

# RWTHAACHEN

# THEMEN



BERICHTE  
AUS DER  
RHEINISCH-  
WESTFÄLISCHEN  
TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE  
AACHEN

AUSGABE 1/2011

ISSN-NR.  
0179-079X

# WERK- STOFFE

# Bis 2020 soll der Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland bei 20 % liegen.

## Wann können Sie anfangen?



**Nur mit Energie lässt sich Zukunft sichern.**

Die Welt steht vor ihrer wahrscheinlich größten Herausforderung: Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird sich der Energiebedarf der Menschen verdoppeln. Gleichzeitig gilt es jedoch, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu halbieren. AREVA stellt sich dieser Aufgabe und bietet wegweisende Konzepte für die Energieversorgung. Als Wegbereiter für Technologien zur CO<sub>2</sub>-freien Stromerzeugung führen wir aber nicht nur die Kernenergie in eine sichere Zukunft. Unsere Kompetenz in den Bereichen Wind, Biomasse, Photovoltaik und Wasserstoff erweitert den Zugang zu sauberen, sicheren und wirtschaftlichen Energieträgern.

**Bewerben Sie sich online unter: [www.karriere.areva.com](http://www.karriere.areva.com).**





**Impressum**

Herausgegeben  
im Auftrag  
des Rektors:  
Dezernat Presse,  
Öffentlichkeitsarbeit  
und Marketing  
der RWTH Aachen  
Templergraben 55  
52056 Aachen  
Telefon 0241/80-94327  
Telefax 0241/80-92324  
Pressestelle@zhv.rwth-aachen.de  
www.rwth-aachen.de

**Verantwortlich:**  
Toni Wimmer

**Redaktion:**  
Sabine Busse  
Angelika Hamacher

**Fotos:**  
Peter Winandy

**Titelfoto:**  
Zahlreiche auch seltene  
Legierungsmetalle würzen die  
hochwertigen Stahlsorten.

**Anzeigen:**  
print´n´press, Aachen  
jh@p-n-p.de

**AUS DEM  
INHALT**

**Anzeigenberatung:**  
L. Rüster Telefon 06131/58 04 96  
l.ruester@gmx-mainz.de

**Logodesign:**  
Klaus Endrikat

**Gestaltung:**  
Monika Zahren,  
Aachen

**Druck:**  
Vereinte Druckwerke,  
Neuss

Gedruckt auf  
chlorfrei gebleichtem Papier

Das Wissenschaftsmagazin  
„RWTH-Themen“  
erscheint einmal pro Semester.  
Nachdruck einzelner Artikel,  
auch auszugsweise,  
nur mit Genehmigung der Redaktion.  
Für den Inhalt der Beiträge  
sind die Autoren verantwortlich.

Sommersemester 2011

# Werkstoffe

Das Forum Materialwissenschaft und Werkstofftechnik	6
Heiße Schmelzen schweben lassen	8
Auf dem Weg zum universellen Datenspeicher	10
Gezielt modifizierbar, vielfältig und innovativ – Neuartige Fasermaterialien für Hightech Produkte	16
Neue Methoden zur Entwicklung von Strukturwerkstoffen	20
Abfallprodukt wird Rohstoff!	24
Hochleistungsplasmen zur Beschichtung	28
Wärmedämmschichtsysteme für Gasturbinen	32
Höchste Reinheit für Funktionswerkstoffe	36
Fliegen leicht gemacht	40
Wenn Knochenersatz benötigt wird	44
Zutritt nur für befugte Substanzen	48
CO <sub>2</sub> -freie Kohlekraftwerke – Was können keramische Membranen leisten?	52
Fügen mit Glas	56
Werkstoffsimulation – Schnittstelle zwischen Materialphysik und Prozesstechnik	58
Textilbetonbandagen für den Aachener Dom	62
Gewürzmetalle in Hochleistungswerkstoffen	66
Namen & Nachrichten	70

# Vorwort

4

Jährlich beginnen über 6.500 Studierende ihr Studium an der RWTH Aachen. In den nächsten Jahren blickt die Hochschule jedoch einem größeren Zuwachs an jungen Studienanfängerinnen und -anfängern entgegen. Aufgrund der Aussetzung der Wehrpflicht rechnen die Aachener Hochschulen schon zum Wintersemester 2011 mit rund zusätzlichen 800 Studierenden und weiteren 700 im Wintersemester 2012. Mit den Doppel-Abiturjahrgängen (G8) werden sich ab 2013 voraussichtlich weitere 6.000 zusätzliche Studierende in Aachen einschreiben, die Hälfte davon an der RWTH Aachen. Dies bedeutet, dass die Studierendenzahl für den Zeitraum 2011 bis 2019 in der Stadt Aachen auf insgesamt 45.000 ansteigen wird. Diese Studentinnen und Studenten müssen neben einem ordnungsgemäßen Studienablauf auch Verpflegung und Unterbringung vorfinden. Der verfügbare Wohnraum allerdings reicht derzeit bei Weitem nicht aus, um die Studierenden unterzubringen. Die Aachener Hochschulen, das Studentenwerk und die Stadt Aachen haben unter Einbeziehung der Studierendenschaft deshalb beschlossen, alle erforderlichen Schritte zu unternehmen, diesen jungen Menschen ein reguläres Studium unter normalen Wohn- und Lebensbedingungen zu ermöglichen.

Im Vergleich zu 2010 erwartet die RWTH Aachen durch die doppelten Abiturjahrgänge im Jahr 2013 einen Studierendenzuwachs um sechs Prozent auf über 35.000 Studierende. Durch die Hochschulpakt II-Vereinbarung fließen zur Bewältigung dieser Jahrgänge rund 180 Millionen Euro in die Hochschule. Über 50 Millionen Euro sind für Baumaßnahmen vorgesehen, vor allem für die Einrichtung von Lern- und Lehrräumen. Die derzeitigen Pläne gehen von einem Flächenzuwachs von rund 10.000 Quadratmeter aus. Sogar Vorlesungen in Kinosälen werden erwogen. Insgesamt werden rund 400 zusätzliche Stellen geschaffen: 20 Professuren, 350 Wissenschaftliche und 10 Nichtwissenschaftliche Mitarbeiterstellen sowie zahlreiche Studentische Hilfskraftstellen. Aber auch die Stundenplanung des Lehr- und Prüfungsbetriebs wird im Zusammenhang mit der effizienten Nutzung bestehender Räumlichkeiten überarbeitet. Schließlich wird auch das RWTH-Übergangsmanagement von Schule zu Hochschule intensiviert, um die Orientierungs- und Beratungsleistung für die Schülerinnen und Schüler zu optimieren. Eine gesonderte PR-Kampagne von Stadt und Hochschulen wird über diese Entwicklungen umfassend informieren. Auf diese Weise blickt die RWTH Aachen optimistisch der Herausforderung der starken Jahrgänge vor dem demographischen Wandel entgegen und heißt ihre zukünftigen Absolventinnen und Absolventen schon jetzt herzlich willkommen. ■■■■



Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Ernst Schmachtenberg  
Rektor

## Was können Sie bei uns als Ingenieur (m/w) auf keinen Fall entwickeln?

a) Großdieselmotoren

b) Einspritzsysteme

c) Notstromaggregate

d) Langeweile

## Empower your Career



Find us on  
**Facebook**



### Neues schaffen. Weiter denken. Vorwärtskommen.

Aus faszinierenden Ideen machen unsere rund 9.000 Mitarbeiter kraftvolle Technik – vom 10.000-kW-Dieselmotor bis zum klimafreundlichen Blockheizkraftwerk. Mit den Marken MTU und MTU Onsite Energy ist Tognum einer der weltweit führenden Anbieter von Motoren, kompletten Antriebssystemen und dezentralen Energieanlagen. Innovative Einspritzsysteme von L'Orange vervollständigen unser Technologie-Portfolio rund um den Antrieb. Bewegen auch Sie mit uns die Welt!

Berufseinstieg, Traineeprogramm, Praktikum, Abschlussarbeit: Tognum bietet Ihnen alle Möglichkeiten. Informieren Sie sich näher über unsere Website oder auf unserer Facebook-Seite: [www.facebook.com/tognum](http://www.facebook.com/tognum).

### Willkommen bei der Tognum AG in Friedrichshafen.

Wir freuen uns, von Ihnen zu hören.

Tognum AG • Personalmarketing • Regine Siemann • Maybachplatz 1 • 88045 Friedrichshafen  
regine.siemann@tognum.com • Tel. 07541/90-6513



# Das Forum

## D Interdisziplinäre Zusammenarbeit Wissenschaft, Industrie,

Das Forum Materialwissenschaft und Werkstofftechnik bündelt heute mit über 80 Mitgliedern aus mehr als 35 Instituten der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich die Kompetenzen im Bereich Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Das Forum versteht sich dabei als Plattform zur Diskussion und zur Generierung von interdisziplinären Projekten, wobei das Forum aktiv als Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Industrie, Gesellschaft und Politik fungiert. Im Jahr 1988 als Werkstoff-Forum gegründet, entschied man sich 2010 für eine Umbenennung des Forums in „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik“, um die in der Fachgemeinschaft feststehende Begrifflichkeit auch in der RWTH Aachen zu verankern. Die Intention des Forums bleibt dabei unverändert: Das Forum entwickelt und überprüft Formate zur Förderung der interdisziplinären Forschung im Bereich der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.

**Die Arbeitsgruppen des Forums**  
Die Forschungsarbeit des Forums wird in den thematisch ausgerichteten Arbeitsgruppen

- Metalle
  - Glas/Keramik
  - Aachen Composite Engineers
  - Aachen Polymer Chain
  - Prozess-Simulation SimPRO
  - Werkstoffanwendungen und Werkstoffverbunde sowie
  - Elektronische Materialien
- organisiert und durchgeführt. Die Arbeitsgruppe **Metalle** wurde gemeinsam mit der Gründung des Forums ins Leben gerufen. Aufgrund ihrer vielfältigen und fachübergreifenden Aktivitäten wurde die Gruppe in mehrere Arbeitskreise unterteilt:

- Prüfverfahren und Bruchmechanik
- Zentrum Metallische Bauweisen
- Prozess- und Werkstoffmodellierung
- Füge-technik
- Hochwärmefeste Werkstoffe
- Stahl – ab initio/Sonderforschungsbereich 761
- Aluminium Engineering Center Aachen (aec)

In den Arbeitskreisen besteht eine enge interdisziplinäre Kooperation der beteiligten Institute untereinander und mit den Partnern aus der Industrie.

Die Arbeitsgruppe **Werkstoffverbunde**, bestehend aus 12 Instituten verschiedener Fakultäten der RWTH Aachen, dem Forschungszentrum Jülich und der DLR in Köln, beschäftigt sich mit der Entwicklung und Fertigung von Schichtverbunden für Anwendungen im Bereich der Mikrosystemtechnik, der Nanotechnologie, der Medizintechnik, der Energie- und Verkehrstechnik sowie der Verschleißschutzanwendungen.

Die Arbeitsgruppe **Glas/Keramik** wurde mit der Gründung des Forums eingerichtet. Derzeit gehören ihr neun Institute beziehungsweise Lehrstühle aus vier Fachbereichen der RWTH Aachen an. Das Aufgabengebiet dieser Gruppe umfasst die Bereiche Herstellung, Charakterisierung, Konstruktion, Prüftechnik, Verbindungs- und Anwendungstechnik. Schwerpunktmäßig werden Strukturen, aber auch Funktionskeramiken behandelt.

Die **Aachen Composite Engineers (ACEs)** sind ein Verbund von fünf Instituten (die Institute für Leichtbau für Textiltechnik für Kunststoffverarbeitung, für Kraftfahrzeuge sowie das Fraunhofer Institut für Produktionstechnik), die auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstofftechnik forschen. Sie bilden zusammen ein Netzwerk, das in der Lage ist, die Erarbeitung ganzheitlicher Systemlösungen zu offerieren, das heisst von der Produktanalyse über die konzeptionelle Technologieentwicklung und Prozessgestaltung bis hin zur praktischen Umsetzung von Entwicklungsvorhaben.

Die **Aachen Polymer Chain (APC)** entstand als Verbund von Wissenschaftlern und Instituten mit Bezug zu den Polymerwerkstoffen. Die Bündelung der am Standort Aachen vorhandenen Forschungspotenziale verschafft der APC eine Leuchtposition. Ziel ist es, umfangreiche und komplexe Forschungs- und Entwicklungsvorhaben für öffentliche und private Geldgeber zu bearbeiten.

Die Arbeitsgruppe **SimPRO** ging aus dem vom BMBF geförderten Kompetenzzentrum für Prozesssimulation hervor und ist ein Zusammenschluss von verschiedenen Forschungseinrichtungen aus dem Umfeld des Forums. Anders als die übrigen Arbeitsgruppen des Forums, die werkstoffbezogen aufgestellt sind, ist SimPRO quer zu diesen angeordnet und bearbeitet übergreifend Themen der Simulation und Modellierung von Eigenschaften und Herstellungsverfahren, wodurch das Know-how für die Werkstoffe Metall, Kunststoff und Keramik stetig erweitert und gebündelt wird.

Die Arbeitsgruppe **Werkstoffanwendungen** befindet sich noch in ihrer Gründungsphase, derzeit wird an einem Konzeptpapier gearbeitet.

Die Arbeitsgruppe **Elektronische Materialien** ist seit Kurzem in den NanoClub der RWTH Aachen eingebunden, die Arbeitsschwerpunkte werden dort weitergeführt.

Aus den Arbeitsgruppen des Forums sind in den vergangenen Jahren mehrere Sonderforschungsbereiche hervorgegangen, unter anderem der Sonderforschungsbereich Stahl – ab initio, der 2007 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf eingerichtet wurde. Weitere Sonderforschungsbereiche werden derzeit im Forum geplant.

### Formate und Angebote

Das Forum versteht es als eine Hauptaufgabe, neue interdisziplinäre Projekte anzustoßen und voranzutreiben. Dafür ist es erforderlich, dass sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der verschiedenen Forschungsbereiche kennenlernen, austauschen und gemeinsame Ideen entwickeln. Als Instrument zur Knüpfung und Pflege von Kontakten wurde eine Exkursionsreihe angestoßen: die ersten beiden Exkursionen in 2010 führten zu Thyssen-Krupp Nirosta nach Krefeld und zu den Ford-Werken nach Köln. Bei der Planung und Durchführung wurde darauf geachtet, dass nicht nur viel Interessantes gesehen und erlebt wurde, zusätzlich wurde den Teilnehmern auch Zeit und Raum zur Kommunikation und Diskussion gegeben. In 2011

# Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

## an der Schnittstelle zwischen Gesellschaft und Politik

werden wieder mehrere Exkursionen durchgeführt; das Forum greift dafür auf seine internen Netzwerke, kombiniert mit externen Partnern, zurück. Diese Netzwerke müssen über einen langen Zeitraum wachsen, um die Fächer- und damit oftmals auch die Kommunikationsgrenzen zu überwinden und eine effektive Zusammenarbeit zu gewährleisten.

Um die Publikationstätigkeit der jungen Wissenschaftler anzuregen, wurde vom Forum 2010 erstmals der „Best-Paper-Award“ ausgeschrieben. Die Mitgliedsinstitute des Forums waren dazu aufgefordert worden, ihre Veröffentlichungen einzureichen, die einen neuen interdisziplinären Ansatz in der Forschung untersucht haben und in einem relevanten Organ veröffentlicht wurden. Da der Best-Paper-Award auf große Resonanz gestoßen ist, wird er künftig als forschungs- und veröffentlichungsanregendes Instrument eingesetzt werden. Das Forum hat sich neben der Anbahnung und Durchführung von Forschungsaktivitäten aktiv der Nachwuchsförderung verschrieben. Im NRW-Landeswettbewerb „Jugend forscht“ wird daher seit 2005 jährlich in der Kategorie Technik als Sonderpreis ein dreiwöchiges Forscherpraktikum vergeben. Den Preisträgerinnen/Preisträgern wird die Möglichkeit gegeben, an der Arbeit eines oder mehrerer Institute teilzunehmen. Die Institute können je nach Interessenlage ausgewählt werden. Während des Praktikums lebt der Preisträger im Gästehaus der Hochschule und wird mit einem Preisgeld ausgestattet, um neben der Forschungsarbeit in das Studentenleben hineinzuschnuppern.

Daneben zeigt das Forum regelmäßig auf Messen Präsenz und führt Veranstaltungen durch. Zwischen der IHK Aachen und dem Forum soll es künftig im Rahmen der IHK-POTENZIALE eine eigene Veranstaltung geben. Den Auftakt bildete die Veranstaltung „Prüftechnik Metalle: Auf Herz und Nieren geprüft“ im September 2010 im Zentrum Metallische Bauweisen e.V. der RWTH Aachen. Der wechselseitige Gedanken- und Erfahrungsaustausch unterstützt den Wissens- und Technologietransfer zwischen Forschung und Wirtschaft.

### Fazit

Sich selbst immer wieder neu zu erfinden, neu zu definieren, neue Schwerpunkte zu setzen, Formate und Instrumente zu überprüfen ohne das Ziel aus den Augen zu verlieren, das ist ständige Aufgabe des Forums für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Dies geschieht durch einen permanenten Rückkopplungsprozess auf die globalen Herausforderungen in den Feldern Gesundheit, Ernährung, Energie, Mobilität, demographischer Wandel und Klimawandel. Um Lösungswege und Konzepte aufzuzeigen, bedarf es besonders für die Werkstoff-Forschung der intensiven interdisziplinären Kooperation und Vernetzung quer über verschiedene Forschungs- und Technologiefelder: Diese Vision der Interdisziplinären Foren der RWTH Aachen ist ständiger Anspruch für das Forum Materialwissenschaft und Werkstofftechnik in seiner täglichen Arbeit. ■■■■■

### Autoren:

Petra Kraus M.A. ist Referentin für die Interdisziplinären Foren. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter G. Senk ist Inhaber des Lehrstuhls für Metallurgie von Eisen und Stahl und Sprecher des Forums Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.



# Heiße Schmelzen schweben lassen

Stellen Sie sich vor, Sie sollen den Schmelzpunkt von Eis bestimmen! Nichts leichter als das: Zerstoßenes Eis nehmen, in einen Becher füllen, Thermometer hinein, erwärmen lassen, kräftig rühren und ablesen, wie die Temperatur des Eis-Wassergemischs sich einpendelt, bis alles geschmolzen ist. Was aber tun, wenn nur ein Becher aus Salz verfügbar ist? Dieselbe Prozedur führt zu einer sehr viel niedrigeren Schmelztemperatur, weil sich Salz im Wasser löst. Dies kennen wir von den Streuaktionen auf den Straßen im Winter.

Richtig schwierig wird es, wenn man den exakten Schmelzpunkt keramischer Hochtemperaturwerkstoffe bestimmen will. Zwar gibt es für ein gegebenes Probenmaterial vielleicht sogar höher schmelzende Verbindungen, die als Tiegel in Betracht gezogen werden können. Doch bei Temperaturen oberhalb 1500°C reagieren nahezu alle Substanzen sehr schnell mit den verfügbaren Tiegelmaterialein. Man müsste also eine Schmelze ohne jegliche Berührung mit einem anderen Stoff erzeugen können. Die Schmelze sollte also „schweben“ und allen möglichen Messmethoden zugänglich sein. Es könnte dann der echte Schmelzpunkt sehr genau bestimmt werden, ferner könnten Dampfdruck, Viskosität, Oberflächenspannung oder innere Molekülstrukturen der Schmelze als Funktion der Überhitzungstemperatur gemessen werden. Diese Daten werden dringend benötigt, um Computermodelle mit thermodynamischen Größen zu füttern, mit denen dann wiederum neue Werkstoffe entwickelt oder das Reaktionsverhalten hochschmelzender Stoffe mit anderen korrosiven Umgebungsmedien wie Metallschmelzen, Schlacken, Aschen oder Gasen simuliert werden können. Je präziser die experimentellen Daten sind, umso sicherer können solche Ergebnisse auch extrapoliert werden. Diese Datensätze, Stoffsysteme und neuen Werkstoffzusammensetzungen finden Einsatz in der Energietechnik wie zum Beispiel bei



der Konzipierung und für den Betrieb von Verbrennungskraftwerken, Müllverbrennungsanlagen, in solarthermischen Kraftwerken, ferner in Anlagen der Metallerzeugung, der Glasherstellung sowie im Industriefabrikbau.

Wie kann man nun eine Probe levitieren, das heißt in die Luft erheben? Aus der Welt- raumforschung kennt man die Parabelflüge mit großen Flugzeugen, die während der kurzen Sturzflugphase durch das gemeinsame „Fallen“ von Flugzeug, Messinstrument, Probe und Beobachter Schwerelosigkeit simulieren, oder die Aachener Versuche in der D2-Mission im Orbit, wo unter Mikrogravitation Metalle geschmolzen worden sind und ihre Erstarrung ohne Schwerkräfteinfluss untersucht worden ist.

Bei Metallen kann man ferner Magnetfelder verwenden, um den Einfluss der Schwerkraft im Labor zu kompensieren. Es entsteht dann im Hochvakuum des Gerätes unter in-

duktiver Erwärmung oder mittels Laserstrahlen eine Schmelzkugel, die nichts berührt. Wie steht's aber mit Keramiken und Gläsern?

Bereits seit 1995 werden am Lehrstuhl für Keramik und Feuerfeste Werkstoffe im Auftrag der NASA keramische Käfige für die Untersuchung von Metallschmelzen in Experimenten unter Parabelflug- und Orbitbedingungen hergestellt. Die Frage nach einer eigenen Möglichkeit zur Erzeugung und Charakterisierung von Schmelzen von Oxiden, Silikaten, Nitriden und anderen mineralischen Werkstoffen im Labor beschäftigte lange die wissenschaftlichen Mitarbeiter, bis weltweit eine Firma gefunden werden konnte, die in den 80er Jahren einmal für die NASA und ein japanisches Forschungsinstitut einen Levitator für Nichtmetalle gebaut hatte. Das bei diesem Anlagentyp angewandte Prinzip der aeroakustischen Levitation beruht auf dem Bernoulli-Effekt, nach wel-

*Bild 1: 2300°C erreicht! Über vier Stunden steht die  $Al_2O_3$ -Schmelze im Fokuspunkt der beiden Laser. Die Beobachtungskameras überprüfen laufend die Position und melden Abweichungen an die akustischen Transducer. Foto: PPH, Inc.*

chem von unten mit Luft angeblasene Kugeln schweben können, Flugzeuge Auftrieb erhalten und Duschvorhänge sich unweigerlich an die nasse Haut legen. Die Balance zwischen Unterdruck und Überdruck verleiht dem schwebenden Körper einen Auftrieb und hält ihn in Position. Allerdings zappelt so ein Objekt ziemlich unkontrolliert umher, sobald die Strömung lokale Turbulenzen aufweist. Als Stabilisatoren hat die Firma Physical Property Measurement, Pty. Inc., Evanston/Chicago, Illinois, einen Aufbau von sechs Lautsprechern entwickelt, die in oktaedrischer Anordnung um den gewünsch-

# Berührungslose Charakterisierung nichtmetallischer Schmelzen

ten Aufenthaltsort der Probe herum stehende Schallwellen generieren. In den Knotenpunkten dieser überlagerten Wellen bilden sich also käfigartige „ruhige“ Zonen aus, die die Lage der Probe perfekt und kontrollierbar fixieren und aus denen sie trotz Anströmung und Eigengewicht nicht entkommen kann. Allerdings erlauben Knotengrößen und verfügbarer Schalldruck nur die Stabilisierung von Objekten bis etwa 3-4 mm Durchmesser und einer Dichte bis 10 g/cm<sup>3</sup>, was aber für die Forschungszwecke völlig ausreicht. Eine Heizung mittels zweier 250-Watt-CO<sub>2</sub>-Laser entfacht das Höllenfeuer im Zentrum des Fokus. Die Probe schmilzt bei Temperaturen bis zu 3000°C. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit automatischer Irisblende kann dann das wiederholte Schmelzen und Erstarren gefilmt werden; ein optisches Pyrometer misst simultan die Temperatur. Vom ersten Angebot im Jahre 2002 über die Mittelbeantragung bis zur Beauftragung vergingen sechs Jahre! Die Firma hatte sich zwischenzeitlich aufgelöst, die Mannschaft aus hoch spezialisierten Physikern sowie Laser- und Akustik-Ingenieuren war in alle Winde zerstreut und musste wieder zusammengetrommelt werden. Da es Schwebeschmelzanlagen nicht „von der Stange“ gibt, planten die Wissenschaftler etwas grundsätzlich Neues: die vollautomatisch gesteuerte Schwebeschmelze. Die früheren Anlagen wurden manuell betrieben. Ab 2008 begann nach schwierigen Detailverhandlungen der Bau. Unvorhergesehene Schwierigkeiten gab es bei der quantitativen Erfassung der Probenvibration, -oszillation, -rotation und -verformung sowie deren Gegensteuerung. Ein hochauflösendes und schnelles Bilderkennungssystem musste installiert werden, Daten mussten in Echtzeit ausgewertet und in Regelsignale für das komplexe Lautsprechersystem umgewandelt und eingespeist werden. Hierfür fehlten Kalibrierungen, teilweise sogar die mathematischen Zusammen-

hänge – von Steueralgorithmien ganz abzusehen, die erst entwickelt werden mussten. Die Lautsprecher, so genannte piezoelektrische Transducer exakt ausgeklügelter Form und Abmessung, mussten aufeinander präzise abgestimmt werden. Von mehr als 30 hergestellten Transducern erwiesen sich nur zwei Gruppen aus je sechs Stück als wirklich kompatibel. Endlich gelang die Lagestabilisierung und -manipulation, dann die Tropfenverformung per Mausclick und Windows-Schieberegler, dann die Temperatur-Regelung.

Seit Frühjahr 2011 verfügt das Institut für Gesteinshüttenkunde über die weltweit modernste und leistungsfähigste Schwebeschmelzanlage für mineralische Materialien. Bei Temperaturen bis zu 3000°C können Schmelzpunkte reiner Stoffe berührungslos und damit sicher bestimmt werden. Bei der Erstarrung können Unterkühlungseffekte, Keimbildung und Kristallwachstum direkt gefilmt und bezüglich des Energieumsatzes und der Kinetik quantitativ ausgewertet werden. Die Anlage stärkt somit die Kernkompetenz des Instituts in den Bereichen der Thermochemie, der Hochtemperaturwerkstoffe und der Gläser beträchtlich. Für technisch wichtige und wissenschaftlich hochinteressante Zustandssysteme keramischer und feuerfester Werkstoffe können dann Schmelzisoothermen für thermodynamische Berechnungen bereitgestellt werden. Stoffkandidaten sind Systeme mit ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> und Oxiden der Seltenen Erden wie Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und andere. Hierauf wartet neben zahlreichen Partnerinstituten der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich ein weltweiter Verbund aus Forschungsinstituten, die sich auf die Modellierung komplexer Stoffsysteme spezialisiert haben. Daneben erlaubt die zyklische Verformung und Relaxation der Schmelze mittels Schallwellenanregung auch die Bestimmung der Oberflächenspannung und Viskosität der

Schmelze, indem die Amplituden und Frequenzen der Oszillationen ausgemessen werden. Diese Daten sind unter den angestrebten Bedingungen durch keine anderen Messmethoden zugänglich und werden ebenfalls für die Entwicklung und das thermodynamische Verständnis von Gläsern, beziehungsweise des nichtkristallinen Zustands generell, benötigt. ■■■■■

## Autor:

Univ.-Prof. Dr. Rainer Telle ist Inhaber des Lehrstuhls für Keramik und Feuerfeste Werkstoffe und Leiter des Instituts für Gesteinshüttenkunde.

# Auf dem Weg zum universellen Datenspeicher

# W

Wer schreibt, der bleibt. Dieses Sprichwort beschreibt die Notwendigkeit, Wissen auch über Generationen hinweg weiterzugeben. In der Entwicklung der Menschheit hat die Fähigkeit, Informationen für die Nachwelt zu erhalten, eine entscheidende Rolle gespielt. Wir können nur rätseln, wie unsere Welt heute aussehen würde, wenn Papier und Buchdruck nicht erfunden worden wären, oder auch die Revolution der Datenaufbewahrung durch den Computer nicht stattgefunden hätte. Vielleicht werden sogar die Grenzen unseres kulturellen Fortschritts eines Tages unter anderem durch die technischen Grenzen unserer Datenspeicher bestimmt. Schon heute speichert jeder Mensch im Durchschnitt 30 Gigabyte pro Jahr, genug um 30.000 kleine Bücher mit Text zu füllen. Bei Wachstumsraten der gespeicherten Informationsmengen von mehr als 60 Prozent jährlich wird offensichtlich, dass wir neue und bessere Speicher benötigen. Zunehmend mehr Wissenschaftler und Ingenieure glauben, dass die Suche nach dem Datenspeicher der Zukunft, die Suche nach dem Material mit den bestmöglichen Speichereigenschaften ist. Heute baut man unter anderem auf eine ungewöhnliche Materialklasse, die so genannten Phasenwechselmaterialien, die häufig auf Legierungen mit Antimon (Sb) und Tellur (Te) basieren. Das Prinzip eines Speichers, der solche Phasenwechselmaterialien nutzt, ist in Bild 1 dargestellt. In einem extrem kleinen Bereich eines Phasenwechselmaterials wird dabei durch wohldefinierte und extrem kurze Wärmezufuhr die Anordnung der Atome verändert. Während der geordnete kristalline Zustand dem elektrischen Stromfluss nur einen kleinen Widerstand entgegenstellt, hat der ungeordnete amorphe Zustand einen millionenfach höheren Widerstand. Wird der amorphe Zustand nun so stark geheizt, dass die Atome in die energetisch günstigere kristalline Phase umordnen, so wird die Information gespeichert. Ein sol-

cher Datenspeicher hat eine Vielzahl attraktiver Eigenschaften.

So ist die gespeicherte Information auch ohne Stromzufuhr stabil; der entsprechende Speicher wird als „nicht-flüchtig“ bezeichnet. Da die Speicherinformation, anders als bei den meisten Computerspeichern, nicht laufend aufgefrischt werden muss, ist auch der Energiebedarf dieses Speichers moderat. Zudem konnten amerikanische und koreanische Halbleiterkonzerne zeigen, dass Phasenwechselmaterialien auch in extrem kleinen Speicherzellen noch erfolgreich Daten speichern. Der Rekord liegt bei Zellen mit einem Platzbedarf von nur 17 nm x 7 nm. Er übertrifft damit die Speicher-

dichte des heute noch erfolgreichsten nichtflüchtigen elektronischen Datenspeichers, des Flash-Speichers, der unter anderem in Digitalkameras, USB-Sticks und Handys eingesetzt wird, um ein Vielfaches. Daher ist die Industrie zuversichtlich, mit Phasenwechselmaterialien ein Speicherkonzept gefunden zu haben, mit dem man auch noch bei steigender Informationsdichte in 10 bis 15 Jahren Daten speichern kann. Allerdings gibt es eine zweite Klasse von Datenspeichern, die sehr schnell Informationen speichern können und daher zum Beispiel in Rechnern eingesetzt werden, die große Informationsmengen verarbeiten. Allerdings vergessen diese Speicher ihre Infor-

mationen ohne Stromzufuhr und man bezeichnet sie daher als „flüchtig“. Deshalb wird nach einem Speicherkonzept gesucht, das nicht nur eine hohe Speicherdichte und eine nichtflüchtige Speicherung, sondern auch einen schnellen Datentransfer erlaubt. Einen solchen Speicher bezeichnet man als universellen Speicher, da er alle Anforderungen in Idealform erfüllt. Phasenwechselmaterialien haben das Potenzial eines solchen universellen Speichers, wenn sie neben der hohen Speicherdichte und der nichtflüchtigen Speicherung auch eine sehr schnelle Datenspeicherung erlauben.

Wissenschaftler am I. Physikalischen Institut haben sich

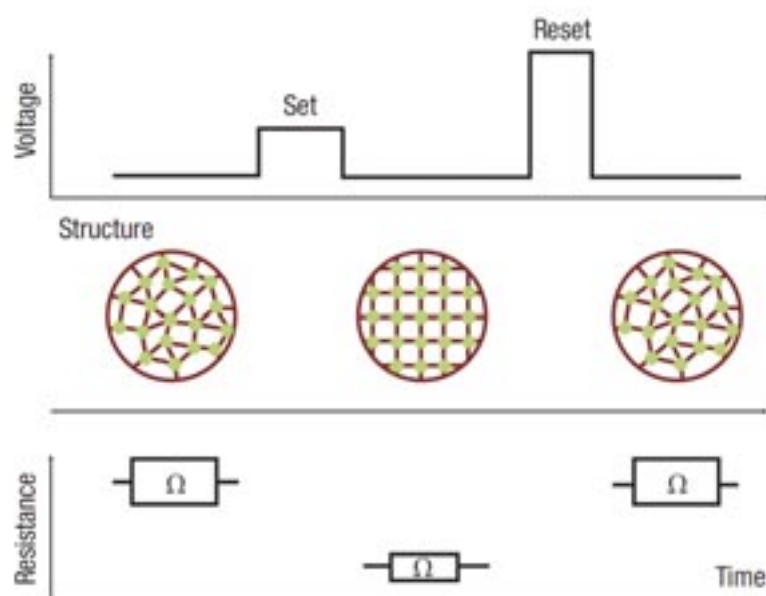


Bild 1: Das Operationsprinzip eines Speichers auf der Basis von Phasenwechselmaterialien. Der Zustand der Speicherzelle wird durch die atomare Anordnung der Atome festgelegt. Ist die Anordnung langreichweitig geordnet (kristallin), so entspricht dies der binären '1', ist das Material hingegen ungeordnet (amorph), so entspricht dies der '0'. Um das Material aus dem amorphen in den kris-

tallinen Zustand zu überführen, muss das Material kurzzeitig über die Glastemperatur erwärmt werden. Dies erhöht die Beweglichkeit der Atome im Material – ohne es zu schmelzen – und erlaubt den Atomen, sich in der energetisch günstigeren kristallinen Ordnung zu arrangieren. Um die Zelle zurückzuschalten, ist ein höherer Spannungspuls notwendig, der das Material lokal auf-

schmilzt. Durch schnelles Abkühlen kann so der flüssigkeitsähnliche Unordnungsstatus in der amorphen Phase eingefroren werden. Da der elektrische Widerstand ( $\Omega$ ) des Materials im amorphen Zustand wesentlich höher ist als im kristallinen Zustand, besteht das ‚Lesen‘ der Speicherzelle einfach in der Messung ihres Widerstandes.

# Phasenwechselmaterialien im Blick

das Ziel gesetzt, die Grenzen der Schaltgeschwindigkeit (und damit der Schreibraten) von Phasenwechselmaterialien zu bestimmen. Die Leserate ist bei diesem Speichertyp ausschließlich von der Ausleselektronik abhängig und kann daher mit jedem anderen Speichertyp konkurrieren. Die Untersuchung des Schreibvorgangs ist aus zwei Gründen sehr anspruchsvoll: Zum einen muss dazu anspruchsvolle Messtechnik entwickelt werden, um Schaltprozesse auf der Nanosekunderskala zu untersuchen; Zum anderen muss genau geprüft werden, welche Materialien überhaupt als Phasenwechselspeicher geeignet sind. Bisher wurden Phasenwechselmaterialien empirisch gefunden, allerdings war dies sehr zeitaufwändig. Am I. Physikalischen Institut ist es gelungen, ein atomistisches Verständnis der ungewöhnlichen Eigenschaften von Phasenwechselmaterialien zu entwickeln. Dieses Verständnis basiert auf der Erkenntnis, dass sich die Art der chemischen Bindung in Phasenwechselmaterialien beim Übergang von der amorphen in die kristalline Phase drastisch ändert. Bislang ist keine andere Materialklasse bekannt, bei der die Änderung der langreichweitigen atomaren Anordnung im Festkörper mit einer Änderung der Bindungsverhältnisse einhergeht. Dies zeigen die Bilder 2 und 3. In Bild 2 erkennt man an den Reflektionsspektren, wie verschieden die optischen Eigenschaften der amorphen und kristallinen Phase sind, die eine Folge der besonderen Bindungsverhältnisse sind. Dies wird schematisch in Bild 3 dargestellt. Das Charakteristikum kristalliner Phasenwechselmaterialien sind die ungewöhnlichen Bindungsverhältnisse, die man auch als Resonanzbindung bezeichnet.

Das Besondere bei kristallinen Phasenwechselmaterialien ist daher das Auftreten einer Resonanzbindung, wie sie zum Beispiel aus der organischen Chemie beim Benzol bekannt ist. Eine solche Resonanzbindung tritt nur dann auf, wenn

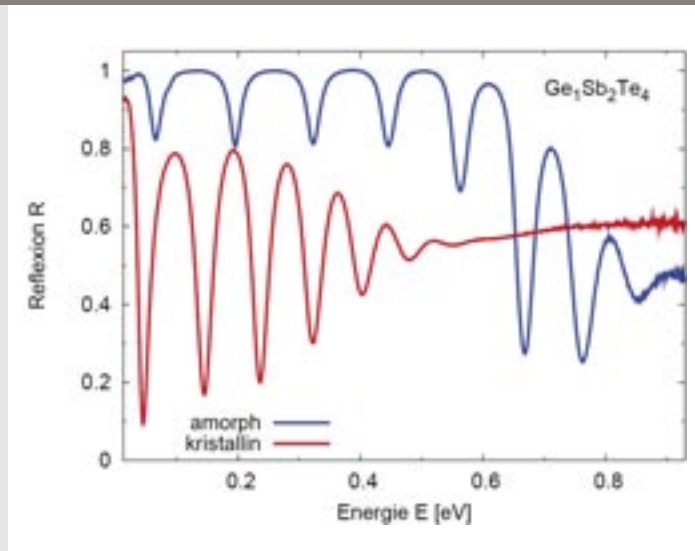


Bild 2: Reflektionsspektrum eines Phasenwechselmaterials ( $\text{Ge}_1\text{Sb}_2\text{Te}_4$ ) in der amorphen (blau) und kristallinen Phase (rot) im infraroten Spektralbereich. Die unterschiedlichen Bindungsverhältnisse in den beiden Zuständen sind für den ausgeprägten Kontrast der optischen Eigenschaften verantwortlich.

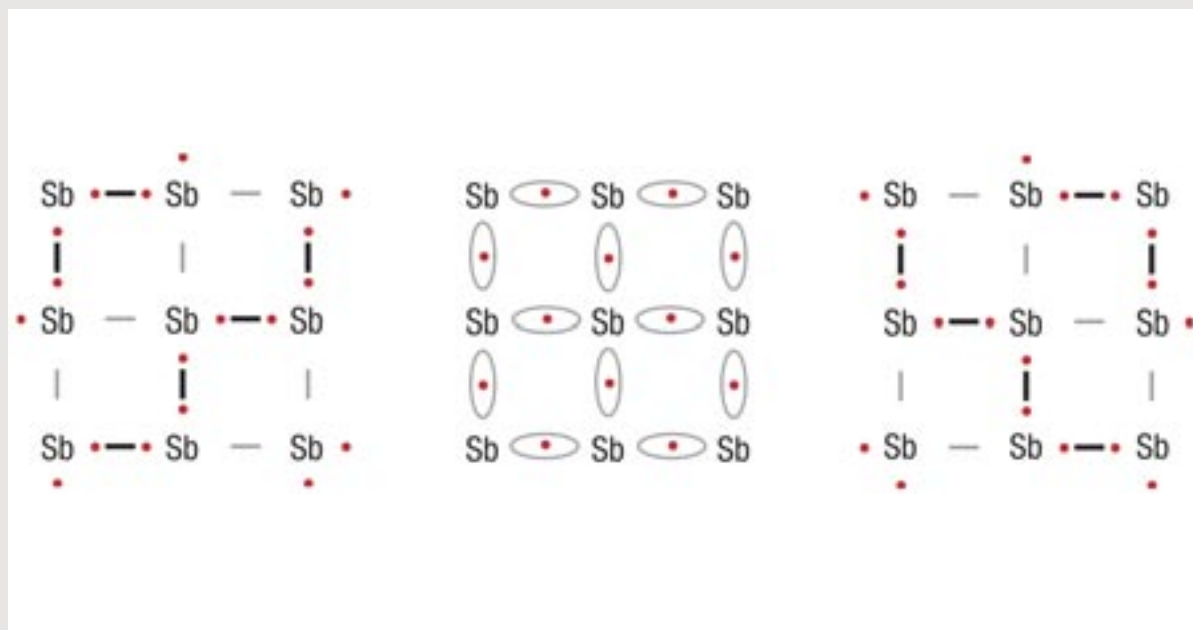


Bild 3: Schematische Darstellung der Resonanzbindung bei kristallinem Antimon (Sb). Links ist eine Grenzstruktur mit kovalenter Bindung dargestellt; rechts eine zweite solche Grenzstruktur. Durch Überlagerung dieser beiden Grenzstrukturen entsteht die Resonanzbindung in der Mitte, bei der besonders hohe elektronische Polarisierbarkeiten auftreten.

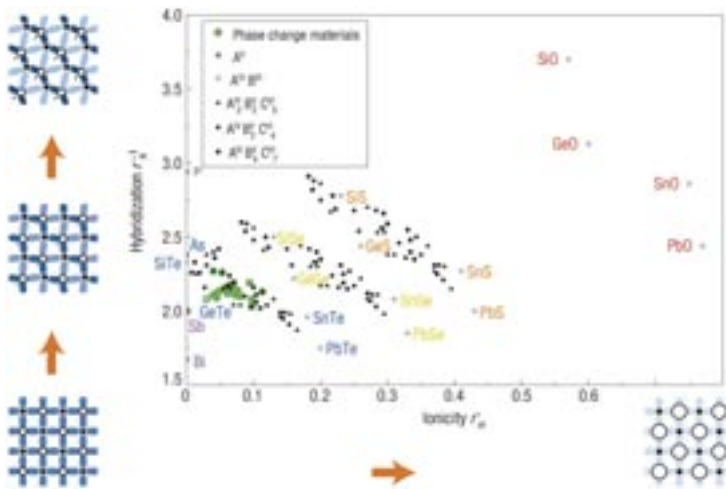


Bild 4: Schatzkarte für Phasenwechselmaterialien. Eine größere Zahl von Verbindungen mit 3 p-Elektronen sind als Funktion der Ionizität und s-p Hybridisierung dargestellt. Phasenwechselmaterialien, die durch grüne Kreise markiert sind, finden sich vor allem in einem kleinen Bereich der Karte (linke untere Ecke), in dem die Verbindungen durch geringe Ionizitäten und kleine s-p-Hybridisierung gekennzeichnet sind.

ein Atom mehr Bindungspartner als Elektronen besitzt, die eine Bindung ausbilden können und zudem benachbarte Atome bereit sind, eine gemeinsame Bindung (kovalente Bindung) einzugehen. Dies geschieht, wenn die unterschiedlichen Atome eines Phasenwechselmaterials nur eine geringe Tendenz haben, eine ionische Bindung auszubilden. Diese Erkenntnis hat zu einer ersten ‚Schatzkarte‘ für Phasenwechselmaterialien geführt, siehe Bild 4.

Man erkennt, dass sich Phasenwechselmaterialien – dargestellt durch grüne Punkte – ausschließlich in der linken unteren Ecke der Karte befinden, da nur dort eine Resonanzbindung auftreten kann. In diesem Bereich haben die beteiligten Atome mehr nächste Nachbarn als Bindungselektronen und zeigen zudem keine starke Neigung zur Ausbildung einer ionischen Bindung. Mit dieser

Schatzkarte lassen sich sehr einfach neue Phasenwechselmaterialien identifizieren und optimieren. Auch Eigenschaftstrends lassen sich so erfolgreich vorhersagen. Den Erfolg dieser Bemühungen belegt Bild 5, das zeigt, dass eine Speicherzelle aus einem Phasenwechselmaterial in etwa vier Nanosekunden geschaltet werden kann. Dies ist eine der schnellsten je gemessenen Schaltzeiten für einen solchen Datenspeicher und liegt in derselben Größenordnung wie die Schaltzeiten der schnellsten heute eingesetzten Computerspeicher, der so genannten DRAM's. Allerdings sind DRAM's flüchtige Datenspeicher, während Phasenwechselmaterialien eine nicht-flüchtige Datenspeicherung erlauben.

