



**JAHRESBERICHT  
2012/13**

**Themenschwerpunkt ENERGIE**

Die Sonne ist die größte Quelle, aus der wir Energie beziehen können. Im Sinne der Energiewende arbeitet das Fraunhofer ISC an Wegen und Verfahren, Sonnenenergie und andere regenerative Energieträger wie Wind und Wasser effizient, intelligent und sicher zu nutzen, aber auch an einem nachhaltigen Umgang mit Energie aus fossilen Energieträgern. Im diesjährigen Themenschwerpunkt Energie berichten wir über funktionelle Beschichtungen, Energiespeichersysteme, Verfahren zur Energieoptimierung industrieller Prozesse und anderes mehr.

Titelbild © Frank Zürn

# **JAHRESBERICHT**

# **2012/13**

**Themenschwerpunkt »ENERGIE«**

---

---

# VORWORT

---

Liebe Freunde und Partner des Fraunhofer ISC,  
sehr geehrte Damen und Herren,

2012 war für das Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC wieder ein turbulentes und ereignisreiches Jahr. Mit dem Auf- und Ausbau der Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS an den Standorten Alzenau und Hanau, der Überführung der Projektgruppe »Keramische Verbundstrukturen« in das Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperaturleichtbau HTL am Standort Bayreuth und der Vorbereitung und Gründung von neuen Fraunhofer-Anwendungszentren an den Hochschulen in Aschaffenburg und Hof erstrecken sich die ISC-Aktivitäten jetzt über fast den ganzen nordbayerischen Raum – von Hof bis Alzenau und mit »Satelliten« in Hessen (Hanau) und Baden-Württemberg (Bronnbach).

Im Jahr 2012 stieg der Betriebshaushalt des Instituts entsprechend von 18,5 Mio € in 2011 auf 20,4 Mio € an. Die Zahl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter betrug Ende 2012 343, von denen 197 festangestellt waren. Das Geschäftsjahr 2012 konnte wieder mit einem positiven Ergebnis abgeschlossen werden.

Mit dem Wachstum einher gehen auch die baulichen Erweiterungen. Das Technikum III am Standort Würzburg mit modernsten Labors und Technikumräumen wird im Sommer 2013 fertiggestellt sein und anschließend bezogen werden können. Mit seinen ausgezeichneten technischen Möglichkeiten und seiner außergewöhnlichen Architektur, entworfen von ZAHA HADID Architects, London, setzt der Laborneubau auch die äußeren Signale für neue Wege bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen in Produkte.

Auch in Bayreuth wird ab Sommer 2013 der geplante Neubau begonnen werden, ein großer Labor- und Bürobau für das Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL. Weitere Neubauten sind ab 2014 im Rahmen des Aufbaus der Projektgruppe IWKS für die Standorte Alzenau und Hanau vorgesehen, die internen Planungen dafür haben bereits angefangen.

Der Aufbau der Projektgruppe IWKS schritt 2012 unter der Geschäftsführung von Herrn Prof. Stauber zügig voran. Bis Ende 2012 konnten für die beiden Standorte Alzenau und Hanau mehr als 20 wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter eingestellt und erste Industrieprojekte bearbeitet werden.

Am 29. Juni 2012 konnte nach Genehmigung der Anschubfinanzierung durch das Bundesland Hessen plangemäß der zweite Projektgruppen-Standort im Industriepark Hanau-Wolfgang eröffnet werden – zunächst in angemieteten Räumlichkeiten der Fa. Umicore. An dem Festakt mit mehr als 200 Partnern und Gästen aus Industrie und von öffentlichen Institutionen nahmen u. a. der vergangenes Jahr noch amtierende Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, Herr Prof. Bullinger, der stellvertretende hessische Ministerpräsident Hahn und die hessische Wissenschaftsministerin Frau Kühne-Hörmann teil. Noch im Sommer 2012 hat das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie für den weiteren Ausbau in Alzenau eine Förderung für den Zeitraum 2014 bis 2018 zugesagt.

Darüber unterstützt das STMWIVT an der Hochschule Aschaffenburg den Aufbau eines Fraunhofer-Anwendungszentrums zum Thema »Recyclinggerechtes Design von Produkten« mit entsprechenden Fördermitteln. Dieses Anwendungszentrum wird eng mit der Projektgruppe IWKS am Standort Alzenau zusammenarbeiten, dort sollen die praktischen Arbeiten durchgeführt werden. Nach Abschluss des Kooperationsvertrags mit der Hochschule konnte bereits im November 2012 mit dem Aufbau des Anwendungszentrums begonnen werden. Die Stadt Alzenau hat in Aussicht gestellt, diese Aktivitäten mit der Finanzierung einer Professur an der Hochschule Aschaffenburg zu unterstützen.

Nach Gründung dieser zukunftsfähigen Einrichtung wurden im Verlauf des vergangenen Jahres wichtige Weichen gestellt: Zum 1. Oktober 2012 wurde Herrn Dr. Raether die alleinige Leitung übertragen und das Zentrum konsequent auf die Themen



Optimierung der Energie- und Ressourceneffizienz sowie der Qualitätssicherung bei Wärmebehandlungsprozessen neu ausgerichtet. Auf diesem Arbeitsgebiet konnte sich das Institut bereits in der Vergangenheit als zuverlässiger Innovationspartner für die Industrie etablieren.

Für den Ausbau des Zentrums HTL wurden vom Bayerischen STMWIVT weitere Ausbaumittel zugesagt, u. a. für die Errichtung eines Institutsgebäudes (s. o.). Herr Staatsminister Zeil hat dazu im August 2012 einen (ersten) Zuwendungsbescheid in Bayreuth übergeben. Eine Bestätigung des eingeschlagenen Weges ist die Bewilligung von weiteren umfangreichen Landesmitteln im Herbst 2012 für das Projekt »Effiziente Wärmeenergie-Nutzung bei industriellen Prozessen«. Zusätzlich wird voraussichtlich im Laufe des Jahres 2013 ein Fraunhofer-Anwendungszentrum an der Hochschule in Hof zur Verarbeitung von keramischen Fasern seine Arbeit aufnehmen.

Parallel zu den externen Aufbauaktivitäten wurde die Institutstrategie für die Jahre 2013 bis 2017 erarbeitet, die im Sommer 2013 im Rahmen eines Strategieaudits von externen Gutachtern evaluiert werden wird. Im Wesentlichen wird die Fokussierung auf die strategischen Themen Energie, Umwelt und Gesundheit fortgesetzt. Auch die Entwicklung der institutsinternen Zentren CeSMa (Center Smart Materials) und ZfAE (Zentrum für Angewandte Elektrochemie) verläuft wie geplant. Sehr erfreulich war im September die Übergabe eines Zuwendungsbescheides durch Herrn Staatsminister Zeil an das Center Smart Materials für die Entwicklung von dielektrischen Elastomergeneratoren (DEG) zur dezentralen Gewinnung von Energie aus regenerativen Quellen in Höhe von 8 Mio € (für 5 Jahre).

Im November 1952 hat das ISC, das ursprünglich 1926 in Berlin-Dahlem als Kaiser-Wilhelm-Institut für Silikatforschung gegründet wurde, in Würzburg als Max-Planck-Institut die Arbeit wieder aufgenommen. Dieses Ereignis jährte sich im November 2012 zum 60. Male, ein Anlass, sich intensiv mit den wissenschaftlichen Wurzeln des Instituts und den gesellschaftlichen und technischen Entwicklungen während

der beinahe 90-jährigen ISC-Geschichte auseinanderzusetzen. Als Ergebnis entstand eine spannende Institutshistorie, die seit Ende 2012 auch in gedruckter Form vorliegt (vgl. S. 18).

Auch 2012 wurde wieder ein Mitarbeiter des Fraunhofer ISC mit einem Preis ausgezeichnet: Herr Gerhard Domann, Leiter des Kompetenzbereichs Optik und Elektronik, erhielt im Rahmen des EU-Projektes 3PLAST eine Auszeichnung für den »Best publicly funded project demonstrator« der Organic Electronic Association.

Ich möchte es an dieser Stelle nicht versäumen, allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fraunhofer ISC, der assoziierten Projektgruppen sowie des Lehrstuhls »Chemische Technologie der Materialsynthese« meine Anerkennung und meinen Dank auszusprechen, ohne deren konstruktive Mitarbeit und exzellente Entwicklungsergebnisse die beschriebenen Erfolge nicht möglich gewesen wären. Für das uns entgegengebrachte Vertrauen danke ich der Fraunhofer-Gesellschaft, allen industriellen und institutionellen Projektpartnern, Kunden und Beratern, den Mitgliedern des Kuratoriums sowie dem BMBF. Mein besonderer Dank gilt dem Bayerischen STMWIVT für das in uns gesetzte Vertrauen, das sich auch 2012 in der großzügigen Unterstützung der Ausbauprojekte des Fraunhofer ISC manifestiert hat.

Würzburg, im März 2013

Prof. Dr. Gerhard Sextl

---

---

# INHALTSVERZEICHNIS

---

## PROFIL

2	Vorwort
6	Organisation
8	Das Kuratorium
10	In Zahlen
12	Im Profil
18	60 Jahre Silicatforschung in Würzburg
20	Materialbasis
23	Kernkompetenzen
24	Kompetenz- und Fachbereiche, Zentren
34	Projektgruppe IWKS
38	Rückblick

## GESCHÄFTSBEREICHE

44	Umwelt
52	Gesundheit
58	Energie – im Themenschwerpunkt

## THEMENSCHWERPUNKT »ENERGIE«

60	Mit Energie in die Energiewende
64	Das Zentrum für Angewandte Elektrochemie ZfAE
68	Konzeptstudien für neuartige Lithium-Ionen-Zellen
72	Alterungs- und Post-Mortem-Analytik
74	Elektroden für Hybrid-Energiespeicher
76	Energy Harvesting – Ein Konzept zur Nutzung regenerativer Energien
78	Ressourceneinsparung durch Prozessoptimierung in der Kraftwerkstechnik
80	Innovative Abschattung

## FRAUNHOFER-ZENTRUM FÜR HOCHTEMPERATUR-LEICHTBAU HTL

86	Das Fraunhofer-Zentrum HTL
90	Kriechbeständige Metall-Hybrid-Keramikbauteile für Höchsttemperaturdampfanwendungen in Kraftwerken
92	Low-Cost-Technologien zur Herstellung von Ceramic Matrix Composites
94	Energieeffizienz bei der Wärmebehandlung von Keramiken
98	Entwicklung einer europäischen SiC-Faserfertigung
99	Projektinformationen
104	Die Fraunhofer-Gesellschaft
106	Impressum

## ANHANG



Den Anhang des Jahresberichts 2012/13 finden Sie im Internet unter <http://www.isc.fraunhofer.de/publikationen.html>



**Institutsleiter**

Prof. Dr. Gerhard Sextl

☎ +49 931 4100-100

gerhard.sextl@isc.fraunhofer.de

**Stellv. Institutleiter | Strategisches Management**

Dr. Rolf Ostertag

☎ +49 931 4100-900

rolf.ostertag@isc.fraunhofer.de

**Fraunhofer ISC | Würzburg**

**ISC International**

Dr. Michael Popall | ☎ +49 931 4100-522

**GESCHÄFTSBEREICHE**

**Energie**

Dr. Victor Trapp | ☎ +49 931 4100-370

**Gesundheit**

Dr. Jörn Probst | ☎ +49 931 4100-249

**Umwelt**

Dr. Gerhard Schottner | ☎ +49 931 4100-627

**ZENTREN**

**Zentrum für Angewandte Elektrochemie ZfAE**

Dr. Victor Trapp | ☎ +49 931 4100-370

**Center Smart Materials CeSMA**

Dieter Sporn | ☎ +49 931 4100-400

**Zentrum für Angewandte Analytik ZAA**

Dr. Jürgen Meinhardt | ☎ +49 931 4100-202

**Fraunhofer ISC | Würzburg**

**KOMPETENZBEREICHE**

**Dental und Mikromedizin**

Dr. Herbert Wolter | ☎ +49 931 4100-510

**Glas und Mineralische Werkstoffe**

PD Dr. Martin Kilo | ☎ +49 931 4100-234

**Optik und Elektronik**

Dr. Gerhard Domann | ☎ +49 931 4100-551

Dr. Ruth Houbertz | ☎ +49 931 4100-520

**Werkstoffchemie**

**Hybride Schichten und Beschichtungstechnologie**

Dr. Klaus Rose | ☎ +49 931 4100-626

**Partikeltechnologie und Grenzflächen**

Dr. Uta Helbig | ☎ +49 931 4100-516

**Sol-Gel-Werkstoffe und -Produkte**

Walther Glaubitt | ☎ +49 931 4100-406

Emailadressen:

vorname.nachname@isc.fraunhofer.de | z. B. marie-luise.doerffel@isc.fraunhofer.de



### Verwaltungsleiter

Axel Kuhn

☎ +49 931 4100-102

axel.kuhn@isc.fraunhofer.de

### Geschäftsführer

Prof. Dr. Rudolf Stauber

☎ + 49 6023 32039-801

rudolf.stauber@isc.fraunhofer.de

### Leiter

PD Dr. Friedrich Raether

☎ +49 921 786931-60

friedrich.raether@isc.fraunhofer.de

#### Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS | Alzenau und Hanau

##### Geschäftsführer

Prof. Dr. Rudolf Stauber | ☎ +49 6023 32039-810

#### Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL | Bayreuth

##### Leiter

PD Dr. Friedrich Raether | ☎ +49 921 786931-60

#### Fraunhofer ISC | Würzburg

##### ADMINISTRATION

##### Verwaltungsleiter

Axel Kuhn | ☎ +49 931 4100-102

##### Marketing und Kommunikation

Marie-Luise Righi | ☎ +49 931 4100-150

##### Vertriebsmanagement

Marie-Luise Dörffel | ☎ +49 931 4100-106

##### New Business Development

Dr. Karl-Heinz Haas | ☎ +49 931 4100-500

##### Zentrale Dienste | Bau

Michael Martin | ☎ +49 931 4100-111

#### Fraunhofer ISC | Außenstelle Bronnbach

##### Leiter

Dr. Andreas Diegeler | ☎ +49 9342 9221-702

##### ZENTREN

##### Zentrum für Geräte- und Anlagenentwicklung CeDeD

Dr. Andreas Diegeler

##### Internationales Zentrum für Kulturgüterschutz und Konservierungsforschung IZKK

Sabrina Rota | ☎ +49 9342 9221-710

##### KOMPETENZBEREICH

##### Werkstoffchemie

##### Kulturgüterschutz

Dr. Andreas Diegeler (kommisarisch)

---

# Kuratorium 2012

**Dr. Martin Bastian**

SKZ Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, Würzburg

**Henry Rauter**

VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen

**Prof. Dr. Peter Behrens**

Universität Hannover

**Dr. Georg Ried**

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur,  
Verkehr und Technologie, München

**Dr. Hans Dolhaine**

Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf

**Prof. Dr. Martin Winter**

CeNTech GmbH, Münster

**Dipl.-Ing. Hans-Michael Güther**

SGL Brakes GmbH, Meitingen

**Dr. Detlef Wollweber**

Bayer Innovation GmbH, Düsseldorf

**Prof. Dr. Martin Jansen**

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung,  
Stuttgart

**Dr. Roland Langfeld**

Vorsitzender  
Schott AG, Mainz

**Dr. Egbert Lox**

Umicore NV/SA  
Olen, Belgien



*Poröse Glasflakes*

# IN ZAHLEN

Die Entwicklung des Fraunhofer ISC war in 2012 geprägt von einer kontinuierlichen Weiterentwicklung im Stammhaus, dem Ausbau des Fraunhofer-Zentrum HTL in Bayreuth sowie dem Aufbau der Projektgruppe IWKS an den Standorten Alzenau und Hanau. Vor dem Hintergrund dieser insgesamt ausgezeichneten Lage erzielte die ISC-Gruppe einen ausgeglichenen Haushalt und schloss das Jahr 2012 erfolgreich ab.

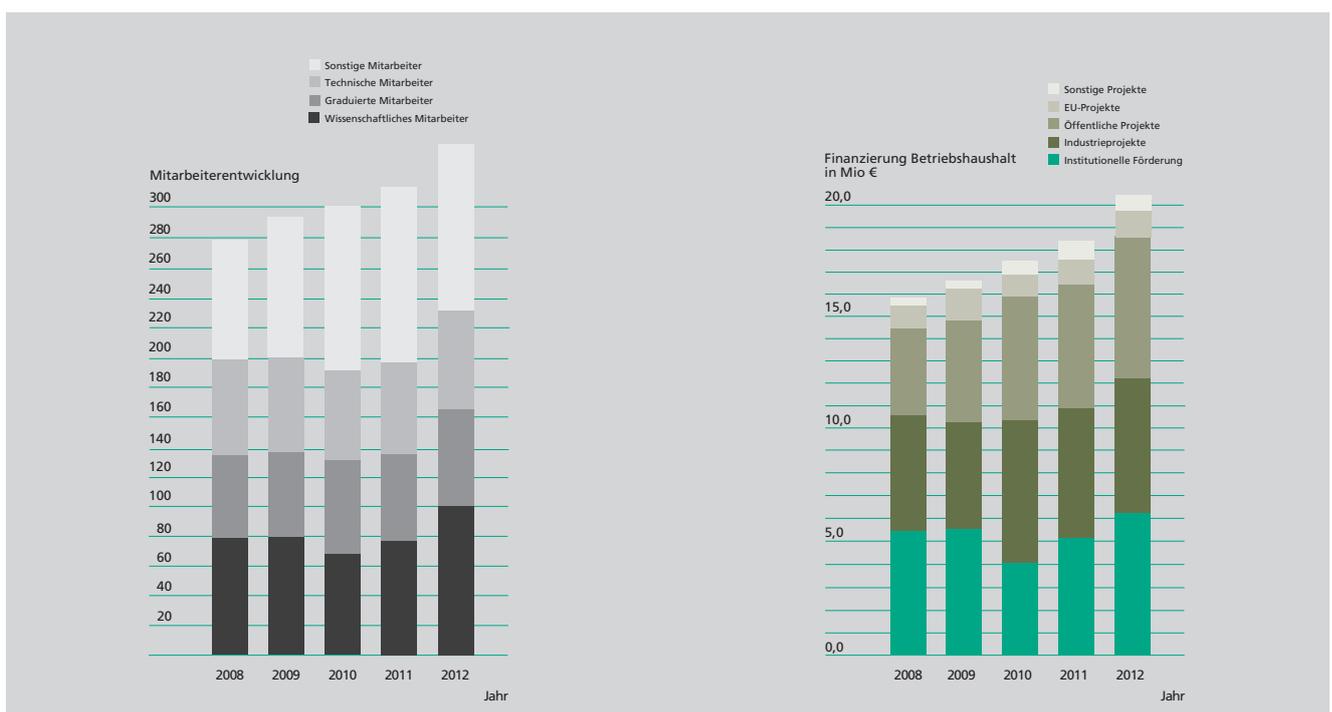
## Mitarbeiterentwicklung

Das moderate Wachstum im Stammhaus mitsamt Außenstellen sowie der Ausbau der Projektgruppen, insbesondere der Projektgruppe IWKS, erlauben der ISC-Gruppe ein im Rahmen der vorgesehenen Budgetplanungen überdurchschnittliches Personalwachstum.

Von den insgesamt 343 Mitarbeitern sind rund 57 % (197) Stammpersonal. Innerhalb dieses Stammpersonals sind 71 % in unbefristeten Stellen, der Anteil an unbefristet beschäftigten Wissenschaftlern liegt bei 43 %. Insgesamt verfügt das ISC über eine ausgeglichene Personalstruktur zwischen Wissenschaftlern, graduierten Mitarbeitern und Technikern. Darüber hinaus hat das Fraunhofer ISC zahlreichen Studenten die Möglichkeit zu Praktika, Diplomarbeiten sowie Dissertationen gegeben und damit einen wichtigen Beitrag zur materialwissenschaftlichen Hochschulausbildung geleistet.

