanol (normaler Alkohol) oder anderen organischen Flüssigkeiten sorgfältig gemahlen, bis eine Suspension



der Metalloxidkörner mit einer Größe von wenigen tausendstel Millimetern entstanden ist. Die organische Flüssigkeit dient dabei nur der besseren Verteilung sowie als Schmier- und Kühlmittel. Sie wird nach dem Mahlen rückstandsfrei verdampft. Das getrocknete Pulver wird jetzt im Ofen bei circa 800°C vorreagiert (kalziniert). Jetzt kann durch Röntgendiffraktometrie überprüft werden, ob die erwartete Struktur entstanden ist. Ist dies der Fall, kann das Material in die gewünschte Form gepresst und dann fertig reagiert (gesintert) werden. Anschließend kann überprüft werden, ob das Material die erhofften Eigenschaften aufweist; gegebenenfalls muß die Mischung angepasst werden.

Aktuelle Forschung

PZT wird seit 50 Jahren wegen seiner überragenden Eigenschaften verglichen mit anderen bekannten Systemen am meisten eingesetzt. Es hat jedoch Nachteile, die seine Anwendung einschränken. Jedes piezoelektrische Material funktioniert nur unterhalb einer bestimmten Temperatur, der Curie-Temperatur. Oberhalb dieser Temperatur ist die Struktur nicht mehr asymmetrisch und somit nicht mehr piezoelektrisch aktiv. Diese Temperatur liegt in PZT bei maximal 250°C, was beispielsweise in Fahrzeugmotoren Kompromisse erfordert. Um die Eigenschaften von PZT zu modifizieren, können noch verschiedene Metallionen in geringen Konzentrationen eingebracht werden, die Einfluss auf Curie-Temperatur, Langzeitstabilität, maximale Dehnung, maximal verwendbare elektrische Felder usw. haben.

Die heutigen Materialien sind in der Regel eine Mischung aus zwei Kristallstrukturphasen, beispielsweise einer rhomboedrischen (Abb. 3a) und einer tetragonalen (Abb. 3b). Der Grund dafür ist, dass bei

Abb. 1
Treibstoffeinspritzvorrichtung bestehend aus piezoelektrischem Element (Aktor), das ein Ventil öffnet und schließt. Der Vorteil gegenüber elektromagnetisch betriebenen Ventilen ist eine vielfach erhöhte Schaltgeschwindigkeit und somit verbesserte Treibstoffökonomie.

Fuel injection system consisting of the piezoelectric element (actuator) which opens and closes the valve. The advantage compared to conventional electromagnetically driven valve is a highly increased switching speed and hence improved fuel economy.

$$t = \frac{R_{\text{weiß}} + R_{\text{blau}}}{\sqrt{2}(R_{\text{schwarz}} + R_{\text{blau}})} \approx 0,84 - 1,09$$

Formel 1:
Der Goldschmidtsche Toleranzfaktor berechnet das Verhältnis der Ionenradien der verschiedenen Ionen (siehe Abb. 2). Eine stabile Struktur hat in der Regel einen Wert zwischen 0,84 und 1,09.

The Goldschmidt tolerance factor calculates the ratio of the metal ion radii and the oxygen ion radii. A stable structure usually has a value between 0.84 and 1.09.

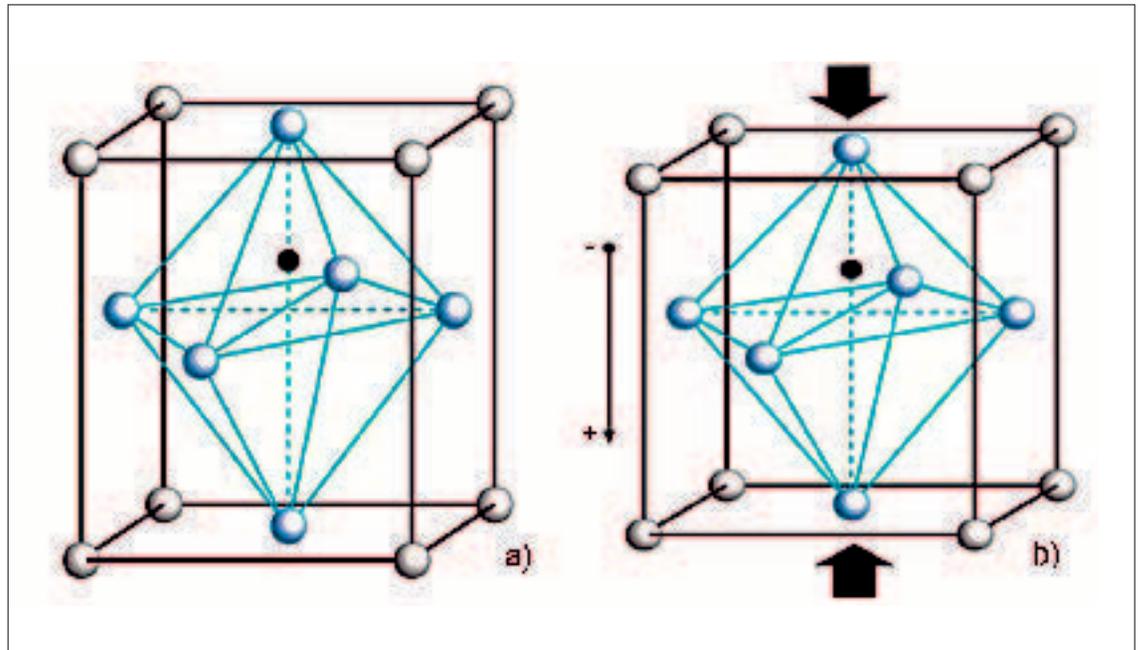


Abb. 2
Perowskitkristall: Der Kristall besteht aus positiv geladenen Metallionen (weiß und schwarz) und negativ geladenen Sauerstoffionen (blau). Im unbelasteten Zustand ist die Ladung der Ionen so verteilt, dass von außen betrachtet die Ladungsverteilung gleichmäßig ist [Abb. 2a]. Wird jetzt Druck auf den Kristall ausgeübt, verschieben sich die Ionen leicht gegeneinander. Durch die Asymmetrie im Kristall werden die Ladungen getrennt [Abb. 2b]. Die eine Seite des Kristalls lädt sich positiv auf, die andere negativ und zwischen den beiden Seiten entsteht ein elektrisches Feld.

Perovskite crystal: The crystal is made up of positively charged metal ions (black and white) as well as negatively charged oxygen ions (blue). Without mechanical load, the charge of the ions is distributed evenly throughout the crystal [Abb. 2a]. When a mechanical load is exerted on the crystal, the ions shift relatively to each other and due to the asymmetry of the crystal, the charges separate partially producing an electric field across the crystal.

einer Mischung, die genau am Übergang zwischen den beiden Phasen, der morphotropen Phasengrenze, liegt, die piezoelektrischen Eigenschaften besonders gut sind. Über die Ursache dafür wird bislang noch spekuliert, jedoch ein vielfach akzeptiertes Modell für dieses Verhalten ist, dass durch das Vorhandensein beider Phasen die Anzahl der Polungsrichtungen (Verschiebungsrichtung für das zentrale Ion) von acht für rhomboedrische Strukturen oder sechs für tetragonale Strukturen auf insgesamt 14 steigt. Dies ist wichtig, da die Orientierung der Kristalle im Material zufällig ist, und nicht notwendigerweise in Anwendungsrichtung.

Neue Gesetzgebung und Umweltschutz

Ein weiterer wesentlicher Nachteil des meistbenutzten PZTs ist der hohe Bleianteil von über 60 Prozent. Obwohl PZT als Verbindung recht unbedenklich ist, kann durch Zersetzungsprozesse oder Verbrennen zum Beispiel bei der Müllverbrennung Blei freigesetzt werden. Blei ist gesundheitsschädlich. Es kann durch unbeabsichtigten Verzehr beispielsweise von Kinderspielzeug oder durch Bleistaub beim Zerschlagen in den Körper gelangen, wo es sich besonders in den Knochen sowie in Leber und Niere anreicht und zur Beeinträchtigung der betroffenen Organe führt. Blutarmut, Leber- und Nierenversagen oder Zeugungsunfähigkeit können die Folge sein. Ähnlich wie für den Menschen, ist Blei auch für die Natur schädlich. Aufgrund dessen hat die EU Richtlinien (RoHS – Restriction on Hazardous Substances, Einschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe) erlassen, die einen Wechsel zu bleifreien Materialien erfordern, sobald diese in genügend guter Qualität und mit akzeptablen Eigenschaften vorhanden sind.

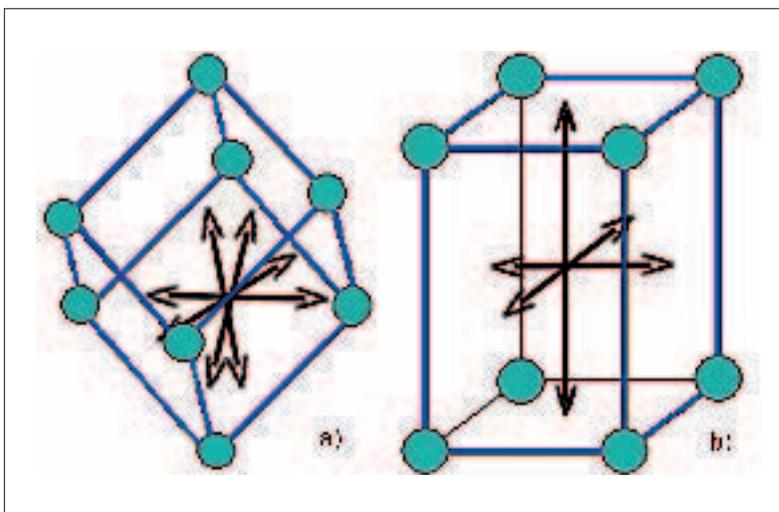


Abb. 3:
Rhomboedrische (a) und tetragonale (b) Kristallstruktur mit den möglichen Polungsrichtungen.
Rhombohedral (a) and tetragonal (b) crystal structure showing the possible poling directions.

Ausblick

In den letzten fünf Jahren ist ein erheblicher Anstieg der Forschung an bleifreien Materialien zu verzeichnen. Dieser Trend wird sich in nächsten Jahren fortsetzen, da brauchbare bleifreie Materialien hohe Gewinne versprechen. Darüber hinaus ist auch zu erwarten, dass neue Anwendungsgebiete erschlossen werden wie beispielsweise ‚Energy Harvesting‘: unter Gehwegen und Straßen eingebaute Piezoelemente könnten Strom aus den Vibrationen vorbeigehender Fußgänger oder vorbeifahrender Autos gewinnen helfen, um möglicherweise Parkautomaten zu betreiben. Auch aktive Schalldämpfung könnte mittels Piezokeramiken ermöglicht werden, indem einem Geräusch ein Signal in Antiphase entgegengeschickt wird, um das Geräusch aufzuheben.

Literatur

- [1] Piezo Systems, Inc. <http://www.piezo.com/tech4history.html>
- [2] T. R. Shrout, R. Eitel, C. Randall, „High performance, high temperature perovskite piezoelectric ceramics“ in „Piezoelectric Materials in Devices“, N. Setter, Ed., 2002
- [3] Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27.01.2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment
- [4] Institut für Mikrosystemtechnik, <http://www.imtek.de>

Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe

Das Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe unter Leitung von Prof. Dr. Jürgen Rödel im Fachbereich Materialwissenschaften an der Technischen Universität Darmstadt untersucht viele Aspekte der Herstellung und Charakterisierung piezoelektrischer Keramiken, unter anderem die Ermüdung unter mechanischer und elektrischer Belastung, die Entwicklung von Piezoelektrika für Hochtemperaturanwendungen und seit 2005 auch die von bleifreien Piezoelektrika. Klaus Seifert und Thorsten Schlegel sind Doktoranden im Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe.

Prof. Dr. Jürgen Rödel

Materialwissenschaften,
Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe
Petersenstraße 23
64287 Darmstadt
Tel: 06151/16-6315
Fax: 06151/16-6314
E-Mail: roedel@ceramics.tu-darmstadt.de



Deutschland - Polen - USA - China



Fahrzeugpneumatik Fahrzeughydraulik Industrieanwendungen

In vielen industriellen Anwendungen, die durch Elektromagnete und Ventile bewegt oder geschaltet werden können, finden sich ETO MAGNETIC Produkte - weltweit, Tendenz steigend.

Mit unseren internationalen Kunden zu wachsen, in Zukunftsmärkte zu investieren, Kompetenzen in Qualität und Leistung neu zu definieren, sind die Ziele der ETO MAGNETIC KG.

Menschen mit Ideen, Kreativität und dem Willen Neues zu erschaffen, sind die Grundlagen unseres Erfolges. Begleiten Sie uns!

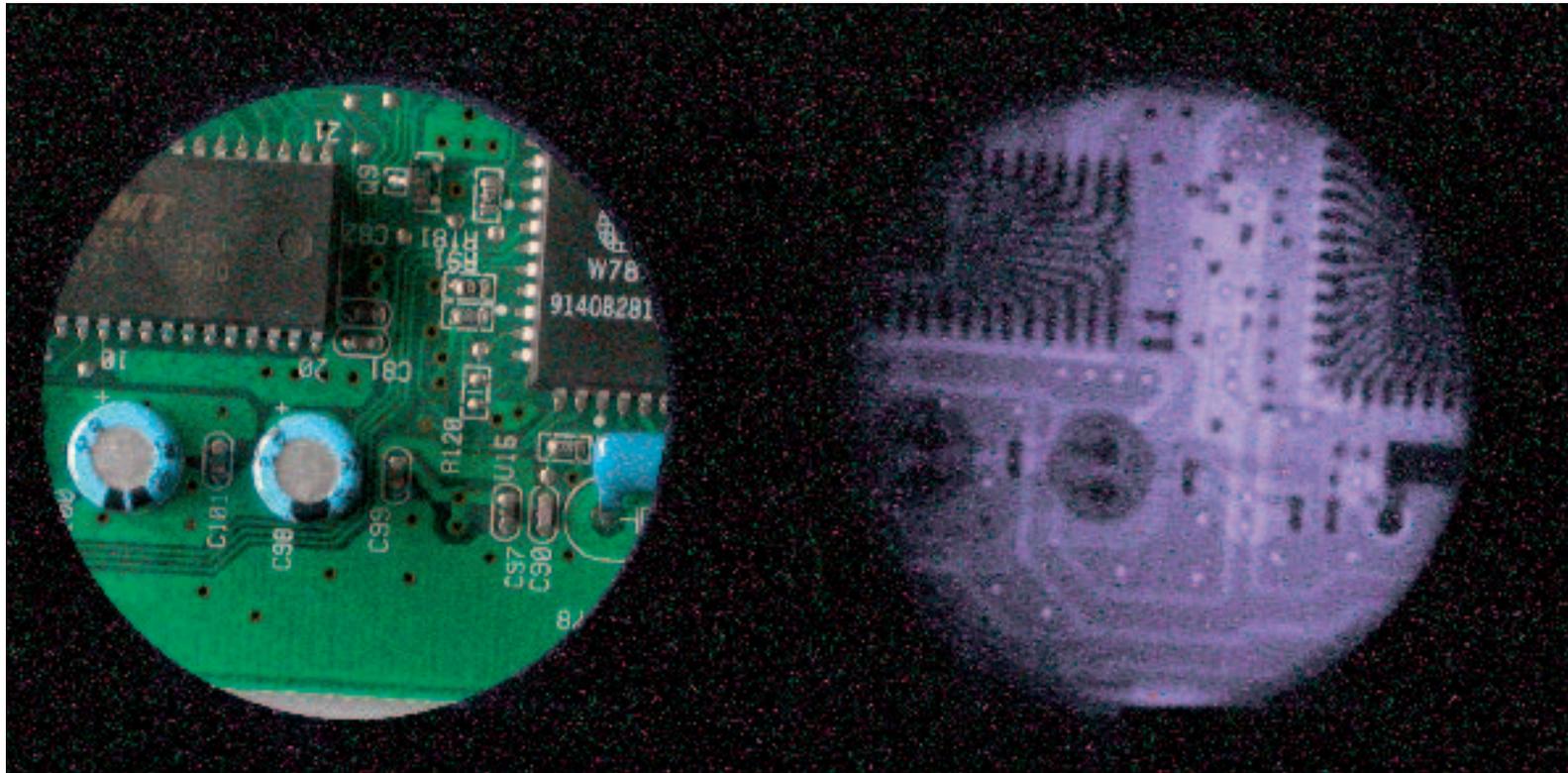
Gemeinsam zum Optimum

Mehr Infos und unser komplettes Stellenangebot finden Sie im Internet unter: www.etomagnetic.de

ETO MAGNETIC KG
Hardtring 8 • 78333 Stockach • Telefon 07771 809-0

Nadelförmige Speicherleuchtstoffe für die medizinische Diagnostik

Jörg Zimmermann/Sabine Hesse/Heinz von Seggern



Röntgenbild eines Platinenausschnittes, aufgenommen mit einer nadelstrukturierten CsBr:Eu²⁺-Bildplatte (Δ 40 mm).

Frontispiece:
X-ray image of a circuit board section recorded with a needle-like CsBr:Eu²⁺ image plate.

Nadelstrukturierte Bildplatten (engl.: Needle-like Image Plates) stellen eine interessante Alternative zu den herkömmlichen Film/Folien-Systemen und den granularen Bildplatten für die medizinische Diagnostik dar. Sie versprechen eine dem Film vergleichbare räumliche Auflösung bei höherer Röntgen-Empfindlichkeit und erlauben dadurch eine verringerte Strahlenbelastung für den Patienten. Heutige Materialien leiden jedoch an einer zu geringen Strahlenbeständigkeit, was ihren Einsatz fraglich macht. Durch gezielte Kodotierung lässt sich der für die Speicherung der Bildinformation verantwortliche Defekthalt optimieren und die Strahlenbeständigkeit der Bildplatte verbessern.

Needle-like image plates for medical diagnostics Needle structured image plates (NIPs) have the potential to replace the common film/screen systems and the granular image plates in medical diagnostics. A comparable spatial resolution to the film/screen combined with a higher sensitivity for x-rays results in a lower exposure for the patients. Today's materials, however, exhibit a poor radiation hardness which questions their practical applicability. By means of codoping the defect balance, responsible for the information storage, can be modified thereby improving the radiation hardness of the NIPs.

Moderne Medizin

Eine verbesserte medizinische Diagnostik erfordert bildgebende Verfahren mit hoher örtlicher Auflösung bei gleichzeitig geringer Strahlenbelastung des Patienten, eine digitale Speicherung und eine praktische Handhabung. Dieses beinhaltet die Möglichkeit zur digitalen Bildverarbeitung, unkomplizierte und platzsparende Archivierung und vor allem eine zeitnahe Verfügbarkeit des Bildmaterials bei anderen Ärzten und Spezialisten. Diese Anforderungen einer modernen Medizin sind mit herkömmlichen bildgebenden Verfahren auf Film/Folien-Basis nur bedingt vereinbar. Durch die Verwendung von so genannten Bildplatten kommt man den Anforderungen bereits einen großen Schritt näher, allerdings stellt die räumliche Auflösung der heutigen kommerziellen Bildplatten aufgrund ihrer granularen Struktur noch ein Problem dar. Durch geeignete Wahl des Speicherleuchtstoffs unter Ausnutzung eines nadelförmigen Wachstumsmodus lässt sich auch dieser Aspekt optimieren.

Funktionsweise der Bildplatten

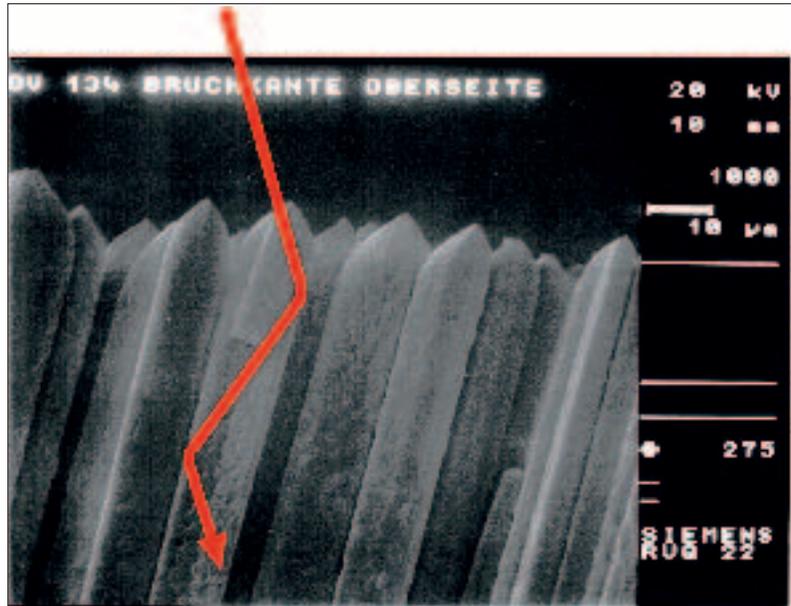
Eine Bildplatte besteht aus einem Gemisch aus einem Speicherleuchtstoff und einem organischen Binder, die als dünne Schicht auf ein Substrat aufgebracht sind. Dabei ist der Speicherleuchtstoff im Allgemeinen ein Salz (z.B. BaFBr: Eu²⁺), das mit einem lumineszierenden Aktivator dotiert ist und die Fähigkeit besitzt, die bei ionisierender Bestrahlung (z. B. mit Röntgen) entstehenden Elektronen und Löcher getrennt voneinander zu speichern [von Seggern et al., 1988]. Hierbei werden die Elektronen in Farbzentren und die Löcher durch die Aktivatoren eingefangen. Auf diese Weise entsteht ein latentes Bild von gespeicherten Elektronen und Löchern, welches mit einem Laserscanner durch Stimulation der gespeicherten Elektronen ausgelesen werden kann. Dabei kommt es zur Rekombination von Elektron und Loch und die frei werdende Energie wird zur Erzeugung von Licht genutzt, dessen lokale Intensität registriert wird und die lokal absorbierte Röntgenstrahlung repräsentiert. Diesen Vorgang bezeichnet man als photostimulierte Lumineszenz (PSL).

Informationsspeicherung im Röntgenspeicherleuchtstoff?

Bei der Bestrahlung mit Röntgenquanten werden Elektronen aus dem Anionenuntergitter befreit. Als Folge sucht sich das nun neutrale Atom ein Anion in der unmittelbaren Nachbarschaft, mit dem es sich ein Elektron teilen kann. So entsteht ein einfach negativ geladenes Anion-Molekül (V_k -Zentrum), das wegen eines fehlenden Elektrons gegenüber dem Wirtsgitter als Loch betrachtet werden kann. Dieses Loch ist mobil und wird bevorzugt an einem Aktivatorion eingefangen. Das befreite Elektron fällt in eine nahe gelegene Anionleerstelle und bildet ein Farbzentrum oder F-Zentrum. Elektron und Loch werden auf diese Weise stabil gespeichert. Da die Speicherung auf die Umgebung des Absorptionsortes der Strahlung lokalisiert ist, stellt die räumliche Verteilung der gespeicherten Elektron-/Lochpaare ein latentes Abbild des geröntgten Objekts dar.

Wie wird die Bildinformation abgerufen?

Das F-Zentrum kann als ein „Elektron im Kasten“ mit einer Wasserstoffatom-ähnlichen elektronischen Struktur betrachtet werden. Durch Zuführen von Energie, z.B. Licht, kann das Elektron aus dem elektronischen Grundzustand in den angeregten Zustand angehoben werden. Von dort kann es bei Raumtemperatur in das Leitungsband des Salzes gelangen und



zu einem Loch in seiner näheren Umgebung migrieren, mit dem es rekombiniert. Ist das Loch mit einem Aktivatorion, wie z.B. Europium, gekoppelt (korreliert), so wird die bei der Rekombination frei werdende Energie resonant an den Aktivator abgegeben, wobei dieser zur Lumineszenz angeregt wird (PSL). Mit einem Laserscanner kann die Bildinformation auf diese Weise Punkt für Punkt ausgelesen werden.

Die Sackgasse

Das Problem heutiger Bildplatten liegt in dem gegenläufigen Verhalten der PSL-Empfindlichkeit (Anzahl der emittierten PSL Photonen pro eingestrahlt Röntgenquant) und der erzielbaren räumlichen Auflösung, die z. B. für die Mammographie nicht ausreichend ist. Die physikalischen Ursachen dafür liegen in der Bauweise der Bildplatten, deren aktive Schicht aus einer Mischung aus feinkörnigen Speicherleuchtstoffen und einem organischen Binder besteht. Die räumliche Auflösung wird dabei durch die Lichtstreuung des scannenden Lasers an den beiden unterschiedlich lichtbrechenden Komponenten sowie deren Korngröße bestimmt. Ein großes Korn sorgt dabei für eine weitreichende Streuung des Lichts und dadurch für eine geringe räumliche Auflösung. Andererseits überstreicht das Licht ein großes Auslesevolumen und ist daher in der Lage, Information selbst aus großen Tiefen der Schicht auszulesen. Daher weisen Bildplatten mit großen Pulverkörnern eine hohe PSL-Empfindlichkeit auf. Kleine Körner führen zu einer starken lokalen Lichtstreuung und damit zu hohen räumlichen Auflösungen, jedoch zu geringen Empfindlichkeiten, da das ausgelesene Volumen nicht

Abb. 1 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Nadelstruktur von CsBr:Eu²⁺. Schematisch dargestellt ist der Weg des Ausleselichtes. Scanning electron microscope picture of the needle structure of CsBr:Eu²⁺. The path of the readout beam is drawn schematically.

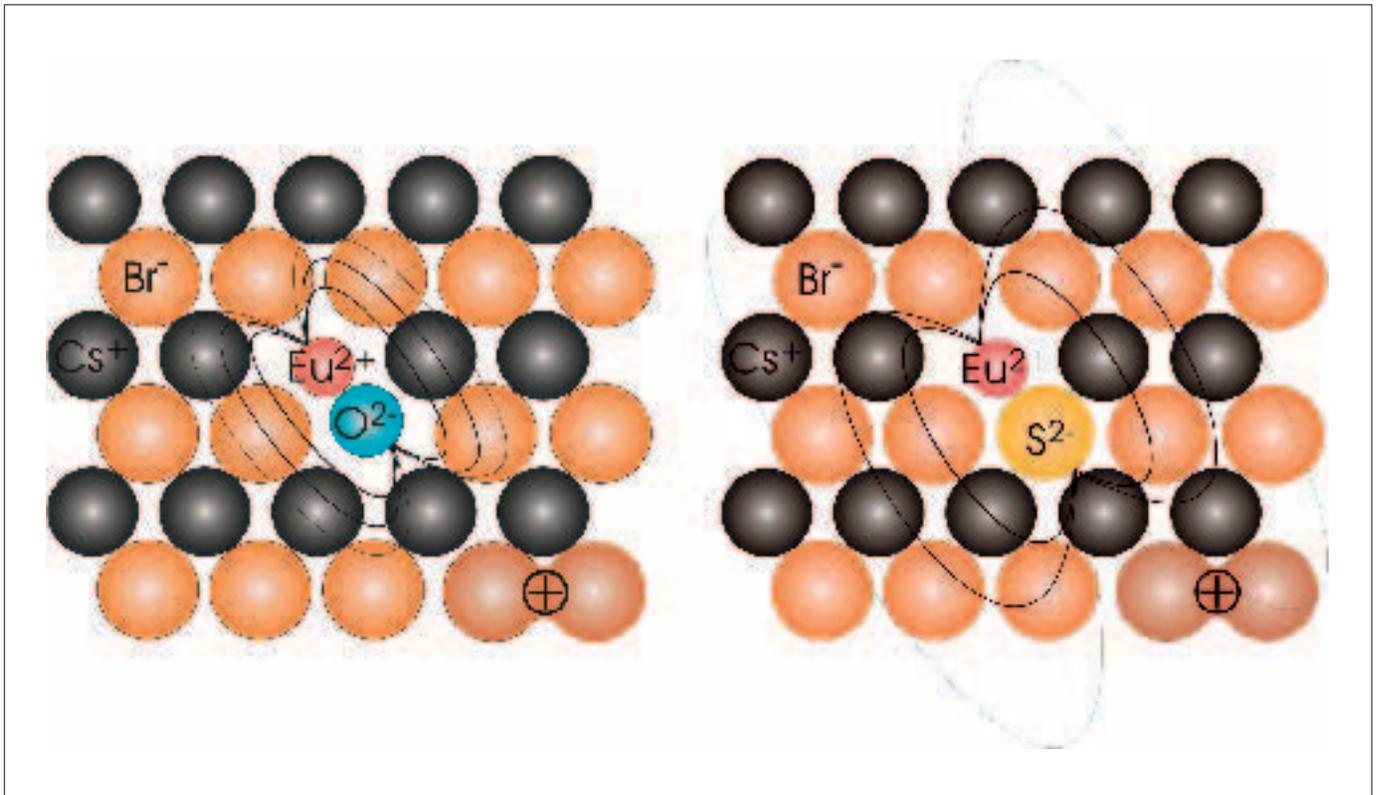


Abb. 2
Schematische Darstellung eines Dipols aus Eu^{2+} und O^{2-} (links) und eines Dipols aus Eu^{2+} und S^{2-} (rechts). Die Feldlinien deuten den Einfluss auf das nahe liegende Loch an.

Schematic drawing of a Eu^{2+} - O^{2-} dipole (left) and a Eu^{2+} - S^{2-} dipole (right). The fieldlines of the dipoles suggest the influence on the nearby hole centre.

mehr über die gesamte bestrahlte Schichtdicke reicht. Hinzu kommt eine bekannte Abnahme der Leuchteempfindlichkeit mit kleiner werdender Größe der Einzelkörner. Diese Gegenläufigkeit verhindert die Verbesserung der Bildplatteeigenschaften in granularen Systemen.

Der Ausweg

2001 berichteten Schweizer und Mitarbeiter über den neuen Speicherleuchtstoff CsBr:Eu^{2+} , der vergleichbare Empfindlichkeitswerte wie der kommerzielle Speicherleuchtstoff BaFBr:Eu^{2+} aufweist [Schweizer et al., 2001]. Es war dann die Fa. Siemens, die in Analogie zu Arbeiten am CsJ:Tl die Möglichkeit erkannte, dass CsBr:Eu^{2+} als nadelförmige Schichten auf einem geeigneten Substrat abgeschieden werden kann

[Schmitt et al., 2002]. Die Stärke der Nadeln lässt sich dabei zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ und die Länge zwischen $50\ \mu\text{m}$ und $1000\ \mu\text{m}$ variieren. Da jede Nadel wie ein Lichtleiter fungiert und die Streuung des Auslesehlichts im Wesentlichen in der Einzelnadel passiert, ist man in der Lage, auch in großen Tiefen der Schicht strahlungsinduzierte Defekte zu stimulieren (siehe Abb. 1). Das Confinement des Auslesehlichtes auf die Nadel bedeutet dabei eine große räumliche Auflösung und die große Eindringtiefe eine optimale PSL Empfindlichkeit. Mit einer solchen Nadelstruktur ist es also möglich, eine hohe Auflösung bei gleichzeitig hoher Empfindlichkeit zu realisieren. Auch im Hinblick auf die Anwendung stellt CsBr:Eu^{2+} ein ideales Material dar. Es zeigt ein PSL -Anregungsspektrum bei 680nm und erlaubt dadurch den Einsatz von preisgünstigen und leistungsstarken Diodenlasern.

Bei der Umsetzung der Röntgenenergie in die Bildinformation spielt die Speicherung der Elektronen und Löcher eine wesentliche Rolle. Neueste Untersuchungen lassen vermuten, dass Sauerstoff während der Präparation ins CsBr:Eu^{2+} eingebaut wird und sich Dipole aus Eu^{2+} und O^{2-} bilden. Der Sauerstoff dient dabei als Ladungskompensator für das zweiwertige Europium in der einwertigen CsBr -Matrix. Der Sauerstoff ist dafür ein sehr wahrscheinlicher Kandidat, da er in allen Alkalihalogeniden als Verunreinigung vorliegt und speziell bei der Synthese und Nachbehandlung von CsBr:Eu^{2+} zusätzlich in die Matrix eingebracht wird. Die Vorstellung ist, dass das lokal entstehende Dipolfeld (siehe Abb. 2) dann für eine effiziente Trennung der strahlungsinduzierten Elektronen/Loch Paare sorgt und den ersten Schritt zu einer effizienten Lochspeicherung begünstigt. Getestet wurde dieses Modell durch den Einbau von Schwefel, der durch sein stärkeres Dipolfeld aufgrund des größeren Ionenradius diese Trennung verstärken sollte (siehe

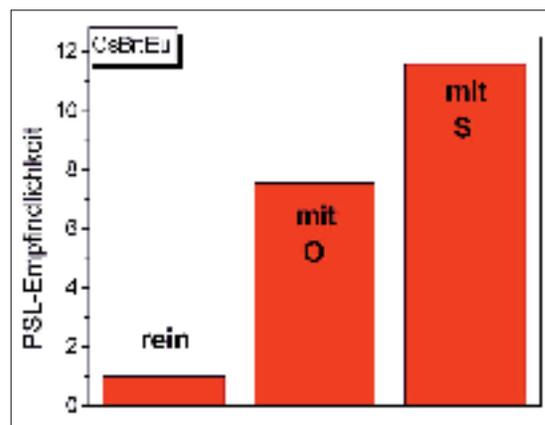


Abb. 3
PSL-Empfindlichkeit eines reinen CsBr:Eu^{2+} und zweier unterschiedlich (O bzw. S) codotierter CsBr:Eu -Proben.

PSL sensitivity of a pure CsBr:Eu^{2+} and of two differently cocoped (O and S, respectively) CsBr:Eu^{2+} samples.

Abb. 2). Tatsächlich erhöht sich durch den Einbau von Schwefel die PSL-Ausbeute um einen Faktor 1,5 gegenüber dem Sauerstoffeinbau, was die Gültigkeit des vorgeschlagenen Mechanismus untermauert (siehe Abb. 3).

Tücken des neuen Speicherleuchtstoffes

Neben den guten PSL-Empfindlichkeiten und dem sehr guten räumlichen Auflösungsvermögen gibt es leider ein Problem mit der Strahlenstabilität des Speicherleuchtstoffes, das derzeit einen kommerziellen Einsatz behindert. CsBr:Eu²⁺ verliert an PSL-Empfindlichkeit mit der akkumulierten Strahlendosis und fällt nach einer Gesamtdosis von etwa 1.0 Gy (bei Röntgen-

strahlung gilt Gy = Sv) um 20% der anfänglichen Empfindlichkeit ab (siehe Abb. 4). Bei Röntgenaufnahmen werden zwischen 0,01 mSv bei Zahnaufnahmen und 1,1 mSv bei einer Abdomenübersicht appliziert. Das würde die Anzahl der Aufnahmen im ungünstigsten Fall auf ca. 900 begrenzen, aber bereits eine höhere Strahlenbelastung für den Patienten von 20% bedeuten. Da eine solche Dosiserhöhung medizinisch fragwürdig erscheint, wird man eher von 600 oder weniger möglichen Aufnahmen ausgehen müssen, wobei sich dann die Frage der Rentabilität stellt. Unsere Arbeiten haben jedoch gezeigt, dass der PSL Verlust durch eine Deaktivierung des Leuchtzentrums Europium zustande kommt [Zimmermann et al., 2005]. Bei dieser Deaktivierung bilden sich große

- Einfallsreiche Collage.
- Umfangreiche Zettelwirtschaft.
- Abwechslungsreiche Projekte.

Wenn Sie nicht nur gerne Ihren Arbeitsplatz, sondern auch internationale Projekte mitgestalten wollen, sollten Sie sich bei uns melden. Als einer der großen Technologiekonzerne der Welt bieten wir Ihnen alle erdenklichen Aufgabengebiete im Bereich Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften – und das mit internationalen Einsatzfeldern. Diamanterz-Mahlanlagen in Südafrika, Schiffbau und U-Boot-Technologie in ganz Europa oder Großwälzlager in Asien. Fragen Sie uns also lieber, was Sie bei ThyssenKrupp Technologies nicht erwartet: Langeweile.

Interessiert? Dann sprechen Sie mit uns: 0201 106-3108.

ThyssenKrupp Technologies 

Weitere Informationen unter www.thyssenkrupp-tech.com

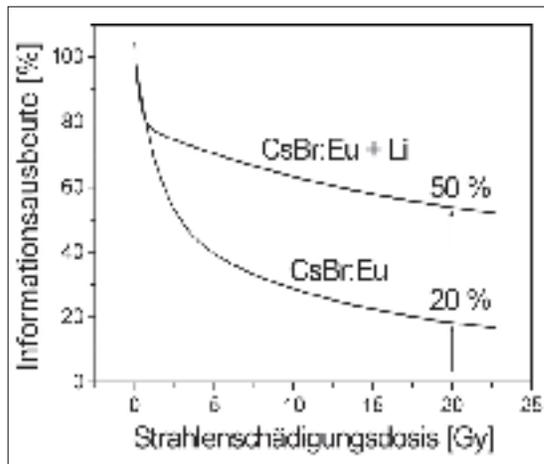


Abb. 4 Verschlechterung der Informationsausbeute einer reinen und einer Li-codotierten CsBr:Eu²⁺-NIP in Abhängigkeit von der akkumulierten Schädigungsdosis.

Degradation of the information yield of a pure CsBr:Eu²⁺ and of a Li codoped CsBr:Eu²⁺ NIP with the accumulated dose.

Leerstellen in der Nachbarschaft des Europiums, die eine Migration und Agglomeration von Europium ermöglichen und zu einem Konzentrationslöschen der Lumineszenz führen. Hoffnung besteht durch den Einbau von Fremdkationen wie Lithium, die während der Bestrahlung als Elektronenfänger fungieren und so den Austausch von Elektronen zwischen F-Zentren behindern. Es wird vermutet, dass dieser Ladungsaustausch ansonsten zu Anionenleerstellen und mit zwei Elektronen besetzten F-Zentren führt. Die resultierende Coulombsche Anziehung begünstigt dann eine Agglomeration zu F₂ (M) Zentren. Wir konnten zeigen, dass solche F₂ Zentren sich bevorzugt in der Nähe von Eu-Ionen ansiedeln und so die Freiräume bilden, die eine Migration des Europiums erlauben. Abb. 4 zeigt die Verbesserung der Strahlenresistenz, die leider noch nicht in dem Bereich nutzbarer Dosen wirksam ist. Hier ist weitere Forschung notwendig.

Resumee und Ausblick

Seit 1983 werden in der medizinischen Röntgendiagnostik Bildplatten als Ersatz für die Film/Folien-Systeme eingesetzt. Immer höhere Anforderungen bezüglich Empfindlichkeit und räumlicher Auflösung machen neue Aufnahmetechniken unverzichtbar. Kommerziell erhältliche Bildplatten auf Basis von BaFBr:Eu²⁺ sind durch die Gegenläufigkeit von Empfindlichkeit und räumlicher Auflösung begrenzt. Eine weitere Erhöhung der Auflösung durch Verkleinerung der Pulverkorngröße würde unweigerlich zur drastischen Verschlechterung der Empfindlichkeit führen. Diesbezüglich bietet CsBr:Eu²⁺ durch die Möglichkeit des Nadelwachstums einen großen Vorteil. Die Nadelstruktur erlaubt eine verbesserte räumliche Auflösung bei gleichzeitig hoher PSL-Empfindlichkeit. Einziger Nachteil des heutigen CsBr:Eu²⁺-Speicherleuchtstoffs ist dessen geringe Strahlenbeständigkeit. Doch auch hier wurden erste Verbesserungserfolge durch Kodotierung mit kleinen Kationen erzielt.

Literatur

- Schmitt et al. (2002) B. Schmitt, M. Fuchs, E. Hell, W. Knüpfner, P. Hackenschmied, A. Winnacker, Structured alkali halides for medical applications, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. B 191 (2002), 800-804
- Schweizer et al. (2001) S. Schweizer, u. Rogulis, S. Assmann, J.-M. Spaeth, RbBr and CsBr doped with Eu²⁺ as new competitive x-ray storage phosphors, Radiation Measurements 33 (2001), 483-486
- von Seggern et al. (1988) H. von Seggern, T. Voigt, W. Knüpfner, G. Lange, Physical model of photostimulated luminescence of x-ray irradiated BaFBr:Eu²⁺, J. Appl. Phys. 64, No. 3 (1988), 1405-1412
- Zimmermann et al. (2005) J. Zimmermann, S. Hesse, H. von Seggern, M. Fuchs, W. Knüpfner, Radiation hardness of CsBr:Eu²⁺, J. Luminescence 114 (2005) 24-30

Das Fachgebiet Elektronische Materialeigenschaften an der TU Darmstadt

Die Forschungsschwerpunkte des Fachgebietes mit 12 wissenschaftlichen Mitarbeitern konzentriert sich auf drei Schwerpunkte:

- Elektronische und optoelektronische Eigenschaften von organischen Halbleitern
- Ladungstransport und Polarisation in Dielektrika und
- Photo- und photostimulierte Lumineszenz in anorganischen Phosphoren

Auf dem Gebiet der Phosphore werden derzeit Zintillatoren und Speicherleuchtstoffe für die Röntgendiagnostik untersucht. Die Arbeiten spezialisieren sich auf die physikalischen Grundlagen der Lichterzeugung und des Speichermechanismus als auch auf die Aufklärung der involvierten Strahlungsdefekte.

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr. Heinz von Seggern

Tel.: 06151/16-6301

E-Mail: seggern@e-mat.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner:

Dr. Jörg Zimmermann

Tel.: 06151/16-6250

E-Mail: zimmermann@e-mat.tu-darmstadt.de

Anschrift

TU Darmstadt

Fachgebiet Elektronische

Materialeigenschaften

Petersenstraße 23

64287 Darmstadt



WIR GEBEN GAS FÜR IHRE ZUKUNFT.

Ihr Diplom in der Tasche, starten Sie mit jeder Menge Zukunftsplänen ins Berufsleben. Zum Start wollen Sie anspruchsvolle und abwechslungsreiche Projektaufgaben in einem erfahrenen und innovativen Team übernehmen. Dann schnell Verantwortung tragen, um mit den Aufgaben zu wachsen. Willkommen bei FERCHAU, Deutschlands Engineering-Dienstleister Nr. 1.

In unserer Niederlassung Frankfurt suchen wir

DIPLOMINGENIEURE (M/W) DIPLOMINFORMATIKER (M/W)

Elektrotechnik, Fahrzeugtechnik, Maschinen- und Anlagenbau

Sie steigen in Hightech-Projekte namhafter Kunden ein, z. B. in Forschung und Entwicklung, Projekt- und Qualitätsmanagement, Consulting, Mechatronik, Embedded Systems, Software.

Sie sind Absolvent und haben erste Projekterfahrung in einer interessanten Diplomarbeit gewonnen. Jetzt suchen Sie einen Einstieg in anspruchsvolle und abwechslungsreiche Aufgaben, die Sie fordern und motivieren.

Die Arbeit mit modernen Entwicklungs- und Projektmanagement-Tools reizt Sie und die enge Zusammenarbeit mit unseren Kunden macht Ihnen Spaß.

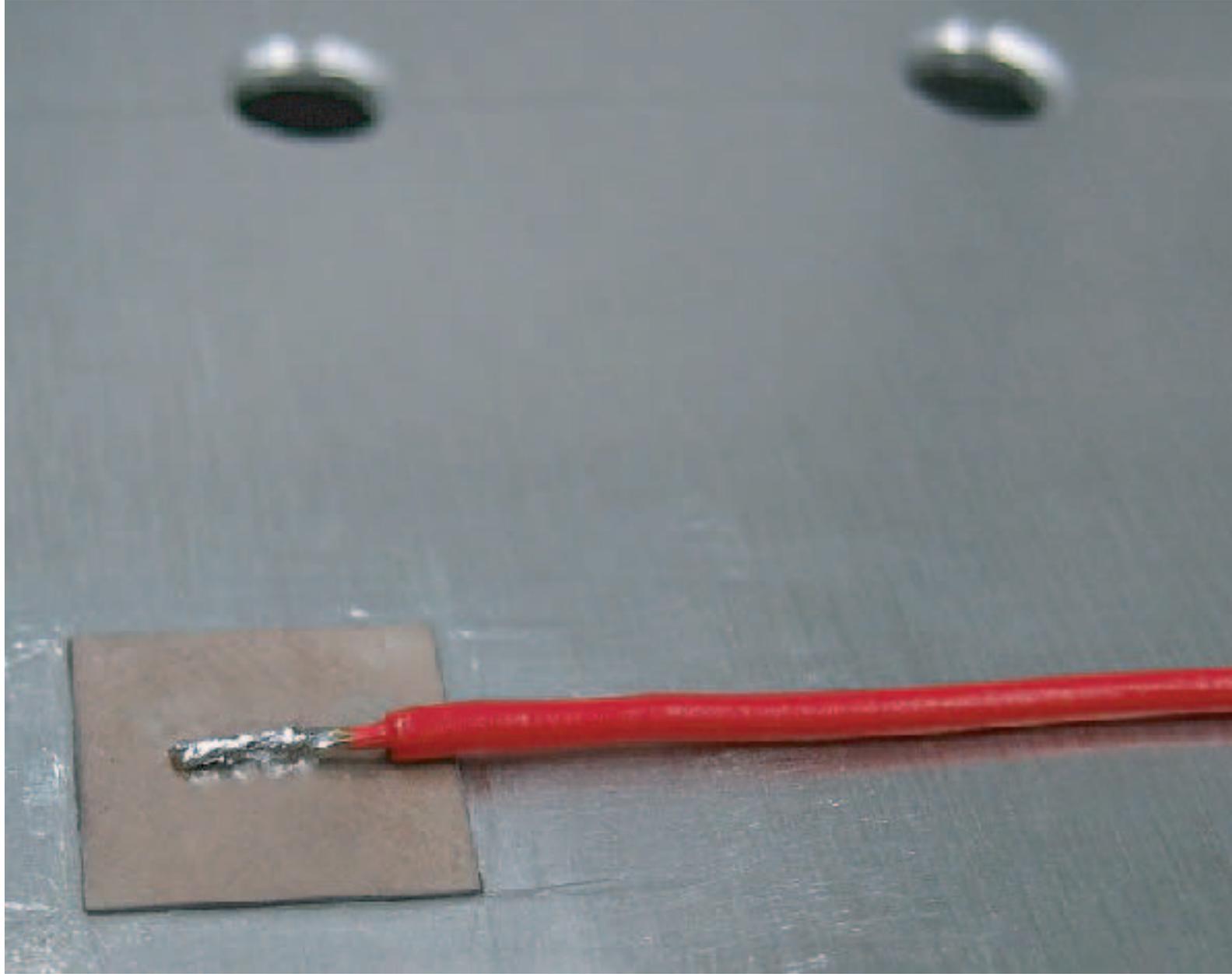
Mit regelmäßiger Aus- und Weiterbildung machen wir Sie fit für die Zukunft. Werden Sie aktiv und überzeugen Sie uns mit Ihrer Bewerbung unter der Kennziffer HP6-005-6000.

Wir entwickeln Sie weiter.

FERCHAU Engineering GmbH

Niederlassung Frankfurt
Borsigallee 19 a 60388 Frankfurt
Fon +49 69 941363-0 Fax +49 69 941363-63
frankfurt@ferchau.de www.ferchau.de

 **FERCHAU**
ENGINEERING



Schadensüberwachung mit Wandlermaterialien

Roland Platz/Andreas Büter/Dirk Mayer/Holger Hanselka

Verschiedene Wandlermaterialien können als Aktoren und Sensoren in mechanische Strukturen integriert und zur aktiven Schadensüberwachung, z. B. in einer Rumpfschale eines Flugzeugs eingesetzt werden. Zum einen wird gezeigt, inwieweit Schäden an einem Flugzeugrumpf das Schwingungs-Übertragungsverhalten von Strukturbereichen mit Aktoren und Sensoren detektiert werden können. Zum anderen wird auf die Bedeutung der, im Vergleich zur überwachten Struktur, hohen erforderlichen Lebensdauer des Wandlermaterials eingegangen.

Structural Health Monitoring with transducing materials Different types of transducing materials can be integrated as actuators and sensors in mechanical structures and can be used for active health monitoring, e. g. in fuselage shells of an airplane. On the one hand, it is shown how damages in a fuselage shells change the vibrational transferring behaviour of the structure by actuators and sensors. On the other hand, the meaning of the lifetime and reliability of the transducers versus the monitored main structure will be examined.

Piezoelektrischer Aktor auf einer schwingungsfähigen Strukturoberfläche
Bild: TU Darmstadt SzM, Fraunhofer LBF
[Piezoelectric actuator on a flexible structural surface](#)

Bedeutung der Schadensüberwachung im Leichtbau

Mechanische Strukturen, z. B. Flugzeugrümpfe oder Automobilrahmen, werden durch die Verringerung der Anzahl von Bauteilen, durch den Einsatz neuer Werkstoffe und durch neue Konstruktions- und Produktionsverfahren immer leichter. Durch den Leichtbau und die damit verbundene Gewichtersparnis wird der Verbrauch von Ressourcen während der gesamten Produktlebensdauer, von der Produktionsphase über die Nutzungsphase bis zur Entsorgungsphase, verringert. Allerdings steigen mit dem Leichtbau auch die Anforderungen an Herstellung und Betrieb der mechanischen Strukturen. Vor allem während des Betriebs muss die Belastbarkeit der leichten, meist sehr nah an ihren Belastbarkeitsgrenzen betriebenen mechanischen Struktur durch geeignete Überwachungsmethoden laufend kontrolliert werden können. Ziel ist es, Schäden in der Struktur, z. B. Ermüdungsrisse oder Delamination in Faserverbundwerkstoffen durch Überlasten oder andere Umgebungseinflüsse frühzeitig zu erkennen. Bei frühzeitiger und sicherer Kenntnis der Schwere der auftretenden Schäden müssen Wartungs-, Reparatur- und Inspektionsarbeiten nur bei Bedarf durchgeführt werden.

Überwachung durch Messung der Dehnung

Tritt ein Schaden auf, so ändert sich meist auch das Dehnungsverhalten in den geschädigten Strukturen. Überwachungssysteme können von außen auf die lasttragende Struktur appliziert oder direkt in die Struktur integriert werden. In beiden Fällen müssen geeignete Sensoren gefunden werden, die bei Applikation von außen oder bei direkter Integration die zu überwachende Struktur in ihren Betriebseigenschaften nicht nennenswert beeinflussen, z. B. durch zusätzliches Gewicht, Veränderung/Umlenkung der Lastpfade oder Einschränkungen in Steifigkeit und Verformbarkeit. Herzstück derartiger Überwachungssysteme sind dünne und wenig Bauraum verbrauchende Sensoren und, je nach Überwachungsmethode, Aktoren. Als Sensoren eignen sich z. B. Dehnungsmessstreifen (DMS), deren Messgitter z. B. aus Kupfer-Nickel-Legierungen mit hoher Temperaturbeständigkeit bestehen, oder piezoelektrische Wandler z. B. aus Blei-Zirkonat-Titanat-Oxiden, die als Aktoren hohe Kräfte bei hoher Anzahl N von Zyklen im kHz Bereich in mechanische Strukturen einleiten können. Derzeit finden umfangreiche Forschungsarbeiten statt, piezoelektrische Wandler ohne umweltschädliches Blei marktfähig zu machen. Bei der meist durch Wirkung von statischen oder kinetischen Lasten verursachten Dehnung ändert sich bei den DMS der elektrische Widerstand, bei den piezoelektrischen Wandlern kommt es zu Ladungsverschiebungen im Wandlermaterial. Wird der piezoelektrische Effekt umgekehrt (inverser piezoelektrischer Effekt) kann der piezoelektrische Wandler auch als Aktor genutzt werden.

Die Änderung des elektrischen Widerstands der DMS oder die Ladungsverschiebungen der piezoelektrischen Wandler sind in den angegebenen Messberei-

chen proportional zu den Dehnungen und lassen sich als elektrische Spannungen über Elektroden abgreifen, verstärken und über eine Auswerteelektronik weiterverarbeiten. Generell muss beachtet werden, dass ein stets ausreichend guter Kontakt zwischen den Wandlermaterialien und der mechanischen Struktur vorhanden ist, z. B. mit dünn aufgetragenen Klebstoffen. Außerdem ist sicherzustellen, dass die Lebensdauer der eingesetzten Sensoren und der Aktoren größer ist als die der zu überwachenden Struktur.

Applikation von Wandlerwerkstoffen an der Strukturoberfläche

Ein Flugzeugrumpf dient als Beispiel einer mechanischen Leichtbaustruktur. Der Rumpf besteht im Wesentlichen aus der Außenhaut, den Quer- und Längsträgern sowie Nietverbindungen (Bild 1). Ziel ist es, Schäden im Rumpf mit Hilfe von außen auf die Struktur, auf Basis piezoelektrischer Materialien applizierte Aktoren und Sensoren zu erkennen. Die Aktoren werden mit einem bestimmten elektrischen Signal angesteuert und leiten aufgrund des inversen piezoelektrischen Effekts Schwingungen in die Struktur ein. Bild 2 zeigt beispielhaft eine Anordnung der Wandler an einem gerissenen Querträger. Der piezoelektrische Sensor liefert elektrische Signale aus der Schwingungsantwort der Struktur. Aus den Signalen der eingeleiteten Aktorschwingungen und den Signalen der Schwingungsantwort wird das Schwingungsübertragungsverhalten bestimmter Strukturbereiche ermittelt. Bild 3 zeigt dazu das Amplitudenverhältnis



Bild 1
Unbeschädigtes Segment
eines Flugzeugrumpfs
(TU Darmstadt SzM,
Fraunhofer LBF)

Undamaged part of an
airplane fuselage

Bild 2
Riss (mitte) in einem Quer-
träger und Applikation
eines piezoelektrischen
Aktors (oben) und eines
piezoelektrischen Sensors
(unten) (TU Darmstadt
SzM, Fraunhofer LBF)

Crack (centre) in a cross
beam and application of a
piezoelectric actuator (top)
and a sensor (bottom)



von Antwort- zu Erregungssignal im Frequenzbereich bis 10 kHz bei ungerissenem und bei gerissenem Querträger. Ein Unterschied ist deutlich zu erkennen; die Intensität der Schwingungsantwort des gerissenen Querträgers ist über den gesamten Frequenzbereich deutlich geringer als die des ungerissenen Quer-

trägers. Dieser Riss beeinflusst demnach merklich das Schwingungs-Übertragungsverhalten. Die eingeleiteten Schwingungen werden nicht mehr vollständig im Querträger, sondern mehr über ihre Nietverbindungen weitergeleitet. Weitere Untersuchungen müssen nun klären, inwieweit sich die Schwere, der Ort und die Anzahl von Rissen aus dem Übertragungsverhalten ermitteln lassen. Können neben Rissen auch andere Schäden, z. B. Ablösung von Nietverbindungen, Materialverlust durch Korrosion, Steinschlag, etc. diagnostiziert werden? Welche Positionen von Aktoren und Sensoren sind sinnvoll? Wie empfindlich und wie zuverlässig ist die Methode? Wie aufwendig ist die Signalbearbeitung und wie lassen sich alle notwendigen Komponenten der Messkette platzsparend integrieren? Diese und weitere Fragen sind Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten an SzM und LBF.