Damit belegen die Untersuchungen, dass Speicher aus Phasenwechselmaterialien das Potenzial zum universellen Speicher besitzen. ■■■■

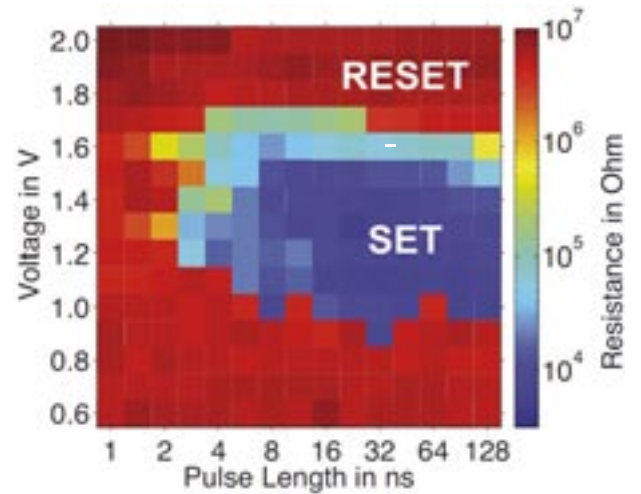


Bild 5: Elektronischer Widerstand einer Speicherzelle aus Phasenwechselmaterial nach Anlegen verschiedener langer Spannungspulse unterschiedlicher Höhe. Die Zelle ist vor Anlegen des Pulses im hochohmigen amorphen Zustand. Bei Spannungen zwischen 1 und 1.6 V lassen sich die Zellen mit kurzen Pulsen von etwa 4 Nanosekunden schalten (blau markierter Bereich).

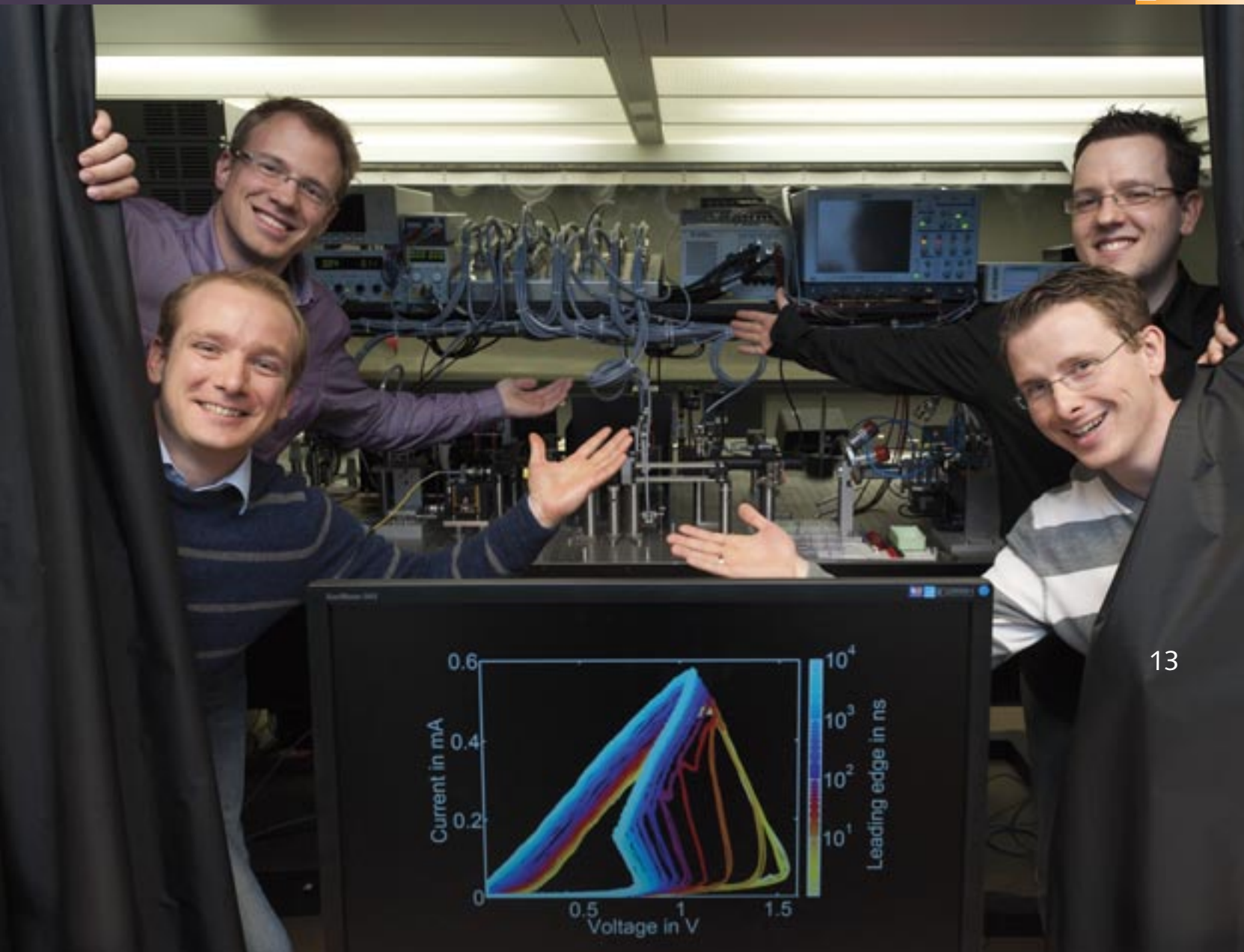
#### Autoren:

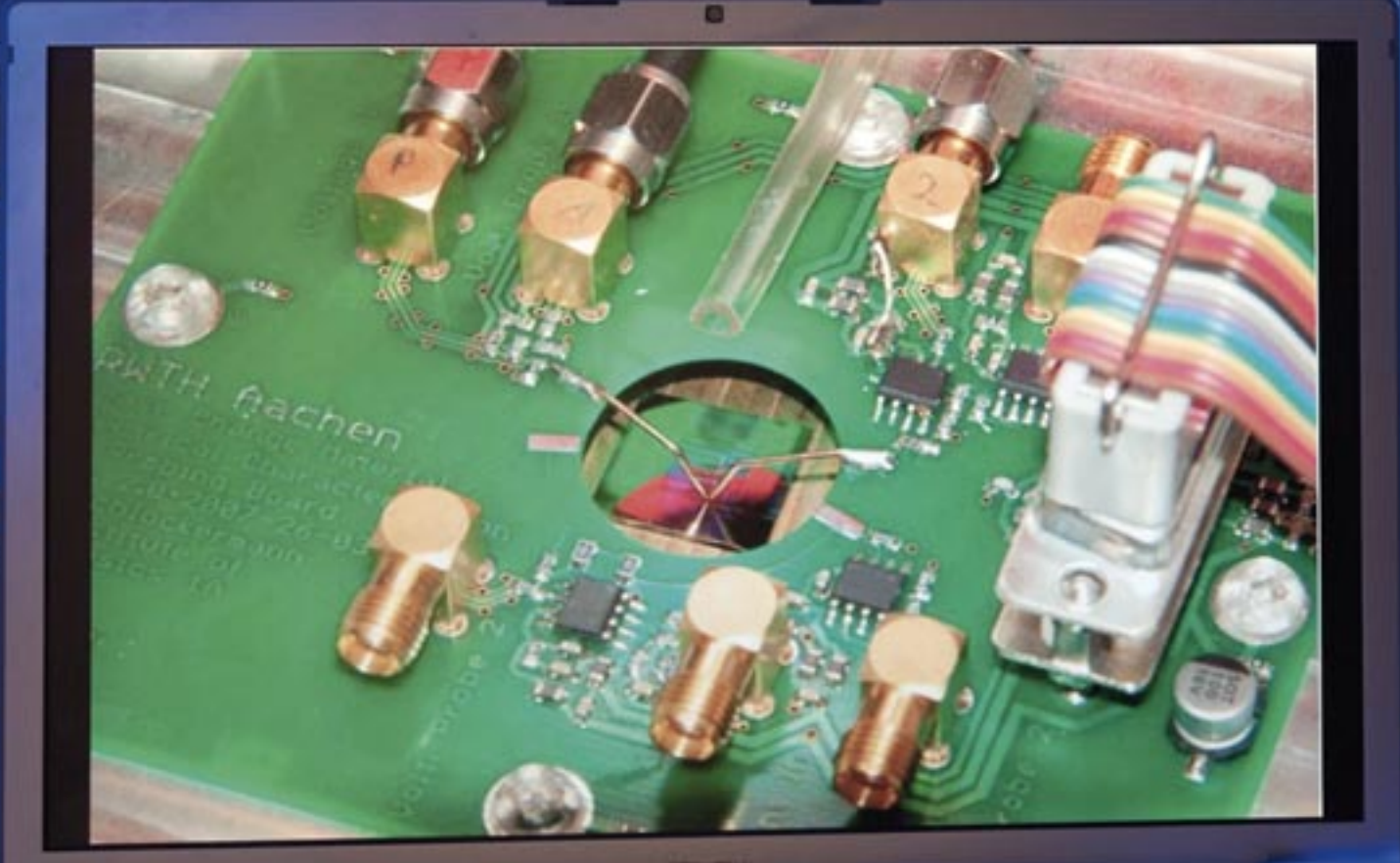
Dr.rer.nat. Dominic Lencer, Dr.rer.nat. Martin Salinga und Dipl.-Phys. Peter Zalden sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am I. Physikalischen Institut. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Matthias Wuttig ist Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik IA.

*Bild 6: Wie in einem Puppentheater führt das Phasenwechselmaterial seinen Schaltvorgang aus, wenn optische oder elektrische Pulse appliziert werden. Der Schaltvorgang läuft dabei so schnell ab, dass bereits Pulse von einer Nanosekunde ausreichend lang sind, um den wenige*

*Nanometer großen Bereich in einen anderen Zustand zu versetzen. Um diesen schnellen Schaltvorgang beobachten und untersuchen zu können, ist anspruchsvolle optische und elektrische Technologie erforderlich, die am I. Physikalischen Institut entwickelt und realisiert wurde. Mit dem gezeigten Aufbau sind die*

*Wissenschaftler in der Lage, Pulse mit einer Dauer von einer Nanosekunde anzulegen und die Reaktion des Materials während der Umwandlung zu beobachten. Foto: Peter Winandy*







*Bild 7: Um den Datenspeicher der Zukunft zu entwickeln, müssen die verwendeten Phasenwechselmaterialien auf den relevanten Zeitskalen, also während des Schaltvorgangs in wenigen Nanosekunden untersucht werden. Dazu wurde am I. Physikalischen Institut ein entsprechen-*

*der Messplatz entwickelt. Die Abbildung stellt unten die Platine zur Kontaktierung einer Zelle und oben das Oszilloskop zur Beobachtung der Strom- und Spannungskennlinien während des Schaltvorgangs dar. Zur Beobachtung von schaltenden Pulsen mit einer Länge von 1 ns ist*

*eine noch kürzere Messdauer notwendig. Diese hohe Messfrequenz wurde realisiert und erlaubt, das Verhalten des Materials bei besonders hohen Schreibgeschwindigkeiten zu untersuchen.*

*Foto: Peter Winandy*

# Gezielt modifizierbar,

## Neuartige Fasermaterialien bilden die Grundlage für eine Vielzahl von Hightech Produkten

# F

Faserartige Materialien begegnen uns jeden Tag, nicht nur in der Bekleidung sondern auch in vielen anderen Bereichen. Die Herstellung von Kunststofffasern ist eine Hightech-Branche! Aktuelle Themenfelder wie die Nutzung nachwachsender Rohstoffe, die Verwendung nano-additiver Werkstoffe, medizintechnische Anwendungen oder der Leichtbau werden am Institut für Textiltechnik untersucht.

### Fasern für Warnwesten und Schutzhelme

Die Herstellung von Chemiefasern erfolgt vornehmlich auf zwei verschiedenen Wegen. Die konventionelle und einfachere Technologie ist das Schmelzspinnen. Hierbei wird das zu verarbeitende Material zunächst aufgeschmolzen, um es in einen verformbaren Zustand zu überführen. Die Schmelze wird durch Mikrometer große Düsen in Fäden ausgeformt. Die Düsenkapillaren haben einen Durchmesser von einigen hundert Mikrometern, die endgültigen Filamente von etwa 20 µm. Damit sind die Fasern wesentlich dünner als ein menschliches Haar, welches ungefähr 100 µm dick ist.

Anschließend erfolgt die kontrollierte Abkühlung und somit Erstarrung der so genannten Filamente. Dabei werden diese gezielt verstreckt, um die gewünschte Feinheit und die mechanischen Eigenschaften einzustellen. Zuletzt werden die Fasern zusammengefasst und aufgewickelt.

Im alternativen Lösungsmittelspinnprozess können Materialien verarbeitet werden, die nicht schmelzbar sind. Diese werden in einem Lösungsmittel gelöst und so in eine fließfähige Form überführt. Die nachfolgenden Prozessschritte ähneln denen beim Schmelzspinnprozess. Es muss jedoch drauf geachtet werden, dass das hinzugefügte Lösungsmittel im Fertigungsprozess dem Material wieder entzogen wird.

Ein anwendungsnahe und gleichzeitig materialwissenschaftlich und prozesstechnisch herausforderndes Beispiel für die Modifikation von Chemie-

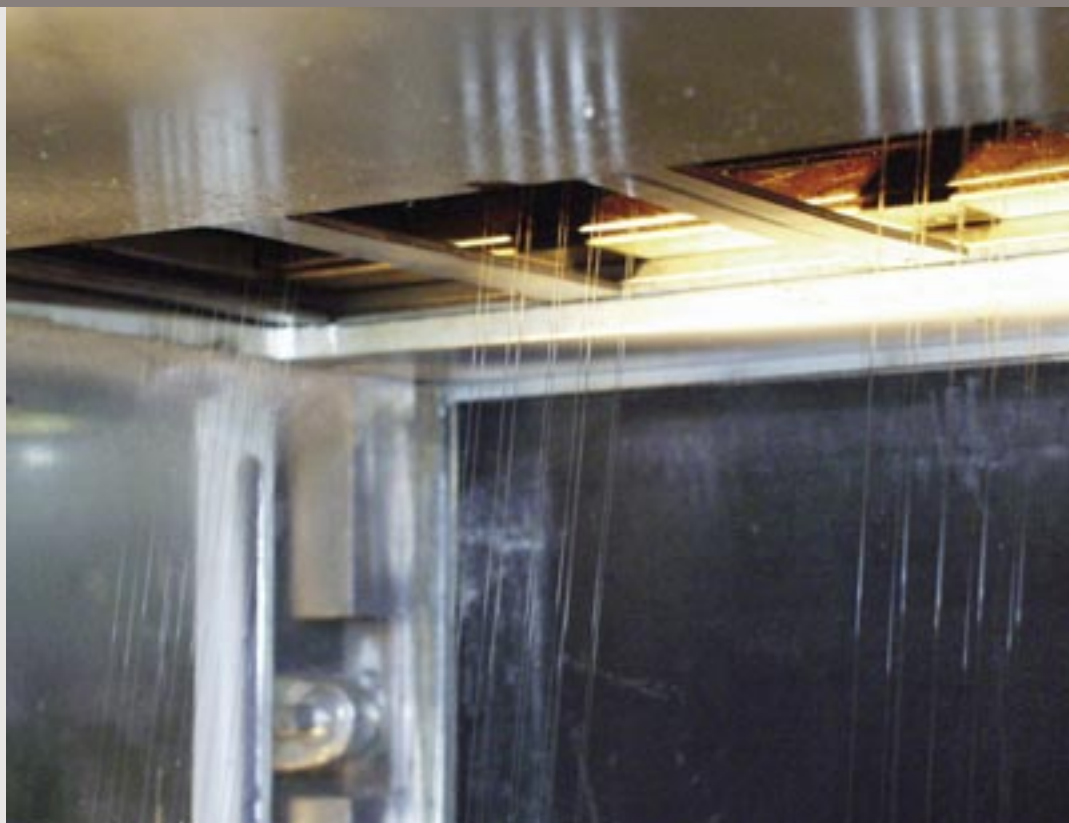


Bild 1: Austritt der Filamente aus der Spinnndüse.

fasern ist die Herstellung von transparenten lumineszierenden Filamenten. In einem von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. geförderten Projekt werden zusammen mit dem DWI an der RWTH Aachen e.V. und dem Lehrstuhl für Feststoff- und Grenzflächenverfahrenstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg derartige Fäden entwickelt. Ziel des Projektes ist es, Polyester mit lumineszierenden Nanopartikeln auszurüsten. Die Nanopartikel erlauben, was zunächst unmöglich erscheint: Eine transparente Einfärbung. Aufgrund ihrer geringen Größe sind sie in ihrem Ausgangszustand für das menschliche Auge nicht sichtbar. Werden die Nanopartikel jedoch mit Strahlung einer bestimmten Wellenlänge angeregt, senden sie sichtbares

Licht aus und der Faden wird sichtbar. Die Herausforderung liegt darin, geeignete Partikel herzustellen und diese in den Kunststoff einzubetten. Das Ausspinnen solcher Materialien erfordert langjährige Prozess Erfahrung, da durch die Additivierung die Verarbeitungseigenschaften verändert werden. Eine denkbare Anwendung dieses Produktes sind Sicherheitsanwendungen wie beispielsweise Warnwesten.

Die Additivierung von Kunststoffen mit Nanopartikeln bietet neben der bereits vorgestellten optischen Modifikation weitere Möglichkeiten. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt das Projekt NanoOrgano, in dem die Möglichkeit zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Bauteile erforscht wird. In Zusammenarbeit mit namhaften Partnern aus der In-

dustrie werden in Polyamid zunächst Nanopartikeln eingebracht. Dies dient der Steigerung der mechanischen Eigenschaften, wie beispielsweise der Schlagzähigkeit. Dieses Material, das Nanocompound genannt wird, wird anschließend im Schmelzspinnprozess zu Fäden versponnen. In einem weiteren Prozessschritt werden diese Fäden mit Aramidfäden im Commingling-Verfahren durchmischt und zu einem so genannten Hybridgarn verarbeitet. Dabei wird der Einfluss der Maschinen- und Prozessparameter (Düsengeometrie, Luftdruck und Produktionsgeschwindigkeit) sowie der Werkstoffparameter (Filamentdurchmesser der Garnkomponenten) durch systematische Versuchsvariation untersucht. Das Hybridgarn aus Polyamid und Aramid wird anschließend zu einer textilen Fläche, zum Beispiel einem Ge-

# vielfältig und innovativ

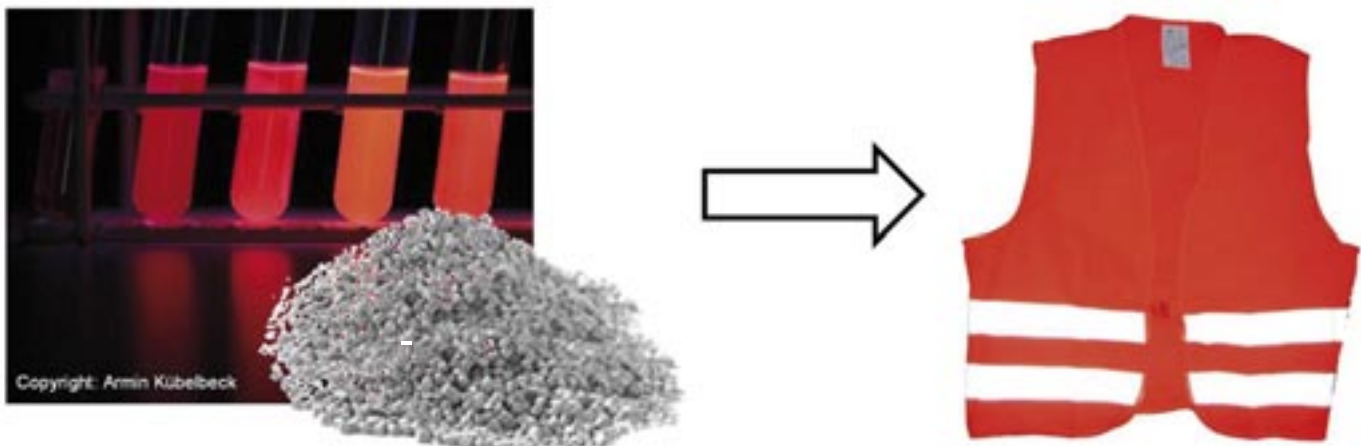


Bild 2: Fluoreszierende Stoffe und Polyester können zusammen zu Warnwesten verarbeitet werden.

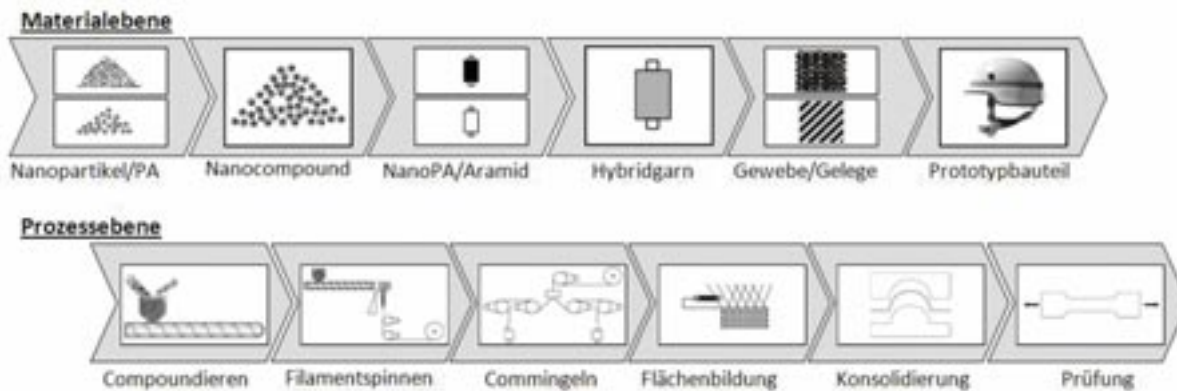


Bild 3: Vorgehensweise im Projekt NanoOrgano.

webe, weiterverarbeitet. Das Potenzial des Hybridgarns zeigt sich in der Weiterverarbeitung: Polyamid ist ein thermoplastischer Werkstoff und daher bei Temperaturen unterhalb von 300° C schmelz- und verformbar. Die Aramidfasern schmelzen bei diesen Temperaturen jedoch nicht. Wird das Textil nun in eine beheizte Presse eingelegt, werden die Polyamidfäden aufgeschmolzen und umfließen die festen Aramidfasern. Das Ergebnis ist ein Faserverbundbauteil, welches aus Aramidfäden in einer Polyamid-Matrix besteht. Mögliche Anwendun-

gen sind aufgrund der hohen Energieaufnahme der Aramidfäden Schutzhelme.

### Implantate für die Medizintechnik

Eine zentrale Herausforderung für die Industrie vor dem Hintergrund einer globalisierten Welt ist die Verkürzung des Produktlebenszyklus' industrieller Güter. Dies resultiert in der Notwendigkeit, immer schneller neue Produkte auf den Markt zu bringen und die Entwicklungszeiten zu verkürzen. Ein Werkzeug hierbei ist das rapid prototyping, beispielsweise mit-

tels selektivem Lasersintern, kurz SLS. SLS ermöglicht eine werkzeuglose Herstellung komplexer Bauteile aus thermoplastischen Materialien. Die sehr begrenzte Werkstoffpalette limitiert jedoch bisher den Anwendungsbereich. Der Lösungsansatz ist die Entwicklung einer neuen Verfahrenstechnik basierend auf der Herstellung teilkristalliner Filamentgarne. Hierzu werden zunächst geeignete Polymere ausgewählt und additiviert. Die so auf die Anwendung zugeschnittenen Materialien werden im Schmelzspinnprozess verarbeitet. Im Rahmen

der Prozessentwicklung wird ein Faserkonverter konstruiert, mit dem die ersponnenen Fasern auf definierte Längen < 0,1 mm geschnitten werden. Diese werden als Rohstoff dem Lasersintern zugeführt. Die Verwendung geschnittener teilkristalliner Fasern verbessert das Sinterverhalten und ermöglicht somit die Verwendung neuer Materialien in diesem Prozess. Anwendung finden gesinterte Werkstoffe unter anderem als Implantate in der Medizintechnik, beispielsweise bei Schädelverletzungen, siehe Bild 4. In diesem Fall liegt der innovative

Bild 4: Lasergesintertes Schädelimplantat [RKW+08].  
 Quelle: Rietzel, D., Kühnlein, F., Wendel, B., Feulner, R., Hülder, G.: Enhanced range of plastics for Selective Laser Sintering: serving different user profiles and also consumer and industry requests.  
 Quelle: Proceeding Euro-u Rapid 2008, Berlin, September 2008.



Bild 5: Zyklus der Verwendung biobasierender Polymere.

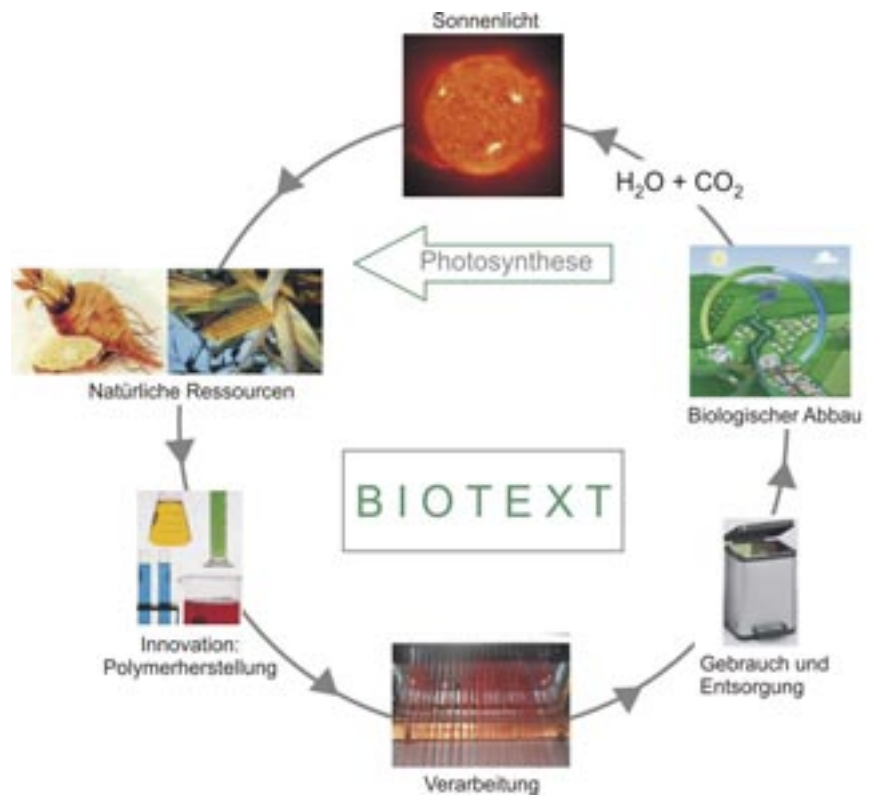
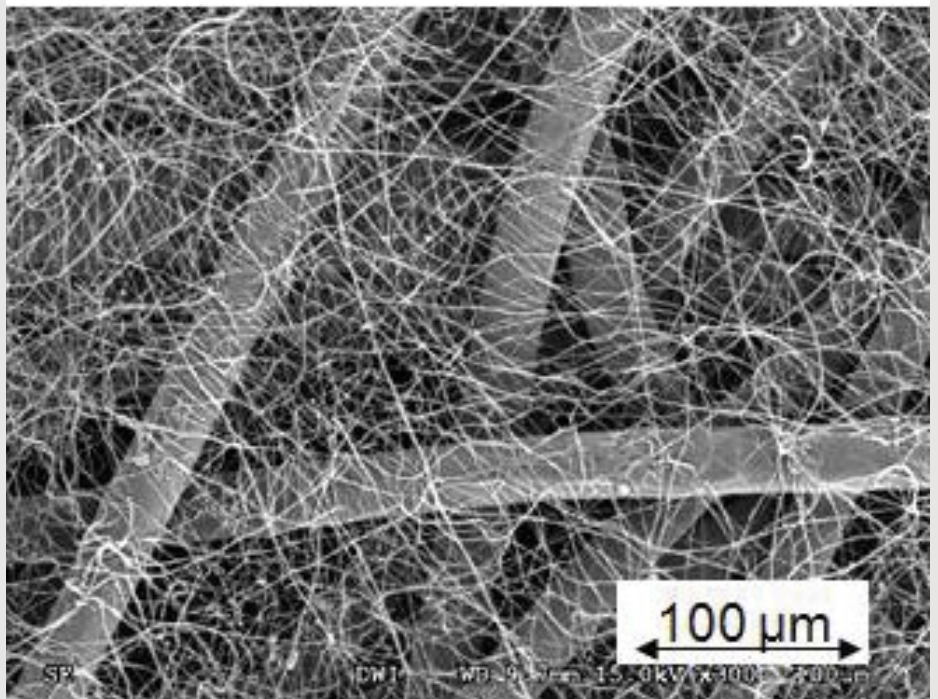


Bild 6: Nanofasern auf Trägervliesstruktur.



Charakter sowohl in der Auswahl und Additivierung des Kunststoffes, als auch in der Prozessführung und der Entwicklung eines geeigneten Faserkonverters.

#### Neue Technologien und alternative Rohstoffe

Die Anwendung von erneuerbaren Ressourcen in der Produktion von Polymeren geht Hand in Hand mit einer wachsenden Nutzung von alternativen Rohstoffen einher. Inzwischen sind die ersten Biopolymere, wie zum Beispiel Polylactide (PLA), schon in einigen Anwendungen genutzt worden. Trotz alledem ist weitere Forschung notwendig, um die Möglichkeiten dieser neuen Polymerklassen zu untersuchen. Diese sind nicht nur imstande, die Abhängigkeit der Textilindustrie vom Öl zu verringern, sondern können auch durch ihre spezifischen Eigenschaften zu neuen und innovativen Pro-

dukten führen, die benötigt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Textilindustrie zu wahren.

Ein weiterer Weg, um neue Fasermaterialien entwickeln zu können, ist der Aufbau neuartiger Spinntechnologien. Hier ist beispielsweise das Schmelzelektrosinnen zu nennen. Dabei werden Vliese aus Massenkunststoffen wie Polypropylen mit einem durchschnittlichen Faserdurchmesser von 500 nm zu erzeugen sein. Der geringe Energieverbrauch und der einstufige Prozess zeichnen dieses Verfahren aus. Letzteres ist ein deutlicher Vorteil gegenüber dem Spinnen aus der Lösung. In einem Projekt zwischen dem Institut für Textiltechnik, dem DWI und dem Institut für elektrische Maschinen ist es gelungen, mit 64 Spinnköpfen eine Produktivität von 18 m<sup>2</sup>/h zu erreichen. Die Vliesstrukturen sind dabei mit einem Flächengewicht von 0,5 g/m<sup>2</sup> extrem leicht.

Neue Anwendungen für Fasern lassen sich auch durch die Nutzung von Materialien, die bisher nicht verwendet werden konnten, erschließen. Dies sind beispielsweise Kunststoffe, die hochtemperaturstabil sind. Das Einsatzgebiet bei hohen Temperaturen fordert hinsichtlich der Verarbeitung neue Technologien. Konventionelle Spinnanlagen sind darauf ausgelegt, lediglich bis etwa 300 °C aufheizen zu können. Der Aufbau einer Hochtemperaturspinnanlage ermöglicht zukünftig die Verarbeitung von Materialien wie Polyetheretherketon (PEEK) und Polyetherimid (PEI) und somit den Zugang zu neuen Anwendungen. Dies kann beispielsweise der Einsatz im Motorraum von Fahrzeugen sein, in dem aufgrund der auftretenden Temperaturen herkömmliche Kunststoffe nicht verwendet werden können.

Die beschriebenen Beispiele illustrieren die Vielfältigkeit und

die Anwendungsbreite von Chemiefasern. Am Institut für Textiltechnik besteht die Möglichkeit, die hergestellten Materialien entlang der textilen Kette weiterzuverarbeiten.

Zunächst werden hieraus textile Flächen – wie beispielsweise Biaxialgewirke – hergestellt. Anschließend können diese Materialien zu Verbundbauteilen wie Textilbeton oder Faserverbundkunststoffen weiterverarbeitet werden.

#### Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Thomas Gries ist Inhaber des Lehrstuhls für Textilmaschinenbau und Leiter des Instituts für Textiltechnik. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Gunnar Seide leitet den Bereich Chemiefasertechnik am Institut für Textiltechnik. Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Christian Wilms ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik.

Anzeige

SEW-EURODRIVE—Driving the world

Ihre Freunde wissen nicht,  
wo Bruchsal liegt?  
**Sagen Sie einfach:  
an der Spitze  
der Antriebstechnologie.**

Jahre **80**  
Kompetenz in  
Antriebstechnik

**Menschen mit Weitblick und Schaffenskraft gesucht.** Was halten Sie von einem Einstieg bei einem der führenden Spezialisten für Antriebstechnologie? Wir suchen Köpfer, Macher, Denker und Lenker. Menschen, die mit Kompetenz und Tatkraft Spitzenleistungen erbringen wollen, um Gutes noch besser zu machen. Menschen, die die Möglichkeiten eines weltweit erfolgreichen Unternehmens ebenso schätzen wie seine familiären Wurzeln. Menschen, die täglich Mut und Einsatz zeigen für neue Ideen: für Getriebe, Motoren und Antriebssysteme, die in Zukunft Maßstäbe setzen werden. Menschen, die Visionen haben und wissen, wie man sie verantwortungsvoll verwirklicht. Menschen, die das Ganze sehen. Menschen wie Sie? Herzlich willkommen bei SEW-EURODRIVE.

[www.karriere.sew-eurodrive.de](http://www.karriere.sew-eurodrive.de)

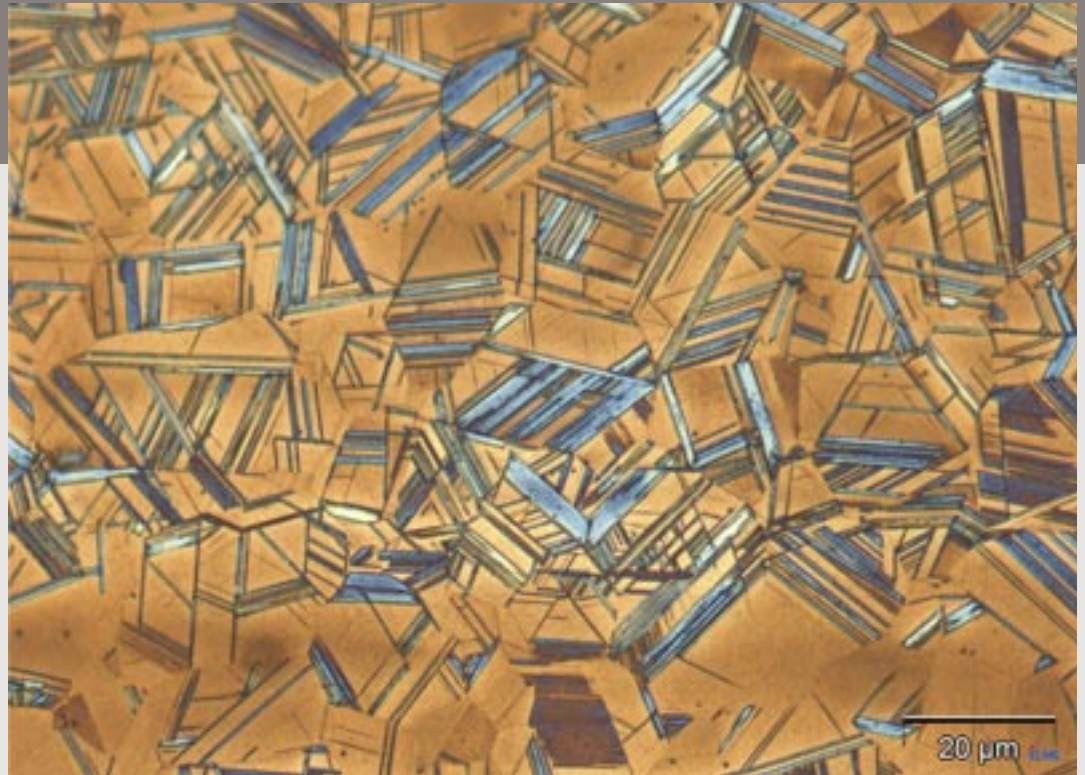
**SEW**  
**EURODRIVE**

# Stahl ab initio

Im Sonderforschungsbereich 761 „Stahl ab initio – Quantenmechanisch geführtes Design neuer Eisenbasis-Werkstoffe“ arbeiten Naturwissenschaftler und Ingenieure vom Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf und der RWTH Aachen zusammen an der Entwicklung neuer Werkstoffe. Dies geschieht unter anderem auf Basis von ab initio Ansätzen, also unter Nutzung von lediglich auf Naturkonstanten aufbauenden numerischen Modellen, sowie weiteren mesoskopischen Modellierungsansätzen. Damit sollen ein neuer Weg zur schnellen und zielgerichteten Entwicklung einer neuen Gruppe von Strukturwerkstoffen aufgezeigt und gleichzeitig ab initio Ansätze für ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen in der Werkstofftechnik eingesetzt und weiterentwickelt werden.

## Auswahl des Legierungssystems Fe-Mn-C

Ziel ist es, das Legierungssystem Fe-Mn-C im Hinblick auf seine Eignung zur Entwicklung neuer Strukturwerkstoffe zu untersuchen. Dabei ist das System Fe-Mn-C vor allem für Anwendungen von Interesse, die eine Kombination von hoher Festigkeit einerseits und guter Kaltumformbarkeit, hohem Verschleißschutz oder guten Tieftemperatureigenschaften andererseits erfordern. Es wurde gewählt, da die Eigenschaften dieses Legierungssystems im Wesentlichen durch die chemische Zusammensetzung beeinflusst werden, so dass die Werkstoffe für eine thermodynamische Modellierung besonders geeignet erscheinen. Das Werkstoffverhalten mit seiner außergewöhnlich attraktiven Kombination von hoher Festigkeit bei gleichzeitig guter Umformbarkeit kann bei diesen Stählen auf unterschiedliche Verformungsmechanismen zurückgeführt werden. Abhängig von der Stapelfehlerenergie treten die Verformungsmechanismen homogenes oder inhomogenes Versetzungsgleiten, mechanische induzierte Martensitbildung – TRIP-Effekt



*Bild 1: Gefüge eines hochmanganhaltigen Stahles. Braun erscheint das austenitische Grundgefüge, hellblau die durch Verformung aufgetretenen Martensitlamellen (TRIP-Effekt).*

(transformation induced plasticity) – mechanisch induzierte Zwillingsbildung – TWIP-Effekt (twinning induced plasticity) – im Material auf.

Bei der Gefügebildung ist es deshalb besonders wichtig, die Phasenstabilität des Austenits zu kennen, was im Wesentlichen über die Ermittlung der Stapelfehlerenergie erfolgt.

Ein Stapelfehler ist ein zweidimensionaler Gitterfehler, der sich in einer kubischflächenzentrierten Struktur dadurch darstellt, dass die regelmäßige Reihenfolge der dichtest gepackten Ebenen unterbrochen wird. Man kann sich dies anschaulich so vorstellen, dass eine eingeschobene Versetzung in zwei Partialversetzungen aufgespalten wird und sich diese Partialversetzungen in einem definierten Abstand zueinander anordnen. Zwischen ihnen wird ein Stapelfehler aufgespannt, in dem die normale Reihenfolge der dichtest gepackten Ebenen der kubisch-flächenzentrierten

Kristallstruktur nicht mehr gegeben ist. Mit dieser Anomalie in der Reihenfolge verbunden ist als Werkstoffkenngröße eine charakteristische Energie: die Stapelfehlenergie. Da sowohl die Zwillingsbildung als auch die Martensitbildung mittels Partialversetzungen interpretiert werden können, ist das Vorhandensein und die Aufspaltungswerte von Partialversetzungen und damit letztendlich die Stapelfehlenergie ein Parameter, der die verschiedenen Verformungsmechanismen in kubisch-flächenzentrierten Werkstoffen steuert. Die Stapelfehlenergie hat für die Modellierung eine verbindende Funktion, da sie einerseits für theoretische Chemiker und Physiker als Kenngröße mittels ab initio Ansätzen berechenbar ist, andererseits für Werkstoffingenieure einen Materialparameter darstellt, der die Auswahl verschiedener Verformungsmechanismen und damit die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften ermöglicht.

## Methodischer Ansatz

Im Sonderforschungsbereich werden unterschiedliche Modellierungsansätze verfolgt. Dabei wird keine durchgehende Prozesssimulation vorgenom-

men und auch nicht für alle untersuchten Phänomene eine alle Skalen übergreifende Werkstoffmodellierung angestrebt. Vielmehr sollen die wichtigsten thermodynamischen, kinetischen und mikromechanischen Effekte in den Grundlagen erkenntnisorientiert auf der jeweils für das Phänomen wichtigen Größenskala behandelt werden. Die Phänomene werden dann skalenübergreifend mittels „Scale hopping“ betrachtet; darunter wird beispielsweise verstanden, dass auf der atomistischen Ebene erhaltene quantenmechanische Informationen unmittelbar in mikrostrukturellen oder makroskopischen Modellen eingesetzt werden.

Eine Besonderheit ist, dass in mehreren Teilprojekten ab initio Methoden zum Einsatz kommen. Darunter versteht man, dass basierend auf der Elektronenkonfiguration die Bindungsverhältnisse von Molekülen und Kristallstrukturen vorhergesagt werden können. Grundlage hierfür ist die Schrödinger-Gleichung, die in ihrer allgemeinen Form bereits 1926 aufgestellt wurde. Mit der Einführung von vereinfachenden Annahmen zur gegenseitigen Beeinflussung von Elektronen in

# Neue Methoden zur Entwicklung von Strukturwerkstoffen

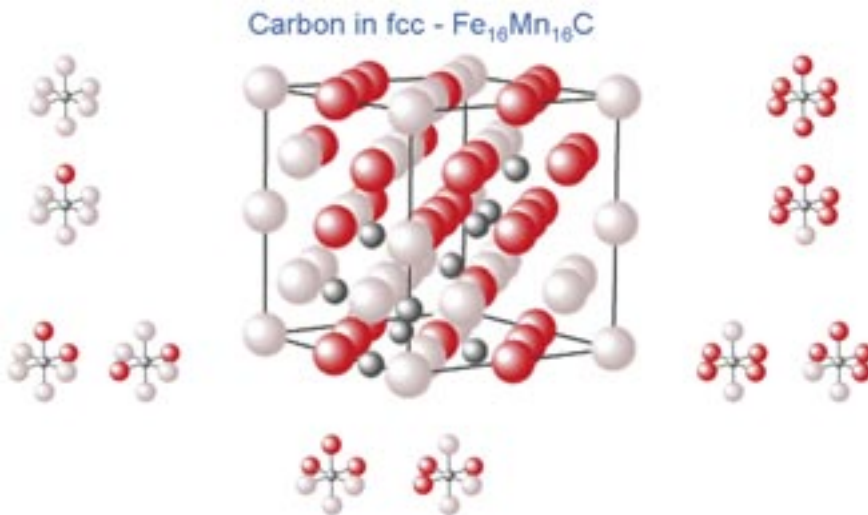
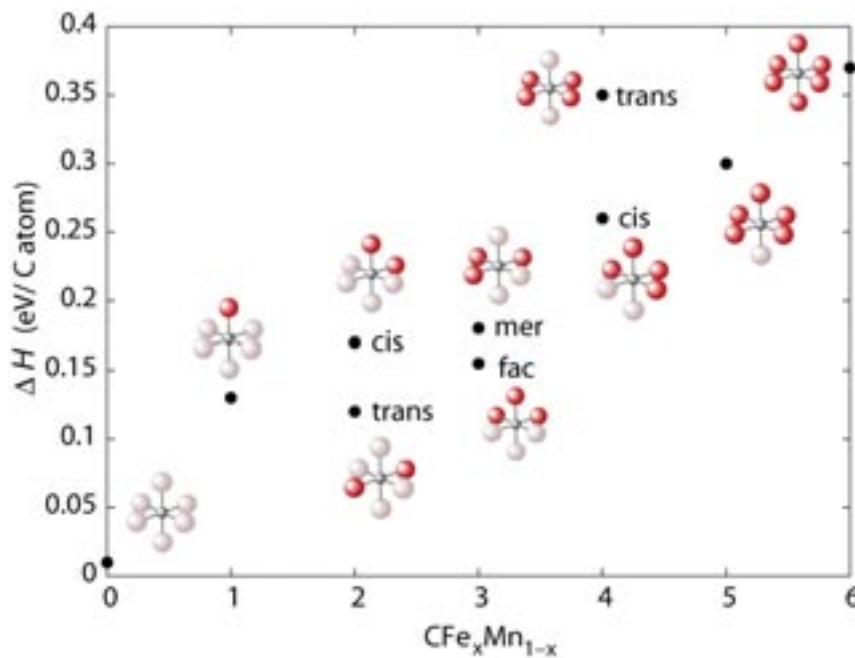


Bild 2: Ab initio Berechnung der Bindungsenthalpie der unterschiedlichen Fe-Mn-C-Konfigurationen.



der Dichtefunktionaltheorie können nun auch Viel-Elektronensysteme wie beispielsweise Festkörper behandelt werden, weil die erforderliche Rechenleistung zur Lösung der Schrödinger-Gleichung deutlich sinkt. Die ab initio Modellierung wird beispielsweise dort genutzt, wo es um das grundlegende Verständnis der Wirkung von Fremdatomen

in einer Matrix geht, also zum Beispiel der Rolle von Legierungselementen oder der Wechselwirkung von interstitiellen und substitutionellen Atomen.