## Betriebshaushalt

Die Situation im Fraunhofer ISC ist nach wie vor durch den Aufbau einer Reihe neuer Themen und Bereiche gekennzeichnet. In 2012 stieg der Betriebshaushalt um 10 % (1,9 Mio €)



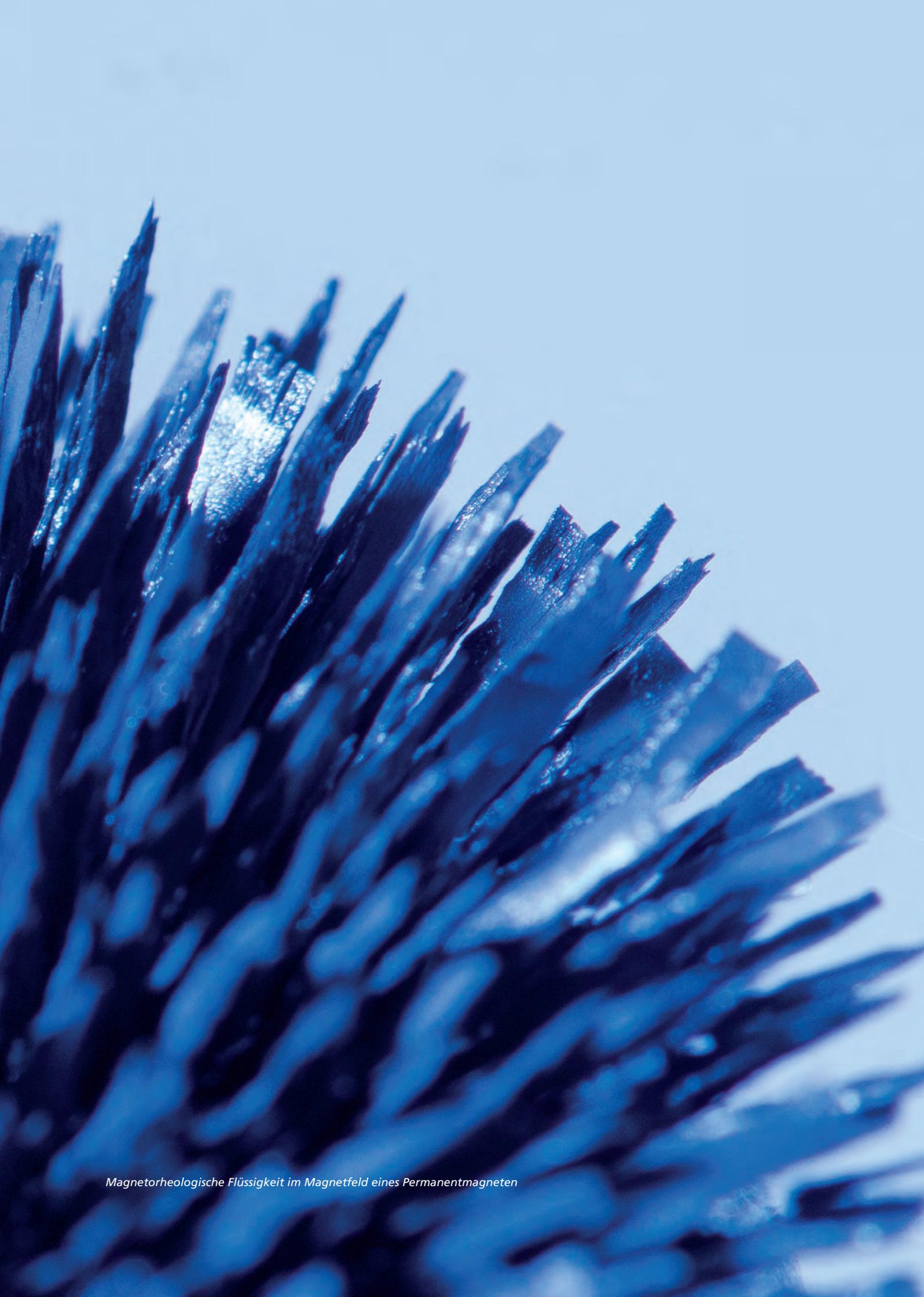
auf insgesamt 20,4 Mio €, maßgeblich bedingt durch den Aufbau des IWKS. Dabei entspricht die Entwicklung sowohl des Personalaufwands (12,7 Mio €) als auch des Sachaufwands (7,7 Mio €) dem gesteigerten Geschäftsvolumen.

Das Fraunhofer ISC finanziert sich zu 30 % / 6,2 Mio € aus der institutionellen Förderung durch die Fraunhofer-Gesellschaft. Der Anteil der Vertragsforschung liegt bei insgesamt 70 % / 14,2 Mio €. Dabei beträgt der Anteil der öffentlichen Erträge 6,3 Mio € und der EU-Projekterträge 1,2 Mio €. Die Erträge aus Industrie und Wirtschaft liegen bei 6,0 Mio €. Sonstige Erträge betragen 0,7 Mio €. Das Fraunhofer ISC schließt 2012 erfolgreich mit einem positiven Jahresergebnis in Höhe von 102 T€ ab. Im Geschäftsjahr 2013 erwartet das Institut ein starkes Wachstum durch die Projektgruppen. Dabei gilt es, die Balance im Finanzierungsmix durch ein entsprechendes Volumen an Wirtschaftserträgen zu wahren.

## Investitionshaushalt

Um sich im Wissenschaftswettbewerb behaupten zu können, sind neben hoch qualifizierten Mitarbeitern fortlaufende Investitionen in technische Geräte, Geschäftsausstattungen und Baumaßnahmen notwendig. Das Fraunhofer ISC investiert einen Betrag von mehreren Millionen Euro in einen Neubau inkl. Erstaussstattung am Standort Würzburg. Allein in 2012 wurden über 8 Mio € dafür ausgegeben. Die Finanzierung dieser Ausbauinvestition erfolgt durch den Bund, die EU und das Land Bayern. In 2012 wurden in die neue Projektgruppe IWKS und somit in neue Themenbereiche am Standort Alzenau 0,5 Mio € und am Standort Hanau 0,7 Mio € investiert. Am Standort Würzburg wurden neben der Erstaussstattung für den Neubau weitere Investitionsgelder für neue Technologien bzw. Ersatzinvestitionen in Höhe von 0,9 Mio € getätigt. Das Budget für diese Investitionen wurde zu 50 % durch Projekte finanziert und zu 50 % aus der Grundfinanzierung bestritten.





*Magnetorheologische Flüssigkeit im Magnetfeld eines Permanentmagneten*

# PROFIL

---

---

---

# IM PROFIL

---

---

## Werkstoffe für nachhaltig hergestellte Produkte

---

Bei der Entwicklung neuer Produkte und der Verbesserung bestehender Produkte zeichnet sich ein Paradigmenwechsel ab. Verbraucher, Hersteller und Entwickler folgen nicht mehr nur ökonomischen Zwängen, sondern berücksichtigen zunehmend auch das ökologische und soziale Umfeld. Ein weiterer Aspekt ist die Verknappung bestimmter Rohstoffe, die viele Branchen bereits spüren und die sich in den nächsten Jahren noch verstärken wird. Vor dem Hintergrund der Verpflichtung zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen gewinnt die Optimierung von energieintensiven Herstellprozessen zunehmend an Bedeutung. Dies erfordert intelligente Werkstoff- oder Technologielösungen.

Das Fraunhofer ISC ist hier ein zuverlässiger Partner für Hersteller und Entwickler. Seit vielen Jahrzehnten befasst sich das Institut mit neuen Materialien und effizienten Prozessen für eine hohe Wertschöpfung und Nachhaltigkeit in Produkten. Etablierte Werkstoffe sowie ihre Herstell- und Verarbeitungsverfahren werden im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Funktionalität und Kosteneffizienz weiterentwickelt bis hin zur produktionsgerechten Auslegung der Prozesstechnologien. Umweltfreundlichkeit und Nachhaltigkeit sind dabei ebenso wichtige Kriterien wie Recyclebarkeit oder intelligenter Ersatz, nach der Maxime »intelligenter Materialgebrauch, wenig Energieverbrauch«.

Über 300 Mitarbeiter forschen in enger Zusammenarbeit mit kleinen oder mittelständischen Unternehmen sowie der Großindustrie an den Lösungen für diese Herausforderungen. Damit sichert das Institut den Technologievorsprung seiner Partner und nicht zuletzt auch die damit verbundenen Arbeitsplätze.

Im Jahr 2012 wurden über 390 Projekte erfolgreich durchgeführt. Darüber hinaus konnten in mehr als 600 Analyseaufträgen Materialien optimiert, die Qualitätssicherung

unterstützt sowie Schadensfälle schnell und präzise bewertet und praxisgerechte Lösungsvorschläge erarbeitet werden.

---

## Weltweit vernetzt mit Industrie und Forschung

---

Das Fraunhofer ISC ist national wie international breit vernetzt und beteiligt sich aktiv auf unterschiedlichen Plattformen am Dialog mit Industrie und Wissenschaft.

Mit dem Bereich ISC International unter der Leitung von Dr. Michael Popall konnte eine deutliche Vertiefung der internationalen Kontakte erreicht werden. Insbesondere im asiatischen Raum haben sich die Verbindungen zu neuen Kooperationspartnern erfolgreich entwickelt. Auf europäischer Ebene unterstützt Dr. Johanna Leibner im Brüsseler Fraunhofer-Büro die Aktivitäten des Instituts. Mit diesen organisatorischen Maßnahmen, einer verstärkten Öffentlichkeitsarbeit und der intensiven Vernetzung auf operativer Ebene in den Forschungsprojekten wurde die internationale Präsenz des Instituts deutlich ausgebaut.

---

## Entwicklungstrends und Zukunftsvisionen

---

Das neue Technikumsgebäude des Fraunhofer ISC am Hauptsitz in Würzburg wird ein industrienahes Entwicklungsumfeld insbesondere für die Arbeitsgebiete Batterieentwicklung kontinuierliche und großflächige Beschichtungstechnologien und biomedizinische Werkstoffe bieten.

Technika, Reinräume und GMP-nahe Standards ermöglichen die Weiterentwicklung von Werkstoffen und Verfahren in diesen Bereichen aus einer Hand, bis hin zur Produktionsanpassung und Implementierung in die Herstellprozesse bei unseren Kunden. Modernste Laboreinrichtungen, baulich komplett entkoppelte Räumlichkeiten und neue Präparationsverfahren für die Elektronenmikroskopie schaffen für den Analytikbereich des Fraunhofer ISC hervorragende Voraussetzungen, noch anspruchsvollere Aufgaben aus der Material- wie auch der Schadensanalytik und Qualitätssicherung zu lösen.



*Technikum III, Detail der Fassade während der Bauzeit*

*© Katrin Heyer für Fraunhofer ISC*

# IM PROFIL

## Fraunhofer ISC – Standorte



1

Fraunhofer-Institut für  
Silicatiforschung ISC  
Neunerplatz 2  
97082 Würzburg

2

Fraunhofer-Institut für  
Silicatiforschung ISC  
Außenstelle Bronnbach  
Bronnbach 28  
97877 Wertheim-Bronnbach

3

Fraunhofer-Zentrum für  
Hochtemperatur-Leichtbau HTL  
Gottlieb-Keim-Str. 60  
95448 Bayreuth

4

Fraunhofer-Projektgruppe  
für Wertstoffkreisläufe und  
Ressourcenstrategie IWKS  
Brentanostraße 2  
63755 Alzenau

und im 5

Industriepark Hanau-Wolfgang  
63357 Hanau



Geschäftsbereich UMWELT – Photokatalytische Schichten im Test

## Geschäftsbereiche und Weiterentwicklung der Standorte

In den Geschäftsbereichen Energie, Umwelt und Gesundheit werden Projekte und Forschungen subsumiert, die u. a. Werkstoffe und Materialien für umweltfreundliche Produkte und Anwendungen, für effiziente, sichere Energienutzung und -bereitstellung sowie eine individualisierte, und dennoch bezahlbare Medizin zum Ziel haben.

Das Zentrum für Angewandte Elektrochemie im Würzburger Stammhaus hat sich nachhaltig etabliert. Das wachsende Interesse der Industrie zeigt den großen Forschungsbedarf im Bereich der stationären wie auch mobilen Energiespeicher im Hinblick auf die Energiewende. Das Fraunhofer ISC hat die Dringlichkeit für die technologische Weiterentwicklung frühzeitig erkannt und den Forschungsbereich Materialien für Energiespeicherung und elektrochemische Anwendungen auch unter Einsatz großer Eigenmittel vorangetrieben.

Eine ebenso große Herausforderung gerade für den Produktionsstandort Deutschland ist die Sicherstellung von Rohstoffen für Hochtechnologien angesichts des weltweit steigenden Bedarfs und daher unkalkulierbar steigender Preise und schwindender Vorräte an Ressourcen. Um die Industrie auf diesem Gebiet noch besser unterstützen zu können, hat das Fraunhofer ISC im Jahr 2011 in Alzenau die Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS gegründet. Im Jahr 2012 konnte diese neue Gruppe bereits um einen hessischen Standort im benachbarten Hanau erweitert werden. Dies belegt nicht nur die große Nachfrage aus der Industrie, sondern auch die breite und länderübergreifende Unterstützung aus der Politik. Dafür werden in enger Kooperation mit der Industrie Recyclingtechnologien, Substitutionsmöglichkeiten und Strategien zur Rohstoffversorgung entwickelt. In Zusammenarbeit mit der Hochschule Aschaffenburg wird außerdem derzeit das

Fraunhofer-Anwendungszentrum Ressourceneffizienz in Aschaffenburg und Alzenau aufgebaut.

Der Geschäftsbereich Gesundheit kann mit den GMP-nahen Einrichtungen und biomedizinischen Labors im Neubau Technikum III sein Portfolio in der Materialentwicklung stark erweitern. Die Einrichtung einer Fraunhofer-Attract-Gruppe zur Erforschung von 3D-Strukturen für das Tissue-Engineering und die enge Zusammenarbeit mit weiteren Fraunhofer-Instituten und universitären Zentren sind zusätzliche Bausteine für diese Weiterentwicklung.

Das Bayreuther Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL ist erfolgreich auf dem Weg zu einem eigenständigen Fraunhofer-Institut. Die Detailplanung für ein neues, eigenes Laborgebäude mit Büro- und Technikumsflächen startete im Jahr 2012, der Baubeginn war 2013, fertiggestellt sein wird das Gebäude 2015.

Somit betreibt das Fraunhofer ISC Materialforschung an nunmehr fünf Standorten:

Würzburg:

- Hauptsitz und Außenstelle Friedrichstraße

Bronnbach:

- Internationales Zentrum für Kulturgüterschutz und Konservierungsforschung IZKK
- Center of Device Development CeDeD

Bayreuth:

- Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL

Alzenau und Hanau-Wolfgang:

- Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS

---

---

# IM PROFIL

---

---

## 60 Jahre Silicatforschung in Würzburg

---

Das Institut für Silicatforschung ist ein sehr traditionsreiches Forschungsinstitut. Im Lauf seiner Geschichte hat es drei Staatsformen erlebt, und seine Forscher haben zu drei verschiedenen Forschungs-Gesellschaften mit jeweils eigenen Philosophien gehört. Gegründet wurde es im Jahr 1926 – damals als Kaiser-Wilhelm-Institut. Nach Ende des Zweiten Weltkriegs wurde es von der Max-Planck-Gesellschaft fortgeführt und dann 1971 in die Fraunhofer-Gesellschaft eingegliedert.

Aufgrund seiner Geschichte und Ausrichtung war und ist das Institut schon immer sehr stark an der direkten Anwendung seiner Forschungsergebnisse und an deren industrieller Umsetzung orientiert. Die Gründung des Kaiser-Wilhelm-Instituts wurde seinerzeit v. a. von der Keramik- und Glasindustrie betrieben, die in den wirtschaftlich schwierigen Zeiten der Weimarer Republik wissenschaftliche Unterstützung brauchten, um dem hohen internationalen Wettbewerbsdruck entsprechende Innovationen entgegensetzen zu können.

Das ursprünglich in Berlin-Dahlem angesiedelte Institut wurde in den 1940er Jahren kriegsbedingt in die Rhöner Mittelgebirgslandschaft nördlich von Würzburg verlagert, um Mitarbeiter, Gerät und Forschungsbetrieb vor den zunehmenden Luftangriffen zu schützen. Nach Kriegsende und dem von Politik und Industrie unterstützten Entschluss des Max-Planck-Präsidiums, das Institut unter dem Dach der neuen Forschungs-Gesellschaft weiter zu betreiben, wurde Würzburg als neuer Standort gewählt, nicht zuletzt aufgrund intensiver Bemühungen der Stadt und des Landes Bayern.

So konnten die Mitarbeiter am 14. November 1952 den historischen Backsteinbau am Neunerplatz – ein ehemaliges Offizierskasino von 1891 – als neues und eilends für den wissenschaftlichen Betrieb umgebautes Institutsgebäude offiziell beziehen. Bereits 1959 wurde der erste Erweiterungsbau mit einer neuen Glasschmelzhalle sowie zusätzlichen Büroflächen eröffnet. Das Institut war auf Wachstumskurs.

Mit der Emeritierung des damaligen Institutsleiters Professor Adolf Dietzel drohte dem Institut allerdings kurz das Aus, denn eine Kommission der Max-Planck-Gesellschaft kam zu dem Schluss, dass die wesentlichen Aufgaben des Instituts im Bereich der Grundlagenforschung abgeschlossen seien. Damit sei das Institut in der Max-Planck-Gesellschaft nicht mehr passend aufgehoben. Fürsprecher für einen Erhalt des Instituts, das zur damaligen Zeit eine Instanz der Glas- und Keramikforschung in Deutschland war, konnten sich jedoch durchsetzen und Verhandlungen aufnehmen mit der Fraunhofer-Gesellschaft, unter deren Dach die Silicatforschung weitergeführt wurde. Bis heute ist das Institut Teil der Fraunhofer-Gesellschaft.

Der Erfolg spricht für sich: 1986 kam der erste Technikumsbau dazu, eine hohe Halle mit industrienaher Geräteausstattung zur Herstellung und Verarbeitung von Sol-Gel-Materialien im Technikumsmaßstab. 1996 folgte der große Erweiterungsbau Technikum II, der die Büro- Labor- und Technikumsflächen des Fraunhofer ISC nahezu verdoppelte. 2006 ergänzte ein Polymersynthesetechnikum mit weiteren 400 Quadratmetern Fläche die industrienahere Forschung. Und 2013 wird das Technikum III am Standort Neunerplatz in Würzburg fertiggestellt sein, mit 2500 m<sup>2</sup> Quadratmetern Nutzfläche für Labor- und Technikumsräume. Um der gesellschaftlichen Verantwortung und des Vorbildcharakters der Fraunhofer-Gesellschaft im Bereich der Nachhaltigkeit gerecht zu werden, wurde beschlossen, das Technikum III als eines der ersten Laborgebäude einer Vorzertifizierung für nachhaltiges Bauen zu unterziehen.

60 Jahre Silicatforschung in Würzburg: Das Jubiläum war Anlass auch für die intensive Beschäftigung mit den Wurzeln des Instituts. Nachhaltiges Ergebnis der Recherchen war die Erstellung einer Institutshistorie, die im November 2012 als Buch erschienen ist unter dem Titel »Für Industrie und Wissenschaft – Weg eines Forschungsinstituts von der Weimarer Republik ins 21. Jahrhundert«. Das Buch ist auf Anfrage erhältlich.

## **FÜR INDUSTRIE UND WISSENSCHAFT**

Weg eines Forschungsinstitutes  
von der Weimarer Republik ins 21. Jahrhundert



*Das Buch über die Historie des Instituts für Silicatforschung, 155 S., Hardcover*

---

## Materialbasis

---

### Anorganische Sol-Gel-Werkstoffe

---

Das Fraunhofer ISC besitzt auf dem Gebiet der Synthese von anorganischen nicht-metallischen Materialien aus flüssigen Vorstufen profunde chemische Expertise und verfahrenstechnisch Know-how, um Werkstoffe für verschiedene Anwendungen »nach Maß« zu designen, Herstell- und Verarbeitungstechnologien zu entwickeln oder Materialeigenschaften an bestehende Verfahren anzupassen. So können über den Sol-Gel-Prozess mit einer Vielzahl von Steuerungsmöglichkeiten die physikalischen und chemischen Eigenschaften des späteren Werkstoffs sowie sein Verhalten bei Verarbeitung, Strukturierung und Härtung optimiert werden. Anorganische Sol-Gel-Werkstoffe bieten die Materialbasis für die Herstellung von Partikeln, Beschichtungen und Fasern. Für die Weiterverarbeitung der anorganischen Sole stehen Spinn-, Druck- und Beschichtungstechnologien zur Verfügung. Auf dem Markt etabliert sind beispielsweise nanoporöse Antireflexschichten für Solarmodule und zur wellenlängensensitiven Transmissionssteigerung für Fenster- und Fassadenglas («Wohlfühlglas»), sensitive Schichten für Feuchtesensoren, photokatalytische Beschichtungen oder auch hochbrechende Schichtsysteme für Farbfilter.

---

### ORMOCER®e

---

Neben der Materialklasse der rein anorganischen Sol-Gel-Werkstoffe werden auch anorganisch-organische Hybridpolymere – ORMOCER®e\* – am Fraunhofer ISC entwickelt. Diese eigene Stoffklasse wird mit Verfahren der chemischen

\* ORMOCER®

Eingetragene Marke der Fraunhofer-Gesellschaft für Angewandte Forschung e. V.

Nanotechnologie erzeugt und nach Bedarf funktionalisiert. Über die gezielte Auswahl monomerer oder polymerer Ausgangskomponenten können Werkstoffe und Oberflächen mit multifunktionellem Eigenschaftsprofil realisiert werden. Optische und elektrische Eigenschaften sowie die Widerstandsfähigkeit gegenüber Verschleiß und Korrosion lassen sich ebenso beeinflussen wie Hafteigenschaften, Benetzbarkeit und Oberflächenenergie, Barriereigenschaften oder Biokompatibilität. Das Know-how zur Synthese über den Sol-Gel-Prozess sowie die Funktionalisierung und Weiterverarbeitung der ORMOCER®e wird kontinuierlich weiterentwickelt und ist Grundlage für viele von industriellen Anwendungen.