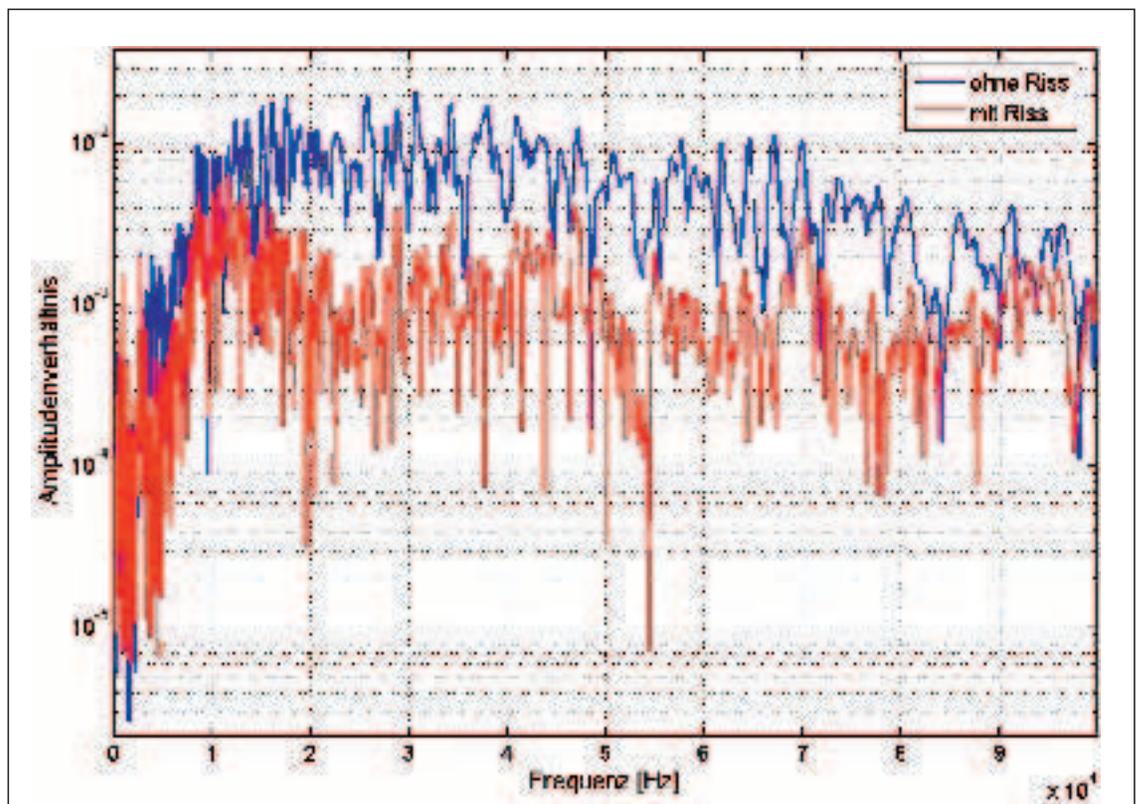
Integration von Wandlerwerkstoffen in die Struktur

Überwachungsverfahren mit strukturintegrierten Wandlerwerkstoffen haben gegenüber den Verfahren mit an der Oberfläche applizierten Wandlerwerkstoffen einige Vorteile:

- Bessere Verklebung der Wandlerwerkstoffe – an Ober- und Unterseite – mit der Struktur, dadurch höhere Sensitivität sowie besserer Schutz, z. B. vor auftretenden Massekräften
- Besserer Schutz des Sensors vor schädigenden Einflüssen, z. B. Umwelteinflüsse, chemische Einflüsse, usw.
- Kein negativer Einfluss auf aerodynamische Profile, z. B. für den Flugzeugbau
- Evtl. geringere Kosten in der Massenproduktion.

Bild 3
Schwingungs-Übertra-
gungsverhalten der Struk-
tur: Verhältnis Antwort-
zu Erregungsschwingung
(TU Darmstadt SzM,
Fraunhofer LBF)

Vibration transfer of the
structure



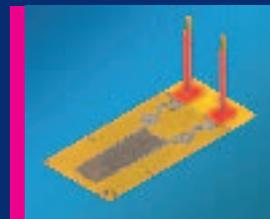
... mit eingebetteten DMS

- Der DMS ist für alle gängigen Verarbeitungsverfahren und Materialien geeignet
- Applikation während des Fertigungsprozesses an später nur schwer oder nicht mehr zugänglichen Stellen
- Überwachung von Reparaturstellen
- Messen in Klebefügungen
- Anpassung des Dehnungsniveaus bei biegebeanspruchten Strukturen
- Messungen an Strömungsprofilen

Faserverbundwerkstoffe (FVW) haben in vielen Bereichen des täglichen Lebens Einzug gefunden und gewinnen aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften immer mehr an Bedeutung. So sind sie heute nicht nur in Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt oder dem Motorrennsport zu finden, sondern auch in der Energie- und Medizintechnik, im Bauwesen sowie in Sport- und Freizeitgeräten.

In vielen Anwendungsfällen kann erst durch die Sensorintegration die Anforderung an moderne Leichtbaustrukturen hinsichtlich Fertigungskontrolle, Lastmonitoring, Schadensanalyse und Generierung von Steuersignalen erfüllt werden.

HBM hat einen DMS entwickelt, der während des Fertigungsprozesses von Faserverbundwerkstoffen mit in die Struktur eingebettet werden kann.



Prinzipieller Aufbau des Dehnungsmessstreifens (DMS) für die Strukturintegration



Anwendungsbeispiel: Rotorblatt mit integriertem DMS und kundenspezifischer Elektronik



Bild 4
Links: Strukturintegrierter DMS (HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH);
Rechts: Einbettung eines DMS in ein Multiaxialgelege (Prof. Horoschenkoff, FH München)

Left: Integrated strain gauges; Right: Integration of DMS in a multi axial clutch



Bild 5
Flügelmodell mit strukturintegrierten Piezofasermodulen (Fraunhofer LBF, ISC, IzFP, Degussa Röhm, Hochschule Darmstadt)
Wing demonstrator with integrated piezoelectrical fibers

Tabelle 1
Vergleich der ertragbaren Dehnung verschiedener Sensoren (HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Insensys)
Comparison of tolerated strains of different sensors

Einsatzbereich	Dehnungsmessstreifen	Piezofasermodule	Faseroptische Sensoren
Dehnungsbereich	Bei 0,15 % ca. 1E7 Zyklen. Bis 5 % statisch einsetzbar. [Quelle: HBM]	Bei 0,1 % 1E8 Zyklen [Quelle: Fraunhofer ISC]	Bei 0,6 % 2,5E6 Zyklen. Bis 12 % lineares Verhalten. [Quelle: Homepage Insensys]

Einsatzbereich	Windenergie nach Germanischem Lloyd	Bauwerke BÜV	Luftfahrt
Dehnungsbereich der Struktur	Zug: < 0,35% (GFK) < 0,24% (CFK) Druck: < 0,25% (GFK) < 0,18% (CFK) tragendes Laminat mit unidirektionalen Fasern Belastung in Faserrichtung	Bei GFK: 0,20%	für überwiegend statisch belastete Bauteile: 0,80% = 1,5 x 0,4 % („Ultimate Load“ = 1,5 x „Limit Load“)

Tabelle 2
Vergleich der Strukturdehnung in verschiedenen Einsatzgebieten (Germanischer Lloyd Windenergie GmbH)
Comparison of strains in structures for different applications

Natürlich müssen bestimmte Anforderungen an das Trägermaterial erfüllt sein, um überhaupt eine Integration zuzulassen. Beispielsweise müssen realistische und wirtschaftlich sinnvolle Herstellungsverfahren, Verträglichkeit von Wandlermaterial und Trägermaterial hinsichtlich ihrer chemischen Wechselwirkungen (z. B. Korrosion, etc.) sowie mechanischer Wechselwirkungen (z. B. Haftung und Reibung, unterschiedliche Steifigkeiten, Dämpfung und Massenträgheiten, etc.) gewährleistet sein. Als Basismaterial mechanischer Strukturen bieten sich Faserverbundwerkstoffe, z. B. Kohlefaserkunststoffe (CFK) als Trägermaterial an. Nicht nur der Wandlerwerkstoff selbst, sondern auch die Kontaktstellen, Kabel und ggf. auch die elektronischen Bauteile sollen in die mechanische Struktur integriert werden können.

Beispiel A: Strukturintegrierte DMS

Bild 4 zeigt einen integrierten DMS zwischen einzelnen Faserschichten einer CFK Struktur. Die wesentliche Aufgabe der DMS ist die Aufnahme von Dehnungen in bestimmten Tiefenlagen der CFK Struktur, um beispielsweise Delamination zwischen den einzelnen Faserschichten frühzeitig zu erkennen. Die Einbettung zwischen den Faserschichten wirkt sich außerdem positiv auf das Verhalten der Schwingfestigkeit des DMS aus.

Beispiel B: Strukturintegrierte piezoelektrische Wandler

Mit strukturintegrierten Piezofaserwandlern können hochfrequente Körperschallwellen in Faserverbundstrukturen, die z. B. bei einem Einschlag eines Fremdkörpers auf die Oberfläche der Struktur entstehen, detektiert werden und zur Ortung der Einschlagposition herangezogen werden. Neben diesem passiven

Funktionszentrum Lenksäule

Optisches Schalten Wickelfederkassette Lenkwinkelsensor



KOSTAL

Die Kostal-Gruppe ist ein unabhängiges Familienunternehmen, das 1912 in Deutschland gegründet wurde.

Aktuell arbeiten an 22 Standorten weltweit 10.500 Mitarbeiter flexibel, kompetent und kundennah.

So können wir unseren Kunden zum einen die internationale Erfahrung einer globalen Firmenstruktur und zum anderen die Flexibilität eines mittelständisch geführten Familienunternehmens bieten.

Produktfelder

- ❖ Lenksäulenmodule
- ❖ Türmechatronikmodule
- ❖ Dachbedieneinheiten/ -module
- ❖ Bordnetzsteuergeräte
- ❖ Bedienfelder/-schalter
- ❖ Karosserie-/ Steuerelektroniken
- ❖ Regen-/ Lichtsensoren

Mechatronische Innovation!

Leopold Kostal GmbH & Co. KG
Wiesenstraße 47
D-58507 Lüdenscheid
Tel. 02351 / 16-28 12
Fax 02351 / 16-22 33
<http://www.kostal.com>

Bild 6
Qualitativer Vergleich der Wöhlerlinien von Sensor und Struktur
(Abbruchkriterien Sensorbruch bzw. Bruch der Struktur)
(Fraunhofer LBF)

Qualitative comparison of Wöhlerlinien from sensor and structure
(truncation criteria is a breaking sensor or a breaking structure)

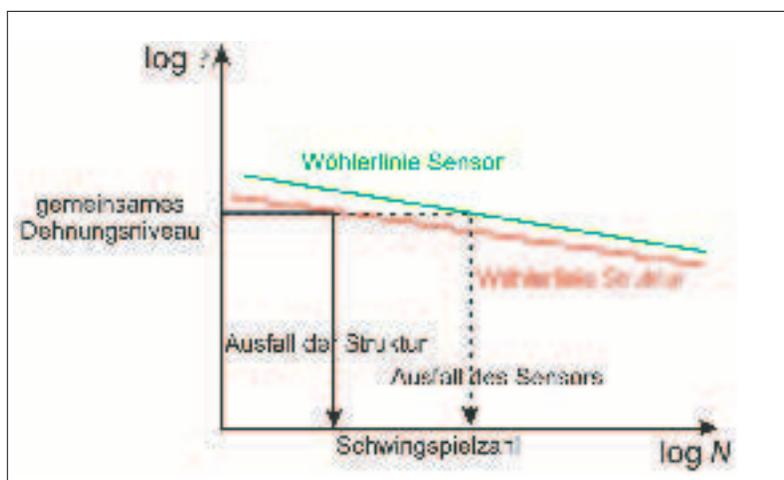
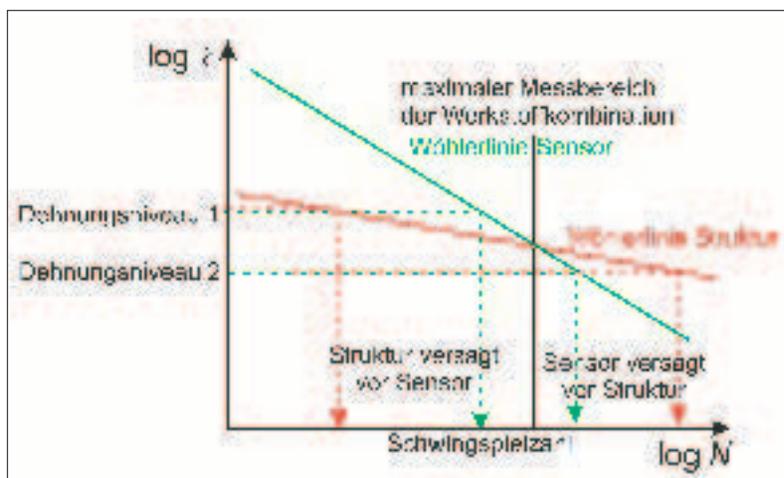


Bild 7
Anpassung der Wöhlerlinie des Sensors durch Auswahl struktur-
ähnlicher Werkstoffe (Fraunhofer LBF)

Adjusting the sensor-Wöhlerlinie using materials similar to the
materials of the structure

Modus können Piezofaserwandler als Aktoren die Schallwellen auch aktiv generieren. Führt ein Einschlag zu Schäden, lassen sich diese im aktiven Modus über ihre Wechselwirkung mit den Schallwellen nach Position und Größe lokalisieren (Bild 5). Zum Vergleich sind in Tabelle 1 die maximalen Dehnungsgrenzen von DMS und der piezoelektrischen Sensoren sowie von faseroptischen Sensoren aufgeführt.

Anforderungen an die Kombination von Sensor und Struktur

Einer der wichtigsten Kennwerte zur Wahl von Sensoren ist die Dehnung ϵ , der Sensor und Struktur gleichermaßen ausgesetzt werden. Tabelle 2 liefert einen Überblick der Dehnung in Abhängigkeit des Einsatzbereichs. Die Kombination von Faserverbundstrukturen und elektronischen Komponenten ist aus Sicht der Betriebsfestigkeit aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffe kritisch. Verglichen mit metallischen DMS oder piezokeramischen Werkstoffen zeigen Faserverbundwerkstoffe eine sehr flache Neigung der Wöhlerlinie. Das führt z. B. häufig zu einem frühen Ausfall von DMS bei Langzeitmessungen an Thermoplasten oder Faserverbundwerkstoffen. Bild 6 zeigt beispielhaft diese Problematik. Beim Dehnungsniveau 1 wäre diese Werkstoffkombination zur Strukturüberwachung einsetzbar. Aufgrund der höheren Neigung der Wöhlerlinie des Sensorwerkstoffs endet die Einsatzfähigkeit jedoch am Schnittpunkt beider Wöhlerlinien. Zur Lösung dieser Problematik muss entweder der Sensorwerkstoff an den Werkstoff der Struktur angepasst oder durch konstruktive Maßnahmen muss die Dehnung des Sensors auf ein erträgliches Maß reduziert werden. Bei vergleichbaren Werkstoffen für Sensor und Struktur sind z. B. die Neigungen beider Wöhlerlinien ähnlich. Damit die Lebensdauer des Sensors auch in diesem Fall größer als die der Struktur ist, muss die Sensorwöhlerlinie über der Strukturwöhlerlinie liegen. Daher sollte der Elastizitätsmodul des Sensormaterials stets kleiner als der des Trägerwerkstoffes sein (Bild 7).

Forschungsschwerpunkt Funktionale Werkstoffe – Werkstoffe in Funktion

Der Forschungsschwerpunkt „Funktionale Werkstoffe – Werkstoffe in Funktion“ ist seit Mitte 2004 integraler Bestandteil im Materialforschungsvorhaben Rhein-Main der TU Darmstadt (MatFoRM-TUD). Der Forschungsschwerpunkt liefert Beiträge auf den Forschungsfeldern:

- neue Konstruktionswerkstoffe, geeignete Herstellungsverfahren und Anwendungen
- Funktionswerkstoffe und deren Zuverlässigkeit
- Verbundwerkstoffe, Werkstoffverbunde und Schichtsysteme

- Werkstoffe für die Katalyse, für die Gewinnung regenerativer Energien und für emissionsarme und sichere Verkehrssysteme

für Anwendungen auf den Gebieten:

- intelligenter Leichtbau
- adaptions- und mechatronische Systeme
- Optoelektronik und Photonik
- nachhaltige Energien.

www.fws.tu-darmstadt.de

www.matform.tu-darmstadt.de

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik an der TU Darmstadt

Ausgehend von gängigen Methoden der Betriebsfestigkeit, Zuverlässigkeit und Maschinenakustik sollen neue Ansätze zur Beschreibung der Systemzuverlässigkeit komplexer Systeme im Maschinenbau entwickelt und nachgewiesen werden. Neben der Entwicklung von Grundlagen, Methoden und Verfahren soll auch deren Anwendung auf vielfältige Fragen des Maschinenbaus untersucht werden. Die Forschungsarbeiten laufen in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt.

Leiter des Fachgebiets und des Fraunhofer LBF:
Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka

Anschrift:

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit
und Maschinenakustik SzM
Magdalenenstr. 4, 64289 Darmstadt, Germany
Tel: 06151/16-3362 • Fax: -6928

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Roland Platz
E-Mail: platz@szm.tu-darmstadt.de

Literatur

- V. Giurgiutiu, J. Redmond, D. Roach, K. Rackow: Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures, Proceedings of the SPIES's 7th International Symposium on Smart Structures and Materials, 05.-09. März 2000
- J. Käsgen: Schadensüberwachung an einer Flugzeugrumpfstruktur mit applizierten Piezowandlern, Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2006
- M. Lehmann, A. Büter, B. Frankenstein, F. Schubert, B. Brunner: Monitoring System for Delamination Detection, Proceedings of the 3rd Workshop NDT in progress, Prague, 2005

IST The Test Solutions Provider

Als weltweit kompetenter Partner bietet IST Lösungen für die **Bauteilprüfung und Betriebslastensimulation**, einschließlich der anwendungstechnischen Beratung sowie der Entwicklung und Herstellung von Prüfsystemen und -komponenten.

Das Angebot von IST reicht von der einfachen Bauteilprüfung bis zu **komplexen mehrkanaligen Prüfsystemen** für Komplettfahrzeuge, Baugruppen oder Bauteile, ergänzt durch die digitale Regelelektronik Labtronic® und die RS LabSite® Software Suite zur iterativen Reproduktion von Belastungsverläufen mit höchster Genauigkeit.

Das **modulare Prüfstandkonzept** von IST ermöglicht die Konfiguration unterschiedlichster Systeme zur Prüfung der Betriebsfestigkeit, des Fahrverhaltens, der Passiven Sicherheit und für die NVH-Analyse.

www.instron.com/ist

IST INSTRON STRUCTURAL TESTING SYSTEMS

Germany

Telefon: +49 6151 3917-0
Telefax: +49 6151 3917-500

China

Telefon: +86 21 6215 8568
Telefax: +86 21 6215 0261

USA

Telefon: +1 248 553 4630
Telefax: +1 248 553 6869

Japan

Telefon: +81 44 853 8520
Telefax: +81 44 861 0411

ist_sales@ist.instron.com

Agil und flexibel: Neue Materialien für die Kommunikation von morgen

Rolf Jakoby/Yuliang Zheng/Alexander Gaebler



Wachsender Bedarf an drahtloser Informationsübertragung erzwingt eine flexible und zunehmend effizientere Nutzung der Frequenzbänder. Es sind neue Lösungen erforderlich. Die Entwicklung steuerbarer Kommunikationselemente wird notwendig, um zukünftige Anforderungen zu erfüllen. Der Artikel beschreibt Mikrowellenschaltungen mit steuerbaren Dielektrika. Es werden Schlüsselkomponenten in verschiedenen Technologien und Frequenzbereichen vorgestellt, mit deren Hilfe rekonfigurierbare hochfrequente Übertragungssysteme realisiert werden können.

Agile and flexible: new materials for tomorrow's communications Increasing demands for wireless information exchange force a flexible and more efficient use of the frequency bands. There ought to be new solutions. The development of controllable communication elements prove necessary, in order to fulfill future requirements. The article describes microwave circuits with controllable dielectrics. With assistances of the presented key components from various technologies and in different frequency ranges, reconfigurable transmission systems can be then realized.

Einleitung

Frequenzen für die Funkkommunikation stellen eine begrenzte Ressource dar, die nicht erhöht werden kann. Abgesehen davon, dass einige Frequenzbänder lückenlos belegt sind, eignen sich auch nicht alle Frequenzbereiche für die Funkübertragung.

Vor allem im Mobilfunk müssen die Endgeräte zukünftig zudem in der Lage sein, sich auf unterschiedliche Übertragungsbereiche und Standards zu adaptieren. Aufgrund der Marktakzeptanz wird diese Technik für den Nutzer jedoch immer unsichtbarer (seamless communication). Aus diesen Gründen ergibt sich die Notwendigkeit frequenzagiler und rekonfigurierbarer Kommunikationssysteme.

Wesentliche Bestandteile aller Kommunikationssysteme sind Sende- und Empfangseinrichtungen. Sie lassen sich im Hochfrequenzbereich (HF-Frontend) als auch im Basisband in verschiedene Baugruppen unterteilen, welche die Schlüsselkomponenten darstellen. Für die Entwicklung rekonfigurierbarer Funksysteme müssen diese Komponenten steuerbar bzw. adaptiv rekonfigurierbar sein.

Interessante Realisierungsmöglichkeiten für derartige Systeme bieten Materialien, deren elektrische Eigenschaften im Betrieb gezielt geändert werden können. Hierfür geeignetes agiles Material im Frequenzbereich bis zu einigen Gigahertz ist Barium-Strontium-Titanat. Für höhere Frequenzen können spezielle Flüssigkristalle für agile Kommunikationssysteme verwendet werden. Diese Materialien und damit realisierte Anwendungsbeispiele werden im Folgenden vorgestellt.

Barium – Strontium – Titanat

$Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) ist ein ferro-elektrisches Material. Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes wird das Titanatom in der Mitte der Perovskite-Zelle (Abb. 1) ausgelenkt, wodurch sich die Dielektrizitätszahl des Materials ändert.

Wird das Material als Dielektrikum für einem Plattenkondensator verwendet, kann durch gezielte Änderung einer angelegten Gleichspannung die Materialpermittivität und damit die Kapazität des Kondensators geändert werden. Auf diese Weise lassen sich mit BST Varaktoren realisieren.

Zur Herstellung von BST-Substraten eignet sich z.B. das Siebdruckverfahren. Im Detail wird ein Pulver mit Anteilen von Barium, Strontium und Titan hergestellt und zu einer Siebdruck-Paste weiterverarbeitet. Diese Paste wird auf einem Al_2O_3 Trägersubstrat verteilt. Durch anschließendes Sintern erhält man 2-8 μm dicke BST-Schichten. Auf diesen Dickschichten können mittels Lithographieprozessen kostengünstig metallische Strukturen und damit Schaltungen realisiert werden. Abb. 2 zeigt schematisch einen mit diesem Verfahren hergestellten koplanaren InterDigital-Kondensator. Die Elektroden und Massekontakte sind aus Gold und befinden sich über der im Bild grauen BST-Schicht. Durch Anlegen einer Gleichspannung kann die Permittivität der BST-Schicht verändert werden. So können mit dieser Struktur Kondensatoren realisiert werden, deren Kapazität sich durch Anlegen einer Steuerspannung um ca. 20% bis 50% verringern lässt. Da der ungewünschte Einfluss der

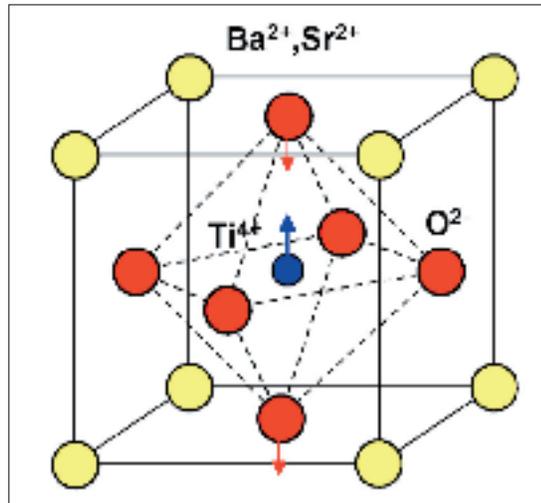


Abb. 1
Perovskit-Zelle
Ionic constellation of a perovskite cell

Signalleistung auf die Permittivität vom Verhältnis der Steuerfeldstärke zur Signalfeldstärke abhängt, können durch Verwendung hoher Steuerspannungen bis 100 V sehr lineare Bauelemente realisiert werden. Aufgrund der hohen Linearität, niedrigen Herstellungskosten und einfachen Steuerbarkeit können BST-Komponenten eine wichtige Rolle bei Kommunikationssystemen der nächsten Generation spielen. So ist zum Beispiel bei Mobiltelefonen die genaue Anpassung zwischen Verstärkerausgang und der Impedanz der Empfangsantennen wesentlich für die Qualität des Kommunikationssystems und die Akkulaufzeit.

Speziell bei modernen UMTS-Systemen beeinflussen Lage und nähere Umgebung die Antennenimpedanz. Andererseits variiert auch die Ausgangsleistung des Verstärkers. So können plötzliche Fehlanpassungen auftreten, da die Impedanzen des Verstärkers und der Antenne nicht mehr aufeinander abgestimmt sind. Aufgrund der entstehenden Reflektion wird in die-

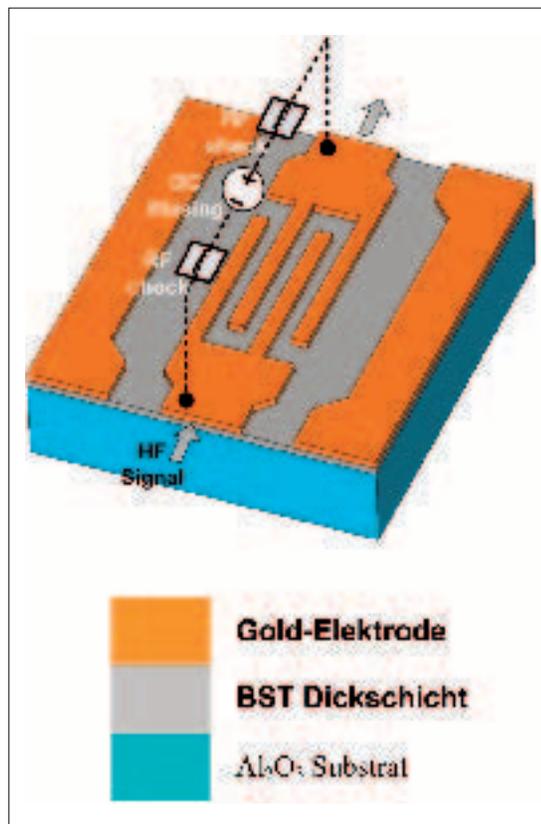


Abb. 2
BST-Varaktor
BST-Varactor

Abb. 3
T-Netzwerk (oben) und
Realisierung eines BST-
Varaktors
T-network (above) and
realization of a BST-
Varactor

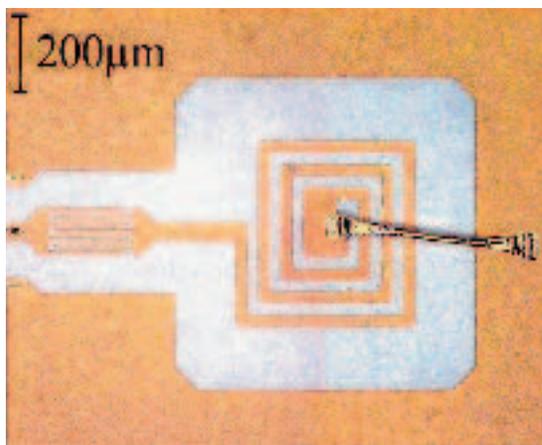
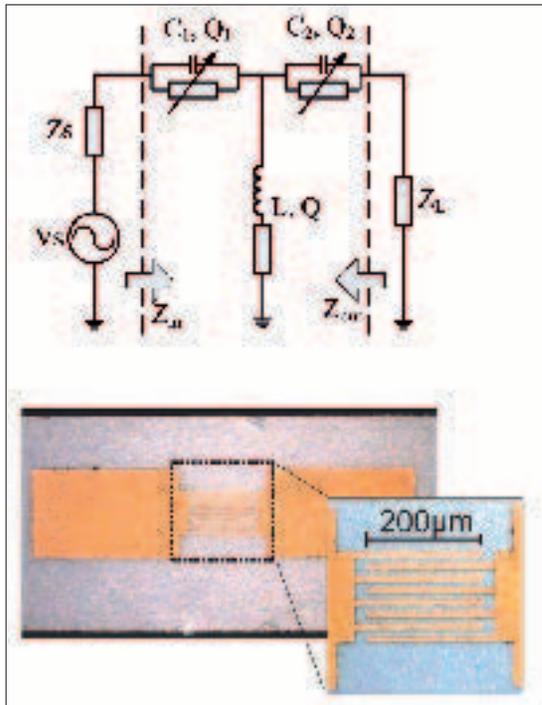


Abb. 4
BST-Backscatterer
BST-Backscatterer

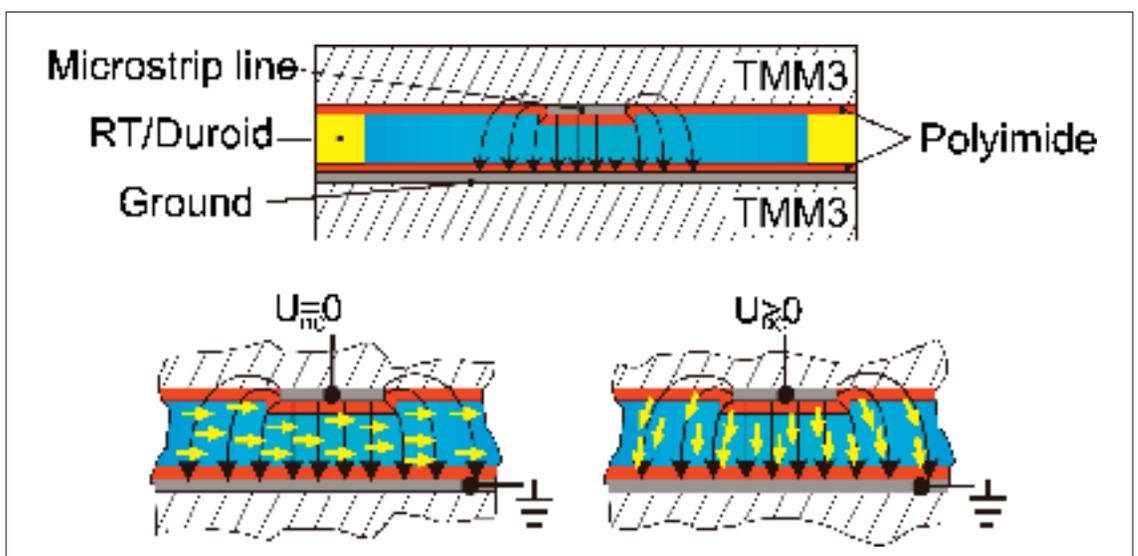
sem Fall ein großer Teil der Sendeleistung noch innerhalb des Kommunikationssystems gedämpft. Um die Akku-Laufzeit zu verlängern und die Übertragungsqualität zu verbessern, kann ein Netzwerk realisiert werden, welches beide Teile dynamisch anpasst. Mit z.B. einem steuerbaren T-Glied zwischen der Antenne und dem Verstärker, bestehend aus BST-Varaktoren (Abb. 3), kann eine auftretende Fehlanpassung deutlich reduziert werden [2]. Somit zeigt das Kommunikationssystem durch die Verwendung von BST eine deutlich verbesserte Performance mit sehr geringen Verlusten und gleichzeitig hoher Linearität.

Ein weiteres Anwendungsfeld innovativer BST-Schaltungen sind Radio Frequency Identification (RFID)-Systeme. Sie ermöglichen die Erkennung und Lokalisierung von Objekten mittels Funksignalen. Bei RFID-Backscatteranwendungen antwortet ein RFID-Transponder auf ein Signal vom Lesegerät, um z.B. seine Identifikationsnummer zurückzusenden. Es ist sehr energiesparend, dieses Signal gleich auf die empfangene Welle mit charakteristischen Änderungen der Frequenz, Phase oder Amplitude aufzumodulieren und zurückzustreuen.

Abb. 4 zeigt einen miniaturisierten RFID-Backscatterer mit BST-Dickschichtkomponenten bestehend aus einem Serienschwingkreis. Bei Betrieb nahe der Resonanzfrequenz wird die reflektierte Welle mit einem Phasenunterschied von 72° zwischen beiden Aussteuerzuständen zurückgestreut. So können in Abhängigkeit von der Steuerspannung unterschiedliche Phasen auf die rücklaufende Welle moduliert und dadurch Binärdaten übertragen werden [2]. Da die BST-Dickschichttechnologie sehr preisgünstig ist, könnte sie sich zu einer Schlüsseltechnologie für zukünftige RFID- und Kommunikationssysteme entwickeln.

BST-basierte Mikrowellenschaltungen sind in der Praxis aufgrund steigender Verluste auf Frequenzen unterhalb von etwa 10 GHz beschränkt. Bei Anwendungen darüber hinaus können jedoch andere passiv steuerbare Materialien verwendet werden. Hierfür geeignet sind spezielle Flüssigkristalle (Liquid Crystals, LCs). Im Gegensatz zu BST werden die Hochfrequenzeigenschaften der LCs bei höheren Frequenzen besser.

Abb. 5
Auslenkung der LC-
Moleküle senkrecht und
parallel zum HF-Feld
Orientation of the LC-
molecule vertical and parallel
to the RF-Field



In diesem Zusammenhang ist das Verhältnis von Materialsteuerbarkeit zu Materialverlusten wesentlich. In Zusammenarbeit mit Materialwissenschaftlern der Firma Merck wurde hier eine deutliche Verbesserung der Hochfrequenzeigenschaften von LCs erzielt. So können frequenzagile Anwendungen im Höchstfrequenzbereich mit hohen Güten realisiert werden.

Der Flüssigkristall

Flüssigkristalle besitzen eine Viskosität ähnlich einer Flüssigkeit und können aus stabförmigen Molekülen bestehen. Zudem existiert bei LCs in der nematischen Phase eine Orientierungsordnung ähnlich zu kristallinen Materialien. Diese Orientierung kann z. B. mit einem angelegten elektrischen Feld beeinflusst werden. Dadurch ergibt sich eine makroskopische dielektrische Anisotropie und unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten je parallel und senkrecht zu den Molekülen.

Eine Möglichkeit zur gezielten Ausrichtung der Moleküle ist mit Hilfe eines Polyimidfilms eine Grundorientierung einzuprägen [3]. Durch Anlegen einer zusätzlichen Steuerspannung können die Moleküle senkrecht zur ursprünglichen Lage ausgelenkt werden (Abb. 5).

Abb. 6 zeigt ein Anpassnetzwerk in LC-Technologie im X-Band. Es besteht aus zwei steuerbaren Stichelungen. Reflektionen werden stark reduziert, so dass auch bei großen Fehlanpassungen und verlustfreien Schaltungselementen nur 10% der Eingangsleistung zurückgestrahlt wird. Um den Anpassbereich LC-basierter Netzwerke bei geringen Verlusten weiter zu erhöhen, müssen weitere Netzwerktopologien und deren Realisierung überprüft werden.

Breiter Einsatz möglich

Ein weiteres Beispiel ist ein Finline-Phasenschieber im Ka-Band (26-40) GHz. Phasenschieber sind Schlüsselkomponenten um unter anderen eine schwenkbare Abstrahlcharakteristik von Antennenarrays (z.B. für Satellitenanwendungen) zu realisieren. Der im Abb. 7 entwickelte Prototyp wird mit Flüssigkristall gefüllt und ermöglicht durch Umorientierung der LC-Moleküle eine Verschiebung der Phase um 300° bei 40GHz mit geringen Einfügeverlusten. Die Grundorientierung der Moleküle wird über einen Polyimidfilm realisiert.

Mit einer angelegten Gleichspannung von 0 bis 20V werden die Moleküle in eine zur ursprünglichen Lage senkrechte Ausrichtung gesteuert. Die stufenlose Änderung der Permittivität ermöglicht eine genaue Verschiebung der Phase in Abhängigkeit der angelegten Spannung [3]. Das Einsatzgebiet von Flüssigkristallen in der Hochfrequenztechnik erstreckt sich bis in den Terahertzbereich. Aufgrund der hohen Steuerbarkeit bei geringen Verlusten sind Anwendungen in Radarsystemen und der Satellitenkommunikation vorstellbar.

Um die Schaltgeschwindigkeit für derartige Anwendungen weiter zu erhöhen, werden in einem DFG-Projekt die dazu relevanten Mechanismen untersucht.

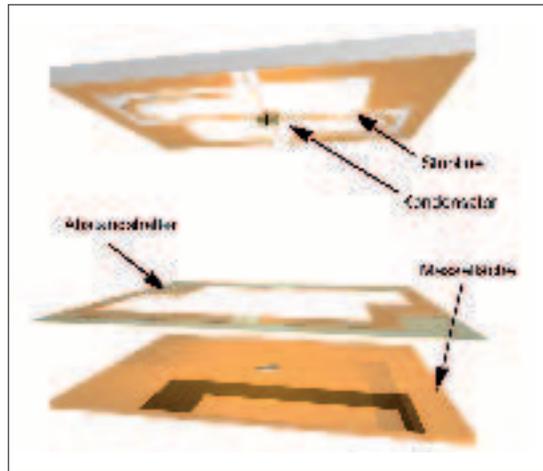


Abb. 6
LC-Anpassnetzwerk im X-Band (8-12)GHz
LC matching network in X-band (8-12GHz)

Zusammenfassung und Ausblick

Die systematische Realisierung von passiv rekonfigurierbaren Hochfrequenzsystemen beginnt mit der Materialsynthese und deren Modellierung. Auf dieser Grundlage werden passiv steuerbare HF-Elemente entwickelt, mit deren Hilfe frequenzagile Schaltungen realisiert werden können.

Die Flexibilität, hohe Linearität und einfache Ansteuerbarkeit machen die BST-Dickschichtkomponenten und Schaltungen mit Flüssigkristall vielversprechend

ALU-CAR
Karosserieentwicklung

Der
Entwicklungspartner
im Automobil-Leichtbau

Für die Standorte Mannheim / Winterberg
suchen wir zum baldmöglichsten Eintrittstermin:

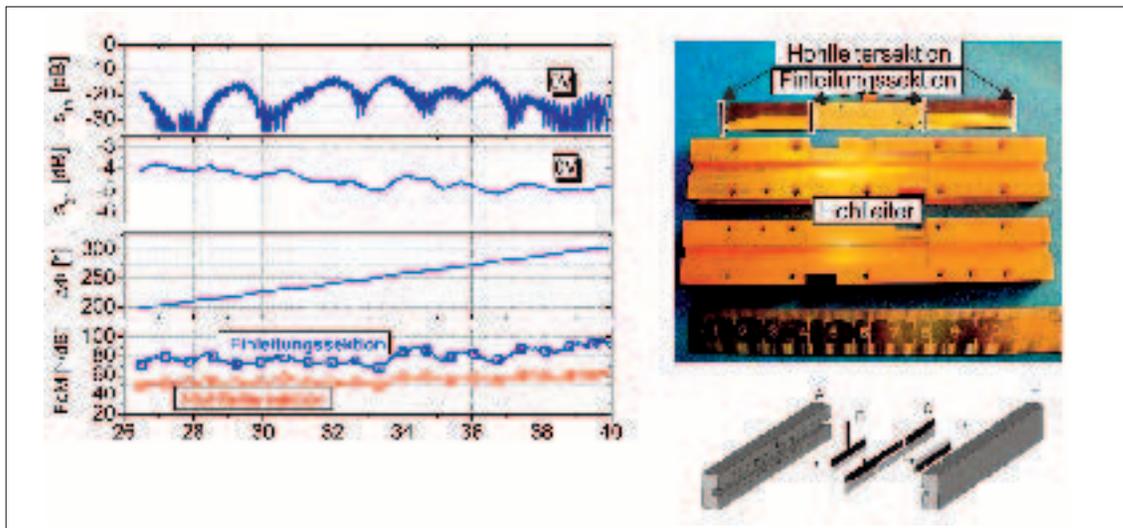
Entwicklungsingenieur(in)
für die Bereiche Karosserie- und Fahrzeugentwicklung

Sie sollten über Ihre fachliche Ausbildung hinaus CAD-Erfahrung mit dem CAD-System Catia V4/V5 nachweisen können.

Wenn Sie in einem erfahrenen Entwicklungsteam eigenständig interessante und technisch anspruchsvolle Aufgaben übernehmen möchten, kontaktieren Sie uns bitte unter:

ALU-CAR GmbH
Herr J.Rachfahl
Postfach 1131, 59955 Winterberg
Tel. 02981/9272-12, Fax 02981/9272-10,
email: j.rachfahl@alu-car.de, www.alu-car.de

Bild 7
 Finline Phasenschieber,
 Ka-Band (26-40) GHz
 Finline phase shifter in
 Ka-band (26-40GHz)



für eine Vielzahl von Anwendungen vom Mikrowellen- bis in den Terahertzbereich. Bei beiden Materialien ist es möglich, die Permittivität stufenlos über einen weiten Bereich zu verändern.

Der gegenwärtige Forschungsschwerpunkt ist auf niedrigere Verluste, höhere Steuerbarkeit und höhere Schaltgeschwindigkeiten gerichtet, um weitere Verbesserungen der Hochfrequenzeigenschaften zu erzielen.

Der Zusammenarbeit von Materialwissenschaft und Hochfrequenztechnik kommt dabei eine Schlüsselrolle zu, um Anforderungen der modernen Kommunikationsgesellschaft auch in Zukunft erfüllen zu können.

Literatur

- [1] „Continuously tunable impedance matching network using ferroelectric varactors“ Scheele, P.; Goelden, F.; Giere, A.; Mueller, S.; Jakoby, R.; Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International 12-17 June 2005 Page(s):603 – 606
- [2] Passive ferroelectric phase modulators for RFID backscatter transponders Scheele, P.; Tomescu, V.; Giere, A.; Mueller, S.; Jakoby, R.; 2005 European Microwave Conference, Volume 1, 4-6 Oct. 2005 Page(s):4
- [3] Passive tunable liquid crystal finline phase shifter for millimeter waves; Mueller, S.; Felber, C.; Scheele, P.; Wittek, M.; Hock, C.; Jakoby, R.; 2005 European Microwave Conference Volume 1, 4-6 Oct. 2005 Page(s):4 ppt

Das Fachgebiet Funkkommunikation an der TU Darmstadt

Die Forschungsschwerpunkte des Fachgebietes mit 15 wissenschaftlichen Mitarbeitern sind:

- Wellenausbreitung, Funkkanalmodellierung, Netzwerkplanung und Handover
- Antennen und HF-Sensoren (HF:=Hochfrequenz)
- Metamaterial-basierende HF-Bauteile und HF-Komponenten sowie
- Neuartige steuerbare passive HF-Bauteile für rekonfigurierbare Mobilfunk- und Sensorsysteme auf Basis agiler Materialien.

Der letzte Forschungsschwerpunkt umfasst innovative Schaltungskonzepte, Modellierung, Optimierung und mikroskalige Strukturierung für neuartige steuerbare passive HF-Komponenten und deren technologische Prototyp-Realisierung sowie die Charakterisierung/Evaluierung von 1 MHz bis 325 GHz. Beispiele sind hoch-empfindliche HF-Sensoren, abstimmbare HF-Filter, darauf beruhende „HF-Schalter“, adaptiv abstimmbare HF-Anpassnetzwerke für Leistungsverstärker und Antennen, Phasenschieber sowie elektronisch steuerbare Reflectarrays und Leck-

wellenantennen auf Basis steuerbarer, strukturierter, ferroelektrischer Dick- und Dünnschichten, Flüssigkristall-gefüllter Anordnungen und Metamaterialien. Anwendungen sind u.a. steuerbare/rekonfigurierbare HF-Komponenten und -module im Satelliten- und Mobilfunk, Mikrowellen-RFIDs sowie HF-Sensoren im Prozess-Monitoring, Materialdetektion, Spektroskopie und Radarbildgebung.

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr.-Ing. Rolf Jakoby

Tel.: 06151/16-4893

E-Mail: jakoby@hf.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner:

Alexander Gäbler

Tel.: 06151/16-3617

E-Mail: gaebler@hf.tu-darmstadt.de

Anschrift:

TU Darmstadt, Institut für Hochfrequenztechnik,
 Merckstraße 25, 64283 Darmstadt



**VDI NACHRICHTEN HAT NUN MAL
DIE ATTRAKTIVSTE BEWERBER-DATENBANK DEUTSCHLANDS.**

ZUMINDEST FÜR INGENIEURE.*

* Mit über 6 000 von unabhängigen Personalberatern bewerteten Lebensläufen verfügt das VDI nachrichten-Karriereportal ingenieurkarriere.de über Deutschlands qualifizierte Bewerber-Datenbank für Ingenieure.

Ingenieure, die sich beruflich neu orientieren wollen, bauen darauf: die Bewerber-Datenbank auf ingenieurkarriere.de. Wer hier steht, hat größte Chancen, den Job zu finden, den er sucht. Erfolgreich bewerben mit VDI nachrichten. Täglich im Internet. Wöchentlich im Stellenmarkt. Regelmäßig im Magazin Ingenieur Karriere und auf den Recruiting Events.

Das Karriereportal der VDI nachrichten.

VDI nachrichten
ingenieurkarriere.de

Medienübergreifende Jobsuche mit VDI nachrichten: Stellenmarkt · Ingenieur Karriere · ingenieurkarriere.de · Recruiting Events

Keramische Materialien mit integrierter Sensorik

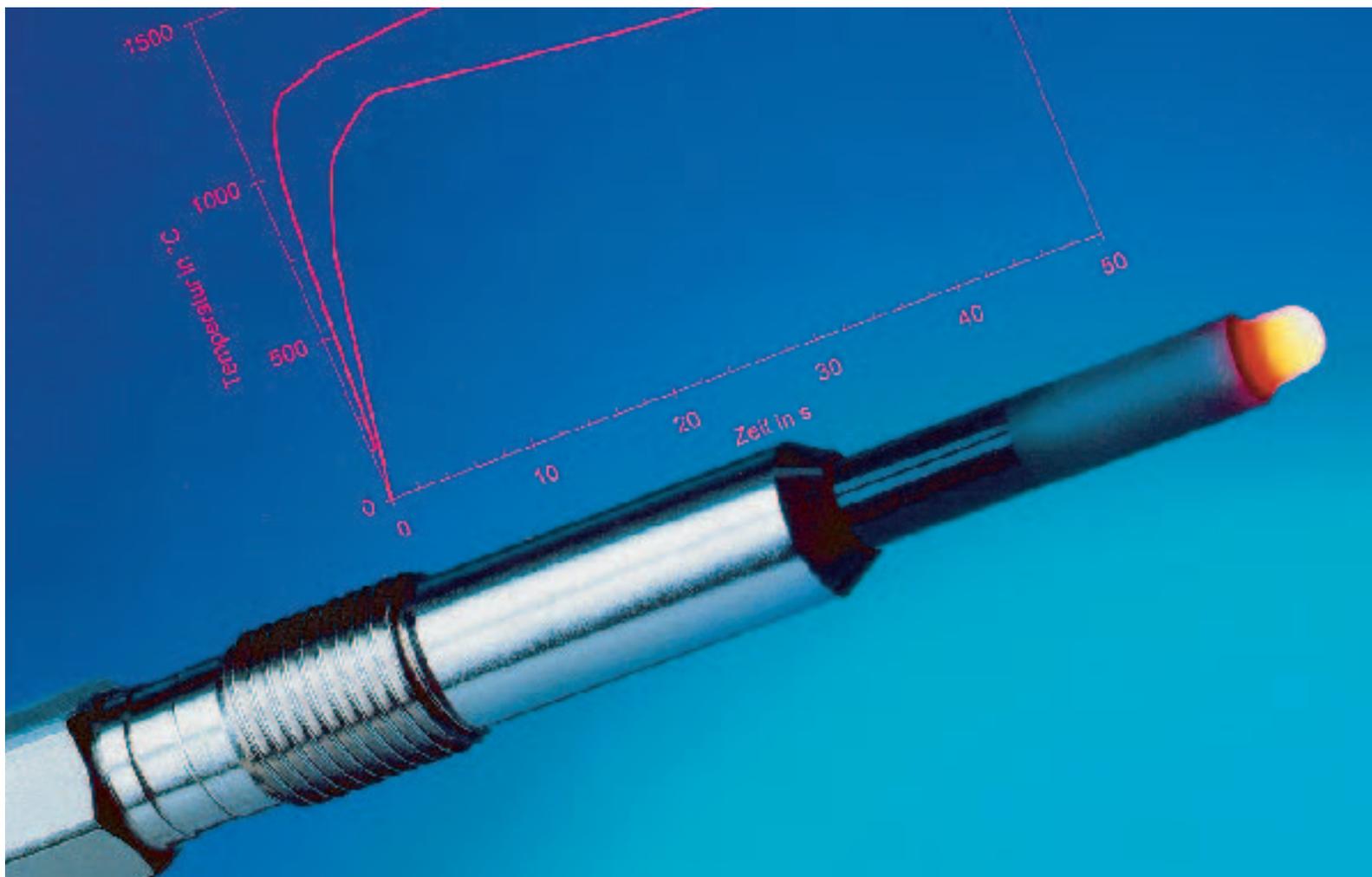
Ralf Riedel/Ralf Hauser/Liviu Toma

Aufgrund der industriellen Anforderungen an zukünftige Technologien werden neue Materialien und Materialeigenschaften benötigt, die weit über die der heute bekannten Werkstoffe hinausgehen und die nur durch Design des Werkstoffaufbaus auf nanoskaliger Ebene erreicht werden können. Auf der Basis von mit Aluminium oder Bor modifizierter Polysiloxane (Silicone) oder durch Zusatz nanoskaliger Füllstoffe soll ein multifunktionales keramisches Bauteil im System SiOC mit sensorischen Eigenschaften entwickelt werden. Als mögliche Anwendung wird ein keramischer Heizer mit integrierten Temperatur- und Drucksensoren diskutiert.

Ceramic Materials with Integrated Sensors
Industrial demands on future technologies have created a need for new materials and materials properties which exceed by far those of materials known today and which can only be achieved by designing the microstructure at a nanoscale level. Here we describe the objective to develop a multifunctional ceramic component based on the ternary system SiOC with sensoric properties. The synthesis of the integrated ceramic system is achieved from polysiloxanes (silicones) modified by additional elements such as aluminum or boron at the molecular level or by the addition of nanoscale fillers. As possible application a ceramic heater with integrated temperature and pressure sensors is discussed.

SiOC-Glühstift aus Polysiloxan mit multifunktionalen Eigenschaften.
Quelle: Robert Bosch GmbH

Multifunctional glow plug derived from polysiloxane



Keramische Werkstoffe gewinnen zunehmend an Bedeutung im Bereich der Konstruktions- und Funktionswerkstoffe in Form von Verbundwerkstoffen, Fasern, Schichten oder Membranen. Als zukünftige Einsatzgebiete für hoch entwickelte keramische Materialien werden Werkzeuge und Werkzeugbeschichtungen in der Umformtechnik oder optische, piezoelektrische und magnetische Anwendungen diskutiert. Ein weiteres Einsatzgebiet sind keramische Membranen für die Heißgasextraktion und Gastrennung bei hohen Temperaturen sowie keramische Heizer. Insbesondere für die letztgenannten Einsatzgebiete werden Materialien mit hoher Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit benötigt. Zukünftig sollen in die Werkstoffmatrix integrierte Sensoren die Leistungsfähigkeit der neuen Materialien verbessern und deren gezielte Steuerung in einem breiten Temperaturbereich ermöglichen. Neuere Forschungsarbeiten beschäftigen sich damit, die Sensoren in situ während der Herstellung des Bauteils auszubilden. Im Fachgebiet Disperse Feststoffe entwickeln wir aktuell Syntheseverfahren, die eine simultane Ausbildung der Werkstoffmatrix und des gewünschten Sensors erlauben. Grundlage des Verfahrens stellt die Polymerpyrolyse dar, in der molekular aufgebaute, anorganisch-organische Polymere gezielt synthetisiert und zu Formteilen verarbeitet werden. Anschließend erfolgt die thermische Zersetzung des Polymers zum keramischen Bauteil [1]. Die Zugabe von Füllstoffen zum Polymer eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, die Zusammensetzung und die Eigenschaften der daraus hergestellten Werkstoffe in weiten Bereichen zu variieren.

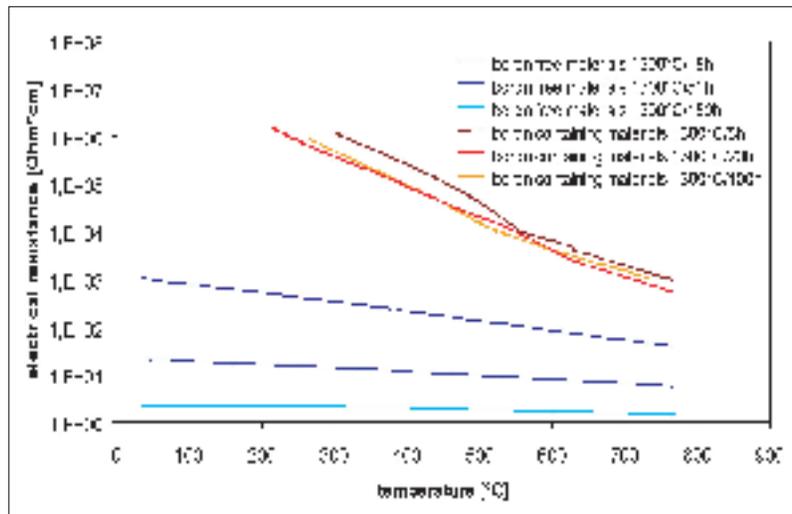
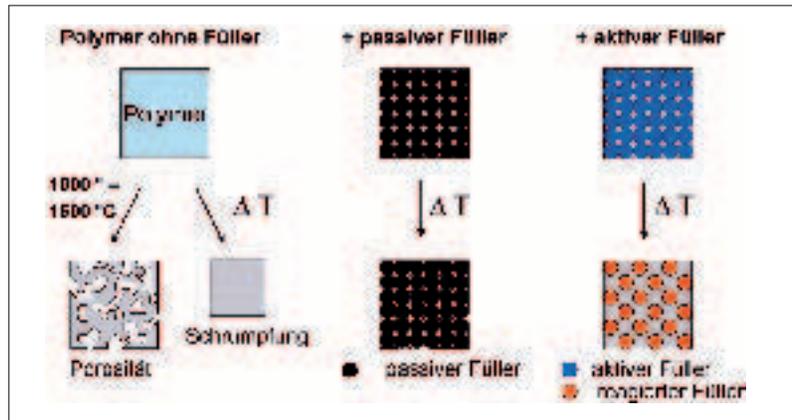
So wurden auf dem Gebiet des molekularen Designs nanoskaliger, anorganischer Materialien grundlegende Arbeiten zum füllergesteuerten Reaktionsablauf durchgeführt, die mittlerweile zu ersten Produktentwicklungen in der Industrie geführt haben (Glühstift für Dieselmotor). Ausgehend von gefüllten molekularen Polysiloxanen gelang es, durch gezielte Steuerung der Verarbeitungseigenschaften (Viskosität, Schwindung) und der Mikrostruktur (amorph oder kristallin, Perkolationsnetzwerkbildung, Porosität) eine neue Gruppe mehrphasiger Nanoverbundwerkstoffe zu entwickeln, deren mechanische (Festigkeit, Zähigkeit) und elektrische Eigenschaften (Übergang Isolator-Leiter, Leitungsnetzwerke) in weiten Grenzen gezielt einstellbar sind [2, 3, 4]. Der Glühstift besteht aus einer elektrisch leitenden und einer elektrisch isolierenden SiOC-Phase. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch Zusatz von MoSi₂ als Füllstoff, die elektrische Isolierung durch Al₂O₃ eingestellt. Darüber hinaus beeinflusst der bei der Pyrolyse sich ausscheidende Kohlenstoff die Leitfähigkeitseigenschaften.

Polymerabgeleitete Keramiken weisen gegenüber den „klassischen“ Keramiken einige wesentliche Vorteile auf. Neben der Verfügbarkeit reiner Ausgangsmaterialien sind relativ niedrige Herstellungstemperaturen sowie die Möglichkeit, bei der Formgebung Methoden der Kunststofftechnik wie Spritzgießen oder Extrudieren zu verwenden, weitere Charakteristika des Polymer-Pyrolyse-Verfahrens. Darüber hinaus lassen sich die Festkörperstruktur und die chemische Zusammensetzung der Keramik im Ausgangspolymer auf molekularer bzw. atomarer Ebene einstel-

len und durch chemische Variation des Polymers gezielt beeinflussen.