Parallel zu den theoretischen Ansätzen werden experimentelle Arbeiten durchgeführt. Hier liegen die Herausforderungen einerseits in der Technologieentwicklung zur Herstellung der

hoch legierten Werkstoffe; andererseits werden neue Untersuchungsmethoden für gezielte wissenschaftliche Fragestellungen entwickelt. Weiterhin dienen umfangreiche experimentelle Untersuchungen sowohl zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens als auch zur Evaluierung der numerischen Modellierung.

## Ab initio Berechnungen mit Superzellen

Auf atomarer Skala werden lokale Ordnungsphänomene untersucht, die experimentell nicht zugänglich sind, wie zum Beispiel die kohlenstoffinduzierte Nahordnung von Fe- und Mn-Atomen. Nachdem gezeigt werden konnte, dass in binären Fe-Mn-Legierungen die Verteilung der Metallatome auf die Plätze des Gitters statistisch verteilt erfolgt, wird in einem Rechnerexperiment eine Fe-Mn-Superzelle aus 16 Eisen- und 16 Manganformen aufgebaut. Diese Superzelle beinhaltet alle denkbaren Typen von Oktaederlücken mit unterschiedlicher Anordnung der Eisen- und Manganatome. Ein einzelnes Kohlenstoffatom wird nacheinander in die zehn möglichen unterschiedlich koordinierten Oktaederlücken eines kubisch-flächenzentrierten Fe/Mn-Gitters eingelagert und jeweils die theoretische Reaktionsenthalpie berechnet. In einer Auftragung der Enthalpiedifferenzen gegen die Zahl der direkten Eisennachbarn (rote Atome) zeigt sich, dass umso mehr Energie aufgebracht werden muss, je eisenreicher das Oktaeder um den Kohlenstoff ist, siehe Bild 2. Die größte Reaktionswärme wird demnach frei, wenn das C-Atom von einem reinen Mn6-Oktaeder, das in einer statistischen Verteilung jedoch äußerst selten vorkommt, umgeben ist. Diese Rechnung wurde für 0 Kelvin durchgeführt; es wird angenommen, dass der Enthalpieunterschied von etwa 35 kJ in dieser Größenordnung vom Entropieverlust bis zur Schmelztemperatur nicht ausgeglichen werden kann, so dass eine Nahordnung von Kohlenstoff und Mangan auch bei den technisch interessanten Temperaturen wahrscheinlich ist.

*Bild 3: Konfokalmikroskopisch ermittelte Oberflächentopographie eines zwillingsbildenden hochmanganhaltigen Stahles in drei Stadien der Umformung im Zugversuch. Oben: unverformt, mitte, 2 Prozent Dehnung, unten: 6 Prozent Dehnung. Das in Rot hervorgehobene austenitische Korn zeigt mit zunehmender Dehnung parallele Strukturen, welche als Gleitstufen oder Zwillinge interpretiert werden können.*

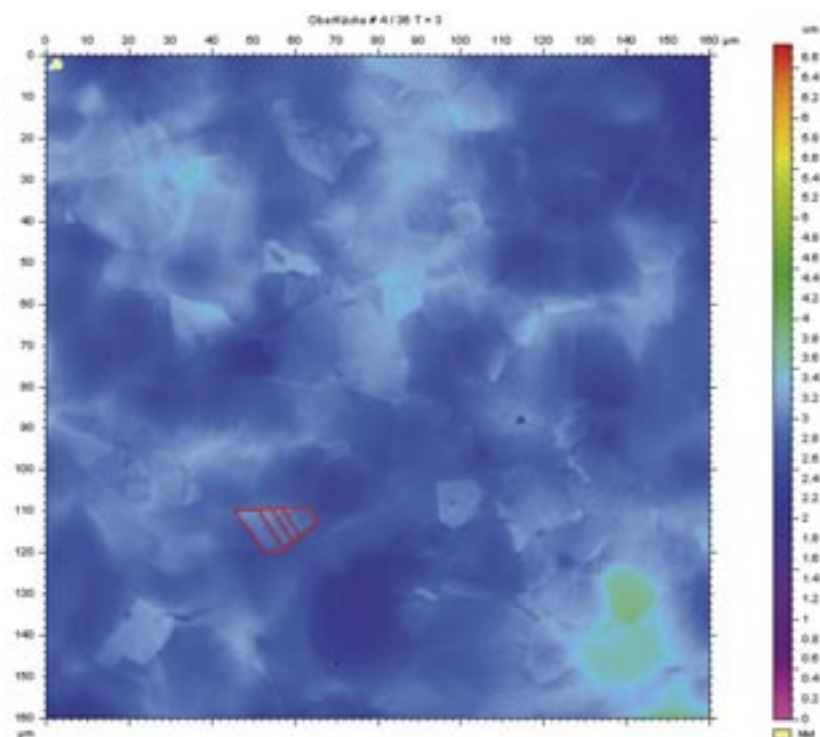
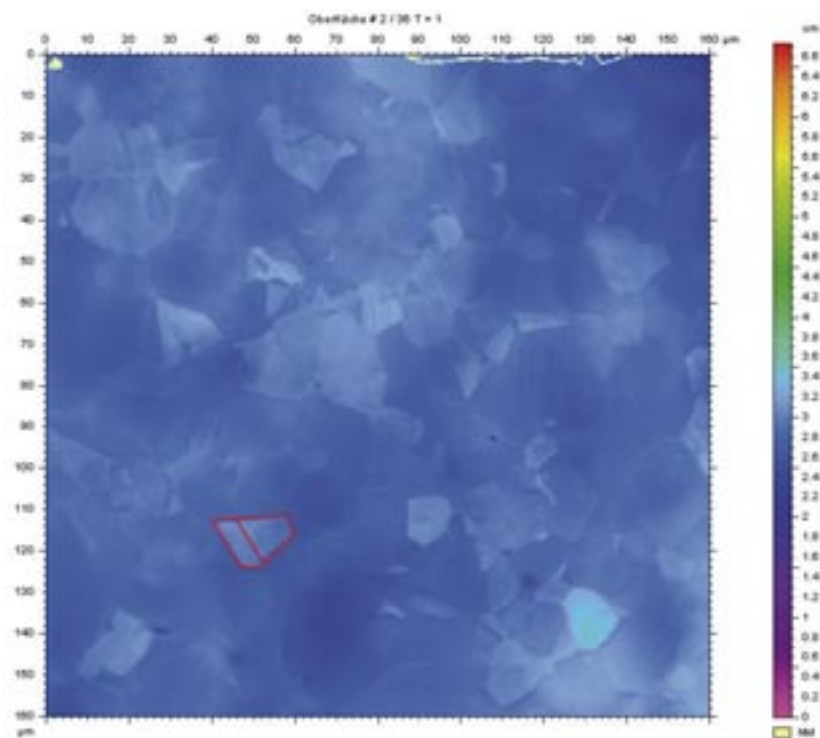
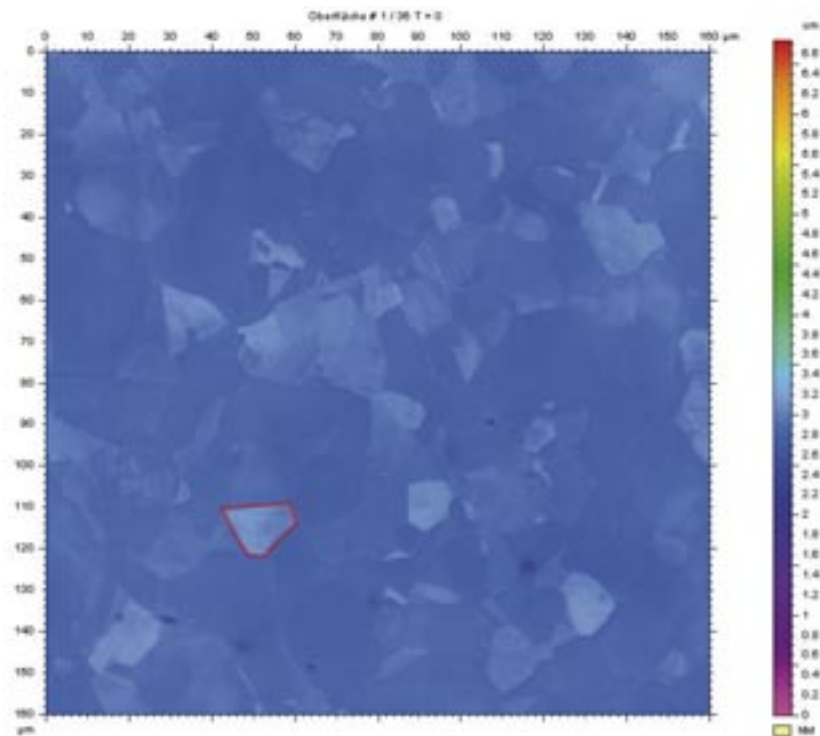
### Experimentelle Ermittlung mechanischer Eigenschaften

Die Zusammenhänge der auf verschiedenen Skalen berechneten Einflussgrößen mit den erwarteten Verformungsmechanismen werden in einem nächsten Schritt experimentell überprüft. Dazu werden verschiedene Korngrößen im Gefüge eingestellt sowie unterschiedliche Prüftemperaturen und Dehngeschwindigkeiten im Zugversuch ausgewählt. Für Gefügeuntersuchungen werden lichtoptische Methoden wie die konfokale Mikroskopie (siehe Bild 3) und TEM-Techniken genutzt. Wo diese Methoden an ihre Grenzen stoßen, werden unterstützend EBSD- und XRD-Techniken eingesetzt, um die Martensit- oder Zwillingsbildung genau differenzieren zu können. Das Ziel ist, über das Verständnis der Grundlagen der Zwillings- und Martensitbildung und deren Kontrolle eine möglichst genaue Vorhersage der Verformungsmechanismen anhand von chemischer Zusammensetzung, Korngröße und Umformparametern zu treffen.

22

### Autoren:

Dr.rer.nat. Jörg von Appen ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anorganische Chemie. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck ist Inhaber des Lehrstuhls und Leiter des Instituts für Eisenhüttenkunde. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Richard Dronskowski hat den Lehrstuhl für Festkörper- und Quantenmechanik inne. Dr. Alireza Saeed-Akbari, MSc. und Dipl.-Ing. Sascha Hoffmann sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Eisenhüttenkunde.



# Der neue FORD FOCUS. Starten Sie ein Auto und so viel mehr.

Am 9. April bei Ihrem Ford Partner.

[ford.de](http://ford.de)

**Denkt an Sie.**  
Das Verkehrsschild-Erkennungssystem.

**Denkt für Sie.**  
Der Fernlicht-Assistent.

**Denkt auch an andere.**  
Active City Stop.

**Denkt, damit Sie sich auf den  
Fahrspaß konzentrieren können.**  
Richtungweisende Spitzentechnologien.

**Econetic**  
TECHNOLOGY



Kraftstoffverbrauch (in l/100 km nach VO (EC) 715/2007): 11,3–5,1 (innerorts), 6,5–3,7 (außerorts), 8,3–4,2 (kombiniert). CO<sub>2</sub>-Emissionen (kombiniert): 139–109 g/km (vorläufige technische Daten).

**Feel the difference**

# Abfallprodukt wird Rohstoff!

**F**Es ist eigentlich ein nahe liegender Gedanke: Wenn die Menschheit schon zu viel Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) produziert und damit ein Ungleichgewicht in dem natürlichen Kohlendioxidkreislauf erzeugt, warum sollte man dann nicht versuchen, dieses an sich harmlose Gas für etwas Nützliches einzusetzen? In diesem Sinne arbeiten Wissenschaftler am CAT Catalytic Center an einer nachhaltigen Verwertung von CO<sub>2</sub>. Ziel ist die technische Erschließung von CO<sub>2</sub> als Synthesebaustein für Polymere.

Bereits heute wird CO<sub>2</sub> mit vorhandenen Technologien in einer Reihe von bedeutenden chemischen Prozessen als Rohstoff eingesetzt. Der Chemiker spricht von einem C1-Baustein. So werden bei der jährlichen Produktion von etwa 30 Millionen Tonnen Methanol aus Synthesegas, einem Gemisch aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff, rund zwei Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> zugesetzt und ebenfalls in Methanol umgewandelt. Salicylsäure, eine der Vorstufen für die Herstellung von Acetylsalicylsäure, dem Wirkstoff in Aspirin®, wird ebenfalls unter Einsatz von CO<sub>2</sub> hergestellt, wobei 30.000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr verbraucht werden. Harnstoff ist das Produkt, bei dessen Herstellung mengenmäßig am meisten CO<sub>2</sub> als C1-Baustein eingesetzt wird. In der jährlichen Herstellung von rund 146 Millionen Tonnen Harnstoff werden etwa 107 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> in den Produktkreislauf zurückgeführt. Harnstoff wird hauptsächlich als Dünger in der Landwirtschaft genutzt, ist aber auch ein interessanter chemischer Baustein.

Über die in der chemischen Industrie bekannten Verfahren, CO<sub>2</sub> nutzbringend zu verwerten, hinaus, gibt es viele innovative Ideen, wie das Molekül in Zukunft genutzt werden kann. Diskutiert werden derzeit vor allem vier interessante Technologien: der Einbau von CO<sub>2</sub> in Polymere, die Hydrierung von CO<sub>2</sub> sowie seine elektro- oder photokatalytische Aktivierung. Die Herstellung von Polymeren aus CO<sub>2</sub> er-



*Bild 1: Bereits heute wird CO<sub>2</sub> industriell als Rohstoff genutzt. Dies gilt beispielsweise für die Erzeugung von Salicylsäure, die benötigt wird, um Aspirin herzustellen.*

*Foto: www.fotolia.com*

weist sich dabei derzeit als besonders viel versprechender Ansatz.

Bei der Verwertung von CO<sub>2</sub> stellen sich besondere Herausforderungen: Als Endprodukt der Verbrennung ist CO<sub>2</sub> thermodynamisch sehr stabil und befindet sich auf einem niedrigen energetischen Niveau. Um eine ausreichende Triebkraft für den Einbau von CO<sub>2</sub> zu erreichen, sind daher Umsetzungen mit hochreaktiven und energetisch höher liegenden Reaktionspartnern besonders attraktiv. Durch die Wahl geeigneter Katalysatoren lässt sich dann im Idealfall die chemische Reaktion der beiden Partner soweit beschleunigen und in die gewünschte Richtung lenken, dass das Verfahren wirtschaftlich wird. Hier ist jedoch noch viel grundlegendes Wissen über die Wirkungsweise der Katalysatoren erforderlich, um möglichst schnell zu optimalen Lösungen zu gelangen.

Die stoffliche Verwertung von Kohlendioxid besitzt das Potenzial, einen wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Beitrag zur chemischen Wertschöpfungskette zu leisten und als ein, wenn auch kleiner, Baustein zum Klimaschutz beizutragen. So stehen der derzeitigen Nutzung von CO<sub>2</sub> als Industrie-gas mit 20 Millionen Tonnen pro Jahr und der Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff in der chemischen Industrie mit 110 Millionen Tonnen pro Jahr durch den Menschen verursachte CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 30 Milliarden Tonnen pro Jahr gegenüber. Mengenmäßig ist der Beitrag einer verstärkten Nutzung von CO<sub>2</sub> begrenzt. Das Interesse liegt vielmehr darin begründet, dass CO<sub>2</sub> einen Wertstoff mit interessantem Anwendungsprofil und Wertschöpfungspotenzial für die chemische Industrie darstellt. Es bieten sich spannende Möglichkeiten, neue Produkte herzustellen und über verbesserte Herstellungsverfahren Energie einzusparen.

Es gibt verschiedene Kriterien Syntheserouten ausgehend von CO<sub>2</sub> zu bewerten:

- Ein wichtiges Bewertungskriterium ist das Fixierungspotenzial von CO<sub>2</sub>. Fixierungsmenge und -dauer variieren stark in Abhängigkeit von Produkt und Anwendungsgebiet. Polymere erweisen sich hier als besonders effektive CO<sub>2</sub>-Speicher, da man relativ gesehen viel CO<sub>2</sub> einbauen kann und sie CO<sub>2</sub> für die Dauer ihres Einsatzes über Jahre oder Jahrzehnte chemisch binden können.
- Die Reinheit des eingesetzten Kohlendioxids spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, da Verunreinigungen die Funktion der für die chemische Umsetzung eingesetzten Katalysatoren beeinträchtigen können und in das Produkt eingebaute Verunreinigungen über das spätere Anwendungsgebiet entscheiden.
- Von maßgeblicher Bedeutung ist die Energiebilanz des Gesamtprozesses. Alle chemischen Transformationen erfordern Energie. Bevorzugt sollte diese aus regenerativen Energiequellen bereit gestellt werden. Ein kluger Einsatz von CO<sub>2</sub> kann neben dem direkten Einbau von CO<sub>2</sub> in Produkte in der Gesamtbilanz zu einer erheblichen Minderung der CO<sub>2</sub> Freisetzung im Vergleich zu den jetzigen Produktionsverfahren führen. Für eine umfassende Bewertung neuer Produkte und Verfahren sind vollständige Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen erforderlich, in denen sowohl die Energieversorgung als auch die Nutzung von Kohlendioxid berücksichtigt werden.

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes „Dream Production“ soll nun erstmals kohlestämmiges CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgasstrom eines Braunkohlekraftwerkes als Synthesebaustein für Polymere verfügbar gemacht und die technische und wirtschaftliche Machbarkeit anhand einer Pilotanlage demonstriert werden. Das von Bayer MaterialScience geführte Konsortium umfasst die Partner RWTH Aachen,

# Aus Kohlendioxid werden Polymere hergestellt



*Bild 2: So genannte Polyethercarbonatpolyole sind spezielle Molekülstrukturen, die als Bausteine zur Herstellung von Polyurethan-Kunststoffen eingesetzt werden können.  
Foto: Thorsten Groetker*

Bayer Technology Services sowie die RWE Power AG. Die RWTH Aachen ist mit mehreren Forschergruppen, dem CAT Catalytic Center (PD Dr. T. E. Müller), dem Institut für Technische und Makromolekulare Chemie (Prof. W. Leitner und Prof. M. Liauw) sowie den Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (Prof. A. Bardow) an der Kooperation beteiligt. Die Industriepartner decken damit die Wertschöpfungskette von der CO<sub>2</sub>-Quelle, über die Prozesstechnologie bis hin zum Produkt ab. Für die Wissenschaftler an der RWTH Aachen stehen das grundlegende Verständnis und die Optimierung der Katalysatoren und Reaktionen sowie die Bewertung des Verfahrens im Rahmen einer Ökobilanz im Fokus. Damit eröffnet sich bei erfolgreichem Projektabschluss der Weg zu einer großindustriellen Anwendung, wodurch die Notwendigkeit und Bedeutung von

Grundlagenforschung und ihres raschen Transfers in die industrielle Praxis verdeutlicht wird.

Konkretes Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Prozessen zur technischen Nutzung von CO<sub>2</sub> für die Produktion von so genannten Polyethercarbonatpolyolen. Diese speziellen Molekülstrukturen sind Bausteine zur Herstellung von Polyurethan-Kunststoffen, die in unterschiedlichen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen. Im Rahmen des Projekts wird CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas des Kohlekraftwerks Niederaußem abgetrennt und in einer CO<sub>2</sub>-Verflüssigungs- und Abfüllanlage verfügbar gemacht. Die Forschung am CAT Catalytic Center in Aachen wird unter anderem die Verträglichkeit dieses „realen“ CO<sub>2</sub> mit den Einsatzstoffen und Katalysatoren des Chemieprozesses gewährleisten. Die wissenschaftlich-technischen Grundlagen der Stoffumwandlung und der Reaktionstechnik werden gemeinsam am CAT Catalytic Center und am ITMC erarbeitet. In einer Pilotanlage in Leverkusen werden die Polyole im Kilogramm-



*Bild 3: Durch speziell entwickelte Katalysatoren lässt sich die chemische Reaktion beschleunigen und in die gewünschte Richtung lenken.  
Foto: Thorsten Groetker*

Maßstab verfügbar gemacht, anschließend in die Polyurethan-Endprodukte überführt und Mustermengen für Eigenschaftstests in der Praxis bereit gestellt.

Die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz des Gesamtprozesses wird am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik über eine so genannte Life-Cycle-Analyse überprüft. Bei der Bewertung des neuen Verfahrens sind neben dem direkten Einbau von Kohlendioxid weitere interessante CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale durch Verwendung der aus den Polyethercarbonatpolyolen hergestellten Polyurethane zu berücksichtigen. Als effizientes organisches Dämmmaterial sind sie in der Lage, während ihrer Nutzungsdauer bis zu siebenmal mehr Energie einzusparen, als für ihre Herstellung benötigt wurde. Neben der Gebäudedämmung tragen in der Automobilindustrie Leichtbauteile aus Polyurethanen zu einer Ge-



*Bild 4: Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit arbeiten Forscher des CAT Catalytic Center hoch motiviert an Prozessen zur technischen Nutzung von CO<sub>2</sub> als Synthesebaustein für Polymere.  
Foto: Thorsten Groetker*



*Bild 5: Grafische Darstellung des CO<sub>2</sub>-Moleküls.  
Grafik: T. E. Müller*

wichtsreduzierung und damit zu deutlichen Energieeinsparungen bei. In beiden Fällen kann also ein doppelt positiver Effekt für den Klimaschutz erzielt werden. Aber auch in alltäglichen Anwendungen wie zum Beispiel bei der Herstellung von hochwertigen Matratzen oder Polstermöbeln finden Polyurethane ihre Anwendung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit CO<sub>2</sub> – dem Abfallprodukt der Energiewirtschaft – ein Wertstoff mit einem äußerst interessanten Anwendungsprofil und Wert-

schöpfungspotenzial für die chemische Industrie vorliegt. Die nutzbaren Mengen an CO<sub>2</sub> sind dabei naturgemäß sehr viel kleiner als die bei der Energiegewinnung entstehenden Emissionen. Die stoffliche Nutzung kann also keine globale Lösung, wohl aber ein willkommener Baustein in einer Gesamtstrategie zum Umgang mit unseren Kohlenstoffressourcen sein – und bietet dabei die Chance, mit innovativen Prozessen und Produkten wirtschaftlich erfolgreich zu sein!

#### **Autoren:**

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Walter Leitner ist Inhaber des Lehrstuhls für Technische Chemie und Petrochemie am Institut für Technische und Makromolekulare Chemie. PD Dr. Thomas E. Müller ist Leiter des CAT Catalytic Centers an der RWTH Aachen. Dr.rer.nat. Christoph Gürtler ist Leiter des Katalyse-Programms bei Bayer MaterialScience.



LENA:  
3384675

lie

reine

poesie

2  
!!!  
up

VIELEN DANK  
AUF WIEDERSEHEN  
28.10.10

.....0.....e  
2 18.500

## Im Team geht alles besser: unsere Angebote für Studenten.



Wir bieten Ihnen ein Dream-Team, das es in Sachen Geld voll drauf hat: Das kostenlose Sparkassen-Girokonto macht Sie flexibel, der Sparkassen-Bildungskredit versorgt Sie finanziell, die Sparkassen-Kreditkarte Gold gibt Ihnen weltweite Zahlungsfreiheit. Und das Sparkassen-Finanzkonzept stellt die Weichen für Ihre Zukunft. Alles Weitere in Ihrer Geschäftsstelle oder unter [www.sparkasse.de](http://www.sparkasse.de).

**Wenn's um Geld geht – Sparkasse.**

# Hochleistungsplasmen

## Mit gepulsten Plasmen zu nanostrukturierten Funktionsschichten

**F**Ein Leben ohne technische Plasmen ist in der heutigen Zeit nicht vorstellbar. Das Plasma als vierter Aggregatzustand der Materie oder ionisiertes Gas findet in vielen Bereichen des alltäglichen Lebens direkt oder indirekt seinen Einsatz. Seien es Plasmen in ihrer direkten Anwendung wie bei der Lichterzeugung in modernen Energiesparlampen oder Xenon-Scheinwerfern oder in indirekter Anwendung bei der Herstellung von tesa®-Film, bedruckten Kunststoff-Einkaufstüten oder elektrischen Komponenten für Computer. Aufgrund der großen Bandbreite an Anwendungsgebieten ist das Plasma seit Jahrzehnten Gegenstand innovativer Forschungsprojekte. Ein großes Feld ist hierbei die Materialforschung und die Entwicklung neuer Plasmabeschichtungen, die für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt werden können. Zum Beispiel werden heute PET-Flaschen beschichtet, um Diffusionsprozesse

zu vermeiden und Lebensmittel länger frisch zu halten. Ein weiteres Einsatzgebiet von Plasmabeschichtungen ist die Automobilbranche. Hier werden Common-Rail-Einspritzdüsen, Lager und Kolbenringe beschichtet, um eine effizientere, umweltschonende Antriebseinheit zu erhalten. Durch die Verwendung von gepulsten Hochleistungsplasmen, auch HPPMS für High Power Pulse Magnetron Sputtering oder HIPIMS für High Power Impulse Magnetron Sputtering genannt, können neue Anwendungsgebiete erschlossen und weitere Erfolge in bestehenden Märkten verzeichnet werden. Hierbei sorgen kurze, hochenergetische Pulse mit Leistungen von bis zu 1,5 MW innerhalb von 100 µs für einen hohen Anteil an schichtbildenden Ionen. Im Vergleich zu den 0,015 MW, die bei konventionellen Gleichstrom (DC)-Plasmaprozessen erreicht werden können, bietet dies neue Möglichkeiten des

Schichtdesigns und die Einstellung bisher nicht erreichbarer Eigenschaftsprofile.

Bisher werden diese Beschichtungen primär empirisch entwickelt und Fortschritte über das Trial-and-Error-Verfahren erzielt. Die RWTH Aachen geht jetzt zusammen mit der Ruhr-Universität Bochum einen anderen Weg: Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs TR 87 „Gepulste Hochleistungsplasmen zur Synthese nanostrukturierter Funktionsschichten“ soll das empirische Vorgehen überwunden und die grundlegenden Mechanismen auf dem Syntheseweg in Hochleistungsplasmen erforscht und theoretisch wie auch experimentell beschrieben werden. Um dies zu erreichen, umfasst das Forschungsprojekt den gesamten Spannungsbogen von den eingestellten Prozessparametern an der Anlage über das einzelne Atom in der Gasphase und der Wechselwirkung mit dem Festkörper bis hin zu den mechani-

schon und chemischen Eigenschaften und dem Einsatz beschichteter Bauteile.

Die enge Kooperation und das Verständnis der Einzelschritte soll eine geschlossene Betrachtung des gesamten Ablaufs ermöglichen. Damit ist es das Ziel, eine Methodik zu entwickeln, die auf Grundlage des Belastungskollektivs einer beliebigen Anwendung auf eine bestimmte chemische Zusammensetzung einer geeigneten Schicht und die entsprechenden Prozessparameter schließen lässt. Auf diese Weise soll der Entwicklungsaufwand neuartiger Plasmabeschichtungen reduziert und schon bestehende Plasmabeschichtungen optimiert werden. Um den direkten Bezug zur Anwendung zu gewährleisten, werden zwei definierte Anwendungsgebiete betrachtet. Für metallische Werkstoffe wird das Beschichten von Komponenten für die Kunststoffverarbeitung erforscht. Unter anderem haben hier harte Füllstoffe in der Polymerschmelze hohen Schichtverschleiß zur Folge, weshalb die Schicht gute Verschleißigenschaften aufweisen sollte. Im Hinblick auf polymere Werkstoffe sollen neuartige Beschichtungen zur Verbesserung der Barriereigenschaften von Kunststofffolien aus PET entwickelt werden. In den folgenden zwei Abschnitten wird das Vorgehen und das Ziel beider Anwendungsgebiete vorgestellt.

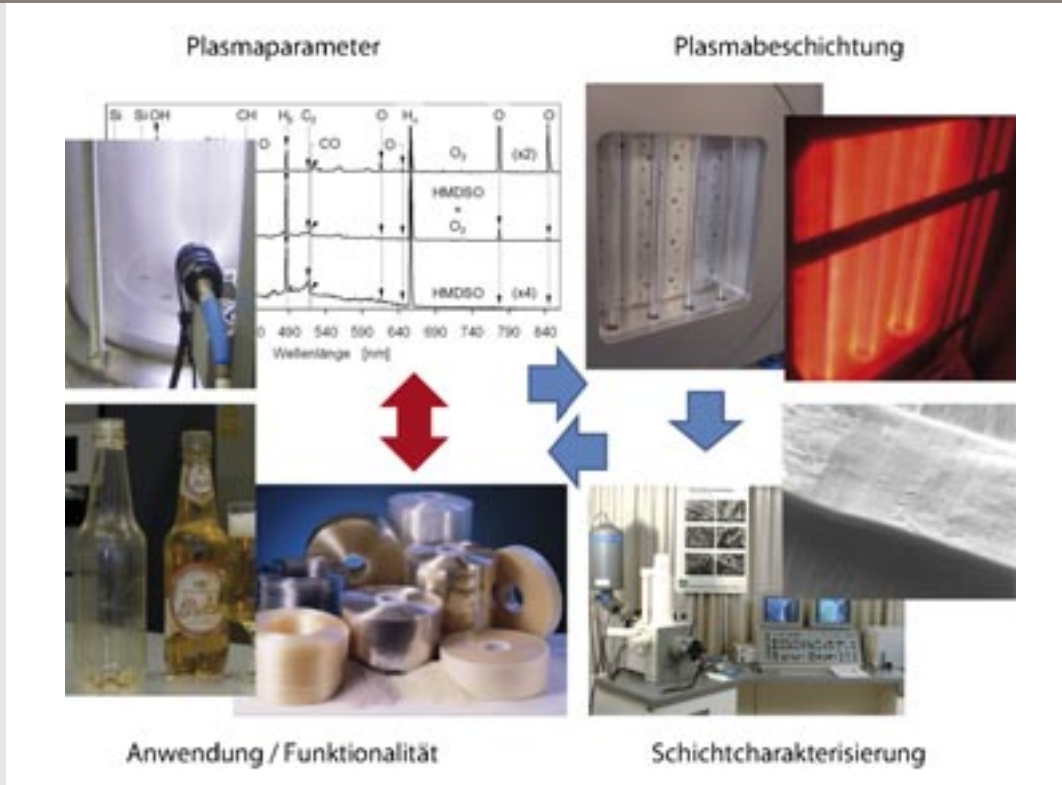
### Beschichten von Metallen

Mittels geeigneter Plasmabeschichtungen mit Schichtdicken von 1 µm bis 5 µm können Anlagenkomponenten von Kunststoff-Spritzgießmaschinen geschützt und hochwertigere Bauteile hergestellt werden. Forschungen haben gezeigt, dass Plasmabeschichtungen das Potenzial besitzen, Bauteile von hoch belasteten Spritzgießmaschinen effektiv vor Korrosion,



Bild 1: Prozess von der Simulation bis zur Anwendung beschichteter Bauteile.

# zur Beschichtung



*Bild 2: Methodik zur wissenschaftlichen Abscheidung nanostrukturierter Schichtsysteme auf Kunststoffen.*

verarbeitungsanlagen, wie Extruderschnecke oder Werkzeug, erhöht nicht nur die Standzeit der Anlagen sondern trägt auch wesentlich zu einer höheren Qualität der Produktoberflächen bei. Vor allem eine höhere Oberflächenqualität von Kunststoffbauteilen erleichtert die anschließende Veredelung mit einer funktionellen Beschichtung zur gezielten Erweiterung des Anwendungsspektrums.

Die Materialauswahl im Bereich der Lebensmittelverpackungen wird stark durch die Permeationseigenschaften der eingesetzten Kunststoffe geprägt. Typische Werkstoffe, wie PET oder PP, bieten als Folienmaterial bei Dicken von 10 µm – 200 µm jedoch häufig keine ausreichende Sperrwirkung gegen Wasserdampf, Sauerstoff und Aromastoffe. Aufgrund ihrer Verarbeitungsbedingungen und der geringen Materialdicke stellen Folien jedoch besondere Anforderungen an eine plasma-polymere Beschichtung. So wird der Einsatzbereich der Plasmatechnologie zur Barrierebeschichtung von Kunststofffolien einerseits durch die geringe Dehnfähigkeit der Schichten beschränkt. Andererseits stellen sowohl die geringe thermische Beständigkeit der eingesetzten Materialien als auch die homogene Beschichtung großflächiger Substrate wesentliche Anforderungen an das Verfahren. Die gezielte Synthese dünner plasma-polymerer Funktionsschichten auf flexiblen Kunststoffsubstraten kann nur dann wirtschaftlich erreicht werden, wenn es gelingt, das Leistungsspektrum der Schichten auch unter mechanischer Belastung schon vor der Beschichtung vorherzusagen, siehe Bild 2. Hierzu müssen die Zusammenhänge zwischen der Morphologie und der Funktionalität der Beschichtung, den zugrundeliegenden gepulsten Hochleistungsplasmaprozessen sowie den Plasma-Substrat-Wechselwirkungen bekannt sein.

Verschleiß und Anhaftung von Kunststoffen zu schützen. Dies hat einerseits eine Kosteneinsparung durch geringe Instandhaltungskosten und andererseits eine Verbesserung der Bauteilqualität durch eine verringerte Anzahl von Fehlstellen zur Folge. Zukünftige Verbesserungen von Plasmabeschichtungen können jedoch nur dann wirtschaftlich erreicht werden, wenn es gelingt, schon vor der Beschichtung vorherzusagen, wie die Schicht in der Praxis abschneiden wird. Die Vorhersage kann aber nur gelingen, wenn die Schnittstellen von den Plasmaparametern während der Schichtherstellung über die Schichteigenschaften bis hin zur Anwendungscharakteristik eines Bauteils hinlänglich bekannt sind. Aus diesem Grund ist es Ziel des Forschungsvorhabens, die Schnittstellen genau zu definieren, das heißt den Weg von den Plasmaprozessparametern bis hin zur fertigen Anwendung aufzuzeigen und am Beispielprozess beschichteter und damit verschleißgeschützter Komponenten von Kunststoff-

Spritzgießmaschinen konkret auszuformulieren. Hierzu ist es notwendig, dass eine gezielte, softwareunterstützte Schichtauswahl stattfindet, die es ermöglicht, eine Vielzahl von chemischen Schichtzusammensetzungen zu untersuchen und aufzuzeigen, welche geeignet für die Anwendung in Spritzgießmaschinen ist, siehe Bild 1. Mit Hilfe von rechnergestützten Untersuchungen ist es anschließend möglich, die mechanischen Eigenschaften der Plasmabeschichtungen vorherzusagen und so eine weitere Einschränkung zu erreichen. Neben der chemischen Zusammensetzung wird ein Hauptaugenmerk auf die Schichtstruktur im Nanometerbereich gelegt. Durch eine gezielte Prozesssteuerung ist es möglich, Multilagenstrukturen zu synthetisieren, die sich aus unterschiedlichen Werkstoffen zusammensetzen und so die Vorteile beider Werkstoffe vereinen. Eine große Herausforderung ist das Verständnis der Vorgänge im Plasma während der kurzen Pulse bei Hochleistungsplasmen. In

enger Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum werden dazu Diagnostiksysteme zur Charakterisierung von Hochleistungsplasmen eingesetzt und grundlegend erforscht. Dieses Verständnis ist erforderlich, um eine möglichst geschlossene Betrachtung der gesamten Prozesskette zu ermöglichen und so eine Vorhersage der chemischen und mechanischen Eigenschaften der Plasmabeschichtungen treffen zu können. Die theoretisch und experimentell ermittelten Werkstoffparameter und -eigenschaften werden verglichen, um so Annäherungsmodelle zu validieren und zu verbessern. Der letzte Schritt ist die Anwendung der entwickelten Plasmabeschichtungen in Kunststoff-Spritzgießanlagen, um die Vorhersagen zu evaluieren und hochpräzise Kunststoffbauteile für Automobilbau, Bürobedarf und Home-Entertainment herstellen zu können. **Beschichten von Kunststoffen** Die gezielte Beschichtung der Komponenten von Kunststoff-

Eine entsprechende Methodik wird daher anhand der Abscheidung siliziumorganischer Schichten untersucht. Hierbei werden die schichtbildenden Substanzen gasförmig zugeführt und in Mikrowellen geheizte Plasmen im Niederdruckbereich von 10 Pa bis 30 Pa umgesetzt. Das große Potenzial gepulster Mikrowellenplasmen hinsichtlich einer geringen thermischen Belastung der Substrate und homogenen Schichtabscheidung konnte dabei bereits in Voruntersuchungen angedeutet werden. Auf der Grundlage der gewonnenen Ergebnisse an der RWTH Aachen und der Ruhr-Universität Bochum soll entsprechend das Leistungsvermögen sehr dünner Schichten von etwa 10 nm dem von mehrlagigen Schichtsystemen mit variiertem Aufbau zur Erhöhung der Flexibilität gegenübergestellt werden. Hierbei werden iterativ die makroskopischen Eigenschaften beschichteter Substrate – beispielsweise Sauerstoffpermeation bei variiertem Dehnungszustand – mit den mikroskopischen Eigenschaften wie Schichtaufbau und Schichtversagen korreliert und auf die zugrunde liegenden Plasmaprozesse zurückgeführt.

Durch diese intensive Vernetzung der Plasmaphysik/Plasmatechnik und der Werkstoffwissenschaften/Oberflächentechnik soll das angestrebte Ziel einer geschlossenen Betrachtung erreicht, das bislang vorherrschende empirische Vorgehen überwunden und ein physikalisch und chemisch basiertes Prozessverständnis entwickelt werden.

#### Autoren:

Dr.-Ing. Nazlim Bagcivan ist Oberingenieur am Institut für Oberflächentechnik.

Dipl.-Ing. Karim Bahroun ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffverarbeitung.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin hat den Lehrstuhl für Oberflächentechnik im Maschinenbau inne und leitet das Institut für Oberflächentechnik.

Dr.-Ing. Jens Emmerlich ist Gruppenleiter der Gasphasenabscheidung am Lehrstuhl für Werkstoffchemie.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Walter Michaeli ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung und Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk e.V..

Univ.-Prof. Jochen M. Schneider, Ph.D. ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffchemie.

Dipl.-Ing. Sebastian Theiß ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter für den Bereich der PVD-Bauteilbeschichtung am Institut für Oberflächentechnik.





*Bild 3: Den Forschungsinstituten stehen speziell für dieses Vorhaben ausgestattete industrielle Hochleistungsplasmabeschichtungsanlagen zur Verfügung. Foto: Peter Winandy*

# Wärmedämmschicht

## Untersuchungen zu Mikrostruktur, Schädigung und Zuverlässigkeit

# D

Der Wirkungsgrad von Gasturbinen steigt mit der Eintrittstemperatur der Brenngase in die Turbine. Die Einsatzgrenze modernster metallischer Werkstoffe liegt bei knapp über 1000° C. Um höhere Temperaturen zu erreichen, werden ausgedübelte Kühlsysteme in Verbindung mit keramischen Wärmedämmschichten eingesetzt, da vollkeramische Schaufeln zu spröde für einen sicheren Betrieb wären. Mit solchen Schutzschichten sind Oberflächentemperaturen bis 1200° C möglich. Absolute Zuverlässigkeit zwischen den Revisionen der Anlage ist unerlässlich, da ein kompletter oder örtlicher Verlust der Schicht zur sofortigen Überhitzung des Grundwerkstoffs und damit zu kapitalen Turbinenschäden führen würde. Aktuelle Forschungsarbeiten befassen sich mit der Entwicklung verbesserter Schichtsysteme für wesentlich höhere Oberflächentemperaturen und mit der Entwicklung von Berechnungsmodellen für eine zuverlässige Lebensdauervorhersage.

Wärmedämmschichtsysteme, kurz WDS, sind ein wesentlicher Bestandteil in Flug- und sta-

tionären Gasturbinen, da nur hiermit die für einen effizienten Betrieb notwendigen hohen Brenngastemperaturen verwirklicht werden können. Der weltweit als Standard etablierte Werkstoff für WDS-Anwendungen ist das 7 bis 8 Gewichtsprozent  $Y_2O_3$  teilstabilisierte Zirkonoxid, kurz YSZ. Dieses Material verfügt für diese Anwendung über eine Reihe von herausragenden Eigenschaften wie niedrige Wärmeleitfähigkeit, hoher Ausdehnungskoeffizient zur Reduzierung der thermischen Spannungen im Verbund mit dem metallischen Substrat und gute Zähigkeit.

Zurzeit kommen zwei Herstellungsverfahren in der industriellen Serienproduktion von Wärmedämmschichten zum Einsatz, das Elektronenstrahlverdampfungsverfahren, kurz EB-PVD für Electron Beam – Physical Vapour Deposition, und das Atmosphärische Plasmaspritzen, kurz APS. Für Beschichtungen in stationären Gasturbinen wird fast ausschließlich das kostengünstigere APS-Verfahren eingesetzt. Hierbei werden Pulverpartikel aus dem Schichtwerkstoff über einen Trägergasstrom in die Heißgasfackel eines Plasmabrenners eingeleitet. Im Heißgasstrom werden die Partikel beschleunigt und bis zum Aufschmelzen aufgeheizt, die heißen und beschleunigten Partikel treffen

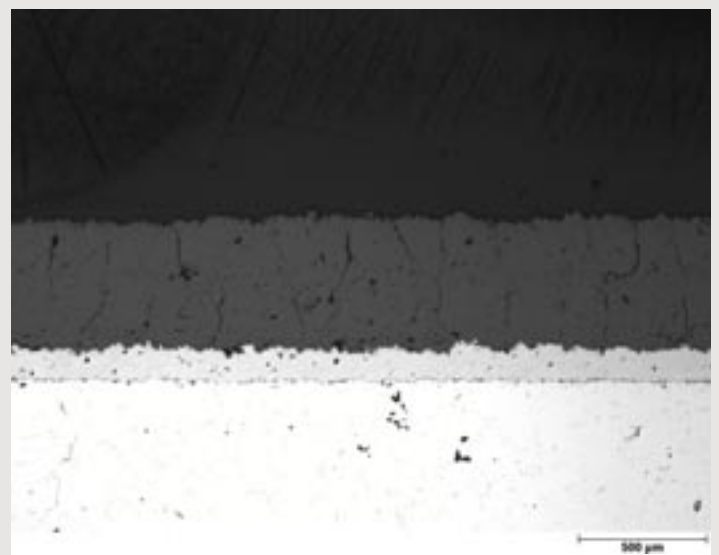
dann auf das Substrat. Dabei verformen sie sich und kühlen schnell ab. Es entsteht ein lamellenartiges Gefüge, das typischerweise durchsetzt ist mit Poren und Mikrorissen, siehe Bild 1. Diese Gefügestruktur ist wichtig für die Leistungsfähigkeit der Schichtsysteme im Betrieb, da sie einen niedrigen Elastizitätsmodul mit entsprechend niedrigen Spannungen zur Folge hat und eine gute Dehnungstoleranz durch Öffnen der Risse und ein Abgleiten einzelner Spritzlamellen ermöglicht. Die gute Dehnungstoleranz ist notwendig, da aufgrund des Unterschiedes in der thermischen Ausdehnung zwischen Substrat und WDS beim Aufheizen und Abkühlen thermische Spannungen entstehen. Zusätzlich reduzieren die vielen Mikrorisse auch die Wärmeleitfähigkeit und verbessern damit die thermische Isolationswirkung der Schichten.

Zusätzlich zur wärmedämmenden Keramikschicht besteht ein Wärmedämmschichtsystem noch aus einer metallischen Zwischenlage, der so genannten Haftvermittlerschicht. Wie der Name nahelegt, verbessert

diese Schicht die Anbindung zwischen dem metallischen Substrat und der keramischen Deckschicht. Zusätzlich schützt sie die Substrate vor Oxidation und Korrosion durch die heißen Brenngase. Dies ist notwendig, da die Deckschichten porös und gasdurchlässig sind. Im Falle der atmosphärisch gespritzten Wärmedämmschichten verwendet man als Haftvermittlerschicht meist MCrAlY-Legierungen, wobei M für Ni oder Co steht. Hergestellt werden die Schichten über verschiedene thermische Spritzverfahren, wie das Vakuumplasmaspritzen oder das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen. Die Schichten bilden im Betrieb eine dichte Deckschicht aus Aluminiumoxid, die die weitere Oxidation des Werkstoffs deutlich verlangsamt. Wichtig für eine gute Anbindung der Wärmedämmschicht an die Haftvermittlerschicht ist eine hohe Rauigkeit mit  $R_a$  – Werten über etwa 8  $\mu m$ , da die Anbindung primär über eine mechanische Verklammerung abläuft. Neben der mikrorissbehafteten Struktur der keramischen Decklage gibt es weitere Ansätze, die Leistungsfähigkeit von Wärmedämmschichten zu steigern. So gelingt es zum Beispiel durch spezielle Herstellungsbedingungen, relativ dichte Schichten abzuscheiden, die mit einer hohen

Bild 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Bruchfläche einer YSZ-Wärmedämmschicht.