---

### Technisches Spezialglas

---

Die Entwicklung und Charakterisierung von Spezialgläsern und Glaskeramiken gehört zu den traditionellen Kernkompetenzen des Fraunhofer ISC. Gezielt werden Eigenschaften wie Homogenität, Viskositätsverhalten, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Biegebruchfestigkeit oder chemische Beständigkeit gemäß Produkthanforderung eingestellt. Neben dem Know-how in Glaschemie und -herstellung kommen modernste In-situ-Messmethoden zur Charakterisierung glasbildender Schmelzen sowie eine europaweit einzigartige automatisierte Glas-Screening-Anlage zum Einsatz. Sie ermöglicht das High-Throughput-Screening von Gläsern mit definierten Gemengevariationen zur schnellen Entwicklung neuer Glaszusammensetzungen. Technische und optische Spezialgläser mit angepasstem Eigenschaftsprofil werden in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt, z. B. Messtechnik, Mikroskopie, Elektronik, Medizintechnik, Automobilindustrie oder Bauindustrie.



Spezialgläser

---

### Intelligente Werkstoffe

---

Adaptive Materialien und Werkstoffe, deren Eigenschaften sich beispielsweise elektrisch oder magnetisch schalten lassen, werden als »Intelligente Materialien« oder »Smart Materials« bezeichnet. Mit ihrer Hilfe lassen sich nicht nur komplexe mechanische oder mechatronische Systeme vereinfachen, sondern gleichzeitig auch neue zusätzliche Funktionen implementieren.

Das Center Smart Materials verfügt über langjährige Erfahrung und profundes Know-how in der Entwicklung und Auslegung von Komponenten wie Dämpfern, Aktoren und Sensoren, die auf der Basis von magnetorheologischen und elektrorheologischen Flüssigkeiten (MRF und ERF) und magnetisch oder elektrische ansteuerbaren Elastomeren (MRE und DEA) beruhen. Schnelligkeit und Reversibilität, mit der diese Materialien nach Anlegen eines elektrischen oder magnetischen Feldes ihre Viskosität oder Elastizität ändern können, machen sie ideal zur adaptiven Schwingungs- oder Aufpralldämpfung oder für haptische Bedienelemente.

Darüber hinaus wird an Werkstoffen gearbeitet, mit denen elektrische Signale in mechanische Bewegung umgesetzt werden und/oder umgekehrt Bewegung in elektrische Signale. Dazu zählen Piezokeramiken, elektroaktive Polymere (EAP) und Carbon-Nanotube-Komposite (CNT). Sie eignen sich als aktorische und sensorische Komponenten, beispielsweise als Ultraschallwandler, zur Online-Strukturüberwachung oder für die Energiewandlung (Energy Harvesting). Auf letzterem Gebiet werden die dielektrischen Elastomere künftig besondere Bedeutung gewinnen. Mithilfe von dielektrischen Elastomer-Generatoren (DEG) soll mechanische Energie aus Wasser und Wind in elektrische Energie umgewandelt werden, das erschließt zusätzliche Einsatzgebiete wie kleinere Flüsse oder auch Schwachwindgebiete, die nicht für den Betrieb herkömmlicher Turbinen geeignet sind. Je nach Anwendungsbereich und Anforderungsprofil werden die geeigneten Materialien ausgewählt und gegebenenfalls kombiniert.

Neben dem Energy Harvesting sind Smart Materials für die Robotik besonders interessant. Hierfür stehen Entwicklungen und Umsetzungen für intelligente Schalter und Sensoren für die Kollisionserkennung, adaptive Dämpfer und neuartige Aktorik für die Greifer sowie Human Machine Interfaces.

---

### Hochtemperatur-Werkstoffe und -Prozesstechnik

---

Als leichter, besonders temperaturbeständiger und hochbelastbarer Ersatz für Metalle in extremen Einsatzbereichen werden keramische Faserverbundwerkstoffe eingesetzt, kurz CMC (Ceramic Matrix Composites). Zusammen mit Partnern aus der Industrie entwickelt das Fraunhofer-Zentrum HTL Herstellverfahren für hochtemperaturstabile nichtoxidische sowie chlorfreie oxidische Fasern von der Precursorsynthese bis zum Verspinnen im Pilotmaßstab. Neben den keramischen Hochleistungsfasern selbst werden auch Matrixmaterialien für CMC und Komponenten daraus entwickelt. Derzeit im Vordergrund stehen thermoschockbeständige Leichtbauteile, die die Energieeffizienz von Wärmebehandlungsprozessen verbessern.

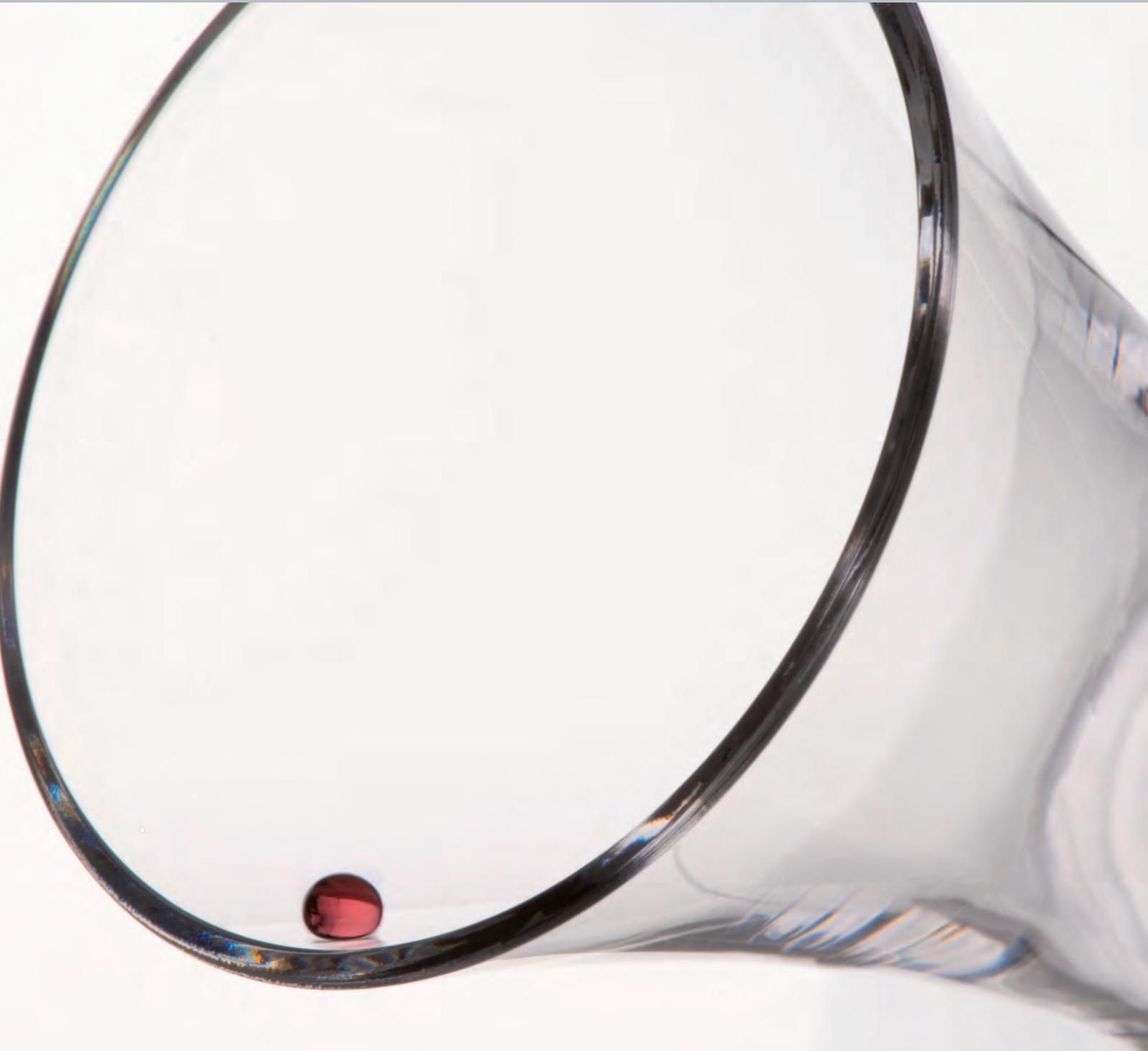
Die Produktion von Hochleistungskeramiken – mit oder ohne Faserverstärkung – in hoher Qualität mit gleichzeitig möglichst geringem Energieverbrauch benötigt optimale Verfahrensparameter. Mit dem Ziel einer inhärent sicheren und energieeffizienten Herstellung untersucht und modelliert das Zentrum HTL die zentralen Verfahrensschritte wie Formgebung, Entbindung und Sinterung. Zur berührungsfreien In-situ-Untersuchung werden die am Fraunhofer ISC entwickelten thermo-optischen Messmethoden (TOM) eingesetzt, mit denen sogar empfindliche Grünkörper untersucht werden können. So lässt sich der Ablauf der Keramikherstellung für beliebige Temperaturzyklen und unter verschiedenen Atmosphärenbedingungen präzise verfolgen und vorhersagen. Die Kombination von Modellierung und In-situ-Messung ermöglicht die Optimierung der Eigenschaften keramischer Materialien sowie der Prozessparameter für niedrigen Energieverbrauch.

---

---

# IM PROFIL

---



*Drop-Protect für Weidekanter, in Zusammenarbeit mit der Zwiesel Kristallglas AG*

---

# Kernkompetenzen

Arbeitsschwerpunkt des Fraunhofer ISC ist die anwendungsbezogene Entwicklung nicht-metallischer Materialien und Werkstoffe – von der Vorstufe bis zum Funktionsmuster.

- *Chemische Nanotechnologie*
- *Prozesstechnik und Charakterisierung*
- *Glaschemie und -technologie*

---

## Mit den spezifischen Kompetenzen in den Bereichen

---

- Nanochemie, Sol-Gel-Werkstoffe
- Spezialglasentwicklung
- Smart Materials
- Beschichtungstechnologien und -werkstoffe
- Energiespeicherung, mobile Energieversorgung
- Mikro- und Polymerelektronik, Optik
- Diagnostik, regenerative Medizin
- Dentalwerkstoffe, Mikromedizin
- Funktionsfüllstoffe, Partikeltechnologie
- Umweltmonitoring und Konservierungsforschung
- Geräte- und Anlagenentwicklung
- Energieeffiziente Wärmebehandlung, Hochtemperatur-Leichtbau, Hochtemperatur-Werkstoffe, Polymerkeramik
- Ressourcenstrategien, Recyclingkonzepte, recycling-gerechtes Design, Werkstoffsubstitution

---

---

# KOMPETENZBEREICHE

---

## DENTAL UND MIKROMEDIZIN

Der Kompetenzbereich entwickelt (bio-/aktiv) funktionalisierte Materialien für die Zahnerhaltung (Restauration, Prophylaxe, Regeneration) und den Zahnersatz sowie für den Einsatz als Knochenzement und in der Mikromedizin (2D/3D-strukturierte/geformte Werkstoffe). Zu den Kernkompetenzen gehören die Entwicklung und Synthese von multifunktionalen Precursoren bis hin zu anwendungsadaptierten Werkstoffen wie Harzsystemen ohne dentale Monomere, (Nanohybrid-)Komposite, Glasionomerezemente und darauf abgestimmte (self oder total etch) Adhäsive als ausgezeichnete Basis für direkte und indirekte Restaurationen, wie Füllungen, Kronen etc.. Begleitet werden die Entwicklungen durch umfassende sowie spezielle applikationsbezogene chemisch/physikalische Charakterisierungen. Der Kompetenzbereich verfügt über eine Vielzahl von Verfahren zur Strukturierung sowie zur Füllstoffsynthese und zur Kompositherstellung.

### Kontakt

Dr. Herbert Wolter | ☎ +49 931 4100-510 | [herbert.wolter@isc.fraunhofer.de](mailto:herbert.wolter@isc.fraunhofer.de)



## OPTIK UND ELEKTRONIK

Der Kompetenzbereich entwickelt Technologien (Werkstoffe, Prozesse, Charakterisierung) für Anwendungen in Optik und Elektronik. Zu den Kernkompetenzen zählen Entwicklung und Adaption von produktionsgerechten Beschichtungs-, Formgebungs- sowie zwei- und drei-dimensionaler Strukturierungsverfahren insbesondere für Hybridpolymer, Gläser und Keramiken. Ein Spezialgebiet ist die Entwicklung direkt strukturierbarer Hybridpolymere für die optische und elektronische Aufbau- und Verbindungstechnik sowie für mikro-medizinische Anwendungen.

### Kontakt

Dr. Gerhard Domann | ☎ +49 931 4100-551 | [gerhard.domann@isc.fraunhofer.de](mailto:gerhard.domann@isc.fraunhofer.de)

Dr. Ruth Houbertz | ☎ 49 931 4100-520 | [ruth.houbertz@isc.fraunhofer.de](mailto:ruth.houbertz@isc.fraunhofer.de)



## GLAS UND MINERALISCHE WERKSTOFFE

Von der modellgestützten Entwicklung neuer Gläser und anorganisch-mineralischer Materialien über die Verfahrens- und Prozesstechnik bis hin zur Herstellung prototypischer Bauteile werden alle wesentlichen Schritte der Materialentwicklung abgedeckt. Schwerpunktmäßig werden Spezialgläser und Glaskeramiken sowie Materialien für den Baubereich in Form von Bulkmaterialien, Fasern und Schichten entwickelt. Im Bereich der Spezialglasherstellung kommt eine weltweit einmalige automatische Glas-Screening-Anlage zum Einsatz. Bei Bedarf können Gläser und Halbzeuge in Mengen bis maximal 100 kg im Jahr hergestellt werden. Bei den mineralischen Werkstoffen bilden Werkstoffkreisläufe und Sekundärrohstoffe einen besonderen Schwerpunkt der aktuellen Arbeiten in Kooperation mit der Projektgruppe IWKS. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Funktionalisierung von traditionellen Baumaterialien.



### Kontakt

PD Dr. Martin Kilo | ☎ +49 931 4100-234 | [martin.kilo@isc.fraunhofer.de](mailto:martin.kilo@isc.fraunhofer.de)

---

---

# FACHBEREICHE

---

## WERKSTOFFCHEMIE

Der Kompetenzbereich Werkstoffchemie führt das Know-how aus den Fachbereichen Sol-Gel-Chemie, Schichtwerkstoffe und Partikeltechnologie zusammen. Damit stehen vielfältige Synthesemethoden zur Verfügung für die Entwicklung und Optimierung von Werkstoffen und Werkstoffkomponenten. Umfassende Lösungen werden erarbeitet für spezifische Anwendungen in Technik, Gesundheit, Energie, Bau und Umwelt sowie im Kulturgüterschutz.

## SOL-GEL-WERKSTOFFE UND -PRODUKTE

Ausgehend von der klassischen Sol-Gel-Chemie werden in diesem Fachbereich Vorstufen für nichtmetallische, anorganische Werkstoffe synthetisiert. Sie bilden die chemisch-synthetische Grundlage für anorganische Beschichtungslösungen, Faserspinnmassen sowie mesoporöse Materialien, die bei der Entwicklung von multifunktionalen Werkstoffen z. B. für Baustoffe, für Architekturverglasung oder für Produkte in der regenerativen Medizin, zum Einsatz kommen. Produkte für eine bezahlbare Gesundheit in den Märkten von übermorgen sind ebenso im Fokus wie technische Detaillösungen für einen effizienten Einsatz von Solaranlagen in staubbelasteten Wüstengebieten.

### Kontakt

Dipl.-Ing. Walther Glaubitt | ☎ +49 931 4100-406 | [walther.glaubitt@isc.fraunhofer.de](mailto:walther.glaubitt@isc.fraunhofer.de)



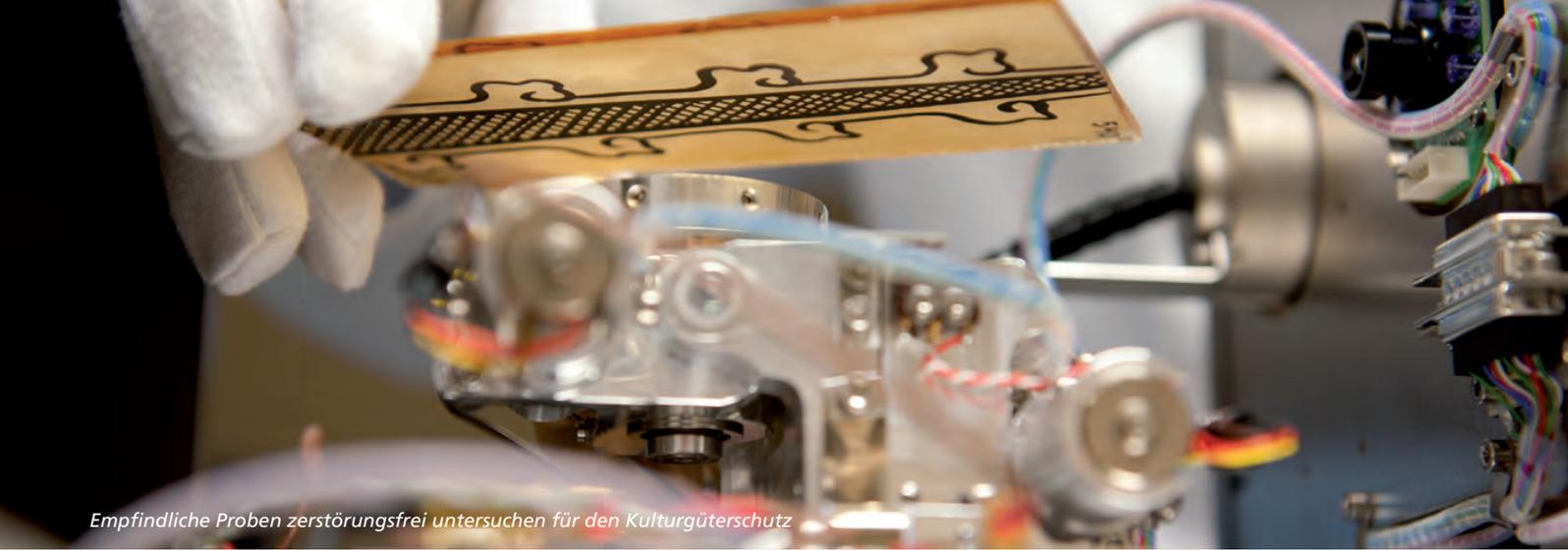
## HYBRIDE SCHICHTEN UND BESCHICHTUNGSTECHNOLOGIE

Mit Verfahren der chemischen Nanotechnologie werden multifunktionelle hybridpolymere Schichtwerkstoffe synthetisiert. Dabei kommen substrat-, werkstoff- und bauteilspezifische produktionsangepasste Verarbeitungs- und Schichthärtungsverfahren zum Einsatz. Das Eigenschafts- und Anwendungsspektrum umfasst Schutzwirkungen, einstellbare Permeabilität und Migrationsbarrieren, katalytische Wirkung und spezielle chemische Sensitivität sowie variable optische Eigenschaften und schaltbare, aktive Funktionen.

### Kontakt

Dr. Klaus Rose | ☎ +49 931 4100-626 | [klaus.rose@isc.fraunhofer.de](mailto:klaus.rose@isc.fraunhofer.de)





*Empfindliche Proben zerstörungsfrei untersuchen für den Kulturgüterschutz*

## PARTIKELTECHNOLOGIE UND GRENZFLÄCHEN



Durch die wachsende Funktionalität und Komplexität von Werkstoffen und Bauteilen gewinnen Grenzflächenphänomene immer größere Bedeutung. Überall dort, wo große Oberflächen im Spiel sind, z. B. bei Partikelsystemen für die Diagnostik oder in Verbundwerkstoffen, wird die Chemie an Grenzflächen qualitätsbestimmend oder sogar eigenschaftsdominierend. Ausgehend von langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet der nass-chemischen Synthese multifunktionaler Partikel für Dentalanwendungen, Oberflächenfunktionalisierung und Kompositherstellung wurde die Expertise in Richtung medizinische Diagnostik/Theranostik, Wirkstoffverkapselung, gezielte Freisetzung und Selbstheilung erweitert.

### Kontakt

Dr. Uta Helbig | ☎ +49 931 4100-516 | [uta.helbig@isc.fraunhofer.de](mailto:uta.helbig@isc.fraunhofer.de)

## KULTURGÜTERSCHUTZ



Vor dem langjährigen Erfahrungshintergrund im Bereich Glas- und Metallkorrosion befasst sich diese Arbeitsgruppe mit den Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf gefährdete Kulturgüter, insbesondere aus Glas, Metall oder Keramik. Die Messung von Umwelteinwirkungen mittels speziell entwickelter Glas- und Lichtdosimeter erlaubt es, Kunst- und Kulturgüter vorbeugend besser zu schützen. Zum Dienstleistungsangebot gehört darüber hinaus die Entwicklung neuer Konservierungsmaterialien und -methoden zum Schutz historischer Kultur- und Industriedenkmäler. Beispielsweise wurde gemeinsam mit dem Bereich Sol-Gel-Werkstoffe ein spezieller Glas-in-Glas-Festiger entwickelt, der die schonende, langsame Ausheilung von Mikrorissen in korrosionsgeschädigten Kirchenfenstern ermöglicht.