Die Umwandlung der anorganischen Polymere in keramische Materialien erfolgt durch thermische Zersetzung der Polymere. Dabei unterliegen diese stets einem Massenverlust und damit auch einer Schrumpfung. Dies führt in der Regel zur Ausbildung von Poren und Rissen, wodurch die Materialeigenschaften negativ beeinflusst werden. Die Zugabe passiver oder aktiver Füllstoffe kann die Schrumpfung, Porosität und Rissbildung vermindern oder vollständig kompensieren [5, 6]. Der gezielte Zusatz von Füllstoffen ermöglicht die Herstellung von Materialien

Abb. 1 Wirkung von Füllstoffen in polymerabgeleiteter Keramik [5, 6].
Effect of fillers in polymer-derived ceramics [5, 6].



mit maßgeschneidertem Eigenschaftsprofil im Sinne von Härte, elektrische und thermische Leitfähigkeit oder Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit [7]. Dabei unterscheidet man zwischen passiven und aktiven Füllstoffen. Passive Füllstoffe wie Metalloxide, -carbid oder -nitride gehen keine chemischen Reaktionen mit den Zersetzungsprodukten oder der sich ausbildenden keramischen Matrix ein und wirken der Schrumpfung nur durch ihren Volumenanteil entgegen. Im Gegensatz dazu können aktive Füllstoffe wie Metalle oder deren Legierungen mit der polymeren Matrix oder deren Zersetzungsprodukte während der Pyrolyse reagieren und auf diese Weise aktiv den Massenverlust und damit die Schrumpfung vermindern. Als Reaktionsprodukte werden zum Beispiel Metallcarbide und -nitride gebildet. In beiden Fällen sind die Füllstoffpartikel nach der Pyrolyse in der polymerabgeleiteten Matrix dispergiert. In Abb. 1

Abb. 2 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes.
Temperature dependency of the electrical resistance.

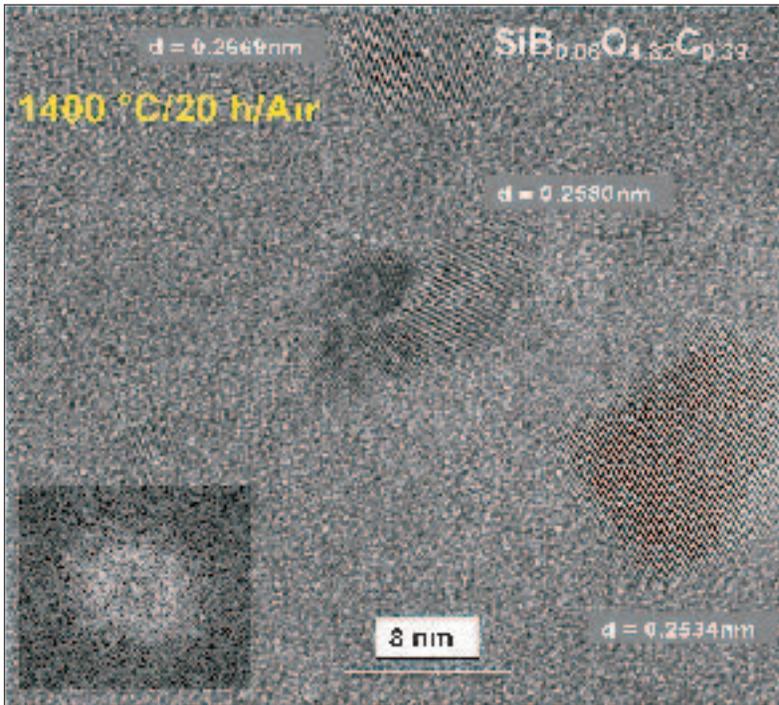


Abb. 3
TEM-Aufnahme einer SiBOC-Keramik mit SiC-Nanodomänen in einer amorphen SiBO(C)-Matrix.

TEM micrograph of a SiBOC ceramic with SiC nano domains in a amorphous SiBO(C) matrix.

sind die möglichen Verfahrenswege zur Herstellung polymerabgeleiteter Volumenmaterialien gegenübergestellt.

Ausgangspunkt der Arbeiten ist der von der Firma Robert Bosch GmbH zur Serienreife entwickelte Glühstift auf der Basis einer polymerabgeleiteten SiOC-Keramik. Für weitere Anwendungen ist zukünftig eine Erhöhung der Dauerbetriebstemperatur von momentan 1200°C auf 1300°C gefordert. Um eine homogene Verbrennung zu erreichen, ist eine gezielte Steuerung des Dieselmotors notwendig. Hierfür sind die zeitnahe Erfassung von Temperatur und Druck unerlässlich. Deshalb sollen in das Bauteil Temperatur- und Drucksensoren integriert werden, um eine verbrennungsnahe Messung dieser Daten zu ermöglichen. Ziel ist eine Reduzierung der Emission von C-Partikeln sowie NO_x um 60 - 90% durch eine homogene, saubere Verbrennung des Dieselkraftstoffes (Homogeneous Charge Compression Ignition).

Der Temperatursensor wird durch in situ-Messung des elektrischen Widerstandes während des Betriebs des Glühstifts realisiert. Für eine zuverlässige Funktion der Temperatursensorik darf keine Gefügeveränderung im Betrieb stattfinden, die den spezifischen elektrischen Widerstand der Matrix verändert. Auf diese Weise werden an die Beständigkeit des Stoffsystems sehr hohe Anforderungen gestellt. Durch die Temperaturmessung kann die Glühtemperatur konstant ausgeregelt werden, und Schwankungen der Glühtemperatur durch den Lastzustand des Motors oder der Außentemperatur werden vermieden.

Zur Erreichung dieses Ziels kann die SiOC-Matrix mit Elementen wie Bor oder Aluminium modifiziert werden. Es konnte gezeigt werden, dass Bor und Aluminium die thermische Stabilität der SiOC-Matrix im Hinblick auf Zersetzung und Kristallisation maßgeblich positiv beeinflussen. Wie in Abb. 2 dargestellt, bewirkt die Zugabe von Bor zum SiOC-System eine deutliche Verbesserung der Langzeitstabilität der thermoelektrischen Eigenschaften [8].

Im Gegensatz zu den reinen SiOC-Materialien zeigen die borhaltigen Keramiken keine signifikante Verringerung des elektrischen Widerstandes nach Auslagerungsversuchen bis zu 100 Stunden bei 1300°C. Durch die Zugabe von Bor wird die Ausscheidung von freiem, graphitartigem Kohlenstoff gehemmt, was in den reinen SiOC-Materialien zur drastischen Verringerung des elektrischen Widerstandes führt. Stattdessen kommt es in den SiBOC-Keramiken, wie in Abb. 3 illustriert, zur Ausbildung von SiC-Nanodomänen in einer amorphen SiBO(C)-Matrix. Darüber hinaus wird auch die Bildung kristalliner SiO₂-Phasen verhindert [9].

Die Zugabe von Aluminium zum SiOC-System bewirkt ebenfalls eine Erhöhung der thermischen Stabilität dieser Materialien. Während bei reinen SiOC-Keramiken die Kristallisation und damit die thermische Zersetzung bereits bei 1300°C einsetzt, beginnt die Kristallisation der SiAlOC-Keramiken erst bei 1500°C. Ferner wird durch die Anwesenheit von Aluminium die Bildung von Cristobalit verhindert. Dieses Verhalten ist von großer Bedeutung, da Cristobalit während der Aufheiz- und Abkühlphasen mehrere Phasenumwandlungen durchläuft, die mit Volumenänderungen verbunden sind. Volumenänderungen können zur Ausbildung von Rissen und damit zur Zerstörung des Bauteiles führen [10].

Fazit unserer bisherigen Ergebnisse ist, dass durch gezielte Zugabe von Bor und Aluminium zu Polysiloxanen die Hochtemperatur- und Phasenstabilität der daraus abgeleiteten SiOC-Keramiken deutlich erhöht werden können. Bei der Verwendung von SiOC als Glühstiftmaterial für Dieselmotoren kann durch Integration von Temperatur- und Drucksensor die Steuerung des Verbrennungsvorgangs weiter optimiert werden. Der Temperatursensor wird durch in situ-Messung des elektrischen Widerstandes während des Betriebs des Glühstifts realisiert. Über einen zusätzlichen Drucksensor soll der Einspritzzyklus (Einspritzzeitpunkt, Einspritzverlauf und Einspritzmenge) geregelt werden. Hierzu wird ein Piezomaterial an geeigneter Stelle auf den SiOC-Glühstift als Schicht aufgebracht oder in eine Kavität eingebaut.

Im Rahmen unserer Studien wird eine Werkstoffentwicklung angestrebt, die auf die Integration eines neuen Werkstoffes in ein komplexes interagierendes System zielt. Als Modellsystem wird ein Bauteil betrachtet, das zugleich als Heizleiter (hier primäre Funktion genannt), als Temperatursensor (hier sekundäre Funktion genannt), Gas- und Drucksensor (ebenfalls sekundäre Funktionen) arbeiten soll. Störeinflüsse sind eine aggressive Atmosphäre und Schlacke bildende Reststoffe. Die Funktionen können an verschiedenen Stellen oder durch eine multifunktionale Nutzung des Werkstoffes an einer Stelle des Bauteils realisiert werden.

Fachgebiet Disperse Feststoffe an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Disperse Feststoffe befasst sich mit der Entwicklung von Strategien zur Herstellung neuartiger anorganischer, oxidischer und nichtoxidischer Netzwerke mit dem Ziel der Synthese von Hochleistungskeramiken mit Eigenschaften, die über den gegenwärtigen Stand der Technik weit hinausreichen. Neben der Synthese und strukturellen Charakterisierung molekularer, monomerer und polymerer Keramik-Vorstufen sowie der daraus abgeleiteten anorganischen Festkörper beschäftigen sich weitere Schwerpunkte mit der Verarbeitung der Vorstufen zu keramischen Bauteilen (wie Schichten, Fasern, Massivwerkstoffe, Verbundwerkstoffe, Membranen, etc.) und der Charakterisierung deren chemischen und physikalischen Eigenschaften. Die Materialeigenschaften sollen insbesondere mit der molekularen Struktur der präkeramischen Vorstufen korreliert werden.

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr. Ralf Riedel
 Institut für Materialwissenschaft
 Fachgebiet Disperse Feststoffe
 Technische Universität Darmstadt
 Petersenstraße 23
 D-64287 Darmstadt • Germany
 Tel.: 06151/16-6347 • Fax: 06151/16-6346
 E-Mail: riedel@materials.tu-darmstadt.de
 oder riedel@hardmaterials.de
 www.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/df/index.html

Ansprechpartner:

Dr. Ralf Hauser • Tel.: 06151/16-6344
 E-Mail: hauser@materials.tu-darmstadt.de

Literatur

- [1] R. Riedel, S. Rastätter, I. Kinski, Thema Forschung 2 (2001) 50-54.
- [2] A. Geissinger, J. Oberle, W. Teschner, H. Boeder, K.-H. Heussner, Robert Bosch GmbH, DE-19538695-A1.
- [3] A. Geissinger, G. Lindemann, C. Haluschka, A. Reissner, W. Dressler, F. Lindner, W. Otterbach, C. Kern, Robert Bosch GmbH, WO-01/16528-A1.
- [4] R. Riedel, W. Dreßler, A. Klönczynski, Robert Bosch GmbH, DE 10243017 A1.
- [5] R. Riedel, G. Passing, H. Schönfelder, R. J. Brook, Nature 355 (1992) 714.
- [6] P. Greil, J. Am. Ceram. Soc. 78 (1995) 835.
- [7] P. Greil, Adv. Eng. Mat. 4 (2002) 247.
- [8] R. Riedel, G. Mera, R. Hauser and A. Klönczynski, J. of the Ceram. Soc. of Japan 114 (2006) 425-444.
- [9] A. Klönczynski, G. Schneider, R. Riedel, R. Theissmann, Adv. Eng. Mat. 6 (2004) 64.
- [10] R. Harshe, C. Balan, R. Riedel, J. Europ. Ceram. Soc. 24 (2004) 3471.



Gestalten Sie mit uns die Zukunft

Überdurchschnittlich qualifizierte Mitarbeiter sind der Motor unseres Unternehmens und Garant für eine kontinuierliche Weiterentwicklung unseres Unternehmenserfolgs. Als Branchenspezialist im Finanzdienstleistungssektor suchen wir kontinuierlich kreative Köpfe, die sich sowohl durch ihre Persönlichkeit als auch durch fundiertes Fachwissen auszeichnen. Wir sind sehr daran interessiert, Nachwuchskräfte und studentische Mitarbeiter/-innen für unser Unternehmen zu begeistern. Unabhängig davon, ob Sie gerne in Beziehung zum Kunden stehen oder im Back-Office komplexe technische, finanzmathematische oder betriebswirtschaftliche Aufgaben lösen, bieten wir Ihnen vielfältige Einstiegs- und Aufstiegsmöglichkeiten in den Bereichen IT-Integration, Softwareentwicklung, Consulting.

Das Arbeitsumfeld von GILLARDON ist geprägt von Vertrauen und Teamgeist. Eine flexible Organisationsstruktur und flache Hierarchien ermöglichen es unseren Mitarbeitern, ihre Ideen und Fachkompetenz voll zu entfalten. Neueinsteiger erhalten eine intensive fachliche Einarbeitung in das zukünftige Aufgabengebiet sowie anspruchsvolle und weitreichende Perspektiven.

Haben wir Ihr Interesse geweckt?

Dann informieren Sie sich über unsere vielfältigen Stellenangebote unter www.gillardon.de und senden Sie uns Ihre ausführlichen Bewerbungsunterlagen.

GILLARDON

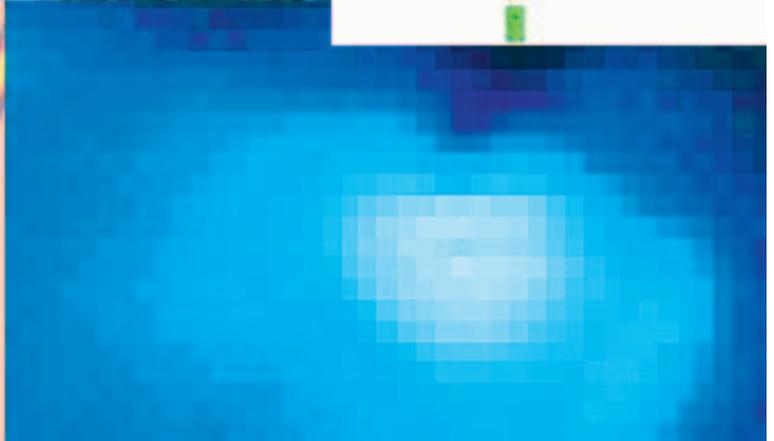
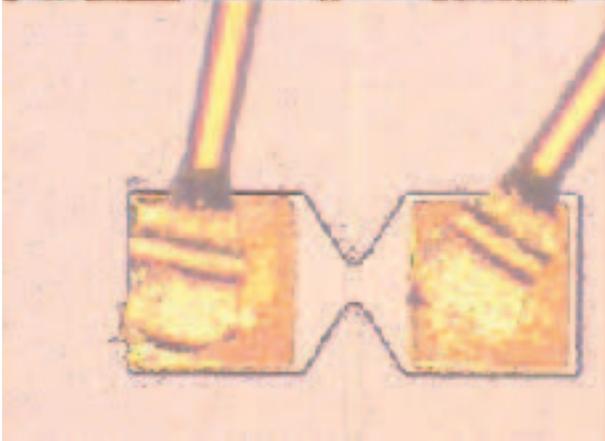
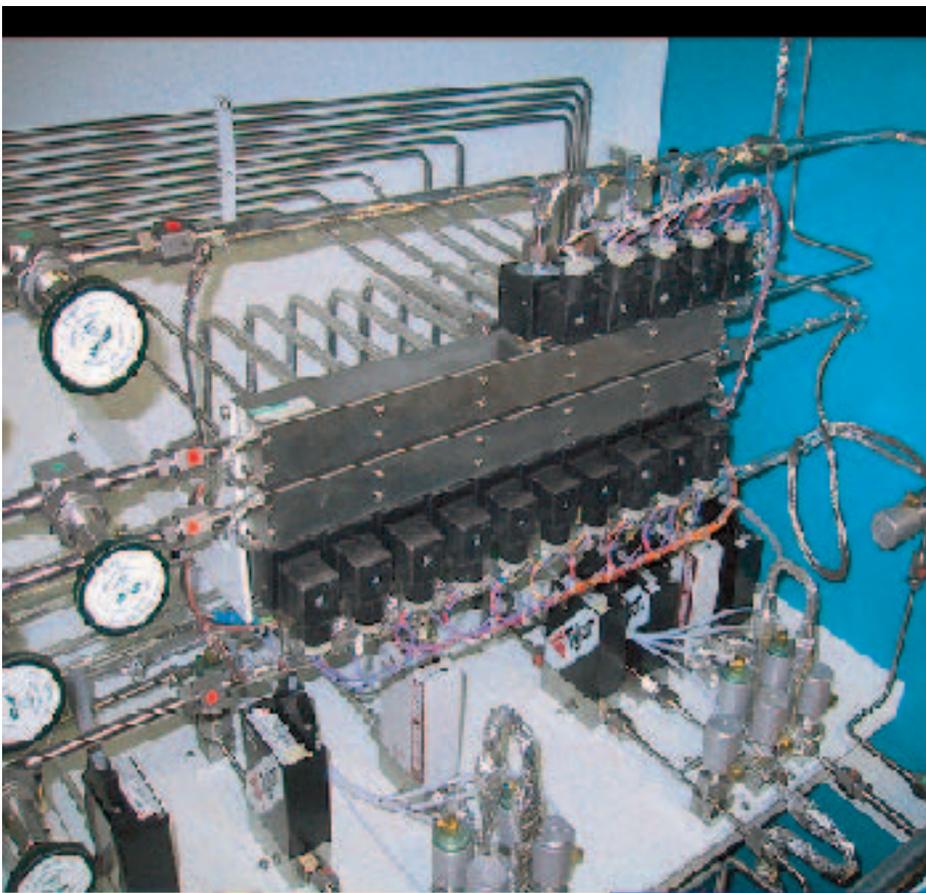
Bretten • Frankfurt • Karlsruhe • München

Wir sind ein expandierendes Softwareunternehmen mit mehr als 160 Mitarbeitern und entwickeln anspruchsvolle Softwaresysteme für die Finanzwirtschaft in den Themenbereichen Gesamtbanksteuerung, Produktkalkulation, Kundenberatung und Financial Planning. Unser Leistungsportfolio umfasst: Standardsoftware, Consulting, Seminare und Fachpublikationen. Zu unserem Kundenkreis zählen renommierte Banken, Sparkassen, Versicherungen und Bausparkassen. Wir beschäftigen uns mit topaktuellen Themen aus dem weiteren Kontext der Gesamtbanksteuerung wie Marktpreis- und Adressrisiko, Profit-Center-Steuerung, Basel II, IFRS und MaRisk.

GILLARDON AG financial software
 Melanie Stahlschmidt
 Alte Wilhelmstraße 4 · D-75015 Bretten
 Fon: +49 (0) 72 52 / 93 50 - 228
 E-Mail: kariere@gillardon.de
 Internet: www.gillardon.de

ein Unternehmen der ● msg systems ag

Wir denken nach, um vorzudenken



Wide- and Narrow-Bandgap Semiconductor Materials

Dimitris Pavlidis

Wide- and narrow-bandgap materials are investigated for devices that allow one to attain frequencies that span over a wide range and attain THz. Nanoscale dimensions are employed as obtained by growth or post-processing. Applications span from communications to biomedical engineering

Breit- und engbandige Halbleitermaterialien
Breit- und engbandige Halbleitermaterialien wurden in Hinblick auf Komponenten untersucht, die in einem sehr breitbandigen Frequenzbereich bis THz verwendet werden können. Sowohl beim Wachstum der Materialien, als auch in ihrer Mikro- und Nanostrukturierung werden Nanotechnologien verwendet. Anwendungen für solche Bauelemente findet man im Bereich der Kommunikation und der biomedizinischen Technologie.

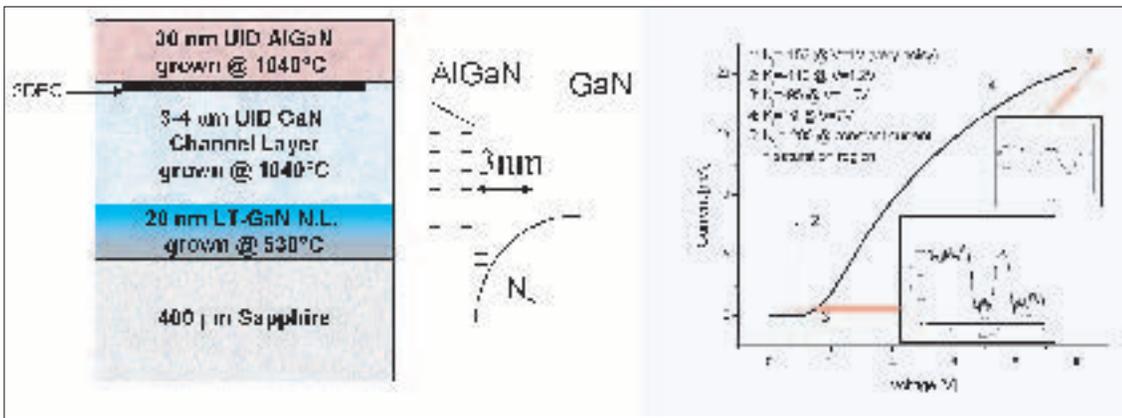


Fig. 1 Layer structure and band diagram of an electron channel with nanosize dimensions used for pressure sensing.

Schichtstruktur und Banddiagramm eines Elektronenkanals im Nanometerbereich für Drucksensoren-anwendung.

Response of high sensitivity sensor for various bias voltages.

Sensortantwort für unterschiedliche Versorgungsspannungen mit höchsten Druckempfindlichkeiten.

Semiconductor components have traditionally been based on silicon. Other materials such as III-V compound semiconductors have also attracted the interest of researchers over the last 40 years; but it is over the last 20 years that they made their way to the commercial arena representing a small but valuable part of products. Devices used daily, such as cell phones and satellite receivers take advantage of the unique properties of III-Vs to respond to system needs in the best possible way in terms of high frequency power and low-noise requirements. Sophisticated radars for automotive and other applications are also taking advantage of these semiconductors. A unique feature of non Si-based semiconductors is the plethora of material options that they offer through the possibility of combining two, three or more elements from the periodic table. Examples of these are GaAs, InP, GaN, ZnO, MgO, GaAsSb, InGaAs, AlGaN, InGaN and more. The only exception to this is the SiGe family of semiconductors, which although very promising, does not have the same versatile range of applications that other semiconductors possess. Each of the above materials can be distinguished through a property unique only to them: their bandgap. Narrow- and wide-bandgap materials cover the sub-eV to several eVs spectrum and open the way to a multitude of different applications that range from communications to biomedical engineering. Combined with other materials such as ferroelectrics, they can lead to very sophisticated functions that address tuning and high frequency requirements that span to the sub-millimeter-wave regime. All of the above materials offer exciting controlled properties based on nanostructuring and nanoparticle formation. These can be selected during material growth or by processing. Examples of the attractive possibilities offered by narrow- and wide-bandgap semiconductors are provided and discussed in more detail below.

Widebandgap semiconductors such as nitrides respond to needs where neither Si or traditional III-Vs can provide a solution. Short wavelength light emitters (LEDs and Laser) in the blue and UV region of the spectrum are an example of them. Short wavelength (blue and UV) lasers also have a huge market potential for high-capacity DVD media and high resolution laser printers. The use of a blue wavelength in DVD optical storage devices can increase the storage capacity by almost 6 times (~30 GB DVD capacity for blue laser compared to 5GB for the current red laser technology). Potential applications also include electronic

sensors inside the high temperature environments of automobile engines, gas turbines or other harsh environments, high-power amplifiers for cellular base stations to improve coverage area and signal to noise ratio, broadband communication for military application, high-power/high-speed switches, compact power sources, and broadband high-power phased array systems. In addition to their high carrier velocity and high breakdown field opening the way to high frequency, high-power applications, widebandgap semiconductors such as nitrides present spontaneous and piezoelectric polarizations exceeding those of conventional III-V semiconductors by more than an order of magnitude. Spontaneous polarization fields and strain-generated piezoelectric polarization fields present in pseudomorphic AlGaN/GaN or InGaN/GaN structures, may be as high as 3 MV/cm and 2 MV/cm. These very high polarization fields lead in extremely high sheet carrier concentrations in the order of 10^{13} cm^{-2} at the heterointerface.

Wide Band-Gap (WBG) Semiconductors are expected to play a fundamental role in the development of

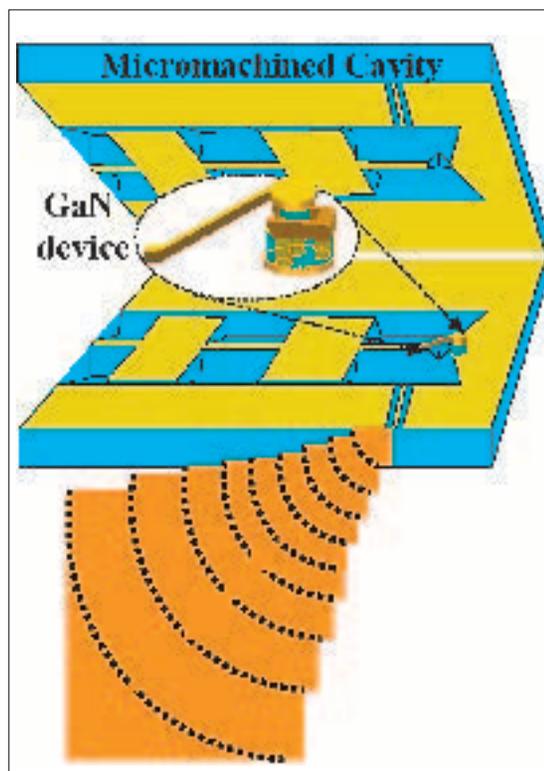


Fig. 2 Schematic view of THz signal generation using an NDR Nitride Device and micromachined circuitry.

Prinzip von THz Signalzeugung basierend auf NDR Nitrid-Komponenten und „micromachined“ Schaltungen.

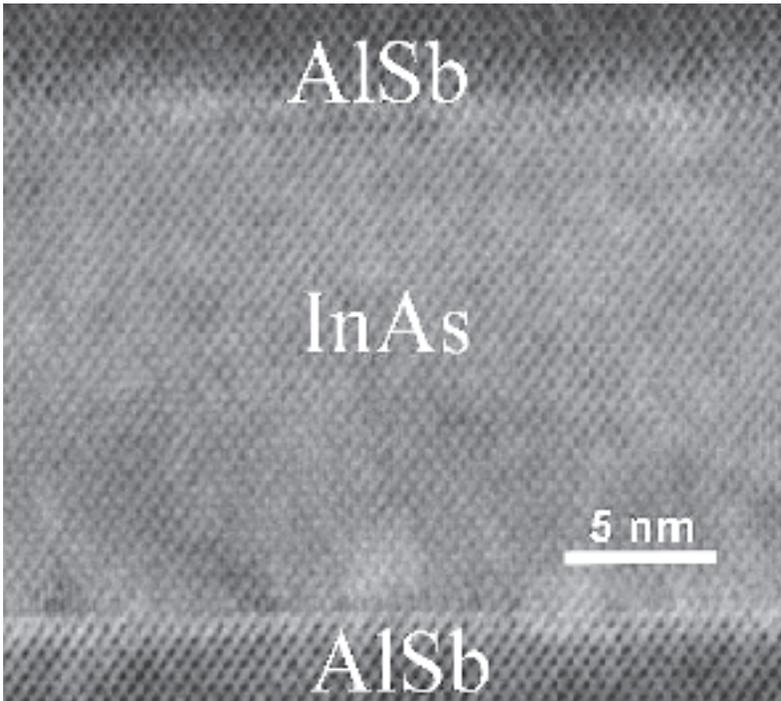


Fig. 3 Atomic resolution of crystalline structures is possible using high resolution electron transmission microscopy. The picture shows a nanometer AlSb/InAs Quantum well that could allow THz signal generation.

Mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie ist eine atomare Auflösung von kristallinen Strukturen möglich. Im Bild ist ein Nanometer großer AlSb/InAs-Quantentopf zu sehen, der THz Frequenzen ermöglicht.

Intelligent Microsystems (IMS), yielding unprecedented performance, efficiency and, along with suitable reconfigurable architectures, adaptability to operational changes. Other applications explored by our group include pressure and gas sensors (Fig. 1). Sensors of this type exploit the unique piezoelectric, polarization characteristics, as well as the high temperature stability of wide-bandgap semiconductors in order to allow stable operation with high sensitivity. Using this material system one can also explore the possibility of developing fundamental sources operating in the THz regime and employing Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) approaches (Fig. 2). Devices of this type operate using the Negative Differential Resistance (NDR) mechanism.

Wurtzitic ZnO is a wide-bandgap semiconductor with a free exciton having a 60-meV binding energy, which

permits excitonic emission at room temperature and above paving the way to the brightest ever made emitters. ZnO can also take advantage of already existing native large-area substrates and has excellent resistance to radiation damage. Heterostructures can also be built based on the MgO/ZnO system. These may have potential applications in imaging and electronic control. ZnO also has an excellent lattice match to GaN, making ZnO an attractive substrate material. Some of the Co-doped ZnO films exhibit ferromagnetic behaviour with a Curie temperature higher than room temperature.

Of particular importance among the narrow bandgap semiconductors is the GaAsSb material system, which allowed Heterojunction Bipolar Transistors to present terahertz (THz) operation capability. The staggered band lineup at the GaAsSb/InP base-collector junction not only eliminates the electron blocking problem but also allows electrons at the base-collector edge to be ballistically launched into the collector at high initial energies. The velocity overshoot of electrons achieved in the subcollector allows for shorter transport times. Moreover, due to the relatively large energy separation between satellite valleys, electrons launched from base to collector generally do not reach a critical energy for inter-valley transfers. In addition to extremely high frequency devices demonstrated with this system, monolithic integrated circuits such as those demonstrated by our group start proving the ultimate potential capability of these devices.

GaAsSb grown at low-temperature (LT) can also be used as a replacement for the more traditionally recognized material for THz applications. Short carrier lifetimes are necessary for this purpose and THz signals are generated based on photoconductivity. For LT-GaAs hopping between deep level defects (AsGa), which can be found in very high concentrations in non-annealed samples is the main mechanism of conduction. In non-stoichiometric LT-GaAs, metallic As nano-precipitates are formed upon annealing, which reduce the AsGa point defects and lead to high resi-

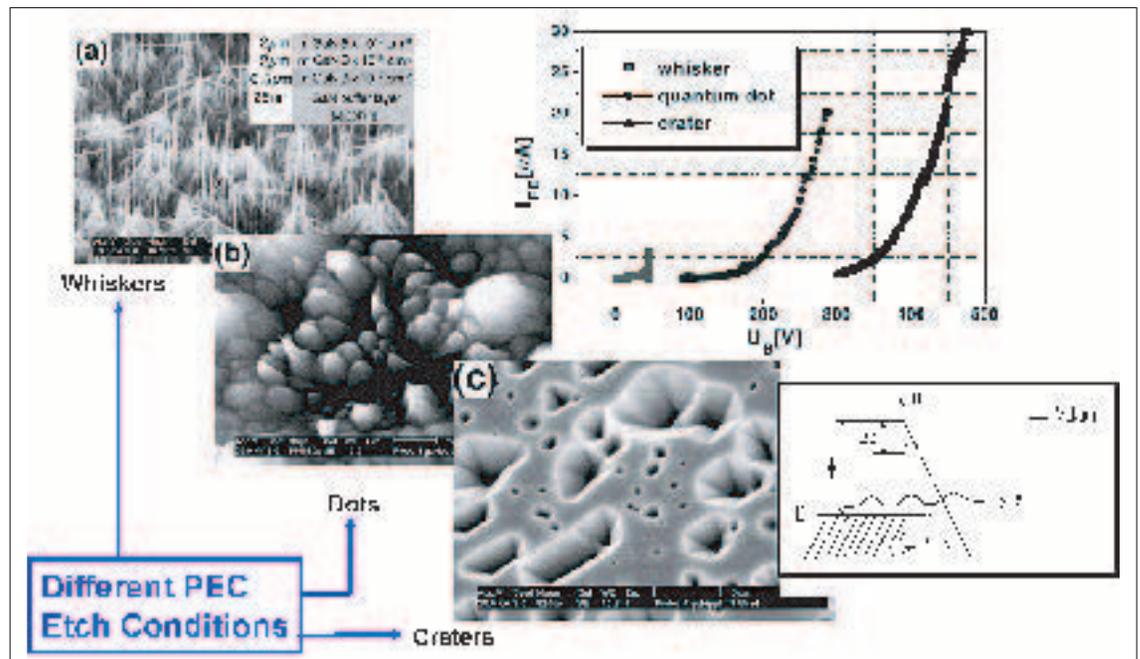


Fig. 4 Field emission from quantum size GaN structures. Feldemission von GaN Strukturen mit Quantenabmessungen.

stance. GaAsSb follows similar trends depending on composition and as demonstrated by our investigations may also be used for THz signal generation offering a major advantage in terms of the type of laser source that is used. By mixing the technology of low- and high-frequency (up to several THz) microelectronics i.e. microwave devices with microfluidic networks one can provide an analytical platform for studying specimens of biological and (bio)chemical origin. This approach allows one to avoid markers that current Polymerase Chain Reaction (PCR) techniques use; markers are needed (1) to detect and quantify DNA; (2) quantify in real time the tested DNA from the sample.

Traditional approaches used so far for THz signal generation were based on femtosecond, as well as solid state lasers and were therefore relatively bulky. Recent progress and new concepts using narrow- and wide-bandgap semiconductors and device concepts such quantum wells with very high mobility (Fig. 3) and plasma waves will lead in THz detectors and emitters. Semiconductors of this type may also be used for other novel applications such as spintronics and field emission (fig. 4). Other approaches include nanometer gates deposited on Quasi-1D channels (Fig. 5).

Spin-based electronic devices employ the spin instead of the charge for information processing. Spintronic devices can be extremely small in size and therefore very attractive for new logic components with lower power consumption and higher degree of functionality than in classical electronic devices. Moreover, spintronics can incorporate novel functionalities by combining for example, magnetic storage of information with electronic readout in the same device. Efficient injection of spin-polarized electrons into nonmagnetic materials, minimization of spin dephasing and the ability of spin control during transport, as well as efficient spin detection are an absolute requirement in these devices and novel concepts using resonant tunneling structures are considered by our group to fully explore their attractive features.

Instead of using very thin emitters for field emission, as for example necessary for vacuum microelectronics one can use semiconductor materials with selected properties. By proper material selection and device geometry one can decrease the work function and introduce quantum size effects that have an impact on field emission. Quantum size GaN whiskers and quantum dots have been studied for this purpose and appear to be very promising for such applications.

Frequency modification of GHz and THz components can be achieved via ferroelectric material in the paraelectric state. Using the electric field dependence and nonlinear behavior of the dielectric constant ϵ , modification of the resonance frequency, shifting of the phase as well as frequency multiplication can be obtained. Ideal candidates for complex RF components are thin ferroelectric films that can be combined with semiconducting rf devices. SrTiO₃ (STO) and (Ba,Sr)TiO₃ (BSTO) seems to be most suitable choice of ferroelectric thin films. Studies of this type in integrated form with wide bandgap semiconductors will permit the development of ultra-small chips for sensing and diagnosis and are explored in our group.

The Department of High Frequency Electronics at TU Darmstadt

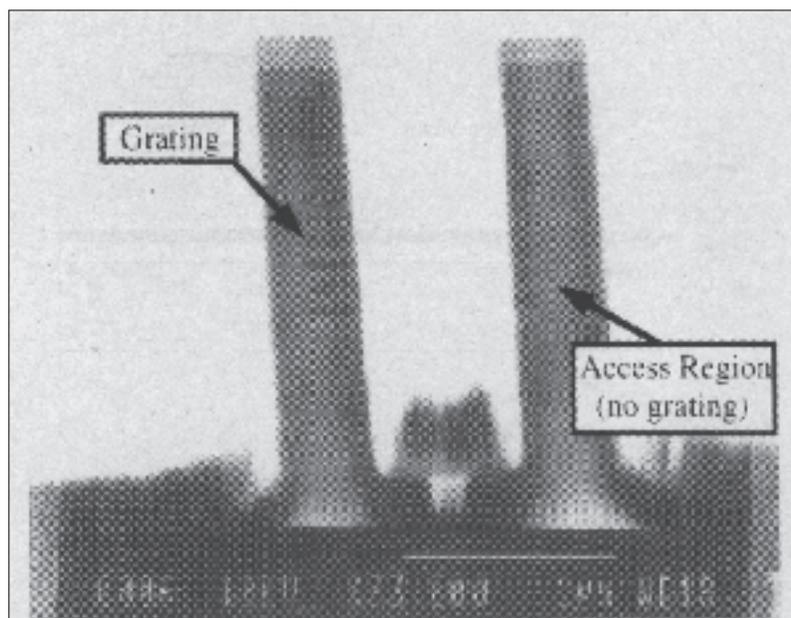
The Department of High Frequency Electronics has a major research activity in semiconductor growth (MBE, MOCVD), processing and characterization. Narrow i.e. Sb-based and Wide-bandgap i.e. nitrides and other III-V compounds are a major part of the activities. Nanostructuring at growth or upon processing is a key to the research. THz signal sources based on NDR and superlattices are also explored. Applications cover a wide range of devices, circuits and components for communications, sensors and biomedical engineering.

Contact: www.hf.e-technik.tu-darmstadt.de/en/labs/mwe

The following group members are greatly acknowledged for their contributions to the presentation of this work: Eunjung Cho, Shawn Hsu, Seth Hubbard, Kabula Mutamba, Sanghyun Seo, Jochen Sigmund, William Sutton, Pouya Valizadeh, Oktay Yilmazoglu. Thanks also go to the students, fellows, colleagues, as well the agencies and industry that supported the reported work.

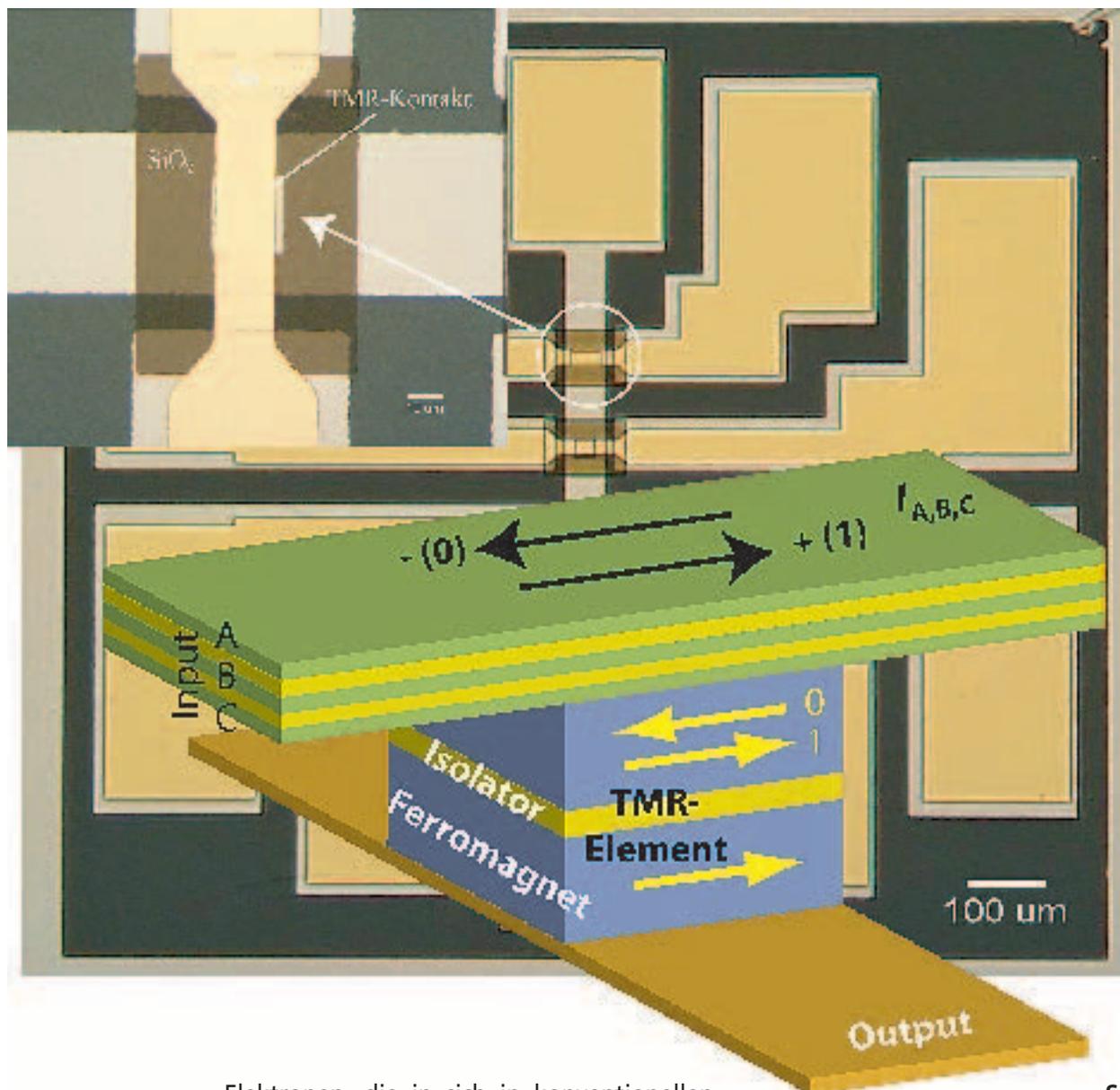
Fig. 5
Hochfrequenztransistor (220 GHz) with 100 nm gate length and quasi 1D channel.

Hochfrequenztransistor (220 GHz) mit 100 nm Gatelänge und Quasi-1D Kanal.



Die spinnen, die Oxide: Neue Materialien für die Spintronik

Lambert Alff



Elektronen, die in sich in konventionellen Bauelementen bewegen, sind sich einer ihrer grundlegendsten Eigenschaften meist gar nicht „bewusst“: dass sie einen Spin besitzen. In der Spintronik will man diesen Freiheitsgrad der Ladungsträger für verbesserte und ganz neue Bauelemente nutzen. In manchen ferromagnetischen Oxiden „spinnen“ die Elektronen sogar völlig: Alle haben dieselbe Spinrichtung. Dabei treten nicht nur gigantische magnetoresistive Effekte auf, sie lassen sich auch in zukünftigen Rechnerspeichern und sogar für Quantencomputer nutzen.

Spintronics:

A new spin for electronics In conventional electronic devices one basic quantum mechanical property of electrons is neglected: electrons possess a spin. It is the vision of spintronics to use this degree of freedom for better and completely novel devices. In some ferromagnetic oxides, all conducting electrons even have the same spin direction. This will not only cause giant magnetoresistive effects, but these effects can be used in future computer memory chips and even quantum computers.

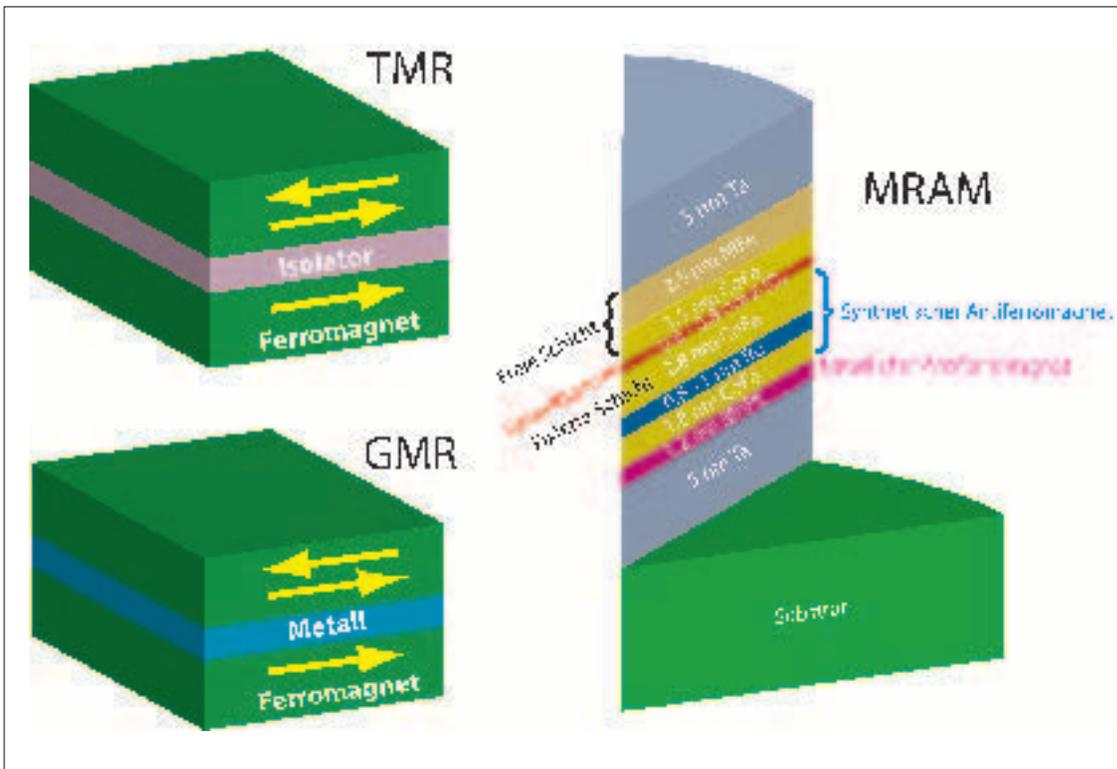
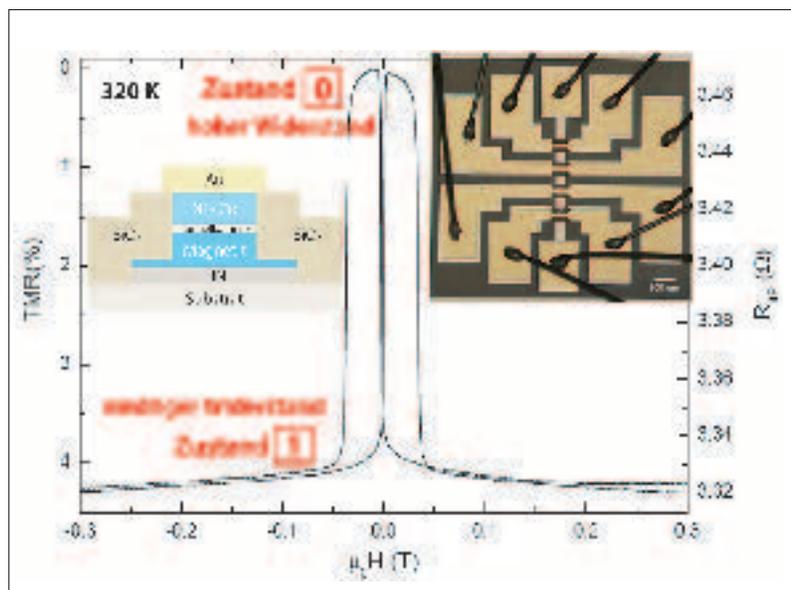


Abb. 1
 Links oben: Grundbaustein eines TMR-Bauelements.
 Links unten: Grundbaustein eines GMR-Bauelements.
 Rechts: Komplexer Aufbau eines realistischen MRAM-Bauelements.
 Upper left: Basic element of a TMR device. Lower left: Basic element of a GMR device. Right: Complex buildup of a realistic MRAM device.

Der Begriff Spintronik oder Spin-Elektronik geistert seit einiger Zeit durch die Welt der Mikroelektronik [1]. Eigentlich müsste man wohl gemäß der neuen deutschen Rechtschreibung Spinn-Elektronik schreiben, was einen interessanten Aspekt zum Thema „intelligente Materialien“ beitragen würde. Gemeint ist allerdings etwas anderes: In herkömmlichen Bauelementen wird für die jeweilige elektronische Funktion die Ladung der Elektronen genutzt. Elektronen haben aber auch noch einen Eigendrehimpuls, sozusagen einen Drall wie der vom Außenstürmer in den Strafraum geflankte Ball. Das Bild eines rotierenden Teilchens ist zwar historisch gesehen hilfreich gewesen, letztlich ist der Spin aber eine quantenmechanische Eigenschaft der Elektronen. Und es ist diese Eigenschaft, die man in der Spintronik für neuartige und verbesserte Bauelemente zu verwenden sucht.

Zwei essenzielle Entdeckungen im Rahmen der Spintronik sind der sogenannte Riesen-Magnetwiderstand (GMR, engl. giant magneto resistance) und der Tunnel-Magnetwiderstand (TMR). Der Grundbaustein eines GMR-Bauelements ist in Abb. 1 (links unten) gezeigt. Dabei hängt der elektrische Widerstand durch eine solche Anordnung von der relativen magnetischen Ausrichtung der Elektroden ab. Sind sie parallel magnetisiert, ist der Widerstand niedrig, im antiparallelen Fall ist der Widerstand hoch: Diesen beiden Zuständen ordnet man jetzt noch die Information 0 und 1 zu – fertig ist ein magnetisch gesteuerter digitaler Speicherbaustein. Der GMR-Effekt wurde 1988 gemeinsam von Peter Grünberg (Forschungszentrum Jülich) und Albert Fert (Universität Paris-Süd) entdeckt und schon 1997 von IBM kommerziell erstmalig genutzt – eine leider nur selten glückende rasche Umsetzung von Forschungsergebnissen in Massenprodukte.

In einem TMR-Bauelement ist die metallische Zwischenschicht des GMR-Kontakts durch eine isolierende Schicht ersetzt (Abb. 1, links oben). Deswegen



müssen die Elektronen durch diese Schicht „durchtunneln“, auch ein quantenmechanisches Verhalten. In Abb. 2 ist das typische Schaltverhalten eines TMR-Bauelements gezeigt. Man sieht deutlich zwei Widerstand-Plateaus, denen man die digitale Information 0 und 1 zuordnen kann. TMR-Bauelemente sind bislang noch nicht kommerziell eingesetzt. Sie werden allerdings als heiße Kandidaten für MRAM (magnetic random access memory) Speicherbausteine (Abb. 1, rechts) der Zukunft gehandelt. Der große Vorteil der MRAM-Technologie liegt darin, dass der Speicher nicht-flüchtig ist, also die magnetisch gespeicherte Information nicht nach Abschalten des Computers verloren geht. MRAM soll in der Zukunft das universale Speicherbauelement sein, das die Vorteile der bisherigen Speichermöglichkeiten in (langsamen) Festplatten und schnellen (aber flüchtigen) Arbeitsspeichern vereint, ohne deren Nachteile zu besitzen.

Abb. 2
 Schaltverhalten eines TMR-Bauelements auf Basis von Magnetit mit Aluminiumoxid-Tunnelbarriere (Doktorarbeit Daniel Reisinger, TU München).
 Switching behavior of a TMR device based on magnetite with aluminium oxide barrier (Ph.D. Daniel Reisinger, TU München).

Wir klappen also unseren Laptop auf – und haben sofort die Information parat, die wir beim Abschalten auf dem Bildschirm und im Arbeitsspeicher hatten. Weniger bekannt ist, dass ein TMR-Element die Leistungsfähigkeit eines Computers dadurch deutlich erhöhen könnte, dass es neben seiner Funktion als Speicherbaustein auch als Logikelement dienen kann [2]. Schematisch ist der Aufbau eines solchen Logikelements in der Titelabbildung gezeigt. Mit dieser Technologie würde die räumliche Trennung des Datenspeichers von der Datenverarbeitung aufgehoben – und die Rechenleistung enorm nach oben getrieben. Das ist zwar noch Zukunftsmusik, aber die Forschung läuft...

Eine wesentliche Thematik im Bereich der Spintronik ist die Verbindung von Halbleitern und ferromagnetischen Materialien. Ein prototypisches Bauelement ist der Spin-FET (Feldeffekttransistor), wie er 1990 von Datta und Das vorgeschlagen, aber bis heute nicht verwirklicht wurde. In dem in Abb. 3 (links) gezeigten Transistor wird der durch ein zweidimensionales Elektronengas (2 DEG), das sich an der Grenzfläche zwischen einer InGaAs- und einer InAlAs-Schicht bilden kann, geleitete Elektronenfluss durch eine Basisspannung (am gate) gesteuert. Die Einleitungs- und Ableitungselektroden (source und drain) sind dabei aus einem magnetischen Material, hier Eisen. Der Transistoreffekt beruht darauf, dass durch den auf der Spin-Bahn-Wechselwirkung beruhenden Rashba-Effekt eine Präzessionsbewegung des Spins hervorgerufen wird. Je nach Präzessionswinkel, der durch die Basisspannung eingestellt werden kann, verändert sich nun der an der Ableitungselektrode anfallende Strom.

Das im rechten Teilbild in Abb. 3 gezeigte Bauelement, eine spinbasierte Licht emittierende Diode, ist schon in Spin-LEDs (light emitting diodes) oder Spin-

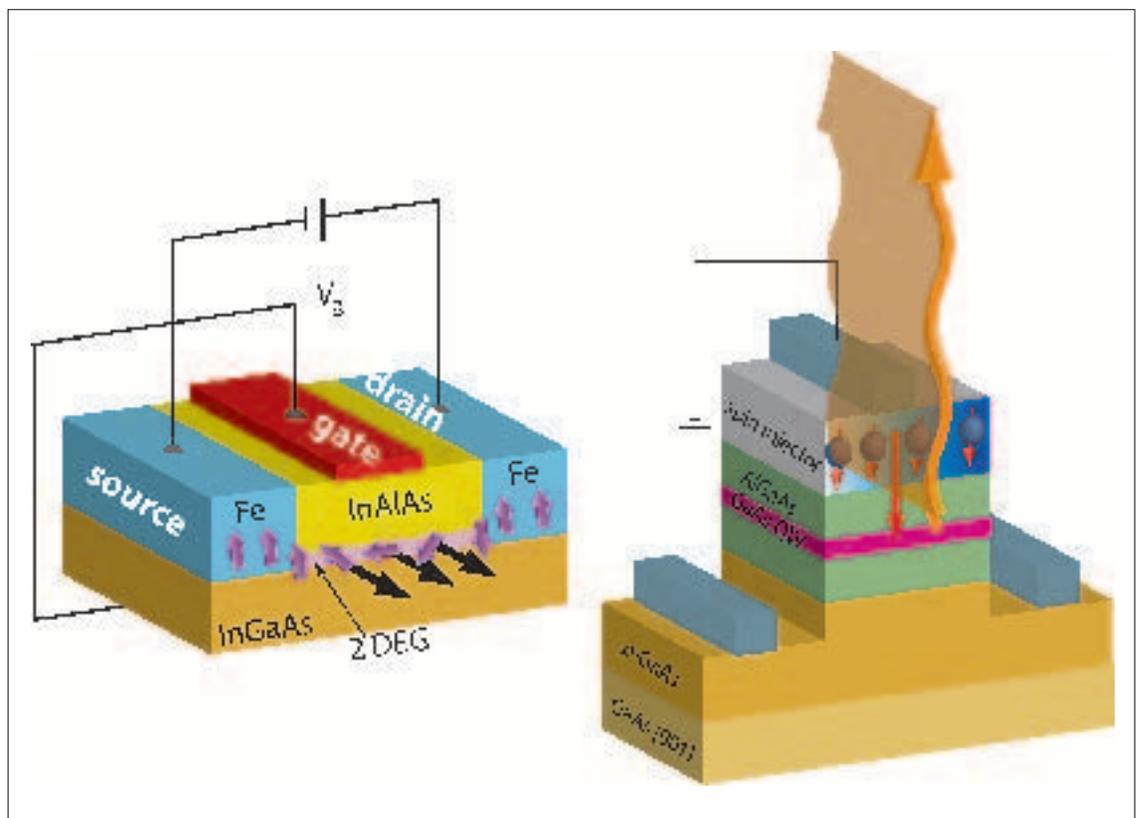
VCSELs (vertical cavity surface emitting lasers) realisiert. Hier nutzt man im Bereich der Spin-Optoelektronik die Tatsache aus, dass sich die Polarisation der Strom tragenden Ladungsträger in die Polarisation von Licht übersetzen kann (und umgekehrt). Damit kann brillantes rechts- oder linkszirkulares Licht erzeugt werden. Die Spin-VCSELs dringen dabei in den technisch interessanten Terahertz-Frequenzbereich vor.