Bild 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Querschliffes einer YSZ-Wärmedämmschicht mit einer hohen Segmentierungsrisssdichte.



# systeme für Gasturbinen

Anzahl von Segmentierungsrissen durchsetzt sind, siehe Bild 2. Belastet man eine solche Schicht auf Zug, wie es beim Aufheizen in der Turbine geschieht, können sich die Segmentierungsrisse öffnen. Damit kann der Aufbau hoher Spannungen in der Schicht und damit eine Schädigung vermieden werden. Zusätzlich zu dieser Weiterentwicklung der APS-Technologie befinden sich auch neue Verfahren in der Erprobung. Besonders interessant ist dabei das Suspensions-Plasma-spritzen, bei dem anstelle von pulverförmigen Ausgangsstoffen Suspensionen in die Plasmafackel eingeleitet werden. Mit diesem Verfahren ist die Einstellung hoher Segmentierungsrissdichten über 10/mm bei gleichzeitiger niedriger Wärmeleitfähigkeit möglich. Ein weiteres in der Entwicklung befindliches Verfahren ist der LPPS-PVD-Prozess. Hierbei werden pulverförmige Ausgangsstoffe in einem Plasmabrenner verdampft und es kommt zur Abscheidung stengelkristalliner Schichten, die eine hervorragende Leistungsfähigkeit im Zyklerversuch zeigen.

Neben der Entwicklung extrem leistungsfähiger Schichten aus YSZ liegt ein weiterer

Schwerpunkt der Arbeiten am Forschungszentrum Jülich in der Entwicklung neuer Wärmedämmschichtmaterialien. Dies ist notwendig aufgrund der limitierten Temperaturstabilität des YSZ: Ein Langzeiteinsatz von YSZ ist auf Temperaturen von etwa 1200° C begrenzt, da bei höheren Temperaturen Phasenumwandlungen und eine verstärkte Verdichtung der Schichten eintreten. Von besonderem Interesse sind dabei Pyrochlore wie das  $Gd_2Zr_2O_7$ , Perowskite wie  $SrZrO_3$  oder (Hexa-) Aluminate. Aufgrund der relativ niedrigen Zähigkeit der neuen WDS-Materialien setzt man meist die in Jülich entwickelten Doppellagensysteme ein, bei denen auf dem Haftvermittler zuerst eine Schicht aus dem zähen YSZ und obenauf die neue Keramik abgeschieden wird, siehe Bild 3. Besonders die aus Pyrochloren aufgebauten Schichten zeigen ein exzellentes Verhalten bei zyklischer thermischer Belastung zum Beispiel in einem Gasbrennerteststand.

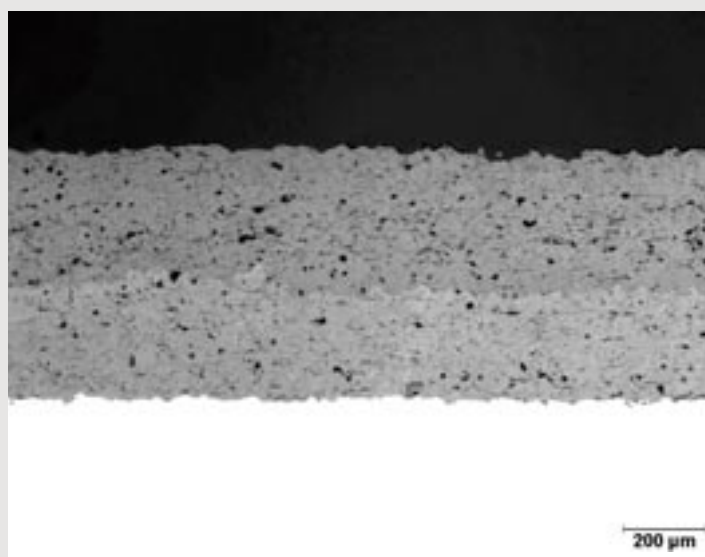
### Zuverlässigkeit und Lebensdauerprognose

Bei Oberflächentemperaturen jenseits der Einsatzgrenze des metallischen Grundwerkstoffes müssen Schädigungsmechanismen und Lebensdauer des Schichtsystems unter typischen und extremen Betriebsbedin-

gungen bekannt sein. Für eine zielführende Neu- oder Weiterentwicklung von Wärmedämmschichten müssen zahlreiche Varianten in der chemischen Zusammensetzung und Mikrostruktur getestet werden. Versuche an Bauteilen in realen Triebwerken wären zu kostspielig und zeitaufwändig. Außerdem können einzelne Belastungsparameter, wie Temperatur oder mechanische Beanspruchung nicht hinreichend systematisch variiert werden. Daher erfolgen die Versuche in der Regel zunächst an Werkstoffproben. Um an Laborproben anwendungsnahe Belastungsbedingungen zu erzeugen, werden Prüfstände mit Strahlungsheizung eingesetzt, da hiermit die Wärme – zum Beispiel im Gegensatz zu induktiver Beheizung – in die Keramikschicht an der Oberfläche der Probe eingebracht wird. Bild 4 zeigt einen am Forschungszentrum Jülich für derartige Versuche verwendeten Strahlungssofen. Die Strahlungsleistung der insgesamt 24 Halogenlampen wird über Parabolspiegel auf die Messlänge im mittleren Bereich der Probe gebündelt. Es können Aufheizge-

schwindigkeiten von mehreren 10° C/s und Maximaltemperaturen an der Probenoberfläche über 1200° C erreicht werden. Mittels Innenkühlung der Probe lassen sich gezielt Temperaturgradienten über das Schichtsystem hinweg einstellen. Die Probe ist in eine servohydraulische Prüfmaschine eingespannt, mit der gleichzeitig zur thermischen Beanspruchung mechanische Lasten, beispielsweise durch Fliehkräfte an einer Turbinenschaufel, nachgebildet werden können. Diese können mehrere Tausend Kilogramm pro Quadratzentimeter erreichen, da eine Kraftwerksturbinen mit 3000 Umdrehungen rotiert. Für die Nachuntersuchung der beanspruchten Proben werden zerstörungsfreie und zerstörende Prüfmethoden auf unterschiedlichen Größenskalen eingesetzt. So erlaubt es die Infrarot-Impulsthermographie, örtliche Ablösungen der Wärmedämmschicht ab 0,5 mm Durchmesser zerstörungsfrei zu erkennen und zu vermessen. Hierzu wird der Versuch unterbrochen, auf die Probe mittels einer Blitzlampe ein kurzer Wärmeimpuls aufgebracht und der Abkühlvorgang mittels einer Infrarot-Thermokamera beobachtet. Abgelöste Bereiche kühlen langsamer ab und weisen daher eine höhere Temperatur auf. Bild 5 zeigt eine solche Wärme-

*Bild 3: Mikrostruktur eines Doppellagensystems aus unten YSZ und oben Pyrochlor.*



*Bild 4: Strahlungssofen zur thermomechanischen Prüfung von WDS-Systemen.*

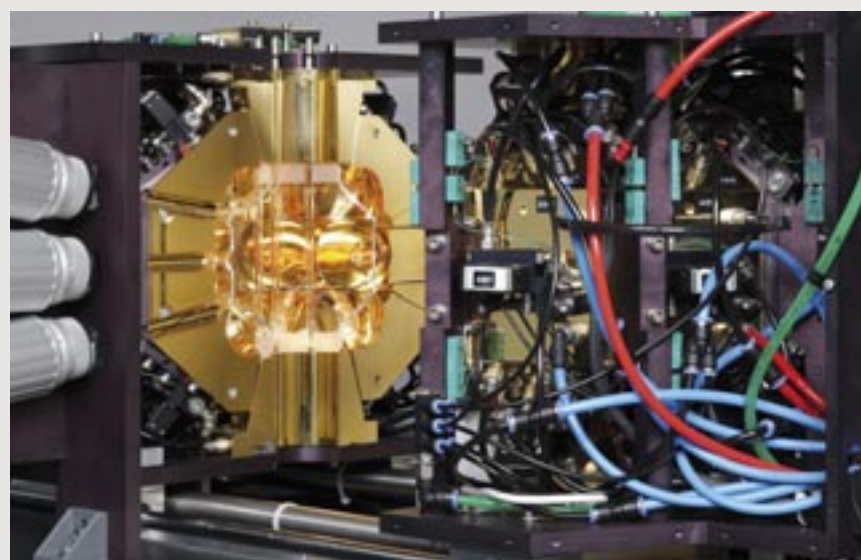
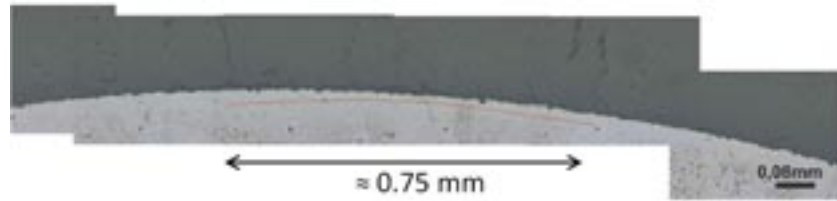
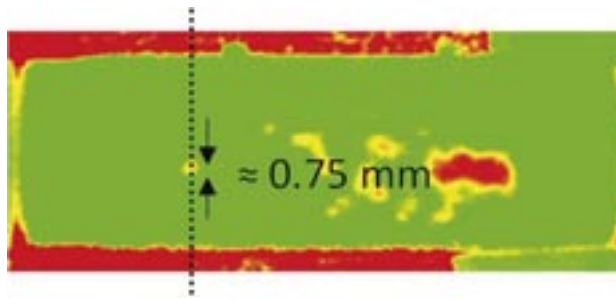


Bild 5: Infrarot-Thermographie der Oberfläche und Schliffbild eines geschädigten Wärmedämmschichtsystems.



bildaufnahme zusammen mit einem Querschliff durch die markierte Schichtablösung. Ein Vergleich beider Bilder zeigt, dass die Größe des abgelösten Bereichs von der Thermographie äußerst genau erfasst wird. Wird diese Methode in regelmäßigen Zeitabständen während des Versuchs angewandt, kann die Ausbreitung von Schichtablösungen bis zum Versagen durch örtliches Abplatzen quantitativ bestimmt und für Simulationsrechnungen weiterverwendet werden. Für weitere Untersuchungen der geschädigten Bereiche und der Frühphasen der Schädigung kommt die Rasterelektronenmikroskopie zum Einsatz. Hierzu werden aufgrund der Informationen aus der Thermographie zielgenau Schlitze präpariert und mit hoher Vergrößerung betrachtet. Da diese ersten

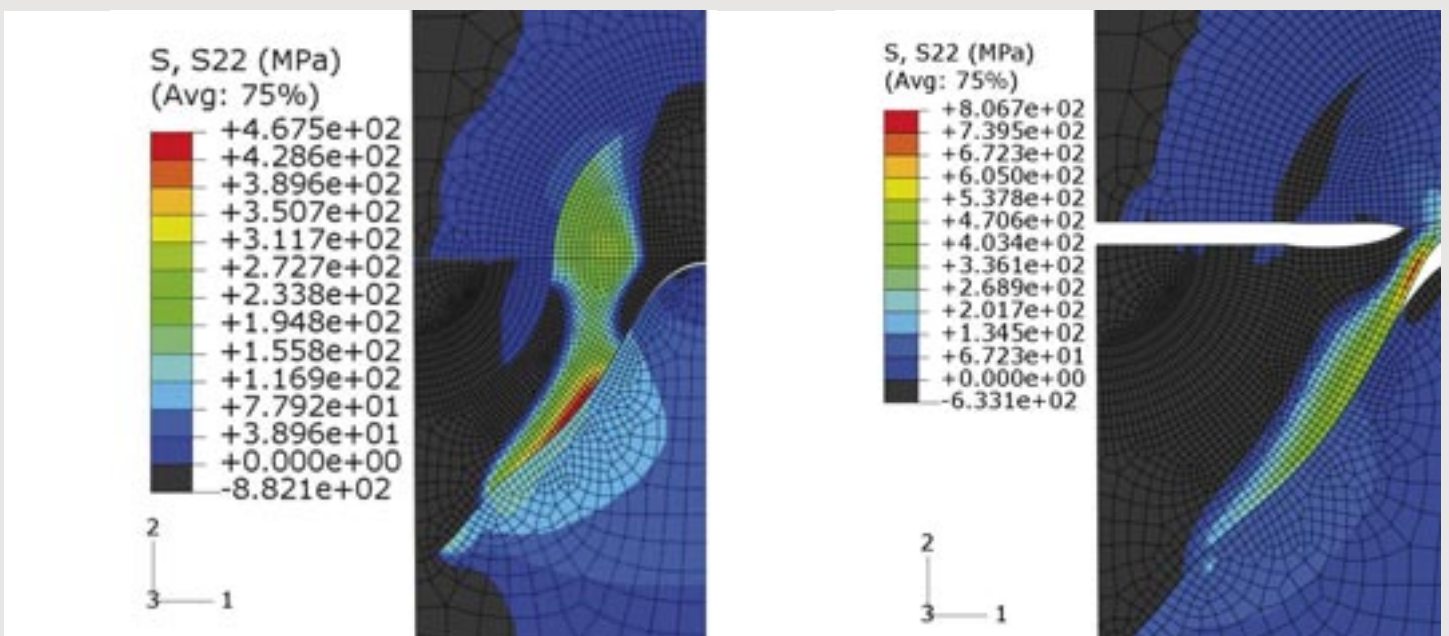
Schädigungen stark durch die Rauheit der Grenzfläche beeinflusst werden, liegt hier ein wichtiger Ansatzpunkt für die Optimierung von Wärmedämmschichten.

Auf dieser Grundlage erfolgt die Lebensdauervorhersage mittels zweier verschiedener Ansätze: Im ersten wird die Rissbildung aufgrund der Versuchsdaten über das Wachstum der Oxidschicht unter der Wärmedämmschicht abgeschätzt. Die weitere Berechnung des Risswachstums erfolgt dann mittels einer bruchmechanischen Methode. Der zweite Ansatz geht von einer Finite-Elemente-Berechnung des Spannungsfelds an einer als typisch angenommenen Rauheitsspitze der Grenzfläche zwischen Wärmedämmschicht und Oxidationsschutzschicht aus. In dem so berechneten Spannungsfeld

wird die Rissausbreitung direkt simuliert. Sobald der Riss die repräsentativ simulierte Zone komplett durchläuft, wird die weitere Ausbreitung mit einem bruchmechanischen Modell berechnet. Bild 6 zeigt die wesentlichen Schritte einer Rissfortschrittsrechnung mittels der Finite-Elemente-Methode. Neben der Lebensdauervorhersage experimentell gut charakterisierter Schichten in Abhängigkeit von den Belastungsparametern leisten solche Simulationsrechnungen wertvolle Dienste bei der Optimierung der Mikrostruktur, zum Beispiel der Grenzflächenrauheit, da sie mit relativ wenig Aufwand Parameterstudien ermöglichen, auf deren Grundlage eine gezielte Planung der aufwändigen Proben- und Bauteilversuche erfolgen kann.

**Autoren:**  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck ist Professor für das Fach Hochtemperatur-Werkstoffmechanik/Allgemeine Mechanik der RWTH Aachen und Abteilungsleiter Metallische Strukturwerkstoffe am Institut für Energie- und Klimaforschung des Forschungszentrums Jülich. Univ.-Prof. Dr. Robert Vaßen ist Professor für das Fach Keramische Werkstoffe an der Ruhr-Universität Bochum und Abteilungsleiter Fortschrittliche Kraftwerke am Institut für Energie- und Klimaforschung des Forschungszentrums Jülich.

Bild 6: Finite-Elemente-Simulation der Rissausbreitung in einem WDS-System.



## Sorgen Sie mit uns für frischen Wind!

Die Deutschen Edelstahlwerke sind ein führender Hersteller von Spezialstählen für die Windkraftindustrie. Für die Energie von morgen. Für unsere Umwelt.

Im Bereich der Edelstahlhlangprodukte produzieren wir mit rund 4.000 Mitarbeitern ein einzigartiges Angebot, das zufriedene Kunden rund um den Globus nutzen.

Deutsche Edelstahlwerke: Providing special steel solutions

**DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE**

Providing special steel solutions



# Höchste Reinheit für Funktionswerkstoffe

## Neue Prozesse ermöglichen Superpurity

RWTH THEMEN 1/2011

# M

Moderne Gasturbinen gehören zu den High-Tech-Anwendungen, die höchste Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe stellen. So werden in Strahltriebwerken von Flugzeugen Drehzahlen von 10000  $\text{min}^{-1}$  bei gleichzeitigen Anwendungstemperaturen von bis zu 2200°C erreicht: die verwendeten Materialien werden sowohl hinsichtlich ihrer mechanischen Hochtemperatureigenschaften als auch bezüglich ihrer Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit massiv beansprucht. Die Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe richten sich hierbei nach ihrem Einsatzort, so dass in den unterschiedlichen Stufen des Triebwerks verschiedene Legierungsgruppen verwendet werden: Im Fan und im Verdichter, wo vergleichsweise moderate Temperaturen herrschen, werden vorwiegend Titanlegierungen aufgrund ihrer geringen Dichte, ihrer hohen spezifischen Festigkeit und ihrem hohen Ermüdungswiderstand verbaut. Mit steigenden Temperaturen nimmt im hinteren Bereich des Verdichters der Anteil an warmfesten Sonderstählen zu, bevor in der Brennkammer und der eigentlichen Turbine fast ausschließlich hochtemperaturbeständige Superlegierungen auf Nickel-Basis zum Einsatz kommen, siehe Bild 1.

36

Damit die für moderne Strahltriebwerke typischen Zyklenzahlen von mehreren zehntausend Starts und Landungen reproduzierbar erreicht werden, muss neben der korrekten chemischen Zusammensetzung und einer geeigneten kristallinen Struktur vor allem die Fehlerfreiheit der Werkstoffe garantiert sein. So kann beispielsweise ein kritischer nichtmetallischer Einschluss zum Materialversagen einer Turbinenschaukel führen, was unter Umständen den Ausfall des Triebwerks zur Folge hat. Um dies so weit als möglich auszuschließen, kommen in der industriellen Praxis die qualitativ hochwertigsten Einsatzmaterialien, metallurgische Spezialverfahren im Vakuum und modernste Prüfmethode zur Herstellung

und Charakterisierung von dynamisch stark beanspruchten Bauteilen zum Einsatz. Da im Zuge der Entwicklung von Gasturbinen die Spezifikationen der Werkstoffe stetig anspruchsvoller werden, wird aktuell an innovativen Methoden zur Herstellung und zur Charakterisierung dieser metallischen Hochleistungswerkstoffe geforscht.

So finden am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, kurz IME, Forschungsprojekte zur Synthese und Raffination von Titan-, Eisen- und Nickel-Basis-Legierungen statt. Während die industrielle Praxis vorwiegend sauberste und damit teuerste Einsatzstoffe zur Herstellung von Hochleistungswerkstoffen einsetzt, werden am IME auch die Grenzen der Verwendung von Recyclingmaterial zur Kostensenkung untersucht. Global betrachtet würde der Einsatz von Schrott einen Beitrag zur ressourceneffizienteren Nutzung von Rohstoffen leisten und für Deutschland die Importabhängigkeit reduzieren. Durch Verwendung von kostengünstigem Ausgangsmaterial können zudem neue Anwendungsfelder für diese Hochleistungswerkstoffe, zum Beispiel im Automobilbau, erschlossen werden, die bislang aufgrund zu hoher Materialkosten nicht erreichbar sind.

Unabhängig davon, ob Kreislaufmaterial oder Reinstoffe eingesetzt werden, stellt das Schmelzen und Homogenisieren im Vakuuminduktionsofen den ersten Schritt der Legierungsherstellung dar. Prinzipiell ähnelt dieser Prozess einer im Haushalt gebräuchlichen Induktionskochplatte: Durch das Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes an eine Induktionsspule werden im zu erwärmenden Metall Wirbelströme hervorgerufen. Während dadurch beim Herd der Topf aufgeheizt wird und die Wärme an den Inhalt abgibt, wird im Induktionsofen das Metall in einem keramischen Tiegel zum Schmelzen gebracht und je nach Legierung auf bis zu 1800°C erhitzt. Dementsprechend liegt eine typische Nennleistung industrieller Öfen mit

5 MW etwa 2000-fach über der eines handelsüblichen Kochfeldes. Da ungewünschte Reaktionen mit Bestandteilen der Atmosphäre zur Bildung von Nitriden oder Oxiden führen könnten, findet der gesamte Prozess in einem geschlossenen Kessel unter Vakuum oder Inertgas statt.

Da das Vakuuminduktions-schmelzen nur über begrenzte Raffinationsmöglichkeiten verfügt, finden High-Tech-Raffinationsschritte statt. Um das Metall in hierfür geeignete Ausgangsformate zu bringen, wird die Schmelze zu zylinder- oder quaderförmigen Blöcken vergossen.

Die gebräuchlichsten Reinigungsverfahren für derartige Funktionswerkstoffe sind das Elektroschlackeschmelzen und das Vakuumlichtbogenschmelzen. Während der Wärmeeintrag beim Elektroschlackeschmelzprozess über Widerstandserhitzung erfolgt, bewirkt im Vakuumlichtbogenschmelzen ein Lichtbogen das Aufschmelzen des umzuschmelzenden Metalls. Beide Prozesse arbeiten in Kupfertiegeln, die so intensiv wassergekühlt sind, dass selbst sehr reaktive oder hochschmelzende Metalle wie Niob oder Tantal problemlos darin umgeschmolzen werden können, obwohl ihr Schmelzpunkt 1500 bis 2000°C über dem des Kupfers liegt. Da Kupfer über eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit verfügt, wird die Wärme abgeführt bevor der Tiegel von der Schmelze angegriffen werden kann. So entstehen auf wenigen Millimetern Temperaturdifferenzen von mehreren Tausend Grad Celsius. In beiden Umschmelzverfahren werden durch physikalische und chemische Mechanismen schädliche Einschlüsse im Größenspektrum zwischen Nano- und Millimetern entfernt.

Diese Mechanismen befinden sich zurzeit am IME im Fokus der Forschung, da die maximale Raffinationswirkung der Umschmelzprozesse gerade im Hinblick auf den steigenden Anteil stark verunreinigter Einsatzstoffe aber auch aufgrund immer höherer Anforderungen

an die bestehenden Werkstoffe optimiert werden muss. Wie auch in der industriellen Praxis besteht die Möglichkeit der Kombination der einzelnen Verfahren zur so genannten Triple-Melt-Route, welche die Standardprozedur für höchstbeanspruchte, rotierende Bauteile in Luft- und Raumfahrt darstellt. Während die typische Größenordnung industriell hergestellter Blöcke mehrere Tonnen betragen kann, lässt sich die gesamte Route im Technikausschnittstab mit Blockgewichten von 200 kg und Durchmesser von 200 Millimetern darstellen. Auf diese Weise raffiniertes Einsatzmaterial stellt ein ideales Ausgangsmaterial für hoch technologisierte Prozesse wie das Bridgman-Verfahren dar, welches am Gießerei-Institut erforscht wird. Dieser Prozess dient zur gerichteten oder einkristallinen Erstarrung, die beispielsweise bei der Herstellung von hochtemperatur- und korrosionsfesten Gasturbinenschaukeln Anwendung findet. Hierzu wird das Metall in eine aufgeheizte Formschale abgegossen, die anschließend langsam aus der Heizzone in die so genannte Kühlzone abgesenkt wird. Hierbei führt der axiale Wärmetransport zur parallelen Ausrichtung der wachsenden Kristalle, während bei der Einkristallzucht eine zusätzliche Selektion der Körner erfolgt, so dass das gesamte Bauteil nur aus einem Kristall besteht. Trotz deutlich erhöhter Kosten gegenüber der allseitig globulitischen Erstarrung ergeben sich durch das Bridgman-Verfahren aufgrund verbesserter Lebensdauer und höheren Anwendungstemperaturen der derart hergestellten Bauteile wirtschaftliche und technische Vorteile. Hauptursache für die verbesserten Eigenschaften ist die Ausrichtung der Kristalle in Richtung der größten Beanspruchung beziehungsweise beim Einkristall das Vorliegen eines einzigen Kristalls ohne Korngrenzen, was dem lebensdauerbestimmenden Hochtemperaturkriechen entgegenwirkt. Zurzeit finden in aktuellen Forschungsprojekten Untersuchun-

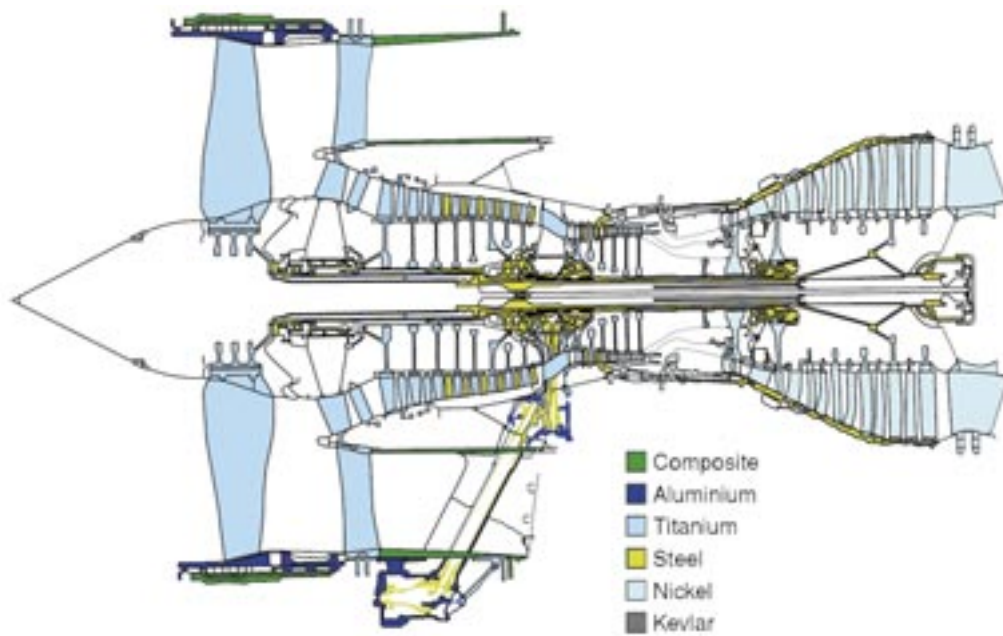


Bild 1: Darstellung der Einsatzbereiche verschiedener Legierungsgruppen im Triebwerk Trent 800, mit freundlicher Genehmigung von Rolls-Royce.

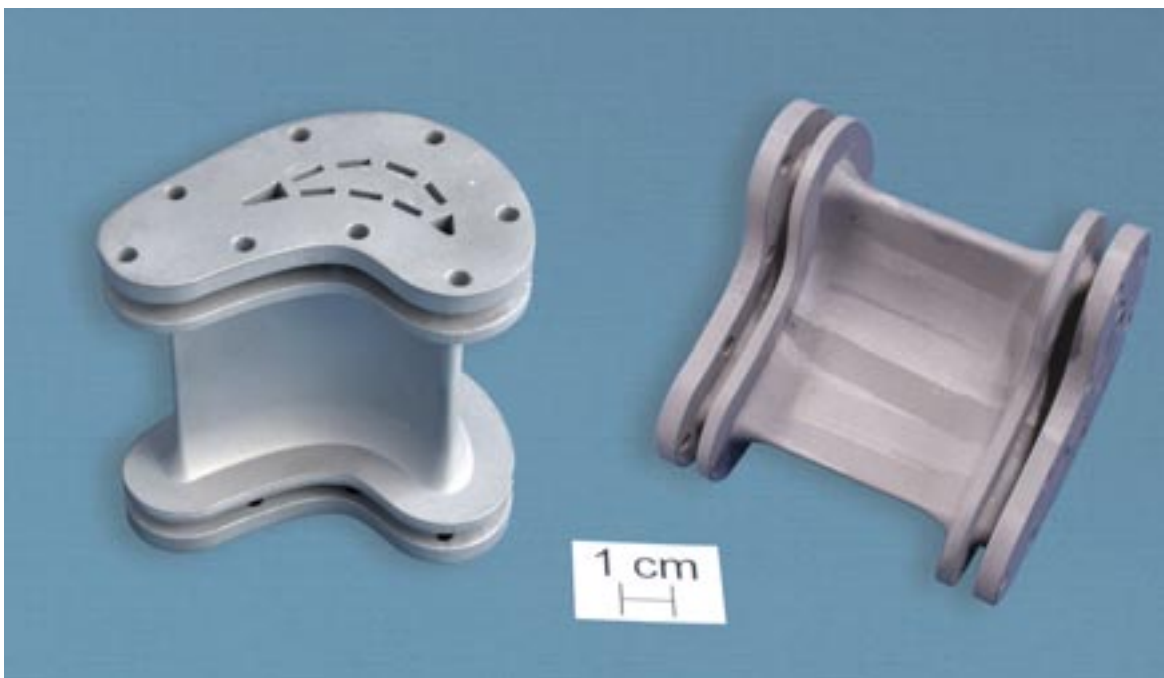


Bild 2: Links: Am Gießerei-Institut gerichtet erstarrte Turbinenschaufel mit innenliegenden Kühlkanälen aus einer Ni-Basis-Legierung; rechts: Nachweis des parallel erstarrten Gefüges durch Ätzen der Oberfläche.

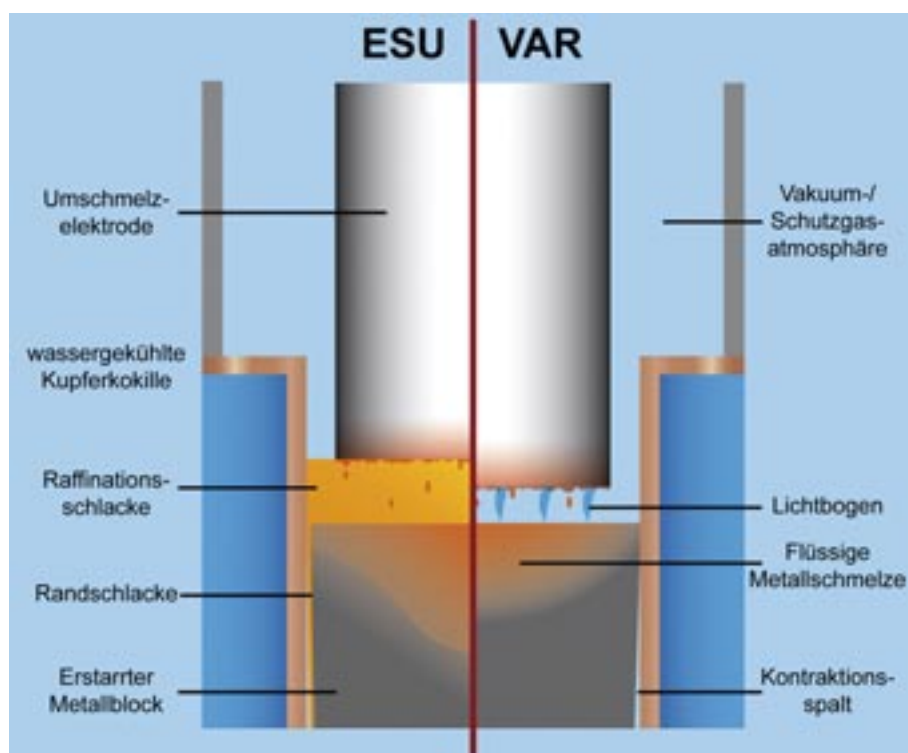


Bild 3: Schematische Gegenüberstellung der Verfahrensprinzipien von VAR-(rechts) und ESU-Prozess (links).

gen statt, inwiefern sich die Anwesenheit von nichtmetallischen Einschlüssen auf die gerichtete Erstarrung von Nickel-Basislegierungen bemerkbar macht. So werden verschiedene Legierungen mit gestuften Reinheitsgraden in Formschalen vergossen und anschließend ihre Erstarrungsverhalten und ihre Erstarrungsmorphologien untersucht, so dass gezielt der Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse dargestellt werden kann.

Der Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse ist ebenfalls Gegenstand aktueller Forschung am Institut für Eisenhüttenkunde, wo das grundsätzliche Wirkprinzip eines einzelnen Einschlusses in einer metallischen Matrix untersucht wird. Hierzu werden unter Zuhilfenahme der zerstörungsfreien Ultraschalltauchttechnikprüfung und der 3D-Röntgentomographie Kleinstproben mit einzelnen Einschlüssen angefer-

tigt und anschließend mittels Zugversuchen auf ihre statischen mechanischen Eigenschaften geprüft. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für eine numerische Simulation mithilfe der so genannten Finite-Elemente-Methode, mittels derer Experimente zukünftig direkt nachgebildet beziehungsweise am Computer ersetzt werden können. So kann durch den Vergleich von fehlerfreien Proben und Proben mit geometrisch definierten Einschlüssen die Wirkungsweise von Einschlüssen experimentell und numerisch genauer untersucht werden.

Bei weiterer Verfeinerung des Modells können die aus der numerischen Simulation gewonnenen Ergebnisse einerseits Zielvorgaben für die prozesstechnischen Institute liefern, indem für bestimmte Anwendungen kritische Einschlussgrößen und -formen identifiziert wer-

den, die bei der Herstellung der entsprechenden Bauteile vermieden werden müssen. Umgekehrt kann dann für einen bekannten Einschlussgehalt mithilfe der Simulation eine Vorhersage über das Verhalten des Werkstoffes bei mechanischer Belastung getroffen werden, wodurch Material für bestimmte Anwendungen gezielt freigegeben oder gesperrt werden kann. Auf diese Weise könnten zum Beispiel optimale Einsatzmöglichkeiten für Titan- oder Superlegierungen aus Recyclingmaterial bestimmt werden, die möglicherweise nicht dem Standard der Luftfahrtindustrie entsprechen, aber dennoch über hervorragende Werkstoffeigenschaften verfügen. Somit könnte aus jedem Material der optimale wirtschaftliche Nutzen gezogen werden, getreu der Devise: so günstig wie möglich, so rein wie nötig. ■

#### Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck ist Inhaber des Lehrstuhls für Eisenhüttenkunde und leitet das Institut für Eisenhüttenkunde. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polacek hat den Lehrstuhl für Gießereiwesen inne und ist Leiter des Gießerei-Instituts. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Bernhard Friedrich ist Inhaber des Lehrstuhls für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling sowie Leiter des Instituts für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie. Dipl.-Ing. Johannes Morscheiser ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie.

*Bild 4: Entnahme einer keramischen Fertigungsformschale aus dem Sinterofen.*

*Foto: Peter Winandy*





**Gut:**  
Zu den Besten  
gehören

**Besser:**  
Auch bei den Besten  
arbeiten

Rexroth bietet Ihnen einen Einstieg nach Maß. Ob als Praktikant, Verfasser einer Diplom-, Bachelor- oder Masterarbeit, Doktorand, PreMaster, Graduate Specialist, Junior Manager oder Direkteinsteiger: Wir eröffnen Ihnen die Perspektive, die Sie suchen.

## Ingenieure, Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte (m/w)

Ganz gleich, wie weit Sie mit Ihrem Studium schon sind – bei Rexroth sind Sie immer richtig. Ob Sie einen ersten Einblick in einen internationalen Konzern gewinnen wollen, aktive Unterstützung bei Ihrer Abschlussarbeit brauchen oder einen guten Einstieg ins Berufsleben suchen. Wir betreuen Sie individuell und stimmen Ihre Entwicklung auf Ihre Kompetenzen ab.

Das PreMaster Program vermittelt Ihnen praxis- und studien-nahe Ausbildungsinhalte im Rahmen anspruchsvoller Aufgaben vor dem Einstieg in das Master-Studium. Unser Junior Manager

Program bietet Ihnen die Möglichkeit, aktiv in Projekten im In- und Ausland mitzuarbeiten und erste Führungserfahrung zu sammeln. Im Graduate Specialist Program durchlaufen Sie verschiedene Fachabteilungen an einem Standort und lernen so wichtige Schnittstellen Ihrer späteren Arbeitsaufgabe kennen. Auch für Direkteinsteiger aller Fachrichtungen bieten wir beste Karrierechancen. Schulungen und Feedback-Gespräche fördern sowohl Ihre fachliche als auch persönliche Weiterentwicklung und bereiten Sie auf die Herausforderungen der Zukunft vor.

Die **Bosch Rexroth AG** ist einer der weltweit führenden Spezialisten von Antriebs- und Steuerungstechnologien.

Unter der Marke Rexroth entstehen maßgeschneiderte Lösungen zum Antreiben, Steuern und Bewegen – für die Anlagenausrüstung und Fabrikautomation, für mobile Arbeitsmaschinen sowie für die Nutzung regenerativer Energien.

Haben wir Ihr Interesse geweckt?  
Dann freuen wir uns auf ihre Online-Bewerbung  
unter [www.boschrexroth.com/jobs](http://www.boschrexroth.com/jobs)

**Rexroth**  
Bosch Group

# Fliegen leicht

## Herstellung und Bearbeitung aus hochwarmfesten

# S

Steigende Preise für Treibstoffe machen sich nicht nur regelmäßig an der Zapfsäule bemerkbar, sondern auch durch Kerosinzuschläge bei Flugreisen und nicht zuletzt die vielfältige Berichterstattung in den Medien. Bei Flugzeugtriebwerken leitet sich hieraus die Forderung nach steigender Effizienz und damit einem sinkenden Treibstoffverbrauch ab. Ein erfolgreicher Weg zur Effizienzsteigerung von Triebwerken, ist der Einsatz neuer, leichter Hochtemperaturwerkstoffe wie intermetallische „Gamma-Titanaluminide“, kurz TiAl. Der Wirkungsgrad einer Flugzeugturbine hängt, genau wie bei einem aus dem Automobil bekannten Verbrennungsmotor, im Wesentlichen von der Verbrennungstemperatur ab. Turbinenschaufeln aus TiAl, die bei höheren Prozesstemperaturen den auf sie wirkenden Belastungen standhalten und gleichzeitig bis zu 50 Prozent leichter sind als die derzeit noch dominierenden Nickelbasislegierungen und Sonderstähle, stellen eine hervorragende Alternative dar. Die sichere und wirtschaftliche Herstellung und Bearbeitbarkeit solcher Werkstoffe ist Voraussetzung für deren Anwendung in Flugzeugtriebwerken und damit zur Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung in der Luftfahrttechnik.

40

Um der Anforderung nach leichteren und effizienteren Antrieben nachzukommen, stehen die Hersteller von Triebwerken für Passagierflugzeuge weltweit unter starkem Druck, neue und leichtere Einzelkomponenten in den Flugturbinen einzusetzen, siehe Bild 1. Ihr Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Niederdruckschaufeln einer Flugturbine. Diese gehören zu den größten Schaufeln, die in einer Turbine zum Einsatz kommen, siehe Bild 2. Durch das geringere Gewicht einer TiAl-Turbinenschaufel ließe sich das Gesamtgewicht einer Flugturbine auf direktem Wege verkleinern. Des Weiteren würde eine deutliche Reduzierung der rotierenden Masse in der Turbine umgesetzt werden können. Eine geringere dynamische Belas-

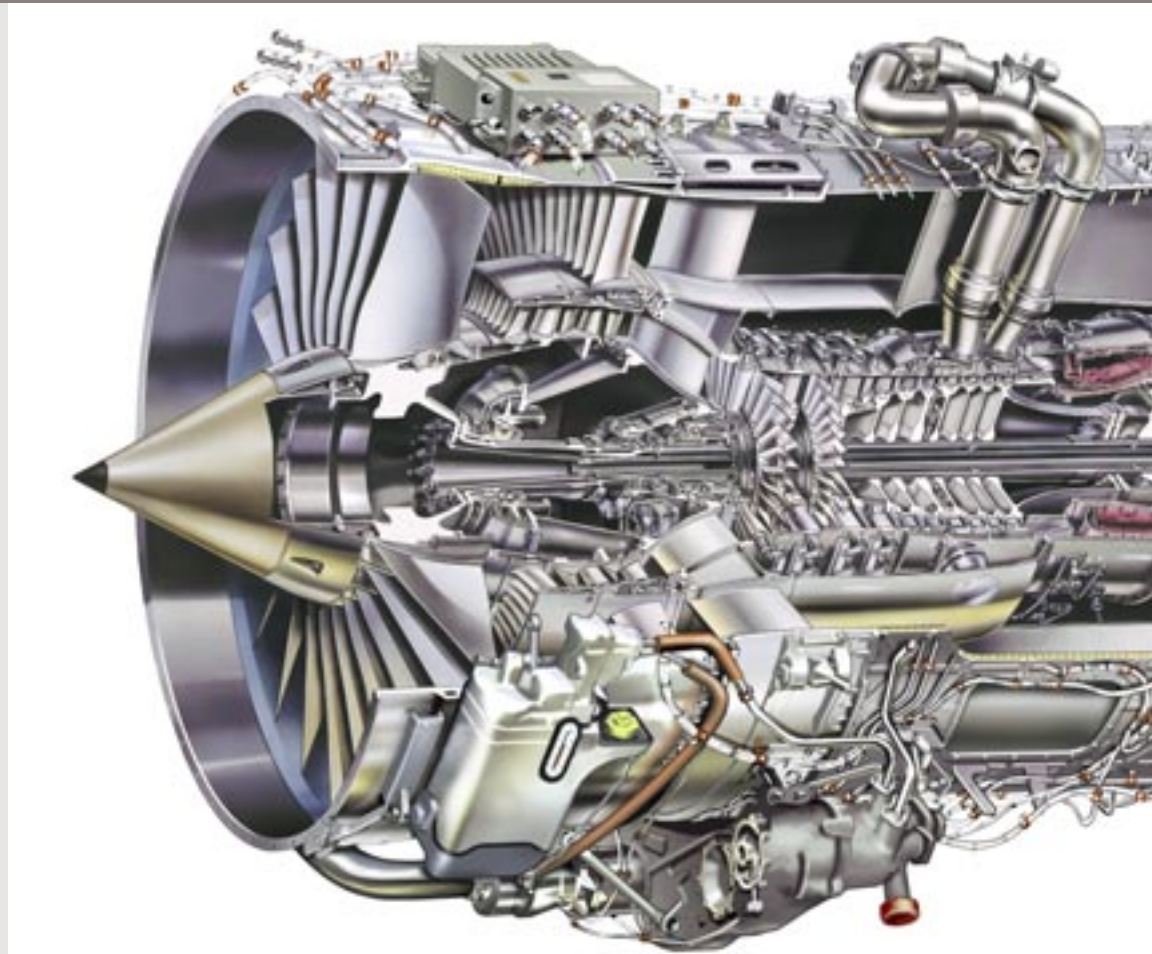


Bild 1a: Schnittbild einer  
BR 715 Flugzeugturbine der  
Firma Rolls-Royce D.  
Quelle: Rolls-Royce

tung wäre die Folge. Dies kann bei der konstruktiven Auslegung der Turbine berücksichtigt werden, was noch einmal eine Verringerung des Gesamtgewichts zur Folge hätte. Obwohl die Werkstoffgruppe der Gamma-Titanaluminide aufgrund ihrer Eigenschaften als hervorragend geeignet erscheint, findet sie bislang nur wenig Einsatz in Flugzeugtriebwerken. Zu den Hauptgründen hierfür zählen die außerordentlichen Herausforderungen für die Fertigungstechnik, die auf den sehr hohen Anforderungen in Bezug auf die Sicherheit und Haltbarkeit der Triebwerke basieren. Der Einsatz von TiAl

kann nur durch sichere und unter industriellen Produktionsbedingungen reproduzierbare Fertigungsprozesse ermöglicht werden. Eine unverzichtbare Voraussetzung für die Anwendbarkeit eines Fertigungsverfahrens ist, dass damit schadensfreie Komponenten herstellbar sind.