### Kontakt

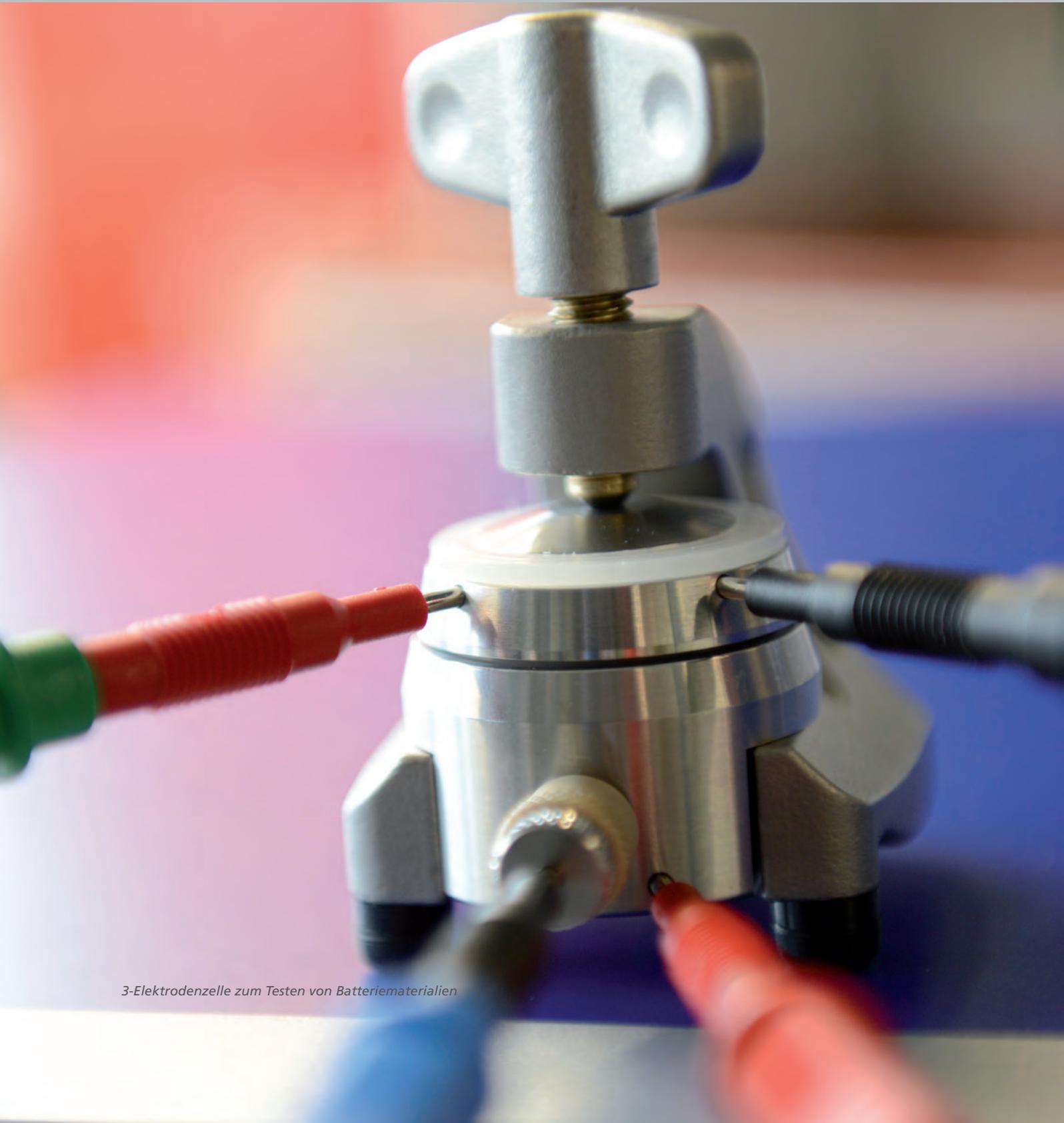
Katrin Wittstadt | ☎ +49 9342 9221-704 | [katrin.wittstadt@isc.fraunhofer.de](mailto:katrin.wittstadt@isc.fraunhofer.de)

---

---

# ZENTREN

---



*3-Elektrodenzelle zum Testen von Batteriematerialien*

---

# ZENTRUM FÜR ANGEWANDTE ELEKTROCHEMIE ZfAE

---

---

## Batterieentwicklung im Fokus

---

Das Zentrum für Angewandte Elektrochemie ZfAE ist Ansprechpartner für die Entwicklung und Optimierung von Materialien und Verfahren zur effizienten Speicherung und Nutzung von elektrischer Energie für mobile und stationäre Anwendungen.

Gegründet wurde das ZfAE im Oktober 2011 als Teil des »Bayerischen Forschungs- und Entwicklungszentrums Elektromobilität«, das der Freistaat Bayern in seinem Programm »Aufbruch Bayern« an den Standorten Würzburg und Garching fördert. Beide Zentren verstehen sich als Bindeglied zwischen universitärer Grundlagenforschung und industrieller Anwendung. Die Zielsetzung des ZfAE in Würzburg liegt in der Schaffung der Voraussetzungen für eine breite Nutzung von Elektromobilität. In enger Zusammenarbeit mit der Industrie untersucht und entwickelt das ZfAE daher zukunftsorientierte Elektrodenmaterialien, Elektrolyte und andere Zellkomponenten sowie Verfahren zu deren Herstellung und Verarbeitung bis zum Technikumsmaßstab.

---

## Entwicklungsschwerpunkte

---

- Entwicklung von Materialien und Komponenten für elektrochemische Energiespeicher – Anoden-/Kathodenmaterialien, Elektrolyte
- Elektrochrome Schichten
- Batterien
- Supercaps (Doppelschichtkondensatoren)
- Brennstoffzellen
- Verfahrensentwicklung
- Recycling von Batterien und elektronischen Bauteilen

---

## Komponentenabstimmung

---

Besonders wichtig ist die optimale Abstimmung der einzelnen Zellkomponenten wie Elektroden, Elektrolyt und Separator aufeinander. Hierzu werden auch Separatoren optimiert und umweltfreundliche Bindersysteme entwickelt. Dabei kommen sowohl eigene Entwicklungen als auch kommerzielle Produkte, die nach Bedarf modifiziert werden, zum Einsatz. Moderne Geräte und Techniken gestatten eine umfassende Analyse der in den Zellkomponenten auftretenden Reaktionsvorgänge in situ und post mortem.

---

## Materialcharakterisierung und Tests

---

Unterstützt durch eine nach DIN EN ISO/IEC 17025-2005 akkreditierte Analytik werden Materialien und Zellkomponenten getestet.

## Kontakt

Dr. Victor Trapp

☎ +49 931 4100-370

victor.trapp@isc.fraunhofer.de



# ZENTREN



## ZENTRUM FÜR GERÄTE- UND ANLAGENENTWICKLUNG CeDeD

### Entwicklung und Dienstleistung

Im Fokus des Centers of Device Development CeDeD steht die Entwicklung wissenschaftlicher Sonderanlagen, die sowohl bei der Charakterisierung neuer Materialien als auch bei der Qualitätskontrolle im Produktionsprozess eingesetzt werden.

Das Zentrum verfügt über das gesamte Kompetenzspektrum für die wissenschaftliche Ausarbeitung, die Konstruktion und das Design bis hin zum Aufbau der Forschungsanlagen. Angefangen bei der Entwurfserstellung und Konzeptionierung über die 3D-Konstruktion bis hin zur computergesteuerten Bauteilfertigung in der angeschlossenen feinmechanischen Werkstatt wird die gesamte Entwicklungslinie der Sonderanlagen abgebildet. CeDeD ist Ansprechpartner für interne und externe wissenschaftliche Arbeitsgruppen wie auch direkter Partner der Industrie bei der anlagentechnischen Umsetzung von Forschungsergebnissen. In enger Zusammenarbeit mit den Kompetenzbereichen am Fraunhofer ISC übernimmt CeDeD die Entwicklung von Prototypen, Demonstratoren und Pilotanlagen für die Herstellung und Verarbeitung von neu entwickelten Werkstoffen wie auch von Forschungsgeräten für die Prozesskontrolle am Ende der Wertschöpfungskette.

### Partner für Industrie und Forschung

Besondere Kompetenz hat das CeDeD bei der Entwicklung thermo-optischer Messsysteme, kurz TOM, die zur In-situ-Charakterisierung von Materialien während einer Wärmebehandlung eingesetzt werden. Die Messungen können im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis über 2000 °C erfolgen.

Aktuelle Fragestellungen kommen dabei aus der Spezialglas- und Hochleistungskeramikindustrie sowie aus der Weiterentwicklung von Feuerfestmaterialien. Dabei werden die neu entwickelten Verfahren mithilfe der Vakuumtechnik, Lasertechnologie und Robotik zu industriell nutzbaren Systemen ausgebaut. Thermo-optische Messverfahren sind jedoch auch für andere Werkstoffgruppen interessant, die eine Wärmebehandlung durchlaufen, beispielsweise für das gesamte Spektrum der Pulvermetallurgie und Spritzgusstechnik.

Durch die Zertifizierung nach ISO 9001:2008 gewährleistet CeDeD die vollständige Abbildung der Prozesskette mit einem jährlich geprüften Qualitätsmanagement und steht als verlässlicher Partner für die Entwicklung neuer Gerätetechnologien zur Verfügung.



### Kontakt

Fraunhofer ISC  
Außenstelle Bronnbach  
Bronnbach 28  
97877 Wertheim

Dr. Andreas Diegeler  
☎ +49 9342 9221-702  
andreas.diegeler@isc.fraunhofer.de



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



Kristallstrukturbestimmung im Röntgendiffraktometer

## ZENTRUM FÜR ANGEWANDTE ANALYTIK ZAA

Präzise Materialanalysen sind die Grundlage von Werkstoff- und Verfahrensentwicklungen und entscheidend bei der Schadensanalytik. Schadensfälle in der Produktion oder »im Feld« sind häufig auf Materialfehler oder auf den Einsatz von Materialien unter zuvor nicht berücksichtigten Bedingungen zurückzuführen. Das Zentrum für angewandte Analytik ZAA ist für interne und externe Kunden der Ansprechpartner für die Analyse des Aufbaus, der Eigenschaften und der Korrelation zwischen Gefügestruktur und Eigenschaften von Materialien. Das ZAA bietet eine Kombination aus modernster Materialanalytik und anwendungsnaher wissenschaftlicher Beratung. Aus dem Verständnis der analytischen Ergebnisse werden gemeinsam geeignete Lösungsansätze entwickelt.

Die Schwerpunkte liegen in der chemischen Analytik für Nichtmetalle, der Nanoanalytik, der Schadensanalyse, der Charakterisierung von Gefüge- und Schichteigenschaften, in Produktprüfungen sowie in der Grenz- und Oberflächenanalytik. Neben chemischen Routineanalysen z. B. mit der Röntgenfluoreszenzmethode werden Resistenzprüfungen an verschiedenen Werkstoffen durchgeführt. So können mit einem Atomemissionsspektrometer mit Plasmaanregung (ICP-AES) oder der Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) selbst wenige Millionstel Gramm eines gelösten Materials analysiert werden. Die Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) detektiert Oberflächenchemie und Bindungszustände. Mit höchstauflösender Rasterelektronenmikroskopie lassen sich Mikrostruktureigenschaften wie Oberflächentopographie und Oberflächeneigenschaften der Proben untersuchen. Ein Scanning-Transmissionselektronenmikroskop (S/TEM) dient zur Analyse des Materialgefüges bis in den Nanometerbereich.

Die umfangreiche Ausstattung für artefaktfreie Probenpräparation ermöglicht die elektronenmikroskopische Analyse auch schwierigster Proben. So stehen Ionenstrahl-Cross-Section-Polisher zur Verfügung, mit denen sich auch poröse Proben für das Rasterelektronenmikroskop präparieren lassen. Die technisch höchst anspruchsvolle Herstellung von hauchdünnen Probenlamellen für das Transmissionselektronenmikroskop erfolgt in einer Focused-Ion-Beam-Anlage. Neu hinzugekommen ist eine Ion-Slicer-Anlage, ausgestattet mit Stickstoffkühlung. Das in dieser Kombination in Europa einzigartige Gerät macht die Präparation großflächiger Probenlamellen von Materialien möglich, deren Gefügeeigenschaften sensitiv auf Temperaturänderungen während der Präparation reagieren, speziell aus dem Glas- und Baustoffbereich.

Insgesamt stehen am Fraunhofer ISC über 50 verschiedene Analyseverfahren zur Verfügung, die eine korrelative Analytik erlauben. Darüber hinaus verfügt das Zentrum für angewandte Analytik über ein Netzwerk aus analytischen Dienstleistern innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft, um ggf. weitere Spezialverfahren anzubieten.

Das Zentrum für angewandte Analytik ist akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025 sowie RAL- bzw. EUCEB-Prüflabor für Mineralwolle.

### Kontakt

Dr. Jürgen Meinhardt

☎ +49 931 4100-202

[juergen.meinhardt@isc.fraunhofer.de](mailto:juergen.meinhardt@isc.fraunhofer.de)





MRE in unterschiedlicher Geometrie

## CENTER SMART MATERIALS CeSMa

Das Center Smart Materials entwickelt kundenspezifische Werkstoffe und Komponenten, die auf der Nutzung elektrisch und magnetisch schaltbarer Materialeigenschaften beruhen. Dabei geht es im Wesentlichen immer darum, eine schnelle Wandlung mechanischer in elektrische Energie für einen Sensor oder umgekehrt für einen Aktor technisch auszunutzen. Da sich die zugrundeliegenden physikalischen Effekte im Bereich weniger Millisekunden reversibel schalten und stufenlos regeln lassen, sind neuartige Lösungen möglich, die konventionelle mechanische Lösungen vereinfachen, neue zusätzliche Funktionen zugänglich machen und schließlich auch Masse einsparen. CeSMa fokussiert sich auf die rasche Umsetzung von »Smart Materials« in Komponenten wie Aktoren, Sensoren, Dämpfern, Kupplungen, »Energy Harvestern« oder auch im »Smart Windows«, die sich auf Knopfdruck einfärben lassen und so eine Steuerung des Lichteinfalls erlauben. CeSMa ermöglicht seinen Kunden so den Zugang zu neuartigen Produkten und Technologien. Seit seiner Einrichtung im Mai 2009 ist CeSMa auf einem Wachstumskurs, der sich nach den vorliegenden Zahlen und Planungen auch 2013 fortsetzen wird.

### Materialien – Funktionen – Komponenten

»Smart Materials«, auch »adaptive Materialien« genannt, bezeichnen eine stofflich sehr uneinheitliche Werkstofffamilie: Sie umfasst polykristalline Festkörper wie Piezokeramiken, elektrisch oder magnetisch schaltbare Flüssigkeiten (ERF bzw. MRF) sowie dielektrische Elastomere, die sich entweder als Aktor oder Sensor einsetzen lassen (DEA bzw. DES) oder, wenn sie mit magnetisierbaren Partikeln gefüllt werden, auch ihre Steifigkeit und/oder ihre Form reversibel im Magnetfeld ändern können (MRE). Eine weitere Stoffklasse mit guten Schalteigenschaften sind Metallo-Polyelektrolyte (MEPE),

die ein breites Farbspektrum für technische Anwendungen verfügbar machen. Sie werden zunächst für den Einsatz in »Smart Windows« qualifiziert, weitere Anwendungen sind bereits in Planung.

Die Strategie der Materialauswahl und -optimierung beginnt mit der Analyse des jeweiligen Anwendungsfalls, für den die erforderlichen Kräfte, die Wege, die Dynamik und der Temperaturbereich spezifiziert werden. Daraus lassen sich die werkstofflichen Optimierungsschritte ableiten. Dann erfolgt der Entwurf für einen Labordemonstrator, in dem die ausgewählten Materialien eingebaut und geprüft werden. Je nach Bedarf können die Untersuchungen auch zyklische Belastungs- und Klimatests (nach DIN oder EN) umfassen.

Folgende Werkstoffe und Komponenten werden bei CeSMa eingesetzt und gemeinsam mit den Partnern weiterentwickelt:

- Dielektrische Elastomer-Aktoren DEA
- Dielektrische Elastomer-Sensoren DES
- Dielektrische Elastomer-Generatoren DEG
- Hochtemperaturstabile magneto-rheologische Flüssigkeiten MRF
- Neuartige parametrische piezoelektrische Lautsprecher
- Hochtemperatur-Ultraschall-Wandler
- Piezoelektrische Schalter
- Schaltbare Metallo-Polyelektrolyte MEPE

### Kontakt

Dieter Sporn

☎ +49 931 4100-400

dieter.sporn@isc.fraunhofer.de

www.cesma.de





Kirchenfenster mit teilweise zerstörter Glasmalerei

# INTERNATIONALES ZENTRUM FÜR KULTUR- GÜTERSCHUTZ UND KONSERVIERUNGS- FORSCHUNG IZKK

Unter dem Motto »Austauschen, Forschen, Konzentrieren« versteht sich das Internationale Zentrum für Kulturgüterschutz und Konservierungsforschung IZKK als bildende Einrichtung und ist damit wichtiges Zentrum der Nachhaltigkeitstrategie der Fraunhofer-Gesellschaft.

Selbst beheimatet in einem lebenden Denkmal, dem Kloster Bronnbach, informiert das Kompetenzzentrum über das kulturelle Erbe und vor allem über die Möglichkeiten seiner Erhaltung. Hierzu bietet das IZKK in den modern ausgebauten Tagungsräumen der historischen Klosteranlage aus dem 12. Jahrhundert einem internationalen Fachpublikum ein breites Spektrum an Seminaren, Fortbildungen sowie Tagungen an, auf denen sie ihr Fachwissen und die neuesten Erkenntnisse austauschen, konzentrieren, gemeinsam weiterentwickeln und bei der Sicherung historischer Objekte nutzbar machen.

Angesprochen sind Restauratoren, Architekten, Handwerksmeister, Stuckateure, Künstler, Kuratoren und andere, die sich mit dem Schutz von Kulturgütern befassen. Im Bereich der Wissenschaft wird ein intensiver Dialog und Austausch zwischen Universitäten, Hochschulen, Forschungsinstituten, Museen und Ämtern der Denkmalpflege vorangetrieben.

Darüber hinaus arbeitet das IZKK aktiv mit Vorträgen und Workshops daran, in der Gesellschaft das Bewusstsein für die Notwendigkeit der Erhaltung des kulturellen Erbes als Wirtschaftsgut wie auch als Zeitzeugen unserer Vorfahren und als Mahnmal für zukünftige Generationen zu schaffen.

Seit der Initiierung des Zentrums durch das Fraunhofer ISC und den Main-Tauber-Kreis im Jahr 2008 arbeitet das IZKK eng mit dem ebenfalls in der Außenstelle Bronnbach angesiedelten Fachbereich »Kulturgüterschutz« zusammen, der sich mit der Erforschung von Konservierungs- und Restaurierungsmaterialien sowie der Entwicklung von Verfahren und Produkten zur Messung und Bewertung industrieller Einflüsse auf die Umwelt und das Kulturgut befasst.



## Kontakt

**Fraunhofer ISC**  
**Außenstelle Bronnbach**  
**Bronnbach 28**  
**97877 Wertheim**



**Sabrina Rota**  
☎ +49 9342 9221-710  
sabrina.rota@isc.fraunhofer.de  
www.izkk.de

---

---

# PROJEKTGRUPPE IWKS

---

---

## **Sicherheit in der Rohstoffversorgung – Ressourcen-Gebrauch statt -Verbrauch**

---

Ressourcenknappheit ist ein zentrales politisches Thema für die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung von Industrienationen geworden. Die Sicherung einer nachhaltigen Versorgung der Industrie mit Rohstoffen ist deshalb ein essentielles Thema. Die Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS widmet sich dieser Zukunftsaufgabe durch Erforschung und Entwicklung neuer Technologien für Recyclingprozesse, durch Substitution seltener Roh- und Werkstoffe sowie durch Untersuchungen zur Kreislauffähigkeit von Wertstoffen und Erstellung von Technologieprognosen.

---

## **Die Struktur im Überblick**

---

In seinen drei Geschäftsbereichen bündelt das IWKS die Kernkompetenzen:

- Ressourcenstrategie
- Recycling und Wertstoffkreisläufe
- Substitution

Die enge Vernetzung der Geschäftsbereiche untereinander mit dem Leitungsteam, bestehend aus Prof. Dr. Armin Reller (Universität Augsburg), Prof. Dr. Stefan Gäth (Justus-Liebig-Universität Gießen) und Prof. Dr. Oliver Gutfleisch (Technische Universität Darmstadt) sowie der Geschäftsführung durch Prof. Dr. Rudolf Stauber, ermöglicht Forschungsansätze entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Angewandte Forschung misst sich am Markterfolg. Das IWKS bietet seinen Kunden daher ein aktuelles Portfolio an Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen. In enger Zusammenarbeit mit seinen Unternehmenspartnern entwickelt das IWKS branchenübergreifend innovative Trenn-,

Sortier- und Aufbereitungsverfahren sowie Produkte, die den Unternehmen in Deutschland und Europa einen technischen Vorsprung verschaffen. Neueste wissenschaftliche und technische Erkenntnisse werden individuell und nachhaltig in Anwendungen und Produkten, unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und technischer Machbarkeit, umgesetzt. Sowohl die Verbesserung der Ressourceneffizienz hinsichtlich des Einsatzes von Material, Energie und Zeit, als auch eine optimierte Ressourcenallokation, ermöglichen den Auftraggebern, ihre Marktposition weiter auszubauen. Auch Politik und Wirtschaft vertrauen auf die Beratung der Projektgruppe, beispielsweise in der Prognostizierung von Ressourcenbedarf innerhalb der produzierenden Industrie und deren Relevanz.