Bisher haben wir nur klassische Anwendungen der Spintronik diskutiert. Es gibt aber auch die Möglichkeit, nicht nur ein beliebiges statistisches Ensemble von Spins in einem Material zu haben, sondern Spins können sich in einem quantenmechanisch kohärenten Zustand befinden. Durch optische Pulse manipuliert kann man eine Überlagerung von Basiszuständen erreichen, die über signifikante Zeiten (einige 100 ns) und Entfernungen (einige μm) Bestand hat. Zwar scheinen 100 ns keine wirklich lange Zeit zu sein; gemessen an den Laserpulsen im Femtosekunden-Bereich sieht die Sache jedoch um einige Größenordnungen anders aus. Damit kann die Spintronik nicht nur die Grundlage für neue Computer werden, die aber herkömmlich konzipiert sind, sondern auch die Basis für einen zukünftigen Quantencomputer sein, der bestimmte Rechenoperationen durch Quantenalgorithmen extrem beschleunigen kann.

An der TU Darmstadt wird im Bereich Spintronik an der Entwicklung neuer Materialien gearbeitet, die zum einen einen hohen magnetoresistiven Effekt zeigen, und zum anderen mit konventionellen Halbleitern kompatibel sind. Die Größe des TMR-Effekts hängt von der magnetischen Polarisation der Ladungsträger im Elektrodenmaterial ab. Das Ideal ist, dass alle Elektronen die gleiche Spinrichtung haben, sie „spinnen völlig“. Solche Materialien nennt man Halbmetalle, weil nur die eine Hälfte der Elek-

Abb. 3
Zwei Bauelemente der Spintronik. Links: Ein Spin-Feldeffekttransistor nach dem Vorschlag von Datta und Das (1990). Rechts: Eine spinbasierte Diode, die brillantes zirkular polarisiertes Licht emittieren kann.

Two spintronics devices. Left: Spin field-effect transistor according to Datta and Das (1990). Right: A spin-based diode that is capable to emit left and right circularly polarized brilliant light.



Wertschätzung **leben.**



Heraeus

Wir bauen auf Mitarbeiter/innen, die Intelligenz und Menschlichkeit vereinen.

Ein Name. Ein Unternehmen. Eine Erfolgsgeschichte. Als herausragender Global Player bietet Heraeus eine ideale Plattform für die individuelle berufliche und persönliche Weiterentwicklung. Setzen Sie Zeichen. Bei Heraeus.

Hier tragen innovative, qualifizierte und hoch motivierte Menschen im Umgang mit Edelmetallen und anderen hochwertigen Werkstoffen maßgeblich zum Fortschritt bei. In der anspruchsvollen Materialtechnologie. Für die Industrie. Für Medizin und Gesundheit.

Dafür nutzen sie zahlreiche individuelle Gestaltungsfreiräume und die besondere partnerschaftliche Atmosphäre eines Familienunternehmens. In diesem Umfeld wird Wertschätzung täglich neu gelebt – von Kunden und Mitarbeitern. Das Resultat: faszinierende Produkte, die fester Bestandteil unseres täglichen Lebens sind. Weltweit.

Sind Sie dabei? www.heraeus.com

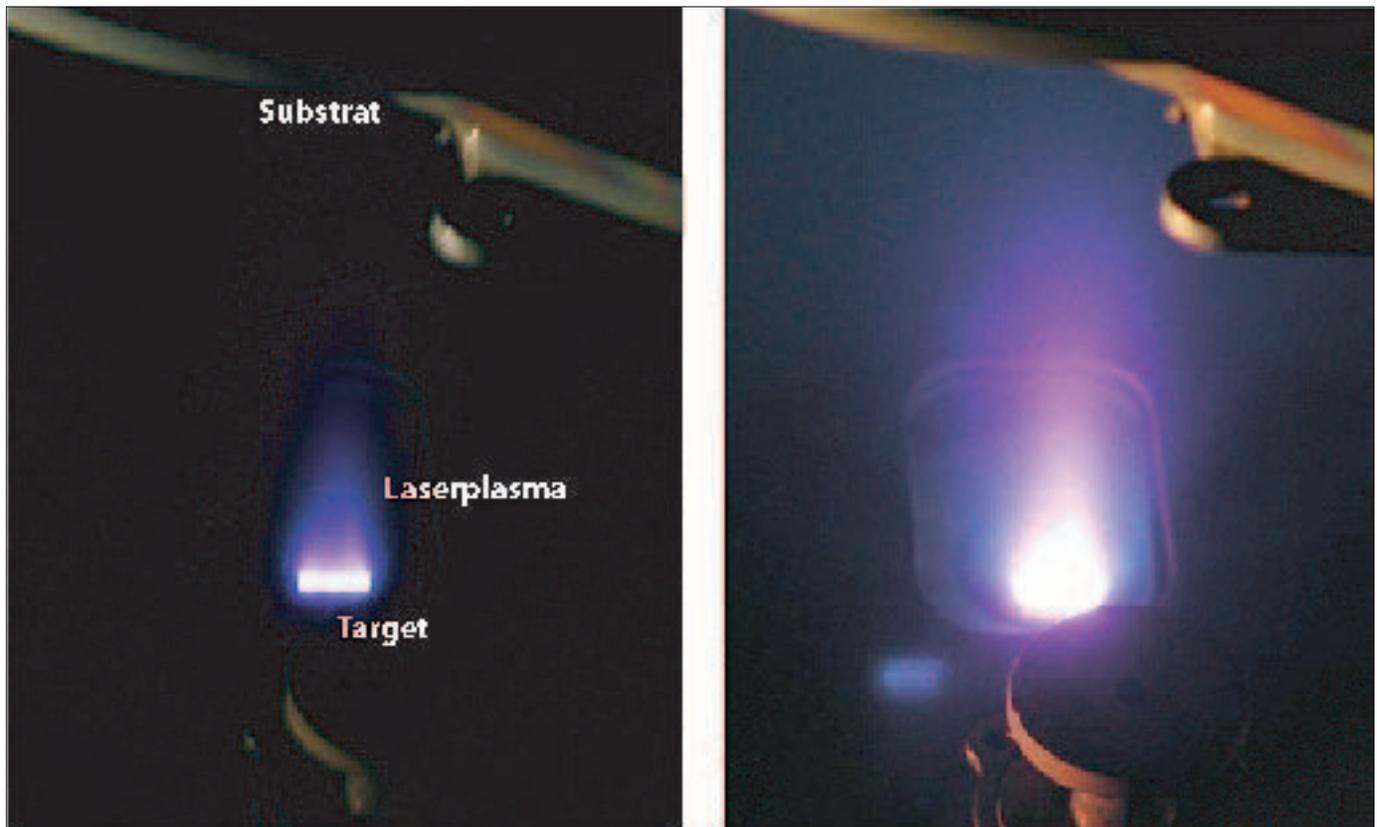


Abb. 4
Blick in eine Laserdepositionsanlage bei der Herstellung eines TMR-Bauelements.
View into a laser deposition system during fabrication of a TMR device.

tronen, nämlich die mit der bevorzugten Spinrichtung, Strom leiten. Solche Halbmetalle gibt es insbesondere in der großen Materialklasse der perowskitartigen Oxide (eine weitere interessante halbmetallische Materialklasse sind die Heuslerschen Legierungen). Aus der Gruppe der Oxide stammen nicht nur die berühmten Hochtemperatur-Supraleiter, sondern eben auch halbmetallische magnetische Oxide für die Spintronik. Dünne Schichten aus diesen Materialien können mit modernen Beschichtungsverfahren wie der gepulsten Laserdeposition (PLD) hergestellt werden, wobei ein Laserstrahl ein stöchiometrisches Target in ein Plasma verdampft (Abb. 4), das sich auf einem Substrat als epitaktische Schicht des gewünschten Materials abscheidet – wenn man Temperatur und Druck richtig eingestellt hat. Jüngstes Forschungsergebnis einer Gemeinschaftsarbeit der TU Darmstadt mit dem Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart sind Materialien, in denen die spinpolarisierte Leitfähigkeit in einem großen Bereich zwischen metallisch und isolierend gezielt durch Dotierung eingestellt werden kann. Diese Materialien stammen aus der Gruppe der Doppelperowskite und können möglicherweise dazu beitragen, die Herstellung von widerstandsangepassten Ferromagnet-Halbleiter-Kompositstrukturen zu erleichtern – und damit ein Mosaiksteinchen zur Verwirklichung der Vision einer spinbasierten Elektronik für die Zukunft liefern.

Literatur

- [1] S. A. Wolf et al. Spintronics: A spin-based electronics vision for the future. *Science* 294, 1488 (2001).
- [2] A. Ney, C. Pampuch, R. Koch, K. H. Ploog. Programmable computing with a single magnetoresistive element. *Nature (London)* 425, 485 (2003).

Das Fachgebiet Dünne Schichten an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet beschäftigt sich mit modernen Herstellungsmethoden dünner epitaktischer Schichten. Im Mittelpunkt der Forschung stehen komplexe Übergangsmetalloxide und deren Übergitter, wie zum Beispiel Hochtemperatur-Supraleiter, Ionenleiter für Dünnschichtbatterien und eben magnetische Oxide für die Spintronik. Als Dünnschichtverfahren werden Sputtern, gepulste Laserverdampfung und eine speziell entwickelte Oxid-Molekularstrahlepitaxie eingesetzt. Zur Probencharakterisierung stehen mehrere Tieftemperatur-Magnetkryostate (bis 16 Tesla und 300 Millikelvin), ein SQUID-Magnetometer und Röntgendiffraktometrie zur Verfügung.

Leiter des Fachgebiets:

Prof. Dr. rer. nat. Lambert Alff

Anschrift:

Institut für Materialwissenschaft

Petersenstr. 23

64287 Darmstadt

E-Mail: alf@oxide.tu-darmstadt.de



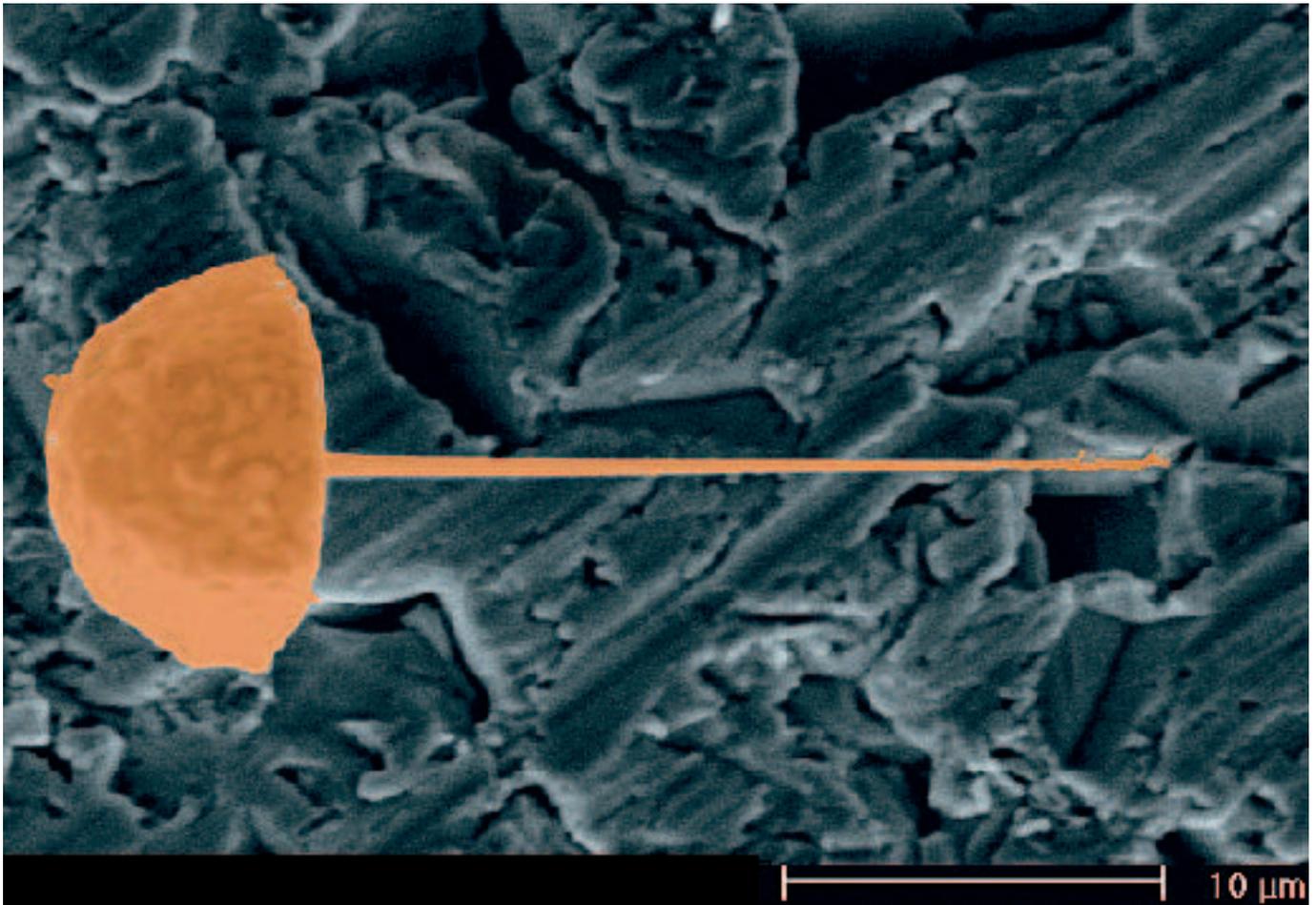
Omya - weil Papier Kostbares birgt

Ihre Bedürfnisse und Ansprüche sind unsere Inspiration.
Unsere Spezialisten erarbeiten Lösungen für Sie,
die Ihr Geschäft noch erfolgreicher machen.



omya.com

Omya - Ihr kompetenter Partner, wenn es um Pigmente geht.



Herstellung und Charakterisierung von Nanodrähten

Wolfgang Ensinger/Reinhard Neumann

Nanodrähte kommen für vielfältige Anwendungen in Frage, z.B. als Halbleiter-Bauelemente und Leiterbahnen in nanoelektronischen Schaltkreisen oder als Sensoren für chemische und biologische Spezies wie Biomoleküle und Mikroben. In der Doppelfunktion als Detektoren und Aktuatoren, die nach Detektion eines bestimmten Objekts einen spezifischen Vorgang ausführen, würden sie intelligente Materialien darstellen. Mit solchen Möglichkeiten vor Augen erzeugen wir Nanodrähte in Polymerfolien, die über Ionenbestrahlung mit Nanoporen ausgestattet wurden, und charakterisieren ihre Eigenschaften als Funktion der Abscheidebedingungen.

***On the way to intelligent nanomaterials: generation and characterization of nanowires** Nanowires are presently considered for numerous applications, for example, as semiconductor components and strip conductors in nanoelectronic circuits, or as sensors for chemical and biological species such as biomolecules and microbes. If functioning both as sensors and actuators which, after detecting a certain object, perform a specific process, they would represent intelligent materials. Having these possibilities in mind, we generate nanowires in polymer membranes that have been equipped with nanopores via ion irradiation, and characterize their properties as a function of the growth parameters.*

Wann spricht man von Nanodrähten?

Ein Draht verdient dann die Bezeichnung Nanodraht, wenn sein Durchmesser erheblich (d.h. üblicherweise um mindestens einen Faktor 10) kleiner als ein Mikrometer (= ein millionstel Meter) ist und außerdem seine Länge den Durchmesser um mindestens eine Größenordnung überschreitet. Bei vielen in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Nanodrähten erreichen die Durchmesser größenordnungsmäßig zehn oder einige zehn Nanometer (ein Nanometer ist der milliardste Teil eines Meters), und das Verhältnis von Länge zu Durchmesser besitzt Werte von 1000 und mehr. Dabei kann der Querschnitt eines Nanodrahts ganz unterschiedliche Gestalt haben, also etwa quadratisch oder kreisförmig sein. Auch bei der Art der Festkörpermateriale, aus denen Nanodrähte bestehen, gibt es keine Einschränkungen.

Anwendung von Nanodrähten

Nanodrähte kommen für eine Vielzahl von Anwendungen in Frage [Köhler, 2001; Bushan, 2004; Hartmann, 2006]. Eine große Sparte stellen Elektronik und Optoelektronik dar. So kann man Nanodrähte als Halbleiter-Bauelemente herstellen, z.B. als p-n Dioden oder Feldeffekt-Transistoren, oder ihnen die Funktion als Leiterbahnen in elektronischen Schaltkreisen übertragen. Weitere Möglichkeiten bietet die Verwendung als optische Bauelemente wie LEDs für Chip-to-Chip-Kommunikation, oder als Feldemitter, z.B. für Displays oder Magnetleseköpfe. Zur Herstellung von Systemen der integrierten Optik im Submikrometer-Bereich werden nanoskalige Lichtquellen benötigt, ebenso entsprechend kleine Schaltelemente und Detektoren. Eine maximale Dichte in der optischen Informationsübertragung liefert die Verwendung kohärenter Lichtquellen, also von Nanolasern, für die sich Nanodrähte heranziehen lassen. Wohldefinierte Endflächen können dabei als Laserresonator-Spiegel fungieren. Ein typisches Material für Nanolaser ist Zinkoxid. Weitere Anwendungen für Nanodrähte liegen im Bereich der Sensorik für elektromagnetische Strahlung oder für Magnetfelder. Ebenso können sie zum Nachweis chemischer und biologischer Substanzen eingesetzt werden. Hier seien Wasserstoffsensoren genannt, die in einer zukünftigen Wasserstoff-Energiewirtschaft eine große Rolle spielen könnten. Ein weiteres, der Medizin entnommenes Beispiel sind Biomoleküle wie Glucose, deren Nachweis wegen der Zunahme von Erkrankungen an Diabetes II aufgrund der wachsenden Lebenserwartung der Menschen eine immer größere Rolle spielen wird.

Nanodrähte als intelligente Materialien

Die obigen Beispiele zeigen, dass Nanodrähte sowohl passiv, wie in Detektoren, als auch aktiv, z.B. als Strahlungsemitter, einsetzbar sind. Besonders augenfällig für eine aktive Rolle ist die Aktuatorik, in der sie sich z.B. als winzige Pinzetten verwenden lassen. Nanodrähte aus geeigneten Materialien können z.B. durch Anlegen eines elektrischen Feldes dazu veranlasst werden, sich zu verbiegen oder ihre Dimensionen zu ändern. Zwei Nanodrähte, die aus einer paral-

lelen Ausgangslage kontrolliert und reversibel eine Zangenbewegung ausführen, stellen eine Nanopinzette dar. Diese kann genügend große Kräfte ausüben, um nanoskalige Objekte gegen die Gravitation oder gegen Coulomb- oder van-der-Waals-Kräfte zu bewegen. Die Kombination von Nanodrähten als passive Komponenten, wie Detektoren oder Sensoren, mit einer aktiven Funktion, z.B. als Aktuatoren, so dass nach Überschreiten eines Schwellenwertes ein Vorgang realisiert wird, führt zu einem intelligenten Material. So ist etwa ein Sensor vorstellbar, der mit Hilfe spezifischer Rezeptoren bestimmte bei einer Erkrankung auftretende Moleküle registriert und durch Ausschüttung eines Medikamentes eine Maßnahme zur Vermeidung negativer Symptome oder gar zur Heilung ergreift.

Herstellung von Nanodrähten mit definierten Eigenschaften

Auf dem Weg zu Bauelementen auf der Grundlage von Nanodrähten mit Fähigkeiten intelligenter Materialien befinden wir uns noch in der Phase der Forschung zur Herstellung und Charakterisierung von Nanodrähten. Zur Erzeugung verwenden wir im Rahmen unserer Zusammenarbeit die sog. Templatmethode. Dazu wird eine Polymerfolie – das Templat – mit Poren versehen, welche sich mit dem gewünschten Drahtmaterial füllen lassen. Auf diese Art wurden z.B. Nanodrähte aus Kupfer, Bismut und Gold hergestellt.

Abb. 1 zeigt die Methode schematisch. Eine typischerweise einige zehn Mikrometer dicke Polymerfolie (z.B. Polycarbonat) wird mit Ionen schwerer Elemente wie Gold oder Blei bestrahlt. Diese vom Linearbeschleuniger UNILAC der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) gelieferten Projektile besitzen eine derart hohe Geschwindigkeit, dass sie die Folie vollständig durchdringen. Sie bewegen sich völlig geradlinig und werden durch die Wechselwirkung mit dem Material längs ihrer Flugbahn abgebremst. Bei diesem Abbremsvorgang brechen sie chemische Bindungen des Polymers auf, wodurch sich langgestreckte, quasizylindrische Schadensbereiche (sog. latente Ionenspuren) bilden. Im Bereich dieser Spuren mit Durchmessern von einigen Nanometern besitzt das Polymer nun andere chemische Eigen-

Abb. 1
Schematische Darstellung der Templatmethode zur Herstellung von Nanodrähten.

- Ionenbestrahlung der Polymerfolie;
- Ätzen der latenten Ionenspuren zu Poren;
- Aufbringen einer Gold-Kontaktschicht durch Kathodenerstäubung;
- Galvanisches Verdicken der Kontaktschicht;
- Galvanische Abscheidung der Nanodrähte in den Poren;
- Auflösen des Polymer-templats.

Schematic of the template method for production of nanowires.

- Ion irradiation of a polymer foil;
- transformation of latent ion tracks into pores by chemical etching;
- sputtering of a gold contact layer;
- galvanic reinforcement of the contact layer;
- galvanic deposition of nanowires in the pores;
- dissolution of the template.

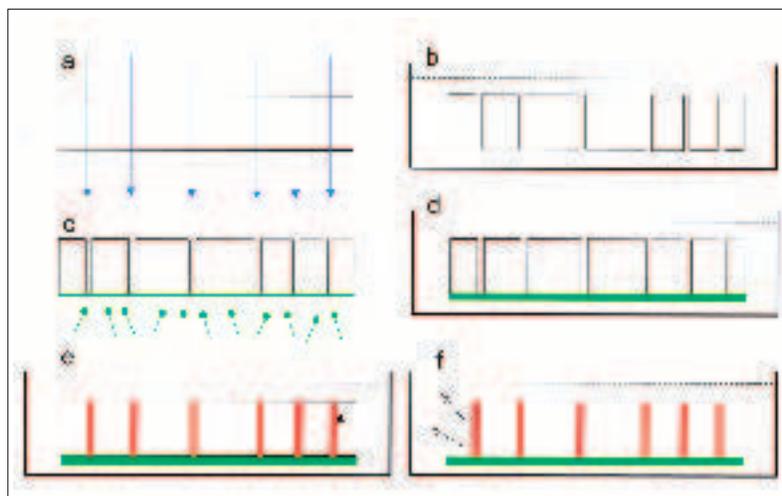


Abb. 2
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Bündels von Gold-Nanodrähten (aus [Karim et al., 2006]).

A bundle of gold nanowires imaged by scanning electron microscopy (from [Karim et al., 2006]).

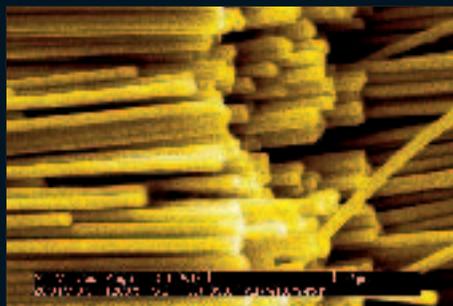


Abb. 3
a) Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme eines Abschnitts eines Goldnanodrahtes;
b) Hochauflösende Darstellung des in a) umrahmten Ausschnitts, um den atomaren Aufbau sichtbar zu machen (aus [Karim et al., 2006]).

a) Section of a gold nanowire visualized by transmission electron microscopy,
b) high-resolution micrograph of the framed area in fig. a) (from [Karim et al., 2006]).

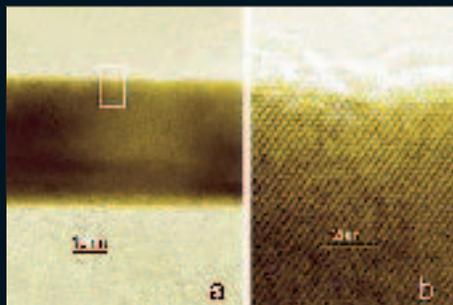


Abb. 4
Kappen von unter verschiedenen elektrochemischen Bedingungen hergestellten Bismut-Nanodrähten.
a) polykristallin;
b) einkristallin (aus [Cornelius et al., 2005]).

Caps of bismuth nanowires that were generated under different electrochemical conditions.
a) Polycrystalline;
b) single-crystalline (from [Cornelius et al., 2005]).

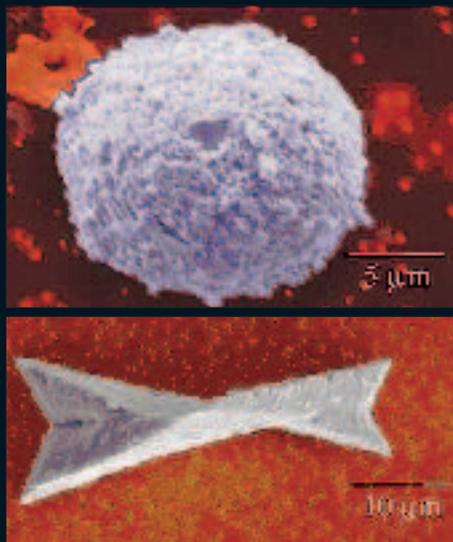
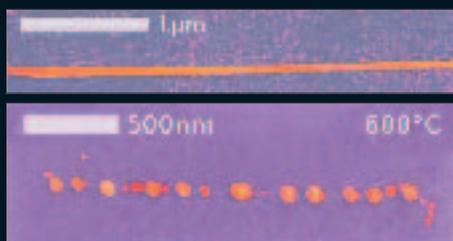


Abb. 5
Ein Kupfer-Nanodraht
a) vor und b) nach Zerfall in eine Reihe von Nanokugeln (aus [Toimil Molares et al., 2004]).

A copper nanowire
a) before and b) after decay into a row of nanospheres ([Toimil Molares et al., 2004]).



schaften und lässt sich mit einem geeigneten Ätzmittel bevorzugt auflösen. Hierbei entstehen in der Folie zylindrische oder auch kegelförmige Poren. Im Folgenden seien nun als Beispiele metallische Nanodrähte betrachtet. Nach flächenhafter elektrischer Kontaktierung einer Seite der Membran lässt sich das vorgesehene Material in den Poren elektrochemisch abscheiden. Wenn ein Nanodraht eine Pore vollständig aufgefüllt hat, so wächst er auf der Oberfläche der Polymerfolie in die Breite und bildet bei fortgesetztem Wachstum eine Kappe, die zunehmend massiver wird. Nach chemischer Auflösung des Polymeremplats schließlich sind die Nanodrähte für weitere Maßnahmen frei zugänglich.

Die mit dem Porendurchmesser identische Dicke der Drähte lässt sich über die Templat-Ätzzeit einstellen und reicht typischerweise von einigen zehn bis zu einigen hundert Nanometern. Ihre Anzahl ist durch kontrollierte Ionenbestrahlung der Folie variierbar von einem einzigen Draht bis hin zu einigen hundert Millionen Drähten pro cm². Abb. 2 zeigt ein Bündel von Goldnanodrähten nach Auflösung des Templats [Karim et al., 2006]. Diese sind weder mit dem bloßen Auge zu sehen noch mit einem Lichtmikroskop abbildbar, sondern werden erst mit dem Rasterelektronenmikroskop sichtbar. Wie Abb. 2 illustriert, besitzen diese Gold-Nanodrähte alle eine zylindrische Form, etwa gleiche Dicke und eine glatte Oberfläche.

Hochauflösende Elektronenmikroskopie erlaubt die Analyse einzelner Drähte bis auf die Ebene ihres atomaren Aufbaus. Abb. 3 zeigt ein Stück eines Gold-Nanodrahtes, wobei der markierte Bereich stark vergrößert dargestellt ist und die atomare Struktur sichtbar macht [Karim et al., 2006]. Diese Aufnahme demonstriert, dass dieser Draht im abgebildeten Bereich einkristallin ist. Was Elektronenmikroskopie sowie Elektronen- und Röntgenbeugung an Nanodrähten über deren inneren Aufbau zeigen, spiegelt sich auch im Erscheinungsbild der zuvor erwähnten Nanodrahtkappen wider. Da diese in der Regel erheblich dicker als die Drähte sind, erfordern sie zur Sichtbarmachung keine sehr hohe mikroskopische Auflösung. Abb. 4 gibt die Kappen zweier unterschiedlich hergestellter Bismut-Nanodrähte wieder [Cornelius et al., 2005]. Während die Abscheidungsbedingungen im Falle von Abb. 4a polykristallines Wachstum erzeugten, entstand bei Verwendung einer etwas niedrigeren Spannung und mäßig erhöhter Temperatur ein einkristalliner Draht (Abb. 4b). Die Kristallinität, d.h. ob es sich um einen ein- oder polykristallinen Draht handelt, hat Auswirkung auf Eigenschaften wie elektrische und thermische Leitfähigkeit. Das Verhalten eines Kupfer-Nanodrahts vor und nach Wärmebehandlung illustriert Abb. 5 [Toimil Molares et al., 2004]. Bei der Erwärmung auf 600 °C (d.h. weit unter dem Schmelzpunkt von Kupfer) wurde der Draht durch ein Zusammenwirken von Oberflächenspannung und inneren Kräften in seiner Form instabil und zerfiel in eine quasiperiodische Reihe von Nanokugeln. Solche Nanostrukturen gelten als interessante Objekte für die Leitung von Licht ohne Beugungsbegrenzung auf der Nanometerskala.

Zusammenfassung

Die Templatmethode unter Verwendung energiereicher schwerer Ionen erlaubt die Erzeugung von Nanodrähten mit wohldefinierten Durchmessern und in variierbarer Anzahl von einem Draht pro Templat bis zu einigen hundert Millionen Drähten pro cm^2 . Die Kristallinität der Nanodrähte lässt sich durch die Herstellungsbedingungen steuern. Sie beeinflusst Eigenschaften wie elektrische und thermische Leitfähigkeit oder auch thermische Stabilität. Zu den wichtigen Aufgaben der Zukunft wird gehören, Nanodrähte auf ihre Verwendbarkeit für Sensorik, Aktuatorik und weitere Funktionen zu testen. Bei entsprechender Eignung würde dann der Schritt zur Realisierung von Nanobauteilen folgen, in denen Nanodrähte als intelligente Materialien zum Einsatz kommen.

Literatur

- M. Köhler, Nanotechnologie, Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik, Wiley-VCH (2001).
- B. Bhusan (Hrsg.), Handbook of Nanotechnology, Springer (2004).
- U. Hartmann, Nanotechnologie, Spektrum Akademischer Verlag (2006).
- S. Karim, M.E. Toimil-Molares, F. Maurer, G. Miede, W. Ensinger, J. Liu, T.W. Cornelius, R. Neumann, Synthesis of gold nanowires with controlled crystallographic characteristics, Appl. Phys. A 84 (2006) 403.
- T.W. Cornelius, J. Brötz, N. Chtanko, D. Dobrev, G. Miede, R. Neumann, M.E. Toimil Molares, Controlled fabrication of poly- and single-crystalline bismuth nanowires, Nanotechnology 16 (2005) S246.
- M.E. Toimil Molares, A.G. Balogh, T.W. Cornelius, R. Neumann, C. Trautmann, Fragmentation of nanowires driven by Rayleigh instability, Appl. Phys. Lett. 82 (2004) 5337.

Die Autoren

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Ensinger ist Leiter des Fachgebietes Chemische Analytik am Fachbereich Material- und Geowissenschaften der TU Darmstadt. Das Fachgebiet beschäftigt sich mit der Herstellung und Charakterisierung von Materialien, darunter Nanodrähte in Zusammenarbeit mit der GSI, sowie Materialmodifikation und Beschichtungen mit Plasma-, Ionenstrahl- und Sol-Gel-Methoden. Bei der Charakterisierung liegt das Hauptaugenmerk auf Festkörperanalytik, z.B. Sekundärionen-Massenspektrometrie.

E-Mail: ensinger@ca.tu-darmstadt.de
Tel.: 06159/166379

Prof. Dr. rer. nat. Reinhard Neumann leitet den Forschungsbereich Materialforschung der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt. Dieser Bereich untersucht das Verhalten unterschiedlicher Materialien bei Bestrahlung mit energiereichen Schwerionen und die hierdurch entstehenden Materialveränderungen. Die Arbeiten umfassen Aspekte der Grundlagenforschung ebenso wie anwendungsorientierte Fragestellungen. Sie erstrecken sich deshalb sowohl z.B. auf Ionen-induzierte Phasenumwandlungen als auch auf Herstellung und Charakterisierung von Nanoporen und Nanodrähten auf der Grundlage von Ionenspuren, oder auf gezielte Bestrahlung biologischer Zellen mit einzelnen Ionen.



Innovation aus Erfahrung

Seit über 25 Jahren unterstützt VEGA in Darmstadt Satellitenmissionen. Wir entwickeln heute Lösungen für die Herausforderungen von morgen.

VEGA Informations-Technologien GmbH Hilpertstraße 20A D-64295 Darmstadt

VEGA

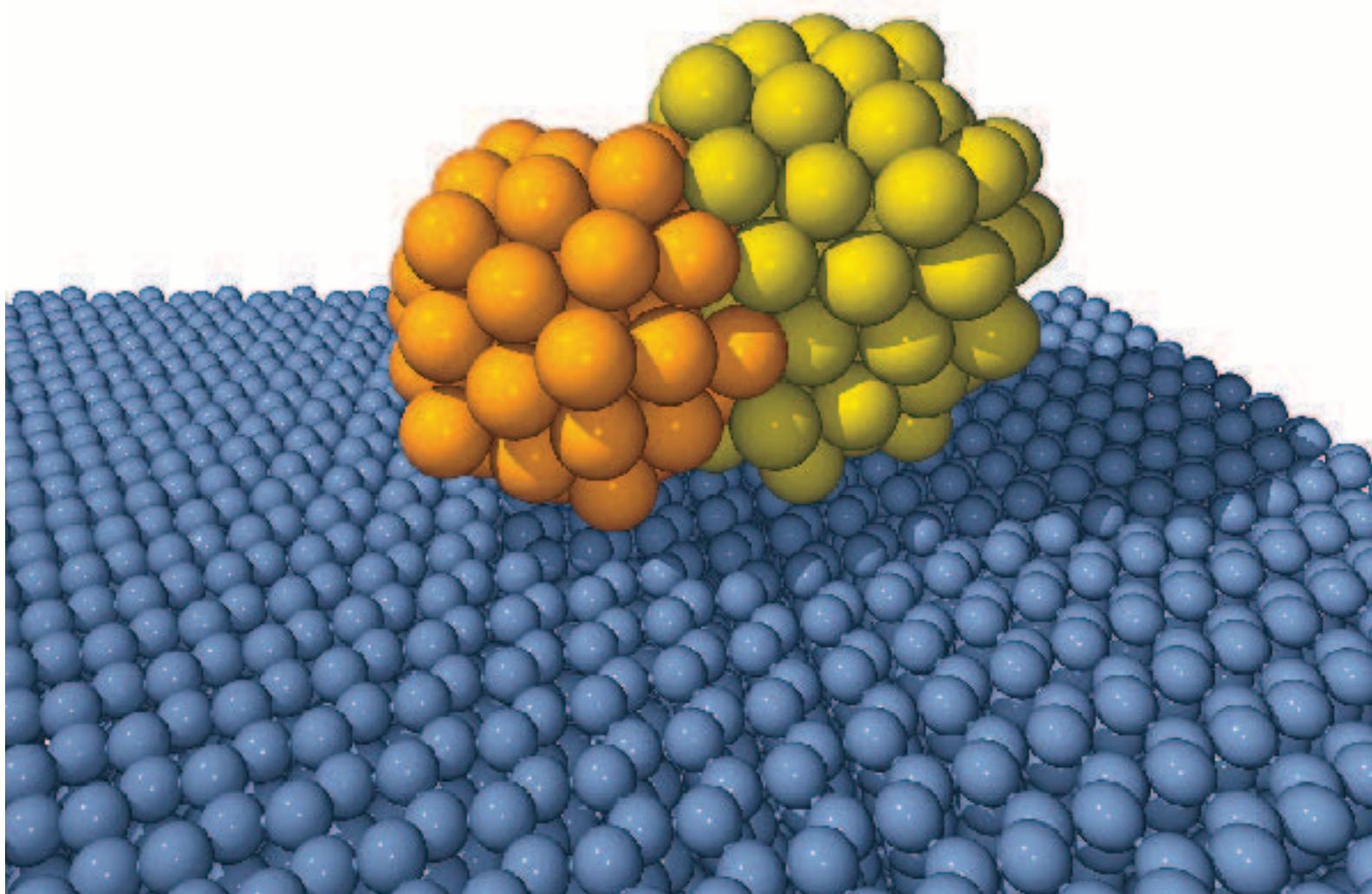
image © esa

Größe entscheidet – Magnetische Nanopartikel in der Computersimulation

Karsten Albe/Michael Müller

Magnetische Nanopartikel sind eine neue Materialklasse mit großem Anwendungspotential. Die funktionalen Eigenschaften dieser Teilchen werden nicht nur von ihrer Struktur und Zusammensetzung, sondern insbesondere von der Größe bestimmt. Deshalb kommt der genauen Kontrolle dieser Parameter eine wesentliche Bedeutung bei der Materialentwicklung zu. Computersimulationen auf Grundlage atomistischer Modelle erlauben, genaue Vorhersagen über die Größenabhängigkeit bestimmter Materialeigenschaften zu machen. Dieses wird im Folgenden am Beispiel magnetischer Nanopartikel aus FePt illustriert.

Size matters: Computer Simulations of Magnetic Nanoparticles Magnetic Nanoparticles build a new class of materials with an enormous potential for future applications. Functional properties of these particles are determined by their structure, composition and most importantly by the particle size. Therefore a direct control of these parameters is of crucial importance in designing nanoparticles for the desired application. At this point, computer simulations based on atomic scale models can be a valuable tool for predicting materials properties. In the following, this is exemplified for the example of FePt nanoparticles.



Einleitung

Nanoteilchen oder auch Nanopartikel sind Aggregate aus Atomen oder Molekülen, die typische Durchmesser von einigen Nanometern (10^{-9} Meter bzw. 1 milliardstel Meter) haben. Kleine Nanoteilchen mit weniger als 1000 Atomen werden häufig auch als Cluster bezeichnet. Das besondere Interesse an Nanopartikeln beruht auf der Tatsache, dass die Eigenschaften nanopartikulärer Materialien nicht nur eine Funktion der Struktur und chemischen Zusammensetzung, sondern auch der Größe sind. Beispielsweise wird das nicht-magnetische Edelmetall Gold in nanopartikulärer Form (10 nm) zu einem rötlichen Material, das Licht im grünen Spektralbereich absorbiert. Goldpartikel mit 2-3 nm Durchmesser haben magnetische Eigenschaften und sind katalytisch aktiv. Mit der Größe ändern sich neben den elektronischen auch die strukturellen und thermodynamischen Eigenschaften von Nanopartikeln. So werden bei einigen Metallen unterhalb einer kritischen Teilchengröße strukturelle Übergänge vom regulären kubischen Gitter in mehrfach verzwilligte Formen beobachtet, während die Übergangstemperaturen für strukturelle Phasenübergänge (fest-flüssig, Ordnung-Unordnung) in der Regel mit abnehmender Teilchengröße sinken. In der Anwendung spielen Nanopartikel aus Edelmetallen und deren Legierungen eine traditionell wichtige Rolle als Katalysatoren. Während in der Katalyse der hohe Oberflächenanteil des Nanopartikels für die Funktion des Materials entscheidend ist, sind für andere Anwendungen die „inneren“ Eigenschaften wichtig. Dies trifft insbesondere bei magnetischen Nanopartikeln zu.

Magnetische kolloidale Flüssigkeiten, d. h. stabile Suspensionen magnetischer Nanopartikel (Ferrofluide) eröffnen die Möglichkeit, statische, dynamische und rheologische Eigenschaften mit Magnetfeldern zu steuern. Anwendungen auf den Gebieten der mechanischen Aktorik, in High-end-Lautsprechern, als Drehdichtungen von Festplatten oder pharmazeutisch funktionalisierten Trägern zur gezielten Wirkstoffdeposition sind bereits Realität.

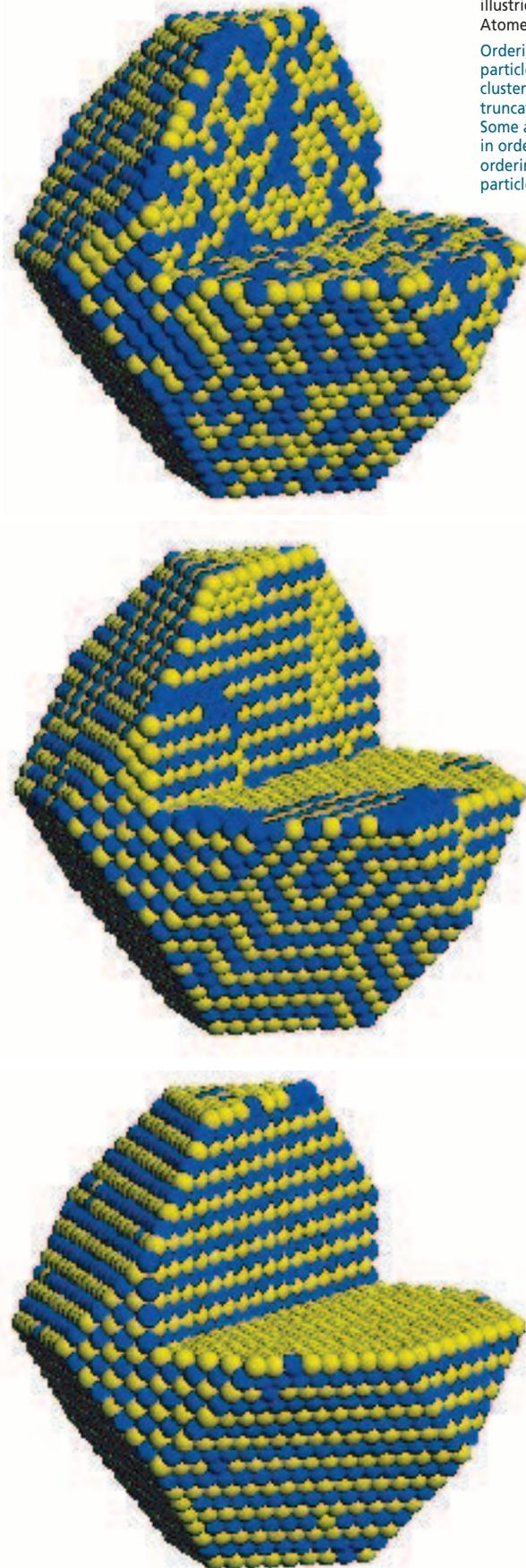
Neben den Ferrofluiden stellen Magnetspeichermaterialien, welche immense Speicherdichten versprechen, ein weiteres Zukunftsfeld für die Anwendung magnetischer Nanopartikel dar.

Konventionelle Speichermedien bestehen heutzutage aus granularen Schichtsystemen, die cobaltbasierte Legierungen enthalten. In diesen Schichten liegen die Korngrößen im Bereich unter 10 nm, wobei die Beiträge einiger hundert Körner nötig sind, um ein Bit bei einem vernünftigen Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu speichern. Da die Zahl der Körner, die pro Bit benötigt werden, nicht deutlich reduziert werden kann, ist eine Erhöhung der Speicherdichte nur möglich, wenn die Korngröße reduziert wird. Allerdings führen thermische Fluktuationen in kleinen Körnern dazu, dass die Magnetisierungsrichtung thermisch nicht stabil ist und zufällig umkehren kann. Dieses superparamagnetische Limit begrenzt die realisierbaren Speicherdichten in konventionellen Schichtmaterialien.

Eine Alternative dazu stellen diskrete Speichermaterialien aus magnetischen Nanopartikeln dar. In einer periodischen Anordnung (Pattern) repräsentiert je-

Abb. 1
Ordnungseinstellung in einem FePt Nanopartikel bei 300 K. Die Gestalt ist ein Oktaeder, dessen pyramidalen Spitzen fehlen. Um die Ordnungseinstellung im Volumen zu illustrieren, ist ein Teil der Atome nicht gezeigt.

Ordering in a FePt nanoparticle at 300 K. The cluster has the shape of a truncated octahedron. Some atoms are not shown in order to illustrate the ordering inside the particle.

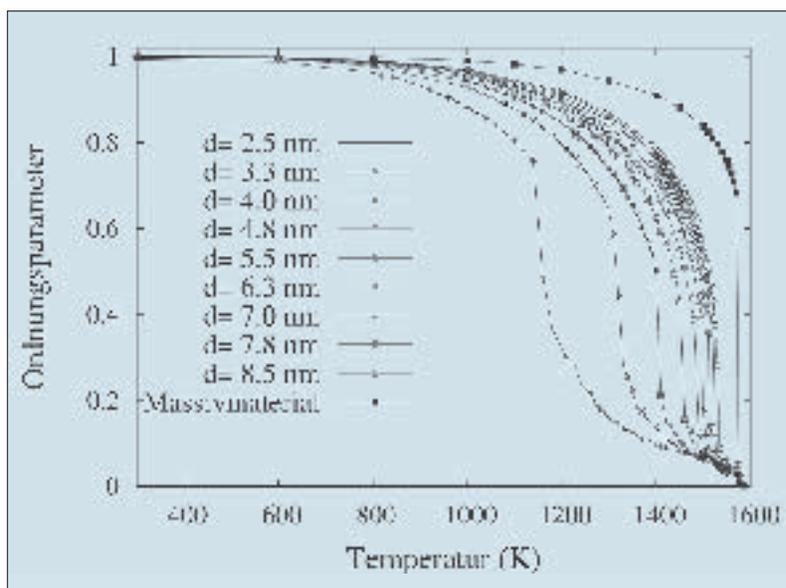


des einzelne Teilchen ein Bit, so dass kein statistisches Rauschen durch die Mittelung des Lesekopfes über verschiedene Schaltvolumina entsteht und eine enorme Erhöhung der theoretischen Speicherdichten möglich wird [Terris, 2005].

Derzeit werden insbesondere FePt Nanopartikel mit einer 50:50 Zusammensetzung aus Eisen und Platin als mögliches Material für Magnetspeicher untersucht. FePt hat eine ungeordnete Hochtemperaturphase, bei der die Atome statistisch auf einer kubisch-flächenzentrierten Struktur verteilt sind (A1-Struktur) und eine geordnete Tieftemperaturphase, die eine tetragonale Verzerrung aufweist (L1₀-Struktur). Die vollständig geordnete Struktur kann man als Lagenstruktur auffassen, welche alternierend mit Fe und Pt belegt ist. Unter allen bekannten Hartmagneten zeigt FePt in der L1₀-Struktur aufgrund der Spin-Orbit Kopplung der Fe 3d und Pt 5d Zustände mit 10⁷ J/m³ einen der höchsten Werte für die magnetokristalline Anisotropie, welche ein Maß dafür ist, wie leicht sich die Magnetisierung umkehren lässt. FePt Nanopartikel gehören zu den wenigen Systemen, die bei kleinen Partikelgrößen chemisch und magnetisch stabil sind [Sun, 2006].

Für die Herstellung der FePt Nanopartikel auf Oberflächen werden derzeit kostengünstige, nasschemische Verfahren favorisiert, bei denen das Teilchenwachstum und somit die Größenverteilung durch den Zusatz oberflächenaktiver Substanzen (Surfactants) kontrolliert wird, welche die Partikel umhüllen. Durch Tauchbeschichtung (dip coating) können die Nanoteilchen dann aus der Lösung auf ein Substrat gebracht werden, wobei sich durch Selbstorganisation bei geeigneter Wahl der Bedingungen periodische Anordnungen herstellen lassen. Auf diese Weise präparierte Nanopartikel zeigen allerdings nicht die gewünschte Ordnung und kristallographische Ausrichtung. Zwar lassen sich die Partikel durch eine anschließende Temperaturbehandlung teilweise in die gewünschte L1₀-Struktur überführen, doch führen Agglomeration und Sintern zur Degradation der periodischen Anordnung. Die Einstellung der Ordnung und kristallographischen Orientierung der Magnetisierungsachse sind weitere, bisher ungelöste Probleme.

Abb. 2
Variation der langreichweitigen Ordnung in FePt-Nanopartikeln als Funktion der Größe und Temperatur. Mit abnehmender Teilchengröße wird der Ordnungs-Unordnungs Übergang zunehmend unscharf. Die Übergangstemperatur sinkt um einige hundert Kelvin
Variation of long-range order parameter in FePt nanoparticles as function of size and temperature. The order-disorder transition is increasingly smoothing with decreasing particle size. The transition temperature decreases by several hundred Kelvin.



Im Fachgebiet Materialmodellierung an der TU Darmstadt werden Methoden der atomistischen Computersimulation eingesetzt, um Erkenntnisse über die thermodynamischen und kinetischen Eigenschaften von FePt Nanopartikeln zu gewinnen. Ziel der Arbeiten ist es, Zusammenhänge zwischen den relevanten Parametern Struktur, Zusammensetzung und Größe und den Partikeleigenschaften aufzuklären und zur Optimierung der experimentellen Prozessparameter beizutragen.

Modellbildung und Computersimulationen

Die für die Miniaturisierung von Speicherelementen wichtige Frage der thermodynamischen Stabilität nano-partikulärer Systeme ist direkt mit der sehr grundlegenden Frage von Phasenübergängen in endlichen Systemen verknüpft. Phasenübergänge sind kollektive Phänomene, die in der Regel im thermodynamischen Grenzfall großer Systeme beschrieben werden. Mit sinkender Zahl von Atomen wird dieser Grenzfall nicht mehr erreicht und die Phasenübergänge werden unscharf. Die üblichen thermodynamischen Konzepte sind dann nur noch begrenzt anwendbar. Im Gegensatz dazu erlauben Computersimulationen auf Grundlage der statistischen Physik, den Einfluss des Parameters Teilchengröße genau zu untersuchen. Die Energie eines Nanopartikels setzt sich aus Beiträgen des Volumens, das linear mit der Teilchenzahl N skaliert, der Oberflächen, die proportional zu $N^{2/3}$ eingehen, und den Beiträgen der Kanten, Eckplätze und möglichen elastischen Verzerrungen zusammen. Im Fall des FePt kann man aus diesen Beiträgen errechnen, dass die Nanopartikel im interessierenden Größenbereich eine kristalline Struktur haben und in sogenannter Wulffgestalt auftreten, in der die Oberflächen kristallographischen Facetten entsprechen (Abb. 1). Da die interessierenden Kristallstrukturen auf ein kubisch-flächenzentriertes Gitter zurückgeführt werden können, das im Fall der L1₀-Struktur nur eine geringe tetragonale Verzerrung aufweist, kann man die Konfigurationsenergie in einem einfachen gitterbasierten Ausdruck beschreiben (Ising-Modell). Wendet man dieses Modell zur Berechnung der Konfigurationsenergie in einem Metropolis Monte-Carlo-Algorithmus an, bei dem eine Sequenz atomarer Konfigurationen durch Platzwechsel entsprechend ihres thermodynamischen Gewichts gesampelt wird, so lassen sich bei gegebener Temperatur die thermodynamischen Gleichgewichtszustände ermitteln. Abb. 1 zeigt eine Sequenz typischer Konfigurationen, die sich in einem anfänglich ungeordneten 4 nm Partikel während einer Monte-Carlo Simulation bei 300 K einstellen [Müller, 2005].

Größeneffekte

Mit dem zuvor beschriebenen Modell lassen sich nun grundsätzliche Fragen der Phasenstabilität im nanopartikulären System FePt beantworten. Im Rahmen der Untersuchungen im Fachgebiet Materialmodellierung wurde beispielsweise untersucht, inwieweit die Ordnungseinstellung der Partikel von der Größe und Zusammensetzung abhängt. Abb. 2 zeigt die Änderung der langreichweitigen Ordnung in FePt Nano-



Gefahren kennen

Chancen nutzen

Als Spezialist für IT-Sicherheit entwickelt das Fraunhofer Institut für Sichere Informationstechnologie SIT unmittelbar einsetzbare Lösungen, die vollständig auf die Bedürfnisse der Auftraggeber ausgerichtet sind. Möglich werden diese maßgeschneiderten Dienste durch über hundert hochqualifizierte Mitarbeiter, die alle Bereiche der IT-Sicherheit abdecken. Sie bilden die breite Kompetenzbasis für technologieübergreifende Leistungen auf höchstem Niveau.

Fraunhofer SIT • Rheinsulze 75 • 64293 Darmstadt • www.sit.fraunhofer.de



Fraunhofer Institut
Sichere Informations-
Technologie

Auf unseren Kompetenzfeldern bieten wir:

- Herstellerneutrale Beratung
- Sicherheitsanalysen
- Prototypenentwicklung
- Konzeption und Modellierung
- Lizenzierung von Lösungen

Mit Sicherheit mehr Erfolg

Die Informationstechnologie ist aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Entsprechend stark sind Menschen von Computern und computerbasierten Technologien abhängig. Der Schutz vor Bedrohungen wie Viren, Würmern, Hacker-Angriffen oder Systemausfällen spielt deshalb eine immer wichtigere Rolle für die Gesellschaft. Nur wenn die eingesetzten IT-Systeme ausreichend sicher sind, können Menschen, Unternehmen und Verwaltungen die Potentiale der Informationstechnologie im vollen Umfang nutzen.

Das Fraunhofer-Institut für Sichere Informationstechnologie SIT entwickelt Innovationen zur Absicherung von Informationen, Geräten, Diensten und Netzen. Sichere IT-Lösungen sind darüberhinaus eine unverzichtbare Basis für das Funktionieren der Gesellschaft, das Katastrophenmanagement, die Terrorismusabwehr oder den Schutz gegen organisierte Kriminalität. Ziel des Instituts ist dabei stets, die Sicherheit benutzerfreundlich zu gestalten und den Mensch in den Mittelpunkt zu stellen. Denn er soll die Technik beherrschen und nicht umgekehrt.

Als Spezialist für IT-Sicherheit befasst sich das Institut mit allen relevanten Technologien und Themen. Weil die digitale Welt immer stärker zusammenwächst, berühren Fragen der IT-Sicherheit viele andere IT-Bereiche. Neben reinen Sicherheitstechniken wie Biometrie, Internetsicherheit

und elektronischen Ausweisen zählen deshalb auch andere Technologien zum Arbeitsgebiet des Instituts. So beschäftigt sich SIT auch mit Sensornetzen, Gebäude- oder Geodatensystemen und entwickelt sichere und datenschutzkonforme Lösungen, etwa für die Bereiche Logistik und sicheres Gebäudemanagement.