Die Prozessentwicklung zur Herstellung von Komponenten aus dem Hochleistungswerkstoff Titanaluminid ist ein Forschungsschwerpunkt bei Access - einem der RWTH Aachen angegliederten, privatrechtlich organisierten Forschungsinstitut. Zur Formgebung von Bauteilen aus Titanaluminiden können

prinzipiell Schmiede-, Gieß- oder pulvermetallurgische Verfahren angewandt werden. Zur Verarbeitung von Titanaluminiden beziehungsweise zur Herstellung von Komponenten für Flugzeugtriebwerke wird bei Access hauptsächlich das Feingussverfahren verwendet. Dieses gehört zu der Gruppe der Präzisionsgießverfahren und ist auch unter der Bezeichnung Modellausschmelzverfahren bekannt. Dabei wird zu Beginn ein Positivmodell des herzustellenden Bauteils aus einem speziellen Modellwachs hergestellt. Um das Wachmodell herum erfolgt dann der Aufbau einer keramischen Formschale, die

# gemacht

## von Bauteilen für Flugzeugtriebwerke Titanaluminid-Legierungen

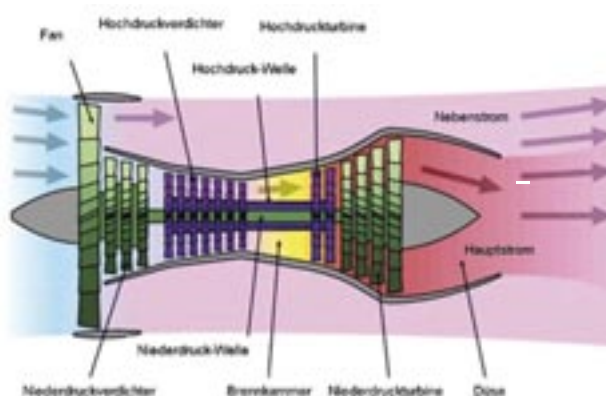
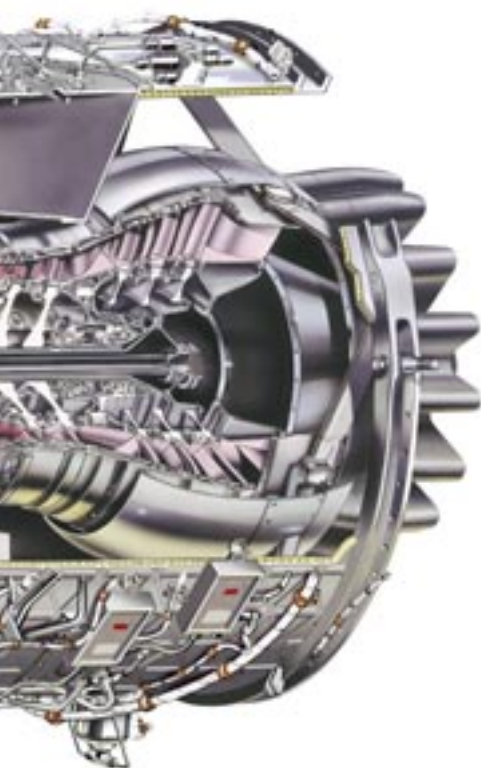


Bild 1b: Schematische Darstellung eines zweiwelligen Turboantriebswerks. Deutlich sind die verschiedenen Bereiche einer Turbine zu erkennen. Niederdruckturbinenschaufeln, für die eine industrielle Herstellung aus TiAl-Legierungen angestrebt wird, gehören zu den größten in einer Turbine eingesetzten Schaufeln. Sie befinden sich im hinteren Bereich der Niederdruckturbinen, welcher in die Düse übergeht. Quelle: Rolls-Royce



Bild 2: Niederdruckturbinenschaufeln aus Titanaluminid und aus einem Nickelbasiswerkstoff. TiAl-Werkstoffe weisen gegenüber Nickelbasiswerkstoffen eine bis zu 50 Prozent geringere Dichte auf. So lässt sich das Gewicht der gesamten Flugturbinen reduzieren. Diese Maßnahmen sind die Basis für angestrebte Einsparungsziele wie die Verringerung des Treibstoffverbrauchs sowie die Reduzierung von Abgas- und Geräuschemissionen. Quelle: Access e.V.

zum anschließenden Ausschmelzen des Wachses dient. Um die Stabilität der Formschaale zu erhöhen, wird sie bei hohen Temperaturen gebrannt. In die hohle Form wird dann das flüssige Metall gegossen. Dieses Verfahren bietet eine große geometrische Gestaltungsfreiheit bei der Auslegung und Konstruktion eines Gussteils. Es ist daher bestens geeignet komplexe Gussteile wie zum Beispiel eine Niederdruckturbinenschaufel herzustellen. Auch lässt das Feingussverfahren eine endabmessungsnahen Fertigung von Bauteilen zu, was nachfolgende Bearbeitungsschritte minimiert und ei-

ne kostengünstige Herstellung ermöglicht. Das Feingussverfahren lässt eine nahezu freie Auswahl des Gießmetalls zu. Je nach verwendetem keramischem Formstoff kann eine thermische Stabilität von über 1500°C erreicht werden. Durch die Auswahl des Formstoffs lassen sich ebenfalls unerwünschte Reaktionen zwischen dem Gießmetall und dem Formstoff unterdrücken. Dieses ist elementare Voraussetzung, um die hochschmelzenden Titanaluminid-Legierungen verarbeiten zu können, welche aufgrund ihres Titananteils eine hohe Reaktivität gegenüber den sie umge-

benden Medien, wie beispielsweise Formstoff, besitzen. Titanaluminide können in einem wassergekühlten Kupfertiegel (Kaltwandtiegelverfahren) oder in einem Tiegel aus hochwertigen Keramiken ausschließlich unter Vakuum geschmolzen werden, siehe Bild 3. Bei dem so genannten Kaltwandtiegelverfahren in einem wassergekühlten Kupfertiegel erstarrt ein Teil der geschmolzenen TiAl-Legierung an der Wand des Kupfertiegels und bildet einen Tiegel aus arteigenem Material. Diese feste Randschicht, die während des gesamten Aufschmelzvorgangs erhalten bleibt, verhindert einen Kontakt

mit der Wand des Kupfertiegels. Eine Reaktion wird auf diese Art unterbunden. Aufwändige Anlagentechnik und hohe Betriebskosten sind ein Nachteil dieser Schmelztechnik. Ein im Vergleich zur Kaltwandinduktionstechnik deutlich weniger komplexes und dadurch preiswerteres Verfahren ist das Schmelzen in speziellen Keramiktiegeln. Der verwendete keramische Formstoff unterdrückt Reaktionen der TiAl-Schmelze. Bei diesem Verfahren wird die TiAl-Legierung induktiv erschmolzen.

Mit finanzieller Unterstützung des Landes NRW und der Industrie wurde im Access

TechCenter der Aufbau einer systemfähigen Plattform für die Schmelz- und Gießtechnik metallischer Hochleistungswerkstoffe ermöglicht. Mit modernster Anlagentechnik werden dort Prozesse zur Herstellung von Komponenten aus TiAl-Werkstoffen untersucht. Ein besonderer Fokus liegt in der Überführung der Prozesstechnik in den Industriemaßstab, um eine Serienfertigung von Bauteilen aus dem Werkstoff Titanaluminid zu ermöglichen. Der Gießprozess stellt jedoch nur einen Schritt in der Fertigungskette dar. Im Anschluss an diesen müssen die Bauteile weiter bearbeitet werden. Die Entwicklung von hierfür geeigneten Fräsbearbeitungsstrategien stellt einen Forschungsschwerpunkt am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) dar. Die hohe Festigkeit und Sprödigkeit von TiAl auch bei hohen Temperaturen prädestinieren den Einsatz dieses Werkstoffes in Flugzeugtriebwerken. Gleichzeitig erschweren sie aber auch die spanende Bearbeitung.

Bei der spanenden Bearbeitung wird durch die Bewegung des Werkzeuges der Werkstoff elastisch und plastisch verformt. Durch die plastische Verformung bildet sich ein Span aus, der über die Spanfläche des Werkzeuges abgleitet. Bei unzureichender plastischer Verformbarkeit des Werkstoffes, bilden sich Reißspäne. Bei der Entstehung dieser sehr kurzen, bröckeligen Späne wird Werkstoff aus der erzeugten Oberfläche gerissen. Aufgrund dessen finden sich dort Mikrorisse, welche sich unter Belastung

ausbreiten und zum Reißen der Schaufel führen können. Festzuhalten bleibt, dass jedes spanende Bearbeitungsverfahren eine Werkstückoberfläche erzeugen muss, welche die an sie gestellten Anforderungen erfüllt.

Die Sprödigkeit von intermetallischem TiAl, welche die Spanbildung und damit die Herstellung sicherheitsgerechter Oberflächen behindert, fällt erst bei hohen Temperaturen nennenswert ab. Bei Temperaturen unter 700 - 750°C verhält sich der Werkstoff so spröde, dass das Zerspanen mit konventionellen Bearbeitungsstrategien nur unzureichende Oberflächen herstellt. Die Anwendung hoher Schnittgeschwindigkeiten bei der spanenden Bearbeitung bewirken Temperaturen, die zu duktilem Werkstoffverhalten bei der Spanbildung führen. Durch diese hohen Temperaturen werden die eingesetzten Zerspanwerkzeuge thermisch extrem beansprucht. Gleichzeitig bewirken diese Temperaturen jedoch auch eine Erhöhung der Duktilität des TiAl und begünstigen so die spanende Bearbeitung.

Unter dem dargestellten Zusammenhang zwischen der thermischen Werkzeugbelastung und der werkstoffbedingten Verbesserung der Bearbeitbarkeit, kann die Temperatur selbst als Werkzeug betrachtet werden. Hieraus leitet sich der Forschungsbedarf nach einem zielgerichteten Einsatz der Tem-

peratur zur Erweichung des Werkstoffes ab. Allerdings bewirkt dieses auch ein schnelleres Verschleifen der eingesetzten Werkzeuge. Es müssen also zusätzlich Strategien entwickelt werden, um das Werkzeug auch bei diesen erhöhten Temperaturen einsetzen zu können. Der zielgerichtete Einsatz der Temperatur wurde durch speziell konzipierte Werkzeuge erreicht. Diese bewirken aufgrund Ihrer Schneidengeometrie eine verstärkte Verformung in der Spanentstehungsstelle. Durch die infolge der Verformung entstehende Wärme steigt die Duktilität des Werkstoffes und eine verbesserte Spanbildung wird ermöglicht. Unter Anwendung dieser Technologie werden rissfreie Oberflächen sogar in Schleifqualität erzeugt. Allerdings schränken die hohen Temperaturen auch die Standzeit der Werkzeuge stark ein. Zur Steigerung der Standzeit wird das Werkzeug gezielt gekühlt. Ein Aerosol aus Wasser und Luft wird nur auf das Werkzeug gesprüht. Dabei erfolgt die Ausrichtung des Sprühstrahls, dass er vorrangig das Werkzeug und nicht das Werkstück im Bereich der Spanentstehungsstelle kühlt. Die Weiterentwicklung dieser Bearbeitungstechnologie ist Gegenstand der Forschungstätigkeit am WZL.

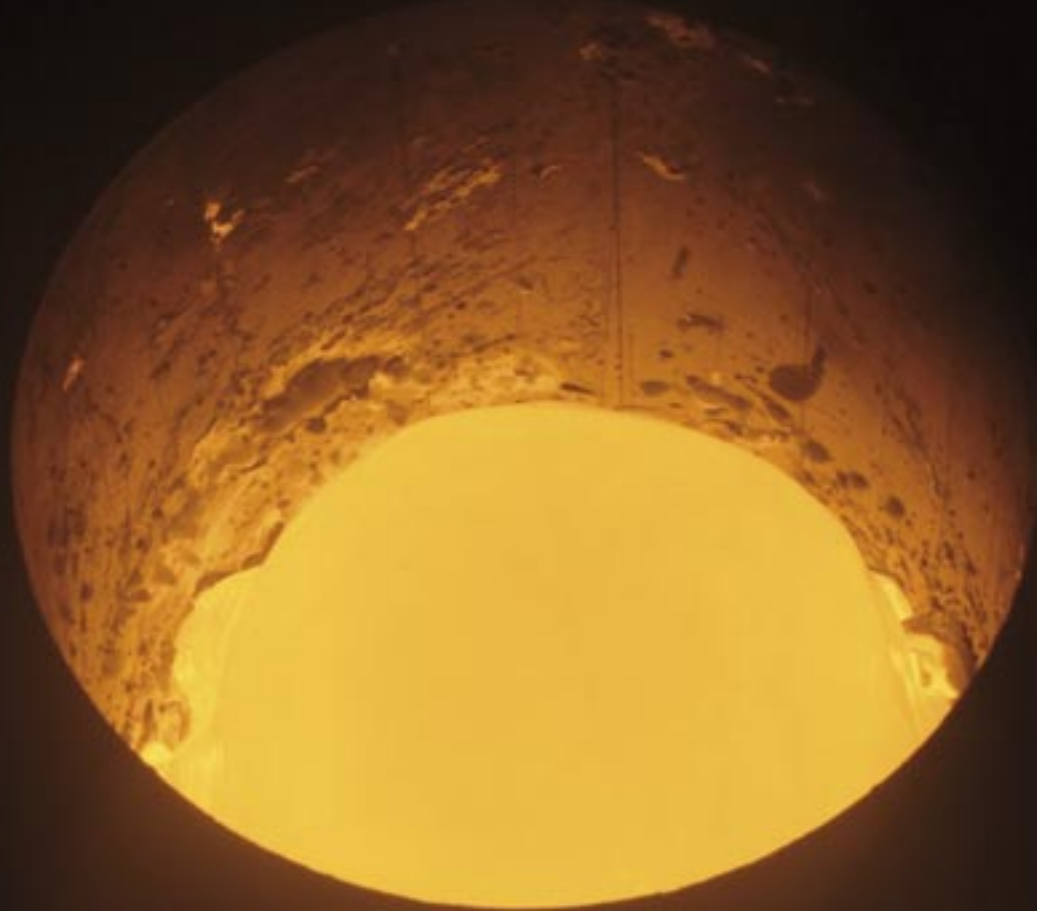
Durch die kooperative Forschungs- und Entwicklungstätigkeit von Access und dem WZL wird die Technologie zur

Fertigung einer Turbinenschaufel aus diesem Werkstoff weiter vorangetrieben. Die notwendigerweise neu aufzusetzende Fertigungslinie mit ihren für „Gamma Titanaluminiden“ speziellen Anforderungen kann nur gelingen, wenn die verbleibenden Herausforderungen an die Herstellung und Bearbeitung dieses interessanten Werkstoffes gemeistert werden können. ■■■■■

#### Autoren:

Dipl.-Ing. Martin Arft ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am WZL.  
Dr.-Ing. Julio Aguilar, Dipl.-Ing. Oliver Kättlitz und Dipl.-Ing. Claudius Grüneberg sind Wissenschaftliche Mitarbeiter bei Access e.V.  
Robert Guntlin ist Geschäftsführer von Access e.V.  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fritz Klocke hat den Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren inne und ist Direktor des Werkzeugmaschinenlabors (WZL).  
Dipl.-Ing. Dieter Lung ist Oberingenieur am WZL.

*Bild 3: Titanaluminid-Schmelze in einem Kaltwandinduktionstiegel. Die Vakuum-Schmelztechnologie und die Verwendung von speziellem Formstoffmaterial ist aufgrund der hohen Reaktivität der Schmelze von großer Wichtigkeit.  
Quelle: ALD Vacuum Technologies GmbH*



- Großes Fragezeichen.
- Große Katastrophe.
- Große Herausforderung.

Zugegeben, es gibt leichteres als technische Formeln. Aber wenn Sie Spaß an solchen und anderen Herausforderungen haben, sollten Sie sich bei uns melden. Als einer der weltweit führenden Technologiekonzerne bieten wir Ihnen eine Vielzahl von Aufgabenfeldern im Bereich der Ingenieurs- und Wirtschaftswissenschaften – und das mit internationalen Auf- und Umstiegchancen: Entwicklung von Hochleistungswerkstoffen, Aufbau einer Niederlassung in Asien, Implementierung eines globalen Wissensnetzwerkes oder Vermarktung richtungweisender Produktentwicklungen. Was Sie bei ThyssenKrupp nicht erwartet? Ein alltäglicher Job.

Interessiert? Dann besuchen Sie uns im Internet unter [www.thyssenkrupp.com/karriere](http://www.thyssenkrupp.com/karriere) oder schreiben Sie uns eine E-Mail: [karriere@thyssenkrupp.com](mailto:karriere@thyssenkrupp.com)

Weitere Informationen unter [www.thyssenkrupp.com](http://www.thyssenkrupp.com)



**ThyssenKrupp**

Wir entwickeln die Zukunft für Sie.

# Wenn Knochenersatz benötigt wird

# F

Erkrankungen des Bewegungsapparates sind weltweit die häufigste Ursache für chronische Schmerzen, körperliche Funktionseinschränkungen und den Verlust an Lebensqualität. In Deutschland werden nach Angaben der Gesundheitsberichterstattung des Bundes zurzeit jährlich ungefähr 25 Milliarden Euro zur Behandlung von muskuloskelettalen Erkrankungen aufgewendet. Dabei nimmt die Versorgung von Knochendefekten aufgrund der demographischen Entwicklung gerade in Deutschland einen immer größeren Raum ein. So wurden 2008 über 75.000 Knochentransplantationen und -transpositionen durchgeführt. Knochendefekte können entweder angeboren sein, entstehen durch traumatische Ereignisse, wie beispielsweise Unfall und Kriegsverletzungen, oder resultieren aufgrund der Entfernung tumorbefallener oder stark entzündeter Hartgewebereale. Der Goldstandard bei Knochendefekten ist die Versorgung mit autologem, also körpereigenem Gewebe. Dieses wird insbesondere dem Beckenknochen entnommen und in den Defekt eingesetzt. Autologer Knochen heilt in der Regel gut ein. Das geschädigte Gewebe kann durch Knochenumbauvorgänge dann meist komplett regeneriert werden. Wegen seiner quantitativen Limitierung ist der autologe Knochenersatz bei größeren Defekten jedoch nur begrenzt einsetzbar. Zusätzlich stellt bei Kindern, bei Polytraumatisierten und bei Patienten in schlechtem Allgemeinzustand die Entnahme größerer Mengen an körpereigener Knochenmasse wegen der damit verbundenen Ausweitung des Operations- und Gewebstraumas einen oftmals nicht zu vertretenden Zweiteingriff dar. Alternativ zur Verwendung autologen Knochens kann zur Überbrückung knöcherner Defekte so genannter homologer Knochen, also Hartgewebe aus Knochenbanken verwendet werden. Obwohl er quantitativ unbegrenzt zur Verfügung steht, ist sein Einsatz umstritten. Der Kno-

chenauf- und -umbau und das Einsprossen neuer Gefäße zur Versorgung der betroffenen Areale ist im Vergleich zu autologem Knochen geringer und die mechanische Belastbarkeit vermindert. Außerdem werden bei Verwendung von homologem Material aus Knochenbanken Infektionen mit HIV und Hepatitisviren beschrieben. Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen können Infektionen mit Creutzfeld-Jakob-Prionen nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

## Synthetische Calciumphosphate

Ein Durchbruch war im Bereich der Knochendefektversorgung zu verzeichnen, als Ende der 1990er Jahre phasenreine synthetische Calciumphosphate in Granulat- und Pastenform am medizintechnischen Markt verfügbar wurden. Ein wichtiger Vertreter ist der Hydroxylapatit, welcher die Calciumphosphat-Variante darstellt, aus der 95 Prozent der Mineralphase menschlichen Knochengewebes bestehen. Besonders interessant ist aber auch das Tricalciumphosphat, da diese synthetische Variante vom Körper biologisch abgebaut werden kann, siehe Bild 1.

Die Eigenschaft der biologischen Abbaubarkeit dieser mineralischen Knochenersatzmaterialien kommt einer neuen Strategie entgegen. Denn seit einigen Jahren findet ein Paradigmenwechsel im Bereich der Implantatforschung statt. Weltweit arbeiten Wissenschaftler seither verstärkt daran, Biomaterialien für die Implantologie zu entwickeln, die das Prinzip der so genannten regenerativen Therapie unterstützen. Dies bedeutet, dass Defektstrukturen im Körper, hier Knochendefekte, nicht mehr dauerhaft durch synthetische Implantate ersetzt werden. Vielmehr soll das implantierte Material den Selbstheilungsprozess des Körpers stimulieren, so dass der Defekt vollständig regeneriert werden kann. Dabei ist es zielführend, wenn das Knochenersatzmaterial so beschaffen ist, dass es mit fortschreitender Defektregeneration sukzessive vom Körper abgebaut werden kann und durch neu gebildetes körpereigenes Knochengewebe ersetzt wird.

Müssen größeren Defekte versorgt werden, reicht die Bioaktivität der synthetischen Calciumphosphate für einen kompletten Umbauprozess in der

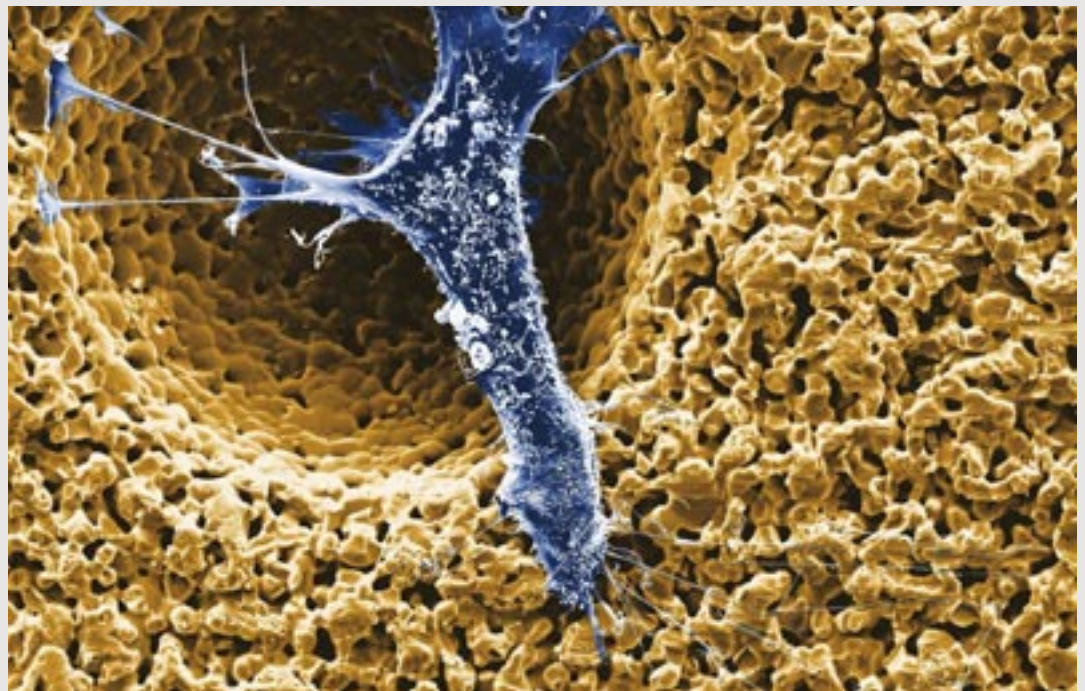
Regel jedoch nicht aus. Der Remodellingprozess kommt bei größeren Knochenersatzvolumina nach anfänglicher Aktivität in der Defektzone mittelfristig meist zum Erliegen. Klinisch stellt sich dieses Phänomen dar, indem zur Defektfüllung eingebrachte synthetische Calciumphosphat-Granulate teilweise nach Jahren noch im Röntgenbild isoliert ausgemacht werden können.

## Funktionalisierung von Knochenersatzwerkstoffen

Damit der defektfüllende Ersatzwerkstoff komplett abgebaut und durch Eigenmaterial substituiert werden kann, wird in der Arbeitsgruppe Zahnärztlichen Werkstoffkunde und Biomaterialforschung daran gearbeitet, die Knochenersatzwerkstoffe durch intelligente Zusatz-

*Bild 1: Mesenchymale Stammzelle auf einem Knochenersatzwerkstoff aus synthetisch hergestellter Calciumphosphat-Keramik.*

*Quelle: Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung ZWBF, Universitätsklinikum Aachen.*



# Interdisziplinäre Forschungsstrategien aus dem Bereich der Biomaterialforschung

stoffe zu funktionalisieren. Zum Beispiel werden in einem grösseren Verbundprojekt in Kooperation mit Forschungspartnern die Calciumphosphatoberflächen mit spezifischen Proteinen beladen, um so den Knochenaufbau zur Regeneration des Defektes zusätzlich zu stimulieren. Bei größeren Defekten ist es zudem von entscheidender Bedeutung, dass ein Einsprossen neuer Gefäße in den Defektbereich stattfindet, damit neugebildete Knochensubstanz nachhaltig versorgt werden kann. Auch einige der spezifischen Weichgewebefaktoren, die der Körper bei der Neubildung von Gefäßen ausschüttet, können heute isoliert und in aufbereiteter Form zum Einsatz für intelligente Knochenersatzwerkstoffe

*Bild 2: Skaliertes Schädelsegment als Knochenersatz-Anschauungsobjekt, hergestellt mittels pulverbett-basierter 3D-Drucktechnik. Quelle: Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung ZWBF, Universitätsklinikum Aachen*

genutzt werden. Dies zeigt, dass es zielführend ist, wenn als Knochenersatz „intelligent“ gestaltete organisch-anorganische Verbundwerkstoffe eingesetzt werden. Nur im Zusammenspiel von degradierbarer anorganischer Matrix auf der einen Seite und organischen Zellinhaltsstoffen auf der anderen, welche die Knochenneubildung im Defektbereich und die Blutgefäßeinsprossung stimulieren, kann Knochenersatz im Sinne der regenerativen Therapie erfolgreich sein.

## Intelligente 3D-Fertigungsverfahren

Kleinere Defekte können heute somit durch solche organisch-anorganische Verbundmaterialien erfolgreich versorgt werden. Bei größeren Defekten ist es jedoch nicht unproblematisch, die in Granulatform oder pastös dargereichten Knochenersatzmaterialien zu verwenden, da eine bleibende Formgebung mit Granulaten und Pasten nicht zu erreichen und zudem die daraus resultierende Primärstabilität der gefüllten Defektzone sehr gering ist. Aus diesem Grund arbeiten verschiedene Forschergruppen

weltweit an so genannten generativen Fertigungsverfahren. Mit Hilfe dieser Verfahren können dreidimensionale Strukturen Schicht für Schicht aufgebaut werden.

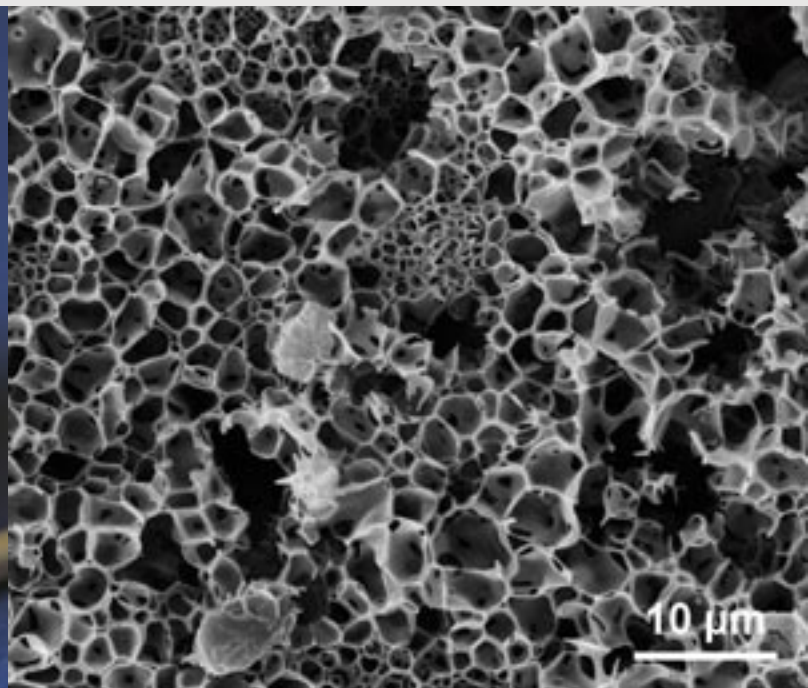
Bei dem so genannten pulverbettbasierten 3D-Druckverfahren wird ein geeigneter Binder mittels Tintenstrahltechnologie in ein Calciumphosphat-Pulverbett gedruckt. Auf die gebundene Pulverlage wird die nächste Pulverschicht appliziert und mittels verdrukten Binders gebunden. Schicht für Schicht kann so ein dreidimensionales Gerüst, ein so genannter Scaffold, hergestellt werden. Die dreidimensionale Form eines solchen Scaffolds wird dabei anhand der Daten generiert, die zuvor mittels klinischer Computertomografie-Technik vom zu versorgenden Knochendefekt ermittelt worden sind, siehe Bild 2.

## Biomimetisch aufgebaute Mikrostrukturen

Menschlicher Knochen besitzt eine komplexe Mikrostruktur. Dies zeigt sich bereits im trabekulären, also balkenartigen Aufbau der so genannten Spongiosa, des schwammarti-

gen Inneren eines großen Röhrenknochens wie beispielsweise des Oberschenkelknochens. Um bei innovativen Knochenersatzimplantaten nicht nur eine individuelle Außenkontur durch generative Fertigungsverfahren umzusetzen, sondern zusätzlich auch eine spongiosa-ähnliche Mikrostruktur zu realisieren, werden werkstofftechnische Verfahren eingesetzt. So ist es möglich, bei mineralischen Knochenersatzwerkstoffen Mikrostrukturen durch spezielle Oberflächenbehandlungen zu erzeugen. Durch einen solchen biomimetischen Ansatz, also durch die Nachahmung der Natur, können Morphologien auf der Mikroskala erzeugt werden, die dem natürlichen Vorbild des spongiosen Knochens bereits sehr nahe kommen, siehe Bild 3.

*Bild 3: Biomimetisch, also dem natürlichen Vorbild des spongiosen Knochens nachempfunden, mikrostrukturierter mineralischer Knochenersatzwerkstoff. Quelle: Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung ZWBF, Universitätsklinikum Aachen*



### Interdisziplinäre Forschungsverbünde

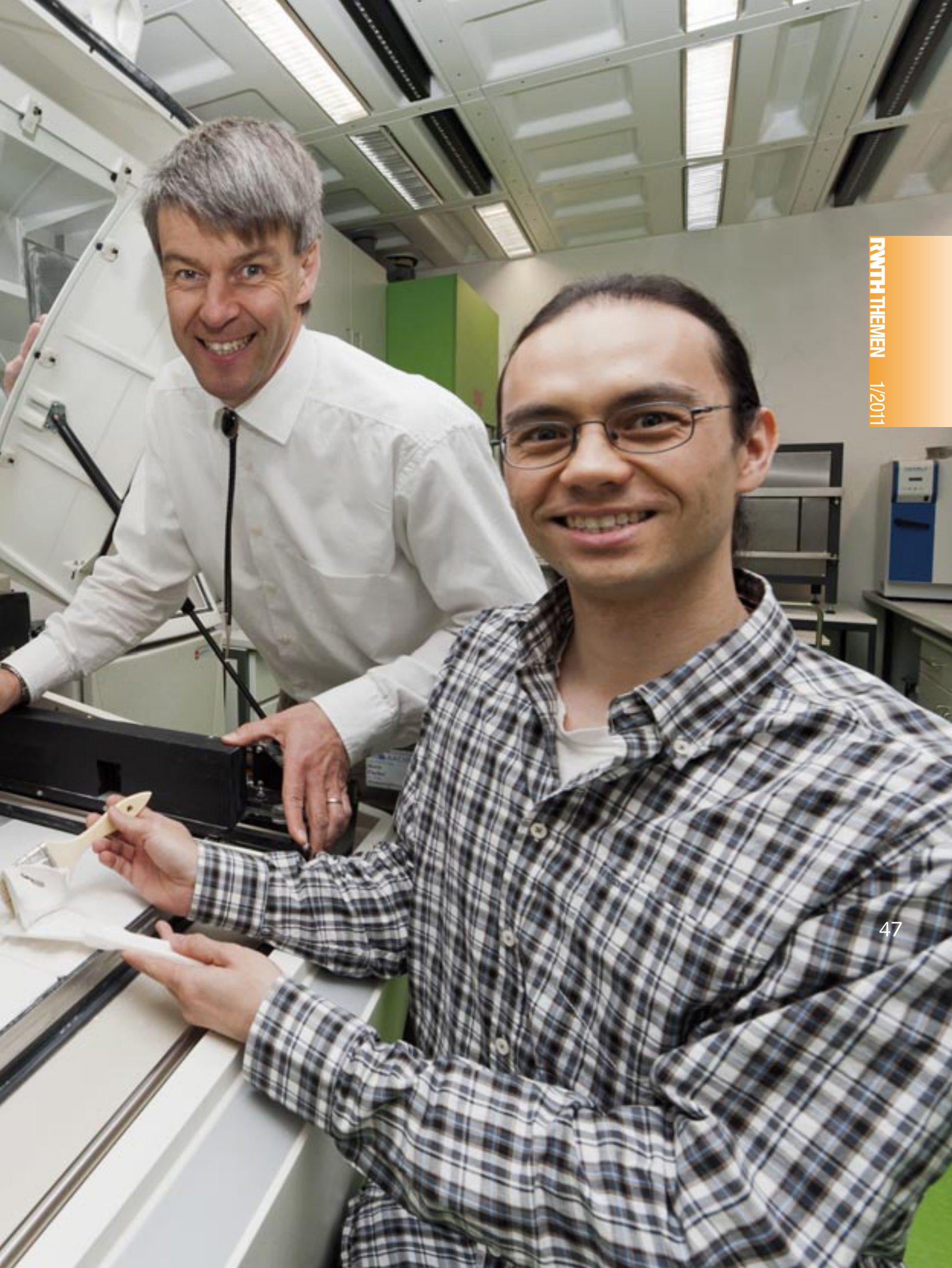
Aufgrund der Interdisziplinarität der Biomaterialforschung arbeiten bei heutigen Forschungsprojekten, in denen innovative Knochenersatzwerkstoffe entwickelt werden, Experten aus verschiedenen Fachbereichen zusammen. Dies betrifft neben den Biowerkstoffwissenschaften und der Medizin vor allem die Naturwissenschaften. Im Hinblick auf die angesprochenen modernen Fertigungsverfahren, die bei der Herstellung der komplex aufgebauten 3D-Strukturen mitunter verwendet und weiterentwickelt werden, fließen auch Fachkenntnisse der Ingenieurwissenschaften Maschinenbau und Elektrotechnik in die Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ein. Das Team des Lehr- und Forschungsgebietes Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung (ZWBF) arbeitet in diesem Sinne mit Fachkollegen aus den angesprochenen Disziplinen in verschiedenen Verbundvorhaben intensiv daran, dass in einigen Jahren auch Patienten mit größeren Hartgewebedefekten mit Hilfe von maßgeschneiderten organisch-anorganischen Ersatzmaterialien im Sinne der regenerativen Therapie zuverlässig versorgt werden können. ■■■■■

#### Autor:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Fischer ist Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung.

*Bild 4: In den Labors des Lehr- und Forschungsgebietes Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung (ZWBF) werden mithilfe der pulverbasierten 3D-Drucktechnik patientenindividuell konturierte Knochenersatzimplantate entwickelt.  
Foto: Peter Winandy*





# Zutritt nur für befugte Substanzen

Unter Dialyse kann sich jeder etwas vorstellen: In einem langwierigen Trennprozess wird über eine semipermeable, also „halbdurchlässige“ Membran das Blut von Stoffwechselabfall- und Giftstoffen gereinigt, während größere Substanzen und Blutzellen zurückgehalten werden. Im Trennprozess der Umkehrosmose wird ebenfalls über eine semipermeable Membran und unter Anwendung von Druck Meerwasser entsalzt und zu Trinkwasser aufbereitet. Membranen spielen für technische Anwendungen und in der Medizin also eine große Rolle. Generell wäre Leben in seiner heutigen Form ohne Membranen als Trennschicht nicht möglich, denn jede Zelle unseres Körpers ist von Membranen umgeben und in verschiedene Bereiche unterteilt. Biomembranen sind keine passiven Trennschichten, sondern steuern aktiv den selektiven Transport von Molekülen und Informationen von einer Seite zur anderen.

## Interaktive Materialien

Selektivität, kontrollierte Aktion, Reaktion und Interaktion mit der Umgebung sind typisch für Lebewesen. Weltweit versuchen Forscher, diese Fähigkeiten nachzuahmen und Materialien mit aktiven Eigenschaften auszustatten. Solche Materialien werden häufig mit den Attributen „bioinspiriert“, „biomimetisch“ oder „biohybrid“ umschrieben. Gemeint sind etwa die Fähigkeit zur Selbstorganisation und die in der Struktur der Bausteine programmierte Strukturbildung, Selektivität, Schaltbarkeit von Struktur und Eigenschaften, adaptive Eigenschaften, Erkennung, Gedächtniseigenschaften, die Fähigkeit zur Strukturheilung sowie Reparatur. In einer weiteren Entwicklungsstufe sollen die neuen Materialsysteme durch integrierte Energiewandelsysteme autonom reagieren, sich selbst bewegen und vervielfältigen können.

Das DWI an der RWTH Aachen e.V. greift diese Kernpunkte moderner Materialforschung auf und hat sich die Entwicklung interaktiver Mate-

rialien zum Ziel gesetzt. Letztlich sollen durch die Kombination von synthetischen Materialien und biologischen Komponenten aktive Eigenschaften und Funktionalitäten generiert werden, die über die Möglichkeiten bisheriger Materialsysteme und rein biologischer Systeme hinausgehen.

Dazu fließen am DWI Kompetenzen aus der Makromolekularen Chemie – insbesondere mit den Schwerpunkten Nanostrukturbildung und Funktion in Makromolekularen Systemen – und der Biotechnologie zusammen. Durch Protein Engineering werden maßgeschneiderte und schaltbare Biobausteine hergestellt, für den jeweiligen Einsatz angepasst und zu biohybriden Systemen weiterentwickelt. Ein drittes Kompetenzfeld bildet die Chemische Verfahrenstechnik. Die gemeinsame Entwicklungsarbeit richtet sich unter anderem auf hochpräzise Membranstrukturen,

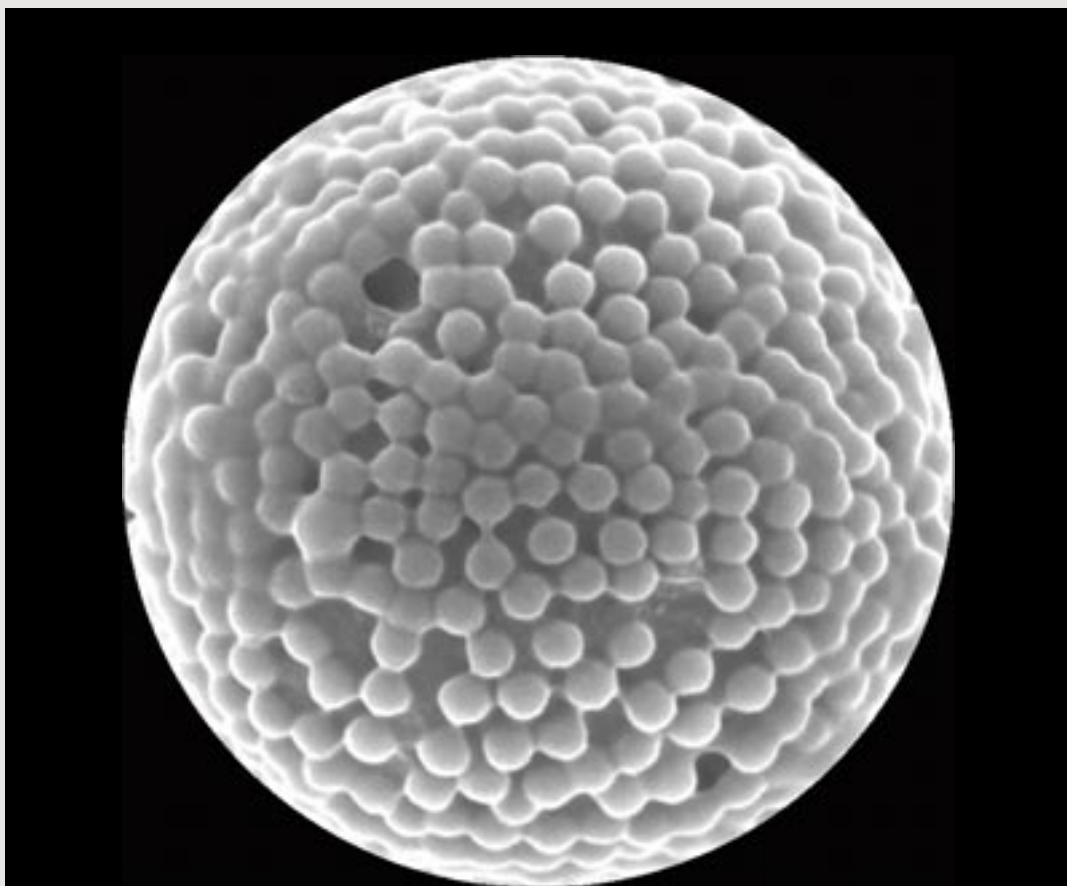
Trennprozesse und den selektiven Transport von Substanzen, zum Beispiel für biomedizinische Anwendungen, Wasserbehandlung oder Energieproduktion.

## Membranen und Kapseln durch Selbstorganisation von Polymeren

Zur Bildung komplexer Materialsysteme für Anwendungen in Trennprozessen, Filtration, Verkapselung und Freisetzung von Wirkstoffen sind bestimmte Voraussetzungen notwendig. Man muss einzelne Kompartimente bilden und stabilisieren können, um Substanzen geschützt oder vorübergehend zu deponieren. Die Bedingungen in diesen Kompartimenten sollten gezielt einstellbar und möglichst auf einen äußeren Reiz hin auch veränderbar sein. Schließlich ist es erforderlich, dass sich zwischen Kompartiment und Umgebung, beziehungsweise zwischen den bei-

den Seiten einer Membran, Substanzen je nach Anwendung selektiv und/oder schaltbar austauschen lassen. Die Chemiker des DWI nutzen die Soft Matter Nanotechnologie, um solche funktionalen Strukturen zu erzeugen. Soft Matter Nanotechnologie ist eine Forschungsrichtung, die durch molekulare Selbstorganisation „weicher Materie“, wie zum Beispiel Polymere oder Polymer/Protein-Konjugate, funk-

*Bild 1: Schaltbare Kapsel mit einer Hülle aus Mikrogel-Partikeln mit einem Durchmesser von 150 nm. Verschiedenste Substanzen können sowohl im Innern der Kapsel als auch in den Mikrogelpartikeln eingeschlossen und auf einen äußeren Reiz hin freigesetzt werden. Der Kapseldurchmesser beträgt etwa 2 µm. Quelle: DWI*



# Membranstrukturen für den hochselektiven Transport von Molekülen

tionale Strukturen im Nanometermaßstab generiert. In einem interdisziplinären Verbund verfolgen Wissenschaftler der RWTH mehrere Ansätze, um die Selbstorganisation von Polymeren für Anwendungen in Membran-, Trenn- und Freisetzungssystemen zu nutzen.

Prominente Vertreter der künstlichen weichen Materie sind Block-Copolymere, deren Selbstorganisation in dünnen Filmen zur Strukturierung von Oberflächen und Grenzflächen genutzt wird. Block-Copolymere bestehen aus zwei verschiedenen Monomersorten, A und B, die jeweils en bloc, zum Beispiel AAA-BBB, angeordnet sind. Kombiniert man Block-Copolymeren mit flüssigkristallinen Einheiten, ordnen sich die Polymere an einer Luft-Substrat-Grenzfläche spontan und absolut regelmäßig an. Die Flüssigkristall-Einheiten lassen sich selektiv herauslösen und

zurück bleiben Poren mit einheitlicher Größe und Verteilung. Anschließend wird der poröse dünne Film stabilisiert und zum Beispiel in eine Silizium- oder Titandioxid-Membran umgewandelt. Diese Schicht kann wiederum als Maske verwendet werden, um Poren in die oberste Schicht einer anderen Membran zu ätzen, die selbst nicht direkt mit der gewünschten Porenstruktur hergestellt werden kann.

Durch die Kombination von Polymeren mit Proteinen können ebenfalls Membranen und Kapseln mit definierter Porenstruktur erzeugt werden. Dazu werden an die Oberfläche des Eisenspeicherproteins Ferritin Polymerketten gebunden, die durch UV-Bestrahlung zu einer Matrix vernetzt werden. Auch hier bewirkt die Struktur der Polymerketten eine spontane Selbstorganisation und regelmäßige Anordnung der Poly-

mer/Protein-Konjugate zum Beispiel auf einem Silikonträger oder an der Phasengrenze von Tröpfchen in einer Emulsion. Im nächsten Schritt werden die Proteine denaturiert und ausgewaschen. Nach diesem Prinzip können sowohl Membranen als auch Kapseln mit definierten Poren hergestellt werden.