Die Geschäftsfelder im Überblick:

- Elektrik, Elektronikschrott
- Magnete
- Schlacken, Schlämme, Deponien
- Biowerkstoffe, Lebensmittel
- Beleuchtungssysteme

Die innerhalb von Forschungsprojekten eingesetzten Kompetenzbereiche sind kundenbedarfsorientiert und richten sich nach folgenden Forschungsschwerpunkten:

- Strategien, Studien und Modellierung
- Analytik
- Zerkleinerungs- und Sortiertechnologien
- Physikalische, chemische und biologische Trenntechnologien
- Werkstofftechnologien

Zudem kann das IWKS auf das Mutterinstitut Fraunhofer ISC sowie ein Fraunhofer-weites Netzwerk von Experten und entsprechend ausgerichteter Hochschulen zurückgreifen. Das damit verfügbare Kompetenznetzwerk ermöglicht eine herausragende Beratungsleistung. Forscher verschiedener



Mitarbeiter der Projektgruppe IWKS in Alzenau und Hanau

Disziplinen arbeiten zusammen, so werden Grenzen der Fachgebiete überschritten und neue Ideen entstehen. Das IWKS hat mit interdisziplinären Forschungsteams von mehr als 20 Mitarbeitern aus den Fachbereichen Umweltmanagement, Verfahrenstechnik, Materialwissenschaften, Wirtschaftsingenieurwesen, Biologie, Chemie und Physik, die Tätigkeit aufgenommen und wird innerhalb der nächsten Jahre weiter gefestigt. Für das Jahr 2013 ist die Einstellung von ca. 10 weiteren Wissenschaftlern geplant. Das Ziel ist die Gründung eines vollwertigen Fraunhofer-Instituts nach 2016.

---

### Ressourcenstrategie

---

Der Geschäftsbereich Ressourcenstrategie identifiziert die zunehmend kritische Verfügbarkeit primärer und sekundärer Ressourcen für gegenwärtige und zukünftige Technologieentwicklungen und bewertet ihre Kritikalität in dem Gesamtprozess der Gewinnung der Rohstoffe, ihrer Nutzung und Nachnutzung. Es werden ökonomische, ökologische, geopolitische und soziokulturelle Faktoren der Ressourcenverfügbarkeit und des Gebrauchs von Rohstoffen betrachtet, um die Grundlage für die Entwicklung nachhaltiger Nutzungsstrategien zu bilden. Das Ressourcenstrategiekonzept definiert eine Reihe quantitativer und qualitativer Kriterien zur Abschätzung von Potenzialen und Risiken hinsichtlich des Einsatzes von Ressourcen, Materialien, Prozessen und Technologien.

Folgende Schwerpunkte werden bereits erforscht:

- Ressourcenkonflikte
- geopolitische Abhängigkeiten
- Sicherheit und Gestaltung globaler Versorgungswege und effizienter Wertschöpfungsketten
- ökonomische Potenziale
- soziokulturelle Faktoren und Akzeptanz neuer Technologien.

Der Geschäftsbereich Ressourcenstrategie wird geleitet von Armin Reller, Professor für Ressourcenstrategie an der Universität Augsburg.

---

### Recycling und Wertstoffkreisläufe

---

Der Geschäftsbereich Recycling und Wertstoffkreisläufe entwickelt in Kooperation mit der Industrie innovative Recycling- sowie Stoffstrom-, Abfall- und Ressourcenmanagementkonzepte. Im Dreiklang (Reverse-)Logistik-Technologie-Sozioökonomie werden im Anschluss an Systemanalyse und Konzeption maßgeschneiderte Technologien entwickelt und in die praktische Anwendung implementiert. Die Beratung zur Konzeption und Umsetzung von recyclinggerechtem Design («Design for Disassembly») erfolgt in der Phase der Produktentwicklung. Der Geschäftsbereich agiert branchenübergreifend in verschiedenen Industriezweigen, wie Lebensmittelindustrie, Elektrik-Elektronikbranche, Automobil- und Beleuchtungsindustrie, in Zusammenarbeit mit den entsprechenden Fachexperten. Betrachtet wird dabei eine große Bandbreite an Materialien, Werkstoffen und Produkten, wie beispielsweise elektrische Bauteile und Komponenten, Leuchtstoffe sowie Verpackungsmaterialien.

Untersucht werden zudem Wertstoffe/Materialien aus:

- Schlacken, Schlämmen und Deponien
- Aschen
- Adsorbentien
- Abwässer
- Lebensmittelabfällen

Stefan Gäth ist Professor für Abfall- und Ressourcenmanagement an der JLU Gießen und leitet den Geschäftsbereich Recycling und Wertstoffkreisläufe.

---

---

# PROJEKTGRUPPE IWKS

---

---

## Substitution von Roh- und Werkstoffen

---

Der Geschäftsbereich Substitution beschäftigt sich vorrangig mit dem möglichst gleichwertigen Ersatz von seltenen und teuren Rohstoffen in verschiedenen Produkten, Anwendungen und Technologien. Ziel ist die Entwicklung innovativer Werkstoffe und auch die Substitution auf Komponenten-, Prozess- und Technologieebene.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten liegt in der Entwicklung von Permanentmagneten mit drastisch reduziertem Seltenerdgehalt bei gleichbleibenden oder verbesserten Betriebseigenschaften zum Beispiel für den Einsatz in Elektromotoren und Windturbinen. Im Mittelpunkt stehen auch die Optimierung und Entwicklung von:

- kritischen Funktionsmaterialien
- optischen Materialien
- optoelektronischen Komponenten
- Beleuchtungssystemen
- Kühlsystemen

Die Leitung des Geschäftsbereichs Substitution von Roh- und Werkstoffen obliegt Oliver Gutfleisch, Professor für Funktionale Materialien im Fachbereich Materialwissenschaft an der TU Darmstadt.

### Kontakt

Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe  
und Ressourceneffizienz IWKS  
Brentanostraße 2  
63755 Alzenau

und im  
Industriepark Hanau-Wolfgang  
Rodenbacher Chaussee 4  
63457 Hanau

### Geschäftsführer

**Prof. Dr. Rudolf Stauber**

☎ + 49 6023 32039-801

[rudolf.stauber@isc.fraunhofer.de](mailto:rudolf.stauber@isc.fraunhofer.de)



### Leitungsteam

**Prof. Dr. Stefan Gäth**

☎ + 49 6023 32039-801

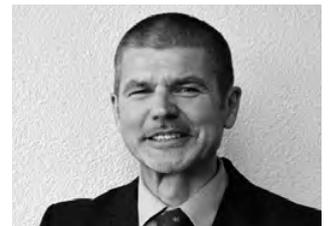
[stefan.gaeth@isc.fraunhofer.de](mailto:stefan.gaeth@isc.fraunhofer.de)



**Prof. Dr. Oliver Gutfleisch**

☎ + 49 6023 32039-801

[oliver.gutfleisch@isc.fraunhofer.de](mailto:oliver.gutfleisch@isc.fraunhofer.de)



**Prof. Dr. Armin Reller**

☎ + 49 6023 32039-801

[armin.reller@isc.fraunhofer.de](mailto:armin.reller@isc.fraunhofer.de)



[www.iwks.fraunhofer.de](http://www.iwks.fraunhofer.de)



# RÜCKBLICK



Besuch von Staatsminister Marcel Huber in Alzenau

## WÜRZBURGER WIRTSCHAFTSTAGE

Zum 4. Mal beteiligte sich das Fraunhofer ISC an den »Würzburger Wirtschaftstagen«, diesmal an der Aktion »Berufsnavigator«. Unter dem Motto »Arbeiten in der Forschung – für die Produkte von morgen« wurden am 28. Februar die Möglichkeiten einer Ausbildung in handwerklichen, technischen oder kaufmännischen Berufen im Fraunhofer ISC vorgestellt. Am 29. Februar konnten sich die Besucherinnen und Besucher über die wissenschaftlichen Ausbildungsrichtungen am ISC informieren und am 1. März über Ingenieurberufe. Junge Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus den jeweils adressierten Berufsbildern schilderten ihren eingeschlagenen Ausbildungsweg aus persönlicher Perspektive – ein Beitrag zur Förderung des Interesses an wissenschaftlich-technischen Laufbahnen, der großen Anklang fand.

## CESMA WORKSHOP

INDUSTRIELLE HERAUSFORDERUNGEN FÜR  
SMART MATERIALS

Inzwischen hat er Tradition, der CeSMA-Workshop in Zusammenarbeit mit den bayerischen Clustern »Neue Werkstoffe« und »Mechatronik und Automation«. Im Mittelpunkt standen 2012 Anforderungen an Materialien für den Einsatz in der Antriebs- und Automatisierungstechnik, steuerbare magnetorheologische Dämpfer in Kombination mit 3D-Magnetfeldsensoren und akustisch steuerbare Transportprozesse. Die Gastreferenten Dr. Volker Seifert von der Bosch Rexroth AG, Lohr am Main, Dipl.-Ing. Andreas Buchholz von der Robert Seuffer GmbH & Co. KG, Calw, sowie Prof. Dr. Gerhard Lindner von der Fachhochschule Coburg gaben den Zuhörern des eintägigen Workshops faszinierende Einblicke in die Welt der Smart Materials.

## HOHER BESUCH IN ALZENAU

Für die Projektgruppe IWKS in Alzenau ein großer Tag: Bayerns Umweltminister Marcel Huber nahm sich trotz vollen Terminkalenders ausführlich Zeit, sich am 20. März 2012 über die inhaltliche Ausrichtung der Projektgruppe und den Stand des Aufbaus zu informieren. Der Minister zeigte in seinem engagierten Vortrag drängende Handlungsfelder im Bereich der Rückgewinnung von Rohstoffen auf und äußerte sich hochzufrieden über das Signal der Fraunhofer-Gesellschaft, diese Fragestellungen in der Projektgruppe IWKS konzentriert zu bearbeiten.



*Staatsministerin Kühne-Hörmann, Prof. Bullinger und stellvertretender hessischer Ministerpräsident Hahn*

## TAG DER OFFENEN TÜR IN DER PROJEKTGRUPPE IWKS

Am Nachmittag des 4. Juni 2012 öffnete die Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS in Alzenau anlässlich des »Deutschen Aktionstags Nachhaltigkeit« zum Auftakt der dreitägigen Konferenz für nachhaltige Entwicklung in Rio, für interessierte Bürgerinnen und Bürger ihre Türen. Die rund 200 Besucher zeigten reges Interesse und informierten sich im IWKS über die Geschäftsbereiche Ressourcenstrategien, Recyclingtechnologien und Werkstoffsubstitution der neuen Fraunhofer-Einrichtung vor Ort.

## PROJEKTGRUPPE IWKS ERÖFFNET STANDORT AUCH IN HESSEN

Am 29. Juni übergab Staatsministerin Eva Kühne-Hörmann, Hessische Ministerin für Wissenschaft und Kunst, der Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS den Bewilligungsbescheid für den Aufbau eines Standorts im Industriepark Hanau-Wolfgang. Entgegengenommen hat den Förderbescheid in Höhe von 24 Mio. Euro Prof. Hans-Jörg Bullinger persönlich. Ein knappes Jahr nach der Gründung der Projektgruppe in Alzenau im Freistaat Bayern ist die Erweiterung auf den Standort in Hessen ein Zeichen für die enorme Wichtigkeit der Themen Recycling, Substitution und Ressourcenstrategie in Industrie, Wirtschaft und Politik.

Bei den neuen Fraunhofer-Aktivitäten am Chemiestandort Hanau-Wolfgang wird das Thema der Werkstoff- bzw. Rohstoffsubstitution im Vordergrund stehen – ein Thema, dessen erfolgreiche Bewältigung den wirtschaftlichen Erfolg der produzierenden Industrie in Zukunft maßgeblich beeinflussen wird. »Uns ist bewusst, welche herausragende Bedeutung die Substitution von kritischen Roh- und Wertstoffen für die Entwicklung unserer Technologien, für unsere Industrie und unsere Gesellschaft mittel- und langfristig hat. Deshalb sind wir froh darüber, mit der Fraunhofer-Gesellschaft einen über die Grenzen hinaus anerkannten und innovativen Forschungspartner mitten in einem der stärksten und attraktivsten Industrieparks, nicht nur in Hessen, ansiedeln zu können«, so Ministerin Eva Kühne-Hörmann.

---

---

# RÜCKBLICK

---

## AUSSTELLUNG

ZUM THEMA RESSOURCEN IM SCHLÖSSCHEN MICHELBACH

Das Wissenschaftsjahr 2012 wurde von der Bundesregierung unter dem Motto »Zukunftsprojekt ERDE« zum »Jahr der Nachhaltigkeitsforschung« ausgerufen. Im Mittelpunkt steht dabei der Beitrag von Wissenschaft und Forschung zu einer nachhaltigen Entwicklung. Eine vom Fraunhofer ISC und der Projektgruppe IWKS gestaltete Ausstellung im Schloßchen Michelbach bei Alzenau vom 1. bis 29. Juli 2012 machte Forschung zur nachhaltigen Entwicklung für die Besucher sichtbar und erlebbar. Sie stellte die unterschiedlichen Forschungsfelder der Fraunhofer-Gesellschaft vor und legte einen Schwerpunkt auf die Forschungsaufgaben der Projektgruppe in Alzenau in den Bereichen Edelmetalle, NE-Metalle, Kunststoffe und Seltene Erden.

## BEWILLIGUNGSBESCHIED

FÜR DEN WEITEREN AUSBAU DES FRAUNHOFER-ZENTRUMS HTL

Am 1. August übergab der Bayerische Staatsminister für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie Martin Zeil den Bewilligungsbescheid für den weiteren Ausbau des Fraunhofer HTL in Bayreuth. Hervorgehoben in den Grußworten wurde insbesondere die Bedeutung der Forschung des Zentrums für das Thema Energieeffizienz und Ressourcenschonung und die regionale Stärkung Oberfrankens. Staatsminister Martin Zeil bekundete, dass mit Ausbau des Fraunhofer-Zentrums HTL ein weiterer wichtiger Meilenstein für den Hochtechnologiestandort Bayern und insbesondere Oberfranken gesetzt wird, denn »die Stärkung der Bayreuther Forschungslandschaft ist ein wichtiger Baustein unserer Standortpolitik für Oberfranken«.

## WISSENSCHAFTSJAHR 2012

Das Wissenschaftsjahr »Zukunftsprojekt Erde« des BMBF war Anlass für die Stadt Würzburg, eine Vortragsreihe zum Thema Nachhaltigkeit zu veranstalten. Unter den Vortragenden waren auch Wissenschaftler des Fraunhofer ISC. So sprach Dr. Gerhard Schottner, Leiter des Geschäftsbereichs Umwelt, zusammen mit Matthias Rothkegel von der Rothkegel Glas GmbH am 14. Juni zum Thema »Kulturerbe erhalten – Forschung und Handwerk Hand in Hand«.



Ausstellung »Ressourcen«



Mittel für DEGREEE bewilligt

Am 5. Juli referierte Prof. Dr. Armin Reller, Leiter des Geschäftsbereichs Ressourcenstrategie der Projektgruppe IWKS in Alzenau zur Frage: »Woher kommen unsere Rohstoffe in Zukunft?« Interessierte Bürgerinnen und Bürger konnten im schönen Ratssaal des Würzburger Rathauses Einblick gewinnen in aktuelle Forschungsarbeiten des Fraunhofer ISC.

## WISSENSCHAFTSSCHIFF MS NACHHALTIGKEIT

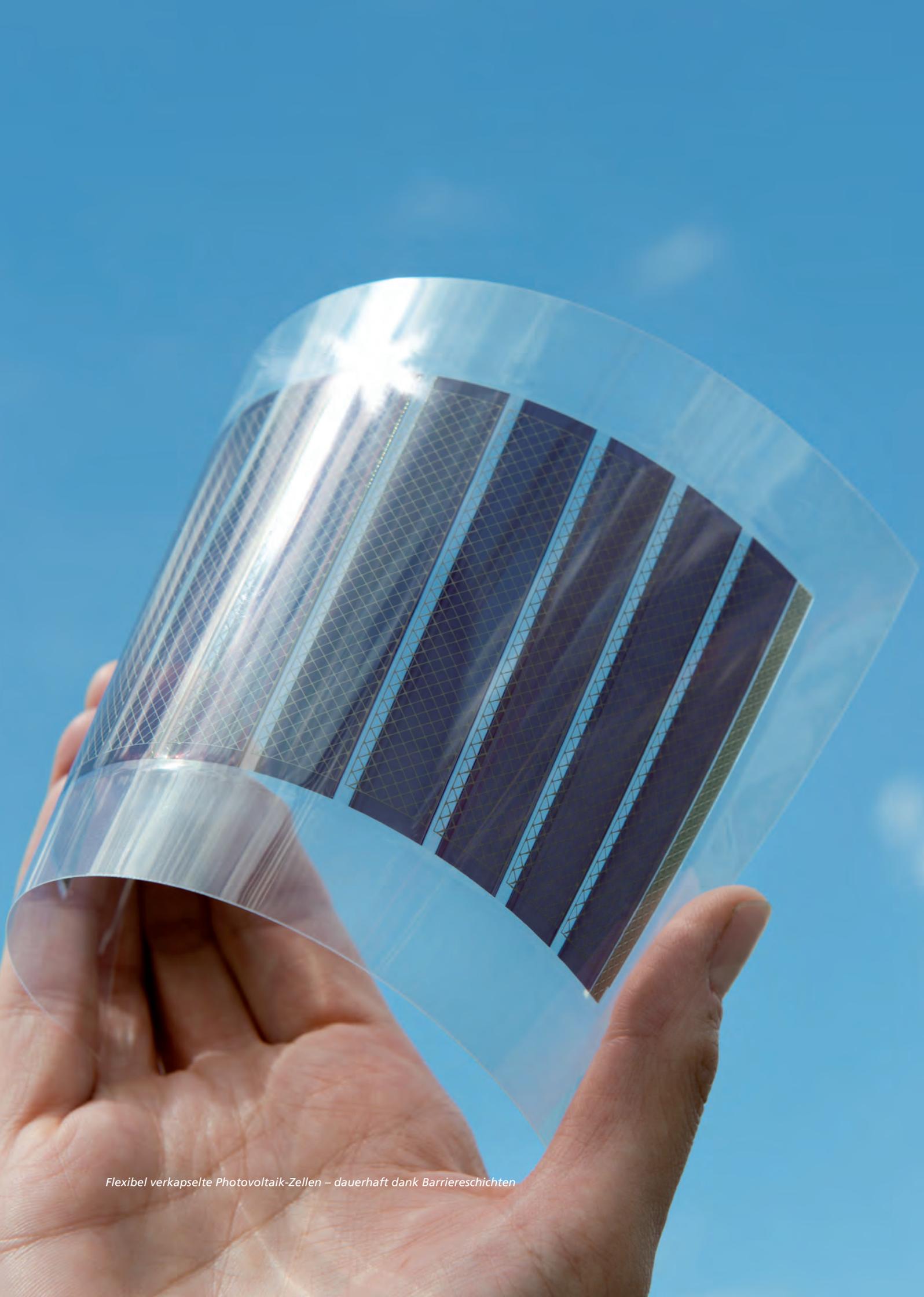
30. MAI BIS 12. OKTOBER – ENDSTATION IN WÜRZBURG

Ein letztes Mal im Jahr 2012 öffnete das Wissenschaftsschiff seine Luken Mitte Oktober in Würzburg – der Endstation seiner diesjährigen Flussreise durch Deutschland und die angrenzenden Regionen. Unter dem Motto des Wissenschaftsjahres »Zukunftsprojekt Erde« hatten eine Vielzahl von Forschungseinrichtungen Exponate über Nachhaltigkeit und Entwicklung beigesteuert - auch das Fraunhofer ISC war wieder mit dabei. Mit seinem Exponat »Das Leben der Dinge« wurden in spielerischer Form Informationen über Geschichte, Herkunft und Nutzung von kritischen Rohstoffen vermittelt - das Angebot wurde von den kleinen und großen Besuchern des Schiffs gerne angenommen. Die Crew bestätigte, dass das »Leben der Dinge« nicht nur eines der über die Laufzeit der Ausstellung zuverlässigsten sondern auch eines der am meisten bespielten gewesen war.

## DEGREEE

INNOVATIVE WEGE ZUR DEZENTRALEN ENERGIEGEWINNUNG  
MITTELS DIELEKTRISCHER ELASTOMERE

Am 19. September startete offiziell das vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie geförderte Projekt DEGREEE, in dem das Center Smart Materials CeSMa am Fraunhofer ISC mithilfe von dielektrischen Elastomer-Generatoren (DEG) neue umweltschonende Technologien zur effektiven und dezentralen Energiegewinnung entwickeln wird. Der Bewilligungsbescheid wurde von Herrn Staatsminister Martin Zeil persönlich übergeben. Für ihn sei dieses Projekt eine hervorragende Möglichkeit, bayerische Technologieunternehmen mit gezielter Forschung zu unterstützen und Bayern als Innovations- und Technologietreiber zu profilieren. Das Grußwort der Stadt überbrachte Würzburgs Oberbürgermeister Georg Rosenthal. Zu den geladenen Ehrengästen des feierlichen »Kick-Off-Meetings« gehörten neben Regierungspräsident Dr. Paul Beinhofer namhafte Vertreter aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft.