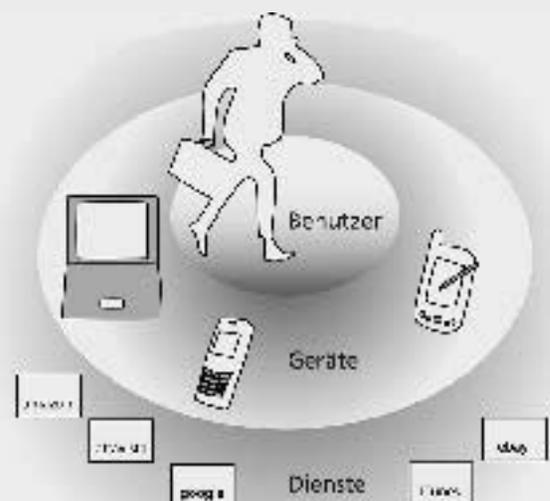
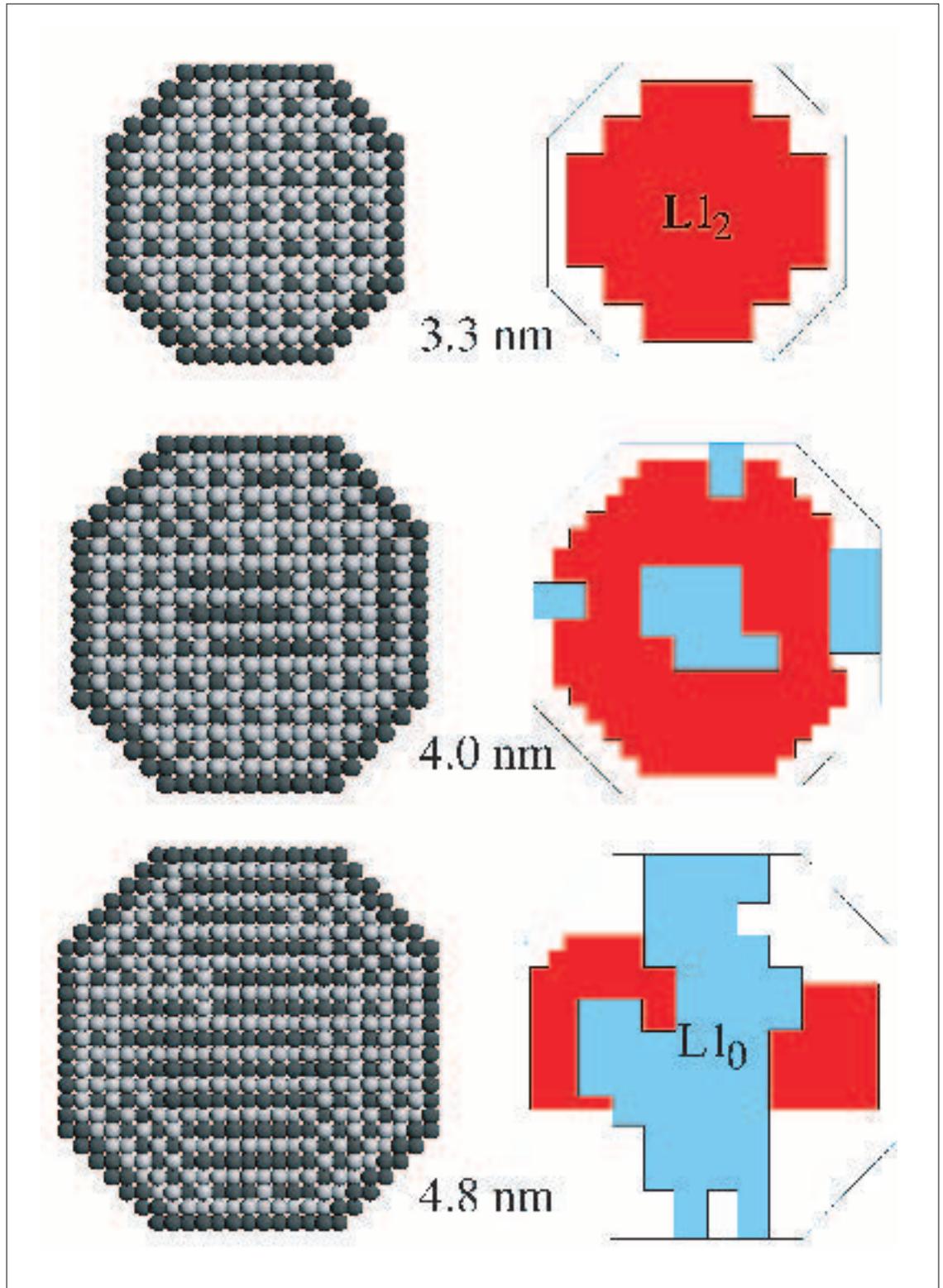


Abb. 3
 Ordnungseinstellung in FePt-Nanopartikeln verschiedener Größe, bei denen die Oberfläche aufgrund der Präsenz von Surfactants (nicht gezeigt) vollständig mit Fe belegt ist.

Ordering in FePt nanoparticles of different size with surface sites occupied by Fe atoms due the presence of surfactants (not shown)



partikeln als Funktion der Teilchengröße und Temperatur. Aus dem Verlauf der Kurven erkennt man, dass der Ordnungs-Unordnungsübergang mit abnehmender Partikelgröße zu niedrigeren Temperaturen verschoben ist und stark verschmiert. Durch die Rechnung wird nachgewiesen, dass FePt auch in nanopartikulärer Form bis zu Temperaturen von 1200 K die gewünschte Ordnung einstellt. Betrachtet man das gleiche System allerdings unter dem Einfluss von Surfactants, die in der chemischen Präparation dazu führen, dass Eisen bevorzugt Oberflächenplätze einnimmt, ergibt sich ein anderes Bild.

Die verstärkte Oberflächensegregation der Fe Komponente hat zur Folge, dass die Partikel mit einer 50:50 Zusammensetzung aus Fe und Pt die Ordnung im Volumen auch unter Gleichgewichtsbedingungen nur noch partiell einstellen können (Abb. 3), da die chemische Zusammensetzung im Volumen stark von der nominellen Stöchiometrie abweicht. Dieses Ergebnis liefert die Erklärung für die experimentellen Schwierigkeiten, geordnete Partikel zu präparieren. Es ist offensichtlich, dass die Zusammensetzung der Partikel angepasst werden muss, um diesen Oberflächeneffekt auszugleichen.

Schlussbemerkungen

Magnetische Nanopartikel sind eine Materialklasse mit Anwendungspotential in vielen Technikbereichen. Die Eigenschaften der Partikel lassen sich durch gezielte Kontrolle der Größe, Struktur und Zusammensetzung maßschneidern. Atomistische Computersimulationen erlauben die Vorhersage von Eigenschaften und Prozessen und ermöglichen im Verbund mit experimentellen Untersuchungen ein effizientes und zielgerichtetes Materialdesign.

Das Fachgebiet Materialmodellierung

Die Forschungsaktivitäten des Fachgebiets Materialmodellierung am Fachbereich Material- und Geowissenschaften der TU Darmstadt umfassen die Modellierung von Materialeigenschaften und -prozessen mit atomistischen Computermodellen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Struktur und Eigenschaften nanoskaliger Materialien und Verbindungshalbleitern. Das Methodenspektrum umfasst quantenmechanische Methoden auf Grundlage der Dichtefunktionaltheorie, molekulardynamische Simulationen für Systeme aus einigen Millionen von Atomen und Monte-Carlo Techniken. Neben der Entwicklung von Computerprogrammen für numerische Simulationen auf Höchstleistungscomputern ist die Entwicklung atomistischer Modelle eine Schlüsselkompetenz des Fachgebiets.

Ansprechpartner:

Dr. Karsten Albe, Juniorprofessor
Fachgebiet Materialmodellierung
FB 11, Material- und Geowissenschaften
Petersenstr. 23
Tel.: 06151/16-6374
Fax: 06151/16-6263
E-Mail: albe@mm.tu-darmstadt.de
www.mm.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Michael Müller
Tel.: 06151/16-6323
E-Mail: mueeller@mm.tu-darmstadt.de

Literatur

- [Terris, 2004] Terris, B.D. and T. Thomson, Nanofabricated and self-assembled magnetic structures as data storage media, J. Phys. D: Appl. Phys 2005, 38, R119-R22
- [Sun, 2006] Sun, S, Recent Advances in Chemical Synthesis, Self-Assembly, and Applications of FePt Nanoparticles, Advanced Materials 2006, 18, 393-403
- [Müller, 2005] Müller, M. and K. Albe, Lattice Monte Carlo simulations of FePt nanoparticles: Influence of size, composition, and surface segregation on order-disorder phenomena, Phys. Rev. B 2005, 72, 094203



Unsere Zwerge stehen nicht im Garten,

sondern erfüllen Resendienste auf
Biomaterialien und für die Biobanalytik.

Unsere hochfunktionale Beschichtung
Hydro-Stellan[®] ermöglicht spezifische
Problemlösungen im Umgang mit Proteinen
und Zellen. Die ultradiünne Schicht kann
ungewollte Wechselwirkungen verhindern
und ermöglicht gezielte Anbindungen.

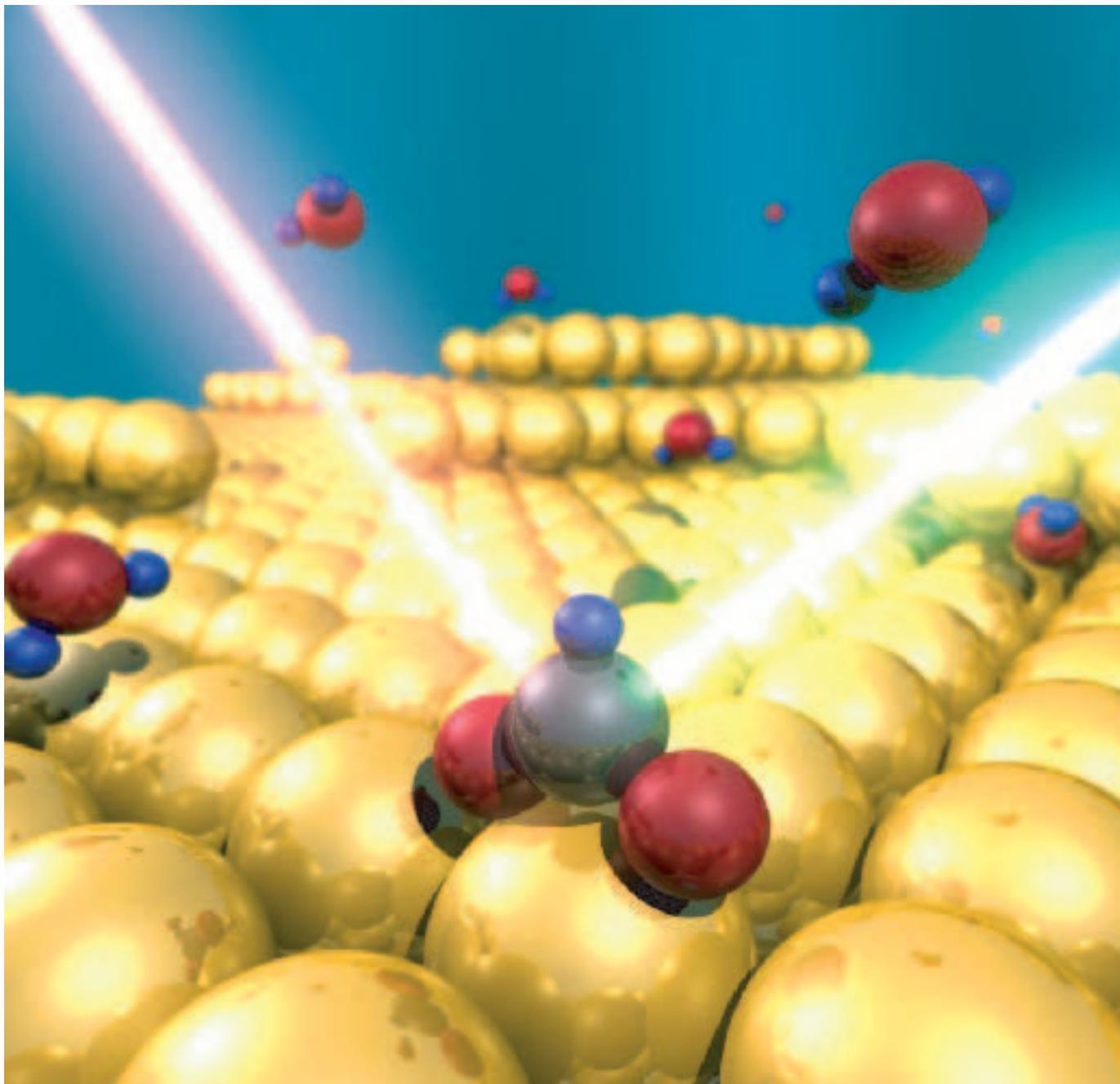
Dies ist nur ein Beispiel wie unsere Experten
innovative **Biokomposite** sowie wegweisende
Klebstoffe und **Beschichtungen** entwickeln.

SusTech ist ein Kompetenzzentrum
für Nanotechnologie.

Besuchen Sie uns auf www.sustech.de!



SusTech GmbH & Co. KG, Petersenstraße 20, 64287 Darmstadt



Maßgeschneiderte Katalysatoren im Baukastensystem

Christina Roth/Marian Mazurek/Nathalie Benker

Katalysatoren spielen in vielen Bereichen unseres Alltags eine wichtige Rolle, angefangen bei der Herstellung von Schwefelsäure bis hin zur Verminderung giftiger Autoabgase. Ungefähr 85% aller chemischen Produkte durchlaufen wenigstens einen katalytischen Produktionsschritt. Umso wichtiger ist die Herstellung kostengünstiger Katalysatoren, die für die jeweilige Reaktion maßgeschneidert sind. Eine interessante Alternative zu multi-nären Systemen ist die gezielte Kombination monometallischer Katalysatoren vergleichbar LEGO®-Steinen in einem Selbstbausatz.

Tailored catalysts via a modular design kit
Catalysis determines almost every aspect in our daily life, starting from the production of sulphuric acid, to the processing of automotive exhausts. Approx. 85% of all chemical products run through at least one catalytic step during their production. Therefore, there is a pressing need for the synthesis of cost-efficient catalysts, which are tailor-made for the respective reaction. One interesting alternative to multinary catalyst systems is the controlled combination of different monometallic catalysts like LEGO™ bricks in a modular design kit.

Abb. 1
Heterogene Katalyse:
Modell einer Katalysator-
oberfläche mit adsorbierten
Ausgangsmolekülen und
desorbierten Produktmolekülen
(Quelle: Internet,
Universität Leiden)

Heterogeneous catalysis:
Model of a catalyst surface
with adsorbed educt molecules
and desorbed product
molecules

Suche nach dem optimalen Katalysator

Katalysatorforschung und rationelles Katalysatordesign stehen nur selten im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses und ihre Bedeutung in unserem Alltag ist nur wenig bekannt. Dabei spielen katalytische Prozesse in fast jedem Bereich unseres täglichen Lebens eine entscheidende Rolle. Heterogene Katalyse, d.h. die Aktivierung chemischer Reaktionen durch Adsorption an geeigneten Feststoffen (Abb. 1), den sogenannten Katalysatoren, kommt in äußerst unterschiedlichen Gebieten zum Einsatz: Ihre Anwendungen reichen von der Schwefelsäureherstellung über die Petrochemie bis hin zur Autoabgaskatalyse, wobei gerade letztgenannte ein wichtiges Anwendungsfeld für Katalysatoren in unserer modernen Welt darstellt.

Umso wichtiger ist die Herstellung kostengünstiger Katalysatoren, die für die jeweilige Reaktion maßgeschneidert sind. Dabei soll ein geeigneter Katalysator eine chemische Reaktion nicht nur beschleunigen, sondern zusätzlich auch noch den Reaktionsweg zu dem gewünschten Produkt – und nicht hin zu unerwünschten Nebenprodukten – ebnen. Dementsprechend gewinnen die wissenschaftliche Wahl eines Katalysators sowie Maßnahmen zur Verbesserung seiner katalytischen Eigenschaften zunehmend an Bedeutung, nicht nur um Verfahrenskosten zu senken, sondern auch um den Grundstein zu einer nachhaltigen und umweltverträglichen Produktion zu legen [1]. Um den optimalen Katalysator für die jeweilige Reaktion aufzuspüren, muss eine große Anzahl möglicher Katalysatorsysteme hergestellt und auf ihre Aktivität hin getestet werden. Das Katalysatordesign findet auf Seiten des Herstellers statt, der die als optimal identifizierte Zusammensetzung im großtechnischen Maßstab synthetisiert und als fertiges Produkt vertreibt.

Eine mögliche Alternative: Das Baukastensystem

Im Gegensatz zu obiger Vorgehensweise soll das hier vorgestellte modulare Konzept dem Anwender, nicht dem Hersteller, die Möglichkeit der eigenständigen Optimierung geben. Der Anwender „baut“ selbst aus Basisbausteinen den optimal auf seinen Produktionsschritt abgestimmten Katalysator zusammen. Dies erfolgt durch die gezielte Kombination monometallischer Katalysatoren vergleichbar LEGO®-Steinen in einem Selbstbausatz. Das Konzept des variablen Baukastensystems orientiert sich dabei in gewisser Weise an den Anfang der 90er Jahre populären Ökawaschmitteln, die je nach Wasserqualität und Verschmutzungsgrad vom Anwender umweltverträglich zusammengestellt werden konnten. Dabei wird vorausgesetzt, dass die einzelnen Waschmittelkomponenten durch einfaches „Mischen“ eine vergleichbare Aktivität erzielen wie das fertig angebotene Vollwaschmittel. Gleiches gilt für einfache „Katalysatormischsysteme“ im Vergleich zu legierten multimetallischen Katalysatoren. Das Potential des modularen Konzepts wird im Folgenden für ein rußgetragertes Pt-Ru System demonstriert, welches bevorzugt in Niedertemperaturbrennstoffzellen zum Einsatz kommt. Der Charme des Baukastensystems für Brennstoffzellenanwendungen liegt vor allem darin, dass das Katalysatorsy-

stem an die Verwendung unterschiedlicher Brennstoffe angepasst werden kann, vorausgesetzt, der Mischkatalysator kann eine vergleichbare oder sogar bessere Aktivität gewährleisten als der kommerzielle Legierungskatalysator.

„Intelligente“ Katalysatoren in der Brennstoffzelle

Seit langem ist bekannt, dass ein Platinkatalysator (Pt) die Oxidation von Wasserstoff an der Anode der Brennstoffzelle am besten katalysiert. Allerdings nur, solange reiner Wasserstoff als Treibstoff benutzt wird. Die Verwendung reinen Wasserstoffs ist jedoch nicht wirtschaftlich, vor allem in Hinblick auf dessen kostspielige Gewinnung und Speicherung, weshalb nach kostengünstigeren, alternativen Treibstoffen gesucht wird. Eine mögliche Alternative ist der Flüssigkraftstoff Methanol, welcher entweder direkt in die Brennstoffzelle eingespeist werden kann oder nach dessen Reformierung als kohlenmonoxid-haltiges Reformat bereitgestellt wird. Unglücklicherweise ist Kohlenmonoxid (CO) ein bekanntes Katalysatorgift, welches an der Oberfläche des Pt-Katalysators adsorbiert und katalytisch aktive Zentren für die Wasserstoffoxidation blockiert [2].

Eine Möglichkeit, der CO-Vergiftung entgegenzuwirken, besteht darin, dem Pt-Katalysator Ruthenium (Ru) zuzusetzen, was eine erhebliche Verbesserung der CO-Toleranz zur Folge hat. Je nach Brennstoff – Wasserstoff, kohlenmonoxid-haltiges Reformat, Methanol – wird eine unterschiedliche optimale Zusammensetzung für den Katalysator ermittelt: Ein Verhältnis von Pt:Ru 50:50 erweist sich als optimal für Reformatbetrieb, 90:10 ist dagegen bestens für Methanol geeignet [3]. Die beste Katalysatorzusammensetzung ist außerdem abhängig von Temperatur und Druck, bei denen die Brennstoffzelle betrieben wird, sowie von weiteren Betriebsparametern.

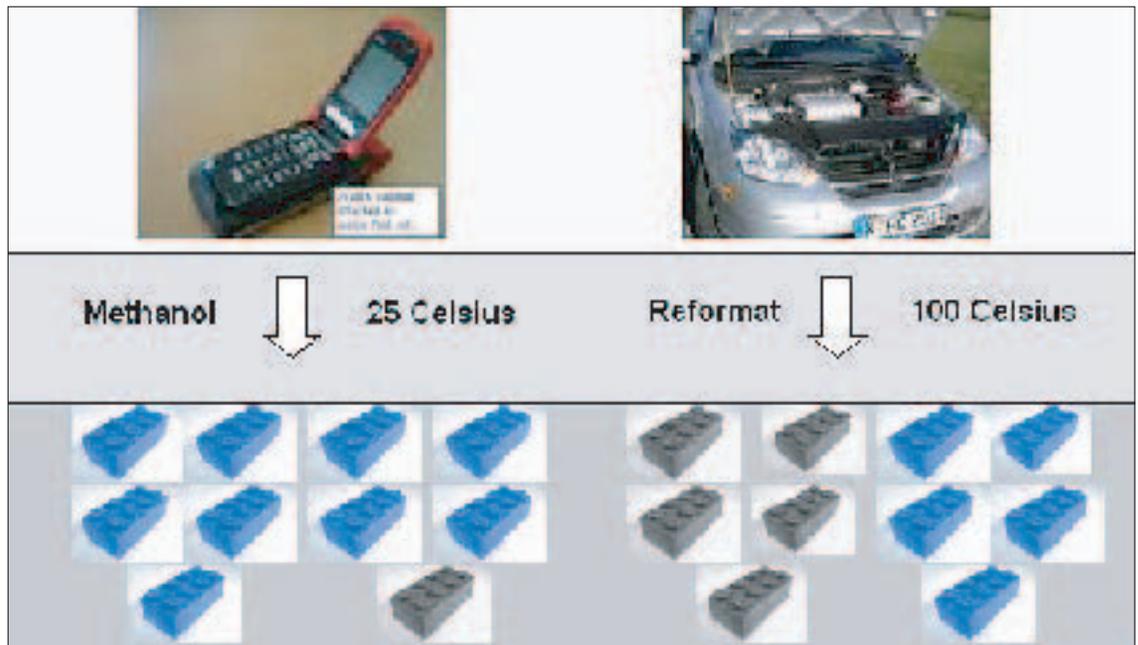
Für den Anwender bietet das Baukastensystem den Vorteil, dass mit nur zwei Einzelkomponenten – einem monometallischen Pt- und einem monometallischen Ru-Katalysator – eine Vielzahl unterschiedlicher Brennstoffzellensysteme für unterschiedliche Anwendungen bestückt werden kann. Beispielsweise könnte eine Produktlinie Brennstoffzellen für methanolbetriebene Mobiltelefone mit einer Mischung Pt:Ru 90:10 bestücken, während mit denselben „Zutaten“ im Verhältnis 50:50 Brennstoffzellen für die Anwendung bei höheren Temperaturen in einem Kraftfahrzeug mit Reformat als Treibstoff hergestellt werden könnten (Abb. 2). Dabei können nicht nur unterschiedliche Zusammensetzungen durch Mischen realisiert werden, sondern auch die Einzelkomponenten unabhängig voneinander verändert werden, z. B. die getragerten Metallteilchen in ihrer Partikelgröße [4].

Erster Einsatz einer Mischung – und es funktioniert tatsächlich...

Für erste Tests wurde ein Pt/Ru Mischungskatalysator (Pt/Ru) durch manuelles Mischen in einem Mörser hergestellt und mit einem kommerziellen Pt-Ru Legierungskatalysator (Pt-Ru) verglichen. Zunächst

Abb. 2
Gedankenexperiment:
Unterschiedliche Katalysator-
mischungen für zwei
verschiedene Produktlinien
(links: methanolbetriebe-
nes Mobiltelefon, rechts:
Personenkraftwagen mit
Reformat als Kraftstoff)

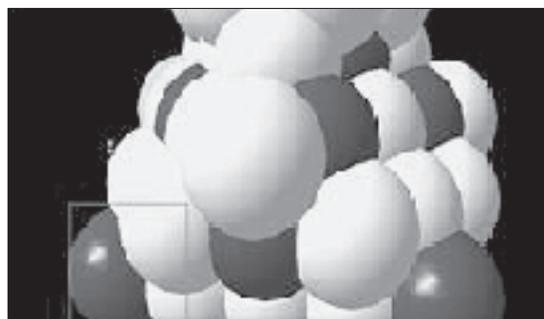
Thought experiment: Diffe-
rent catalyst mixtures for
two different products (left
image: methanol-fuelled
cell phone, right image:
using reformat as fuel in
a fuel cell car)



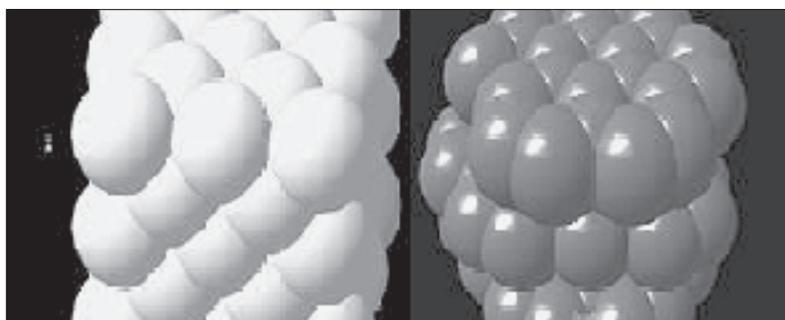
wurde die genaue Struktur der beiden Systeme bestimmt und danach deren elektrokatalytische Aktivität in einer Brennstoffzelle mit CO-haltigem Wasserstoff als Brennstoff getestet. Abb. 3 zeigt Strukturmodelle für die beiden bimetallic Katalysatoren: Der Pt-Ru Legierungskatalysator kristallisiert in der für Platin typischen kubisch flächenzentrierten Struktur (kfz), wobei Ru-Atome statistisch verteilt Platinatome auf deren Gitterplätzen ersetzen. In der Pt/Ru Mischung treten die kubisch flächenzentrierte Struktur von Platin und das hexagonal dichtest gepackte Gitter (hdp) von Ruthenium nebeneinander auf. Um die Gültigkeit unserer Annahmen zu bestätigen, wurden beide Katalysatoren mit Röntgenabsorptionsspektroskopie und im Transmissionselektronenmikroskop untersucht.

Abb.3
Modellvorstellung einer Pt-
Ru Legierung im Vergleich
zu einer Pt/Ru Mischung:
reines Platin und die Legie-
rung kristallisieren in
einem kubisch flächenzen-
trierten Gitter, reines Ru-
thenium besitzt dagegen
hexagonale Struktur.

Model of a Pt-Ru alloy in
comparison to a Pt/Ru mix-
ture: pure platinum as well
as the alloy crystallize in a
face centred cubic lattice
(fcc), whereas pure ruthen-
ium exhibits hexagonal
structure (hcp).



Pt-Ru Legierung (tcc)



Pt (tcc)

Ru (hcp)

Mit Röntgenabsorptionsspektroskopie kann die mittlere geometrische Umgebung eines Pt- oder Ru-Atoms bestimmt werden, d.h. man erhält Informationen über die unmittelbare Nachbarschaft des Absorberatoms und den Aufbau einzelner Nanoteilchen. Das Ergebnis der Messungen ist in Abb. 4 gezeigt. Für die Pt-Ru Legierungspartikel wurden im Durchschnitt 80 Atome pro Nanoteilchen ermittelt. Davon sind etwa 40 Pt-Atome und 40 Ru-Atome. Da Ruthenium sehr oxophil (= sauerstoff liebend) ist, gehen etwa 1/3 der Ru-Atome eine Verbindung mit Sauerstoff ein und bilden Ru(O)_x Inseln an der Oberfläche der Nanopartikel. Für die Pt/Ru Mischung wurde ein „Komposit“ aus Pt-Nanoteilchen (50 Atome) mit geringer Ru-Komponente an der Oberfläche (3 Ru) und Ru-Nanoteilchen (40 Atome) mit wenigen Pt-Substituenten (8 Atome) ermittelt. D.h. durch den Herstellprozess bleiben die monometallischen Einzelkomponenten nicht komplett rein erhalten, sondern zeigen eine geringe Interaktion bei Kontakt [5].

In Abb. 5 sind Aufnahmen beider Katalysatorsysteme im Transmissionselektronenmikroskop gezeigt. Rein optisch lassen sie sich nicht unterscheiden: Die Bilder zeigen Nanoteilchen mit einem mittleren Durchmesser von 3 nm, die homogen auf dem etwa 20 nm großen Kohlenstoffträger verteilt sind. Eine Unterscheidung von Platin- und Rutheniumpartikeln ist nur über eine zusätzliche energiedispersive Röntgenanalyse möglich. Mit dieser Methode konnte gezeigt werden, dass sich im oberen linken Teil des Bildes hauptsächlich der Ru-Katalysator befindet, wohingegen im rechten unteren Teil vorrangig der monometallische Pt-Katalysator zu finden ist.

Nach der strukturellen Charakterisierung wurden die beiden Katalysatoren in einer Brennstoffzelle im Betrieb mit CO-haltigem Brenngas getestet. Dazu wurde eine Strom-Spannungs-Kurve für beide Systeme unter den gleichen Bedingungen gemessen (Abb. 6). Vereinfacht betrachtet gilt, je höher die Stromdichte bei einem bestimmten Potential, umso besser ist der untersuchte Katalysator. Unter den gewählten Bedingungen ist der Mischungskatalysator der Legierung sogar überlegen. Die bei einem mittle-



Wir suchen Sie als
**Praktikant/in oder
Diplomand/in**



„Materials for a better Life“

Umicore ist eine Materialtechnikgruppe. Die Produkte und Materialien von Umicore begegnen uns in vielen Dingen unseres täglichen Lebens.

Wir entwickeln, produzieren, verwenden, vermarkten und recyceln edelmetallhaltige Werkstoffe und tragen zu Lösungen auf Werkstoffbasis bei. Wir kombinieren unsere Kompetenzen in den Bereichen Metallurgie, Chemie und Werkstoffwissenschaften mit einem genauen Verständnis der Bedürfnisse, Anwendungen und Systeme unserer Kunden.

So fährt heute jedes vierte Auto mit einem Katalysator von Umicore.

Tun Sie den ersten Schritt!

Für uns sind Offenheit, Respekt, Innovation, Teamarbeit und Engagement entscheidende Werte.

Gut ausgebildete Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind der Schlüssel zu unserem Erfolg.

Für unseren Geschäftsbereich Automotive Catalysts suchen wir laufend Studentinnen und Studenten, die in unserem Unternehmen ein Praktikum absolvieren oder ihre Diplomarbeit anfertigen möchten.

Bewerber/innen verfügen idealerweise über ein bereits abgeschlossenes Vordiplom in einem Studiengang, bevorzugt aus den Studienrichtungen Chemie, Ingenieurwesen, Werkstoffwissenschaften sowie Maschinenbau.

Ihre Bewerbungsunterlagen senden Sie bitte an:

Umicore AG & Co. KG
Frau Barbara Kriebitzsch
Human Resources–Personalentwicklung
Rodenbacher Chaussee 4
63450 Hanau
bewerbungen@eu.umicore.com

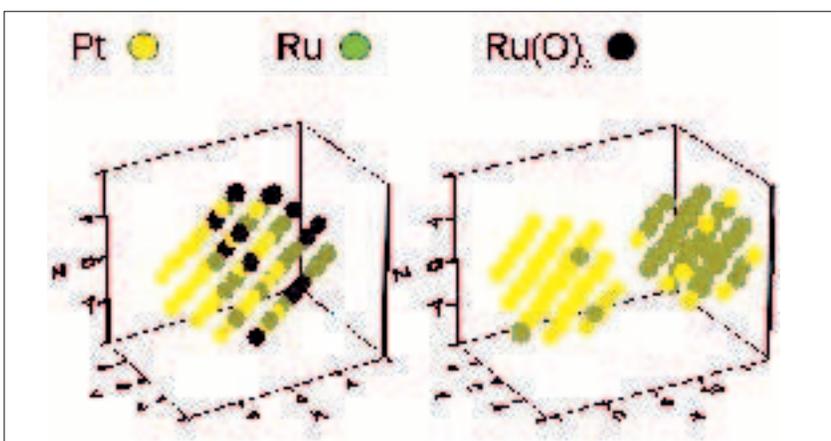


Abb. 4

Aus Röntgenabsorptionsdaten ermittelte Struktur für a) die Pt-Ru Legierung und b) die Pt/Ru Mischung: Die Pt-Ru Legierungspartikel sind im Durchschnitt aus 80 Atomen – davon 40 Pt, 40 Ru – aufgebaut. Etwa 1/3 gehen eine Verbindung mit Sauerstoff ein und bilden Ru(O)₂ Inseln. Für die Pt/Ru Mischung wurde ein „Komposit“ aus Pt Nanoteilchen (50 Atome) mit geringer Ru-Komponente an der Oberfläche (3 Ru) und Ru Nanoteilchen (40 Atome) mit wenigen Pt-Substituenten (8 Atome) ermittelt.

Structure of a) the Pt-Ru alloy and b) the Pt/Ru mixture as obtained by X-ray absorption data: The model for the Pt-Ru alloy is composed of 80 atoms, 40 Pt and 40 Ru, with approximately 1/3 of the Ru atoms present as Ru(O)₂ islands. The Pt/Ru mixture is pictured as an amalgam of Pt nanoparticles (50 atoms) with a small (3 atoms) surface Ru substituent, coincident with similar Ru nanoparticles (40 atoms) with a parallel Pt surface constituency (8 atoms).

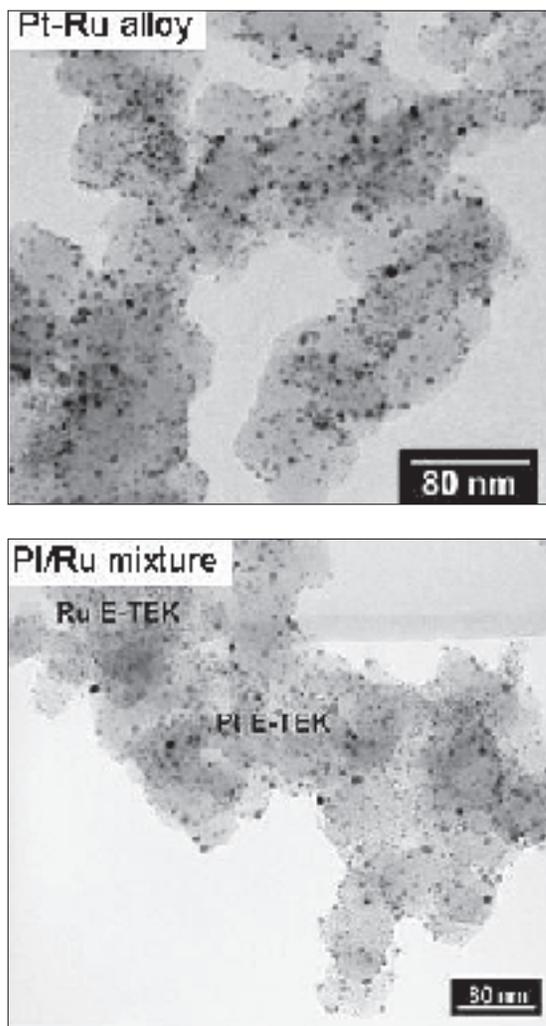
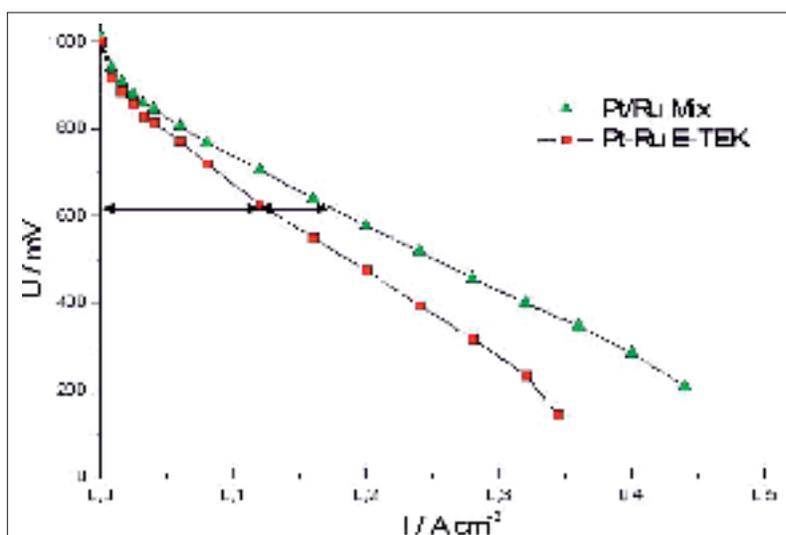


Abb. 5
Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahmen eines Pt-Ru Legierungskatalysators (links) im Vergleich zu einem Pt/Ru Mischungskatalysator (rechts): Nanoteilchen mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 3 nm sind homogen auf dem Kohlenstoffträger verteilt. Eine Unterscheidung von Pt- und Rutheniumpartikeln ist nur über eine zusätzliche energiedispersive Röntgenanalyse möglich.

Transmission electron micrograph of the Pt-Ru alloy catalyst (left) in comparison to the Pt/Ru mixture catalyst (right): Nanoparticles with an average diameter of 3 nm appear to be homogeneously dispersed on the carbon support. Energy-dispersive X-ray analysis is required to distinguish between platinum and ruthenium nanoparticles.



ren Arbeitspotential von 600 mV erreichte Stromdichte liegt für die Mischung um ca. 1/3 höher als für die Legierung. Folglich scheint der Kontakt, der durch einfaches Mischen der Einzelkomponenten erreicht wird, ausreichend zu sein, um eine der Legierung vergleichbare Performance zu erzielen. Für den Einsatz von Pt-Ru in Brennstoffzellen ist das Konzept des Baukastensystems also ein gangbarer Weg zur Herstellung effizienter und kostenoptimierter Katalysatoren. Allerdings stehen momentan noch Langzeittests aus, um das Alterungsverhalten der Mischung im Vergleich zur Legierung zu untersuchen.

Ein Blick in die Zukunft

In ersten Brennstoffzellentests zeigte sich, dass der Mischkatalysator eine dem Legierungskatalysator vergleichbare oder sogar bessere Aktivität gewährleisten kann. Für das betrachtete Pt-Ru System trifft die Voraussetzung also zu, dass die einzelnen Komponenten durch einfaches Mischen eine Aktivität erzielen können, die der des legierten bimetallics Komplettsystems entspricht. Könnte eine ähnliche Wirksamkeit auch für andere Katalysatoren beobachtet werden, wäre in Zukunft der Weg frei für die einfache Herstellung komplexer Katalysatorzusammensetzungen. Kommerzielle Systeme könnten vom Anwender kosteneffizient an die jeweiligen Einsatzbedingungen angepasst werden, so wie es bereits für Brennstoffzellenanwendungen in einem Gedankenexperiment beschrieben wurde. Dabei kann die Anpassung über einfaches Mischen der monometallischen „Bausteine“ in unterschiedlichen Zusammensetzungen erzielt werden oder durch zusätzliche Wärme- oder Reduktionsbehandlungen, um individuelle Eigenschaften der Einzelkomponenten, wie Partikelgröße und Oxidationszustand, separat zu optimieren. Wir dürfen also weiterhin als Anwender von der kinderleichten Katalysatorsynthese träumen, in welcher sich mit zwei Einzelbausteinen in der Schublade eine Vielzahl maßgeschneiderter Katalysatoren herstellen lassen.

Abb. 6
Strom-Spannungs-Kurve der kommerziell erhältlichen Pt-Ru Legierung im Vergleich zur Pt/Ru Mischung: Unter den gewählten Bedingungen ist der Mischungskatalysator der Legierung sogar überlegen. Die bei einem Potential von 600 mV erreichbare Stromdichte ist für die Mischung um ca. 1/3 höher als für die Legierung.

Current-voltage curve of a commercially-available Pt-Ru alloy compared to the home-made Pt/Ru mixture: In the chosen operation conditions, the activity of the mixture catalyst even surpasses that of the commercial alloy. The current density reached at a working potential of 600 mV is higher by approx. 1/3 for the mixture compared to the alloy.

Fachgebiet Erneuerbare Energien an der TU Darmstadt

Seit Dezember 2004 wird das Fachgebiet Erneuerbare Energien im Fachbereich Materialwissenschaft von Dr.-Ing. Christina Roth in Forschung und Lehre vertreten. Forschungsschwerpunkte der jungen Arbeitsgruppe sind u. a. Niedertemperatur-Brennstoffzellen (PEMFC), die detaillierte strukturelle und elektrochemische Charakterisierung nanoskaliger Katalysatorsysteme sowie die insitu Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS). Diese ermöglicht es, Änderungen von Katalysatorstruktur und Adsorbatbedeckung im Brennstoffzellenbetrieb unter realistischen Arbeitsbedingungen zu verfolgen. Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung und das fundamentale Verständnis der Wirkungsweise neuer geträgerter und ungeträgerter Katalysatorsysteme für Anode und Kathode in PEMFC. Die Fertigung von Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) sowie die Untersuchung der Mikrostruktur vor und nach Betrieb sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen. In der Lehre werden insbesondere eine Vorlesung „Brennstoffzellen – von den Grundlagen zur Anwendung“, ein entsprechender Praktikumsversuch sowie ein Kurs „Röntgenabsorptionsspektroskopie – Grundlagen und Datenauswertung“ angeboten.

Kooperationen mit Industrieunternehmen, Großforschungszentren und zahlreichen in- und ausländischen Hochschulen werden durch Drittmittel ermöglicht.

Ansprechpartner:

Dr. C. Roth, Juniorprofessorin
 Institut für Materialwissenschaft
 Fachgebiet Erneuerbare Energien
 Telefon: 06151/16-5498
 Fax: 06151/16-6023
 E-Mail: c_roth@tu-darmstadt.de
www.tu-darmstadt.de/fb/ms/fg/ee

Literatur

- [1] F. Schueth, „Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie: Heterogene Katalyse“, Chemie in unserer Zeit, 2006, 40, 92.
- [2] K. Kunimatsu, K. Shimazu and H. Kita, Journal of Electroanalytical Chemistry, 1988, 256, 371.
- [3] in Reformat: H. A. Gasteiger, N. Markovic, P. N. Ross and E. J. Cairns, Journal of Physical Chemistry B, 1994, 98, 617.
 in Methanol: H. A. Gasteiger, N. M. Markovic, P. N. Ross, E. J. Cairns, Journal of the Electrochemical Society, 1994, 141, 1795.
- [4] M. Mazurek, N. Benker, C. Roth, H. Fuess, „Structural and electrochemical investigation of binary mixtures of carbon-supported Pt and Ru catalysts for PEM fuel cells“, Fuel Cells, 2006, 6, 208.
- [5] F. J. Scott, C. Roth, D. E. Ramaker, „The kinetics of CO poisoning in simulated reformat and effect of Ru island morphology on PtRu fuel cell catalysts as determined by operando XANES“, Journal of the Electrochemical Society, in Vorbereitung.



Südzucker ist ein dynamisches Unternehmen, das im Zuckerbereich europaweit zur Spitze zählt. Diese Position haben wir mit einem engagierten und hervorragend geschulten Team erreicht. Auch Sie können bald dazugehören!

Süße Aussichten für Ihre Zukunft.

Je besser die Zutaten, desto feiner der Lebenslauf. Wie wäre es da mit einem führenden Unternehmen, bei dem frisch gebackene Hochschulabsolventen nicht nur die Theorie in die Praxis, sondern auch Ihre eigenen Ideen umsetzen können? Man lasse sich nur einmal auf der Zunge zergehen:

Südzucker ist die Nummer 1 unter den europäischen Zuckerherstellern, mit über 20.000 Mitarbeitern in nahezu allen Ländern Europas tätig und nicht selten mit zweistelligen Wachstumsraten.

Wer bei uns im Management erfolgreich sein will, braucht vor allen Dingen frische Ideen, eine gesunde Portion Teamgeist und eine ausgeprägte Sozialkompetenz. Zielstrebige Absolventen, die in einem modernen Unternehmen mit flachen Hierarchien und offener Kommunikation den richtigen Grundstein für Ihre Karriere legen wollen, sind bei uns jederzeit willkommen, als Führungskräftenachwuchs auf europäischer Ebene.

Würde Ihnen so ein Start ins Berufsleben schmecken? Dann freuen wir uns auf Ihre Bewerbung!

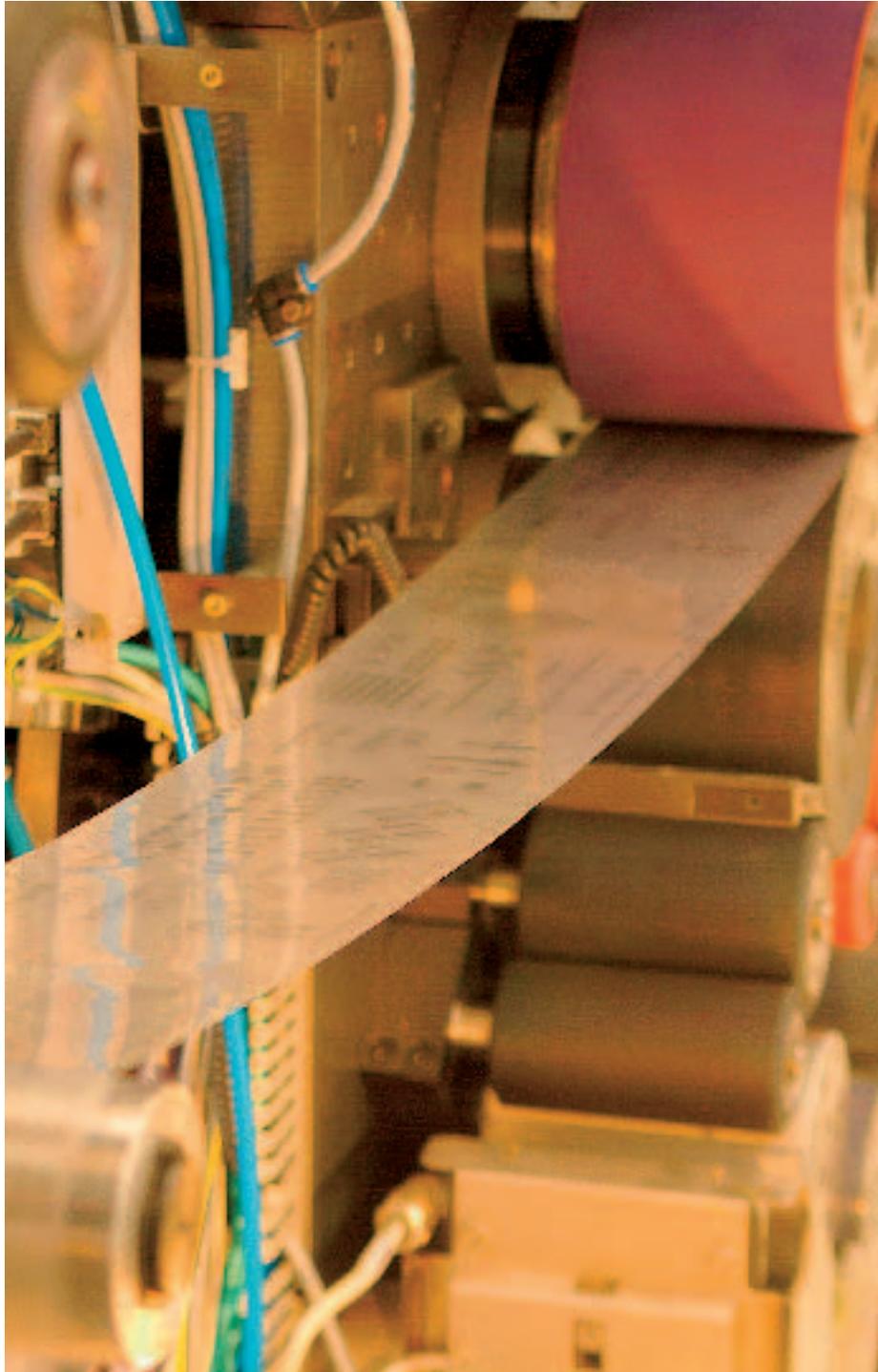


SÜDZUCKER

Südzucker AG Mannheim/Ochsenfurt
 Maximilianstraße 10 · 68165 Mannheim
www.suedzucker.de

Druckbare Intelligenz?

Roland Schmechel/Gabi Schierning



Ein gedruckter Elektronik-Chip? Das wäre genial! Druckprozesse verknüpfen Beschichtung mit Strukturierung und sind daher, technologisch gesehen, sehr flexibel und effektiv. Während das Drucken von Farben ein alter Hut ist, ist das Drucken von elektronischen Funktionsschichten wie Halbleitern, Leitern und Isolatoren noch immer eine Herausforderung. Seit über zehn Jahren werden halbleitende Polymere entwickelt, die potentiell für Druckprozesse geeignet sind. Es gibt aber auch neue Ansätze, anorganische Materialien druckbar zu machen.

***Printable Intelligence** A printed electronic chip? It would be ingenious! Printing combines coating and structuring, which makes it a quite flexible and effective process. While printing of colours is old hat, it is still a challenge to print electronic functional layers like semiconductors, conductors and insulators. Since more than ten years semiconducting polymers have been developed, which are suitable for printing, but there are also new approaches to make inorganic materials printable.*

Massendruck von Transistorstrukturen auf ein flexibles Kunststoffsubstrat
Quelle: pmTUC

Mass printing of transistor structures on a plastic substrate

Wenn ein Farbdrucker in der Lage ist, rote, blaue und grüne Tinte fast mikrometerngenau auf Papier zu platzieren, warum sollte man da nicht auch Leiter, Halbleiter und Isolatoren, die Grundmaterialien jeder Elektronik, zu einer Schaltung zusammenfügen können? Die Idee liegt zum Greifen nahe, doch wer zugreift, merkt schnell: so einfach ist es doch nicht. Um die wahre Herausforderung zu verstehen, sei ein Blick in die Geschichte erlaubt.

Die erste integrierte Schaltung

Der Siegeszug der heutigen Mikroelektronik begann mit der Erfindung des Transistors durch Shockley, Bardeen und Brattain in den Bell-Laboratorien im Jahr 1947. Ein Transistor ist dabei so etwas wie ein elektronischer Schalter, nur dass er auf einem festkörperphysikalischen Effekt in einem gezielt strukturierten Kristall beruht und daher ganz ohne mechanische Bewegungen auskommt. Für eine elektronische Schaltung müssen viele Transistoren mit anderen Bauelementen wie Widerständen oder Kondensatoren verknüpft werden. Bald erkannte man, dass die Fülle an Verbindungen und Verknüpfungen zu einem begrenzenden Faktor beim Verkleinern komplexer Schaltungen wird. Die entscheidende Idee, die zur heutigen Mikroelektronik geführt hat, bekam Jack Kilby im Sommer 1958, als seine Kollegen von Texas Instruments im Sommerurlaub waren und den neu eingestellten Mitarbeiter im Labor allein zurück ließen. Er schlug vor, die gesamte Schaltung monolithisch aus einem einzigen Kristallblock aufzubauen, und bereits im September 1958 hatte er den ersten integrierten Schaltkreis realisiert. Um einen Kristallblock jedoch entsprechend strukturieren zu können, bedarf es eines aufwendigen Verfahrens, der Photolithographie. Dabei werden Teile des Kristalls mit einem Photolack abgedeckt. An den nicht abgedeckten Stellen kann das Material über Eindiffusion von Fremdatomen modifiziert (dotiert), aber auch durch Ätzprozesse abgetragen oder, zum Beispiel über eine chemische Gasphasenabscheidung, neues Material aufgetragen werden. Für eine komplette Schaltung sind viele Einzelstrukturierungsschritte mit wechselnden Masken erforderlich. Die Prozesstemperaturen für die Materialabscheidungen liegen nicht selten über 1000°C. Doch der Aufwand ist notwendig, um entsprechend leistungsfähige Schaltungen aufzubauen, und er lohnt sich, wenn die zu produzierenden Stückzahlen groß genug sind. Wenn man hingegen geringere Leistungsansprüche an die Schaltung stellt, dafür aber eine möglichst einfache Prozessierung, besonders im Hinblick auf geringe Herstellungskosten oder Massenfertigung wünscht, drängt sich zunehmend die Frage nach Alternativen zur herkömmlichen integrierten Schaltungstechnik auf.

Organische Halbleiter

Kilby hat mit Sicherheit nie darüber nachgedacht, seine Schaltung durch einen Druckprozess herzustellen, obwohl dies eine elegante Möglichkeit bietet. Material dort zu positionieren, wo man es braucht. Druckprozesse gehen von Pasten, Flüssigkeiten oder Pulvern aus, herkömmliche Transistoren bestehen aber aus halbleitenden Kristallen aus Germanium oder

Silizium. Es gab wenig Aufsehen, als 1986 Tsumura und Mitarbeiter von Mitsubishi den ersten Transistor auf der Basis eines halbleitenden Polymers aufgebaut hatten [Tsumura, et al, 1986]. Dabei scheint es, rückblickend, der Anfang einer neuen Epoche gewesen zu sein. Mehr Beachtung schenkte man schon der effizienten Elektrolumineszenz aus einer ultradünnen organischen Schicht, die erstmals 1987 von Tang und Mitarbeitern berichtet wurde [Tang et al, 1987]. Die frühen grundlegenden Arbeiten aus den 1960ern, 70er und 80er Jahren, in denen sich Forscher den halbleitenden und leitenden Eigenschaften organischer Materialien widmeten, kamen plötzlich aus der Ecke akademischer Spielerei heraus und wurden unter dem Blickwinkel eines neuen technologischen Ansatzes betrachtet: nämlich der Realisierung einer druckbaren Elektronik. Viele organische Materialien sind löslich und besonders Polymere besitzen gute Schichtbildungseigenschaften. Wenn die organischen Schichten auch noch bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften die Palette vom Isolator über den Halbleiter bis hin zum Leiter abdecken können, steht einer druckbaren Elektronik eigentlich nichts mehr im Wege.

Und doch gleicht die Zielstellung eher einer Quadratur des Kreises. Damit ein Material in der Schaltungstechnik auch als Leiter oder Halbleiter verwendet werden kann, müssen sich die Ladungsträger im Material möglichst gut bewegen können. Dies erfordert eine hohe Dichte und eine starke Wechselwirkung zwischen den Atomen, was wiederum einer guten Löslichkeit entgegensteht. Seit Beginn der 1990er Jahre wird weltweit intensiv daran geforscht, leicht verarbeitbare Polymere zu entwickeln, die eine hohe Ladungsträgerbeweglichkeit oder hohe Leitfähigkeit zeigen. Neben Reinheit und Defektfreiheit der molekularen Grundeinheiten spielt dabei die Ordnung der Moleküle untereinander eine wesentliche Rolle. Hierfür greift man auf die Selbstorganisationseigenschaften vieler Makromoleküle zurück, das heißt, die Moleküle ordnen sich nach dem Auftragen bis zu einem gewissen Grade selbst an. Allerdings ist nicht jede Ordnung auch für den Ladungstransport günstig. 13 Jahre nach der Demonstration des ersten Transistors auf der Basis eines halbleitenden Polymers erreichte man mit dem gleichen Polymer (Polyhexylthiophen) bereits eine um vier Größenordnungen höhere Feldeffektbeweglichkeit, weil man gelernt hatte, die Ordnung richtig einzustellen [Sirringhaus et al. (1999)]. Der Fortschritt ist also unverkennbar.

Anorganische Materialien drucken?

Bei allem Fortschritt sind doch die bisher erzielten Ladungsträgerbeweglichkeiten und Leitfähigkeiten organischer Materialien um mindestens drei Größenordnungen kleiner, als die üblicher anorganischer Kristalle (Tab. 1). Selbst in amorphem Silizium, also einer denkbar schlechten morphologischen Form des klassischen Halbleiters, ist die Ladungsträgerbeweglichkeit immer noch so hoch, wie in den besten gut orientierten halbleitenden Polymeren. Es drängt sich somit die Frage auf, ob nicht auch anorganische Materialien druckbar gemacht werden könnten. Besonders die moderne Nanotechnologie liefert dazu neue Ansätze. Zerlegt man einen herkömmlichen

Halbleiter		Leiter	
Material	Ladungsträgerbeweglichkeit [cm ² /Vs]	Material	Leitfähigkeit [S/cm]
anorganisch			
Silizium (amorph)	0,3 ... 1	Kupfer	6 · 10 ⁵
Silizium (Kristall)	600 (p) 1500 (n)	Aluminium	3 · 10 ⁵
Germanium (Kristall)	1800 (p) 3800 (n)	Eisen	1 · 10 ⁵
Galliumarsenid (Kristall)	400 (p) 8500 (n)	Blei	4 · 10 ⁴
organisch			
regioirreguläres Polythiophen (amorph)	10 ⁻⁵ ... <10 ⁻³ (p)	poly(3,4 ethylen-dioxithiophen) (PEDOT)	≤10 ³
regioregulares Polythiophen (mikrokristallin)	0,1 ... 0,3 (p)	Polyanilin (PANI)	5

Tab. 1
Ladungsträgerbeweglichkeit für Elektronen (n) und Löcher (p) sowie Leitfähigkeit einiger ausgewählter organischer und anorganischer Materialien
Charge carrier mobility of electrons (n) and holes (p) as well as conductivity of some selected organic and inorganic materials

Arbeitsgruppe Druckbare Elektronik am Institut für Nanotechnologie (INT) des Forschungszentrums Karlsruhe

PD Dr. Roland Schmechel (Leiter)

E-Mail: Roland.Schmechel@int.fzk.de

Dr. Gabi Schiering

(wissenschaftliche Mitarbeiterin)

Die Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit der Herstellung und Charakterisierung von halbleitenden und leitenden Schichten aus nanoskaligen Funktionsmaterialien für die Anwendung in der Elektronik. Die Forschungsaktivitäten laufen in enger Kooperation mit der DEGUSSA AG und werden von dieser finanziell unterstützt. Es besteht außerdem eine enge Zusammenarbeit mit dem „Gemeinschaftslabor Nanomaterialien“ am Fachbereich Material- und Geowissenschaften der TU Darmstadt. Dr. Schmechel ist darüber hinaus Privatdozent an der TU und hält Vorlesungen über ausgewählte Themen der Nanotechnologie.