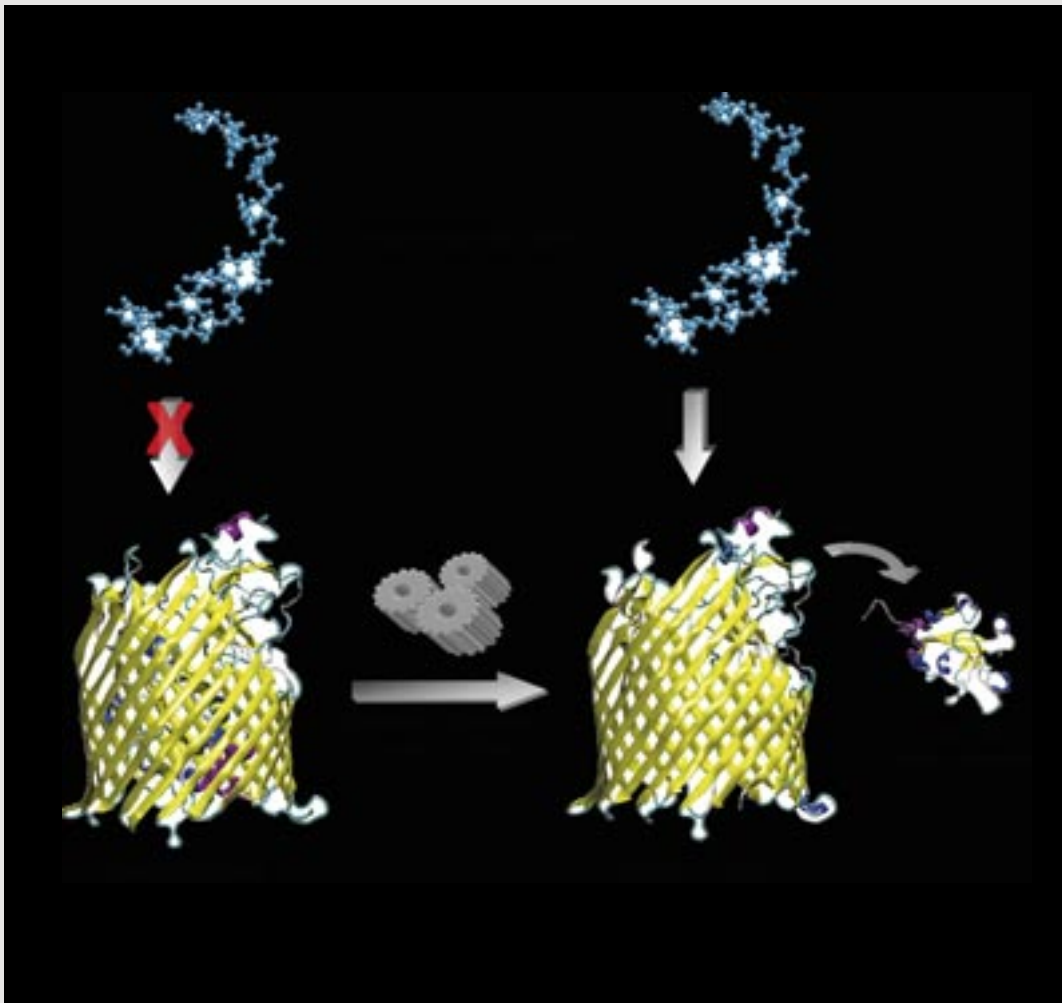
Durch chemische Modifizierung der Polymerseitenketten

*Bild 2: Das Transmembrankanalprotein FhuA wird durch Protein Engineering für selektive Transportaufgaben modifiziert. Aus dem fassförmigen Protein (links Wildtyp, WT) wird eine 160 Aminosäuren umfassende innere Korkdomäne entfernt. Durch die FhuA-Variante (rechts) kann nun zum Beispiel einsträngige DNA passiv diffundieren. Quelle: Lehrstuhl für Biotechnologie*

in den Poren und an der Oberfläche der Membranen oder Kapseln eröffnen sich vielseitige Möglichkeiten: Die Stabilität und Reaktivität in verschiedenen Umgebungsmedien und der Porendurchmesser können eingestellt werden. Reaktive Gruppen im Poreninneren ermöglichen schaltbare Freisetzungssysteme. Aufeinander folgende Modifizierungen setzen nacheinander verschieden große Gastsubstanzen aus den Kapseln frei oder transportieren sie durch die Membran.

Die Selbstanordnung von Polymer/Protein-Konjugaten, Partikeln oder Polymeren an der Oberfläche von Tröpfchen in einer Emulsion ist ein generelles Prinzip, um eine enorme Vielfalt von porösen und dichten Kapseln oder solchen mit schaltbarem Freisetzungverhalten herzustellen. So können aggressive Substanzen wie Wasserstoffperoxid sicher in dichten Silikakapseln verpackt, Medikamente kontinuierlich über einen längeren Zeitraum aus porösen oder auf einen äußeren Reiz hin spezifisch aus schaltbaren Kapseln freigesetzt werden.

Auch Mikrogele können so zu Kapseln angeordnet, als Bestandteile von Membranen oder in Lösung als Freisetzung-, Trenn- und Filtersysteme genutzt werden. Mikro- und Nanogele sind hydrophile vernetzte Polymerpartikel mit Durchmessern im Mikro- beziehungsweise Nanometermaßstab. Sie sind biokompatibel, haben einen hohen Wassergehalt und einstellbare chemische und mechanische Eigenschaften. Sie eröffnen verschiedene Anwendungsmöglichkeiten aufgrund der einstellbaren inneren Porengröße, der großen inneren Oberfläche und der vielfältigen Möglichkeiten zur chemischen Modifizierung. Ein Beispiel ist die Quervernetzung von Nanogelen durch Disulfidbrücken. Durch Zugabe von Reduktionsmitteln oder auch beispielsweise durch das reduktive Milieu in Tumorgewebe werden die Disulfidbrücken gespalten und die in den Nanogelpartikeln enthaltenen Wirkstoffe freigesetzt, siehe Bild 1.





### Protein Engineering und Biohybride Systeme

Der Lehrstuhl für Biotechnologie und das DWI entwickeln gemeinsam biohybride Systeme für den selektiven Stofftransport. Hier werden Proteine produziert und mit rationalem Design sowie gelenkten Evolutionsmethoden für Anwendungen in der chemischen und medizinischen Industrie optimiert. Ein gelenktes Evolutionsexperiment umfasst iterative Schritte, in denen Mutantenbibliotheken generiert und nach verbesserten Proteinvarianten durchmustert werden, ohne dass ein strukturelles Verständnis der zu verbesserten Proteineigenschaft vorausgesetzt wird.

Das Transmembrankanalprotein FhuA zeigt eindrucksvoll, wie durch Protein Engineering neue und schaltbare Funktionen in Proteine eingebracht und zu bio-interaktiven Systemen weiterentwickelt werden können. FhuA ist ein Eisen-transportprotein aus der äußeren Membran des Darmbakteriums *Escherichia coli*. Mittels Protein Engineering lässt sich aus dem zylinderförmigen Protein eine innere Korkdomäne

entfernen, so dass ein passiver Diffusionskanal entsteht. Anschließend werden FhuA-Varianten hergestellt, in denen der Stofftransport geschaltet werden kann. Einmal werden Verbindungen eingebaut, die eine Disulfidbrücke enthalten. Die Zugabe eines Reduktionsmittels spaltet die Disulfidbrücke und erweitert so den Kanal. Neben diesem „Reduktionsschalter“ werden ein Lichtschalter und aktuell ein pH-Schalter entwickelt. Weiterhin werden mittels massivem Proteinengineering Kanalvarianten hergestellt, die nur noch eine -OH-, -NH-, und -SH Gruppe enthalten, die gezielt für chemische Modifikationen genutzt werden können. Damit steht ein Membrantransportsystem zur Verfügung, dessen Durchlässigkeit einstellbar und durch verschiedene äußere Reize schaltbar ist, siehe Bild 2.

Mit FhuA ließen sich ebenfalls erste Erfolge in Richtung Systemintegration erzielen. Haupthindernis für eine effiziente Integration des Kanalproteins in Polymermembranen war bisher der Größenunterschied zwischen Polymermembran und Kanalprotein und die

Dimensionen interagierender hydrophober Bereiche. Durch Verlängerung entsprechender Domänen des FhuA die hydrophoben Bereiche angepasst und das verlängerte Kanalprotein erstmals in kostengünstige Polymervesikel effizient eingebaut. Das Proteinverlängerungskonzept zeigt exemplarisch, wie für eine Biohybrid-Systemintegration eine Proteinkomponente an eine Polymerkomponente angepasst werden kann.

### Prozesstechnologie

Gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Chemische Verfahrenstechnik werden die verfahrenstechnischen Kompetenzen für hochselektive und aktive Separationsprozesse erarbeitet. Ein Schwerpunkt sind Membranen und Freisetzungssysteme für die Medizintechnik, wie zum Beispiel Membranen für das Tissue Engineering. Dabei werden Gerüste vorgegeben, in denen Zellen für neue Gewebe oder Gewebeteile heranwachsen, sich möglichst zu natürlichen Strukturen zusammenschließen und differenzieren. Ein großes Problem beim Züchten künstlicher, insbesondere

größerer Gewebe ist die Nährstoffversorgung der Zellen im Inneren des Gerüsts. Membranen aus biokompatiblen und bioabbaubaren Polymeren können das Zellwachstum und den Gewebeaufbau unterstützen. Dabei kommen unterschiedlich mikrostrukturierte Membranen und Gerüstgeometrien zum Einsatz, die die Nährstoffe in das Gerüstinnere transportieren. Die erfolgreiche Neubildung von Geweben in einem umgebenden Reaktor ist ein fein abgestimmtes Zusammenspiel von entsprechend strukturierter Membran, Inkubationsparametern und optimaler Nährstoffversorgung. Hier wird deutlich, dass für eine erfolgreiche Anwendung von Membran-, Trenn- und Freisetzungssystemen auch die Prozesstechnik einen entscheidenden Beitrag liefert.

Gemeinsam und durch fächerübergreifende Zusammenarbeit können Chemiker, Biologen und Verfahrenstechniker am DWI interaktive Systeme für den selektiven Transport von Molekülen und Wirkstoffen entwickeln. Vielleicht wird die Dialyse in einigen Jahren auf



*Bild 3:  
Untersuchung der Oberflächen-  
beschaffenheit von Membran-  
en und dünnen Filmen am  
Rasterkraftmikroskop.  
Foto: Peter Winandy*

diese Weise schneller und für  
den Patienten schonender, oder  
neue Verfahren ermöglichen  
weltweit eine effiziente und kos-  
ten sparende Trinkwassererzeu-  
gung und Wasseraufbereitung.

**Autorin:**

Dr.rer.nat Brigitte Küppers ist  
beim DWI an der RWTH e.V.  
zuständig für die Öffentlich-  
keitsarbeit.

# LET'S GET THE JOB DONE



Terex ist ein internationales und führendes Unternehmen in der Bau-  
maschinenindustrie. Wir konstruieren Lösungen für härteste Einsätze.  
An unseren sechs Standorten in Deutschland entwickeln wir mit rund einem  
Viertel unserer 16.000 weltweit agierenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter  
Mobil- und Gittermastkrane, Materialumschlagsmaschinen, Radlader und  
Bagger sowie Portalstapler. Unser Umsatz betrug 2009 weltweit 4,1 Mrd. US\$,  
wovon ca. 1,1 Mrd. Euro in Deutschland erwirtschaftet wurden. Nutzen Sie  
die ausgezeichneten Entwicklungschancen und unterschiedlichsten Möglich-  
keiten, die Ihnen ein weltweit agierender Konzern bietet.

Wir bieten interessierten Studenten (m/w) bzw. Absolventen (m/w)

## PRAKTIKA / ABSCHLUSSARBEITEN SOWIE TRAINEE- ODER DIREKTEINSTIEG

in den Bereichen **Forschung & Entwicklung, Vertrieb, Marketing und  
Kundenbetreuung, Einkauf, Finanzen & Controlling, Personal, IT,  
Produktion und Logistik.**

► **Unsere Standorte**

Bad Schönborn, Langenburg und Crailsheim, Würzburg und Zweibrücken

► **Ihr Profil**

- Sie sind engagiert, motiviert und begeistern sich für unsere Produkte
- Sie haben Ihr Können auch im Studium bereits unter Beweis gestellt
- Sie verfügen über gute Kenntnisse in Deutsch und Englisch in Wort und Schrift

► **Wir bieten**

ein abwechslungsreiches und spannendes Arbeitsumfeld innerhalb flacher  
Unternehmensstrukturen, eingebunden in ein internationales Team.

► **Interessiert?**

Dann finden Sie weitere Informationen und aktuelle Stellenangebote auf  
[www.terex.de/karriere](http://www.terex.de/karriere). Senden Sie uns Ihre aussagekräftigen Bewerbungs-  
unterlagen mit Angabe Ihres frühest möglichen Eintrittstermins (und  
gewünschten Praktikumszeitraumes) sowie Ihres Einsatzortes, bevorzugt  
in einem PDF-Dokument, an [career-germany@terex.com](mailto:career-germany@terex.com).

**Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung!**

**Terex Corporation**

Human Resources Germany · Recruiting · Dinglerstraße 24 · 66482 Zweibrücken  
[career-germany@terex.com](mailto:career-germany@terex.com)

[www.terex.de](http://www.terex.de)



**WORKS FOR YOU.**

# CO<sub>2</sub>-freie Kohlekraftwerke

Wissenschaft und Innovation im Bereich der Energietechnik sind heute wichtiger als je zuvor. Eine bedeutende Entwicklung zum Schutze des Klimas kommt aktuell aus dem Bereich der Werkstofftechnik: Keramische Membranen sollen Kohlekraftwerke emissionsfrei machen.

Die Erderwärmung gehört zu den Themen, welche hierzu- und weltweit hitzige und kontroverse Diskussionen auslösen. So blieb der UN-Klimagipfel in Kopenhagen im Dezember 2009 ohne Ergebnis und auch die internationale Klimakonferenz im Juni 2010 ging ohne einen gemeinsamen Beschluss zu Ende. Dabei sind sich alle einig: Der Ausstoß von Treibhausgasen muss zugunsten des Klimaschutzes verringert werden. Insbesondere die Europäische Union und Deutschland verfolgen ehrgeizige Ziele. Sie wollen bis zum Jahr 2020 die Treibhausgasemissionen um 40 Prozent gegenüber 1990 senken. Deutschland hat es sich zum Ziel gesetzt, 2050 kaum noch Kohlendioxid zu emittieren. Allerdings werden solche Maßnahmen auf nationaler Ebene das Weltklima nur in geringem Maße beeinflussen. Denn in Schwellenländern wie China und Indien sind aufgrund des rapide steigenden Energiebedarfs und der hohen eigenen Kohlevorkommen viele neue Kohlekraftwerke geplant. Diese werden in den kommenden Jahrzehnten für eine beträchtliche Emission des Treibhausgases Kohlendioxid sorgen. Schon heute haben Indien und China einen Anteil von ungefähr 45 Prozent am gesamten Weltkohleverbrauch.

Neben einem Klimaabkommen von internationaler Gültigkeit bedarf es neuartiger Technologien, die in der Lage sind, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu begrenzen. Die größten Hoffnungen ruhen dabei momentan auf der CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage). Sie ermöglicht es, das entstehende CO<sub>2</sub> abzuscheiden und einzulagern. Dabei wird Kohle im so genannten Oxyfuel-Verfahren mit reinem Sauerstoff und rezirkuliertem Rauchgas verbrannt. So entsteht als Abgas nahezu reines Kohlendioxid mit Wasser. Nach Kondensation des Wassers kann das Kohlendioxid unter hohen Drücken verdichtet und verflüssigt werden, so dass es nicht mehr in die Atmosphäre gelangt. Größter Nachteil dieses Verfahrens ist die Verringerung des Wirkungsgrades der Kraftwerke um rund zehn Prozentpunkte. Dabei treten die höchsten Verluste bei der Bereitstellung von hochreinem Sauerstoff für die Verbrennung auf, denn das geschieht in bisher gebauten Forschungs- und Demonstrationsanlagen über das energieaufwändige Verfahren der Luftzerlegung bei niedrigen Temperaturen.

Genau an diesem Punkt setzen die Forschungen des OXYCOAL-AC Projektes an, bei dem neben RWTH-Instituten namhafte Industriepartner aus dem Bereich der Energietechnik beteiligt sind. Ziel ist die Entwicklung eines emissionsfreien Kraftwerksprozesses, der sich von dem konventionel-

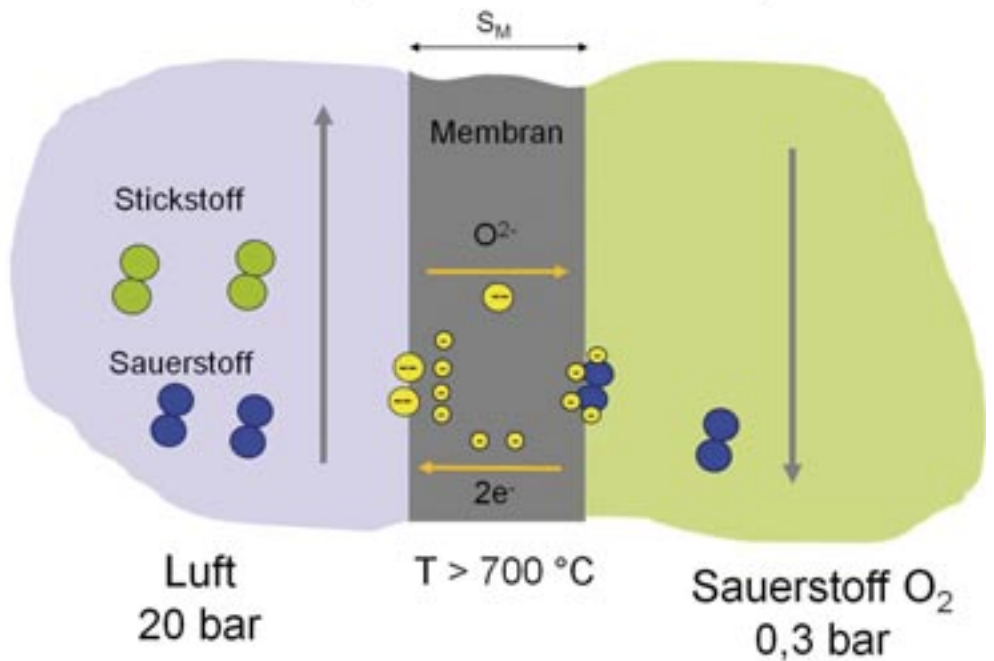
len Oxyfuel-Prozess dadurch unterscheidet, dass der Sauerstoff nicht über energieaufwändige Luftzerlegungsverfahren bereitgestellt wird, sondern durch Abtrennung in einer keramischen Hochtemperaturmembran. Hochtemperaturmembranen haben gegenüber konventionellen Membranen den entscheidenden Vorteil, dass sie vollständige Selektivität für Sauerstoff besitzen und trotzdem hohe Abtrennraten erzeugt werden. Die Keramik, die dabei zum Einsatz kommt, besitzt eine dem Mineral Perowskit sehr ähnliche Struktur und hat die Summenformel ABO<sub>3</sub>. Hierbei steht A für Erdalkalimetalle oder Seltenerdmetalle und B für Übergangsmetalle wie Kobalt oder Eisen. Die größeren A-Kationen bilden zusammen mit den O-Anionen eine kubisch dichteste Kugelpackung, wobei die wesentlich kleineren B-Kationen die oktaedrischen Lücken besetzen. Tatsächlich haben Untersuchungen gezeigt, dass die Summenformel nicht exakt einge-

Bild 1: Schematische Darstellung des Sauerstoffionenflusses durch eine keramische Membran.

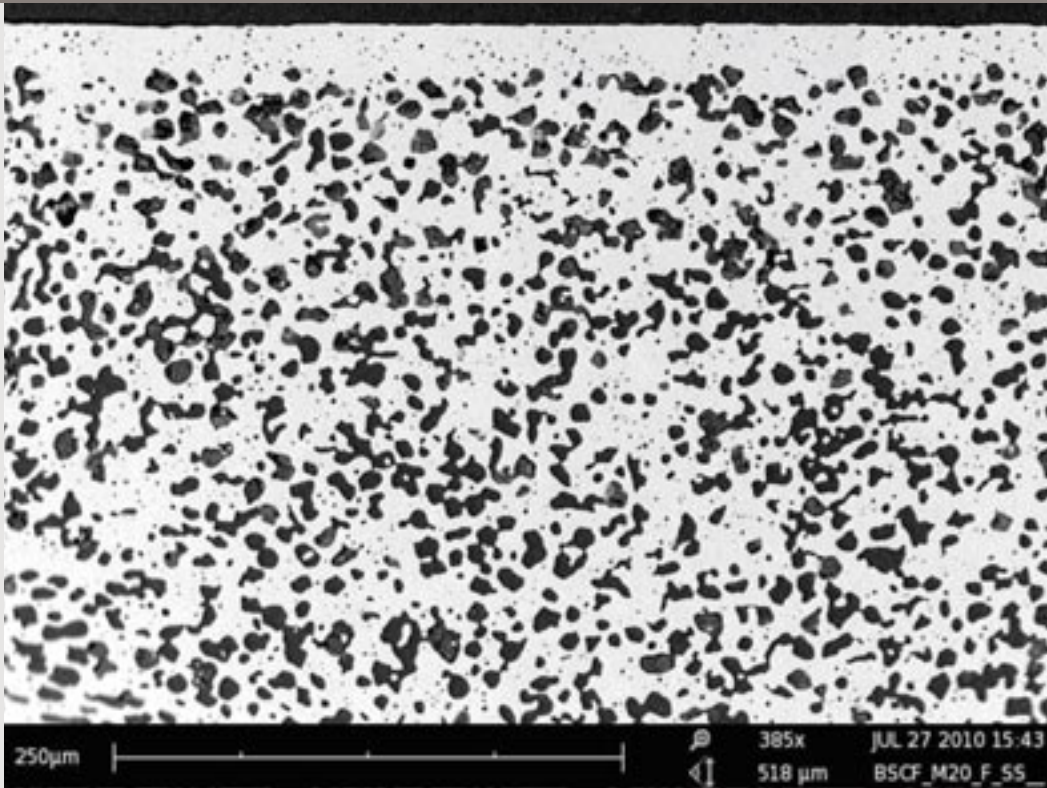
halten wird; vielmehr haben die Materialien ein Sauerstoffdefizit. Dieses Defizit äußert sich in Form unbesetzter Sauerstoffgitterplätze in der Kristallstruktur, den so genannten Leerstellen. Bei höheren Temperaturen, also ab etwa 700 °C, können sich die Sauerstoffionen über diese Leerstellen durch das Membranmaterial bewegen. Die Abtrennung von Sauerstoff durch eine solche Membran erfordert aber eine gerichtete Bewegung der Ionen. Dies wird durch Anlegen einer Differenz des Sauerstoffpartialdrucks p<sub>O<sub>2</sub></sub> beiderseits der Membran ermöglicht, die damit die treibende Kraft für den Sauerstofftransport durch das Membranmaterial darstellt, siehe Bild 1.

Die Zahl der Sauerstoffleerstellen im Membranmaterial hängt allerdings nicht nur vom Sauerstoffpartialdruck ab, son-

## Partialdruck getriebener Sauerstofftransport



# Was können keramische Membranen leisten?



*Bild 2: Schnitt durch eine dünne Membranschicht (20 µm) auf einem porösen Träger.*

den auch von der chemischen Zusammensetzung des Materials selbst. Sie kann durch eine geeignete Materialwahl erheblich gesteigert werden und damit auch der Sauerstoffdurchsatz durch die Membran.

Der Suche nach verbesserten Materialien widmet sich ein weiteres Projekt mit dem Namen MEM-OXYCOAL, in dem neben der RWTH und dem Forschungszentrum Jülich weitere Partner grundlagenorientiert forschen.

Der Sauerstoffdurchsatz wird im Allgemeinen in Form eines Permeationsflusses  $j_{O_2}$  angegeben, der die in einer Materialkonstante zusammengefassten Materialeigenschaften enthält, aber auch noch von weiteren Parametern abhängig ist. Es lassen sich drei wichtige Prozessparameter festhalten:

- Sauerstoffpartialdruckdifferenz
- Temperatur
- Membrandicke

Die Differenz des Sauerstoffpartialdrucks lässt sich in der Praxis auf unterschiedliche Weise einstellen; eine einfache Druckdifferenz ist ausreichend. Dazu wird beispielsweise an einer Seite der Membran ein Überdruck von 20 bar Luft angelegt und auf der anderen Seite ein geringer Unterdruck von circa 400 mbar. In einem Kraftwerksprozess kann man statt des Unterdrucks auch das sauerstoffarme, rezirkulierte Rauchgas nutzen.

Den zweiten Einflussfaktor bildet die Temperatur. Diese sollte so hoch wie nötig und so gering wie möglich gehalten werden. Hier gilt es, einen wirtschaftlich sinnvollen Kompromiss zu finden. Denn mit steigender Temperatur steigt zwar der Sauerstofffluss, es wird aber auch mehr Energie benötigt. Zudem ist zu erwarten, dass sich mit steigender Betriebs-

temperatur die Lebensdauer der Membranen verkürzt. Die derzeitigen Einsatztemperaturen liegen bei 850 °C.

Als dritter Einflussfaktor ist die Membrandicke entscheidend. Je dünner die Membran, desto höher ist der Sauerstoffdurchsatz. Sehr dünne keramische Membranen müssen dabei mechanisch gestützt werden, um nicht zu zerbrechen. Deshalb ist neben der Auswahl des optimalen Werkstoffs auch die Entwicklung von geeigneten Strukturen notwendig. Diese können aus einem porösen Träger mit einer dünnen und gleichzeitig dichten Membranschicht bestehen. In Bild 2 ist ein Querschnitt einer solchen Membran dargestellt.

Die eigentliche Membranschicht ist dabei nur 420 µm dick. Der Träger muss einerseits möglichst durchlässig sein, damit der Sauerstoff problemlos abgeführt werden kann. Andererseits darf er nicht zu porös sein, um eine ausreichende mechanische Stabilität zu gewährleisten. Hier gilt es ein Optimum zu finden.

Die Membranen können je nach Modulkonzept rohrförmig oder als Platten ausgeführt sein. Zur Herstellung solcher Membranen werden keramische Pulver in Form gebracht und bei hohen Temperaturen, hier 1000 bis 1200 °C, gebrannt. Bei diesem so genannten Sinterprozess verdichten die Pulverpartikel zu einem nahezu porenfreien Bauteil. Für die Herstellung poröser Bauteile werden in der Regel organische Porenbildner genutzt; das können beispielsweise Mais-, Reis- oder Kartoffelstärke sein. Diese brennen während des Sinterns aus und hinterlassen entsprechend Poren. Als Formgebungsverfahren kommen für Rohre meist das Strangpressen oder das kaltisostatische Pressen zum Einsatz. Beim Strangpressen wird das keramische Pulver zu einer knetbaren Masse verarbeitet und wie beim Spritzgebäck durch eine Form gepresst.

Als die vielversprechendere Methode für die Herstellung von Membranrohren hat sich das kaltisostatische Pressen erwiesen. Sie birgt die größten Aussichten auf eine großserientaugliche Fertigung. Dabei wird das keramische Pulver zunächst granuliert. Das bedeutet, ihm werden verschiedene Binder wie beispielsweise Presshilfsmittel oder Plastifizierungsmittel beigemischt. Das kugelförmige Granulat besteht aus vielen kleinen Partikeln des keramischen Pulvers, das sich, fein gemahlen wie Mehl, nur schlecht verpressen lässt. Dieses Granulat wird in Pressformen gefüllt, die aus einem Stahlkern und einer Kunststoffummantelung bestehen. Diese Formen werden anschließend in einer Flüssigkeit mit Drücken bis zu 2000 bar beaufschlagt, so dass das eingefüllte Granulat durch die flexible Kunststoffummantelung gegen den starren Stahlkern gepresst und somit zu einem Bauteil mit noch geringer Festigkeit verdichtet wird. Dieses Bauteil erhält seine endgültige Festigkeit durch den keramischen Brand. Mittels einer geeigneten Brennführung lassen sich gezielt die funktionalen



Bild 3: Nach dem isostatischen Pressen werden die keramischen Membranrohre aus den Pressformen entnommen. Danach müssen die Membranen die weitere Prozesskette (Grünbearbeitung, keramischer Brand,

Fügen an metallische Hülsen und Berstdruckprüfung) durchlaufen, bis sie schließlich in die Modul-Pilotanlage eingebaut werden können. Foto: Peter Winandy

54

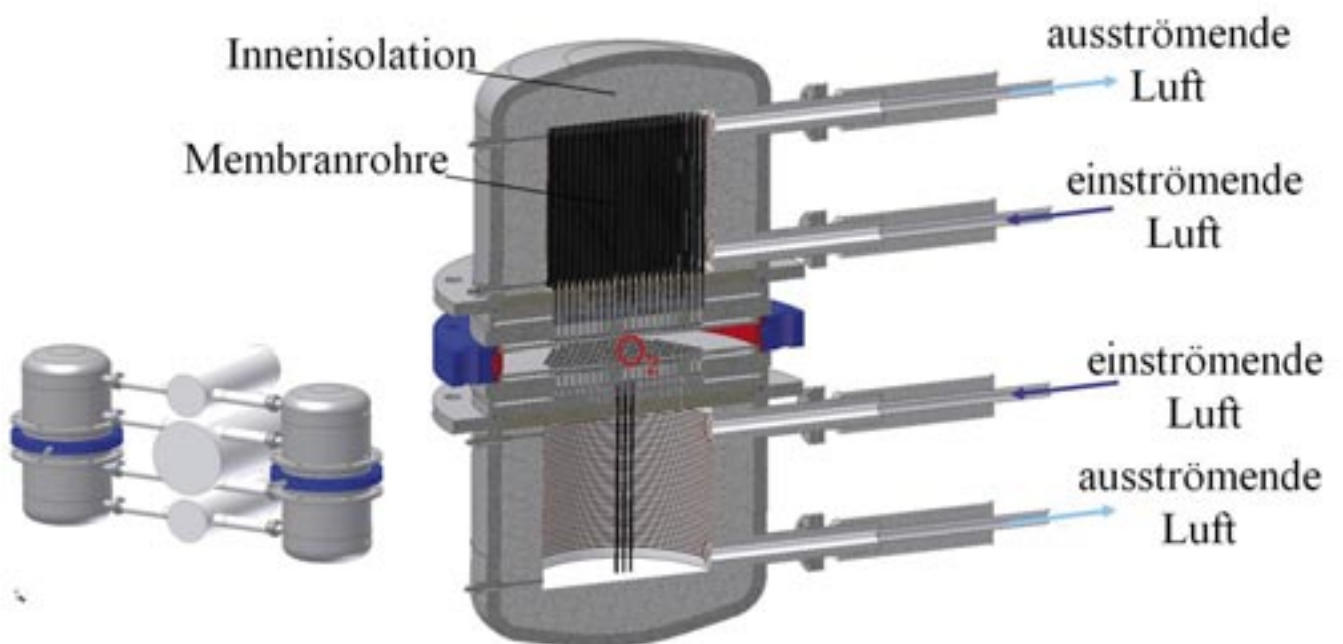


Bild 4: Schematische Darstellung der Modul-Pilotanlage.

und mechanischen Eigenschaften einstellen. Die Sinterung ist bestimmend für die Ausbildung des Mikrogefüges und dieses hat seinerseits einen hohen Einfluss auf die Festigkeit, die Langzeitstabilität und die Sauerstoffleitfähigkeit.

Für Membranen in der Form von Platten bietet sich das Folienengießen an. Die Pulver werden hier zu einem so genannten Schlicker verarbeitet, der eine sahnähnliche Konsistenz aufweist. Dieser Schlicker wird auf eine Kunststoffolie gegossen. Nach dem Trocknen bleibt eine flexible Folie zurück, bestehend aus den Keramikpartikeln und einem sehr hohen Anteil an Zusatzstoffen, die diese Partikel zusammenhalten. Diese Folie kann mehr oder weniger endlos gegossen und nach Bedarf zurechtgeschnitten werden. Durch den Sinterprozess brennen die Zusatzstoffe aus und die Keramikpartikel verdichten sich zu einer stabilen dünnen Platte.

Die vorgestellten Verfahren werden für andere Anwendungen in der keramischen Industrie bereits im großen Maßstab genutzt. Deshalb sind sie für die Membranen in Kraftwerksanwendungen besonders geeignet. Denn durch die Größe der Kraftwerke werden zukünftig Millionen Stück einzelner Membranen

benötigt, die in Modulen zusammengeschaltet werden. Eine einfache und damit kostengünstige Produktion ist daher Grundvoraussetzung.

Mithilfe des kalisostatischen Pressens hat das Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau bereits eine Produktion keramischer Membranen als einseitig verschlossene Rohre im Maßstab einer Kleinserie realisiert. Dabei werden 600 Rohre zur Bestückung eines Membranmodul-Prototyps, siehe Bild 4, benötigt, welcher von RWTH-Wissenschaftlern entwickelt und im Sommer 2011 in Betrieb genommen wird.

Diese Pilotanlage kann bis zu 300.000 Liter reinen Sauerstoff pro Tag zu produzieren. Da diese Technologie noch ganz am Anfang steht, birgt sie sehr viel Entwicklungspotenzial. Zum jetzigen Zeitpunkt können noch keine Aussagen zum Langzeitverhalten solcher keramischer Membranen getroffen werden. Diese sollen in der aktuellen Projektphase des OXYCOAL-AC Projekts durch Untersuchungen im Betrieb der Pilotanlage gefunden werden. Dann sind auch erste Aussagen zur Lebensdauer solcher Anlagen möglich.

Die CCS-Technologie wird im Bereich der Kraftwerkstechnik als Brückentechnologie bezeichnet.

Denn auch wenn das anfallende Kohlendioxid nicht in die Atmosphäre gelangt, so muss es dennoch gespeichert und gelagert werden. Auch hier bietet die Natur nur beschränkte Kapazitäten. Bis es eines Tages möglich sein wird, den gesamten Energiebedarf der Welt aus regenerativen Energiequellen zu decken, bietet CCS allerdings eine sinnvolle Alternative zur Atomkraft.

Auch wenn die Technologie der keramischen Hochtemperaturmembranen bisher noch nicht am Markt eingeführt worden ist, besitzt sie dennoch ein sehr großes Potenzial für eine ganze Reihe verschiedener technischer Anwendungen. Dabei ist Ihr Einsatz nicht nur an die CCS-Technologie geknüpft. Prinzipiell sind keramische Trennmembranen überall dort interessant, wo reiner Sauerstoff benötigt wird, zum Beispiel in der Verfahrenstechnik, der Stahlindustrie und der Glasherstellung. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren zur Sauerstoffherstellung, wie beispielsweise dem Linde-Verfahren, erscheint der Membraneinsatz besonders dann interessant, wenn die Sauerstoffabtrennung in einen schon bestehenden Hochtemperaturprozess integriert wird. Denn dort kann die zum Betrieb der Hochtemperaturmembran benötigte Wärme-

energie wirtschaftlich bereitgestellt werden. Hier ist neben der CCS-Technologie insbesondere die großtechnische Produktion von Synthesegas durch katalytische Oxidation von Methan zu nennen. Synthesegas, eine Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, wird in großem Maßstab für die Herstellung verschiedener Grundchemikalien verwendet.

#### Autoren:

Dr.-Ing. Stefan Baumann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieforschung im Forschungszentrum Jülich. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau. Dipl.-Ing. Anke Kaletsch ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau. Dr.-Ing. Ewald M. Pfaff ist Akademischer Direktor am Lehrstuhl für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau. Dr.rer.nat. Michael Schroeder ist Privatdozent am Institut für Physikalische Chemie.

Anzeige

Zukunft braucht Energie. Deshalb arbeiten Erschließung und Entwicklung neuer Erdöl- Mit modernster Technologie und starken Nordafrika, Südamerika, Russland und dem verfügen wir über ein hohes Maß an regionaler und technologischer Expertise. Ausgebaut werden auch unsere Aktivitäten im Mittleren Osten. Als größter Erdöl- und Erdgasproduzent mit Sitz in Deutschland sorgen wir so für eine sichere Energieversorgung. Heute und in Zukunft.

[www.wintershall.com](http://www.wintershall.com)

Wir fördern Zukunft.

wir international an der Suche, und Erdgaslagerstätten. Partnern. Vor allem in Europa, Raum am Kaspischen Meer

wintershall

■ BASF Gruppe

# Fügen mit Glas

Unter dem Begriff des „Fügens“ versteht man nach DIN 8593 das dauerhafte Verbinden von mindestens zwei Bauteilen. Sie können aus gleichen, aber auch sehr unterschiedlichen Materialien bestehen. Wenn die Verbindung hermetisch dicht sein soll, dann bietet sich eine so genannte stoffschlüssige Verbindung an. Sie wird durch die Eigenschaften eines vermittelnden Fügwerkstoffes zusammengehalten. Das Verfahren begegnet einem im Alltag meist beim Kleben. In der Werkstofftechnik geht es oft darum, hermetisch dichte Verbindungen herzustellen, die für den Einsatz bei höheren Temperaturen geeignet sind. Organische Klebstoffe kommen dann nicht mehr in Frage. Ein typisches Beispiel ist die Verbindung von metallischen und funktionskeramischen Komponenten einer Sauerstoffsonde, wie beispielsweise der „Lambda-Sonde“, mit der in unseren PKW das Verhältnis von Kraftstoff und Sauerstoff optimal eingestellt wird. Das für diesen Artikel ausgewählte Beispiel ist die Hochtemperaturbrennstoffzelle SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). Das Institut für Gesteinshüttenkunde arbeitet auf diesem Gebiet eng mit dem Forschungszentrum Jülich zusammen, um ein einfach anwendbares, praxistaugliches

Fügekonzept für die SOFC zu entwickeln.

Allgemein sind Brennstoffzellen Aggregate, welche die Energie einer Verbrennungsreaktion auf elektrochemischem Wege direkt in elektrische Energie umwandeln. Wie bei der klassischen Verbrennung reagiert dabei ein gasförmiger Brennstoff, etwa Wasserstoff oder Methan, mit Sauerstoff zu einem Abgas, also Wasser und gegebenenfalls Kohlenstoffdioxid ab. Die Verbrennungsreaktion läuft in einer Brennstoffzelle allerdings räumlich getrennt als kathodische, also Elektronen annehmende, und anodische, also Elektronen liefernde, Teilreaktion ab, siehe Bild 1. Kathode und Anode sind durch einen Ionenleiter elektrochemisch verbunden. Bei Stromlosigkeit, das heißt im Gleichgewicht, liegt an den Endphasen der Zelle eine Spannung an, die für typische Verbrennungsreaktionen etwa ein Volt beträgt. Zum Erreichen technisch nutzbarer Spannungen schaltet man mehrere Zellen als so genannte Stapel oder Stacks hintereinander. Bei Leistungsabgabe fließt ein Strom  $I$ , im Bild in technischer Stromrichtung dargestellt, über einen Verbraucher; die Zellenspannung sinkt dabei geringfügig ab.

Die SOFC bietet dabei den Vorteil einer besonders hohen Leistungsdichte. Alle ihre Kom-

ponenten sind für einen Betrieb bei typischerweise 700 bis 900 °C ausgelegt. Bei diesen Temperaturen erreicht der Feststoffelektrolyt eine hinreichend hohe elektrische Leitfähigkeit. Im Forschungszentrum Jülich wird das Konzept verfolgt, die SOFC aus planaren Einzelzellen aufzubauen. Bleche aus Chrom-Nickel-Stahl dienen als Gehäuse und als Träger für die elektrochemisch aktiven Komponenten. Das Konzept funktioniert nur dann, wenn es gelingt, alle Komponenten gasdicht und zugleich elektrisch isolierend miteinander zu verbinden. Die Funktion der Fuge muss zudem beim Durchlaufen vieler Aufheiz- und Abkühlzyklen während einer Betriebszeit von 40.000 Stunden gewährleistet sein. Eigentlich hat die Fuge mit der prinzipiellen Wirkungsweise einer SOFC gar nichts zu tun. Sie stellt scheinbar nur einen Seitenaspekt der Entwicklung dar. Tatsächlich aber steht und fällt der Erfolg der SOFC mit der Entwicklung eines geeigneten Fügekonzeptes.

Zur Lösung des Problems bieten sich Lote auf der Basis anorganischer Gläser an. Dabei wird ein Glas geeigneter chemischer Zusammensetzung pulverförmig als Paste oder Schlicker, seltener monolithisch als Folie oder Einzeltröpfchen, auf die Fügepartner aufgetragen. Beim

Aufheizen beginnt das Glas zu fließen und sintert zu einer monolithischen Fuge zusammen. Die Fügetemperatur liegt dabei stets etwas über der späteren Anwendungstemperatur. Je nach Glaszusammensetzung setzt parallel zum Fließen und Sintern Kristallisation ein – ein gewünschter Effekt, der dazu führt, dass das Material sich einem thermodynamischen Gleichgewicht annähert. Die Eigenschaften einer derart hergestellten glaskeramischen Fuge bleiben so über lange Anwendungszeiten hinweg konstant.

Die Herausforderung bei der Entwicklung geeigneter Stoffsysteme besteht nun darin, neben der Funktion der hermetischen Abdichtung einen Katalog weiterer Anforderungen zu erfüllen. Beim Fügeprozess selbst kommt es auf eine gute Benetzung der zu fügenden Komponenten und eine gute Fließfähigkeit an. Beides muss innerhalb eines engen Temperatur- und Zeitfensters realisiert sein. Die Fuge muss zudem die Komponenten der SOFC elektrisch voneinander isolieren, stabil in (brennstoffseitig) reduzierender und (luftseitig) oxidierender heißer Atmosphäre sein, sich unter diesen Bedingungen chemisch mit dem Stahl vertragen, in ihrem thermischen Ausdehnungsverhalten so gut an den Stahl angepasst

56

Bild 1: Prinzipskizze zur Funktionsweise einer Brennstoffzelle;  $I$  = Strom (technische Stromrichtung).

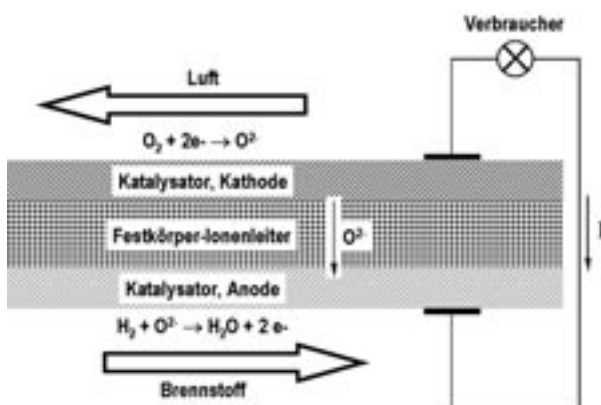
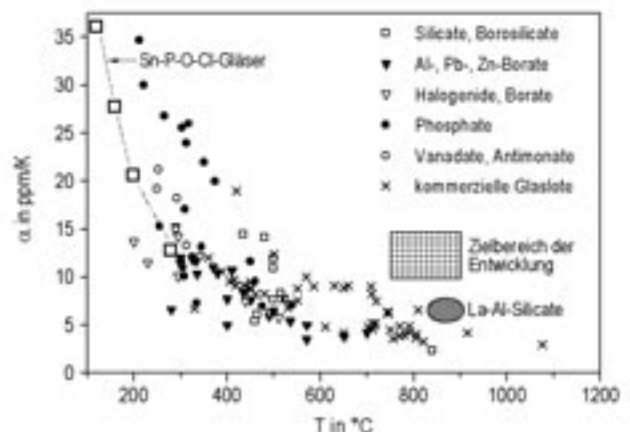


Bild 2: Zusammenhang zwischen thermischem Ausdehnungskoeffizienten und Erweichungstemperatur verschiedener Glaslote.



# Entwicklung von Werkstoffsystemen für glaskeramische Lote

sein, dass die Festigkeit und Dichtigkeit des Verbundes beim Abkühlen und Aufheizen erhalten bleibt.