*Flexibel verkapselte Photovoltaik-Zellen – dauerhaft dank Barrierschichten*

# GESCHÄFTS- BEREICH

---

---

## Geschäftsbereich UMWELT

Der Geschäftsbereich Umwelt des Fraunhofer ISC beschäftigt sich mit den Herausforderungen, die aus der Endlichkeit von stofflichen Ressourcen erwachsen. Unsere Lösungsansätze liegen in der Entwicklung von Werkstoffen und Verfahren für einen effizienten Gebrauch von Ressourcen (Materialeffizienz) und in der Rückgewinnung von Wertstoffen in einem geschlossenen Stoffkreislauf (Sekundärwerkstoffe). Das Wissen um die Wechselwirkung von chemischen und mechanischen Einflüssen mit Oberflächen in ihrer natürlichen und künstlichen Umwelt bildet den Hintergrund für die Entwicklung hoch effektiver Schichtsysteme mit mehrfacher Funktionalität.

Kernfelder sind ressourceneffizientes und gesundes Bauen und Wohnen. Werkstoffe zur Wärmespeicherung und Dämmung schlagen die Brücke zum Geschäftsbereich Energie. Über die Ressourceneffizienz besteht auch eine enge thematische Verknüpfung mit der Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS in Alzenau und Hanau, z. B. beim Einsatz sekundärer Ressourcen für Bauwerkstoffe, bei analytischen Fragestellungen sowie bei der Entwicklung und dem Bau von Spezialgeräten. In Ergänzung dazu stehen Prüfverfahren zum Umweltmonitoring sowie der Schutz von Kulturgütern.

Die Wechselwirkungen von Umwelteinflüssen mit Oberflächen werden über die Entwicklung von Beschichtungen gezielt beeinflusst und gesteuert. Schwerpunkte der Arbeiten sind die Entwicklung von Schichtwerkstoffen unter Einsatz von Nanotechnologien sowie von Applikationsverfahren zur Erhöhung der Funktionalität und Lebensdauer von Bauteilen und Produktionsgütern. Für die Haltbarkeit von Produkten und die Hygiene im täglichen Leben äußerst wichtig sind Verpackungsmaterialien.

Aufgrund des starken Bevölkerungswachstums und der Zunahme an Wegwerfverpackungen entwickeln sich bereits erhebliche Umweltprobleme durch Anreicherung von Abfallprodukten sogar in den Weltmeeren.

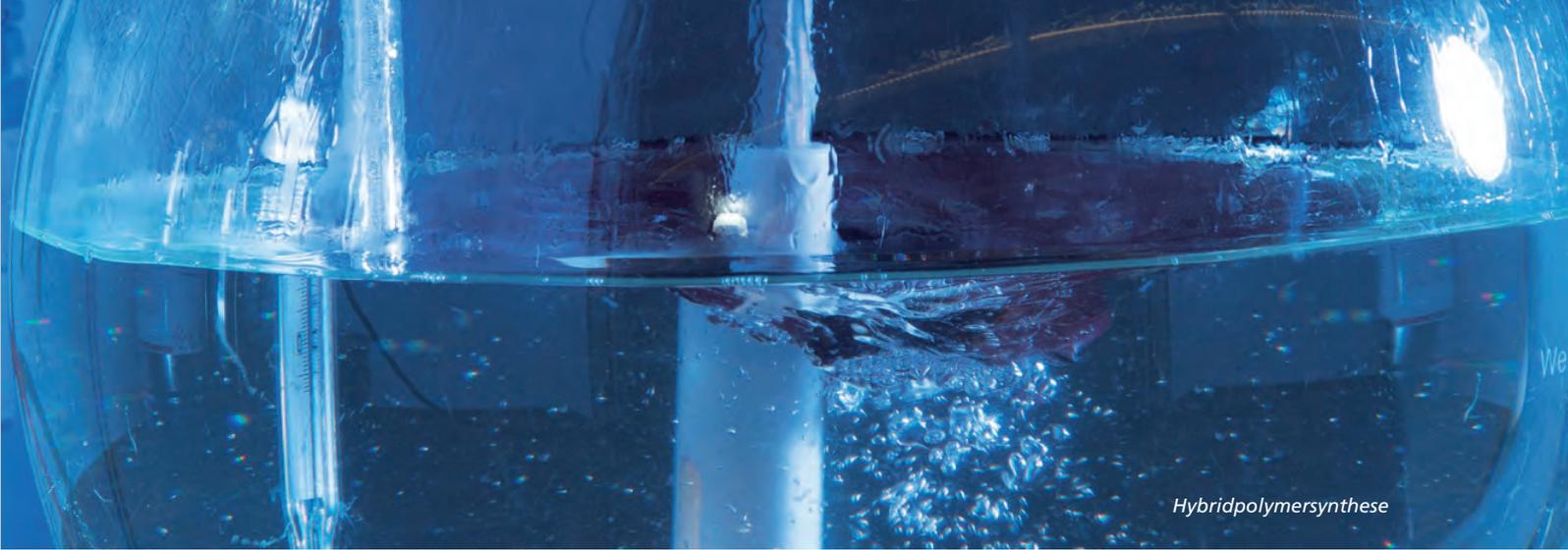
---

### **Kompostierbare Verpackungsmaterialien – öl- und wasserdicht mit PlasmaNice**

---

Viele Verpackungsmaterialien bestehen heute aus einer Kombination unterschiedlicher Komponenten, um eine möglichst hohe Dichtigkeit gegen verschiedene Stoffe – wie etwa Sauerstoff, Wasser, Öl, Schmutz zu erzielen. Dies dient ebenso dem Schutz des Verpackungsguts vor Umgebungseinflüssen wie auch der Umgebung, z. B. vor dem Austreten von Flüssigkeiten. Rein erdölbasierte Verpackungen werden immer teurer und knapper, außerdem stehen mangelnde Recyclingfähigkeit oder Kompostierbarkeit im Kreuzfeuer. Deshalb gewinnen Verpackungsmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen an Bedeutung, der Anteil an organischen Polymeren soll verringert werden.

Die Notwendigkeit, anwachsende Müllberge signifikant zu reduzieren, führte zunächst zum verstärkten Gebrauch von Papier als kompostierbarem Verpackungsmaterial. Um die notwendige Stabilität zu gewährleisten und das Austreten von Flüssigkeiten zu verhindern, wurden entweder Lamine mit Kunststofffolien oder Beschichtungen mit Fluorpolymeren oder Siliconen eingesetzt. Da zunehmend Rezyklierbarkeit oder Kompostierbarkeit der Verpackungen gefordert wird, ist der Einsatz dieser Materialien in Zukunft unerwünscht.



Hybridpolymersynthese

Die Aufgabenstellung im Projekt war daher, diese Materialien durch ein Beschichtungssystem mit folgendem Eigenschaftsprofil zu ersetzen:

- Undurchlässig gegenüber Flüssigkeiten, vor allem Öl und Fett
- Gute Haftung auf bio-basierten Polymeren wie Papier oder Polylactid
- Einfache Verarbeitungsmöglichkeit und Integrierbarkeit in industrielle In-Line-Fertigung bei hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten
- Bioabbaubarkeit

Aufgrund früherer positiver Ergebnisse mit der Verarbeitung und Abscheidung von hybriden Beschichtungsmaterialien in einem Atmosphärendruck-Plasmaprozess (EU-Projekt SOLPLAS) und der daraus resultierenden Bildung von Schichten mit nachgewiesener Sauerstoffbarriereeigenschaft sollten die jetzt zu entwickelnden Fettbarrierschichten nach dem gleichen Verfahren hergestellt werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass auf durchlässigen, porösen und saugfähigen Substraten wie Papier nicht die geforderte Schichtdicke und Filmbildung bei hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten erzielbar war, um eine gute Barrierewirkung zu erreichen. Deswegen wurde parallel dazu an der Entwicklung einer UV-härtenden Schicht gearbeitet, die durch Sprühauftrag verarbeitbar und ebenfalls bei hohen Geschwindigkeiten aushärtbar ist.

Am Ende des vierjährigen EU-Förderprojekts »PlasmaNice« konnte ein ORMOCER®-Beschichtungssystem bereitgestellt werden, das alle genannten Kriterien erfüllt. So wurde eine Zusammensetzung erarbeitet, die neben einer Acrylsiloxan-komponente nur noch Methylsiloxan enthält und somit vollkommen fluorpolymer- und siliconfrei ist. Auf unterschiedlichen Papiertypen wurde ein homogenes Beschichtungsbild erzielt, und sowohl im Technikumsmaßstab als auch im industriellen Pilotversuch konnte die Schicht bei Bandgeschwindigkeiten bis 150 m/min verarbeitet und UV-gehärtet werden.

In einem vierwöchigen Dauertest erwies sich die Schicht auf reinem Papier als vollkommen undurchlässig gegenüber Öl. Der Papier-/ORMOCER®-Schichtverbund ist damit genauso stabil wie herkömmliches Papier-Kunststoff-Laminat.

Ein wesentlicher und problematischer Faktor bei der Anwendung von UV-härtenden Schichten und Druckfarben in der Verpackungstechnologie ist die Gefahr der Migration von unreaktiertem Photoinitiator oder Fragmenten davon in das Verpackungsgut, vor allem bei Lebensmitteln. Um dieser Gefahr zu begegnen, wurde von einem Projektpartner ein spezieller Photoinitiator entwickelt, der über das Sol-Gel-Verfahren chemisch in das Beschichtungssystem eingebunden wird. Die Gefahr der Migration unerwünschter Substanzen kann so minimiert werden. In ersten Versuchen zur Biodegradation konnte gleichzeitig eine Abbaurate von nahezu 100% erzielt werden.

Mit der Entwicklung eines Schichtsystems für Papier als Ersatz für die Kolamination von organischen Polymeren ist es somit gelungen, alle Anforderungen der Gebrauchseigenschaften und industriellen Anwendbarkeit zu erfüllen. Gleichzeitig werden Aspekte des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit, der Ressourcenschonung und Materialeinsparung berücksichtigt.

---

### Nachhaltige Verpackungswerkstoffe

---

Die Herstellung von Kunststoffen auf Erdölbasis, z. B. für die Lebensmittelverpackung, entspricht nicht den im Rahmen der Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA) in Deutschland geforderten Umweltstandards. Mit dem Ziel einer nachhaltigen Lebens-, Arbeits- und Wirtschaftsweise sind inzwischen auch auf europäischer Ebene neue Werkstoffentwicklungen gestartet worden, um eine neue, CO<sub>2</sub>-neutrale Rohstoffbasis und eine vollständige biologische Abbaubarkeit von Verpackungen zu erreichen.

# UMWELT

Das Fraunhofer ISC beteiligt sich in diesem Zusammenhang an dem im Jahr 2012 gestarteten großen europäischen Forschungsvorhaben DIBBIOPACK über biobasierte und bioabbaubare Verpackungen und baut dabei auf die Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten wie »PlasmaNice« auf.

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern – fünf Firmen, sechs KMU, sieben Forschungsinstitute – werden im Rahmen des Projektes im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt:

1. Entwicklung von neuen biobasierten Materialien für Behälter und Verpackungen wie Folien, hergestellt über Extrusionslaminiierung oder Extrusionsblasformung. Durch innovative bioabbaubare Funktionsbeschichtungen sollen die mechanischen und die Barriere-Eigenschaften dieser neuen Verpackungsmaterialien verbessert werden.
2. Integration von intelligenten Technologien in Verpackungsmaterialien, um dem Verbraucher mehr Informationen über das Produkt im Hinblick auf Haltbarkeit und Qualität zur Verfügung zu stellen.

Für beide Schwerpunkte werden neue, umweltfreundliche und effiziente Prozesse entwickelt. Am Fraunhofer ISC werden bioabbaubare funktionelle Beschichtungen mit Barriere- und antimikrobiellen Eigenschaften entwickelt.

Anwendungsspektrum für Verpackungswerkstoffe  
(Bildquelle: [www.dibbiopack.eu](http://www.dibbiopack.eu))



Das Projekt beinhaltet das Design, die Entwicklung, Optimierung und Fertigungstechnik von multifunktionalen neuen intelligenten Verpackungen in Übereinstimmung mit ökologischen Erfordernissen über die gesamte Material- und Herstellungskette. Es werden neue Verpackungsmaterialien für die Bereiche Kosmetik, Pharmazie und Lebensmittel adressiert.

Neben der Verpackungsindustrie, die aufgrund der riesigen anfallenden Mengen an Abfallprodukten dringend auf die Entwicklung nachhaltiger und umweltfreundlicher Stoffkreisläufe angewiesen ist, kommt auch dem Korrosionsschutz eine vergleichbare volkswirtschaftliche Bedeutung zu. Die durch Korrosion metallischer Werkstoffe entstehenden Verluste an Material und Wert sind extrem hoch und belasten die Industriegesellschaften mit ca. 150 Mrd. € pro Jahr. Daher wurden bisher auch arbeitsschutzrechtlich und ökotoxikologisch bedenkliche Verfahren des Korrosionsschutzes mit Cr(VI)-Verbindungen zugelassen. Seit einigen Jahren sind diese Verfahren aber nicht mehr erlaubt oder stehen vor einem generellen Verbot.

## Aktive Schichten für den Korrosionsschutz

Durch Verzinken werden Stahloberflächen sehr gut vor Korrosion geschützt. Abhängig von Umwelteinflüssen korrodiert allerdings auch die Zinkschicht selbst. Sie wird daher entweder sehr dick ausgelegt oder ihrerseits zusätzlich mit einer sogenannten Konversionsschicht, gefolgt von einer organischen Schicht, geschützt. Der beste Korrosionsschutz wird durch eine Konversionsbehandlung mit Chrom(VI)-Verbindungen, das sogenannte »Chromatieren«, erreicht. Da Chrom(VI)-Verbindungen aber als krebserregend und toxisch eingestuft sind, wird intensiv an einem ungefährlichen Ersatz mit gleicher Funktion geforscht.

In dem vom Fraunhofer ISC koordinierten Projekt »ASKORR« werden aktive Schichten für »intelligente« nachhaltige Korrosionsschutzsysteme in einem Verbund aus zwei Fraunhofer-



Umformfähiger passiver Korrosionsschutz auf Hybridpolymerbasis

und zwei Max-Planck-Instituten entwickelt. Durch geschickte Kombination spezifischer Schichtwerkstoffe und neuer partikulärer Wirkstoffcontainer werden aktive Verbundmaterialien hergestellt, die Defekte selektiv ausheilen. Verkapselte polymerisierbare Verbindungen entfalten dabei nur dort ihre Wirkung, wo eine Schädigung auftritt.

Die große Herausforderung, die am Fraunhofer ISC gemeistert werden konnte, war die unbeschadete Einbettung der wirkstoffhaltigen Kapseln in hybridpolymere Korrosionsschutzschichten und der entsprechende analytische Nachweis. Dazu mussten Bruchkanten der Hybridschichten mit den Wirkstoffcontainern zunächst durch Ionenstrahlpräparation freigelegt und mittels REM/EDX-Analyse untersucht werden. Wie die REM/EDX-Analyse in Bild 1 zeigt, gelang es zwar zunächst, Kapseln in die Schicht einzubauen, die Präpolymere in den empfindlichen Kapseln waren jedoch während der Einarbeitung und der Schichtherstellung teilweise oder ganz durch das hybride Matrixmaterial ersetzt worden.

Durch die Anpassung von Containerwandmaterial (bei den Projektpartnern) und Hybridpolymermatrix (am Fraunhofer ISC), die Optimierung der Einarbeitung und nicht zuletzt durch die intensive Zusammenarbeit zwischen Entwicklern und Analytikern am Fraunhofer ISC ist es gelungen, Wirkstoffcontainer mit polymerisierbaren Verbindungen so in die Hybridpolymermatrix einzuarbeiten, dass Kapseln und Inhalt intakt blieben und dies auch analytisch nachzuweisen (Bild 2). Damit konnte ein Verfahren inklusive entsprechender Präparations- und Analysemethoden etabliert werden, das auch auf andere Wirkstoffe übertragbar ist. So können in Zukunft beispielsweise flüssige Korrosionsschutzinhibitoren verkapselt und in hybride Korrosionsschutzschichten integriert werden.

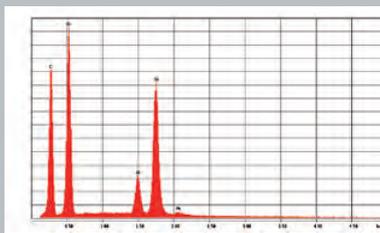
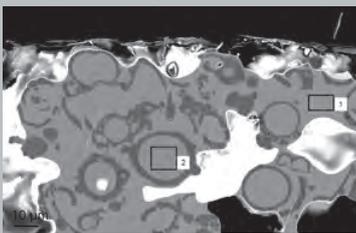


Bild 1: REM-Aufnahme an einer Bruchkante nach Ionenstrahlpräparation (links) und EDX-Spektrum innerhalb einer Kapsel (rechts); die Signale der Hybridpolymermatrix [C, Si, Al, O, (N)] sind gut zu erkennen; die EDX-Spektren innerhalb und außerhalb der Kapseln sind identisch (EDX-Spektrum außerhalb der Kapseln ist nicht abgebildet).

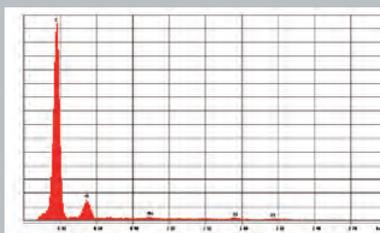


Bild 2: REM-Aufnahme an einer Bruchkante nach Präparation mittels Ionenböschung (links) und EDX-Spektrum (von Ausschnitt 3) innerhalb einer Kapsel (rechts); im EDX-Spektrum ist jetzt hauptsächlich das ausgeprägte Kohlenstoffsignal des Präpolymers und nicht die Signale der Hybridpolymermatrix (vgl. Bild 1) zu sehen; zudem weisen die weichen, dunklen Übergänge in der REM-Aufnahme auf »getrocknete Flüssigkeit« hin und sind somit ebenfalls ein Indiz für das Präpolymer.

## Poröse Glasflakes in Baustoffen und Farben für das Klimamanagement

Einer der wichtigsten Umwelteinflüsse auf den Menschen ist die Sicherheit und Qualität der Gebäude, in denen er sich durchschnittlich zu 85 % seiner Zeit aufhält. Nachhaltige Bauweisen und umweltfreundliche, unbedenkliche Baustoffe sind daher unabdingbar. Darüber hinaus hängen Energieverbrauch, Gesundheit, Wohlbefinden und Komfort in hohem Maße von der Verwendung optimierter Bauprodukte ab.

Feuchte- und Wärmemanagement im Gebäude ist nicht nur in der Bauphysik ein wichtiger Aspekt. Neben dem Energieverbrauch und der Behaglichkeit für die Nutzer wird auch der Einfluss feuchteabsorbierender bzw. -desorbierender Oberflächen in Räumen diskutiert. Insbesondere durch steigende Dämmstandards von Gebäuden und erhöhte Anforderungen an die Dichtheit der Gebäudehülle kann es zu Problemen mit hohen Wohnraumfeuchten und Schimmelpilzbefall kommen.

Über Wände und Decken stehen in Wohnräumen große Flächen zur Verfügung, die für eine Feuchteregulierung genutzt werden können. Hierfür bieten sich anorganische Materialien an, die eine bestimmte Porosität haben und sich in Tapeten, Farben, Putze und Gipse einbringen lassen. Diese können einen Teil der täglich und jahreszeitlich bedingten Feuchteschwankungen abpuffern. Durch solche Materialien würde den Bewohnern deutlich weniger Verhaltensbeschränkungen auferlegt werden, wie z. B. feste Lüftungszyklen. Die Vorteile von wasseraufnehmenden bzw. -abgebenden Farben, Putzen und Gipsen liegen in der Energiegewinnung bei der Kondensation von Wasser in den Füllstoffen sowie in der gesteigerten subjektiven Behaglichkeit durch Reduzierung der Luftfeuchtigkeit.

Mögliche anorganische Materialien sind (natürliche oder künstliche) Zeolithe oder künstlich hergestellte poröse Gläser bzw. Keramiken. Gegenüber natürlichen Materialien lassen sich speziell hergestellte Materialien hinsichtlich der Spezifi-

kationen wie Porenvolumen, Porengröße und Partikelform optimieren. Auch Zusatzeffekte, wie z. B. das Einbringen von Schimmelpilz hemmenden Dotierungen, sind bei Gläsern und Keramiken denkbar. Gläser und Keramiken können über ein gezieltes Sintern in den porösen Zustand gebracht werden, Gläser außerdem über eine spinoidale Entmischung und das Herauslösen einer Phase (Vycorverfahren).

Der Vorteil von Glas gegenüber Keramiken liegt in der einfachen Formbarkeit bei der Herstellung, die bei der Entmischungsrouten genutzt werden kann. Die so entstehenden Glasflakes lassen sich als Füllstoffe mit einem deutlich höheren Volumenanteil in Anstrichfarben einbringen als isotrope Partikel. In jedem Fall muss das Material preisgünstig und in großen Mengen herstellbar sein, um für Anwendungen im Baubereich attraktiv zu sein.