Literatur

- Tsumura, A., Koezuka, H., Ando, T. (1986), Applied Physics Letters 49 1210 (1986).
Tang, C.W., VanSlyke, S.A. (1987), Applied Physics Letters 51 913 (1987).
Siringhaus, H., Brown, P. J., Friend, Nielson, M. M., Bechgaard, K., Langeveld-Voss, B. M. W., Spiering, A. J. H., Janssen, R. A. J., Meijer, E. W., Herwig, P., de Leeuw, D. M. (1999) Nature 401 685 (1999).
Shimoda, T., Matsuki, Y., Furusawa, M., Aoki, T., Yudasaka, I., Tanaka, H., Iwasawa, H., Wang, D., Miyasaka, I., Takeuchi, Y. Nature 440 783 (2006).

Halbleiterkristall in nur wenige Nanometer große Partikel, so können diese in eine stabile Suspension überführt werden, die im Prinzip verdichtet werden kann. Nach dem Verdampfen des Lösungsmittels wären die Partikel lose gepackt. Für vernünftige Transporteigenschaften müssten sie aber noch verdichtet werden. Dies könnte durch eine thermische Nachbehandlung erfolgen. Die Sintertemperaturen vieler anorganischer Materialien liegen aber meist oberhalb 700°C und höher. Bei Nanopartikeln kommt es jedoch durch die deutliche Steigerung der Oberflächenenergie im Verhältnis zur Volumenenergie zu einem signifikanten Absinken der Schmelz- und Sintertertemperatur. Ein Versintern von Nanopartikeln bei Temperaturen um 200°C und weniger ist deshalb möglich. Allerdings führt die mit der Verdichtung einhergehende Volumenabnahme auch leicht zu mechanischen Spannungen und Rissbildungen in der Schicht. Alternativ wäre eine Art chemische Vernetzung der Partikel, die nicht nur thermisch, sondern auch optisch ausgelöst werden kann, denkbar. Anstelle von einem Partikel kann man auch direkt von einer molekularen Vorstufe ausgehen. So haben zum Beispiel kürzlich Wissenschaftler aus Japan einen Siliziumtransistor aus einer flüssigen Silanverbindung gebaut, der in seinen Leistungseigenschaften einem einkristallinen Gegenstück nur um etwa den Faktor 6 unterliegt [Shimoda et al (2006)]. Zwar hat dieser Modelversuch noch deutliche technologische Nachteile: So sind Silanverbindungen aufgrund ihrer Giftigkeit nicht gerade einfach zu handhaben und es sind Temperaturen über 500°C für die vollständige Zersetzung der molekularen Vorstufe erforderlich, aber es bestätigt, dass die Herstellung eines Siliziumtransistors auch über eine druckbare Flüssigphase möglich ist.

Und die Drucktechnik?

Als Johann Gutenberg Mitte des 15. Jahrhunderts in Mainz die Drucktechnik revolutionierte, ging es um Buchstaben, nicht um Transistoren. Bis heute wird Drucktechnik im Wesentlichen für graphische Replikationen verwendet. Natürlich wäre eine von einem Tintenstrahldrucker ausgedruckte funktionsfähige elektronische Schaltung schon revolutionär. Will man aber die Vorzüge einer druckbaren Elektronik richtig ausreizen, so muss auch die Drucktechnik weiterentwickelt werden. Eine möglichst hohe Auflösung ist dabei ein entscheidendes Kriterium, denn umso kürzer die Wege für die Ladungsträger sind, umso schneller kann eine elektronische Schaltung reagieren. Ein sehr interessanter Ansatz hat seine Wurzeln im Flachdruck, einem Ende des 18. Jahrhunderts erfundenen Druckverfahrens, das darauf beruht, dass die Oberfläche einer flachen Druckform chemisch modifiziert wird. Die ölhaltige Farbe haftet dabei an den hydrophoben Stellen der Druckform, während die hydrophilen Stellen Wasser anziehen. Da die Wechselwirkungen auf molekularer Ebene liegen, birgt dieses Prinzip eine molekulare Auflösung in sich. Heutige physikalische Methoden gestatten eine gezielte Oberflächenmodifikation im Nanometerbereich. Damit ist im Prinzip ein Flachdruck mit nahezu molekularer Auflösung möglich



Mittendrin.
Wenn es um junge Talente geht.

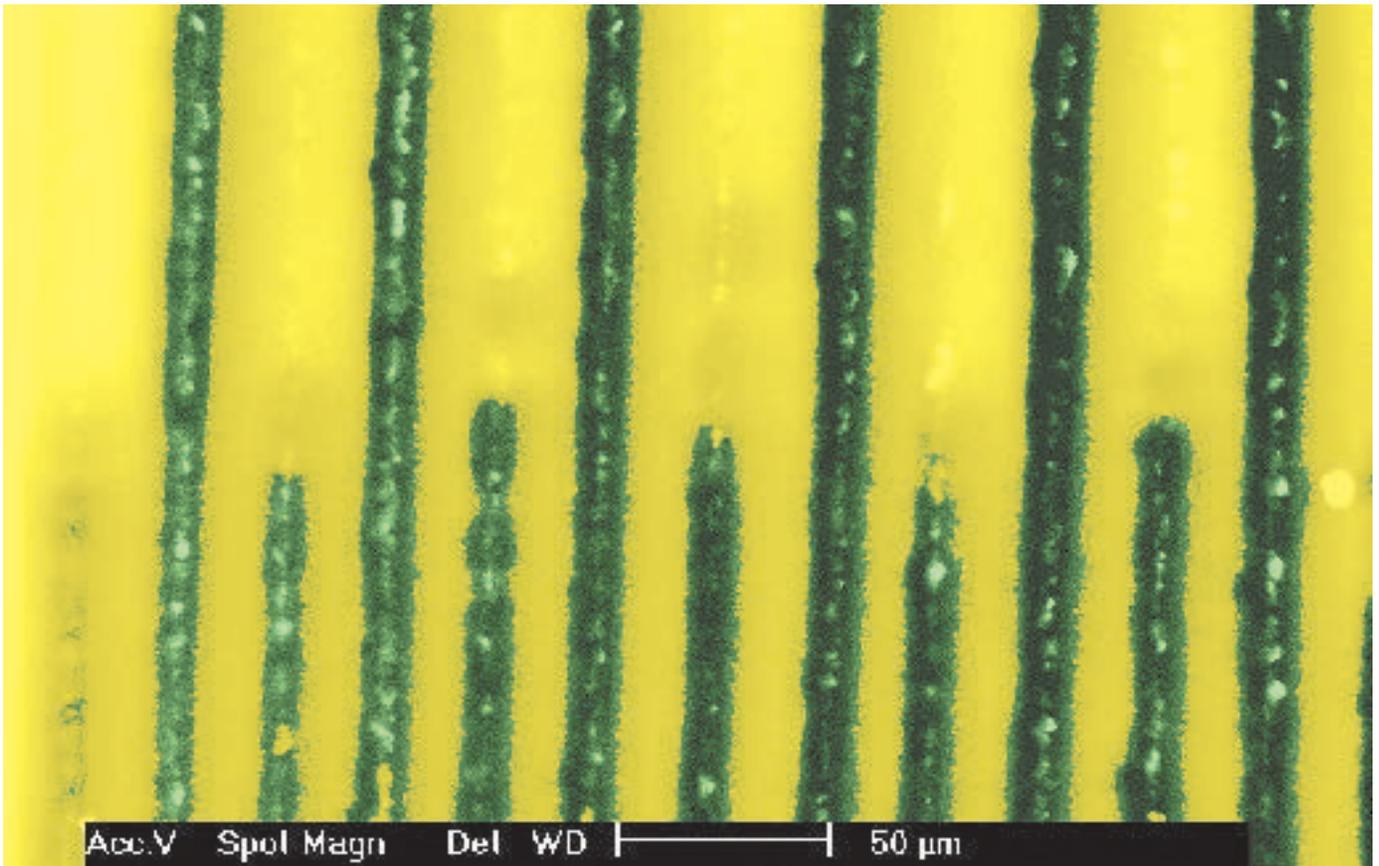


Merck ist mitten im Leben. Und das mit Engagement und Leidenschaft.
Wir sind dabei, wenn es darum geht, Naturwissenschaften zu fördern.

www.darmstadt.merck.de

Muskeln unter Hochspannung – Antriebe mit elektroaktiven Polymeren

Helmut F. Schlaak/Peter Lotz/Marc Matysek



Lautlose Antriebe ohne Elektromotoren können durch Festkörperaktoren realisiert werden, in denen sich Funktionswerkstoffe durch elektrische Stimulation verformen. Im Gegensatz zu Piezoelektrika können elektroaktive Polymere (EAP) Dehnungen von ca. 35% erreichen. Damit entsprechen sie in Stellweg und Kräften dem natürlichen Muskelgewebe. Die für die große Verformung notwendigen Kräfte entstehen durch elektrostatische Felder über dem dielektrischen Material. Mit Hilfe einer neuartigen Multilayertechnologie sind handhabbare Stapelaktoren in beliebig geformten Aktorarrays für vielfältige Anwendungen wie taktile Displays und Fluidfördersysteme herstellbar.

Muscles under Highvoltage – Electroactive Polymer Actuators Silent drives without any electromagnetic motors can be realised by solid state actuators where smart materials are deformed by electrical stimulus. In contrast to piezoelectric materials electroactive polymers (EAP) however reach strain values of about 35%. Applying electrostatic fields on elastomere layers cause their deformation due to electrostatic forces. Motions and forces of these actuators correspond to natural muscle tissue. Using a novel multilayer technology stack actuators with more than 100 layers are manufactured where actuator arrays with arbitrary shape provide a lot of applications like tactile displays or fluidic pump systems.

Einführung

Stellen wir uns vor: in Maschinen und Geräten bewegen sich Hebel, Ventile und Stellknöpfe lautlos wie von Geisterhand. Keine Laufgeräusche von Elektromotoren und Getrieben sind zu hören, wir sehen nur fließende Bewegungen: kein Rucken, keine Vibration ist zu spüren. Beim näheren Hinsehen erkennen wir in diesen neuartigen Geräten Folien, Scheiben und Stangen aus gummiartigem Material, die sich durch magische Kräfte aus dem Inneren heraus zusammenziehen und verformen. Sind diese wundersamen Antriebe Fiktion, Vision oder bereits Wirklichkeit? Nein, keine Fiktion – es handelt sich um smarte Materialien, um Elektroaktive Polymere (EAP).

Seit langem werden in Maschinen Bewegungen durch Elektromotoren hervorgerufen. Meistens wird eine Rotation durch Getriebe in lineare Bewegung umgesetzt. Für kleine Hubbewegungen wird seit einigen Jahrzehnten der inverse piezoelektrische Effekt angewendet (piezoelektrischer Antrieb): Durch Anlegen einer Spannung an die Steuerelektroden einer Piezokeramik verformt sich diese. Die Dehnung erreicht zwar maximal nur 0,1% der Materialdicke, dafür aber mit sehr hohen Kräften.

Gegenüber der starren Piezokeramik sind Kunststoffe (Polymere) wesentlich leichter, nachgiebiger und erlauben eine freie Formgebung. Ebenso wie piezoelektrische Antriebe verändern Elektroaktive Polymere ihre Form durch elektrische Signale. Sie werden nach ihrer Wirkungsweise in elektronische und ionische Elektroaktive Polymere unterschieden [1].

Bei letzteren verursacht ein Ionentransport eine Verformung. Polymer-Metall-Komposite beispielsweise bestehen aus zwei Elektrodenfilmen mit einer flüssigen Polymerfüllung. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung fließen freie Ionen zu einer Elektrode und bewirken durch die Massenverschiebung eine Biegung der Folie. Derartige Antriebe benötigen geringe Spannungen (1 – 5 V), sind dafür aber sehr langsam (ca. 0,1 sec). Die Wirkungsweise wurde bei fischähnlichen Schwimmantrieben und steuerbar biegsamen Katheterspitzen gezeigt.

Bei der ersten Gruppe der EAP wird die Verformung durch Elektronentransport erreicht. Dazu zählen ferroelektrische Polymere wie PVDF nach dem piezoelektrischen Effekt. Eine ähnliche Wirkung erzielen an langen Ketten gepfropfte Polymere (graft polymers), deren „Leitersprossen“ sich durch elektrische Felder zusammenziehen. Eine sehr robuste Klasse bilden die dielektrischen Polymeraktoren, die hohe Wirkungsgrade und schnelle Reaktionszeiten im Mikrosekundenbereich liefern und elektrostatisch stimuliert werden [2].

Elektrostatische Elastomeraktoren

Elektrostatische Elastomeraktoren bestehen aus einem elastischen Dielektrikum zwischen zwei nachgiebigen Elektroden. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die Elektroden wird das Dielektrikum auf Grund der sich anziehenden Ladungen gestaucht (Abb. 1). Auf die elastische Schicht wirkt der elektrostatische Druck

$$p = T = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{U_c^2}{z^2} = \epsilon_0 \epsilon_r E^2$$

mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ_0 , der Dielektrizitätszahl des Materials ϵ_r , seiner Dicke z und der angelegten Spannung U_c [2]. Bisher werden für die dielektrischen Schichten zwei Materialklassen verwendet: weichelastische Polymerfolien aus Acryl oder Silikon. Nachgiebige Elektroden lassen sich in dünnen Schichten aus Graphitpulver realisieren. Das Volumen von Elastomeren kann wegen der sehr geringen Kompressibilität als nahezu konstant angesehen werden. Somit folgt der einachsigen Stauchung $S_z = dz/z_0$ des Elastomerkörpers (Abb. 1) eine Querdehnung $S_x = dx/x_0$ bzw. die Flächendehnung $S_A = dA/A_0$:

$$S_x = \frac{1}{\sqrt{1 - S_z}} - 1; \quad S_A = \frac{S_z}{1 - S_z}$$

Bei Annahme eines isotropen Materials ergibt sich mit einem konstanten Elastizitätsmodul $Y = T_i/S_i$ der Zusammenhang zwischen der von außen wirksamen mechanischen Spannung $T = T_z - T_y - T_x$ und der Stauchung S_z :

$$T = Y(S_z + 2S_x) = Y \left[S_z + 2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - S_z}} - 1 \right) \right]$$

Im Betrieb entspricht der äußeren mechanischen Spannung T nach (3) der elektrostatische Druck nach (1), so dass die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie $S_z = f(U_c)$ eine nichtlineare Funktion darstellt, die in grober Näherung eine quadratische Abhängigkeit $S_z \sim U_c^2$ liefert. Auf Grund der viskoelastischen Eigenschaften der Elastomere, d.h. neben der Elastizität gibt es auch eine Dämpfung, zeigt die Steuerkennlinie der Aktoren eine Hysterese (Abb.2) [3].

Elastomere lassen sich bis zu einer Dickendehnung von ca. 35% verformen, dies entspricht dem 50- bis 100-fachen der Piezoelektrika. Im Gegensatz zu Kristallen und Keramiken zeigen Elastomere sehr hohe

Abb. 1 Deformation eines elastischen Dielektrikums unter elektrostatischer Kraftwirkung

Deformation of an elastic dielectric under electrostatic force

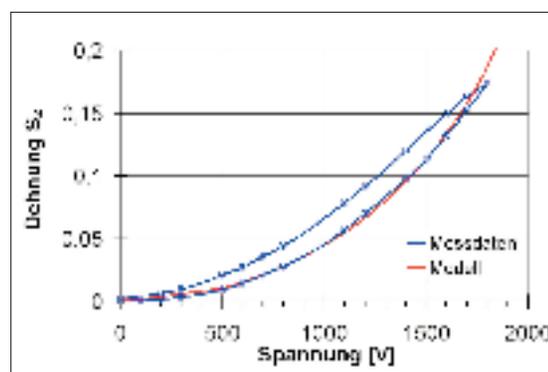
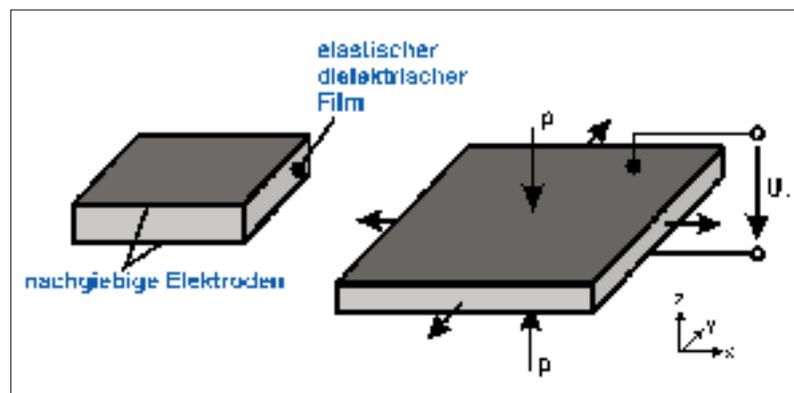


Abb. 2 Dehnung in Abhängigkeit von der Betriebsspannung (Dielektrikum: Elastosil P7670, Schichtdicke 25 µm)

Strain versus driving voltage (dielectric: Elastosil P7670, layer thickness 25 µm)

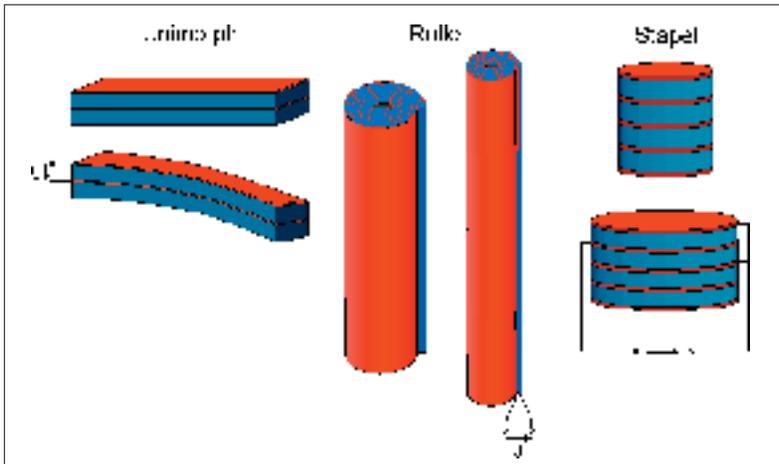


Abb. 3
Aufbau und Funktionsweise elektrostatischer Elastomeraktoren
Setup and function of electrostatic elastomeric actuators

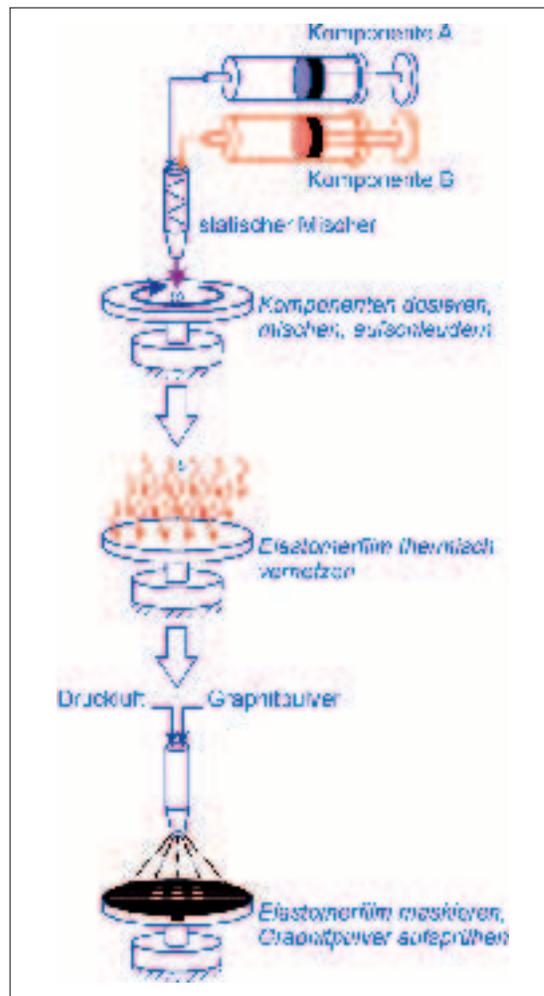


Abb. 4
Prozessschritte der Multilayer-Technologie zur Stapelaktorherstellung
Process steps of multilayer technology to manufacture stack actuators

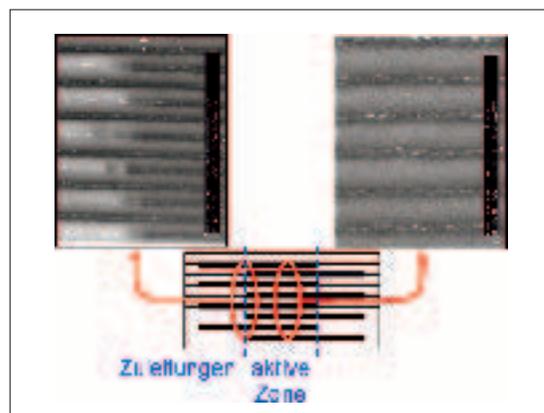


Abb. 5
Querschnitt eines Stapelaktors
Cross section of stack actuator

Durchbruchfeldstärken von über $100 \text{ V}/\mu\text{m}$, dem mehr als 30-fachen von Luft, so dass hohe elektrostatische Drücke bis zu 100 kPa aufgebaut werden können. Menschliches Muskelgewebe kann sich bis zu 50% seiner Ursprungslänge zusammenziehen und liefert eine Kraftdichte (Druck) von 350 kPa [4]. Somit liegen die Kennwerte von Elastomeraktoren in der gleichen Größenordnung.

Um die elektrischen Spannungen zu begrenzen, muss die Schichtdicke des Dielektrikums im Mikrometerbereich liegen, so dass trotz der großen Dehnungen nur geringe absolute Auslenkungen erreicht werden können. Um größere Bewegungen bzw. Kräfte zu erzeugen, sind spezielle Aktoranordnungen nach Abb. 3 erforderlich. Beim Rollenaktor sowie Biegeaktor wird die Dehnung senkrecht zum elektrischen Feld ausgenutzt. Der Stapelaktor besteht aus vielen übereinander angeordneten Aktorfolien, deren Elektroden abwechselnd parallel geschaltet sind. Die Fläche des Aktors bestimmt die erreichbare Kraft und die Schichtanzahl den absoluten Stellweg, so dass Aktorhübe im Millimeterbereich möglich sind. Eine Integration von vielen einzelnen Stapelaktoren in einem gemeinsamen Verbund erfordert eine Multilayer-Technologie, die bisher weltweit einmalig in Darmstadt am Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK) entwickelt wurde.

Multilayer-Technologie für Stapelaktoren

Zur Herstellung von Stapelaktoren mit über 100 Schichten ist eine automatisierte rechnergestützte Anlage entwickelt worden, deren Prozessschritte Abb. 4 zeigt. Die Elastomerfilme werden durch Aufsprühen von flüssigem Silikon hergestellt. Mit diesem Verfahren können Filme mit homogenen Schichtdicken von wenigen Mikrometern erzeugt werden. Zur Anwendung kommen zweikomponentige, additionsvernetzende Silikone, die eine Bildung von Spaltprodukten auf der Oberfläche des Filmes während der Vernetzung vermeiden.

Nach der thermisch stimulierten Vernetzung werden die Elektroden aus Graphitpulver mit einer Partikelgröße von $2 \mu\text{m}$ aufgebracht. Dazu werden Graphitpartikel durch eine geätzte Schattenmaske auf die vernetzte Elastomerschicht gesprüht. Abb. 5 zeigt den Querschnitt eines Stapelaktors mit den REM-Aufnahmen eines Aktorstapels im Elektroden- und im Zuleitungsbereich. Die einzelnen Aktorschichten sind ca. $25 \mu\text{m}$ und die Elektroden-schichten ca. $3 - 5 \mu\text{m}$ dick. Durch die Gestaltung der Schattenmaske lassen sich beliebige Anordnungen von einzelnen Aktoren in einem gemeinsamen Elastomer-Schichtverbund integrieren.

Anwendungsbeispiele

Rollen- und Stapelaktoren bieten eine Vielzahl von Anwendungen in unterschiedlichen Bereichen der Technik, wovon einige schon demonstriert worden sind. Werden Aktorfolien um eine gespannte Spiralfeder als Rolle gewickelt, ergibt sich ein künstlicher Streckmuskel (Abb. 6a). Bei angelegtem elektrischen Feld dehnt sich die Folie aus und die Feder entspannt sich. Derartige elektrische Muskeln sind in laufenden Robotern (Abb. 6b) [5] und in Armdrückwettbewerb-



Achtung Fördermöglichkeit auch für Studenten bis ins Jahr 2006:

EU-Fördermaßnahme

Achtung!: 30% unserer Lehrgangsgebühren werden durch die EU getragen

Ihre Perspektiven für die Zukunft auf dem **deutschen** und **weltweiten** Arbeitsmarkt beginnen bei uns.

Internationale(r)
Schweißfachingenieur/-in

Tageslehrgang (Mo - Fr)
von August bis November 2006
und Februar bis Mai 2007

Wochenendlehrgang (Fr + Sa)
von Oktober 2006 bis Juni 2007

Zugangsvoraussetzung: Studium mit Diplom-, BSc- oder MSc-Abschluss an BA, FH, TH, Uni.
Sonderregelungen zur Anerkennung von Teil 1



Wir informieren Sie gerne
Internet: <http://www.slv-mannheim.de>

E-Mail: info@slv-mannheim.de

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mannheim GmbH
Käthe-Kollwitz-Straße 19 • 68169 Mannheim •Telefax (0621) 3004-292 • Telefon (0621) 3004-123
Staatlich anerkannt und akkreditiert als Ausbildungs- und Prüfstelle für Schweißtechnik

**SIE WOLLEN IHRE KUNDEN
DIREKT UND OHNE
UMWEGE ERREICHEN?**

Mit der Produktdatenbank „Wer baut Maschinen in Deutschland“ sind Sie immer auf dem richtigen Weg – und das im Internet, CD-ROM und Buch.
So haben Sie im Wettbewerb die Nase vorn!



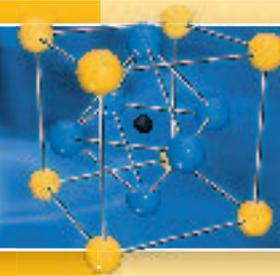
Die Produktdatenbank „Wer baut Maschinen in Deutschland“ bietet Einkäufern und Entscheidern detaillierte Informationen zu geeigneten Lieferanten, Dienstleistern und Produkten sowie weitere Firmendaten zu den gewünschten Unternehmen.

Mehr erfahren Sie unter:
• Fon 06151 380-120
• info-hp@hoppenstedt.de
• www.vdma-products.com

Hoppenstedt
Publishing GmbH

Piezoproducts
Ceramics in Motion >>>>

ARGILLON



Seit mehr als 30 Jahren entwickeln und produzieren wir großserienmäßig Piezokeramiken für unterschiedlichste Anwendungen in **ausgezeichneter Qualität und mit höchster Zuverlässigkeit!** Unsere langjährige Erfahrung bei der Entwicklung und Anwendung piezokeramischer Bauelemente und Baugruppen ist für unsere Kunden ein klarer Vorteil.

- Bauelemente**
- Piezokeramiken
 - Biegewandler
 - Ultraschallwandler
 - Multilayerbiegewandler
 - Multilayerstacks

- Baugruppen**
- Textilmaschinen-Segmente
 - Ultraschallzerstäuber
 - Piezo-Generatoren



ARGILLON ist mit Piezoprodukten Weltmarktführer in den verschiedensten Bereichen.

Argillon GmbH
Piezoproducts
Bahnhofstr. 43
96257 Redwitz

Telefon +49(0)9574/81466
Telefax +49(0)9574/81618
piezoproducts@argillon.com
www.piezo-power.com

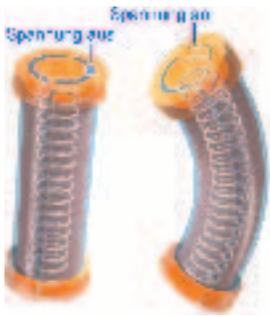


Abb. 6
 (a) Künstlicher Muskel mit Feder, (b) laufender Roboter
 Quelle: SRI International
 (a) Artificial muscle with spring, (b) walking robot

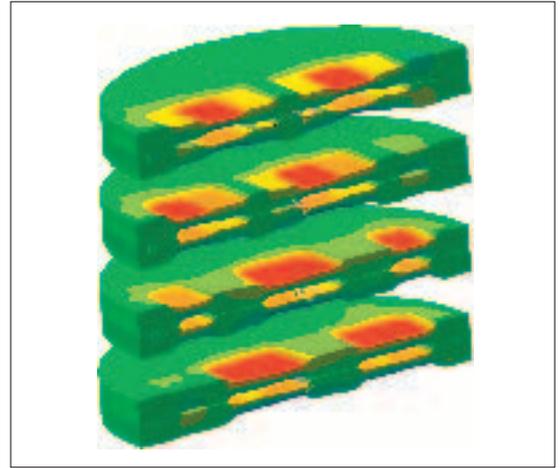


Abb. 8
 Peristaltische Pumpe mit linearem Aktorarray
 Peristaltic pump with linear actuator array

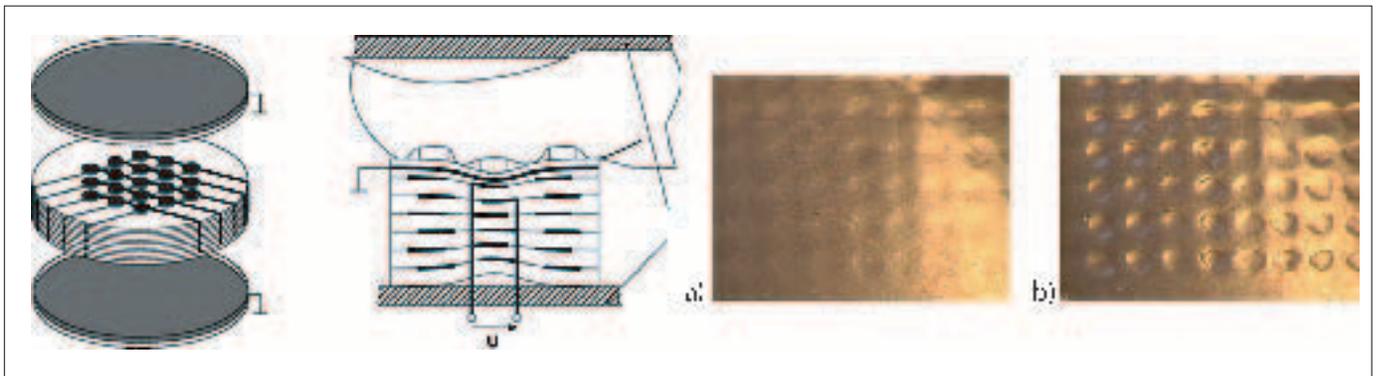
ben auf der jährlichen Konferenz Smart Structures and Materials in San Diego eingesetzt worden. Die Vorteile von flexiblen Kunststoffen kommen auf dem Gebiet der Mensch-Machine-Schnittstellen bei der Stimulation des Tastsinns zur Geltung. Lesegeräte für Blinde, sog. Braille-Displays bestehen aus beweglichen Stiften im Raster von 2,5 mm, die bei Anregung um 0,2 - 0,5 mm aus der Displayoberfläche herausragen. Heutige Braille-Zellen mit acht darstellbaren Punkten bestehen aus einer aufwändigen Feinmechanik, angetrieben von piezoelektrischen Biegeaktoren. An mehreren Instituten, so auch bei EMK, wird an Braille-Displays aus EAP gearbeitet [6, 7]. Die Multilayertechnologie eignet sich dazu, Aktorarrays in einer Matrix aufzubauen: Jedes Aktorelement lässt sich zur Minimierung der nötigen Anschlussleitungen gezielt durch das Adressieren der gekreuzten Zeilen- und Spaltenleitungen stimulieren (Abb. 7). Derartige Aktormatrizen können für benutzerdefinierte Tastenfelder, taktile Graphikdisplays sowie für die taktile Rückmeldung in der Telemanipulation und Virtual-Reality-Anwendungen eingesetzt werden. In der Natur gibt es zur Förderung von Flüssigkeiten nur Membranpumpen (Herz) bzw. peristaltische Pumpen (Darm), die anstelle von Rotationen nur

Hubbewegungen ausführen. Die technische Umsetzung ist sehr interessant, weil das peristaltische Pumpprinzip empfindliche Flüssigkeiten wie Blut schonend transportiert. Integrierte Arrays aus Elastomeraktoren können nach Abb. 8 als peristaltische Pumpen angeordnet werden [8]. Auf Grund der hohen Nachgiebigkeit von Silikon kann die kontinuierliche Bewegung der Pumpenwand gut nachgebildet werden.

Ausblick

Obwohl das Forschungsgebiet der elektroaktiven Polymere (EAP) erst seit zehn Jahren bearbeitet wird, sind bereits beachtliche Ergebnisse vorgestellt worden. Künftig werden auch sensorische Funktionen in die Aktorstrukturen implementiert werden. Wurde bisher noch mit kommerziell verfügbaren Materialien gearbeitet, bedarf es in Zukunft einer gezielten Materialforschung und Prozesstechnologieentwicklung, um insbesondere dauerhaft flexible Elektroden zu gewährleisten und damit eine reproduzierbare Fertigungstechnologie für die industrielle Umsetzung zur Verfügung zu stellen.

Abb. 7
 links: Matrixanordnung für ein taktiles Display;
 rechts: realisiertes Array
 a) aus b) an
 left: Matrix configuration for a tactile display;
 right: realised array
 a) off b) on



Institut für Elektromechanische Konstruktionen an der TU Darmstadt

Innovationen entstehen heute durch Kombinationen unterschiedlicher Technologien. Mikroelektronik, Mechanik, Optik und Software wirken zusammen, wenn technische Systeme unserer Zeit Wirklichkeit werden. Am Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK) im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik arbeiten wir in Forschung und Lehre auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik, d.h. an Entwurf und Realisierung von Systemen, Komponenten und Bauelementen der Mikro- und Feinwerktechnik. Die interdisziplinäre Arbeitsweise in den Gebieten Mechanik, Elektronik und Optik führt zu innovativen Lösungen in den Anwendungsgebieten Aktorik, Messtechnik, Sensorik und optischen Systemen.

Die am Institut bearbeiteten Forschungsthemen umfassen unter anderem:

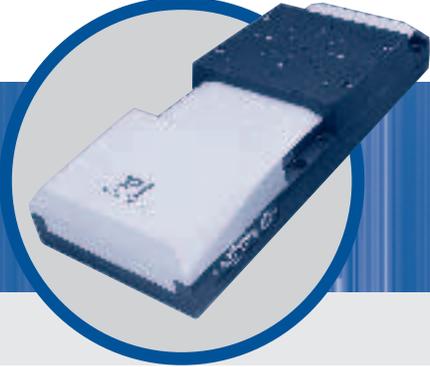
- Medizinische Geräteentwicklung
- Aktive Mensch-Maschine-Schnittstellen
- Miniaturisierte Positioniersysteme
- Mikroaktoren
- Piezoelektrische Antriebe
- Elektroaktive Polymere (EAP)
- Mikrofluidik
- Sensoren mechanischer Größen

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
 Fachbereich 18 - Elektrotechnik und
 Informationstechnik
 Institut für Elektromechanische Konstruktionen
 Merckstr. 25
 64283 Darmstadt
 E-Mail: schlaak@emk.tu-darmstadt.de
www.institut-emk.de

Literatur

- [1] Y. Bar-Cohen (Hrsg.): Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential and challenges. SPIE Press, Bellingham, 2001
- [2] R. Pelrine, R. Kornbluh, J. Joseph, R. Heydt, Q. Pei, S. Chiba: "High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators", Materials Science and Engineering, C11, Elsevier Science, pp. 89-100, 2000
- [3] H. F. Schlaak, M. Jungmann, M. Matysek, P. Lotz: Novel Multilayer Electrostatic Solid-State Actuators with Elastic Dielectric (invited). Proc. SPIE, Int. Symp. Smart Structures and Materials 5759, 2005, 121-131
- [4] Y. Bar-Cohen: "Electric Flex", IEEE Spectrum, NA, 41 (2004), 6, 28-33
- [5] R. Kornbluh, R. Pelrine, H. Prahlaad, R. Heydt: "Electroactive polymers: An emerging technology for MEMS", Proc. SPIE, Int. Symp. Smart Structures and Materials, 2004
- [6] R. Heydt, S. Chhokar: Refreshable Braille Display Based on Electroactive Polymers. Int. Display Res. Conf. IDRC 03, SID Soc. Information Display, 2003, P7.5
- [7] M. Matysek; P. Lotz; H. F. Schlaak: "Braille Display with Dielectric Polymer Actuator", ACTUATOR 2006, 10th International Conference on New Actuators, 14-16 June 2006, Bremen, Conference Proceedings
- [8] P. Lotz; M. Matysek; H. F. Schlaak: "Integrated Sensor-Actuator-System Based on Dielectric Polymer Actuators for Peristaltic Pumps", ACTUATOR 2006, 10th International Conference on New Actuators, 14-16 June 2006, Bremen, Conference Proceedings



Piezo · Nano · Positioning **PI**

Kombinierte Motor-/Piezo-Positioniersysteme
Hybride: Nano-Präzision
auf langen Strecken

■ Neuartig
■ Nanometergenau
■ Bis 100 mm Hub

www.pi.ws/hybt

Wir öffnen Nanowelten | www.pi.ws

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG · Tel. 0721 4846-0



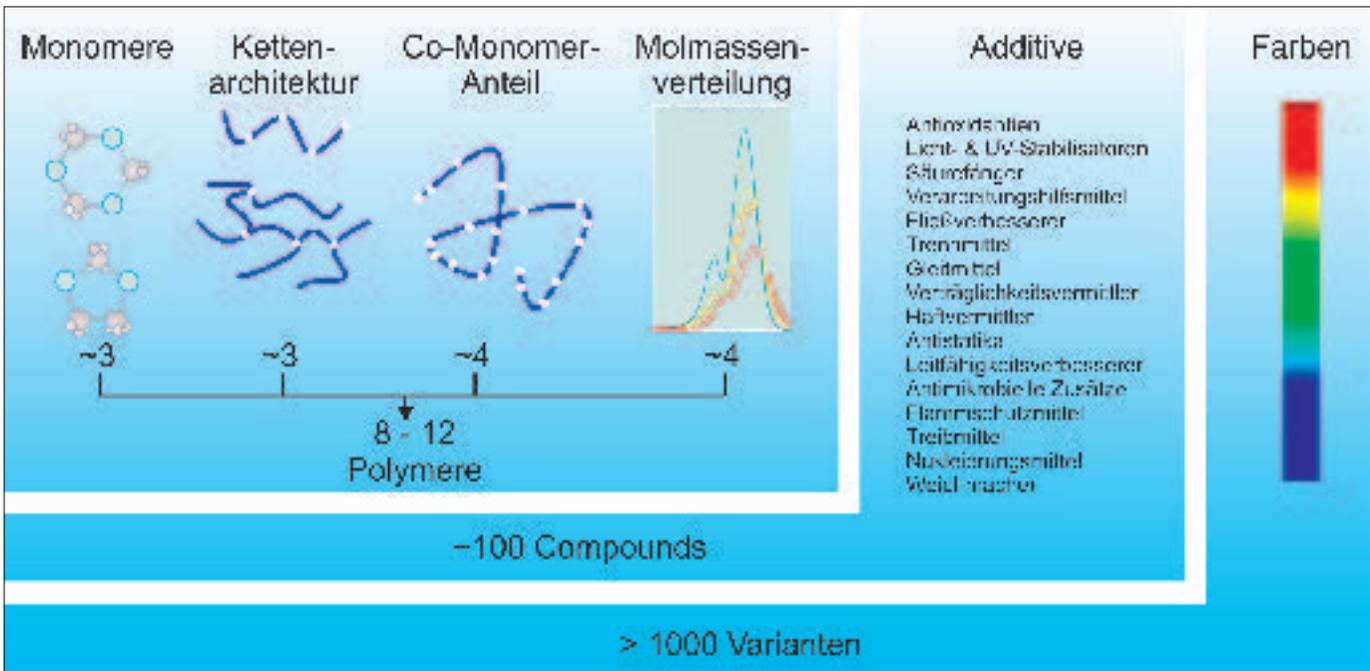
Quelle: Clariant

Smarte Kunststoffe und neue Entwicklungsmethoden

Martin Moneke, Marta Lucka-Gabor, Sergül Acikalin Gülmüs, Shilpa Khare

Kunststoffe bieten wegen der Vielfalt an polymeren Grundstoffen, Additiven und Verstärkungsstoffen die ideale Plattform zur Erzeugung von genau auf die jeweilige Anwendung abgestimmten Anwendungsprofilen, wie z. B. Formgedächtniscompounds für chirurgische Nahtmaterialien oder antimikrobielle Nanocomposites. Um die Vielfalt an Möglichkeiten effizienter für neue Materialien zugänglich zu machen, etabliert sich das kombinatorische Compounding als Erfolg versprechende Methode bei der Entwicklung neuer Kunststoff-Werkstoffe.

Smart Plastics and new development methods Due to the variety of polymers, additives and reinforcements, plastics provide the ideal platform for the generation of property profiles which are precisely fitting specific applications, e. g. shape memory compounds for surgical threads or antimicrobial nanocomposites. To make this huge portfolio more efficiently accessible for new materials to emerge, combinatorial compounding establishes itself as a promising method for the development of new plastic materials.



Produkte aus Kunststoffen umgeben uns im täglichen Leben, das ohne diese Materialien nicht mehr denkbar wäre. Die Ausgangspolymere für die technisch relevanten Kunststoffe sind spätestens seit 1970 bekannt, danach gelangten nur noch die flüssigkristallinen Polymere (LCP, ca. 1980) und die zyklischen Polyolefine (ca. 1997) zu einer größeren Bedeutung. Die Forschung von Polymerchemikern konzentriert sich daher heute auf die funktionalen Polymere, die z. B. durch die Erfolge der Firma Merck bei der Herstellung von organischen Leuchtdioden ins allgemeine Bewusstsein gedrungen sind. Während bei funktionalen Polymeren die Molekülstruktur variiert wird, um makroskopische Eigenschaften zu ändern, werden die Eigenschaftsprofile der uns massenhaft umgebenden Kunststoffe durch Mischen von ungefähr zwölf Basis-Polymeren mit Additiven, Füll- und Verstärkungsstoffen eingestellt. Dies geschieht für die mengenmäßig größte Gruppe der Thermoplaste in einem Compoundierprozess mit so genannten Extrudern – Schneckenmaschinen, die eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Fleischwolf haben. Smart, also „klug“ und „geschickt“, werden Kunststoffe dadurch, dass ihr Eigenschaftsprofil durch eine geeignete Wahl der Additive, Füll- und Verstärkungsstoffe genau an die Anwendung angepasst wird (Abb. 1).

Bakterien tötende Kunststoffe

In Krankenhäusern finden viele Kunststoffprodukte wie z. B. Spritzen, Schläuche und Schalen ihren Einsatz und müssen – wenn es nicht Einmalartikel sind – sterilisierbar sein, um die Übertragung von Krankheiten auszuschließen. Aber auch z. B. die allgegenwärtigen Computer können Bakterien Raum zum Überleben geben. Tastaturen lassen sich allerdings nicht mit Heißdampf oder Flüssigkeiten sterilisieren. Eine intelligente Lösung bieten in dieser Situation Kunststoffe, die Bakterien abtöten. Neben kommerziellen Produkten kann hier auch ein Additiv, das zusammen mit Kollegen der Universität des Saarlandes [1] entwickelt wurde, zum Einsatz kommen. Das für seine

antimikrobielle Wirkung seit dem Altertum bekannte Silber kann in Form metallischer Partikel in beliebige Kunststoffe eincompoundiert werden. An der Oberfläche der Partikel werden Silberionen freigesetzt, die durch die Kunststoffmatrix zur Oberfläche des Bauteils wandern und dort an verschiedenen Stellen in die Abläufe in Bakterienzellen eingreifen. Sowohl die Zellmembran wie auch das Bakterienchromosom werden angegriffen. Um die eincompoundierte Menge metallischen Silbers reduzieren zu können, muss die Freisetzungsrate von Ionen möglichst groß sein. Dazu kann die spezifische Oberfläche der Kugeln erhöht, d. h. ihr Durchmesser bis hin zu wenigen Nanometern verkleinert werden. Wegen der elektrostatischen Anziehung zwischen nanoskaligen Metallpartikeln tendieren diese allerdings besonders stark zur Agglomeration. Hier bedarf es einer geeigneten Stabilisierung der Partikel und einer geeigneten Compoundiertechnologie, um die Agglomeration zu unterdrücken und damit die spezifische Oberfläche zu maximieren. In dem Kooperationsprojekt mit der Universität des Saarlandes wurden Silberpartikel mit

Abb. 1 Alleine für Polyoxymethylen (POM), das für Zahnräder und andere hochwertige technische Produkte eingesetzt wird, gibt es mehr als tausend Varianten (Quelle: Ticona).

Only for polyoxymethylene (POM), which is used for gear wheels and other high-quality technical applications, there are more than a thousand variants (source: Ticona).

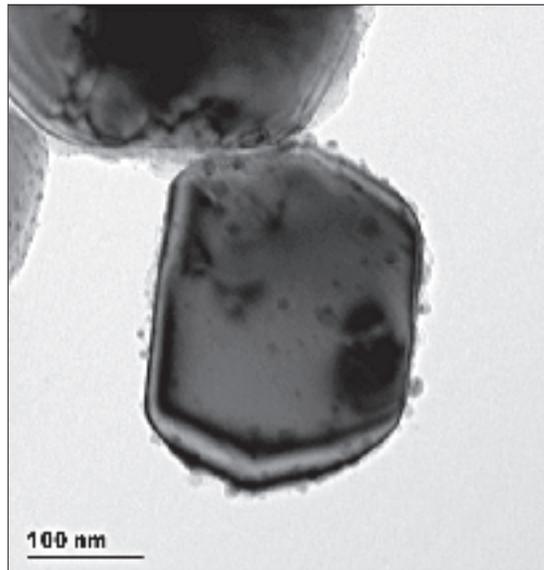
Mikroorganismen	Antimikrobielle Wirkung
Escherichia coli (b)	+
Klebsiella planticola (b)	-
Corynebacterium glutamicum (b)	+
Staphylococcus carnosus (b)	+
Bacillus megaterium (b)	+
Yarrowia lipolytica (h)	-
Schizosaccharomyces pombe (h)	+
Saccharomyces cerevisiae (h)	-

Tab. 1 Antimikrobielle Wirkung bei einer Ag-Konzentration von 0,02 Gew.%; (b) = Bakterium, (h) = Hefepilz (Quelle: Dr. Bureik, Uni Saarbrücken/DKI).

Antimicrobial effect on bacteria (b) and yeasts (h) achieved by a silver concentration of 0.02 weight % (source: Dr. Bureik, Uni Saarbrücken/DKI).

Abb. 2
TEM-Aufnahme von TiO_2 -Partikeln, auf denen die antimikrobiell wirksamen Silber-Partikel fixiert sind
(Quelle: Prof. Hempelmann, Uni Saarbrücken/DKI).

TEM micrograph of TiO_2 particles with the antimicrobial active silver particles attached to them
(source: Prof. Hempelmann, Uni Saarbrücken/DKI).

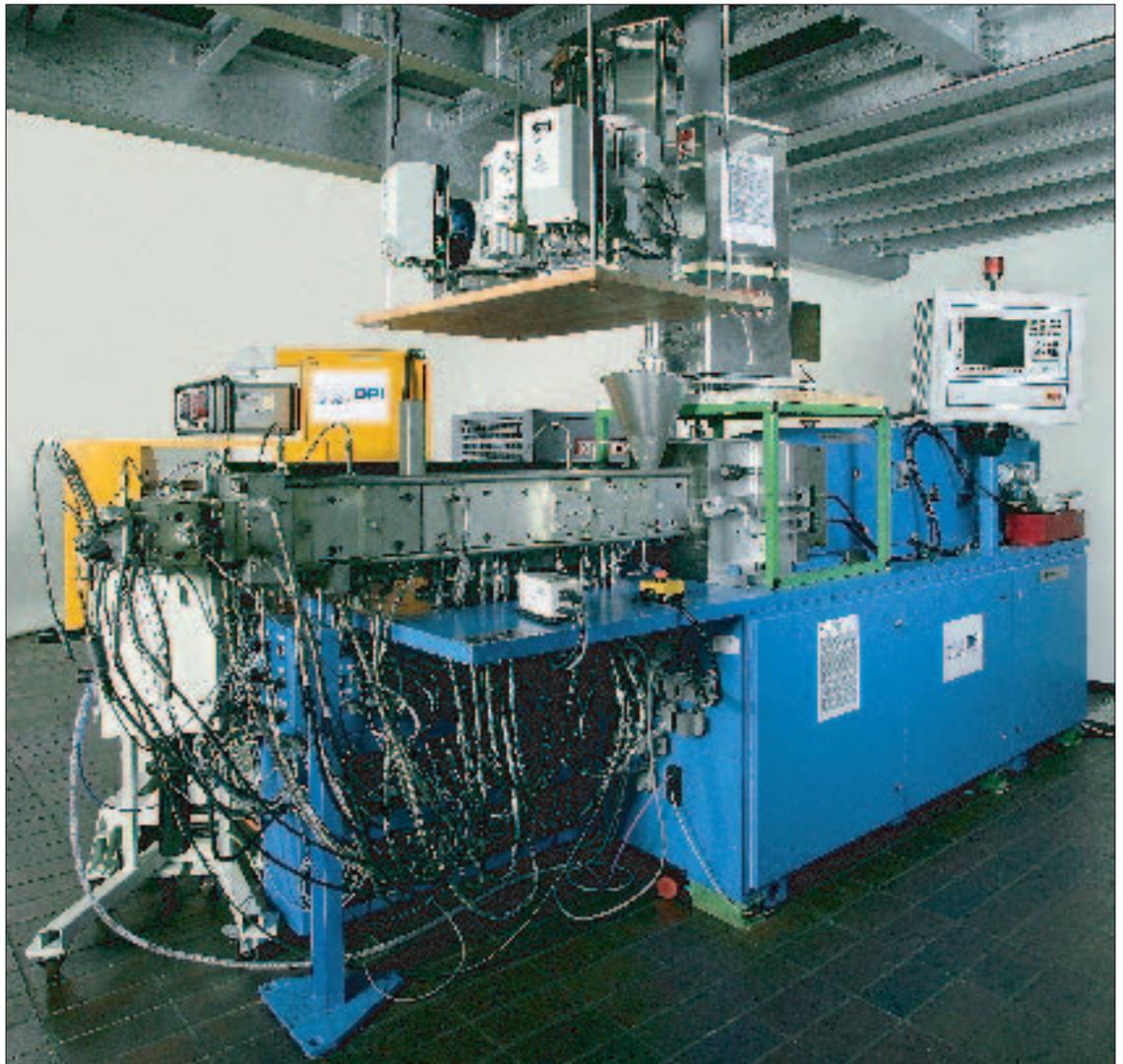


ca. 15 nm Durchmesser auf Titandioxid-Partikeln mit ca. 270 nm Durchmesser aufgebracht und fixiert (Abb. 2). Beim Compoundieren erwiesen sich Mischungen von Polymer- und Additiv-Pulver sowie Aufschmelzzonen mit einem hohen Energieeintrag als geeignet, um die Agglomeration zu minimieren. Wegen der aufgrund des geringen Durchmessers hohen Freisetzungsrates konnte die Silbermenge im Kunststoff auf 0,02 % (Massenanteile) begrenzt werden, also deutlich weniger als in kommerziellen Produkten. Diese Menge reichte aus, um das Bakterium *Escherichia coli* und andere Bakterien und Hefen sicher abzutöten [2] (Tab. 1).

Den Übergang von smarten zu intelligenten Kunststoffen, also zu Materialien, die auf einen Stimulus reagieren, ist bei Formgedächtnispolymeren gegeben. Dies sind meist Polymere aus verschiedenen Blöcken A und B, die bei unterschiedlichen Temperaturen Übergänge aufweisen, sodass unterhalb einer Temperatur T_1 beide Blöcke unbeweglich und oberhalb einer zweiten, höheren Temperatur T_2 beide Blöcke beweglich sind. Oberhalb T_2 können Urformvorgänge durchgeführt werden, die eine permanente Form hervorbringen. Unterhalb T_1 wird eine temporäre Form fixiert, die zwischen den beiden Temperaturen T_1 und T_2 in die permanente Form übergeht. Zum Auslösen der Verformung muss diesen Formgedächtnispolymeren Wärme zugeführt werden. Durch das

Abb. 3
Ein produktionsnaher Extruder für die Compoundierung ist einer der drei zentralen Bestandteile des Systems für das kombinatorische Compoundieren
(Quelle: DPI/DKI).

A production-size extruder for compounding is one of the three central components of the system for combinatorial compounding (source: DPI/DKI).



Wild Thing.

Wer hier mehr als eine Druckmaschine sieht, bringt genau die Leidenschaft mit,
die wir von unseren Bewerbern erwarten.



Der Rhythmus unserer Druckmaschinen ist Musik in unseren Ohren. Wenn Sie sich vorstellen können, als Ingenieur oder Wirtschaftswissenschaftler, gerne auch als Diplomand oder Praktikant, auf der Bühne des Weltmarktführers mitzuspielen, bewerben Sie sich über den Link Karriere auf www.heidelberg.com

HEIDELBERG

Ingenieurwissen in der Praxis...

Als mittelständischer ASiC-Hersteller am Standort Bodenheim in Rheinland-Pfalz entwickelt und fertigt iC-Haus hochintegrierte iCs, u. a. für die Industrie-, Automobil- und Medizintechnik.

Innovative Systemlösungen erfordern die kreative und qualifizierte Ingenieurleistung vom Systemansatz über die Schaltungsentwicklung mit Versuchsaufbau und Simulation, über das Layout in der Device- bzw. Blockebene bis hin zum Test von Wafern und assemblierten iCs. Technische Herausforderungen werden dabei im Team aufgegriffen.