Greifen wir die zuletzt genannte Anforderung heraus: Der thermische Ausdehnungskoeffizient eines Werkstoffes wird in der Einheit „millionstel Teil (ppm) der Ausgangslänge je Grad Temperaturänderung“ angegeben; dabei ist es in der Wissenschaft üblich, 1 Grad Temperaturänderung nicht als 1 °C, sondern als 1 K (Kelvin) zu schreiben. Der Effekt der thermischen Ausdehnung ist nur scheinbar vernachlässigbar klein. Tatsächlich ist der Wert des eingesetzten Stahls mit 12-14 ppm/K recht hoch; er dehnt sich beim Aufheizen von Raum- auf Betriebstemperatur um etwa ein Prozent seiner Ursprungsgröße aus. Ein Blick auf Bild 2 lehrt, dass es gar nicht so einfach ist, geeignete Basisgläser mit passenden Eigenschaften zu finden. Man arbeitet gewissermaßen gegen einen natürlichen Trend an: Gläser, die im für den Fügeprozess angestrebten Temperaturbereich gut fließen, haben im Allgemeinen niedrige Ausdehnungskoeffizienten. Unter den kommerziell verfügbaren Glasloten ist kaum ein geeignetes Material zu finden. Es gilt also, neue Lotsysteme zu entwickeln, trotz des erheblichen finanziellen

und zeitlichen Aufwandes, der damit verbunden ist. Optimal sind Lösungen, die es erlauben, ein einmal gewähltes Lotsystem in gewissen Grenzen ohne großen Aufwand an sich ändernde Anforderungen anzupassen. Dazu zählt etwa eine Verschiebung der Betriebstemperatur der SOFC oder der Einsatz einer besser geeigneten Stahlsorte.

Die folgende Vorgehensweise hat sich als erfolgreicher Ansatz bewährt: Zuerst wird ein Basisglas ausgewählt, das eine gute chemische Verträglichkeit mit den Komponenten der SOFC ausweist und gute Benetzungs- und Fließeigenschaften besitzt. Die Anpassung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten wird getrennt davon durch Zugabe eines geeigneten kristallinen Zuschlages realisiert. Dieser Zuschlag hat einen deutlich höheren Ausdehnungskoeffizienten als das Basisglas. Mit Hilfe thermochemischer Modellierung werden Basisglas und Zuschlag so aufeinander abgestimmt, dass sie im thermodynamischen Sinn „koexistieren“ – so, wie Eis und Wasser bei 0 °C in beliebigen Mischungsverhältnissen stabil nebeneinander vorliegen können. Nach dem Fügeprozess erhält man dann als Fuge einen glaskeramischen Verbundwerkstoff, dessen Eigenschaften sich auch während

langer Betriebszeiten nicht mehr verändern. Die Massenverhältnisse von Ausgangsglas und Zuschlag lassen sich – da sie „koexistieren“ – über einen weiten Bereich variieren. Bild 3 zeigt das Beispiel eines Lotsystems, das aus einem Barium-Magnesium-Silicatglas und kristallinem Bariumsilicat besteht. Innerhalb dieses sehr einfachen Stoffsystems lässt sich der thermische Ausdehnungskoeffizient in den Grenzen zwischen 10 und 13 ppm/K sehr genau an die Eigenschaften der Fügepartner anpassen.

In ähnlicher Weise kann man dem Lotsystem ein – ebenfalls koexistierendes – weiteres Glas zugeben, das besonders leicht fließt. Die Auswahl einer geeigneten Glaszusammensetzung erfolgt wieder mit Hilfe thermochemischer Modellierung. Parallel dazu wird die zu erwartende Viskositäts-Temperatur-Funktion modelliert. Mit Hilfe der Erhitzungsmikroskopie, einer ebenso einfachen wie effektiven Methode, wird das Ergebnis getestet, siehe Bild 4. Ein derart ausgewähltes Glas als weiterer Zuschlagstoff gewährleistet innerhalb gewisser Grenzen die Feinanpassung der Funktion „Fließfähigkeit“ während des Fügeprozesses. Eine Variation der Füge­temperatur im Bereich ±50 K ist problemlos zu erreichen. Der Weg bis zu einer erfolgrei-

chen Entwicklung eines praxistauglichen glaskeramischen Lotsystems erfordert die Lösung einer Reihe weiterer Probleme, auf die im Rahmen dieses Artikels nicht eingegangen werden kann. Ein besonders kritisches Problem ist die chemische Verträglichkeit des Ausgangsglases mit dem Stahl. Bei der Auswahl des Grundglases kommt diesem Aspekt die höchste Priorität zu. Der oben skizzierte Entwicklungsweg erlaubt es dann, ausgehend von relativ einfachen Stoffsystemen, rasch zu geeigneten und flexibel anpassbaren Lösungen zu gelangen. ■

**Autor:**

Univ.-Prof. Dr.rer.nat Reinhard Conradt hat den Lehrstuhl für Glas- und keramische Verbundwerkstoffe inne.

Bild 3: Thermischer Ausdehnungskoeffizient eines Lotsystems aus Barium-Magnesium-Silicatglas und kristallinem

Bariumsilicat als Funktion des Massenverhältnisses der beiden Komponenten.

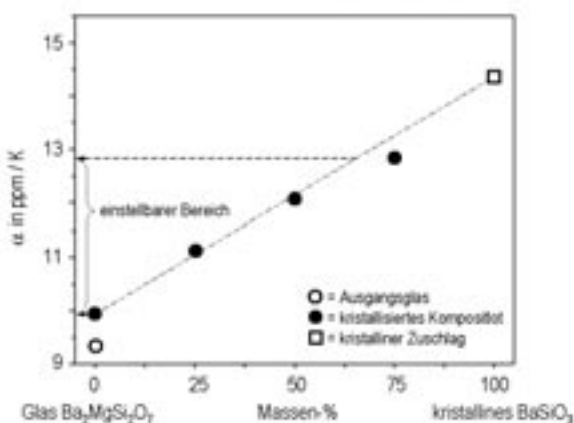


Bild 4: Näherungsweise experimentelle Bestimmung des Fließverhaltens eines Glases im Erhitzungsmikroskop; h = Visko-

sität; der spätere Fügeprozess erfolgt im Temperaturintervall zwischen T2 und T3.



# Neue Dimensionen

## Werkstoffsimulation zwischen Materialphysik

RWTH THEMEN 1/2011

Werkstoffmodellierer für metallische Werkstoffe haben es schwer: Von ihnen wird erwartet, dass ihre Modelle und Computerprogramme zu Verbesserungen von Materialien führen, an denen empirisch bereits seit Tausenden von Jahren geforscht wurde. Dies hat zur Folge, dass die heutigen industriell gefertigten Materialien bereits in vielerlei Hinsicht optimiert sind, beispielsweise in Bezug auf Festigkeit, Duktilität, Kriechfestigkeit, zyklische und thermische Belastbarkeit oder Korrosionsbeständigkeit. Die niedrig hängenden Früchte sind also längst geerntet.

Zusätzlich bedeutet die Erforschung bereits optimierter Legierungen, beziehungsweise Halbzeuge oder Bauteile häufig, dass eine Reihe physikalischer Prozesse, die während der Herstellung oder der Anwendung von Materialien ablaufen, zeitgleich signifikant aktiv sind. Hierzu sei als Beispiel die Härtung von Metallen durch ausgedehnte Partikel einer zweiten fest-

en chemischen Phase genannt. Die Härtung wird dadurch bewirkt, dass diese Partikel die Bewegung eindimensionaler Bauelemente im Kristallgitter, also der Versetzungen, behindern. Die Bewegung dieser Versetzungen im Material ist der technisch wichtigste Mechanismus, der die plastische Verformbarkeit von Metallen gewährleistet. Wird die Versetzungsbewegung nun durch Partikel oder andere Gitterstörungen wie Korngrenzen, die Kristallite mit unterschiedlichen Kristallorientierungen trennen, behindert, so muss die äußere Belastung des Materials gesteigert werden, um die Versetzungen von den Partikeln loszureißen und so eine plastische Verformung zu erzwingen. Für dieses „Losreißen“ gibt es nun mehrere Mechanismen. Sind die Partikel klein, so können sie in vielen Fällen von den Versetzungen unter Energieaufwand durchschnitten und so überwunden werden. Sind die Partikel groß, so krümmen sich die Ver-

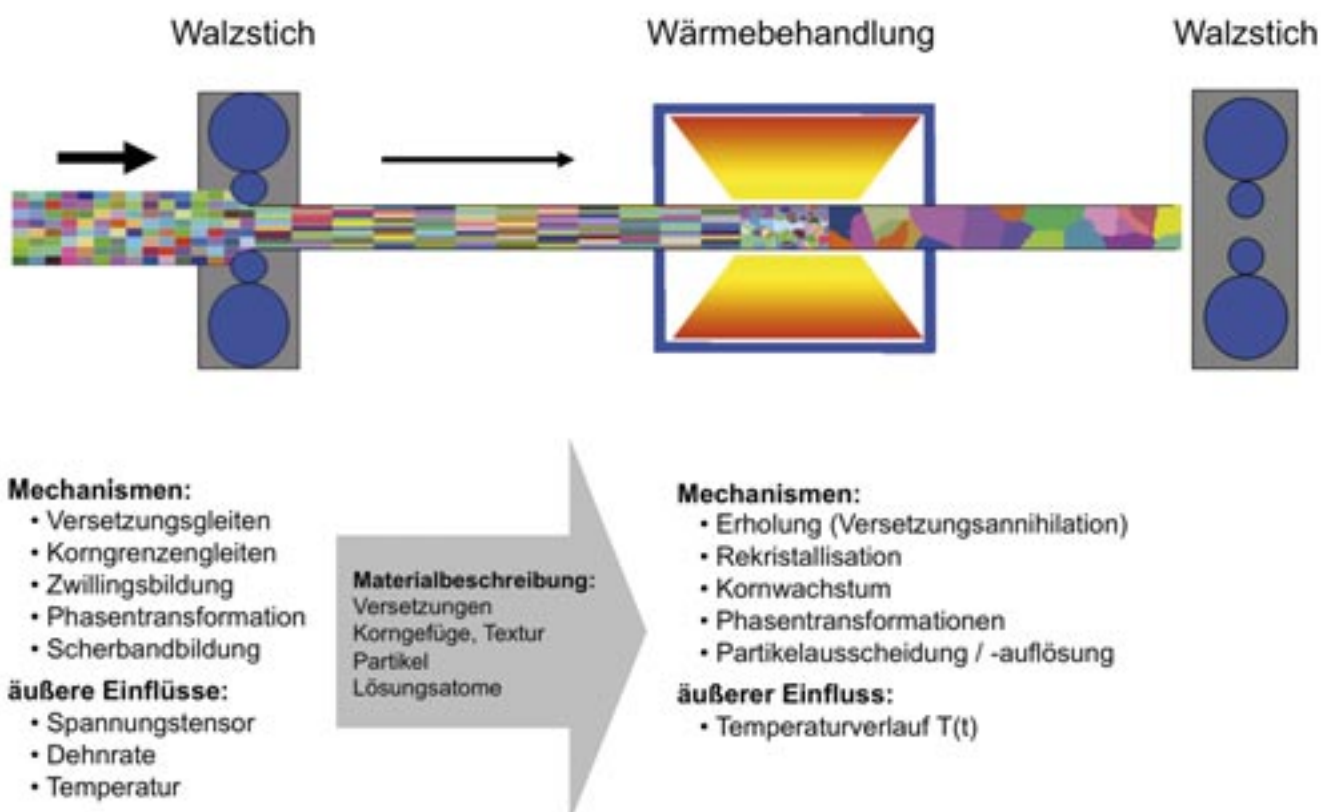
setzungen in ihren Gleitebenen so stark, dass sie die Partikel seitlich umgehen. Den optimalen Härtungseffekt erreicht man dabei, wenn die im Material vorhandene Menge an Legierungsatomen auf mittelgroße Partikel verteilt sind. Diese werden dann teils durchschnitten und teils umgangen. Bei hohen Temperaturen und langsamer Verformung kommt hinzu, dass die Partikel in dritter Dimension umklettert werden können. Es sind also mehrere Mechanismen aktiv, die alle eine plastische Verformung und damit, als schwächstes Glied der Kette, ein Versagen eines Bauteils bewirken können.

Dabei wurde hier bislang nur das Versetzungsgleiten als Mechanismus zur Formänderung betrachtet. Gerade in den hochfesten Materialien, an denen aktuell geforscht wird, sind jedoch weitere Mechanismen relevant. Ein Beispiel sind feinkörnige Materialien mit Korngrößen unterhalb eines Mikrometers, die man durch wiederholte massive Um-

formung, die so genannte „Severe Plastic Deformation“ (SPD), herstellen kann. In solchen nanokristallinen Materialien tritt das Korngrenzgleiten als Verformungsmechanismus hinzu, da das Versetzungsgleiten durch die vielen Korngrenzen massiv erschwert ist. Ein weiteres Beispiel sind die TRIP/TWIP-Stähle, wie sie im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 761 erforscht werden. Hier treten gleich drei weitere Verformungsmechanismen in erheblichem Maße hinzu: die martensitische Phasenumwandlung (TRansformation Induced Plasticity, TRIP), die Zwillingbildung (TWinning Induced

*Bild 1: In einer Gesamtprozess-Simulation werden die physikalischen Mechanismen, die beispielsweise während der Walzstiche und der Wärmebehandlungen ablaufen, durch eine detaillierte Beschreibung des Materialzustandes verknüpft.*

58



# der Materialentwicklung

## als Schnittstelle und Prozesstechnik

Plasticity, TWIP), und die Scherbandbildung. Und falls alle diese physikalischen Vorgänge nicht aktiviert werden können, beispielsweise weil sie sich gegenseitig behindern, dann bleibt noch der Bruch des Materials durch die Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen. Dies kann wiederum bevorzugt an den Korngrenzen oder innerhalb der Kristallite stattfinden. Im Gegensatz zur plastischen Verformung ist der Bruch als Formänderung besonders tückischer Natur, da mit der Rissausbreitung eine weitere Schwächung des Materials eintritt.

Für die Werkstoffmodellierung und -simulation bedeutet die Vielfalt gleichzeitig aktiver physikalischer Vorgänge, dass diese auch gleichzeitig berücksichtigt werden müssen, um den

Gesamtvorgang verstehen und im Idealfall weiter optimieren zu können. Die entsprechenden Simulationsprogramme und deren Kopplung werden hierdurch enorm komplex. Werkstoffmodellierer müssen in der Lage sein, die Physik der einzelnen Mechanismen zu verstehen und mathematisch zu beschreiben. Des Weiteren sollten sie diese effizient implementieren, also zu einem schnell arbeitenden Computerprogramm formen. In einem ersten Schritt muss dabei entschieden werden, welche physikalischen Effekte vereinfacht oder vernachlässigt werden können, weil ihr Beitrag nur zweitrangig ist. Wie oben ausgeführt wurde, ist dieser Schritt gerade bei bereits optimierten Materialien schwierig - oft ist die Signifikanz einzelner Beiträge

einfach unbekannt. Mögliche Vereinfachungen bestehen darin, anstelle individueller Partikel nur die Auswirkung einer statistischen Verteilung von Partikeln, oder gar nur eines einzigen „effektiven“ Partikels zu betrachten. In einem zweiten Schritt gilt es, geeignete Algorithmen zu finden und zu programmieren. Dabei muss möglichst auch auf Parallelisierbarkeit geachtet werden, damit die Simulationen von der weiteren Entwicklung der Prozessoren hin zu vielen Rechenkernen profitieren kann. Die in den beiden Schritten erreichte Effizienz ist von immenser Wichtigkeit. Zwar wächst die zur Verfügung stehende oder bezahlbare Rechenleistung weiterhin exponentiell an, aber ihr Nutzen kann im Handumdrehen vollständig vernichtet werden: Ent-

weder dadurch, dass letztlich irrelevante Dinge berechnet werden (Schritt 1) oder dadurch, dass mit schlechter Skalierung in Bezug auf die Anzahl berechneter Objekte oder rechnerischer Kerne programmiert wird (Schritt 2). Werkstoffsimulationen erfordern daher sowohl physikalisches als auch mathematisch-informatisches Verständnis.

Die Vielfalt gleichzeitig im Material ablaufender Prozesse bedeutet aber auch, dass die Mikrostruktur des zu simulierenden Materials - unabhängig von der konkreten Simulationstechnik - in vielerlei Hinsicht genau charakterisiert werden muss. Die Charakterisierung dieses Ausgangszustandes kann im Prinzip experimentell erfolgen. Dies ist aber nicht nur mit hohem Aufwand verbunden, sondern oft-

### Anzeige



**Dik Lokhorst,**  
Entwicklungsleiter, Aachen

## Wir suchen die richtig Guten. Software-Ingenieure und Architekten

- die unsere weltweit eingesetzten Echtzeitsysteme für den Öffentlichen Verkehr mitgestalten wollen,
- die nicht nur ein paar Programmiersprachen, sondern Objektorientierung als Konzept beherrschen,
- die komplexe Anforderungen in modulare Architektur und robuste Software umsetzen können,
- die mitdenken, mit ihren Lösungen überzeugen und Verantwortung übernehmen wollen,
- Frauen und Männer, die mehr als nur einen Job suchen.

Mehr über uns und unsere Systeme erfahren Sie unter [www.ivu.de](http://www.ivu.de)

**IVU Traffic Technologies AG**  
Borchersstraße 20  
52072 Aachen  
[job@ivu.de](mailto:job@ivu.de)





60

mals schlicht unmöglich. Eine Walzstraße zur Produktion von Blechen oder Folien kann beispielsweise nicht einfach angehalten werden, um einen Zwischenzustand zu ermitteln. Ebenso kann eine Bramme nicht „abgeschreckt“ werden, um ihren mikrostrukturellen Zustand zwecks Untersuchung einzufrieren. In einigen Fällen lässt sich immerhin mit optischen in-situ-Methoden eine Teilcharakterisierung an der Oberfläche vornehmen, beispielsweise in Hinblick auf Textur und Korngrößen, aber ein Blick ins Innere ist im Allgemeinen nicht möglich. Daher ist es notwendig, auch diesen Ausgangszustand durch Simulationen zu ermitteln und eventuell auch den Zustand davor. Solche Simulationen ganzer Prozessketten wurden an der RWTH erstmals in den Jahren 1994 bis 2005 durch den Sonderfor-

schungsbereich 370 etabliert und danach bis 2008 im Transferbereich 63 weiter zur Anwendungsreife gebracht. Neben der Berücksichtigung aller Prozessparameter ist für die Gesamtprozesssimulation entscheidend, dass die Materialbeschreibung nicht in Form beliebiger, angepasster Simulationsparameter, sondern in Form physikalisch bedeutsamer Zustandsvariablen erfolgt, also der Korngröße, der Textur und der Versetzungsdichte. So wird sichergestellt, dass experimentell ermittelte Daten als Ausgangspunkt einer Simulation dienen können und deren Ergebnisse wiederum genauer validierbar sind. Während einer Wärmebehandlung, wie sie beispielsweise im Laufe einer Blechproduktion mehrfach auftritt, siehe Bild 1, finden Erholung, Rekristallisation, Kornwachstum und die Ausscheidung oder Auf-

lösung von Partikeln sekundärer Phasen statt. Dabei ändern sich die Versetzungsdichte, Korngröße, Textur, Partikeldispersion und Lösungsgehalte von Fremd-Atomen. Dies erfolgt in Produktionsprozessen meist lokal unterschiedlich, da die Temperaturentwicklung am Rand und im Inneren des Materials unterschiedlich verläuft oder wenn aus dem vorangegangenen Prozessschritt bereits Inhomogenitäten resultierten. Schon kleine Temperaturänderungen können drastische Auswirkungen zeigen, da sie stark die Geschwindigkeiten thermisch aktivierter Prozesse steuern, wie beispielsweise Diffusion, Korngrenzenwanderung oder Versetzungsklettern. Vor allem können sie aber auch abrupte Phasenübergänge bewirken, mit entsprechenden Auswirkungen auf alle anderen Vorgänge. Ortsaufgelöste Information über

*Bild 2: Zur Validierung der Prozesssimulationen werden die Mikrostruktur und, wie hier, die mechanischen Eigenschaften des Materials experimentell untersucht. Foto: Peter Winandy*

diese physikalisch vielschichtigen Abläufe kann zur Modellvalidierung genutzt werden. Sie muss aber auch an eine nachfolgende Umformsimulation weitergegeben werden, die diese in unterschiedlichster Weise benötigt. Durch die Verwendung echter Zustandsparameter können Simulationsmodelle später auch durch neue, genauere Modelle ersetzt werden.

Bis heute hat die Thematik der Gesamtprozesssimulation nichts an Aktualität verloren. Im Gegenteil: Wie anfangs ausge-



Anzeige



**Eurogress Aachen**  
Begegnung ohne Grenzen

Top-Technik, variables Raumangebot, Spitzen-gastronomie, Kongress-Service etc. sind hier selbstverständlich!

**Das gewisse "Mehr" bei uns: Individueller Service.**

**Wir informieren Sie!**

**Der Veranstaltungsort der Region.**

Ob Kongress, Tagung, Konzert, Ballettaufführung, Ball oder Ausstellung: hier finden Sie stets den richtigen Rahmen.

**Eurogress Aachen**  
Monheimsallee 48  
52062 Aachen  
Telefon 0241/9131-230  
Telefax 0241/9131-200  
info@Eurogress-Aachen.de

führt, sind es gerade die anspruchsvollen, bereits hoch optimierten Materialien und Prozessorouten, die eine sehr detaillierte Charakterisierung und Modellierung erfordern. Bei der Pionierarbeit des SFB 370 konnte dies nur in Ansätzen geleistet werden. Obendrein wachsen die ökonomischen und ökologischen Ansprüche, beispielsweise durch einen verstärkten Einsatz von Recycling-Materialien. Diese verursachen kleine, aber nicht vernachlässigbare Schwankungen der chemischen Zusammensetzung, deren meist negative Auswirkungen auf die angestrebten Materialeigenschaften zumindest abgeschätzt werden müssen. Im Idealfall könnte solchen Auswirkungen über eine prozessintegrierte Werkstoffsimulation mit leichten Eingriffen in den Produktionsablauf entgegengesteuert werden. Für den Weg dorthin sei-

en drei aktuelle Ansätze an der RWTH genannt: Das AixViPMap-Projekt (aixvipmap.de) im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ entwickelt eine Internet-Plattform, die eine automatisierte Kopplung von Simulationsprogrammen zu möglichst breit gefächerten Prozess- und Materialmodellen anstrebt. Auch das „SimWeb“ des Instituts für Metallkunde und Metallphysik (lx7.imm.rwth-aachen.de) ist ein Internet-Portal, auf dem speziell auf die Blechproduktion zugeschnittene und aufeinander abgestimmte Simulationen bereits ausgeführt werden können. Des Weiteren gibt es die interdisziplinäre, werkstoff- und prozessübergreifende Arbeitsgruppe „SimPRO“ des Forums Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (wefo.rwth-aachen.de). Diese Arbeitsgruppe ging aus dem

vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kompetenzzentrum für Prozesssimulation hervor und ist ein Zusammenschluss verschiedener Forschungseinrichtungen aus dem Umfeld des genannten Forums. Hier wird das Know-how zur Modellierung und Simulation von Materialien und Herstellungsverfahren gebündelt, und es werden neue Ansätze zu deren Verknüpfung entwickelt. Der Anfang dieses Beitrags enthielt die Klage, dass die niedrig hängenden Früchte in der Materialentwicklung schon geerntet seien. Dies verkennt natürlich völlig, dass mit den Simulationen neue Werkzeuge bereitstehen. Allein die Rechenkapazität, die in den nächsten zwei Jahren neu hinzukommen wird, erreicht grob die aufsummierte Kapazität sämtlicher bisher existierender Computer. Entspre-

chend könnten Simulationen, die heute entwickelt werden, morgen in Steuerungsrechnern einer Produktion ablaufen. Der bremsende Faktor in dieser Entwicklung liegt in der wachsenden Komplexität der Programme durch parallel ablaufende, wechselwirkende Prozesse, durch die auch die sequenzielle Modellkopplung in der Prozesskette immer komplizierter wird. ■

**Autor:**  
Priv.-Doz. Dr.rer.nat. Volker Mohles leitet die Arbeitsgruppe Simulationen<sup>1</sup> am Institut für Metallkunde und Metallphysik.

# Textilbetonbandagen für den Aachener Dom

# W

Wie kann ein Riss über Jahrhunderte gesichert werden? Der Dom zu Aachen ist eines der bedeutendsten und ältesten Kulturdenkmäler sowie Geschichtsmonument auf deutschem Boden. In Anerkennung seines hohen Erhaltungswertes wurde er als eines der ersten Denkmäler von der UNESCO in die Liste der Objekte des Welt-erbes der Kultur aufgenommen. Zusammen mit der ehemaligen Pfalz Karls des Großen, dem heutigen Rathaus, bildet der Dom bis heute den städtebau-lichen Mittelpunkt der Stadt Aachen.

In den vergangenen Jahren wurden umfassende Instandsetzungsmaßnahmen im Außen- und Innenbereich des Doms durchgeführt. Im Zuge der Instandsetzungsarbeiten an den neobyzantinischen Mosaiken im Innenbereich wurde unter anderem ein Riss im Bereich des Gewölbes des Sechszehneckes unmittelbar oberhalb der Mosaik festgestellt. Im Rissverlauf gefundene Reste eines Bleivergusses lassen darauf schließen, dass der Riss aus der Bauzeit des Doms stammt und infolge eines Erdbebens im Jahre 803 entstanden ist. Infolge von Riss-

bewegungen sind die Mosaik deutlich geschädigt worden.

Um Rissbewegungen dauerhaft auf ein unschädliches Maß zu reduzieren, ist eine kraftübertragende und flexible Verbindung der beiden Rissufer erforderlich. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Höhe der Verstärkung aufgrund des Dachaufbaus maximal 30 mm betragen darf. Selbstverständlich sollte der Eingriff in den Bestand durch die Instandsetzungsmaßnahme den Regeln des Denkmalschutzes entsprechen und eine Lebensdauer von möglichst mehreren hundert Jahren aufweisen.

#### Lösungsansatz

Eine „traditionelle“ Möglichkeit die Rissbewegungen zu minimieren, ist die steife Verbindung der Rissufer mittels Stahlklammern, die auf beiden Seiten des Risses in das Mauerwerk eingebunden werden. Problematisch bei diesem Verfahren ist, dass infolge der punktuellen Belastung des Mauerwerks die Gefahr des Ausreißens der Stahlklammern besteht. Dies kann durch eine flächige Bandage, die die Rissufer flexibel miteinander ver-

bindet, verhindert werden. Eine Möglichkeit der Ausführung einer solchen flexiblen flächigen Bandage ist die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffbahnen, die mittels Reaktionsharzen auf den Untergrund geklebt werden und die Steifigkeit anhand des Fasergehalts eingestellt werden kann. Solche ausschließlich kunstharzgebundenen Materialien kommen sowohl aufgrund der Anforderungen des Denkmalschutzes als auch aufgrund der begrenzten Dauerhaftigkeit für das vorliegende Projekt nicht in Frage. Eine alternative elastische Rissuferverbindung ist die Verwendung einer bewehrten dünnen Mörteltasche, die sowohl flexibel als auch lastabtragend wirken kann. Eine Möglichkeit ein solches dünnes, lastabtragendes und flexibles Bauteil herzustellen, ist der Einsatz des Werkstoffes „Textilbeton“.

Textilbeton ist eine Weiterentwicklung des klassischen Stahlbetons, der die Herstellung von dünnwandigen und hochbelastbaren Bauteilen ermöglicht. Bei Textilbeton wird anstelle einer Stahlbewehrung eine Bewehrung auf Basis von technischen Textilien aus alkali-

beständigem Glas oder Carbonfasern mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern verwendet. Neben der hohen Zugfestigkeit dieser Materialien, die das Zehnfache der Zugfestigkeit des Stahls betragen, ist der geringe Durchmesser der Bewehrung im Wesentlichen dafür verantwortlich, dass sehr dünne und trotzdem hochbelastbare Bauteile realisiert werden können.

Um einen möglichst effektiven Schutz der innenliegenden Mosaik zu erzielen, sind die Rissbewegungen mit einer möglichst steifen Rissbandage zu minimieren. Die konstruktiven Randbedingungen vor Ort, die maximale Höhe der Rissbandage beträgt 30 mm, sowie die Zusammensetzung des Mörtels ermöglichen maximal den Einbau von zwei Lagen Bewehrung. Aufgrund der Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sowie einer möglichst hohen Steifigkeit wurde ein epoxidharzgetränktes, biaxiales Carbondtextil bestehend aus 1600 tex (1600 g/km Länge) Faserbündel, so genannten Rovings, mit einer Maschenweite von 8 mm als Bewehrung der Rissbandage vorgesehen. Im Rahmen von Untersuchungen vor Ort wurde festgestellt, dass der Untergrund Höhendifferenzen von bis zu 10 cm aufweist. Diese Höhendifferenzen sind der Bauweise des Gewölbes von innen nach außen geschuldet, da die außenliegende Seite der letzten Steinreihe nur grob bearbeitet wurde. Um die Applikation einer textilbewehrten Rissbandage zu ermöglichen, ist allerdings ein vergleichsweise ebener Untergrund erforderlich. Daher wurde ein Egalisierungsmörtel („Estrich“) zusätzlich zu dem Mörtel der Rissbandage entwickelt und im Aufbau vorgesehen.

Damit eine ausreichende Rissverteilung innerhalb der Bandage erreicht wird, musste eine dauerhafte Maßnahme zur Rissverteilung oberhalb des



Bild 1: Risse in den wertvollen Deckenmosaiken des Aachener Doms.

# Wie kann ein Riss über Jahrhunderte gesichert werden?

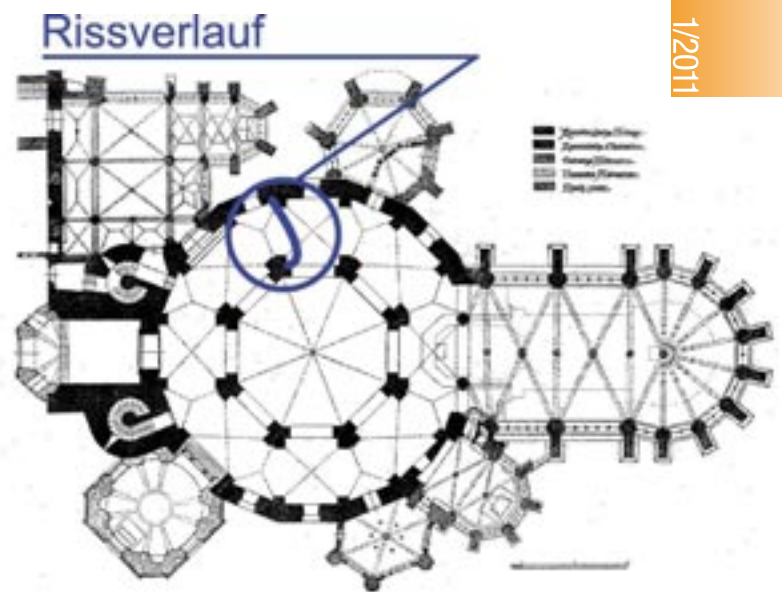
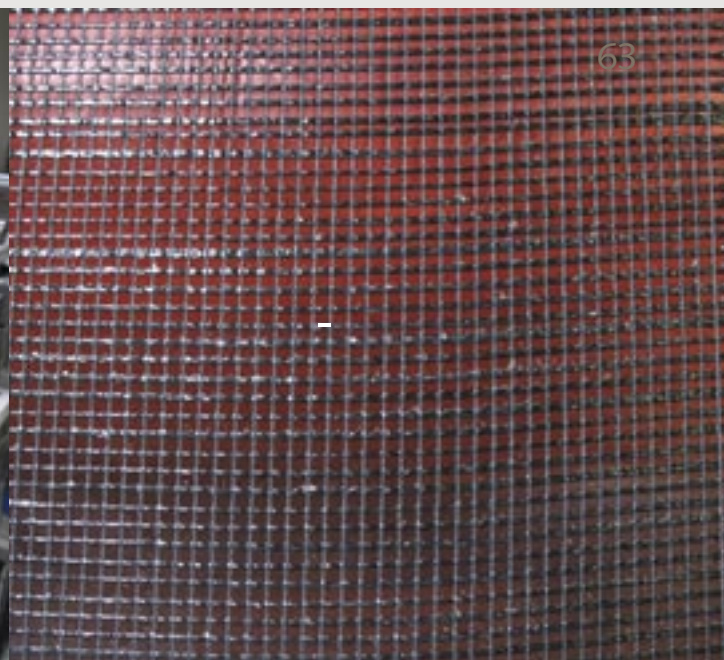


Bild 2: links: Ansicht des Risses – Aufnahme vom Dach des Sechszehneckes aus vor der Schutzmaßnahme; rechts: Rissverlauf im Grundriss.

Bild 3: links: Herstellung der getränkten Bewehrungsstrukturen; rechts: Detailaufnahme der verwendeten Bewehrungsstruktur.



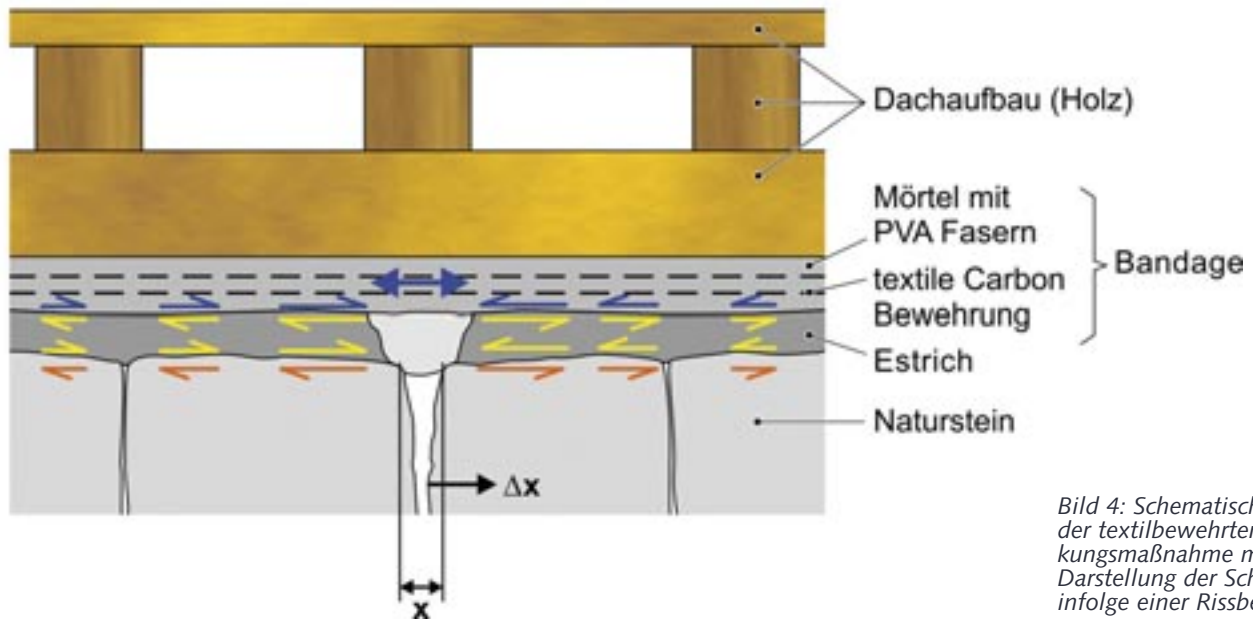


Bild 4: Schematischer Aufbau der textilbewehrten Verstärkungsmaßnahme mit Darstellung der Schubkräfte infolge einer Rissbewegung  $\Delta x$ .

Risses konzeptioniert werden. Als Alternative zu dem Einbau einer Trennlage wurde der Einbau eines Mörtelstreifens oberhalb des Risses vorgesehen, der auf einer Breite von maximal 20 cm eine deutlich geringere Festigkeit als der Estrich aufweist. Dies hat zur Folge, dass sich Rissbewegungen innerhalb der mechanisch schwachen Schicht verteilen und nicht in einen diskreten Riss umgewandelt werden.

#### Entwicklung im Labor

Als Grundlage für die Entwicklung des Feinbetons diente eine Mörtelentwicklung, die für den Vergussmörtel der Instandsetzungsarbeiten an der Aachener Chorhalle am Institut für Bauforschung durchgeführt wurde. Als Bindemittel kommen neben einem speziellen Zement Weißkalkhydrat, Hüttensand rheinischer Trass sowie Kalksteinmehl zum Einsatz. Die Festlegung

des Größtkorns der Gesteinskörnung bei textilbewehrten Bauteilen erfolgt in Abhängigkeit der Maschenweite der textilen Bewehrung. Es wurde daher ein Sand mit einer maximalen Korngröße von 0,6 mm ausgewählt. Aufgrund der bei der Egalisierung des Untergrundes zu erstellenden Schichtdicken wurde für den Estrich eine gröbere Gesteinskörnung mit einer maximalen Kornfraktion von 4 mm gewählt. Weiterhin erhielten beide Mörtelmischungen Kurzfasern aus PVA mit einer Länge von 8 mm als Zugabe, um eine Minimierung der Rissbreite sowie der Rissabstände zu erreichen.

Die Charakterisierung der Bewehrung erfolgte anhand von einaxialen Zugversuchen. Die Zugfestigkeit des Textils beträgt circa 2500 N/mm<sup>2</sup> (Newton per Quadratmillimeter) je Roving. Neben den einzelnen Materialkomponenten wurden

auch Verbundprobekörper untersucht. Dafür wurde ein Rissüberbrückungsprobekörper aus Beton entwickelt. Er weist einen mittigen Riss sowie eine 2 cm tiefe Vertiefung im Bereich des Risses über eine Länge von 20 cm auf. Diese Vertiefung repräsentiert die mittels eines Mörtelstreifens erzeugte freie Dehnlänge. Dieser Grundkörper wurde nicht aus Naturstein, sondern aus Beton hergestellt, da die Schwankungen der mechanischen Eigenschaften von Natursteinen erheblich größer sind. Die Länge des Probekörpers wurde ebenfalls anders als die Bedingungen vor Ort gewählt, da bei einer Probekörperlänge von 120 cm eine Vorschädigung während der Versuchsvorbereitung nicht sicher ausgeschlossen werden kann. Die Belastung der Probekörper erfolgt in einem einaxialen Zugversuch mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit

von 0,1 mm/min. Die Probekörper sind starr mit der Prüfmaschine gekoppelt und während des Versuchs verhindern zwei reibungsfrei eingebaute Stahlstangen ein Abkippen. Während des Versuchs wird sowohl die Kraft als auch die Rissöffnung an beiden Seiten der Probe erfasst. Die Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Probekörper weisen im Zustand I eine Steifigkeit von etwa 400 kN/mm je laufendem Meter auf. Dies entspricht der Größenordnung der im Rahmen der Vorbemessung ermittelten möglichen Federsteifigkeit einer mörtelbasierten Rissbandage und zeigt, dass die Verbundtragwirkung der Rissbandage aktiviert werden kann.
- Nach dem Erreichen der Erstrisslast kommt es zu einer Aktivierung des Bewehrungs-

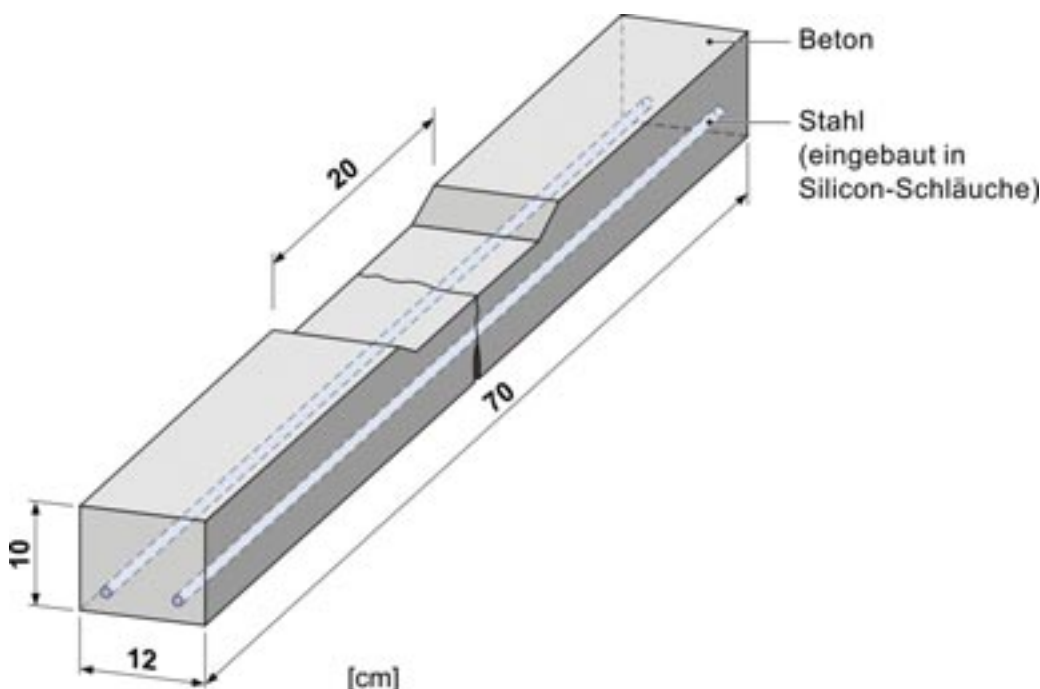


Bild 5: Isometrische Darstellung des Grundkörpers.



Bild 6: Einbau des Estrichs zur Egalisierung des Untergrundes. Die textilbewehrte Rissbandage wurde im Anschluss an die Nachbehandlung mittels Lamiertechnik frisch-in-frisch auf den Estrich appliziert.

traganteils und die Last kann weiter von der Rissbandage aufgenommen werden.

- Das Versagen des Substrates bei beiden Grundkörpern repräsentiert nicht die Verhältnisse vor Ort, da bei dem Aachener Dom die Verbundfuge zwischen Mauerwerk und Rissbandage deutlich länger ist und es somit zu einem späteren Versagen kommen wird.

#### Vom Labor auf die Baustelle

Nach der Entwicklung der Materialien und der Konstruktion im Labor stand die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis an. Zunächst wurde der Untergrund gereinigt und Lockermaterial entfernt. Nach der Untergrundvorbereitung erfolgte die Egalisierung mit dem Estrich. Um einen ausreichenden Verbund zwischen Estrich und Rissbandage zu erzielen, wurde

die Oberfläche mittels einer Zahnkelle aufgeraut. Der farblich abgesetzte Mörtelstreifen unmittelbar oberhalb des Risses dient zum einen der Einstellung der freien Dehnlänge und zum anderen der Kennzeichnung des Rissverlaufs. Der Estrich wurde für insgesamt 18 Tage mit feuchten Tüchern nachbehandelt.

#### Langzeitmonitoring der Rissbandage

Entscheidend für eine Beurteilung der Wirksamkeit der Rissbandage ist die Kenntnis der Verformungen, die während der Nutzung auftreten. Um dies beurteilen zu können wurden innerhalb der Rissbandage sechs interne Dehnungsmessstreifen (DMS) sowie drei Temperaturfühler eingebaut. In Kombination mit einem vor Ort installierten Datenlogger können so die Verformungen der Rissbandage infolge Temperatur und Bewegungen aus dem Untergrund er-

fasst werden. Die bereits vorliegenden Messungen zeigen, dass die Rissbandage in der Lage ist, die vorhandenen Bewegungen aufzunehmen und sich wie eine Feder flexibel zu verformen.

#### Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde mittels der Verknüpfung traditioneller und innovativer Materialien eine dauerhafte Maßnahme zur Substanzerhaltung des Aachener Doms entwickelt. Aufgrund des modularen Aufbaus der Rissbandage ist es möglich, das Verfahren an andere Randbedingungen anzupassen. Das installierte Langzeitmonitoring demonstriert, dass die Rissbandage in der Lage ist, Bewegungen und die Lasten, die aus dem Untergrund auf die Bandage wirken, aufzunehmen und sich ebenfalls flexibel zu verformen.