Ziel des Projekts war die Entwicklung von porösen glasigen Füllstoffen für Farben, Putze und Gipse zum Klimamanagement (Feuchtigkeits- und Wärmehaushalt sowie Raumluftqualität) in Wohn- und Arbeitsräumen. Es konnte gezeigt werden, dass die Gläser in Chargen von mehreren 100 kg in Form von Pulvern bzw. Flakes in Dicken von 1 – 10 µm hergestellt werden können. In dem Material können gezielt Porengrößen zwischen wenigen Nano- bis mehreren Mikrometern eingestellt werden. Das Material weist eine hohe Feuchteaufnahmekapazität auf, die auch noch nach dem Einarbeiten in Farben und Putze vorhanden ist. Modellrechnungen wie auch erste Praxistests zeigen, dass entsprechend modifizierte Baumaterialien einen nennenswerten Einfluss auf die Energiebilanz eines Gebäudes nehmen und dabei gleichzeitig die Wohnbehaglichkeit erhöhen. Zusätzlich besteht die Option, weitere aktive Funktionen wie fungizide oder katalytische Eigenschaften einzubauen.

Bild 2 a: Prinzip der Untersuchung – Betonprobe im Wasserbad. Die Änderung der Probenausdehnung wird simultan in Schichten untersucht, um dabei die verschiedene Belastungszonen zu charakterisieren.

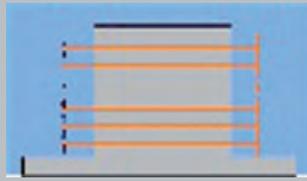


Bild 2 b: Konturbild der Probe während des Versuchs. Es ist eine Blasenbildung an der Oberfläche zu erkennen.



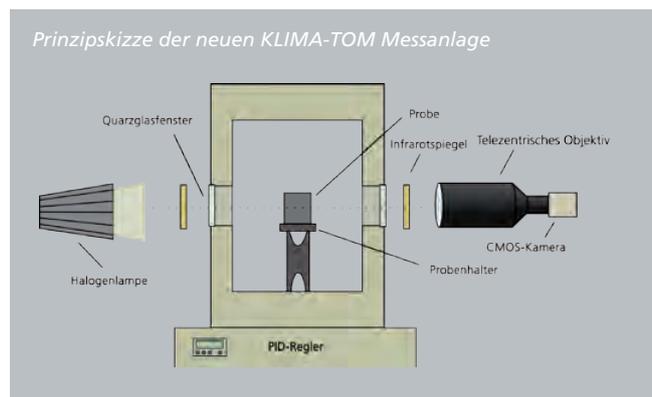
Bild 2 c: Ausgehärteter Beton nach der Untersuchung. Die Austrittsöffnungen der Gasblasen an der Oberfläche sind zu erkennen. Solch eine Porenbildung stellt eine Qualitätsminderung dar.



## Einsatz thermo-optischer Messverfahren bei der Bewertung von Sekundärrohstoffen für die Baustoffindustrie

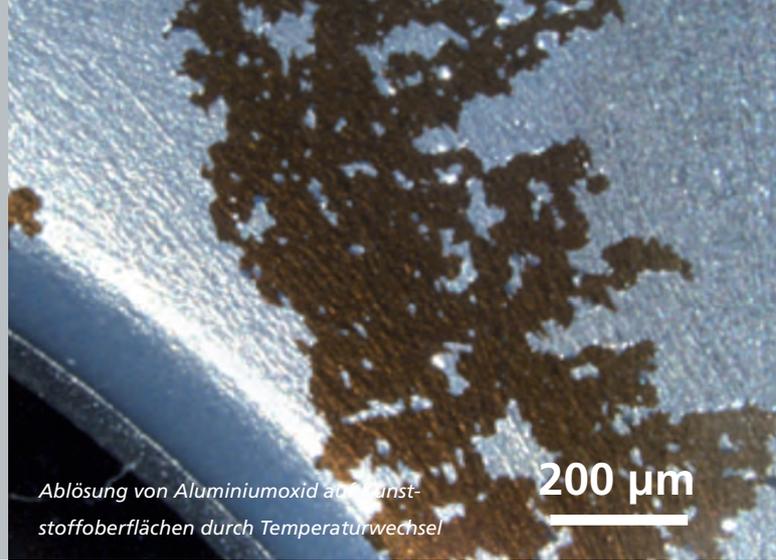
Zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise gehört die effektive Gewinnung und Verwertung von Sekundärrohstoffen mit großem Einsparpotential in vielen Bereichen der Wirtschaft. Viele organische Abfälle aus Land- und Forstwirtschaft werden heute in Biogasanlagen zur Energieerzeugung genutzt, andere Abfallstoffe können nach bestimmten Aufbereitungs- und Veredelungsverfahren wiederverwertet werden, insbesondere für dringend notwendige Infrastrukturmaßnahmen und in der Baustoffindustrie.

Da sich im Europäischen Wirtschaftsraum die Richtlinien für Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz immer weiter verschärfen, müssen die Prozesse zur Gewinnung und Verwertung von Sekundärrohstoffen mit neuen Verfahren optimiert werden, um die Materialien besonders in der Baustoffindustrie überhaupt einsetzen zu können. Die Effizienzsteigerung der Verbrennungsprozesse und die Verwertung der Abfallstoffe, insbesondere der anfallenden Schlacken, steht dabei im Fokus bei der Entwicklung neuartiger Konzepte und Anlagen, aber auch das Verhalten von Sekundärrohstoffen beim Einsatz in Baustoffen unter normalen Umweltbedingungen. Wichtiges Bewertungskriterium für das Material ist das Verhalten bei wechselnden Temperaturen im Bereich von  $-70\text{ °C}$  bis  $+180\text{ °C}$  und wechselnder Feuchte von  $0 - 100\%$ . Am Fraunhofer ISC wird seit über 20 Jahren an der Entwicklung von neuen Messverfahren gearbeitet, die thermische Prozesse bei der Materialentwicklung in situ analysieren und bei der Bewertung und Optimierung helfen. Diese sogenannten thermo-optischen Messverfahren, kurz TOM genannt, wurden bis zum heutigen Zeitpunkt so weit verfeinert, dass sie industriell für eine Vielzahl von Anwendungen in den Entwicklungsabteilungen vieler Firmen und Universitäten nutzbar sind. Für die Bewertung von Primär- und Sekundärrohstoffen wird derzeit ein angepasstes, sogenanntes KLIMA-TOM-Verfahren entwickelt. Hauptbestandteil des Messsystems ist ein Ofen, beim KLIMA-TOM ein Klimaschrank, der mit einer Heizung und einem Feuchtegeber



ausgestattet ist, um Temperaturen und Feuchtwerte stabil zu halten. Um nun das Verhalten des Materials, beispielsweise verschiedener Baustoffe und Betone, beurteilen zu können, sind an beiden Seiten des Ofens entlang einer horizontalen Achse zwei Öffnungen angebracht, die mit Sichtfenstern ausgestattet sind. Mit einer aufwendigen Optik wird durch Bildanalyse die Konturänderung einer in der optischen Achse platzierten Probe beim thermischen Prozess präzise aufgezeichnet und vermessen. Die Auflösung dabei beträgt  $0,4\text{ }\mu\text{m}$ .

Wie in der Bildfolge gezeigt, kann durch genaue Einstellung der Temperatur und Feuchte das Verhalten bei der Trocknung des Materials unter Industriebedingungen nachgestellt und untersucht werden. Diese Daten werden genutzt, um Produktionsprozesse zu optimieren. So können Rohstoffmischungen hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung verbessert werden, Trocknungs- und Wärmeprozesse zeitsparend ausgelegt und Energie gespart werden. Bei optimaler Verarbeitung von Betonen können zum Beispiel im Innenbereich eines Hauses Schimmelbildung und biochemisch induzierte Korrosionsprozesse vermieden werden.



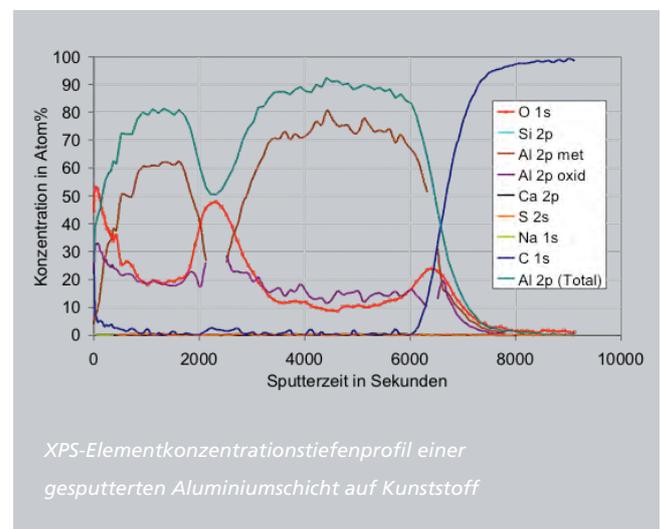
## Umwelt und Analytik

Neu zu entwickelnde Materialien und Werkstoffe sind bei ihrer Anwendung unterschiedlichen Umweltbedingungen ausgesetzt, z. B. Temperaturwechseln zwischen -40 °C und +120 °C bei direkter Sonneneinstrahlung, Feuchtigkeitswechseln zwischen »sehr trocken« im Sommer und »nass« bei Taupunktunterschreitung, oxidativem Angriff der Luft oder auch dem Angriff durch Pilze und Bakterien, dem sogenannten Biofouling. Bei Einsatz der Materialien in Meeresnähe kommt noch der Einfluss des Salzes hinzu, das einen korrosiven Angriff beschleunigt. Salzbelastungen findet man aber nicht nur in Meeresnähe, sondern auch während des Winters auf den Straßen, wenn die Fahrbahn mit Salz eisfrei gehalten wird. Bei porösen oder rissbehafteten Materialien kann Wasser eindringen und bei Minustemperaturen gefrieren und aufgrund der damit verbundenen Ausdehnung das Material schädigen bis hin zu einem strukturellen Versagen.

Bauwerkstoffe, Materialien für den Bereich Automotive und Verkehr im Allgemeinen, d. h. Materialien, die weltweit Anwendung finden, müssen diesen korrosiven und thermisch oder UV-induzierten Belastungen standhalten. Am Fraunhofer ISC werden die jeweiligen Umwelteinflüsse nachgestellt und ihr Einfluss auf die eingesetzten Werkstoffe analysiert. Auf makroskopischer Ebene werden die Materialien dazu in Klimakammern künstlich bewittert sowie in der gerade in Entwicklung befindlichen KLIMA-TOM-Anlage über die Bewitterungszeit optisch analysiert. Darüber hinaus werden sie anschließend mikroskopisch mit verschiedenen analytischen Geräten untersucht, um so die Korrelationen zwischen den Umwelteinflüssen und den Mikrostruktur- und Eigenschaftsänderungen herauszuarbeiten.

Basierend auf dieser präzisen Analytik bis in den Nanometermaßstab können so Umwelteinflüsse auf ein Material nachgestellt, untersucht und daraus abgeleitet Problemlösungs- und Anwendungsstrategien entwickelt werden. Als Beispiel für die Analytik des Umwelteinflusses auf Werkstoffe

seien Aluminiumbeschichtungen auf Kunststoffen genannt. Im konkreten Fall konnte gezeigt werden, dass die in der Produktion eingesetzte Materialkombination den häufigen Temperaturwechseln nicht standhielt und dadurch die beobachteten Schadensbilder entstanden. Mikroskopisch betrachtet zeigte sich eine Oxidation des Aluminiums im Grenzflächenbereich. Das entstandene Aluminiumoxid, auch wenn seine Dicke nur im Nanometerbereich lag, reagierte auf thermisch induzierte Dehnungsänderungen anders als die übrigen Materialien, wodurch es zu Ablösungen der darauf liegenden Aluminiumschicht kam.



Das Aluminium wurde in zwei Sputterprozessschritten aufgebracht. Die rote Kurve zeigt die Sauerstoffkonzentration. Sowohl direkt an der Grenzfläche zum Kunststoffsubstrat als auch zwischen den beiden Aluminiumschichten steigt die Sauerstoffkonzentration deutlich an. Aus den Messergebnissen lässt sich auf die chemische Bindung der vorhandenen Elemente schließen. Die braune Kurve zeigt metallisches Aluminium und die violette Aluminiumoxid. Der Anstieg der Sauerstoffkonzentration korreliert mit einer Zunahme der Aluminiumoxidkonzentration. Dieses Ergebnis erlaubt Rückschlüsse auf den Herstellungsprozess (Prozessanalytik), d. h. der Sputterprozess ist im vorliegenden Fall extrem anfällig für vorhandenen

Rest-Sauerstoff. Mit dieser Bewertung kamen zwei Lösungsansätze infrage: Entweder musste die Reinheit des Herstellungsprozesses verbessert oder ein anderes Beschichtungsmaterial gefunden und im Prozess verwendet werden, das gegenüber Sauerstoff toleranter als Aluminium ist. Man entschied sich für ein neues Materialdesign und hatte damit Erfolg.

Wie das Beispiel zeigt, kann ein Umwelteinfluss – in diesem Fall Restgasspuren aus Luft – schon im Produktionsprozess durch eine Kombination mit weiteren Einflüssen – hier die nachfolgende Temperaturänderung – zu einem Schadbild führen, das sich nur durch den Eingriff in den Herstellungsprozess vermeiden lässt. Die präzise Analyse des Schadbildes, verbunden mit der genauen Kenntnis der Herstellprozesse, schafft die Voraussetzung für einen praktikablen Lösungsansatz.

Hierzu stehen am Fraunhofer ISC im Zentrum für Angewandte Analytik ZAA zahlreiche Messmethoden und Erfahrungswerte zur Verfügung und in den angrenzenden Materialentwicklungsbereichen hohe Kompetenz in Materialdesign und -optimierung. Aber es können auch neue Materialdesigns entworfen werden, ausgehend von molekularen Vorstufen über Sol-Gel-Prozesse («bottom-up approach»). Durch systematische Anwendung nanotechnologischer Prinzipien sind multifunktionelle Materialien mit neuen Eigenschaftsprofilen erreichbar.

---

### **NANOMATCH – Restaurierung mit Nanomaterialien**

---

Treibhausgasemissionen nehmen weltweit dramatisch zu, da der Energiebedarf für die stürmische industrielle Entwicklung in den bevölkerungsreichen Schwellenländern (China, Indien und Brasilien) durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe gedeckt wird. Die resultierenden globalen Klimaveränderungen und extremen Witterungsbedingungen wirken sich zunehmend auch auf die historische Bausubstanz in den Ländern der nördlichen Hemisphäre aus. Eine Temperaturerhöhung um wenige Grad beschleunigt chemische Reaktionen massiv und damit auch Korrosionsphänomene, die den

Erhalt unseres jahrhundertealten kulturellen Erbes gefährden. Diese Kulturgüter stellen u. a. auch einen erheblichen Wirtschaftsfaktor für die Tourismusbranche dar.

Die Schädigungsprozesse, die bereits vor längerer Zeit durch die Industrialisierung und durch Luftschadstoffe in Gang gesetzt wurden, werden dadurch beschleunigt. Restaurierungsmaßnahmen erfordern ein immer früheres Eingreifen und die Entwicklung neuer Materialien, die bereits kurz nach dem Auftreten erneuter Degradationserscheinungen (Mikrorisse, Punktdefekte, Oberflächenerosion) angewendet werden können. Nasschemisch applizierbare Reparaturwerkstoffe, die aufgrund ihrer niedrigen Viskosität auch feine Kapillarrisse ausfüllen und vor Ort am Objekt aufgetragen werden können, sind anderen Technologien in diesem Fall weit überlegen und Methode der Wahl. Der Sol-Gel-Prozess bietet vielfältige Möglichkeiten zur Herstellung anorganischer und hybrider Stoffe, die nachweislich auch nach vielen Jahren der Exposition am Objekt noch weitestgehend unverändert vorliegen.

Im Rahmen eines Europäischen Verbundprojekts mit 15 Partnern aus acht Ländern werden für die Glas- und Steinkonservierung neue anorganische Stoffsysteme auf Sol-Gel-Basis entwickelt und industriell umgesetzt, die Defekte frühzeitig ausheilen, Oberflächen stabilisieren, und sich umweltfreundlich applizieren lassen. Fallstudien am Kölner Dom (Glas, Holz), an der Kathedrale von Oviedo (Kalkstein), an der Opera di Santa Croce in Florenz (Fresken), und an der Stavropoleos Monastery in Bukarest (Stuck, Fresken) demonstrieren die Eignung und Anwendbarkeit der neuen Restaurierungswerkstoffe an wertvoller historischer Bausubstanz.

### **Kontakt**

**Dr. Gerhard Schottner**

☎ +49 931 4100-627

[gerhard.schottner@isc.fraunhofer.de](mailto:gerhard.schottner@isc.fraunhofer.de)



---

---

# GESUNDHEIT

---

---

## Geschäftsbereich GESUNDHEIT

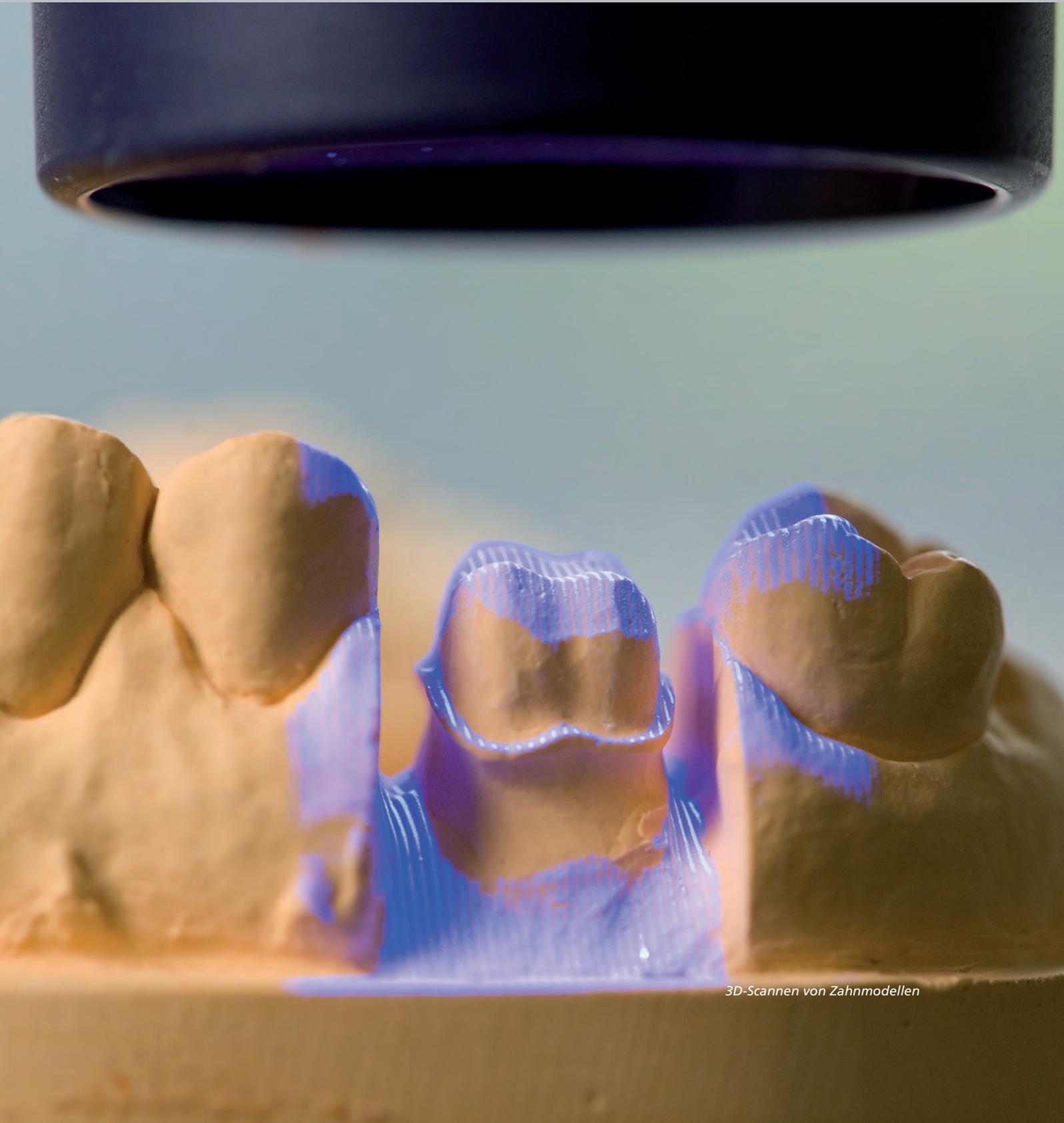
*»In der ersten Hälfte des Lebens opfern wir unsere Gesundheit, um Geld zu verdienen. In der anderen Hälfte opfern wir Geld, um die Gesundheit wiederzuerlangen.«  
Voltaire, französischer Autor und Aufklärer (1694-1778)*

Die Medizin der Zukunft braucht neuartige Diagnostik- und Therapieformen, um die Herausforderungen der demografischen Entwicklung wie auch die Folgen der großen Volkskrankheiten zu meistern. Gleichzeitig muss die Bezahlbarkeit neuer High-Tech-Verfahren gewährleistet sein, um angesichts des Kostendrucks im Gesundheitswesen jedem Bedürftigen die bestmögliche Versorgung zukommen lassen zu können. Dieser Spagat kann nur gelingen, wenn neue Wege beschritten werden, die sich erst durch die enge Verzahnung unterschiedlichster Disziplinen eröffnen. Ein zentrales Element der Wertschöpfungskette ist dabei die Entwicklung innovativer multifunktionaler Materialien, die hochwertige und bezahlbare Produkte für Diagnostik, Therapie und Überwachung realisierbar machen. Ziel der maßgeschneiderten Werkstofflösungen ist stets, angewandte Grundlagenforschung in Zusammenarbeit mit Klinikern und Unternehmen schnell, effektiv und kostenbewusst in die medizinische Regelversorgung zu übertragen. Der Geschäftsbereich Gesundheit fokussiert sich dabei auf die Gebiete:

- Regenerative Medizin
- Dentalmedizin
- Diagnostik

Werkstoffentwicklungen in diesen Bereichen können nicht selten in andere Bereiche transferiert werden, wie etwa in die Anwendungsfelder High-Tech Medical Devices (Sensorische Implantate, endoskopische Instrumente für MIC, Orthesen, Ophthalmologie), Biophotonic (Wellness, »gesundes Licht«, gesundes Wohnen, Biochips, Biosensorik) und Pharmaceutical Packaging (Wasserdampf und Sauerstoff-Barrieren, Lichtschutz, Desorption). Grund dafür ist, dass die Materialforschung am Fraunhofer ISC Querschnittstechnologien bedient, die in fast allen Gebieten der Gesundheitsforschung Einsatzpotentiale haben. Hier gilt es, sich auch in Zukunft eine gewisse Flexibilität zu erhalten, um adäquat und schnell auf neue Bedürfnisse des Marktes und unserer Kunden reagieren zu können.