Absolventen und Studenten der Fachrichtung Elektrotechnik setzen ihr Fachwissen um in Mixed-Mode-ICs und in Mikrosysteme mit integrierter Sensorik in Bipolar-, CMOS- und BCD-Technologien.

iC Haus
Integrated Circuits

www.ichaus.de

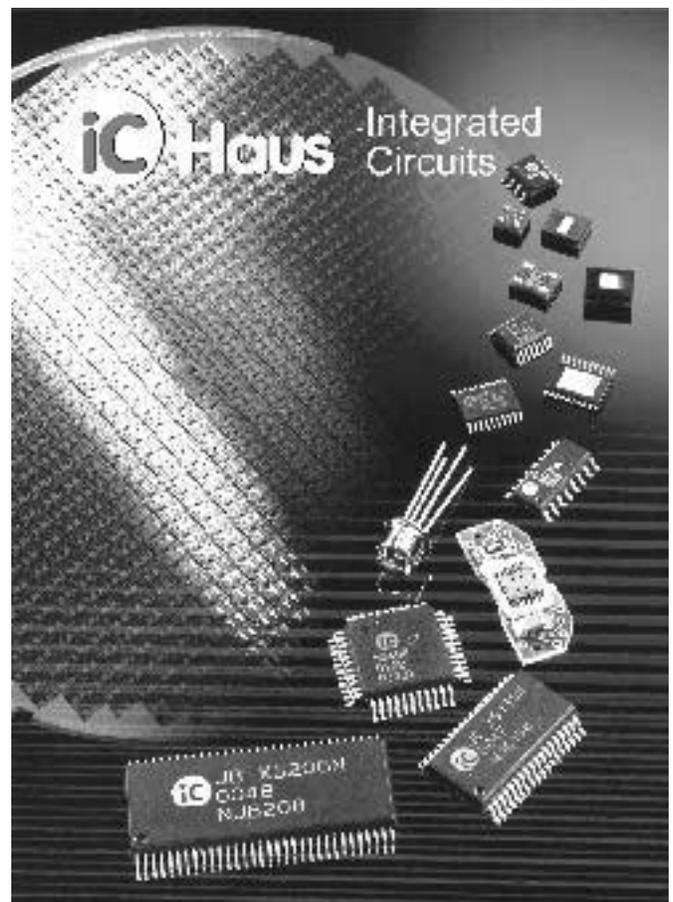
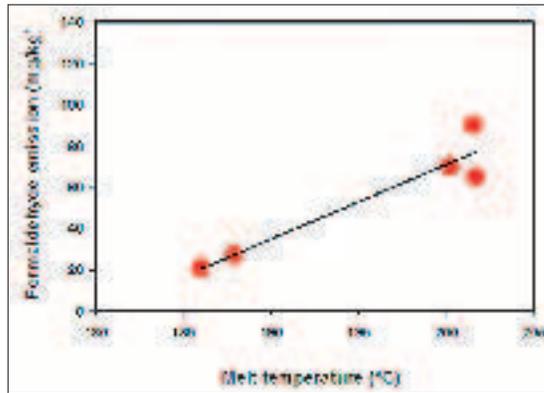


Abb. 4

Die Formaldehyd-Emission aufgrund des Abbaus von Polyoxymethylen (POM) hängt sehr stark von den Betriebsbedingungen wie zum Beispiel der Temperatur der Schmelze an der Düse ab, die durch Prozessparameter wie Durchsatz und Schneckendrehzahl beeinflusst werden. Prozessparameter können somit zu Materialparametern korreliert werden (Quelle: DKI).

The emission of formaldehyde due to the degradation of polyoxymethylene (POM) strongly depends on operating conditions such as the melt temperature at the die which are influenced by process parameters like the throughput and screw speed. Therefore, process parameters can be correlated to material parameters.



Eincompoundieren von ferromagnetischem Eisenoxid kann nun die Temperatur des Compounds berührungslos in einem magnetischen Wechselfeld erhöht werden [3]. Diese Art der Stimulierung ist besonders für chirurgisches Nahtmaterial interessant. Die konkrete Anwendung besteht darin, Knoten im Körperinneren nach dem Abschwellen der vernähten Wunde – z. B. bei Darmoperationen – festziehen zu können, ohne den Patienten erneut traumatisieren zu müssen.

Weitere Beispiele eher technischer Natur für perfekt an die Anwendung angepasste Kunststoffe kann jeder, der die Motorhaube eines modernen Fahrzeugs öffnet, selber finden, wenn er die Kunststoffartikel – z. B. Motorabdeckung und Ansaugstutzen – betrachtet, die direkt mit dem Motor in Berührung kommen. Erst Antioxidantien und weitere Additive stabilisieren die meist eingesetzten Polyamide so, dass sie bei Dauergebrauchstemperaturen von mittlerweile 150°C und im Kontakt mit Ölen, Säuren und salzhaltigem Wasser mindestens 10 Jahre und oft viel länger den rauen Bedingungen standhalten.

Kombinatorisches Compounding

Allen gebräuchlichen Kunststoffen ist gemein, dass sie an die Anwendung angepasst sind und dazu häufig etwa sieben verschiedene Additive, meistens noch Glasfasern zur Steigerung der mechanischen Steifigkeit und natürlich Farbstoffe enthalten. Die Auswahl an Additiven ist dabei immens groß, es gibt alleine mehr als 250 Antioxidantien. Hier stellt sich die Frage der am besten geeigneten Zusatzstoffe für eine Rezeptur. Da viele Zusatzstoffe teurer als das eingesetzte Polymer sind, gibt es ein wirtschaftliches Interesse, ihren Anteil im Kunststoff zu verringern und die Rezeptur hinsichtlich der Additivanteile zu optimieren. Zudem beeinflussen sich die Zuschlagstoffe zum Teil gegenseitig: das Weißpigment Titandioxid kann Glasfasern an der Oberfläche beschädigen und dadurch die mechanische Festigkeit des Kunststoffes herabsetzen, UV-Absorber wie Ruß oder Benzophenon werden zusammen mit Radikalfängern wie HALS (hindered amine light stabilizer) eingesetzt, weil sich beide in ihrer Wirkung verstärken. Bei der Suche nach der geeigneten Rezeptur und ihrer Optimierung muss also von nichtlinearen Wechselwirkungen ausgegangen werden. Dies sind Aufgabenstellungen, die in der Pharmazie schon seit wenigstens zehn Jahren mit Hilfe der Kombinatorik untersucht werden. Am DKI wird nun im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Dutch Polymer Institute in Eindhoven, Nieder-

lande, die Methodik der Kombinatorik [4] auf den Compoundierprozess [5, 6] übertragen, um smarte Kunststoffe noch schneller und effizienter entwickeln zu können. Da beim Compoundieren produktionsnah gearbeitet werden muss (Abb. 3), kann eine Parallelisierung, wie sonst in der Kombinatorik üblich, nicht stattfinden. Durch stete Variation der Anteile einer Rezeptur werden in einer direkt nach dem Compoundieren erzeugten Folie Gradienten der Zusammensetzung erzeugt. Mit Analyseverfahren zur Gewinnung mechanischer, chemischer und morphologischer Messgrößen werden für jede Zusammensetzung der Folie bei verschiedenen Betriebszuständen des Extruders Kennwerte und Maßzahlen ermittelt (Abb. 4). Mit statistischen Methoden werden dann Modelle erzeugt, die die Vorhersage von Materialeigenschaften aus der Rezepturzusammensetzung erlauben. So können neue Rezepturen gefunden und bekannte Inhaltstoffe in ihrer Zugabemenge optimiert werden.

Literatur

- [1] Prof. Dr. Rolf Hempelmann, Leiter der Professur für Physikalische Chemie, und Dr. Matthias Bureik, Professur für Biochemie, Universität des Saarlandes, 66041 Saarbrücken
- [2] N.N., Spritzgießteile mit bakterizider Wirkung durch nanoskalige Zusätze, Jahresbericht 2005, Deutsches Kunststoff-Institut, ISBN 1618-0062 Band 6 (2005), 100 – 107
- [3] R. Mohr, K. Kratz, T. Weigel, M. Lucka-Gabor, M. Moneke, A. Lendlein, Initiation of shape-memory effect by inductive heating of magnetic nanoparticles in thermoplastic polymers, PNAS, vol. 103, no. 10 (2006), 3540-3545
- [4] Adams, N., Schubert, U. S., Software Solutions for Combinatorial and High-Throughput Materials and Polymer Research, Macromol. Rapid Commun., vol. 25 (2004), 48-58
- [5] Adams, N., Moneke, M., Acikalin Guelmues, S., Chenouf, D., Rehahn, M., Schubert, U. S., Combinatorial Compounding, in Combinatorial Methods and Informatics in Materials Science, edited by Michael J. Fasaloka, Qi Wang, Radislav A. Potyrailo, Toyohiro Chikyow, Ulrich S. Schubert, Anatoli Korkin (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 894, Warrendale, PA, 2006), LL09-03
- [6] Moneke, M., A new way in compound development, Trends in Plastics 2-3 (2006), 19-20

Die Autoren

Dr.-Ing. Martin Moneke leitet am Deutschen Kunststoff-Institut (DKI) die Abteilung Technologie, in der Frau Dr.-Ing. Marta Lucka-Gabor, Frau Dr. Sergül Acikalin Gülmüs und Frau Dipl.-Ing. Shilpa Khare wissenschaftliche Mitarbeiterinnen sind. Forschungsgebiete der Abteilung sind das Compoundieren, die Prozess- und Bauteilsimulation sowie die Themen Verschleiß und Korrosion von Kunststoffen. Durch Compoundieren werden am DKI Kunststoffe mit innovativen Funktionen auf Basis meist kürzlich entwickelter Polymere und Zuschlagstoffe hergestellt, wobei dem Kunststofftechnik-Ingenieur die Aufgaben zufallen, zunächst den Compoundierprozess anzupassen und zu optimieren und anschließend die Werkstoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu charakterisieren. Zudem wird in der Abteilung das kombinatorische Compounding als deutlich schnellere Methode zur Rezepturgenerierung und -optimierung entwickelt.

Kontakt

Tel. 06151/16-2504

Ölwasserstoff- solargasmulti.

Multitaskingfähig ist für uns kein Fremdwort.
Für Sie auch nicht? deutschebp.de/karriere



beyond petroleum®

Garlef Steinborn

Schatzkammern der Natur

Naturschutzgebiete in Rheinhessen – Pfalz

Band 1: Eich-Gimbsheimer Altrhein und Wormser Ried

„Erfolgreiche Naturfotografie“

Die Natur ist voller einmaliger Schönheiten, in der Farbe wie in der Form. Die Natur ist aufregend, doch ebenso harmonisch. Die Natur steckt voller einmaliger Wunder, die es immer wieder aufs Neue zu entdecken gilt.

Sich mit der Natur zu beschäftigen ist aufbauend, erlebnisreich und abenteuerlich. Der Naturfotograf besitzt die Möglichkeit, die Schönheiten, die zahlreichen Wunder und die Erlebnisse, die die Natur bietet, im Bild festzuhalten.

Erschienen im VMK Verlag
ISBN: 3 - 9806997 - 3 - 0
Preis: € 28,50



Lufthansa
The Aviation Group



Be **Lufthansa**

Enter High Tech!

Top-Chancen für Studenten und
Absolventen der Fachrichtungen:

- Wirtschaftsingenieurwesen
- Maschinenbau
- Luft- und Raumfahrttechnik
- Elektrotechnik
- Wirtschaftswissenschaften
- (Wirtschafts-) Informatik

Wir bieten Ihnen im Rahmen unseres Talent-Relationship-Management-Programmes ein Praktikum in unterschiedlichen Fachbereichen und damit die Möglichkeit, sich für den beruflichen Einstieg fit zu machen. Dabei können Sie Ihr Wissen und Ihre Persönlichkeit sowohl in Projekte als auch ins Tagesgeschäft einbringen.

Außerdem suchen wir engagierte Ingenieurinnen und Ingenieure für verschiedene Positionen in unseren Geschäftsbereichen Flugzeugwartung, Flugzeugüberholung, Triebwerksüberholung, Geräteversorgung, VIP-Services und Vertrieb. In Ergänzung zu diesen interessanten und verantwortungsvollen Positionen bieten wir Ihnen ein attraktives Leistungspaket.

Sie sind interessiert und möchten gerne mehr erfahren?
Besuchen Sie die **Lufthansa Technik** im Internet.

Die **Lufthansa Technik Gruppe** ist der führende Anbieter luftfahrttechnischer Dienstleistungen. Über 20.000 Mitarbeiter/-innen stehen weltweit für Qualität und Zuverlässigkeit, für maßgeschneiderten Kundendienst und technische Kompetenz. Mehr als 500 Airlines und Aircraft Operators nutzen unsere Services. Unser Angebot umfasst neben der kompletten Wartung und Überholung der Triebwerke, Geräte und Flugzeuge auch deren Lackierung sowie Um- und Ausrüstung.

Bitte bewerben Sie sich online mit allen üblichen Details auf eine der veröffentlichten Praktikantenanzeigen oder unter zusätzlicher Angabe Ihrer Gehaltsvorstellung auf eines unserer aktuellen Stellenangebote bei

Lufthansa Technik AG

www.lufthansa-technik.com

Weitere interessante Jobangebote und
nähere Informationen finden Sie unter:

Be-Lufthansa.com

Das Karriereportal des Aviation Konzerns



Mehr aus weniger

Torsten Finnberg/Bernd-Joachim Jungnickel/Sergej Zhukov/Heinz von Seggern

Piezoelektrische Sensoren und Aktoren sind wichtige Bauteile in einer Vielzahl von Anwendungen von der Unterhaltungsindustrie bis zur Automobilindustrie. Im Fokus gegenwärtiger Forschungen ist eine neue Klasse piezoelektrischer Materialien auf Basis poröser Polymere, welche außergewöhnlich hohe quasistatische Piezokoeffizienten von bis zu 800 pC/N zeigen. Die inhärente Flexibilität und leichte Verarbeitbarkeit dieser Materialien eröffnet neue Anwendungsfelder. Die gegenwärtig zu geringe Ladungsstabilität in dem bislang verwendeten Polypropylen soll durch den Einsatz von expandiertem Polytetrafluorethylen in einer Sandwichkonfiguration überwunden werden.

***More from Less** Piezoelectric sensors and actuators are fundamental devices in applications in the entertainment to automotive industry. Current research is focused on a new class of piezoelectric materials based on porous polymers revealing an outstandingly large quasistatic piezoelectric coefficient of up to 800pC/N. The inherent flexibility and easy processability of such materials opens new fields of applications. The presently too poor charge stability of the polypropylene utilized so far shall be overcome by the use of expanded polytetrafluorethylene in a sandwich configuration.*

Piezoelektrizität ist ein wohlbekannter Effekt, welcher 1880 von Pierre Curie in einer Vielzahl von Materialien, wie Quarz, Turmalin oder Rochellesalz ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$) entdeckt wurde. Er fand, dass diese Materialien bei mechanischer Belastung eine elektrische Spannung erzeugen. Die Deformation des Kristalls führt zu einer Verschiebung von positiven und negativen Ionen in unterschiedliche Richtungen und damit zum Aufbau eines Dipolmomentes. Die resultierende makroskopische Polarisation P manifestiert sich in der beobachteten elektrischen Spannung. Die Stärke des Piezoeffektes ist gegeben durch das Verhältnis d zwischen Änderung der Polarisation ΔP und Änderung der mechanischen Spannung $\Delta\sigma$:

$$d = \frac{\Delta P}{\Delta\sigma}$$

Wie alle physikalischen Effekte hat auch dieser eine reziproke Erscheinung: Anlegen eines elektrischen Feldes E führt zu einer Deformation s des Materials. Auch diese beiden Größen sind linear miteinander verknüpft,

$$s = eE,$$

und für die Proportionalitätskonstante e gilt $e = d$: beide Effekte sind gleich stark.

Seit seiner Entdeckung wurde der Piezoeffekt in vielen weiteren anorganischen Materialien gefunden. Die bekanntesten Vertreter sind Bleizirkonattitanat (PZT) oder Bariumtitanat, welche Piezokoeffizienten von mehr als 500 pC/N aufweisen [1]. Sie haben Einsatz in einer breiten Palette von Anwendungen gefunden, von Zündsystemen in Motoren über nichtflüchtige Speicherchips bis hin zu hochpräzisen Aktoren in optischen Systemen.

Im Jahre 1969 entdeckten Kawai und Mitarbeiter einen starken Piezoeffekt in Polyvinylidenfluorid (PVDF) [2], wodurch die zur Verfügung stehende Bandbreite an Materialien in den Bereich der Kunststoffe erweitert wurde. Der Hauptvorteil von piezoelektrischen Kunststoffen ist, wie bei allen Kunststoffen, ihre Flexibilität und ihre leichte – auch großvolumige oder großflächige – Verarbeitbarkeit. Die Hauptanwendungen für PVDF sind flexible Spannungsmessstreifen sowie, auf Grund der guten Übertragung mechanischer Leistung an und von Wasser, Hydrophone.

In jüngerer Zeit wurde gezeigt, dass auch poröse Kunststoffe piezoelektrisch sein können [3]. Hier ist die Ursache des Piezoeffektes nicht die belastungsinduzierte Verschiebung von Ionen im Gitter. Es ist vielmehr die Versetzung von Ladungen an den Oberflächen der Poren, die ihrerseits der Verformung der Hohlräume folgt. Um einen piezoelektrischen Schaum zu erhalten, ist es daher zunächst erforderlich, innerhalb des Materials Ladungen zu generieren und an den Porenoberflächen einzulagern. Hierzu wird eine elektrische Spannung an das Material angelegt. Ist diese Spannung hoch genug, üblicherweise in der Größenordnung von einigen tausend Volt, wird die Luft in den Poren ionisiert. Dieser Effekt ist als Paschendurchbruch bekannt [4]. Die erzeugten negativen und positiven Ladungen werden durch das elektrische Feld getrennt und an den gegenüberliegenden Oberflächen der Poren eingefangen. Die Poren bilden so „virtuelle“ elektrische Dipole, und

das Material als ganzes ist polarisiert. Der Vorgang als solcher wird als Polung bezeichnet. Anlegen einer mechanischen Spannung führt zu einer Deformation des Materials, insbesondere der Hohlräume. Dies ruft eine Änderung im räumlichen Abstand der Ladungen hervor und bewirkt so eine Änderung der Polarisierung.

Das erste kommerziell erhältliche, auf diesem Funktionsprinzip beruhende piezoelektrische Material war poröses Polypropylen (PP). In Abb. 1a ist der Querschnitt durch einen Film aus diesem Material zu sehen. Es sind große, geschlossene Poren zu erkennen, die sich in Filmrichtung bis zu 100 μm ausdehnen und eine Höhe von ca. 10 μm aufweisen. An solchen Filmen wurden Piezokoeffizienten von mehr als 300 pC/N nachgewiesen [3,5-6]. Für viele Anwendungen ist jedoch die thermische Stabilität der Ladungen in den Poren nicht ausreichend. Wird das Material längere Zeit Temperaturen oberhalb von 70°C ausgesetzt, wandern die Ladungen weg und der Piezoeffekt nimmt stark irreversibel ab. Der Einsatz dieses Materials ist also auf entsprechend niedrige Temperaturen beschränkt. Zur Überwindung dieser Einschränkung wird ein Material mit einer deutlich besseren zeitlichen und thermischen Ladungsstabilität benötigt. Ein Erfolg versprechender Kandidat in dieser Hinsicht ist Polytetrafluorethylen (PTFE), welches Ladungen auch bei hohen Temperaturen auszeichnet speichert [7,8]. Darüber hinaus ist PTFE bekannt für seine exzellente thermische Stabilität. Leider verfügt poröses, „expandiertes“ PTFE (ePTFE), wie aus Abb. 1b ersichtlich, nicht über geschlossene Poren wie poröses PP. Im Film generierte Ladungen können daher nach dem Paschendurchbruch aus dem Material heraus diffundieren. Dies begrenzt den Piezokoeffizienten drastisch auf 20 bis 40 pC/N. Um das Abfließen der Ladungen zu vermeiden, muss der Film zwischen zwei solide, elektrisch blockierende Schichten eingeschlossen werden. Es konnte in der Tat nachgewiesen werden, dass solche Mehrschichtsysteme nach geeigneter Polarisierung einen außergewöhnlichen Piezoeffekt aufweisen. Statische Piezokoeffizienten von mehr als 800 pC/N wurden erzielt. Dieser Wert übersteigt sogar den für PZT.

Um in solchen Mehrschichtsystemen die geforderte thermische Stabilität zu erreichen, muss die Polung bei erhöhten Temperaturen durchgeführt werden [10]. Dies führt zu einer stärkeren Besetzung derjenigen Ladungsspeicherplätze, für deren Leerung viel Energie aufgewendet werden muss und deren Besetzung daher thermisch hoch stabil ist. Eine solche Präparationsweise wäre bei porösem PP erfolglos, da derartige Speicherplätze dort nicht vorhanden sind.

Abb. 2 zeigt den Einfluss der Polungstemperatur auf die thermische Stabilität eines piezoelektrischen Mehrschichtsystems aus einem ePTFE-Film (Good-Fellow Ltd Cambridge, England: Dicke 63 μm , nominelle Porosität 91%, Porengröße 1 μm), eingepackt zwischen zwei Filme aus Perfluor-Ethylen-Propylen-Copolymer (FEP) (Sheldahl Company, USA: Dicke 12,5 μm). Die Polung wurde bei Raumtemperatur und bei +125°C in einer so genannten Koronaapparatur durchgeführt [10]. Die Proben wurden dann für jeweils eine Stunde bei einer Temperatur von 80°C gelagert. Wie ersichtlich, verminderte sich dabei der Piezokoeffizient der bei Raumtemperatur gepolten

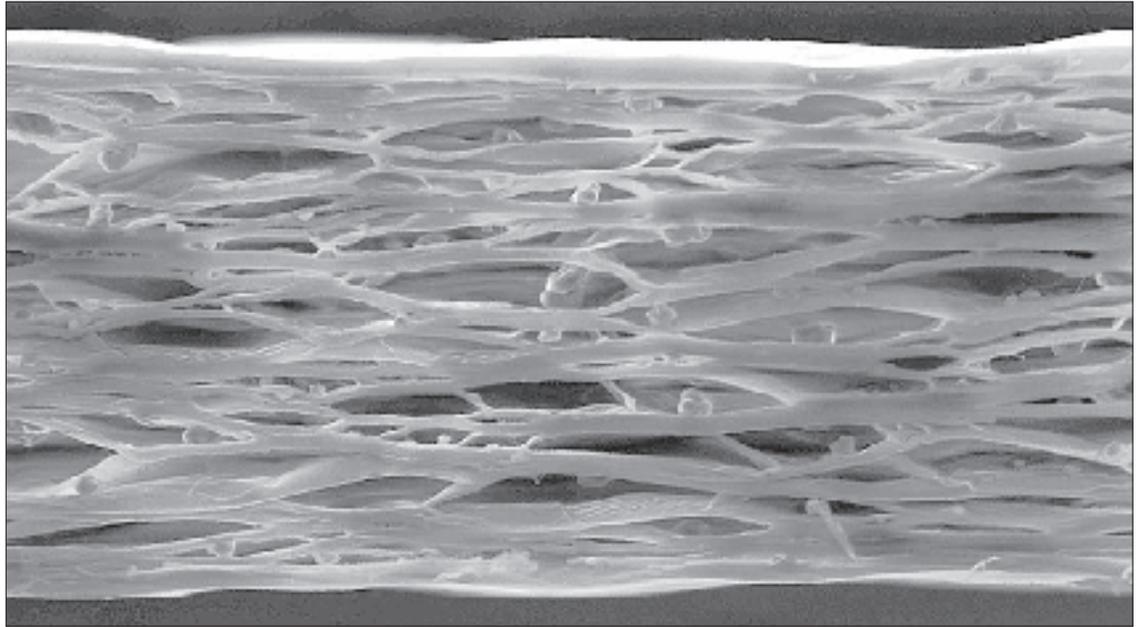


Abb. 1a (oben)
Rasterelektronenmikroskopischer Querschnitt durch einen Film aus expandiertem Polypropylen.
Cross section of a film of expanded polypropylene by scanning electron microscopy.

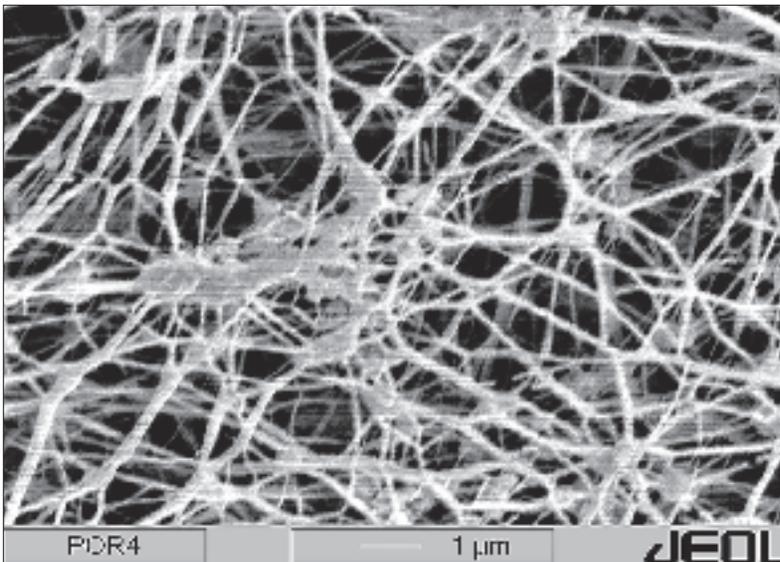


Abb. 1b (links)
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche eines Filmes aus expandiertem Polytetrafluorethylen.
Surface of a film of expanded polytetrafluorethylene by scanning electron microscopy.

Probe auf 20% des Ausgangswertes. Dieser Abfall ist vergleichbar mit dem von porösem PP, wie aus der gleichen Abbildung ersichtlich ist. Die bei +125°C gepolte Probe behält jedoch 95% ihres anfänglichen Piezokoeffizienten.

Zahlreiche fundamentale Aspekte der Physik solcher Materialien warten noch auf eine Antwort. Die gegenwärtig untersuchten Mehrschichtsysteme können nur als Modellsysteme angesehen werden. An diesen können der Aufladungsprozess, die Stabilität der Ladungen und der Polarisierung zusammen mit der piezoelektrischen Antwort untersucht werden. Auch kann man das Verhalten von Mehrschichtsystemen mit verschiedener Größe der Poren und unterschiedlicher Dicke der ePTFE-Schicht untersuchen. Durch solche Forschung sollte es schließlich möglich sein, die piezoelektrischen Eigenschaften dieser viel versprechenden Materialien zu optimieren.

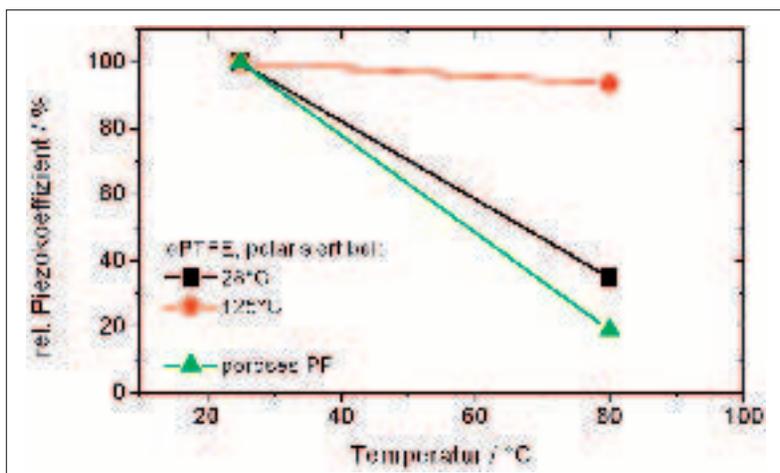


Abb. 2
Vergleich der thermischen Stabilität des Piezoeffekts für expandiertes Polypropylen und Polytetrafluorethylen.
Comparison of the thermal stability of the piezoeffect of expanded polypropylene and polytetrafluorethylene.

Literatur

1. R. N. Torah et al., J. Phys D, 37, 1, (2004).
2. H. Kawai, Jpn. J. Appl. Phys. 8, 975, (1969).
3. R. Gerhard-Mulhaupt, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 9, 850 (2002).
5. G. M. Sessler and J. Hillenbrand, Appl. Phys. Lett. 75, 3405 (1999).
6. J. Peltonen, M. Paajanen, and J. Leikkala, J. Appl. Phys. 88, 4787 (2000).
7. Z. Xia, R. Gerhard-Mulhaupt, W. Künstler, A. Wedel and R. Danz, J. Phys. D: Appl. Phys. 32, L83 (1999).
8. H. von Seggern, J. Appl. Phys. 50, 7039 (1979)
9. Z. Hu and H. von Seggern, J. Appl. Phys. 98, 014108 (2005).
10. Z. Hu and H. von Seggern, J. Appl. Phys. 99, 024102 (2006).

Die Abteilung Physik am Deutschen Kunststoffinstitut

Die Forschung in der Abteilung Physik mit zur Zeit neun wissenschaftlichen Mitarbeitern konzentriert sich auf die Schwerpunkte:

- Struktur-Eigenschaftsbeziehungen von Polymeren
- Untersuchung der Kristallisation und des Glasübergangs
- Entwicklung von Mess- und Prüfmethoden für die Prozesskontrolle
- Elektroaktive Polymere

Auf dem Gebiet der elektroaktiven Polymere werden derzeit piezoelektrische Schäume und elektrostriktive Elastomere für den Einsatz in elektromechanischen Wandlern untersucht. Besonderes Augenmerk liegt auf der Erhöhung der thermischen Stabilität des Piezoeffektes und der Optimierung der Elektrostriktion durch den Einsatz von nanoskaligen Füllstoffen.

Arbeitsgruppenleiter:

PD Dr. Bernd-Joachim Jungnickel

Tel.: 06151/16-2405

E-Mail: BJungnickel@dki.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner:

Dr. Torsten Finnberg

Tel.: 06151/16-4004

E-Mail: tfinnberg@dki.tu-darmstadt.de

Anschrift: Deutsches Kunststoff-Institut • Abteilung Physik • Schlossgartenstraße 6, 64289 Darmstadt

Fachgebiet „Elektronische Materialeigenschaften“ an der TU Darmstadt

Die Forschungsschwerpunkte des Fachgebietes mit 12 wissenschaftlichen Mitarbeitern konzentriert sich auf drei Schwerpunkte:

- Elektronische und optoelektronische Eigenschaften von organischen Halbleitern
- Ladungstransport und Polarisation in Dielektrika
- Photo- und photostimulierte Lumineszenz in anorganischen Phosphoren

Auf dem Gebiet der Phosphore werden derzeit Szintillatoren und Speicherleuchtstoffe für die Röntgendiagnostik untersucht. Die Arbeiten spezialisieren sich auf die physikalischen Grundlagen der Lichterzeugung und des Speichermechanismus als auch die Aufklärung der involvierten Strahlungsdefekte.

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr. Heinz von Seggern • Tel.: 06151/16-6301

E-Mail: seggern@e-mat.tu-darmstadt.de

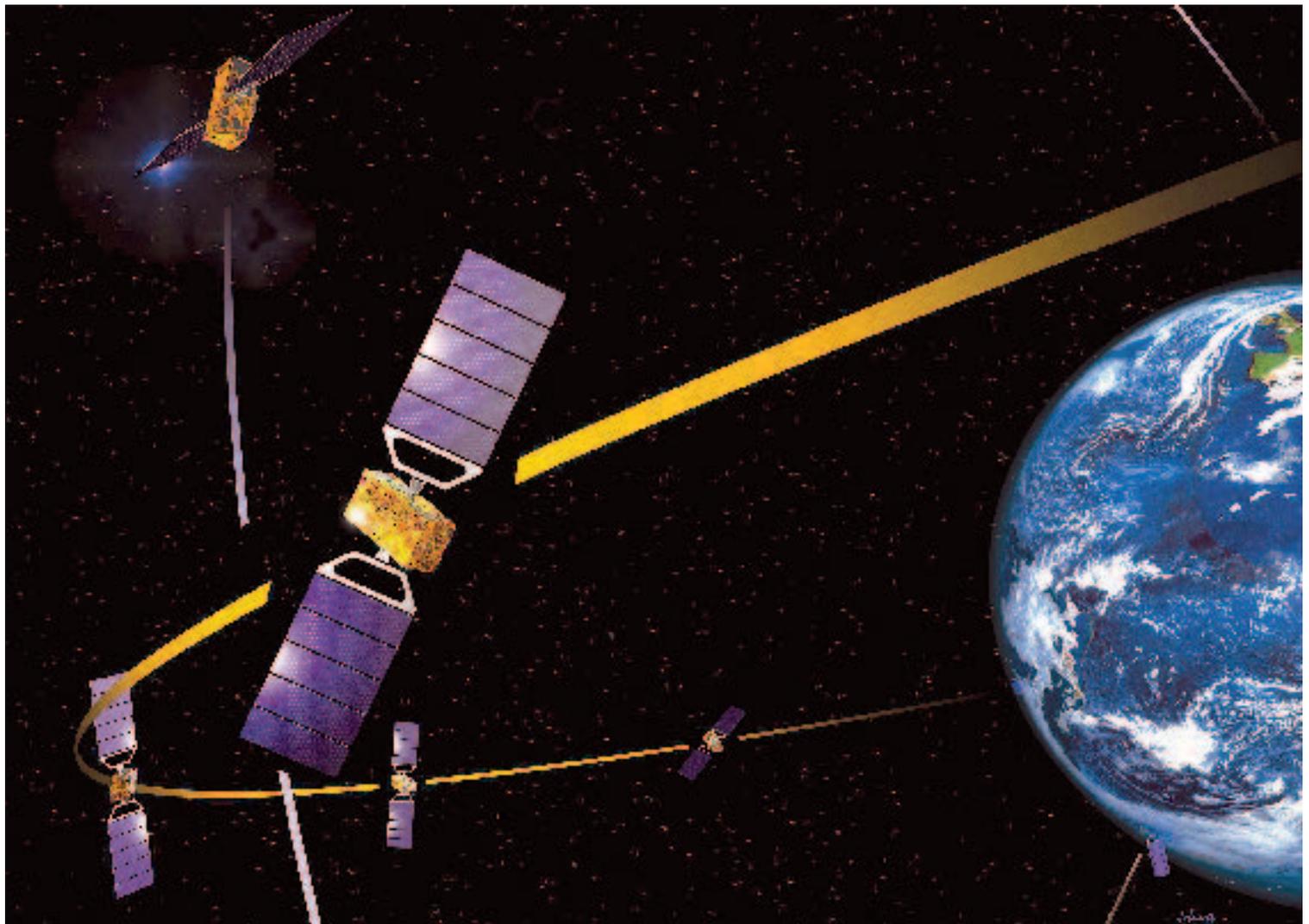
Ansprechpartner:

Dr. Jörg Zimmermann • Tel.: 06151/16-6250

E-Mail: zimmermann@e-mat.tu-darmstadt.de

Anschrift: TU Darmstadt Fachgebiet Elektronische Materialeigenschaften • Petersenstraße 23 64287 Darmstadt





Navigation mit Galileo – Neue Perspektiven für Verkehrsanwendungen

Matthias Becker/Stefan Leinen

Dreißig Galileo Satelliten in 24000 km Höhe werden ab 2010 die Positionsinformationen zur Überwachung und Lenkung der Verkehrsströme liefern.
Bild: ESA

The thirty-satellite Galileo constellation at 24000 km altitude will provide position information for monitoring and guidance of traffic streams from 2010 onwards.

Das europäische Satellitennavigationssystem Galileo ist die zivile Alternative zum militärischen Global Positioning System GPS der USA. Das auf Basis neuester Technologie zur wirtschaftlichen Nutzung optimierte System soll das Potential der Satellitennavigation voll ausnutzen. Es bietet neue Anwendungsfelder und neue Dienste, die über bisherige klassische Ortungs- und Navigationsanwendungen hinausgehen. Der Beitrag gibt eine Einführung zu Galileo und stellt die neuen Möglichkeiten für Verkehrsanwendungen dar.

Galileo system features and the new perspectives in its application to traffic and transportation The European Satellite Navigation System Galileo is the civil alternative to the US Global Positioning System GPS. It is based on newest technology and optimized for commercial use. New areas of application and services beyond classical positioning and navigation are feasible with its implementation. Here we summarize the Galileo system features and the new perspectives in its application to traffic and transportation.

Einführung

Im Verkehr der Zukunft werden die automatische Fahrzeugführung und die optimierte Steuerung von Verkehr und Verkehrsteilnehmern eine zunehmend wichtigere Rolle spielen. Szenarien wie z.B. die Erfassung von Verkehrsdichte und -fluss in Echtzeit, die automatische Flugzeuglandung auch ohne Sicht oder Schienenverkehrssysteme ohne Zugführer, werden zunehmend realistisch.

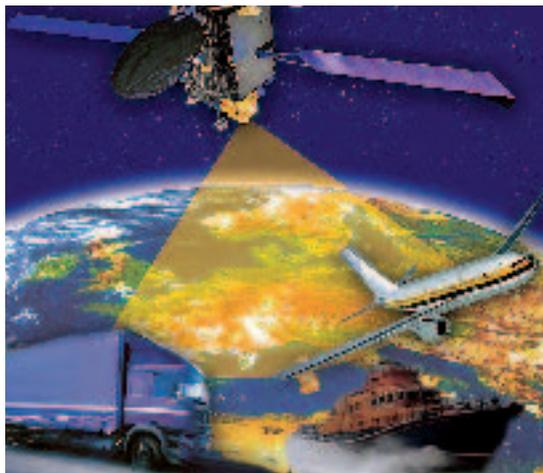
Für derartige Verkehrsanwendungen wird die Position und Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer benötigt. Die Schlüsseltechnologie hierfür ist die Satellitennavigation, d.h. die Nutzung von Globalen Navigations satellitensystemen (GNSS). Derzeit existieren zwei GNSS: während das US-amerikanische Global Positioning System (GPS) bereits 1993 volle Operabilität erreichte und heute eine Monopolstellung inne hat, durchläuft das russische GLONASS-System eine Rehabilitationsphase und wird kaum von zivilen Nutzern verwendet. Beide Systeme wurden für militärische Zwecke entwickelt und befinden sich entsprechend unter nationaler, militärischer Kontrolle.

Um von militärisch kontrollierten GNSS unabhängig zu werden und die europäische Industrie zu fördern, hat die Europäische Union gemeinsam mit der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) das Galileo-Programm zum Aufbau eines europäischen zivilen GNSS angestoßen. Derzeit befindet sich Galileo in der Entwicklungsphase, die volle Funktionsfähigkeit ist nach heutigem Stand für Ende 2010 zu erwarten.

Das Galileo-Dienstekonzept

Durch die Konzentration auf die Bedürfnisse der unterschiedlichen zivilen Nutzergruppen und dem daraus entwickelten Dienstekonzept bietet Galileo gegenüber GPS und Glonass verbesserte Leistungsparameter. Galileo wird für die Nutzer fünf Dienste zur Verfügung stellen [1]:

- Offener Dienst (Open Service, OS): steht dem Nutzer kostenlos und unverschlüsselt zur Verfügung, ähnlich dem zivilen GPS Signal, jedoch mit höherer Genauigkeit und Verfügbarkeit.
- Sicherheitskritischer Dienst (Safety of Life Service, SoL): der um Integritätsinformation erweiterte Offene Dienst, er beinhaltet zudem eine Garantie für die Kontinuität des Dienstes.
- Kommerzieller Dienst (Commercial Service, CS): bietet höhere Leistung für professionelle Anwendungen. Eigenständige kommerzielle Dienstangebote



Das Galileo System wird durch Integritätsinformationen und garantierte Verfügbarkeit neue Anwendungsfelder bei allen Verkehrsträgern ermöglichen. Bild: ESA

The Galileo-System will allow new areas of application for all types of carriers by providing integrity information and a service guaranty.

ter können durch verschlüsselte Zusatzinformationen Mehrwertdienste anbieten.

- Öffentlich Regulierter Dienst (Public Regulated Service, PRS): ist verschlüsselt und besonders störresistent und steht nur für hoheitliche Aufgaben zur Verfügung.
- Such- und Rettungsdienst (Search & Rescue Service, SAR): Aufnahme und Weiterleitung von Notsignalen einschließlich Ortungsinformation zur Einleitung von Rettungsaktionen.

Für die Navigationsanwendungen ziviler Nutzer sind die drei erstgenannten Dienste von Interesse, ihre wesentlichen Merkmale sind in Tab. 1 zusammengefasst. Der Sicherheitskritische Dienst erweitert den Offenen Dienst um Integritätsinformation, und der Kommerzielle Dienst ermöglicht eine Genauigkeitssteigerung durch Signale auf einem dritten Frequenzband sowie eine Leistungssteigerung über Mehrwertdienste.

Perspektiven für Verkehrsanwendungen

Für Verkehrsanwendungen eröffnet Galileo neue Perspektiven je nach Wahl des Dienstes, da sich diese bezüglich der vier wichtigsten Leistungsparameter Genauigkeit, Verfügbarkeit, Integrität und Kontinuität untereinander und im Vergleich zu GPS unterscheiden. Hinsichtlich Genauigkeit und Verfügbarkeit sind von Galileo geringfügige Verbesserungen gegenüber GPS zu erwarten, sie resultieren im Wesentlichen aus der gewählten Satellitenkonstellation und den technischen Spezifikationen der Nutzersignale (höhere Sendeleistung, störresistentere Codes, Anzahl der Signale). Die wesentliche Leistungssteigerung in die-

Tab. 1

	Offener Dienst	Sicherheitskritischer Dienst	Kommerzieller Dienst
Frequenzbereiche	E5a+E5b (1,17-1,20 GHz) und L1 (1,57 GHz)	Wie offener Dienst	Wie offener Dienst dazu E6 (1,28 GHz)
Integritätsdaten	nein	ja	Ja
Mehrwertdaten	nein	nein	Ja
Verschlüsselung	nein	nein	Ja, im E6-Band
Genauigkeit (95%) horizontal/vertikal	15m / 35m ⁽¹⁾ 4m / 8m ⁽²⁾	4m / 8m ⁽²⁾	4m / 8m ⁽²⁾ bis cm-Navigation (abh. von Mehrwertdiensten)

⁽¹⁾ für Einfrequenzempfänger, ⁽²⁾ für Zweifrequenzempfänger

sen beiden Parametern ergibt sich durch die Kombination, d.h. die gemeinsame Nutzung der beiden Systeme und eventuell sogar den Einbezug von GLO-NASS. Wegen der Vielzahl verfügbarer Satelliten wird die Navigation auch in vielen Situationen mit teilweiser Abschattung von GNSS-Signalen ermöglicht, in denen die Positionierung mit einem System alleine nicht gelingen würde.

Eine neue Perspektive für sicherheitskritische Verkehrsanwendungen wie Flugzeuglandung und Schienenverkehr bieten die systemseitig bereitgestellten Daten zur Integrität des Galileo-Systems im Sicherheitskritischen Dienst. Bei Ausfall oder Fehlfunktion einzelner Komponenten erhält der Nutzer entsprechende Warnhinweise mit einer Latenzzeit von sechs Sekunden, so dass auf diese Situation rechtzeitig in geeigneter Weise reagiert werden kann. Da der Systembetreiber für diese Funktion zudem eine Garantie übernimmt, ist die Kontinuität der Galileo-Nutzung für den Anwender gewährleistet.

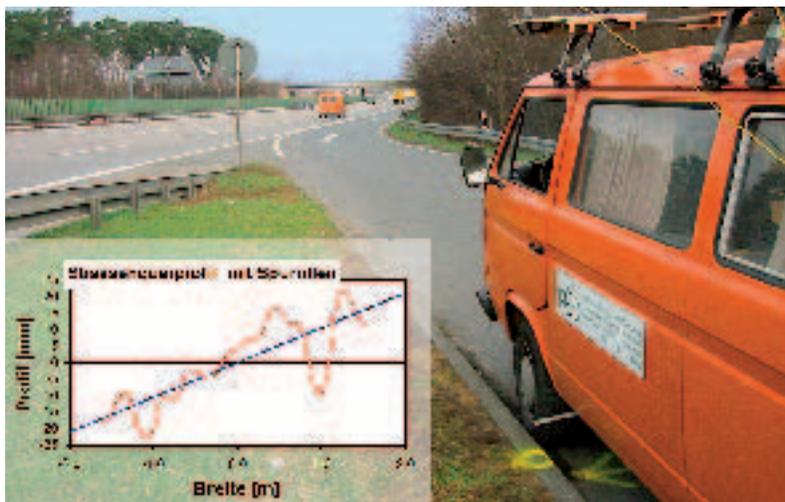
Durch den Kommerziellen Dienst sollen neue Anwendungen erschlossen und bestehende Anwendungen erweitert werden und dadurch technologische und wirtschaftliche Mehrwerte geschaffen werden. Je nach Ausgestaltung der einzelnen Mehrwertdienste durch die eigenständigen Dienstanbieter können die genannten Leistungsparameter gesteigert werden. Als Beispiele seien genannt:

- Die Genauigkeit kann durch Differentielle GNSS Dienste bis zur cm-genauen Navigation gesteigert werden (ein Beispiel ist der SAPOS Dienst der Landesvermessung [2]).
- Die Verfügbarkeit kann für Abschattungsbereiche wie z.B. Tunnel, Bahnhöfe, Parkhäuser durch Integration zusätzlicher Technologie wie Inertialsensoren, Pseudolites, Assisted GNSS verbessert werden.
- Die Integrität kann durch unabhängiges Monitoring der Galileo-Systemperformance erhöht werden.

Ein weiterer Treiber für die breitere Anwendung von GNSS ist die Mobilfunkkommunikation, d.h. die Integration von Kommunikations- und Navigationstechniken. Hier erschließt sich ein weites Anwendungsfeld von Güterverfolgung, Telematik, über Verwendung der Daten der einzelnen Autos in der Verkehrsdatenerfassung (Floating Car Data), bis hin zu den Fahrerassistenzsystemen mit auf aktuellen Umgebungsdaten beruhenden Empfehlungen für den Fahrer zu Geschwindigkeit und Verkehrssituation.

Das kinematische Messsystem HIGGINS mit Mehrantennen-GPS, Inertialmesssystem und Laserscanner im Einsatz zur Straßenvermessung.

The kinematic survey system HIGGINS which combines multi-antenna GPS, inertial survey system and laser-scanner is applied in a road survey mission.



Aktivitäten des Fachgebiets

Das Fachgebiet Astronomische Geodäsie und Satellitengeodäsie befasst sich mit der hochgenauen Anwendung der differentiellen Positionierungsdienste. Aktuelle Problemstellungen sind:

- Analyse der Satellitensignale und Entwicklung von Korrekturmodellen, z.B. für Mehrwegeeffekte, atmosphärische Effekte und Antennen.
- Entwicklung von Methoden und Algorithmen für die hochpräzise Echtzeitpositionsbestimmung mit Mehrfrequenzempfängern.
- GNSS/INS Integration, d.h. die Stützung von GNSS durch inertielle Messsysteme, die hochfrequent die Position und die Orientierung im Raum bestimmen können.
- Aufbau eines hybriden GNSS/INS-basierten kinematischen Messsystems zur mobilen Vermessung, mobilem Mapping und hochpräzisen Trajektorienbestimmung.
- Definition, Erhaltung und Nutzung von Globalen Referenzsystemen aus der Kombination von GNSS und anderen Raumverfahren als Voraussetzung für globale Koordinaten mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich.

Das in der Entwicklung befindliche kinematische Messsystem „HIGGINS“ ist ein Beispiel für eine GNSS-Applikation zur absoluten Georeferenzierung von Bestandsdaten und einer hochpräzisen Anwendung im Verkehrsbereich. Es integriert ein Mehrantennen GPS Modul zur Positionierung und Orientierung, ein Inertial-Messsystem zur hochfrequenten Interpolation zwischen den GPS Epochen und einen Laserscanner zur fächerhaften Messung von Straßenprofilen mit einer Auflösung von 5 mm. Durch die zukünftige Integration von Galileo-Empfängern lassen sich höhere Genauigkeiten erreichen und weitere Einsatzgebiete in abgeschatteten Gebieten, z.B. innerstädtisch und bei dichtem Bewuchs, erfassen.

Ausblick

Galileo eröffnet aufgrund verbesserter Leistungsparameter neue Perspektiven für Verkehrsanwendungen. Hierzu besteht jedoch noch ein großer Bedarf an Forschung, sowohl bezüglich der Grundlagen als auch zur Anwendungsentwicklung. Das Fachgebiet Astronomische Geodäsie und Satellitengeodäsie der TU Darmstadt wird seine Aktivitäten zu Galileo in den kommenden Jahren noch intensivieren.

Neben Galileo ist auch auf die Modernisierung des GPS hinzuweisen, so dass der Nutzer in etwa fünf Jahren die Wahl zwischen zwei GNSS vergleichbarer Genauigkeit und Verfügbarkeit haben wird. Die durch den Betreiber garantierte Integrität und Kontinuität wird jedoch ein Alleinstellungsmerkmal von Galileo bleiben. Alternativ wird der Anwender Galileo und GPS auch in Kombination nutzen können. Eine Entscheidung wird wesentlich von den künftigen GNSS-Empfängertypen, ihren Marktpreisen, den Tarifen für den kommerziellen Dienst von Galileo sowie von den angebotenen Mehrwertdiensten abhängen.

Fachgebiet Astronomische Geodäsie und Satellitengeodäsie an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Astronomische Geodäsie und Satellitengeodäsie des Instituts für Physikalische Geodäsie ist im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der TU Darmstadt angesiedelt und wird seit Dezember 2004 von Prof. Matthias Becker geleitet. Die Forschung umfasst ein breites Spektrum an Aktivitäten in den Bereichen Physikalische Geodäsie, Satellitengeodäsie und Navigation. Dabei liegt seit nunmehr ca. 20 Jahren ein Schwerpunkt der Forschung in der Nutzung Globaler Navigations-Satelliten-Systeme (GNSS, zunächst GPS, dann GLONASS, nun auch Galileo) für hochpräzise geodätische und Navigationsanwendungen. Das Fachgebiet beteiligt sich daher auch am Forschungsschwerpunkt Integrierte Verkehrssysteme der TU Darmstadt (www.tu-darmstadt.de/verkehrsforschung).

Gegenwärtige Forschungsthemen sind:

Hochpräzise Echtzeitpositionsbestimmung mit GNSS: Entwicklung von Methoden und Algorithmen sowie Software mit Echtzeitfähigkeit.

Hochpräzise INS Positionierung: Einsatz von Inertialen Navigationssysteme (INS) zur Bestimmung von Position und Orientierung im Raum.

Hybrides GNSS/INS-basiertes Kinematisches

Messsystem: Realisierung eines hybriden Messsystems unter Ausnutzung der komplementären Eigenschaften der zuvor genannten Sensorarten.

Referenzsysteme: Etablierung, Erhaltung und Nutzung von Globalen Referenzsystemen aus der Kombination von GNSS und anderen Raumverfahren.

Geodynamik: Überwachung von Krustenbewegungen aus der Analyse von GNSS-Daten, zudem das Monitoring von aktiven GNSS-Referenzstationsnetzen.

Satellitenaltimetrie: Bestimmung von Topographie und Änderungen des Meeresspiegels auf Basis von Radardaten verschiedener Fernerkundungssatelliten.

Erdschwerefeld: Berechnung des Erdschwerefeldes aus Satelliten und terrestrischen Messungen und Untersuchungen zum globalen Massentransport.

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker
Institut für Physikalische Geodäsie
Petersenstr. 13 • D-64287 Darmstadt
Tel.: 06151/16-3109
E-Mail: becker@ipg.tu-darmstadt.de
www.tu-darmstadt.de/fb/bi/ipgd

Literatur

- [1] Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat - Derzeitiger Stand des Galileo-Programms (KOM(2002) 518 endg.), Amtsblatt Nr. C 248 vom 15/10/2002, S. 0002 - 0022, http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/documents/official_de.htm
- [2] Positionierungsdienst der Landesvermessung, <http://www.sapos.de/>

Exklusiv für Studenten: 5 Wochen Fakten für nur € 9,50.

FOCUS

FAKTEN. FAKTEN. FAKTEN.



IHRE GARANTIERTEN VORTEILE:

- ✓ 5 Wochen Fakten für nur € 9,50
- ✓ kostenlose Lieferung
- ✓ plus Amazon Gutscheine über € 10,- (1944)
- ✓ exklusiver Zugang zu einmaligen Services und Partner-Angeboten: www.focus.de/aboandmore

Über
34%
sparen!

Wichtiger Hinweis zum Geldsparen: Damit Sie vom Vorzugspreis für Studenten profitieren können, benötigen wir aus rechtlichen Gründen eine gültige Immatrikulationsbescheinigung. Bitte senden Sie uns diese per Fax an 0781 639 5851. Oder per Post: FOCUS Magazin Verlag GmbH, Postfach 2 90, 77649 Offenburg. Möchten Sie FOCUS nach dem Probe-Abo weiterlesen, brauchen Sie nichts zu tun und erhalten FOCUS für zunächst ein Jahr zum günstigen Studenten-Vorzugspreis von zzt. € 2,05 statt € 2,90 Normalpreis pro Ausgabe (Berechnung halbjährlich, zzt. € 53,30). FOCUS Magazin Verlag GmbH, Arabellastr. 23, 81925 München.

**Fakten für Studenten. Über 34 % sparen.
Geschenk sichern.** Aktionsnummer: 628541 M5

www.focus.de/studentenguenstig
FOCUS Line: 0800 453 2000
abo@focus.de

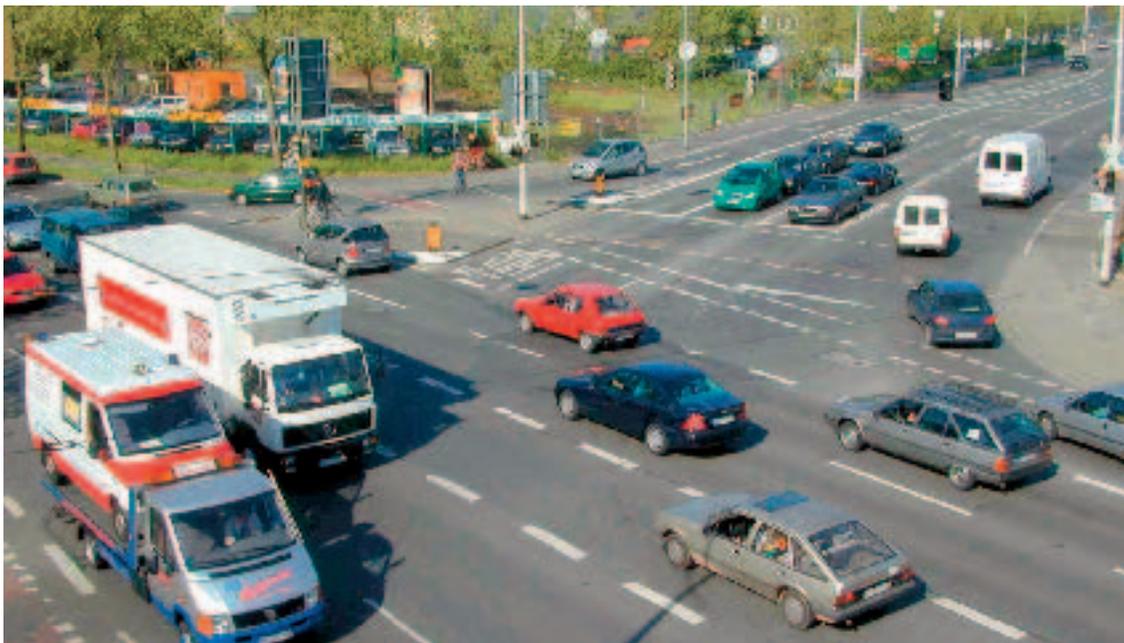
Bessere Lichtsignalanlagen mit System

Manfred Boltze/Achim Reusswig

Die Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen ist ein komplexer Prozess. Verkehrsnachfrage, Straßenraumgestaltung, Steuerungsverfahren, Anlagentechnik und Fachwissen sind nur einige der vielfältigen Einflussgrößen auf die Sicherheit und Flüssigkeit des Verkehrs. Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen ist ein systematischer Ansatz für eine regelmäßige Überprüfung und kontinuierliche Verbesserung der Lichtsignalsteuerung. Ein Leitfaden für die effiziente Anwendung in der Praxis liegt nun vor.

Towards Better Traffic Signal Control Traffic signal control is a complex process. Traffic load, road design, control algorithms, technical devices, and professional know-how stand for the variety of influencing factors on traffic safety and traffic flow. Quality management for traffic signals provides a systematic approach to regular evaluation and continual improvement of traffic quality. A guideline enables the road traffic authorities to efficiently focus on quality – towards better traffic signal control in a systematic manner.





Keine Schwächen zeigen: Wo der Verkehr kreuz und quer fließt, müssen Lichtsignalanlagen effizient und sicher funktionieren.
Foto: Kittler

Showing no weakness: At heavy-loaded intersections traffic lights must work efficiently and reliably.