#### Autoren:

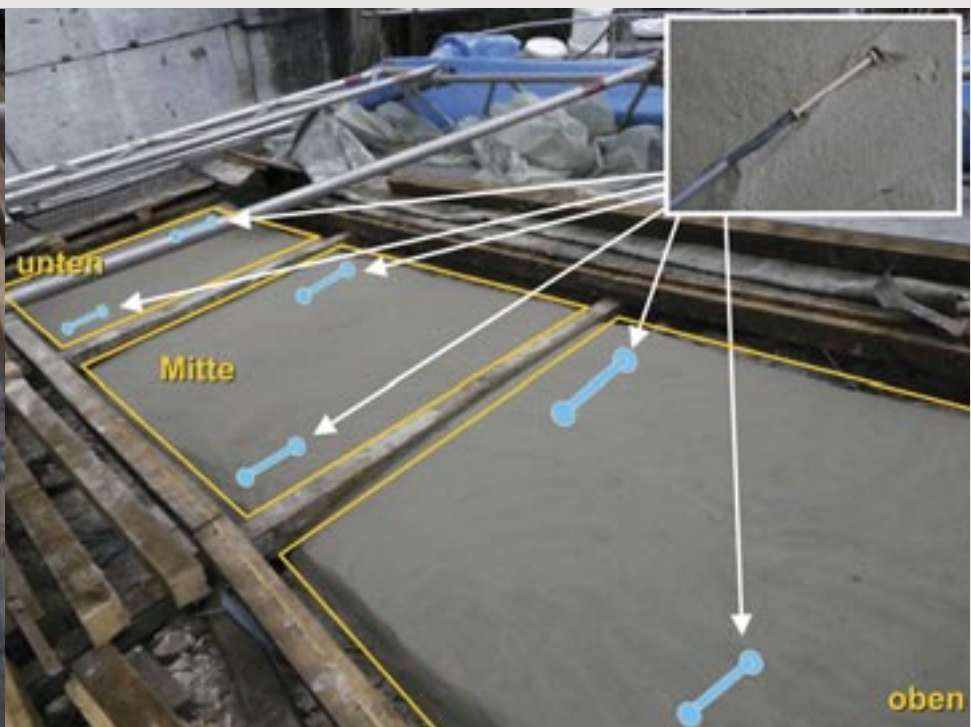
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach leitet das Lehr- und Forschungsgebiet Bauwerkserhaltung und Instandsetzung und das Institut für Bauforschung.

Dipl.-Ing. Till Büttner ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauforschung – Arbeitsgruppe Erhaltung und Instandsetzung.

Bild 7: Darstellung des lagenweisen Aufbaus der textilbewehrten Rissbandage.



Bild 8: Lage der Dehnungsmessstreifen in der Rissbandage.



# Gewürzmetalle in Hochleistungswerkstoffen

# D

Das Wachstum der europäischen Wirtschaft hält aufgrund des Erfolges in den Bereichen der angewandten Technologien und der Hochtechnologien an. Diese benötigen zahlreiche Metalle, die nur schwer auf dem Weltmarkt zu erhalten sind, da sie größtenteils als so genannte Koppelprodukte bei den entsprechenden Gewinnungsverfahren der Hauptmetalle in vergleichsweise geringen Mengen dargestellt werden können. Zu den derart knappen und seltenen Metallen zählen beispielsweise Indium, Tantal, Lithium und Palladium. Sie sind zur Herstellung hochtechnisierter Geräte, wie Mobiltelefone, Flachbildschirme und Solarzellen, unverzichtbar, obwohl sie nur in kleinen Mengen benötigt werden. Prof. Armin Reller aus Augsburg verdeutlichte dieses besondere Verhältnis von Menge und Wirkung einmal am Beispiel des Rezepts für einen Safran-Risotto. So wie man für die Zubereitung der italienischen Spezialität Safran benötigt, braucht man für die Herstellung eines Flachbildschirms oder eines Touchscreens unbedingt etwas Indium: In einen Risotto für vier Personen kommen 0,1 bis 0,2 g Safran, dies entspricht circa 100 ppm (parts per million) Safran pro Portion. Zur Herstellung eines Flachbildschirms wird 1 g Indium, also circa 200 ppm, gebraucht. Ein weiteres Beispiel: In einem typischen, härtesten Konstruktionsstahl liegt der Niobgehalt bei ungefähr 100 ppm.

Um ein Kilo Safran zu gewinnen, braucht man etwa 80.000 bis 150.000 Blüten beziehungsweise 500.000 Blütenstempel einer bestimmten Krokus-Art, dem *Crocus sativus*, die getrocknet als Gewürz verwendet werden. Der *Crocus sativus* wird im Iran, in Kaschmir und im Mittelmeerraum angebaut und kann nur in Handarbeit gepflückt und verarbeitet werden. Das Gewürz Safran trägt aufgrund der roten Farbe der Stempelfäden und wegen seines hohen Preises von ungefähr 8.000 Euro pro Kilogramm auch den Namen „rotes Gold“. Indium wird entsprechend als

„Gewürzmetall“ bezeichnet, da man zwar nur sehr geringe Mengen dieses Schwermetalls für einen Flachbildschirm braucht, der Rohstoff jedoch sehr knapp und teuer ist: Ein Kilogramm Indium kostet derzeit 380 Euro. Das Metall kommt kaum in gediegenem Zustand vor. Die größten Vorkommen liegen in Zinkerzen, insbesondere in Sphalerit, dessen Vorkommen sich in Kanada, China und Peru befinden. Indiumhaltige Erze werden aber auch in Australien, Bolivien, Brasilien, Japan, Russland, Südafrika, den USA und einigen europäischen Ländern gefunden. Indium wird hauptsächlich als Nebenprodukt bei der Produktion von Zink oder Blei gewonnen. Die theoretischen Indium-Reserven werden auf 16.000 Tonnen geschätzt, von denen derzeit nur 11.000 Tonnen abbaubar sind, das heißt die natürlichen Indium-Reserven werden in naher Zukunft erschöpft sein. Es stellt sich die Frage, womit man dann Flachbildschirme und Touchscreens „würzen“ kann, damit sie ihre komplizierten Funktionen weiterhin ausführen können. Ein Risotto lässt sich zwar auch mit Kurkuma gelb färben, aber der typisch-würzige Safrangeschmack ist dann verloren.

## Kritische Rohstoffe

Politik- und Wirtschaftsverbände befürchten zukünftige Versorgungengpässe für die „Gewürzmetalle“ Gallium, Scandium, Indium, Yttrium, Lithium, Niob, Neodym und Germanium. Die Verfügbarkeit dieser Metalle für Zukunftstechnologien wird dadurch erschwert, dass sie meist nur vergesellschaftet mit anderen Elementen in Erzen vorkommen und damit über keine eigene Produktionsinfrastruktur verfügen. Darüber hinaus sind bei einigen dieser Gewürzmetalle einzelne Länder oder Bergbauunternehmen weltweite Marktführer - es ist also eine starke Produzentenkonzentration zu verzeichnen. Die zunehmende Verwendung in Hightech-Produkten treibt demnach den Bedarf an diesen Metallen in die Höhe. Es gibt

nur wenige Beispiele, wo die jeweiligen Metalle in reiner Form verwendet werden, zumeist dienen sie als Beimengungen in anderen Materialien. Außerdem spielen sie eine wichtige Rolle in Legierungszusätzen moderner Werkstoffe, die in Autokonstruktionen verwendet werden. Aufgrund ihrer geringen Beimengungen werden sie auch als „Tuningmetals“ oder „Mikrolegierungselemente“ bezeichnet.

Prinzipiell sind die mit diesen Materialien hergestellten Produkte nach der Nutzungsphase recyclebar. In den meisten Fällen ist ein hochwertiges Recycling jedoch nicht vollständig möglich, da sie nur in minimalen Konzentrationen verarbeitet und daher – wie der Safran vom Reis – „aufgezehrt“ werden. Der effiziente Rohstoffeinsatz bei der Produktherstellung und das Schließen der Materialkreisläufe durch Recycling auch von „Spicemetals“ ist eine wichtige künftige Aufgabe für Wissenschaft und Technik. Es müssen große Anstrengungen unternommen werden, um über die Verbesserung der Rohstoffbereitstellung und Ausweitung der Produktion mit gleichzeitiger Erhöhung der Ressourceneffizienz, die Versorgung der Industrie mit den knappen Gewürzmetallen sicherzustellen. Das Erreichen dieses Ziels erfordert die Untersuchung des gesamten Produktions- und Wertschöpfungskreislaufs von der Lagerstätte mineralischer Rohstoffe über die Aufbereitung und Metallurgie bis zum Recycling.

## Sicherung der Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe

Die Fakultät für Georesourcen und Materialtechnik forscht interdisziplinär zu Themen dieser kritischen Rohstoffe: Die Fachgruppen Geowissenschaften und Geographie, Rohstoffe und Entsorgungstechnik sowie Metallurgie und Werkstofftechnik arbeiten gemeinsam daran, wie die anhaltende Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe gewährleistet werden kann, damit der Bedarf dieser Materialien für zukünftige Industrien sichergestellt wird. Ziel dieser Gemein-

schaftsforschung ist es, Kreislaufstrategien für knappe Materialien zu entwickeln, die wichtig für entstehende Zukunftstechnologien sind. Forscher und Wissenschaftler von der Philosophischen Fakultät werden ebenfalls eingebunden und untersuchen die Beziehungen zwischen dem Rohstoffbestand und den wirtschaftlichen sowie sozialen Belangen. Um nachhaltige Strategien zu planen, die den langfristigen Bedarf der Rohstoffe sichern, sind die Kompetenz und der Einsatz von Forschern der Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie der Politik-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften erforderlich. Der Bedarf und die Beschaffung von Rohstoffen werden von der technologischen Entwicklung und der Wirtschaft beeinflusst. Dazu haben globale, politische und soziale Gesichtspunkte deutliche Auswirkungen auf die Wirtschaft. Die wichtigsten wissenschaftlichen Ziele sind:

- Bestimmungskriterien für den produktionsrelevanten Bedarf an kritischen Rohstoffen zu entwickeln, welche für die zukünftigen Mobilitäts- und Produktionstechnologien wichtig sind;
- Neue Techniken zu identifizieren, welche die Reserven an Rohstoffen unter Berücksichtigung der Prozesskette von der Lagerstätte zum metallurgischen Produkt vergrößern;
- Strategien zu entwickeln, welche garantieren, dass die Rohstoffe nachhaltig für das Entwickeln von Mobilitäts- und Produktionstechnologien vorhanden sind, die innovative Technologien für den Bestand an Rohstoffen und Basiswerkstoffen verwenden und zugleich soziale Interessen berücksichtigen.

Die RWTH-Wissenschaftler bewerten die entwickelten Basisprinzipien für den abzusehenden Rohmaterialbedarf, indem sie auf ihre Materialkompetenz zurückgreifen. Nach Ermittlung des künftigen Bedarfs an Ressourcen wird der Bedarf an kritischen Rohstoffen, die zum Beispiel für die Mobilität oder Energieversorgung von morgen gebraucht werden, erforscht.

Als weiteres Beispiel dient Aluminium, das ein wichtiges, leichtes Material für den Fahrzeugbau ist. Der Rohstoffkreislauf des Elements Aluminium ist auch eine wichtige Grundlage, um das seltene Metall Gallium zu gewinnen. Gallium allein wird in der Natur nicht in hohen Konzentrationen gefunden, daher ist technisches Wissen über die Galliumproduktion aus der Rohstoffquelle Bauxit erforderlich.

Der Aluminiumbedarf wird zunehmend mittels Sekundäraluminium gewonnen und eine Abnahme der Verfügbarkeit von Gallium aus primärem Bauxit ist daher absehbar. In diesem Falle sind Forschung und Entwicklung in den Bereichen Lagerstätte, Abbau, Bergbautechnik und Metallurgie gefordert, um Lösungen zu finden. Solche Entwicklungen sind auch für andere „Gewürzmetalle“ notwendig.

Zur Identifizierung neuer Technologien, welche die Rohstoffreserven ausweiten, ist es notwendig, das Wissen über Rohstoffe zu erweitern und auszubauen. Forscher aus verschiedenen Wissenschaftsfeldern kooperieren interdisziplinär von der Lagerstätte zur Werkstofftechnik.

Die nachhaltigen Strategien für einen lang anhaltenden Bestand an Rohstoffen sind eine herausfordernde, interdisziplinäre Forschungsaufgabe: In den Bereichen Energie und Rohstoffe müssen Quellen und unkonventionelle Vorkommen sichergestellt werden. Deren Auffinden stellt ein neues Forschungsgebiet dar. Auf dem Gebiet des Bergbaus und der Entwicklung neuer Technologien zur Anreicherung von Metallen in Spurenkonzentrationen werden sowohl die Abbaufverfahren als auch die Produktionsausstattung weiterentwickelt. Metallurgie und Recycling entwickeln Technologien weiter für die selektive Entnahme und Gewinnung von Metallen sowie für die Entwicklung von innovativen Prozessänderungen, Automation und den Prozess verbessernde Flexibilität. Die Geistes-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften ermitteln die Möglichkeiten und Grenzen für den Bereich „Gesellschaft und Rohstoffe“. Naturwissen-

schaften und Maschinenbau schließlich stellen weitere wesentliche Kenntnisse und Möglichkeiten bereit.

Die Forschung zielt darauf ab, einen ganzheitlichen Ansatz zu liefern, der Wissenschaftler und Forscher aus den Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaften verbindet und die Antworten und Lösungen miteinander verknüpft. An der RWTH Aachen arbeitet die Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik an einem Konzept zur wissenschaftlichen Erforschung dieser zukunftsorientierten Aufgaben, um geeignete Lösungen für die nachhaltige Sicherung der industriellen Versorgung von „Gewürzmetallen“ zu finden.

Werkstofftechnik ist ein Schlüsselement für die Industrieländer und sichert die Zukunft. Neue Hochleistungsmaterialien für intelligente Produkte werden auf Grundlage neuer Modelle mit verstärktem Einsatz von „Tuningmetals“ entworfen.

Die vorgestellte interdisziplinäre Forschung untersucht das „vorgelagerte“ Feld vom primären und sekundären Rohstoff zum Hochleistungswerkstoff unter Beachtung von Kosten, Gewinnung der Rohstoffe und ihrer Verhüttung, Recycling und Veredelung sowie Umweltschutz. Es werden methodisch

und parallel verschiedene Basisansätze im Feld der Rohstoffverfügbarkeit miteinander verbunden sowie Ressourcen- und Energieeffizienz der Prozessketten entwickelt.

#### Autoren:

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Franz Michael Meyer hat den Lehrstuhl für Mineralogie und Lagerstättenlehre inne.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Niemann-Delius ist Inhaber des Lehrstuhls für Rohgewinnung über Tage und Bohrtechnik. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz ist Inhaber des Lehrstuhls für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe.

Dr.-Ing. Elinor Rombach ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Senk leitet den Lehrstuhl für Metallurgie von Eisen und Stahl.

Anzeige



## Ausschreibung für das Junge Kolleg



Stiftung  
Mercator

Die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und der Künste hat im Jahr 2006 ein Junges Kolleg als Förderprogramm für herausragende junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aller Fachrichtungen eingerichtet. Die Mitglieder werden mit finanzieller Unterstützung durch die Stiftung Mercator, Essen, für drei Jahre mit der Möglichkeit der Verlängerung (bis zu vier Jahren) berufen, um sie durch die Aufnahme persönlich und sichtbar auszuzeichnen, um sie in ihrer Forschungsarbeit ideell und finanziell zu fördern und um ihnen eine interdisziplinäre Plattform für die kritische Bewertung von Problemen der Bildungs- und Forschungspolitik zu bieten.

Für das Jahr 2012 ist die Aufnahme weiterer Mitglieder vorgesehen. Kandidatinnen und Kandidaten können bis zum **01.09.2011** nominiert werden oder sich bewerben. Der Auswahlausschuss der Akademie trifft eine Vorauswahl anhand der eingereichten Unterlagen und entscheidet nach persönlichen Vorstellungsgesprächen, die am **01.12.2011** in Düsseldorf geführt werden.

#### Die Mitglieder des Jungen Kollegs sollen folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Sie sind promoviert.
- Sie zeichnen sich durch besondere wissenschaftliche Leistungen aus.
- Sie arbeiten an einer wissenschaftlichen Hochschule oder Forschungseinrichtung in Nordrhein-Westfalen.
- Sie sind bei der Aufnahme nicht älter als 36 Jahre.
- Sie haben keine unbefristete Hochschullehrerstelle (W2/W3) inne.

#### Arbeitsweise des Kollegs

Die Mitglieder des Kollegs verbleiben an den wissenschaftlichen Hochschulen und Forschungseinrichtungen Nordrhein-Westfalens. Sie treffen sich regelmäßig zu gemeinsamen Veranstaltungen in der Akademie. Im Einzelnen geht es um:

- aktive Mitarbeit in dem ein- bis zweimal jährlich stattfindenden kolleginternen Forschungsforum Junges Kolleg.
- aktive Mitarbeit in einem kolleginternen Arbeitskreis des Jungen Kollegs zu wissenschafts- und gesellschaftspolitischen Problemen.
- aktive Teilnahme an einem jährlich stattfindenden öffentlichen Symposium „Forschungstag der Akademie“, ggf. mit Vortrag aus der aktuellen Forschungsarbeit.

#### Finanzielle Förderung:

- Die Mitglieder des Jungen Kollegs erhalten ein Forschungsstipendium in Höhe von 10.000 Euro pro Jahr für persönliche Forschungszwecke und zur Deckung der Kosten von Reisen zu Veranstaltungen des Jungen Kollegs und der Akademie.
- Auf Antrag können Zuschüsse zu Forschungsaufenthalten an wissenschaftlichen Einrichtungen im Ausland gewährt werden.

#### Nominierungen / Bewerbungen

Geeignete Kandidatinnen und Kandidaten werden in der Regel durch die Leitungen wissenschaftlicher Hochschulen, wissenschaftlicher Forschungseinrichtungen in Nordrhein-Westfalen, insbesondere der Max-Planck-Institute, der Helmholtz-Forschungszentren und der Leibniz-Einrichtungen vorgeschlagen. Auch Selbstbewerbungen sind möglich.

Die Bewerbung ist unter Beifügung folgender Unterlagen unter dem Stichwort „Junges Kolleg“ bei der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften und der Künste, Palmenstraße 16, 40217 Düsseldorf sowohl in Papierform wie digital einzureichen:

1. Bezeichnung des engeren Forschungsgebietes des Kandidaten / der Kandidatin
2. Zwei Fachgutachten, nach Möglichkeit von verschiedenen Hochschulen
3. Lebenslauf (incl. Adresse, Telefonnummer, E-Mail-Adresse der Kandidaten)
4. Schriftenverzeichnis
5. Bis zu drei Publikationen im PDF-Format (nur auf CD)

**Bewerbungsschluss: 01.09.2011**

Weitere Informationen zum Jungen Kolleg finden Sie unter [www.awk.nrw.de](http://www.awk.nrw.de).



*Bild 1: Im Hintergrund ein Vakuuminduktionsofen zur Herstellung hochreiner Stähle am Institut für Eisenhüttenkunde. Die Wissenschaftlichen Mitarbeiter des Lehrstuhls tragen bei Schmelzversuchen Sicherheitskleidung.  
Foto: Peter Winandy*



Anzeige

DIE NEUESTEN  
TECHNOLOGIEN FINDEN  
SIE BEI FARNELL!



> Über 100 neue Produkte werden täglich online hinzugefügt

> Produkte von 3.500 namhaften Herstellern

> element14 – die erste Online-Technologieplattform und e-Community für Elektronikentwickler

> Mit eQuotes erhalten Sie jetzt alle Angebote online

> i-Buy, unser KOSTENLOSER Einkaufsmanager

[www.farnell.com](http://www.farnell.com)

element14  
[www.element14.com](http://www.element14.com)



Was Sie auch entwickeln

A Premier Farnell Company

### DRIVE-E-Studienpreis für Diplomarbeiten

Mareike Hübner und Michael Reiter wurden für ihre Diplomarbeiten zur Entwicklung eines Antriebsumrichters für Elektroantriebe mit dem DRIVE-E-Studienpreis für Innovationen im Bereich der Elektromobilität ausgezeichnet. Sie teilen sich in der Kategorie Diplom- und Masterarbeiten die erste Platzierung und erhalten jeweils ein Preisgeld von 3.500 Euro. Der Preis ist Bestandteil des DRIVE-E-Programms, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und der Fraunhofer-Gesellschaft ins Leben gerufen wurde, um junge Menschen an das Thema Elektromobilität heranzuführen. Zentrales Thema der Diplomarbeiten von Mareike Hübner und Michael Reiter sind Umrichter, die als Bindeglied zwischen dem Motor und dem Energiespeicher ein Kernstück des elektrischen Antriebs darstellen. Dabei untersuchten sie beispielsweise, wie sich durch eine bessere räumliche und funktionale Anordnung der Bauteile gleichzeitig die Leistung steigern und der Einsatz an elektronischen Bauelementen reduzieren lässt. Ferner beschäftigten sie sich mit Fragen der Zuverlässigkeit und Konzepten zur Gewährleistung einer hohen Betriebssicherheit.

### Professor Manfred Martin lehrt an der Seoul National University

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Manfred Martin, Professor für Physikalische Chemie, lehrt künftig an der Seoul National University. Im Rahmen des koreanischen Regierungsprogramms „World Class University“ wurde er als einer von 13 deutschen Akademikern zum Vollzeitprofessor an die asiatische Spitzenuniversität berufen. Insgesamt drei Monate wird er in 2011 Masterstudierende der Materialwissenschaften unterrichten und mit Fachkollegen die bereits bestehende Forschungskooperation vertiefen.

### Neuer Rechner für das Rechen- und Kommunikationszentrum

Die RWTH Aachen erhält einen neuen Supercomputer. Dieser verfügt über mehr als 28.000 Prozessorkerne mit einer Gesamtleistung von etwa 300 Tfllop/s sowie drei Petabyte Plattenspeicher und verschafft der RWTH so einen immensen Vorteil bei der Berechnung lebensnaher Simulationen. Ein Teil des neuen Hochleistungsrechners wird den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in der Jülich Aachen Research Alliance, kurz JARA, zur ausschließlichen Nutzung zur Verfügung gestellt und bildet damit den Grundstein für die Etablierung einer so genannten JARA-HPC Partition. Damit finden Forscher aus JARA in Zukunft eine hochperformante Rechnerplattform vor, die zusammen mit den methodischen Kompetenzen für HPC in JARA ein einzigartiges HPC-Ökosystem für Simulation Science schafft.

### Wolfgang Marquardt ist Vorsitzender des Wissenschaftsrats

Der Wissenschaftsrat hat Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Marquardt zu seinem neuen Vorsitzenden gewählt. Der Inhaber des Lehrstuhls für Prozesstechnik war ein Jahr zuvor als Mitglied in die Wissenschaftliche Kommission des Gremiums berufen worden. Der Wissenschaftsrat ist eines der wichtigsten wissenschaftspolitischen Beratungsgremien in Deutschland. Er berät die Bundesregierung und die Regierungen der Länder in allen Fragen der inhaltlichen und strukturellen Entwicklung der Wissenschaft, der Forschung und des Hochschulbereichs. Prof. Marquardt gehörte den Strategieräten der RWTH und des Universitätsklinikums der RWTH an. Dazu fungierte der Verfahrenstechniker als Direktor des Center for Computational Engineering Science und war Mitglied der Lenkungsausschüsse der Graduiertenschule Aachen Institute for Advanced Study in Computational Engineering sowie des Exzellenzclusters Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse. Eine hohe wissenschaftliche Auszeichnung wurde ihm 2001 mit der Verleihung des Leibniz-Preises der Deutschen Forschungsgemeinschaft zuteil.

### RWTH-Team für

#### Solar Decathlon nominiert

Ein interdisziplinäres Team der RWTH Aachen ist für die Teilnahme am Solar Decathlon 2012 nominiert worden. Neben Aachen nehmen Universitäten aus 15 Ländern am Wettbewerb teil. „Counter-Entropy-House“ - so lautet der Name des Aachener Antrags. Das Team, welches sich aus Vertretern der Fakultäten Architektur, Bauingenieurwesen sowie Maschinenwesen zusammensetzt, überzeugte die Jury mit der Entwicklung eines Hauses, welches sowohl energie-, material- und transporteffizient gebaut werden soll. Solar Decathlon Europe ist ein weltweiter Wettbewerb, bei dem Studierende ein Haus entwickeln und bauen, dessen Energiebedarf allein durch Solarstrom gedeckt wird. Das Bewusstsein für und das Wissen um die Möglichkeiten des energieeffizienten Bauens und der Nutzung regenerativer Energien sollen so gesteigert werden. Der „Solare Zehnkampf“ wird alle zwei Jahre vom spanischen Wohnungs- und vom amerikanischen Energieministerium ausgelobt.

### DFG fördert Transregio weitere vier Jahre

Seit 2007 untersuchen Wissenschaftler der RWTH Aachen, der Universitäten Bonn und Köln sowie des Forschungszentrums Jülich im Transregio-Sonderforschungsbereich 32 das komplexe Wechselspiel zwischen Boden und Atmosphäre. Das Großprojekt aus 20 verschiedenen Projekten beschäftigt sich vor allem mit dem Wärmeaustausch zwischen Boden und Luft. Die Erdoberfläche spielt eine wesentliche Rolle, wie die Energie der Sonnenstrahlung in die Atmosphäre gelangt. Der größte Teil der Wärme nimmt nämlich einen Umweg: Erst heizt die Sonne den Boden auf, dann erwärmt dieser wie eine Herdplatte die Luft darüber. Ziel der Wissenschaftler ist es, die derzeit benutzten Klima- und Wetterprognosesysteme zu verbessern. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat die Förderung des Transregio um vier Jahre verlängert und die Fördersumme auf über 3 Millionen Euro pro Jahr fast verdoppelt. In der zweiten Förderphase entsteht ein Modell, das alle relevanten Prozesse vom Grundwasser bis zur Gewitterwolke miteinander verknüpft. So soll sich verlässlicher berechnen lassen, wie sich das Weltklima in den kommenden Jahrzehnten entwickeln könnte.

### Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz und die RWTH Aachen haben einen Rahmenvertrag unterzeichnet. Seit Jahren gab es bereits gemeinsame Projekte zu unterschiedlichen Themenstellungen, besonders eng waren die zum RWTH-Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Dort wird unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf zum Beispiel der Sedimenttransport in Wasserstraßen untersucht. In Zukunft planen mehrere Institute der RWTH und die Bundesanstalt für Gewässerkunde komplexe wissenschaftliche Fragestellungen in den Bereichen Ökotoxikologie, chemische Analyse von Gewässern, Sediment- und Morphodynamik sowie Küstenhydrologie zu bearbeiten. Dabei wollen die Institutionen gemeinsam Förderanträge stellen. Einige Mitarbeiter werden zudem zeitweise am jeweils anderen Standort arbeiten. Für die RWTH ist die Zusammenarbeit ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem Forschungszentrum Hydrotoxikologie.

### Erste Ziel- und Leistungsvereinbarung unterzeichnet

Die Fakultät für Bauingenieurwesen ist die erste an der RWTH, die eine Ziel- und Leistungsvereinbarung unterzeichnete. Damit bekennt sie sich zur Strategie der RWTH und beschreibt Ihren Beitrag zu ihrer erfolgreichen Implementierung. „Mit den Ziel- und Leistungsvereinbarungen hat die RWTH ein Instrument zur strategischen Führbarkeit entwickelt. Wir sind stolz, damit nun eine Forderung des Wissenschaftsrates erfüllen zu können“, betonte Rektor Ernst Schmachtenberg bei der Unterzeichnung der Vereinbarung. Der Formulierung der Vereinbarung ging eine kritische Stärken-Schwächen-Analyse voraus. Zu den anschließend festgeschriebenen Zielen gehört beispielsweise das Vorhaben, mit Hilfe von neuen Großprojekten eine weitere Verbesserung des Leistungsindikators zu erreichen und gleichzeitig die Grundlagenforschung zu intensivieren. Im Bereich der Ausbildung verpflichtet sich die Fakultät im Rahmen des Konzepts „Exzellenz der Lehre“ die Qualität zu steigern. Die Laufzeit der Ziel- und Leistungsvereinbarungen beträgt fünf Jahre. Die Zielvereinbarungen mit den übrigen Fakultäten und Fachgruppen sollen zügig folgen.

### Deutsch-Indisches Zentrum für Nachhaltigkeitsforschung

Rektor Ernst Schmachtenberg und der Parlamentarische Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung Thomas Rachel, MdB, haben gemeinsam das Deutsch-Indische Zentrum für Nachhaltigkeitsforschung am Indian Institute of Technology (IIT) Madras in Chennai, Indien, eröffnet. Das Deutsch-Indische Zentrum für Nachhaltigkeitsforschung ist eine Kooperation zwischen dem IIT Madras und einer Gruppe deutscher Universitäten unter der Federführung der RWTH Aachen. Es führt deutsche und indische Spitzenforschung in den Bereichen Wasser, Energie, Abfallwirtschaft und Landnutzung mit einem interdisziplinären Ansatz zusammen. Vorsitzende des Zentrums sind der Rektor der RWTH Aachen Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg und der Direktor des IIT Madras. Das BMBF unterstützt das Programm A New Passage to India mit zusätzlichen 3,7 Mio. Euro für den akademischen Austausch mit Indien. Unter anderem werden vier Langzeitdozenturen sowie Stipendien für Graduierte und Wissenschaftler finanziert.

### Auszeichnung für Karen Veroy-Grepl

Karen Veroy-Grepl wurde in das Junge Kolleg der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften aufgenommen. Seit der Gründung des Kollegs im Jahr 2007 wurden insgesamt 50 Kollegiaten berufen, die fachlich, finanziell und ideell unterstützt werden. Zur Finanzierung der ersten beiden Fördersequenzen von jeweils vier Jahren konnte die Stiftung Mercator gewonnen werden.

Die 1975 geborene Karen Veroy-Grepl ist seit Juni 2010 Juniorprofessorin für das Fach Hochleistungsrechnen ingenieurmäßiger Modelle an der Fakultät für Bauingenieurwesen. Ihr aktueller Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich Computational Engineering Science an der Schnittstelle zwischen Mathematik und den Ingenieurwissenschaften. Ihr Interesse gilt dabei vor allem der Entwicklung effizienter numerischer Methoden zur Lösung partieller Differentialgleichungen. Ziel ist es, eine Lösung von Optimierungsproblemen, Inversen Problemen und Regelungsproblemen in Echtzeit zu ermöglichen. Veroy-Grepl studierte Physik an der Ateneo de Manila University. Anschließend ging sie an das Massachusetts Institute of Technology, wo sie 2001 den Master of Science und 2003 den Doctor of Philosophy in Civil Engineering machte. Nach ihrer Promotion arbeitete sie zunächst am MIT als Postdoktorandin, bis sie als Research and Development Trainee zur Robert Bosch GmbH in Stuttgart wechselte.

### Ehrung für Professor Winfried Dahl

Winfried Dahl, emeritierter Professor für Eisenhüttenkunde, wurde die Carl-Lueg-Denk Münze des Stahlinstituts VDEh verliehen. Hans Jürgen Kerkhoff, Vorsitzender des Stahlinstituts VDEh und Präsident der Wirtschaftsvereinigung Stahl, würdigte die wissenschaftlichen Verdienste von Dahl um den Werkstoff Stahl und sein langjähriges Engagement in Ausschüssen, vor allem im Werkstoffausschuss des Stahlinstituts VDEh. Besonders am Herzen lag Dahl die Weitergabe seiner Begeisterung für den Werkstoff an den Nachwuchs in Wissenschaft und Industrie. Dahl, 1928 in Wuppertal geboren, studierte Physik und Metallkunde an der Universität Göttingen. Er promovierte 1953 und arbeitete anschließend am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf. Nach Tätigkeiten an der TU Berlin und im Mannesmann-Forschungsinstitut übernahm er am 1. März 1969 die Leitung des Instituts für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen. 1990 erhielt er die Würde eines Doktor-Ingenieurs ehrenhalber der Bergakademie Freiberg. 1994 wurde er emeritiert und auch mit dem Verdienstkreuz 1. Klasse des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland ausgezeichnet.

### Neuer Studiengang Umweltingenieurwissenschaften

Zum Wintersemester 2010/11 startete der Studiengang Umweltingenieurwissenschaften mit über 250 Einschreibungen. Merkmale des Studiengangs sind eine breite und fundierte Grundausbildung in Mathematik, Mechanik, Thermodynamik, Hydrodynamik, Chemie und Ökologie. Klassische Berufsgebiete sind Planung, Bau und Betrieb von umwelttechnischen Anlagen, Lehre und Forschung, Umweltverbände und -verwaltungen. Der neue Bachelor-Studiengang wird ergänzt durch einen Master-Studiengang mit fünf thematischen Schwerpunkten: Siedlerwasserwirtschaft, Wasserressourcen-Management, Bauen und Umwelt, Recycling und Umweltverfahrenstechnik. Die Fakultät für Bauingenieurwesen führt den neuen Studiengang zusammen mit der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik in enger Kooperation mit der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften sowie der Fakultät für Maschinenwesen durch.

### Rekord bei Drittmitteln

Im Haushaltsjahr 2010 konnten die Drittmittel der RWTH Aachen – inklusive des Anteils der Medizinischen Fakultät – auf 258 Millionen Euro gesteigert werden. Die im Vergleich zum Vorjahr zusätzlich eingenommenen 31 Millionen Euro entsprechen einer Steigerung von 13,6 Prozent. Die drei größten Geldgeber waren die Deutsche Forschungsgemeinschaft mit 79 Millionen Euro, die Industrie und Wirtschaft mit 69 Millionen Euro sowie das Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 20 Millionen Euro. Aber auch andere Bundesressorts, die Europäische Union, Stiftungen, das Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW und andere Landesministerien, Privatpersonen und weitere Forschungsförderer ermöglichen die hohen Drittmittelleinnahmen.

### RWTH-Projekte in Afghanistan

Die Wissenschaftler vom Lehrstuhl für Stadtbaugeschichte arbeiten an zwei kulturellen Projekten für Afghanistan. Die Restaurierung der Stadtmauer von Ghazni, das 2013 islamische Kulturhauptstadt wird, ist ein auf drei Jahre angelegtes Projekt der Aachener Wissenschaftler. Für den Aufbau der Stadtmauer wird das RWTH-Institut vom Auswärtigen Amt der Bundesrepublik Deutschland 1,5 Millionen Euro erhalten. Die Pläne für den Wiederaufbau wurden in enger Zusammenarbeit mit dem afghanischen Ministerium für Kultur und Information sowie dem afghanischen Städtebauministerium entwickelt.

In einem zweiten Projekt – das bereits seit sieben Jahren von Aachen Wissenschaftlern betreut wird – geht es um den Schutz des Bamiyan-Tals, das zum Weltkulturerbe der UNESCO gehört. Das Tal wird derzeit von den Aachener Wissenschaftlern genau vermessen. Denn nicht nur die vor zehn Jahren von den Taliban zerstörten Buddha-Statuen, sondern das gesamte Tal steht auf der UNESCO Welterbe-Liste. In einem Cultural Master Plan haben Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Jansen und sein Team bereits vor einigen Jahren festgeschrieben, was geschützt werden soll beziehungsweise wo heute gebaut werden darf. Diese Vorgaben wurden von der afghanischen Regierung übernommen. Der Master Plan muss aber fortgeschrieben und neue wissenschaftliche Erkenntnisse eingefügt werden.

### Neues Graduiertenkolleg bewilligt

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat das Graduiertenkolleg „Teilchen- und Astroteilchenphysik im Lichte von LHC“ bewilligt und wird mit 2,5 Millionen Euro in den nächsten vier einhalb Jahren die Ausbildung von zwölf besonders qualifizierten Doktorandinnen und Doktoranden fördern. Ziel des Kollegs ist es, in diesem aktuellen Forschungsgebiet der Grundlagenforschung die Grenzen des Standardmodells der Teilchenphysik zu untersuchen. Mit der Inbetriebnahme des Large Hadron Collider-Beschleunigers (LHC) am CERN in Genf erwarten die Wissenschaftler dazu in den nächsten Jahren wesentliche neue Erkenntnisse. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Stefan Schael, Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik, ist Sprecher des neuen Graduiertenkollegs, an dem zehn Professorinnen und Professoren beteiligt sind.

### Akademie der Wissenschaften und der Künste

Die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und der Künste hat die Professoren Matthias Wuttig und Rudolf Mathar zu ihren Mitgliedern gewählt. Univ.-Professor Dr.rer.nat. Matthias Wuttig hat den Lehrstuhl für Physik neuer Materialien inne. Begonnen hat seine Karriere mit dem Studium der Physik in Köln. Die Promotion erfolgte an der RWTH Aachen. Heute berät er als Sprecher des RWTH-Strategierates die Universität in ihren Zukunftsplänen und identifiziert neue potenzielle Forschungsbereiche. Univ.-Professor Dr.rer.nat. Rudolf Mathar ist Leiter des Instituts für Theoretische Informationstechnik sowie Prodekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Zudem ist Mathar als Principal Investigator im Leitungsgremium des Exzellenzclusters Ultra High-Speed Mobile Information and Communication tätig. Den Grundstein für seinen beruflichen Werdegang legte er mit einem Studium der Mathematik.

### Auszeichnung für Christoph Clauser

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Christoph Clauser wurde Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina. Diese wurde bereits 1652 gegründet und später nach Kaiser Leopold I. benannt. Zu ihren Mitgliedern werden hervorragende Forscherpersönlichkeiten aus aller Welt gewählt. Durch die Kooperation mit wissenschaftlichen Akademien anderer Länder fördert die Leopoldina den internationalen Austausch zu Themen wie Energie, Klimawandel oder Gesundheit. Clauser, 1954 in Freiburg im Breisgau geboren, studierte Geophysik an der Technischen Universität Berlin und wurde dort promoviert. 1995 habilitierte er an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Im März 2000 trat er die Professur für Angewandte Geophysik an der RWTH Aachen an und ist seit 2007 Professor und Leiter des Lehrstuhls für Applied Geophysics and Geothermal Energy am E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen.

### Prof. Groß in die Europäische Akademie der Wissenschaften und Künste berufen

Die Europäische Akademie der Wissenschaften und Künste mit Sitz in Österreich hat Univ.-Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Dr. phil. Dominik Groß zum ordentlichen Mitglied ernannt. Der Direktor des Instituts für Geschichte, Theorie und Ethik der Medizin am Universitätsklinikum Aachen wird für seine herausragenden Leistungen im Bereich der Medizinischen Wissenschaften geehrt. Die 1990 gegründete Akademie zählt über 1.400 Mitglieder aus nahezu allen Teilen der Welt. Als interdisziplinäre Vereinigung ist die Akademie in sieben Klassen unterteilt: Philosophie, Medizin, Kunst, Naturwissenschaften, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften, Technik- und Umweltwissenschaften und Weltreligionen.

### Forschungsprojekt zur Hot-Dry-Rock-Technologie

Drei RWTH-Einrichtungen forschen gemeinsam an einem Projekt zur Hot-Dry-Rock-Technologie. Die Arbeit der Wissenschaftler wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit für die nächsten drei Jahre finanziert. Zugesagt wurde im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung „Innovation und neue Energietechnologien“ eine Fördersumme von 920.000 Euro. Beteiligt sind der Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen, der Lehrstuhl für Applied Geophysics and Geothermal Energy (Projektleitung) und der Lehrstuhl für Computergestützte Analyse technischer Systeme. Hot-Dry-Rock-Verfahren nutzen Erdwärme in einer Tiefe zwischen 3.000 und 6.000 Metern. Als Wärmeüberträger wird Wasser eingesetzt. Kaltes Wasser wird mit hohem Druck in das trockene, heiße Gestein gepresst, dabei weiten sich die vorhandenen Risse auf und neue entstehen. Das erhitzte Wasser wird an einer Bohrung wieder entgegengenommen. Eingesetzt wird die Hot-Dry-Technologie bislang nicht, lediglich in Pilotanlagen finden Untersuchungen statt. Die RWTH-Wissenschaftler entwickeln jetzt eine Software, die die Simulation der Vorgänge ermöglicht. Zunächst werden allerdings in Laborversuchen Gesteinsblöcke mit hohem Druck belastet und mit Wasserdruck befrachtet, so werden Klüfte erzeugt und deren Ausbreitung messtechnisch erfasst. Die Simulation der hydraulischen Bruchprozesse und eine Prognose der Rissausbreitung erfolgt im Labormaßstab und wird anschließend auf den Einsatz vor Ort erweitert.

### Professor Jens-Rainer Ohm ausgezeichnet

Univ.-Prof. Dr. Jens-Rainer Ohm vom Institut für Nachrichtentechnik wurde für seine herausragenden Leistungen im Bereich Videocodierung und für die Entwicklung des Standards H.264/AVC mit dem Technologiepreis der Eduard-Rhein Stiftung geehrt. Den mit 30.000 Euro dotierte Preis teilt sich Ohm mit seinem Kollegen Prof. Dr. Thomas Wiegand von der TU Berlin. Der Standard H.264/AVC ist ein hoch effizienter Videokompressionsstandard, der ein breites Spektrum von Anwendungen aufweist. Die Eduard-Rhein-Stiftung wurde im Jahr 1976 zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung sowie der Bildung, Erziehung, Kunst und Kultur im In- und Ausland ins Leben gerufen. Der Technologiepreis wird seitdem alljährlich vergeben.

# RWTH Aachen wird von Bosch gefördert

Drei deutsche Hochschulen wurden für das „Bosch Inter-Campus Program“ ausgewählt, zu ihnen gehört die RWTH: An der Aachener Hochschule sollen zukunftssträchtige Tätigkeitsfelder mit rund 5 Millionen Euro gefördert werden. Mittel in gleicher Höhe gehen an das KIT, das Karlsruher Institut für Technologie, wo das Fördergeld unter anderem für den Ausbau des Lehrstuhls für funktionelle Nanostrukturen eingesetzt wird. Fünf Millionen Euro fließen bis 2024 an die Universität Stuttgart zur Einrichtung eines Instituts innerhalb des Robert Bosch Zentrums für Leistungselektronik, das bereits 2009 gemeinsam mit der Hochschule Reutlingen gegründet wurde.

Bosch zählt die RWTH zu den führenden europäischen Forschungseinrichtungen. Die wissenschaftliche Ausbildung sei geprägt durch einen hohen Anwendungsbezug - nicht zuletzt deshalb gehörten die Absolventinnen und Absolventen zu den gefragten Nachwuchskräften der Wirtschaft. Bosch fördert in Aachen die Einrichtung eines Lehrstuhls für Erneuerbare Energien mit dem Schwerpunkt Antrieb für Windkraftanlagen. Dies geschieht in enger Zusammenarbeit mit dem bestehenden Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung, das bereits im Bereich Windenergie aktiv ist. Weitere Mittel stellt Bosch für den Aufbau eines Lehrstuhls für Produktionstechnik für Komponenten der Elektromobilität innerhalb des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ zur Verfügung. Hier erfolgt eine enge Kooperation mit zahlreichen international renommierten Unternehmen.

„Wir investieren in Innovationen, die der Gesellschaft dienen, die Umwelt schützen und jungen Wissenschaftlern eine Perspektive bieten“, betonte Dr. Volkmar Denner von der Bosch-Geschäftsführung bei Bekanntgabe der Initiative am 17. Mai 2011. Mit dem „Bosch InterCampus Program“ wolle man als weltweit tätiges Technologie- und Dienstleistungsunternehmen die gesellschaftliche Verantwortung unterstreichen und jungen Absolventen zugleich hervorragende Zukunftsperspektiven bieten. Bosch sieht die Themen Energie, Umwelt und Mobilität als große Herausforderungen einer globalen Gesellschaft. Die Firmengruppe startet die Initiative anlässlich ihres 125-jährigen Jubiläums. Mit einem Gesamtbeitrag von 50 Millionen Euro unterstützt sie in den kommenden Jahren Universitäten in Deutschland, China, Indien und den USA.

In der nächsten Ausgabe:

Philosoph trifft Ingenieur –  
Schon heute gemeinsam die Zukunft reflektieren

---

eHealth: Das Future Care Lab

---

Der nichtbrennbare Brennstoff?  
Überlegungen zur nachhaltigen Energieversorgung

---

Aachen im Wandel. Visualisierung von  
Entwicklungslinien und räumlichen Strukturen

---

Der Schreibtisch als digitales Werkzeug –  
Arbeiten im 21. Jahrhundert

---

Patente Technologie:  
Essenzielle Schutzrechte  
in der Standardisierung von Mobilfunktechnologie

---

74

Motion Capture Technologie  
in der Gestenforschung

---

Disziplinübergreifender Methodenmix  
zur Beschreibung von Technologie-Akzeptanz

---

# Wovon Sie früher auch träumten: Jetzt ist die Zeit, es wahr zu machen.

Sie wollten schon immer an wegweisenden Projekten mitwirken? Bei uns können Sie das. Vom ersten Tag an. Einer guten Idee ist es schließlich egal, wer sie hat: der Junior oder der Abteilungsleiter. Und gute Ideen – die brauchen wir. Sie haben uns zu dem gemacht, was wir sind: einer der wichtigsten technologischen Schrittmacher. Im Mobilfunk. Im Digital-Fernsehen. In der Funktechnik. Auch bei Flugsicherung, drahtloser Automobiltechnik oder EMV sind wir federführend – und praktisch in allen unseren Geschäftsgebieten einer der drei Top-Player am Weltmarkt. Damit wir das auch bleiben, brauchen wir Sie. Als frischgebackenen Hochschulabsolventen, Praktikanten, Werkstudenten (m/w) oder fertigen Sie Ihre Abschlussarbeit (Bachelor, Master, Diplom) bei uns an. Wir freuen uns auf Sie!

[www.career.rohde-schwarz.com](http://www.career.rohde-schwarz.com)