Lichtsignalanlagen sind ein wichtiges Instrument der Verkehrsbeeinflussung. Sie tragen entscheidend dazu bei, hohe Verkehrsaufkommen an Knotenpunkten sicher und effektiv abzuwickeln. Funktionieren sie nicht optimal, können Unfälle, lange Wartezeiten, Staus sowie Lärm- und Schadstoffemissionen erhebliche volkswirtschaftliche Verluste verursachen.

Die Verkehrssteuerung mit Lichtsignalanlagen ist ein komplexer Prozess, der unter dem Einfluss von planerischen Vorgaben, Verkehrsnachfrage, Straßenraumgestaltung, Steuerungsverfahren, Anlagentechnik sowie Fachkenntnis der Verantwortlichen abläuft. Diesen Prozess wirkungsvoll, zuverlässig und effizient zu gestalten, ist für die Betreiber von Lichtsignalanlagen eine anspruchsvolle Herausforderung.

Die Optimierung von Prozessen, um vorgegebene Ziele zu erreichen, ist das Prinzip des Qualitätsmanagements [1]. In vielen Bereichen der Produktion und Dienstleistung ist Qualitätsmanagement bereits etablierter Bestandteil einer erfolgreichen Unternehmensführung. Es liegt daher nahe, eine umfassende Auseinandersetzung mit dem Qualitätsmanagement in der Verkehrssteuerung anzustoßen, um die Qualität der Verkehrssysteme zu sichern und weiter zu verbessern.

Mit den Augen des Qualitätsmanagers betrachtet

Relevante Qualitätsfelder der Lichtsignalsteuerung sind die Verkehrssicherheit und die Qualität des Verkehrsablaufs. Daneben können Umweltaspekte berücksichtigt werden. Für ein systematisches Qualitätsmanagement ist es erforderlich, dass Kenngrößen zur Bewertung definiert sind und Bewertungsvorschriften dafür vorliegen. Dabei sollten die Kenngrößen ein nach dem Stand der Technik hohes Qualitätsniveau beschreiben. Wichtige Kenngrößen der Qualität des Verkehrsablaufs sind Wartezeiten und die Anzahl der Halte; ergänzende Kenngrößen wie Reisezeiten, Kraftstoffverbrauch oder Lärm- und Abgasemissionen können hiervon abgeleitet werden.

Kenngrößen zur Verkehrssicherheit beschreiben Anzahl und Schwere der Verkehrsunfälle. Hinzu kommen Kenngrößen zur Verfügbarkeit von Anlagenkomponenten wie Störungshäufigkeit und -dauer.

Damit Qualitätsziele dauerhaft erreicht werden, ist sicherzustellen, dass die Lichtsignalsteuerung fachlich korrekt ausgeführt ist. Sie muss vollständig dokumentiert, wartungsfreundlich konzipiert und anpassungsfähig für Änderungen und Erweiterungen sein, und schließlich muss sie so robust sein, dass sie ihre Funktionsfähigkeit auch im Störfall bewahrt und definierte sichere Zustände einnimmt.

Darüber hinaus unterstützt das Qualitätsmanagement die prozessbezogene Ziele, d.h. die Optimierung von Abläufen, den effizienten Einsatz von Ressourcen für wirkungsvolle Maßnahmen und das Vermeiden von Fehlerfolgekosten. Schließlich wird die Qualitätsleistung belegt, was der Kommunikation gegenüber Politik und Öffentlichkeit dient, zu einem positiven Qualitätsimage beiträgt und zu größerer Rechtssicherheit in Haftungsfragen führt. Dies gewinnt an Bedeutung, wenn künftig verstärkt private Betreiber mit Aufgaben der Lichtsignalsteuerung betraut werden.

Bei der Konzeption des Qualitätsmanagements ist zu beachten, dass die Verfahrensweisen selbst aufwandsoptimiert und praxistauglich entwickelt sind. Dabei hilft, dass es bereits etablierte Ansätze wie z. B. Verkehrsschauen oder das Sicherheitsaudit für Straßen gibt, die aufzugreifen und zu integrieren sind.

Erforscht und erprobt: Qualitätsprüfung im Betrieb

Durch Forschungsarbeiten am Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik und am Zentrum für Integrierte Verkehrssysteme (ZIV) wurden Grundlagen für eine systematische Anwendung des Qualitätsmanagements in der Lichtsignalsteuerung geschaffen [2]. Im Vordergrund stand dabei zunächst die Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Beurteilung der Qualität von Lichtsignalanlagen und zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen.

PROFESSIONELLE TECHNIK



HAT IN GUMMERSBACH TRADITION.

Denn ebenso wie im Handballsport hat das Bergische Land auch als Maschinenbauregion

Professionelles zu bieten: ein präzises Zusammenspiel von Praxis und Technik, hoch motivierte Mannschaften und Bestleistungen auf vielen Positionen. Mit Gummersbach als logistischem Zentrum für Hebetchnik. Im Herzen Europas für ABUS Kunden in aller Welt.

Fordern Sie jetzt den neuen ABUS Film an. Auf CD-ROM oder DVD.



ABUS Wir bewegen etwas.
Kransysteme

ABUS Kransysteme GmbH · Postfach 100162 · D-51601 Gummersbach · Telefon (02261) 37-0 · Telefax (02261) 37-247 · www.ABUS-Kransysteme.de

Wenn morgens große Verkehrsmengen in die Städte drängen, müssen Lichtsignalanlagen effizient und sicher funktionieren. Foto: fsiv

To cope with rush hour traffic, traffic lights must work efficiently and reliably.



Das in einem knappen Leitfaden gebündelte Ergebnis ist von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) aufgegriffen worden und wird zukünftig Bestandteil der Richtlinien sein, nach denen in Deutschland Lichtsignalanlagen gestaltet und betrieben werden [3].

Die Qualitätsanalyse stützt sich auf die Auswertung vorliegender oder einfach zu erzeugender Datenbestände und nutzt EDV-gestützte Analysesysteme. Auszuwerten sind folgende Datenbestände:

- Unfallprotokolle: Mit ihrer Hilfe wird das Unfallgeschehen in Anlehnung an ein etabliertes Verfahren [4] analysiert. Bereits vorhandene Auswertungen wie z. B. Unfallsteckkarten werden dabei weiter verfeinert, um typische Unfallrisiken zu identifizieren.
- Prozessdaten: Im Steuergerät der Lichtsignalanlage gehen Meldeimpulse von Detektoren ein, auf deren Grundlage die Steuerungslogik das Signalpro-

gramm anpasst. Diese Daten werden protokolliert und aus ihnen Kenngrößen des Verkehrsflusses abgeleitet.

- Betriebsdaten: Die in den in der Regel elektronisch geführten „Betriebstagebüchern“ aufgezeichneten Betriebszustände und Störungsmeldungen werden ausgewertet, um die Betriebszuverlässigkeit zu prüfen und fehlerhafte Bauteile zu identifizieren.

Unerlässlich für eine Qualitätsbeurteilung sind ferner die Inspektion des Zustands der Lichtsignalanlage sowie die Beobachtung des Verkehrsablaufs durch den Experten. Diese Untersuchungen werden auf der Grundlage standardisierter Protokolle durchgeführt, die EDV-unterstützt an die Gegebenheiten der einzelnen Anlage angepasst werden können. Im Mittelpunkt der Inspektion steht der verkehrssichere und regelkonforme Zustand von Verkehrsraum und technischen Einrichtungen; mit Verkehrsbeobachtungen werden unter anderem das Auftreten von Staus, überlangen Wartezeiten oder Störungen des Verkehrsflusses in Grünen Wellen erfasst.

Die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung wird durch ein Wissensmanagement unterstützt. Kernstück ist eine Wissensbasis, die den umfangreichen Erfahrungsschatz über die Wirkungsbeziehungen zwischen der Gestaltung des Systems Lichtsignalanlage und den Qualitätskenngrößen der Verkehrssteuerung enthält. Typische Mängel sowie mögliche Maßnahmen sind darin in Form einer Matrix miteinander verknüpft. Durch Abarbeiten des Prüfkatalogs gelangt der Anwender schrittweise von einem zunächst umfassenden Maßnahmenspektrum zu einem spezifischen Handlungskonzept. Dieses gliedert sich in kurzfristige Sofortmaßnahmen, z. B. die Erneuerung von Detektoren oder die Anpassung von Signalzeiten, sowie in langfristige Sanierungsmaßnahmen bis hin zur baulichen Neuordnung des Knotenpunkts. Schnittstellen zwischen der elektronischen Verarbeitung der qualitätsbezogenen Daten und dem Wissensmanagement lassen sich einfach realisieren. Damit kann nunmehr ein umfassendes, modulares Instrumentarium des Qualitätsmanagements genutzt werden.

Noch viel zu tun

Auf dem Weg zu einem vollständigen, zertifizierungsfähigen Qualitätsmanagement-System sind nun weitere Schritte zu gehen. Hierzu zählen

- die Ausweitung des Qualitätsmanagements auf den gesamten Lebenszyklus von Lichtsignalanlagen, d. h. Einbeziehung der Projektierung, Errichtung und Implementierung, und
- die Bereitstellung von Hinweisen für die schrittweise umzusetzende Einführung des Qualitätsmanagements, einschließlich der Abstimmung und Einführung geeigneter Abläufe, der Definition von Qualitätsniveaus, der Bereitstellung von Ressourcen und der Darlegung von Prozessen im Rahmen eines Qualitätsmanagement-Handbuchs.

Auf lange Sicht wird es darum gehen, die Integration in ein modulares Qualitätsmanagement für den Gesamtverkehr zu vollziehen. Ein solches aufzubauen, ist eine gleichsam ambitionierte wie notwendige Aufgabe bei der zukunftsfähigen Gestaltung unserer Verkehrssysteme.

Machen Sie sich fit für Ihre Karriere.

Die F.A.Z. und den Hochschulanzeiger mit 35% Ersparnis.

Gratis für Studenten

6 Wochen die F.A.Z. für 16,50 €. Gratis die Sigg-Flasche der F.A.Z.

Wer am Anfang seiner Karriere steht, braucht die richtigen Informationen, um zu wissen, wie es weitergeht. Als Student erhalten Sie 6 Wochen die F.A.Z. mit 35% Ersparnis und gratis den Hochschulanzeiger sowie die original Sigg-Flasche der F.A.Z.



F.A.Z.-Hochschulanzeiger:
Karrietertips, Stellenangebote, Praktikumsbörse.



Ja, ich bin Student/in und möchte die F.A.Z. mit 35% Ersparnis testen.

Das sechswöchige Miniabo bestelle ich zum Vorzugspreis von 16,50 €* (inkl. MwSt. und Zustellung) gegen Rechnung. *Im Rhein-Main-Gebiet inkl. Rhein-Main-Zeitung und Sonntagszeitung zum Preis von 18,50 €. Ich spare 35% und erhalte die Sigg-Flasche, die ich in jedem Fall behalten darf. Wenn mich das Miniabo nicht überzeugt, teile ich dies dem Verlag Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH innerhalb der Laufzeit schriftlich mit. Ansonsten brauche ich nichts zu veranlassen und erhalte dann die Frankfurter Allgemeine Zeitung zum aktuell gültigen monatlichen Abonnementpreis von zur Zeit 16,90 € bzw. 18,90 € im Rhein-Main-Gebiet (inkl. MwSt. und Zustellkosten). Den sechsmal im Jahr erscheinenden Hochschulanzeiger bekomme ich automatisch nach Erscheinen zugeschickt. Ein gesetzliches Widerrufsrecht habe ich bei diesem Angebot nicht, denn dieses Abo ist jederzeit mit einer Frist von 20 Tagen zum Monatsende bzw. zum Ende des vorausberechneten Bezugszeitraums kündbar. Meine Studienbescheinigung habe ich in Kopie beigefügt.

Ich bin damit einverstanden, daß Sie mir schriftlich oder telefonisch weitere interessante Angebote unterbreiten (ggf. Streichen). Ein Angebot der Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH, Hellerhofstraße 2 - 4, 60327 Frankfurt (HRB 7344, Handelsregister Frankfurt am Main).

Vorname, Name

Straße, Hausnummer

PLZ, Ort

Telefon

E-Mail

Datum

Unterschrift

FS6 PR6078

Das Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik

Das Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik (FGVV) ist Teil des Instituts für Verkehr im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie an der TU Darmstadt. In Forschung und Lehre des FGVV stehen die gemeinsamen Grundlagen für alle Verkehrsmittel und die Verkehrsmittel übergreifenden Fragen der Verkehrsplanung und Verkehrstechnik im Vordergrund. In der Verkehrsplanung werden Methoden und Verfahren mit interdisziplinären Bezügen und als Bestandteil der überfachlichen Raumplanung entwickelt. Im Mittelpunkt stehen die Ursachen und Wirkungen der Mobilität sowie integrierende Strategien zum Verkehrsmanagement. Die Verkehrstechnik betrachtet die Grundlagen des Verkehrsablaufs und die Leistungsfähigkeit von Verkehrsanlagen. Die traditionelle Arbeit des Fachgebiets in der Lichtsignaltechnik wird ergänzt durch eine umfassende Auseinandersetzung mit modernen Verkehrsleittechniken,

Verkehrsinformationssystemen sowie der Erfassung, Aufbereitung und Verteilung von Verkehrsdaten. Das Zentrum für Integrierte Verkehrssysteme (ZIV GmbH) wurde 1998 als Institut der TU Darmstadt gegründet. Gesellschafter sind die Fraport AG, der Rhein-Main-Verkehrsverbund, die DB Regio AG und der Förderverein für integrierte Verkehrssysteme als Zusammenschluss von Industriepartnern und Gebietskörperschaften. Die 20 Mitarbeiter des ZIV betreiben Anwendungsforschung im Verkehrsmanagement. Sie bearbeiten Planungs- und Beratungsprojekte in den Bereichen Straßenverkehr, Flughafenverkehr, Bahnverkehr und ÖPNV an und bieten übergreifende und prozessorientierte Leistungen in den Bereichen Verkehrsmanagement, Projektmanagement, Verkehrswirtschaft und Qualitätsmanagement an.

www.ziv.de

Literatur

- [1] DIN EN ISO 9000:2000 (und folgende): Normenfamilie für Qualitätsmanagementsysteme
- [2] Boltze, M., Reusswig, A.: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V 128. Bergisch Gladbach, 2005.
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA), Ausgabe 1992 und Teilfortschreibung 2003. Eine Neufassung liegt derzeit im Entwurf vor.
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, FGSV 1998

Verkehrsregelungs-
zentrale Berlin

Realisierung eines integrierten Mobilitätsmanagements

mit zentraler Überwachung und Steuerung des gesamten Verkehrs der Hauptstadt

Und das kommt unterm Strich dabei raus:

Höhere Sicherheit und **Mobilität** für über 5 Millionen Menschen



▶▶▶ www.tu-darmstadt.de

Zukunft gestalten – sTUDieren an der TU Darmstadt

Naturwissenschaften – Ingenieurwissenschaften – Geistes- und Sozialwissenschaften

▶ **„In den technischen Disziplinen gehört die TU Darmstadt zu den sehr guten Adressen.“**

*Peter Gruss,
Präsident der Max-Planck-Gesellschaft,
Spiegel Special 1/2005*

▶ **„Die Aufsteiger in der Erziehungswissenschaft: Die TU Darmstadt in der Spitzengruppe bei, Urteil der Studierenden, in der Spitzengruppe bei den Forschungsgeldern.“**

*Hochschulranking
CHE/Stern 2004*

▶ **„In der Physik komplettiert die TU Darmstadt das Führungstrio.“**

Spiegelranking 2004



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Infos – Bewerbung – Einschreibung

Sekretariat für studentische Angelegenheiten • Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt
Tel. 0 6151/16 22 24, 16 20 21 • e-mail: stud.sekretariat@pww.tu-darmstadt.de

Mobilität, Sicherheit und Schutz der Umwelt in Einklang zu bringen, ist das Ziel moderner Verkehrspolitik. Gerade in Ballungsräumen erfordert dies eine intelligente Verkehrslenkung bei Einbeziehung aller Verkehrsmittel. Die neue Verkehrsregelungszentrale in Berlin integriert bislang getrennte Einrichtungen in einem gemeinsamen Verkehrsmanagement: Lichtsignal- und Beeinflussungsanlagen, Verkehrsüberwachung, Warndienst und Regierungsverkehr. Das Ergebnis: eine fortschrittliche und effiziente Lösung für die täglichen Herausforderungen.

Dies ist nur ein Beispiel unter vielen, wie wir auf der Basis unserer Best-in-class-Produkte integrierte Verkehrslösungen realisieren. Für mehr Mobilität in den Städten.

Weitere Beispiele und Informationen unter:

www.siemens.de/traffic

SIEMENS

Industrial Solutions and Services

Your Success is Our Goal

fsiv – Forschungsschwerpunkt Integrierte Verkehrssysteme

Der Forschungsschwerpunkt Integrierte Verkehrssysteme (fsiv) ist der Zusammenschluss von 13 Professoren mit insgesamt etwa 160 wissenschaftlichen Mitarbeitern an der TU Darmstadt, die sich in unterschiedlichen Fachbereichen mit Verkehrssystemen beschäftigen. Damit wurde die bereits etablierte Zusammenarbeit, u. a. im Masterstudiengang Traffic and Transport sowie im Arbeitskreis Luftverkehr, weiterentwickelt. Beteiligt sind auch das ECAD - European Center for Aviation Development, das Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit sowie das ZIV - Zentrum für integrierte Verkehrssysteme GmbH an der TU Darmstadt. Abgerundet wird dieses Profil durch zahlreiche Kooperationen mit Universitäten und der Wirtschaft sowie Verbindungen zu den Aufgabenträgern im Verkehr. Damit bündelt der fsiv seit 2004 wissenschaftliches Potenzial im Verkehrswesen am Standort Darmstadt. In der Forschung und Beratung werden gemeinsam Verkehrsprobleme gelöst. In der Lehre sorgen Aus- und Weiterbildungsangebote für einen umfangreichen Wissenstransfer auf allen Gebieten des Verkehrswesens.

Sprecher:
Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze
Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf (Stellvertreter)

Geschäftsstelle/Kontakt:
Technische Universität Darmstadt
Forschungsschwerpunkt Integrierte Verkehrssysteme (fsiv)
Dipl.-Ing. Wolfgang Kittler
Petersenstraße 30
64287 Darmstadt
Tel.: 06151/16-3626
Fax: 06151/16-4625
E-Mail: info@verkehrsforschung.tu-darmstadt.de
www.tu-darmstadt.de/verkehrsforschung



Lieferprogramm Werkstofftechnik

Alles für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung



Optische/visuelle Prüfung VT



Eindringprüfung PT



Magnetpulverprüfung MT



Ultraschall-Prüfung UT



Druchstrahlungs-Prüfung RT



Andere zerstörungsfreie Prüfmethoden



Dichtheitsprüfung LT



Temperaturbestimmung



DGZfP Ausbildungszentrum

HELLING GmbH, Spökerdamm 2 • Postfach 2132 / 25437 Tornesch
25436 Heidgraben (bei Hamburg) • e-mail: info@hellinggmbh.de
Tel.: (04122) 922-0 • www.hellinggmbh.de • Fax: (04122) 922-201

Neuheiten von Helling GmbH

Verfasser N. Riess, Präsident,
Dipl.-Phys. A. Ivankov

"Generationswechsel" bei UV-Handleuchten!

Davon hatte die Fachwelt - nicht nur in der ZfP - schon lange geträumt - wir haben diese Träume wahr gemacht und eine neue Serie von UV-Handleuchten entwickelt, die vor allem für den mobilen Einsatz geeignet ist. Zu verdanken ist dies dem Einsatz von UV-emittierenden Leuchtdioden (UV-LED's), die wegen ihrer kleinen Abmessungen sowie ihres geringen Energiebedarfs die Entwicklung von UV-Leuchten im Taschenlampen-Format möglich machten!

Dioden als Leuchtmittel sind seit einiger Zeit in breiter Front auf dem Vormarsch! Als Lichtquelle im Bereich des sichtbaren Lichtspektrums (400 bis 700 nm) begegnen sie uns im täglichen Leben, z.B. in Beleuchtungskörpern an Kraftfahrzeugen oder Fahrrädern. Inzwischen sind für unterschiedliche Anwendungsfälle auch Leuchtdioden (UV-LED's) entwickelt worden, deren Emissions-Spektrum unterhalb 400 nm, also im UV-Bereich liegt, und damit wurden sie für viele Anwendungsgebiete (wie z.B. Werkstoffprüfung, Forschung, Medizin, Füge-technik, Kriminalistik, Leckage von Hydrauliksystemen) interessant, insbesondere da, wo spontaner, mobiler Einsatz gefragt ist.

Hier sind sie:



UV-Handleuchten, netzunabhängig, handlich, mit UV-LED's bestückt!

- ① UV-Inspector 365, ② UV-Inspector 380,
- ③ UV-Inspector 2000, ④ UV-Inspector 3000

Die wichtigsten technischen Daten

	UV-Inspector 365	UV-Inspector 380	UV-Inspector 2000	UV-Inspector 3000
- Betriebsspannung	4,8 V (4 x Mignon 1,2 V)	4,8 V (4 x Mignon 1,2 V)	18 V	12 V (10 x Mignon 1,2 V)
- UV-Quelle	1 x UV-LED	10 x UV-LED	4 x UV-LED	100 x UV-LED
- Lebensdauer der UV-LED	ca. 10.000 Std.	ca. 10.000 Std.	ca. 10.000 Std.	ca. 10.000 Std.
- UV-Intensität				
- Abstand 200 mm	10000 µW/cm²	1000 µW/cm²	5000 µW/cm²	3000 µW/cm²
- Abstand 400 mm	2500 µW/cm²		1700 µW/cm²	2000 µW/cm²
- Wellenlänge	365 nm	375 nm		375 nm
- Halbwertsbreite der Emission	8,5 mm	10 mm	8,5 mm	10 mm
- Betriebsdauer	ca. 4 Std. (Dauerbetrieb möglich)	ca. 4,5 Std. (Dauerbetrieb möglich)	ca. 4 Std. (Dauerbetrieb möglich)	ca. 1,5 Std. (nur Intervall-Betrieb)
- Gesamtgewicht	ca. 350 g	ca. 250 g	auch mit Netzadapter lieferbar	auch mit Netzadapter lieferbar
- Abmessungen	170 x Ø 45 mm	170 x Ø 45 mm	ca. 1300 g 75 x 320 x 110 mm	ca. 1400 g 230 x Ø 130 mm



Neues entdecken.

Energie hautnah erleben, Kraftwerkstechnik begreifen. Das rundum neue Informationszentrum Biblis wird zum interaktiven Erlebnis. Wir freuen uns auf Ihren Besuch.

Öffnungszeiten:

Mo. - Sa. 9:30 - 16:00 Uhr · Sonn- und Feiertage geschlossen

RWE Power

Kraftwerk Biblis Informationszentrum · 68647 Biblis · T +49 (0)6245/21-4803 · I www.rwe.com



Die Kernenergie deckt bundesweit etwa 30% der Stromerzeugung. Mit ihrem hohen Sicherheitsstandard und dem hervorragend ausgebildeten Personal gelten die deutschen Anlagen als international vorbildlich.

Das Kraftwerk Biblis liegt 13 Kilometer nördlich der Stadt Worms auf der hessischen Rheinseite. Die Anlage umfasst zwei Kraftwerksblöcke, so genannte Druckwasserreaktoren, mit einer elektrischen Gesamtleistung von circa 2.500 Megawatt. Rund 650 Mitarbeiter gewährleisten mit ihrer hohen Kompetenz und ihrem großen Engagement seit 30 Jahren einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der Anlage.

Die beiden Kraftwerksblöcke in Biblis erzeugen bei voller Leistung pro Jahr so viel Strom, wie fünf Millionen Haushalte in Deutschland verbrauchen. Gleichzeitig vermeidet das Kraftwerk - gegenüber der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen - den Ausstoß von rund 15 Millionen Tonnen Kohlendioxid.

**Kleiner Dreh.
Große Leistung.
Ihre Planung
mit Berrang.**

Kleiner Dreh. Großer Anspruch. Als Spezialist im Bereich mechanischer Verbindungstechnik setzt Berrang auf kundenorientierte Lösungen aus einer Hand. Unser Qualitätsdenken begleitet Sie von der Planung bis zum Endprodukt. Je früher Berrang, desto besser. Wir optimieren für Sie Qualität und Logistik. Das zahlt sich aus.

Engineering: Da hängt viel dran!

Hauptsitz Mannheim:

Helmertstraße 1
68219 Mannheim
Tel.: +49(0)621/8786-0
Fax: +49(0)621/8786-400
mannheim@berrang.de
www.berrang.de



BERRANG®

Mechanische Verbindungstechnik

Chemnitz · Freiburg · Greenville, SC (USA) · Hannover · München · Nürnberg · Orléans (F) · Stuttgart



CargoScoreCard

Hans-Christian Pfohl/Ralf Elbert/Philipp Gallus/Moritz Gomm

Die mit dem Unternehmenswert verbundene zukunfts-, risiko- und marktorientierte Wirkung von Transportalternativen im Güterverkehr ist schwer abzuschätzen. Daher wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie mit der CargoScoreCard ein integriertes Konzept zur Identifikation, Berechnung und Kommunikation wertsteigernder Verkehrsverlagerungspotentiale von der Straße auf die Schiene erarbeitet und in einem DV-Werkzeug implementiert. Dieses ermöglicht die Bewertung von Transportalternativen nicht nur nach finanziellen (z.B. Cash Flow), sondern auch nach technologischen (z.B. Lieferzeit), sozialen (z.B. Mitarbeiterzufriedenheit) und ökologischen (z.B. CO₂-Emissionen) Kriterien.

CargoScoreCard *The shareholder value related impacts of transport alternatives in terms of future-, risk-, and market-orientation are hard to depict. On behalf of the Federal Ministry of Economics and Technology the CargoScoreCard as an integrated concept for the identification, calculation and communication of value enhancing transport shift from road to rail has been developed and implemented into software. This tool allows the evaluation of transport alternatives not only in financial (eg. cash flow) but also in social (eg. employee satisfaction), technological (eg. lead time) and ecological (eg. CO₂-emission) terms.*

Das stetig zunehmende Güterverkehrsaufkommen und die politisch forcierte Verkehrsverlagerung zwingt Logistikunternehmen zur (Um-)Gestaltung ihrer Gütertransporte. Dabei spielen effiziente intermodale Güterverkehre eine wesentliche Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen im globalen Wettbewerb. Es ist erforderlich, mit intelligenten Lösungen die Systemvorteile der einzelnen Verkehrsträger voll auszuspielen und alternative Gütertransportmodi wertorientiert zu gestalten, das heißt, unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf den Unternehmenswert. Insbesondere der Kombinierte Straßen-/Schienengüterverkehr (KV) wird als eine attraktive Alternative bezeichnet, um die Vorteile der Straße mit denen der Schiene wertsteigernd zu verbinden.

Methodik zur wertorientierten Transportgestaltung

Im Zentrum der entwickelten Methodik zur wertorientierten Transportgestaltung steht die Frage, inwiefern Verkehrsverlagerungspotentiale wertsteigernd im Unternehmen genutzt werden können. Dazu müssen zunächst Werte formuliert werden, die für das Unternehmen im Allgemeinen und für die Gestaltung von Transportvorgängen im Besonderen relevant sind. Anschließend werden die für die vorliegende Transportsituation zulässigen Transportalternativen identifiziert, entscheidungsrelevante Informationen im Unternehmen systematisch in eine Struktur gefügt sowie alle entscheidungsrelevanten dynamischen Umweltentwicklungen mittels Trendprognosen erfasst. Solche Trends können Entwicklungen auf der (politi-

schen, gesellschaftlichen, ökonomischen etc.) Makroebene sein [1]. Diese beeinflussen die Akteure am Markt und werden anhand geeigneter Indikatoren in betrachteten Unternehmen gemessen. Die Trends wirken über die Indikatoren auf eine Reihe unternehmensspezifischer Kennzahlen, die so genannten Werttreiber [2]. Diese Werttreiber werden durch mathematische und sachlogische Beziehungen zu Hierarchien zusammengefasst, wobei nicht nur finanzielle, sondern auch technologische, ökologische oder soziale Werttreiberhierarchien mit jeweils eigenen Spitzenwerttreibern entstehen. Zur Prognose der zukünftigen Entwicklung der so genannten Value Flows in den jeweiligen Werttreiberhierarchien werden unternehmensexterne Einflüsse identifiziert, von denen eine maßgebliche Wirkung erwartet wird. Für diese zukunftsorientierte Betrachtung eignet sich die Szenario-Methode [3]. Für die Prognose der Spitzenwerttreiber in den Werttreiberhierarchien sind die innerhalb der Trendkorridore möglichen Trendverläufe zu berücksichtigen. Dazu wird die in der Literatur empfohlene Monte-Carlo-Simulation [4] angewendet (Abb. 1).

Arbeitsweise mit der CargoScoreCard

Die CargoScoreCard als technische Umsetzung realisiert die Methodik zur wertorientierten Transportgestaltung vollständig und unterstützt Logistikmanager in der systematischen Bewertung unterschiedlicher Transportalternativen. Die betriebliche Praxis, routinemäßig die Straße zu wählen, kann damit aufgebrochen werden.

Aufgrund seiner Ausrichtung wurde die CargoScoreCard als eine allein stehende DV-Lösung umgesetzt,

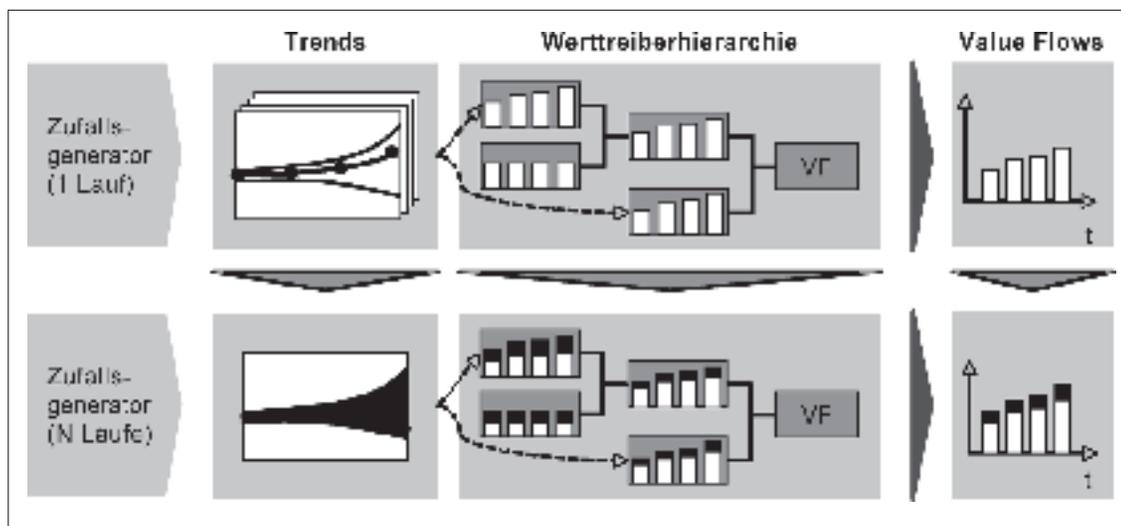


Abb. 1
Berechnung der Value Flows mittels Monte-Carlo-Simulation
Calculation of the value flows with Monte-Carlo-Simulation

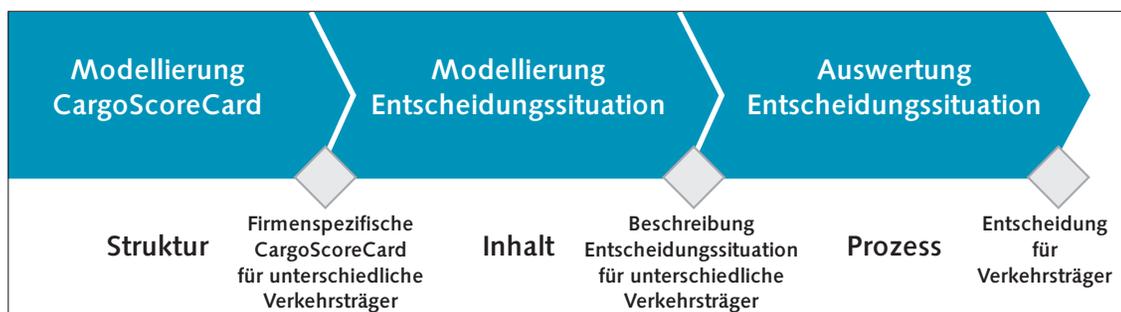


Abb. 2
Arbeitsweise der CargoScoreCard
The functioning of the CargoScoreCard

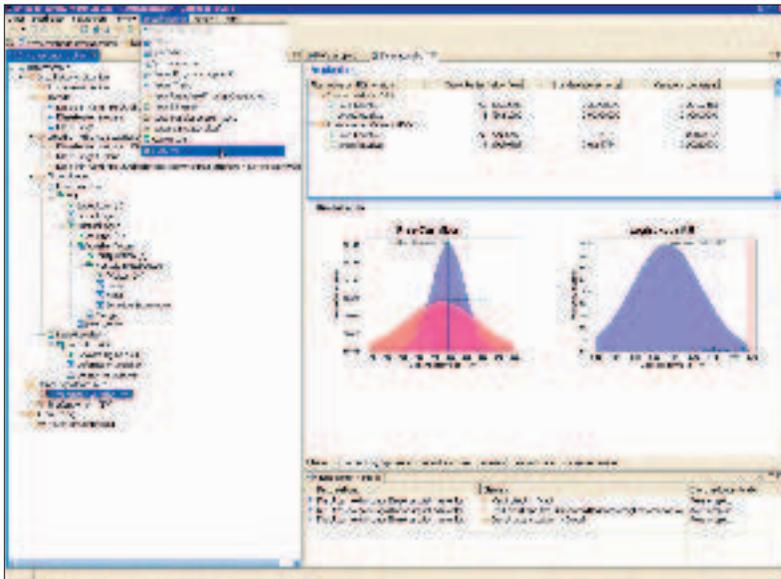


Abb. 3
Benutzungsoberfläche der CargoScoreCard
CargoScoreCard user interface

welche nicht auf Kommunikation mit Drittsystemen angewiesen ist. Das Produkt ist als eigenständige Anwendung ausgerichtet und ohne Drittsysteme lauffähig.

In der Arbeit mit der CargoScoreCard gliedert sich die wertorientierte Betrachtung von Transportgestaltungsalternativen in die drei wesentlichen Schritte Modellierung entscheidungsrelevanter Abhängigkeiten, Ausdifferenzierung der Handlungsalternativen sowie Simulation, Auswertung und Dokumentation (Abb. 2).

Die Elemente der graphischen, objekt-orientierten Benutzungsschnittstelle (Abb. 3) sind zu weiten Teilen direkt-manipulativ und bieten Benutzern kontextabhängig vollen Zugriff auf die Funktionalität des DV-Werkzeugs. Die Anzeige der Entscheidungsstruktur, in Abb. 3 links, gibt einen vollständigen Überblick auf den Arbeitsstand und wird ergänzt um den Arbeitsbereich, in Abb. 3 rechts, für Eingabeformulare sowie die Ergebnisanzeige.

Benutzer genießen bei der Modellierung entscheidungsrelevanter Abhängigkeiten und der Ausdifferenzierung der Handlungsalternativen weitestgehende Freiheit in ihrer Vorgehensweise. Eine Gültigkeitsprüfung validiert die Modellierung auf Vollständigkeit und Korrektheit und weist gezielt auf Gültigkeitsverletzungen hin.

Visuelle Analyse – Trendszenario und Alternativenbewertung

Informationsvisualisierung (IVIS) wird gemeinhin definiert als die Verwendung Computer-gestützter, interaktiver, visueller Repräsentationen von abstrakten Daten, um deren Wahrnehmung zu erleichtern [5]. Informationsvisualisierung kann Menschen wesentlich darin unterstützen, den Umfang von Informationsräumen zu erfassen, deren Beschaffenheit zu verstehen und darin enthaltene relevante Informationen zu erkennen. Eigens entworfene, interaktive Diagramme führen signifikante Kenngrößen sowie Abhängigkeiten vor Augen und schaffen die notwendige Transparenz in den Berechnungsergebnissen. Damit entfällt eine Auswertung langer Tabellen.

Die hier verwendete Darstellungstechnik bietet einen Überblick über die Simulationsschritte anhand der Spitzenkennzahlen (Abb. 4).

Jede Zelle im Raster repräsentiert die Empfehlung für eine Handlungsalternative zu einem Simulationsschritt. Die Empfehlung ist der Farbe der Zelle zu entnehmen. Jede Handlungsalternative wird durch eine Farbe repräsentiert (hier Rot und Blau). Die Zelle wird gemäß der bestbewerteten Handlungsalternative eingefärbt. Kann keine eindeutige Empfehlung zugunsten einer Handlungsalternative ausgesprochen werden, so wird die Zelle neutral gefärbt. Die Simulationsschritte sind in vertikal anhand ihrer laufenden Nummer und horizontal anhand des Prognosezeitpunktes angeordnet.

Ebenso wie die zu Grunde liegende Methodik ist die CargoScoreCard auf unterschiedliche Entscheidungssituationen in Unternehmen anwendbar und nicht auf die Transportgestaltung im KV festgelegt. Strategisch kann das System konsequenterweise langfristig als universelles Werkzeug zur wertorientierten Betrachtung und Entscheidungsfindung von Handlungsalternativen positioniert und weiter entwickelt werden. Der Monte-Carlo-Simulation liegen Pseudo-Zufallszahlenreihen zu Grunde. Durch die Wahl identischer Startwerte ist die Reproduktion von Simulationläufen möglich. Multiple Simulationläufe in Verbindung mit der manuellen Variation von Trendprognosen erlauben grundsätzlich die Durchführung von Sensitivitätsanalysen. Sämtliche Annahmen der Simulation als auch relevante Zwischenergebnisse stehen für eine weiterführende Auswertung bereit. Die visuelle Aufbereitung wesentlicher Ausgangsgrößen sowie Auswertungsergebnisse mittels eigens entwickelter Diagrammtechniken gibt dem operativen Management eine Hilfestellung bei der Auswahl der unternehmensspezifisch wertmaximierenden Entscheidungsalternative. Ein Bericht im HTML-Format ermöglicht die Dokumentation und nachvollziehbare Begründung von getroffenen Entscheidungen.

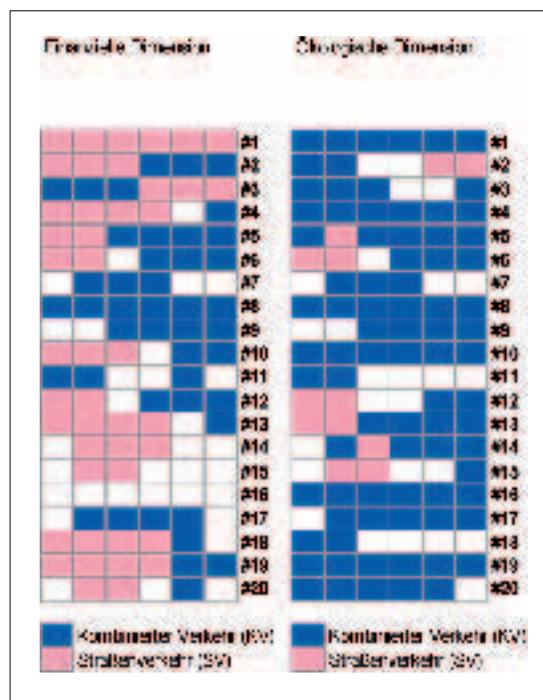


Abb. 4
Darstellung der vorteilhaftesten Transportalternative pro Betrachtungsdimension (links: finanziell, rechts: ökologisch) sowie in Abhängigkeit von Zukunftsszenario (senkrechte Achse) und Zeitpunkt (horizontale Achse).
Depiction of the most profitable transport alternative per dimension under consideration (left: financial; right: environmental) and depending on future scenario (vertical axis) and point in time (horizontal axis).

Wir suchen für die Übernahme zukünftiger Fach- und Führungsaufgaben

TRAINEES

für die Bereiche

- Konstruktion
- Technischer Vertrieb
- Elektrotechnik/
Automatisierung
- Entwicklung
- Service

Wir bieten vielfältige Einsatz- und Entwicklungsmöglichkeiten im Rahmen eines zwölfmonatigen Traineeprogramms (inkl. Auslandsaufenthalt).

Wir fördern und fordern Engagement, Flexibilität und die aktive, eigenverantwortliche Nutzung von Gestaltungsräumen.

Wir erwarten einen überzeugenden ingenieurwissenschaftlichen Hochschulabschluss (Diplom, Master, Bachelor). Sie verfügen über hohe Einsatzbereitschaft, Teamfähigkeit, Kommunikationsstärke, Belastbarkeit und Bereitschaft zur Übernahme von Verantwortung. Sie beherrschen die gängigen MS-Office-Tools und besitzen gute Englischkenntnisse.

Haben wir Ihr Interesse geweckt?
Dann freuen wir uns auf Ihre Bewerbung.

Bitte senden Sie Ihre vollständigen Unterlagen an das Personalmarketing Hilchenbach.



Die SMS Demag ist weltweit mit einem Geschäftsvolumen von rund 1,5 Mrd. EUR führend auf dem Gebiet der Hütten- und Walzwerkstechnik für die Stahl- und NE-Industrie. Das Unternehmen gehört zur SMS group (Hütten- und Walzwerkstechnik, Rohr-, Profil- und Schmiedetechnik, Kunststofftechnik), die mit rund 9.250 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern einen Umsatz von ca. 2,33 Mrd. EUR erwirtschaftet.

SMS DEMAG AG

Personalmarketing Hilchenbach
Herrn Dirk Zöller
Wiesenstraße 30
57271 Hilchenbach
Telefon: +49 (0) 2733 29-2788
E-Mail: dirk.zoeller@sms-demag.com

<http://www.sms-demag.com>

MEETING your EXPECTATIONS



Erste Ergebnisse einer Praxisanwendung

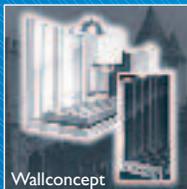
Die für die Softwareerstellung notwendige Anwendungsorientierung wurde durch die enge Zusammenarbeit mit kompetenten Partnern aus der Praxis (Kombiverkehr-Anbieter, Logistikdienstleister) gewährleistet. Im Rahmen einer Pilotierung bei einem assoziierten Partner erfolgte die Implementierung der generischen Version der Software zur DV-gestützten Transportgestaltung einer bestimmten Transportrelation. Diese wurde in einer finanziellen, ökologischen und technologischen Dimension betrachtet. Entgegen den Erwartungen des Logistikdienstleisters kam die Software zu dem Ergebnis, dass eine Verkehrsverlagerung auf der betrachteten Relation wertsteigernd, d.h. zu empfehlen ist. Das Pilotunternehmen nahm dieses überraschende Ergebnis zum Anlass, um in Verhandlungsgespräche für eine Verlagerung zu treten. Damit war auch der politisch gewollte Nutzen der Software in einem ersten Anwendungsfall bestätigt.

Literatur

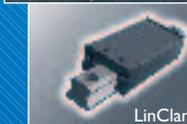
- [1] Micic, P. (2006): Das ZukunftsRadar. Die wichtigsten Trends, Technologien und Themen für die Zukunft. Offenbach 2006.
- [2] Elbert, R. (2005): Sprache der Wertsteigerung zur wertbewussten Unternehmensführung. Ergebnisse einer strukturations-theoretischen Analyse und eines qualitativen Experiments in der Logistik. Wiesbaden 2005.
- [3] Hachmeister, D. (1995): Der Discounted Cash Flow als Maß der Unternehmenswertsteigerung. Frankfurt am Main u.a. 1995; Klien, W. (1995): Wertsteigerungsanalyse und Messung von Managementleistungen: Technik, Logik und Anwendung. Wiesbaden 1995; Schoemaker, P.J. (1995): Scenario planning: A tool for strategic thinking. In Sloan Management Review 36 (1995) 2, S. 25-40.
- [4] Eisenführ, F./Weber, M. (1999): Rationales Entscheiden. 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin 1999.
- [5] Jaeschke, G./Gupta, P./Hemmje, M. (2005): Modelling Interactive, Three-Dimensional Information Visualizations. In: Hemmje, M./Niederée, C./Risse, T. (Hrsg.): From Integrated Publication and Information Systems to Information and Knowledge Environments. Berlin 2005, S. 197-206; Müller, W. (2000): Effektiver Einsatz grundlegender Darstellungsprimitive zur Informationsvisualisierung. Darmstadt 2000.

ADVANTAGE HEMA. INNOVATION ENDET NIE.

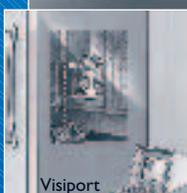
Hema, Gewinner des 2. Hessischen Kooperationspreises für das beste Kooperationsprojekt zwischen Forschungsstelle und Unternehmen, Partner des PTW seit 2003:



Wallconcept



LinClamp



Visiport

Wir suchen Dich,

den motivierten Studenten,

- als Ferienjobber
- als Praktikanten
- für Studienarbeiten
- für Projektarbeiten
- für Diplomarbeiten

oder nach Studienabschluss

- als Vertriebsingenieur
- als 3D-Konstrukteur

www.hema-schutz.de
protecting – clamping – giving visions
to the world of machines.

Innovationsbeispiele: No 1 Lamellenabdeckung* 1978 No 2 Leitungsträger* 1981 No 3 Faltenbalg* 1982 No 4 Faltenbalg* 1983 No 5 Abdeckband* 1983 No 6 Lamellenabdeckung* 1983 No 7 Lamellenabdeckung* 1985 No 8 Lamellenabdeckung* 1986 No 9 Visiport* 1997 No 10 Eaglevision 2001 No 11 Lamellenabdeckung* 2002 No 12 Faltenbalg* 2003 No 13 Flexbox 2003 No 14 Scherenprofil* 2003 No 15 Scherenlagerung* 2003 No 16 Rollenaufhängung* 2003 No 17 Dämpfungselemente* 2003 No 18 Fastlap SA/SB* 2003 No 19 Scherenbefestigung* 2003 No 20 Verbindungsart* 2003 No 21 Leitungsschutz* 2003 No 22 RotoClamp* 2003 No 23 LinClamp* 2003 No 24 pClamp* 2003 No 25 Verbindungsart* 2004 No 26 pClamp X* 2004 No 27 LinClamp SA Active* 2004 No 28 Lamellenform* 2005 No 29 HSC-Dämpfung* 2005 No 30 SAMURAI VECTOR C* 2005 **Erklärung:** *Detailverbesserungen, *Exklusivvertrieb, *Exklusivlizenz



Hema. Schutzsysteme nach Maß.

Fachgebiet Unternehmensführung & Logistik

Das Fachgebiet Unternehmensführung & Logistik betreibt nicht nur Grundlagenforschung, sondern unterstützt mit den Ergebnissen der angewandten Forschung Problemlösungsprozesse in der Unternehmenspraxis und vermittelt dies auch in der Lehre. Das Fachgebiet sieht sich als Plattform für theoriegeleitete und anwendungsorientierte Forschung zu Problemen der Unternehmensführung und der Logistik sowie der Verkehrswirtschaft.

Kontakt:

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Unternehmensführung & Logistik
Fachbereich Rechts- und Wirtschaftswissenschaften
Hochschulstraße 1
64289 Darmstadt
Tel. 06151/16-5423
Fax 06151/16-6503
www.fgul.de

Fachgebietsleiter:

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Christian Pfohl
E-Mail: pfohl@bwl.tu-darmstadt.de

Ansprechpartner:

Dr. Ralf Elbert
E-Mail: elbert@bwl.tu-darmstadt.de
Moritz Gomm
E-Mail: gomm@bwl-tu-darmstadt.de
Philipp Gallus
E-Mail: gallus@bwl.tu-darmstadt.de

BOOST YOUR TALENT WITH A CAREER IN ENERGY



Mit 58.000 Mitarbeitern, Niederlassungen in 40 Ländern und einem Vertriebsnetz, das mehr als 100 Länder abdeckt, bietet AREVA ihren Kunden zuverlässige technologische Lösungen für CO₂-freie Energieerzeugung sowie die Energieübertragung und -verteilung.

Zur AREVA-Gruppe gehört die AREVA NP, ein Unternehmen von AREVA und Siemens, mit rund 14.000 Mitarbeitern. Von unseren Standorten in Frankreich, Deutschland und den USA aus arbeiten wir in allen Teilen der Welt.

>> Technologieführerschaft hat bei uns Tradition

Forschung und Entwicklung sind seit jeher Garanten für unseren Unternehmenserfolg. Nur deshalb können wir heute die modernsten und sichersten Reaktordesigns anbieten und schlüsselfertig für unsere Kunden bauen. Dies wird auch in Zukunft so bleiben. Es gilt, Gutes noch besser zu machen und den weltweit anerkannten Sicherheitsstandard unserer Reaktoren weiter zu erhöhen. Von uns gebaute Kernkraftwerke erzeugen in elf Ländern kostengünstig und CO₂-frei Strom. Immer mehr Betreiber setzen auf das Know-how unserer Teams und auf unsere hochspezialisierten Tools, um ihre Anlagen noch wettbewerbsfähiger zu machen.

>> Menschen – Ideen – Karrieren

Wer sich für uns entscheidet, findet interessante Aufgabenfelder. Bei einem Global Player zu arbeiten verlangt neben Fachwissen und Kreativität auch Offenheit und Verständnis für andere Kulturen. Die von uns entwickelten und angemeldeten Patente belegen Jahr für Jahr unsere herausragende Kompetenz. Mit neuartigen Reaktoren wollen wir der Kernenergie in den nächsten Jahrzehnten neue Einsatzgebiete in der Energiewirtschaft erschließen. Unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus den unterschiedlichen technischen und wissenschaftlichen Disziplinen arbeiten bereits heute an diesen Herausforderungen von morgen. Auch für Sie eröffnen sich einmalige Karrierechancen.

Möchten Sie an diesen herausfordernden Aufgaben mitarbeiten und Ihre Fähigkeiten einbringen? An unseren Standorten in Deutschland, z.B. Erlangen, Offenbach, Karlstein, Lingen und Duisburg, geben wir Ihnen jederzeit die Gelegenheit zum Einstieg.

Wir suchen mehrere Ingenieure, Techniker und technische Assistenten (m/w), gerne auch mit gleichwertigem ausländischen Abschluss, mit Schwerpunkt in einer der folgenden Fachrichtungen:

- Maschinenbau/Verfahrens-/Kerntechnik
- Naturwissenschaften (Physik, Chemie)
- Elektrotechnik/Informatik
- Werkstoff-/Materialwissenschaften
- Bauwesen
- Wirtschaftsingenieurwesen

Darüber hinaus bieten wir Studierenden dieser Fachrichtungen

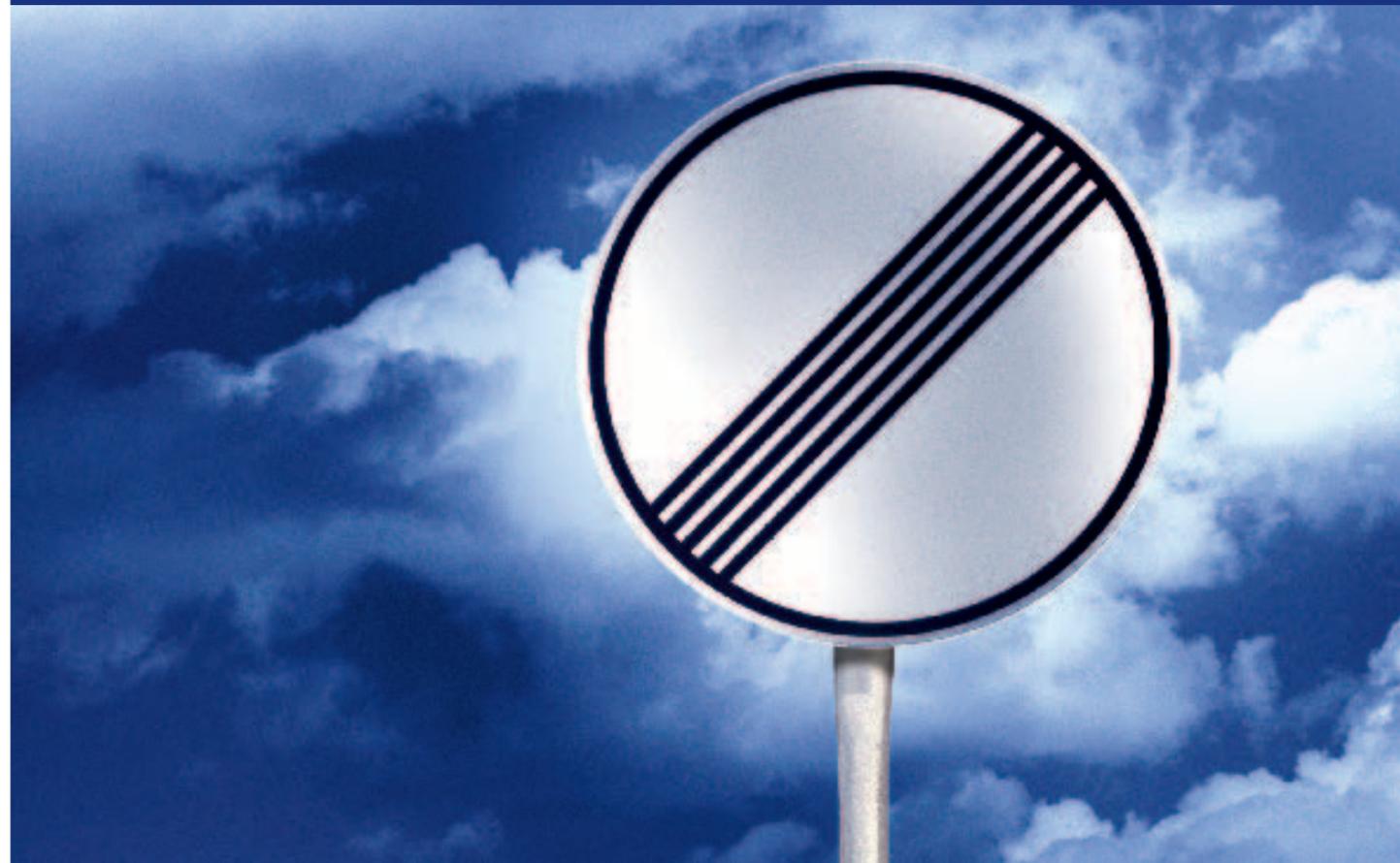
- Werkstudentenjobs
- Praktikantenplätze
- Studien-, Diplom- und Doktorarbeiten

Wir freuen uns darauf, Sie kennen zu lernen.



Bitte bewerben Sie sich vorzugsweise online unter www.aveva-np.com oder nehmen Sie Kontakt mit uns auf:
AREVA NP GmbH, Zentrales Recruiting, Frau Bernhild Pflanzler, Kaiserleistr. 29, 63067 Offenbach
Für mehr Informationen: www.aveva.com

Berufsstart ohne Tempolimit



Maschinenbau- und Wirtschaftsingenieure gesucht

BorgWarner
Turbo Systems
Marnheimer Straße 85/87
67292 Kirchheimbolanden
Telefon 06352/403-1860
Jobs@turbos-bwauto.de
www.turbos.bwauto.com

BorgWarner
Transmission Systems
Hockenheimer Straße 165-167
68775 Ketsch
Telefon 06202/601-786
Jobs@ats.bwauto.de
www.bwauto.com

Wenn Sie nach Ihrem Studium richtig Gas geben wollen, steigen Sie bei BorgWarner ein. Wir sind mit 17.400 Mitarbeitern weltweit Marktführer für technisch hochentwickelte Komponenten und Systeme der Antriebstechnik. Und bekannt dafür, dass man bei uns schneller weiterkommt. Ihre persönliche Laufbahn begleiten wir mit einem fortschrittlichen Personalentwicklungsprogramm, das Sie auf eine verantwortliche Position als Team- oder Projektleiter vorbereitet.

Was Sie dafür im Gepäck haben sollten? Ausgezeichnete fachliche Qualifikationen sowie gute Englischkenntnisse. Und darüber hinaus soziale Kompetenz, Flexibilität, Kreativität und unternehmerisches Denken.

Lassen Sie uns bei dieser Veranstaltung darüber sprechen.
Wir freuen uns auf Sie!

Mehr Infos? www.bwauto.com

 **BorgWarner**