Die Erweiterung der Laborkapazität für den Geschäftsbereich Gesundheit im Rahmen des Mitte 2013 fertiggestellten Technikumneubaus erlaubt es, in neuen biologischen und GMP-nah gestalteten Laboren neue Materialklassen und Werkstofffunktionalitäten zu entwickeln. In diesem Zusammenhang wird die bisher schon enge Kooperation mit externen Zell- und Mikrobiologen weiter intensiviert. Themenfelder wie Theranostik, biohybride Werkstoffe und Smart Biointeractions sollen in den nächsten Jahren in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Regenerative Medizin und Tissue Engineering der Universität Würzburg (Prof. Heike Walles, Teilbereiche In-vitro-Systeme und Zellsysteme) und dem Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (Prof. Stefan Barth, Teilbereiche Biopharmaceuticals und Tiermodelle) erschlossen werden.



*3D-Scannen von Zahnmodellen*

## Nanopartikelbasierte In-vitro-Diagnostik von Prostatakarzinomen

Das Prostatakarzinom (PCa) ist die am häufigsten diagnostizierte Krebserkrankung des Mannes. Insgesamt tragen 40 % der männlichen Bevölkerung das Risiko, im Laufe ihres Lebens ein PCa zu entwickeln. Aber nur etwa 10 % werden symptomatisch und nur 3 % versterben daran. Die Einführung des Tumormarkers PSA Tests zum Ende der 80er Jahre hat zu einer stetigen Zunahme neu diagnostizierter PCa geführt.

Eine steigende Anzahl von Medizinern zweifelt allerdings an der Aussagekraft dieses Tests, da es in vielen Fällen zu einer falsch positiven Diagnose kommt. Mit fatalen Folgen: In den Jahren 1986 bis 2005 wurden eine Million Männer nur aufgrund eines positiven PSA-Tests mittels Resektion und/oder Bestrahlung therapiert. Mindestens 5000 dieser Patienten starben kurz nach der OP, 10 000 bis 70 000 litten unter schweren Komplikationen, bei 20 000 bis 30 000 kam es zu Nebenwirkungen wie etwa Impotenz oder Inkontinenz. Anfang Oktober 2011 reagierte daher ein Gremium des US-Gesundheitsministeriums, die U.S. Preventive Services Task Force, mit der Empfehlung, den routinemäßigen PSA-Vorsorgetest abzuschaffen.

Der zuverlässigeren klinischen und molekularen Charakterisierung des PCa kommt aus diesem Grund in der Zukunft eine große Bedeutung zu. Sowohl neue Biomarker als auch verbesserte zielgerichtete Therapien sind dringend notwendig, um Übertherapie zu vermeiden und die Behandlung fortgeschrittener PCa im Rahmen eines individualisierten Therapiekonzepts zu verbessern. Im Hinblick auf ihre Beteiligung an Tumorgenese und -progression sind spezielle kleine regulatorische RNA-Moleküle, sogenannte miRNA, wegen ihrer regulatorischen Funktionen in Proliferation, Differenzierung, Apoptose und Migration in den Fokus der Forscher gerückt. Im Jahr 2008 wiesen Mitchell et al. erstmals nach, dass Zellen

epithelialer Tumoren, speziell PCa-Zellen, miRNAs in den Blutstrom abgeben. Im Serum von Patienten mit metastasiertem PCa war der Wert für miRNA-141 signifikant erhöht im Vergleich zu gesunden Probanden.

Zentrale Elemente in der Entwicklung neuer hocheffizienter Diagnostikverfahren am Fraunhofer ISC sind multifunktionelle nanopartikelbasierte Materialsysteme und neue hochsensitive Nachweismethoden. Sie erlauben die Identifizierung und Validierung krankheitsspezifischer miRNA-Biomarker, die in geringsten Konzentrationen in Körperflüssigkeiten und Tumorgewebe vorhanden sind.

Zu diesem Zweck wurde eine neue Arbeitsgruppe »Nanopartikelbasierte Diagnostik« etabliert, deren Forschungsarbeiten die Entwicklung neuer hocheffizienter In-vitro-Assays zur molekularen Diagnostik zum Schwerpunkt haben. Die Assays sollen dabei mit gängigen analytischen Verfahren im klinischen Laboralltag kompatibel sein. Die Forschungsgruppe ist interdisziplinär ausgerichtet und deckt so die wichtigsten Themenfelder und die notwendigen Kompetenzen zur erfolgreichen Entwicklung neuartiger Diagnostikverfahren ab.

Im Einzelnen werden – zum Teil in enger Kooperation mit Fachkliniken und anderen Forschungseinrichtungen – folgende Teilbereiche bearbeitet:

- Validierung identifizierter Biomarker zur Festlegung von krankheitsspezifischen Parametern und deren Grenzwerten für die Frühdiagnostik und Verlaufskontrolle einer Erkrankung.
- Assay-spezifische Entwicklung von multifunktionellen Nanopartikel für physiologische Systeme als Ausgangsbasis für die spätere Ankopplung von Biomolekülen und die Anpassung an die Sensorik. Aufgrund ihrer größenabhängigen Eigenschaften eröffnen diese Werkstoffe neue Wege in der



Funktionalisierte Nanopartikel

Weiterentwicklung individualisierter Diagnostik. Sie können Biomarker binden, signalgebende Wirkstoffe kapseln und diese im In-vitro-Einsatz unterschiedlichen optischen Nachweisverfahren zugänglich machen.

- Methodenentwicklung für den Funktionsnachweis der Assays durch die Analyse der relevanten Randbedingungen für nanopartikel-basierte In-vitro-Diagnostik, Ableitung von Anforderungen zur Auslegung der Probengestaltung, Aufbau einer Versuchsplattform, Testen und Verifizieren der Methode.

Als Zukunftsvision soll durch die Bündelung der Kompetenzen eine Technologieplattform als Grundlage zur beschleunigten Entwicklung diagnostischer Methoden auf nanopartikulärer Basis etabliert werden.

---

#### **Attract-Forscherguppe »Zellbasierte Assays auf 3D-bottom-up-nanostrukturierten Oberflächen für regenerative Implantate und Trägerstrukturen« (3D NanoCell)**

---

Im Rahmen des Fraunhofer-internen Programms »Attract« konnte Prof. Doris Heinrich, die bis dato eine Arbeitsgruppe Biophysik an der LMU München leitete, für ein zunächst auf fünf Jahre angelegtes Projekt auf dem Gebiet »Wechselwirkungen von humanen Zellen und strukturierten Oberflächen« gewonnen werden. Die insgesamt sechsköpfige Forschergruppe wird mit Unterstützung aus anderen Kompetenzbereichen am Fraunhofer ISC gezielt dreidimensionale Strukturen an Werkstoffoberflächen einstellen, in denen Zellen möglichst vergleichbar zum natürlichen Gewebe wachsen können.

Für eine optimale Zellbesiedlung soll eine individuell anpassbare 3D-Struktur in Kombination mit einer nanoskaligen Oberflächenstrukturierung und biochemischen Funktionalisierung eingesetzt werden, sodass die Zellen ausreichend stabil

im Raum vernetzt sind, aber auch die Nährstoffversorgung in allen Bereichen gewährleistet ist. Eine Kombination aus High-Tech-Materialien und Zellgewebe soll die Integration in das biologische Milieu beschleunigen und dauerhaft gewährleisten. Um jedoch Zellfunktionen zu kontrollieren und zu steuern, muss ein noch detaillierteres Verständnis der Zytoskelett-Regulation in lebenden Zellen gewonnen werden. Das ist ebenso Projektziel wie die Entwicklung entsprechender standardisierter diagnostischer Assays, die eine solche Steuerung und Kontrolle gewährleisten.

Schon mittelfristig könnte aus diesem Projekt eine neue Implantatgeneration hervorgehen, deren nanostrukturierte Oberflächen nicht nur die antibakterielle Wirkung verbessern, sondern auch den notwendigen kraftschlüssigen Verbund zum umliegenden Gewebe liefern (z. B. bei Gelenkprothesen die physiologische Kraftübertragung zwischen Knochengewebe und Prothesenschaft des Implantats).

Längerfristig könnten Trägerstrukturen für das Tissue Engineering so nanostrukturiert werden, dass Zellfunktionen wie Adhäsion, Proliferation oder Differenzierung gezielt stimuliert werden.

Die Attract-Forscherguppe wird eng mit den Materialforschern des Fraunhofer ISC und mehreren Lehrstühlen der Universität Würzburg zusammenarbeiten.

---

## Dentale Glaskeramik

---

Als Zahnersatzmaterialien haben sich Glaskeramiken in vielen Fällen bewährt. Über den kristallinen Bestandteil und dessen Einstellbarkeit hinsichtlich Kristallgröße und Phasenanteil lassen sich die Transluzenz (partielle Lichtdurchlässigkeit) und die mechanischen Eigenschaften (z. B. Festigkeit und Polierverhalten) einstellen. Außerdem verbessert sich im Vergleich zu reinem Glas die chemische Beständigkeit, ein wichtiger Aspekt für den Einsatz im Mundmilieu.

Für CAD/CAM-Anwendungen kommt eine weitere Eigenschaft zum Tragen: Das Material kann in einer Zwischenstufe im Kristallisationsprozess mechanisch leicht und schnell bearbeitet werden und anschließend in einem kurzen Temperschnitt zur finalen, hochfesten Glaskeramik transformiert werden. Der CAD/CAM-Prozess findet direkt beim Zahnarzt oder im Zahnlabor auf Basis der individuellen Patientenbedürfnisse statt. Oftmals kann durch dieses Verfahren auf ein zeit- und kostenintensives Provisorium verzichtet werden.

In Zusammenarbeit mit der VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG (Bad Säckingen) und der DeguDent GmbH (Hanau) wurden am Fraunhofer ISC im Zeitraum von 2009 bis 2012 sowohl eine neuartige Glaskeramik als auch eine ans Material angepasste Anlage zur Herstellung von Dentalblocks entwickelt. Die patentierte neue Glaskeramik zeichnet sich durch eine hervorragende Transluzenz, exzellente chemische Beständigkeit und großartige Festigkeit aus. Das Material kann in einem extrem großen Fenster des Kristallisationsprozesses mit den gängigen dentalen CAM-Systemen bearbeitet und sehr schnell und formstabil zum finalen Material umgewandelt werden. Es lässt sich außerordentlich gut farblich anpassen und durch den Zahnarzt nachbearbeiten (Politur).

Am Fraunhofer ISC wurde eine Prototypenanlage zur Herstellung von Dentalblocks aus diesem Material konzipiert, aufgebaut und eingefahren. Mit dieser Anlage kann bereits eine monatliche Produktion von Blocks in verschiedenen Farben gefahren werden. Sowohl die Materialentwicklung als auch der Anlagenbau fanden im zertifizierten Fachbereich Glas unter Berücksichtigung der für Medizinprodukte geltenden Richtlinien und geforderten QM-Maßnahmen statt. Das Material wurde unter den Produktnamen Suprinity® und Celtra® von beiden Industriepartnern auf der Internationalen Dental Show (IDS, März 2013 in Köln) vorgestellt und wird voraussichtlich im September auf den Markt kommen.

---

## Sulfonsäure-funktionalisierte ORMOCER®e für die Anwendung als All-in-one-Adhäsiv

---

Die klinische Effektivität in der adhäsiven Zahnheilkunde gründet zu einem entscheidenden Teil auf dem langfristigen Verbund zwischen dem Restaurationsmaterial (Füllungskomposit) und der Zahnhartsubstanz (Dentin, Schmelz). Eine Schlüsselrolle übernehmen neben hochwertigen Restaurationsmaterialien (Kompositfüllung) die Adhäsivsysteme. Diese sollen eine sehr einfache, wenig zeitintensive und fehlertolerante Applikation im klinischen Einsatz haben und gleichzeitig den hohen Ansprüchen hinsichtlich der Biokompatibilität genügen.

Mit konventionell erhältlichen monomerbasierten selbststärkenden Adhäsivsystemen ist dieses Anforderungspaket bisher nicht in vollem Umfang zu realisieren. Ein wesentliches Defizit neben dem Auftreten von Verfärbungen und allergischen Reaktionen ist die Bildung von Randspalten, in denen sich Sekundärkaries ausbreiten kann und infolgedessen die Restauration erneuert werden muss.



Fräsen einer Chairside-Krone

Neuartige All-in-one-Adhäsive auf der Basis von Sulfonsäure-funktionalisierten ORMOCER®en bieten hierfür eine ausgezeichnete Lösung. Die Behandlungszeit, die den kostenintensivsten Bestandteil darstellt, lässt sich durch diese Adhäsive auf Grund der Reduktion der Applikationsschritte signifikant verkürzen (um ca. 30-50%).

Eine fehlertolerante Applizierbarkeit sowie eine stabilere Verankerung durch eine optimale Ätzung der Kavitätenoberfläche und die dadurch verbesserten mikromechanischen Haftungsmechanismen, verlängern letztlich die Lebensdauer einer Restauration und vermeiden aufwendige Folgebehandlungen wegen Sekundärkaries oder Verlust der Füllung.

Aufgrund der sehr guten Wasserlöslichkeit dieser ORMOCER®e kann auf weitere Lösungsmittel, wie etwa Aceton, verzichtet werden, wodurch das Auftreten von allergischen Reaktionen minimiert wird. Zudem verspricht das monomerfreie Konzept unter Verzicht auf klassische Methacrylatmonomere, insbesondere HEMA, sowie der Einsatz hydrolytisch unempfindlicher Strukturen eine deutliche Verbesserung der Biokompatibilität und dementsprechend einen hohen Patientennutzen. Somit stellen diese ORMOCER®e eine ideale Materialbasis dar für hochwertige, aber dennoch einfach zu applizierende und bezahlbare All-in-one-Adhäsive.

---

## Chairside-Krone

---

ORMOCER®-basierte Komposite sind schon seit vielen Jahren als direktes Zahnrestaurations- und Prophylaxematerial im Dental-Markt vertreten. Mit dem neuartigen Therapiekonzept »Chairside-Volkskrone« soll durch eine optimierte Materialbasis ein hochwertiges, aber dennoch bezahlbares Kronenmaterial bereitgestellt werden.

Die digitale Abdrucknahme mit einem Oralscanner sowie die Herstellung einer ästhetisch hochwertigen Krone (z. B. durch ein patientenindividuelles Mehrschichtsystem und »Malfarben« zur Farbanpassung) und das anschließende Einsetzen sind »chairside«, d. h. in einer Sitzung, ohne zahntechnisches Fachpersonal, möglich.

Weitere Vorteile der ORMOCER®-basierten Chairside-Krone sind das Wegfallen einer aufwendigen Nachbearbeitung sowie die intraorale Reparaturmöglichkeit, die bei Keramikkrone nicht gegeben ist. Eine kostenintensive Nachbehandlung sowie Neuanfertigung der Krone wären im letzteren Fall die Folge.

Im Gegensatz zu klassischen Keramikkrone lassen sich durch das Chairside-Verfahren, in Verbindung mit ORMOCER®-basierten Kompositen, der Arbeitsaufwand sowie die Belastung für den Patienten (nur einmalige Lokalanästhesie) minimieren und die Behandlungskosten deutlich senken. ORMOCER®-basierte Komposite stellen somit eine hervorragende Materialbasis für einen hochwertigen, ästhetisch anspruchsvollen und vergleichsweise kostengünstigen Zahnersatz dar.

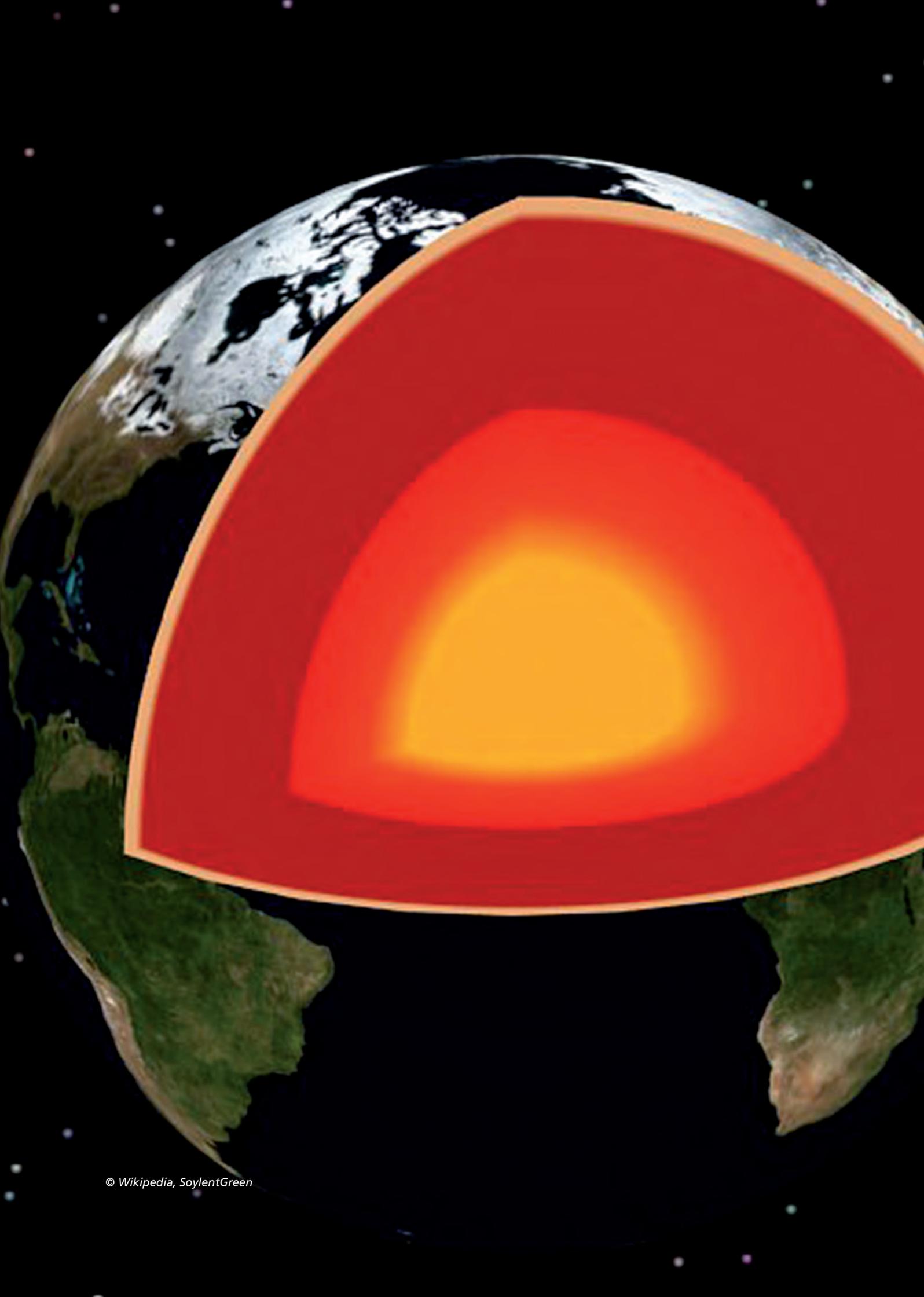
## Kontakt

Dr. Jörn Probst

☎ +49 931 4100-249

[joern.probst@isc.fraunhofer.de](mailto:joern.probst@isc.fraunhofer.de)





# ENERGIE

---

---

## MIT ENERGIE IN DIE ENERGIEWENDE

*Energie ist essentiell – nur eine gesicherte Energieversorgung und ein verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen sind die Brücke in eine prosperierende Zukunft für moderne Industrienationen.*

Mit unserer Forschung an innovativen Materialien, Anwendungen und neuen Technologien tragen wir dazu bei, mittel- und langfristig das hohe Niveau unseres Lebensstandards durch erschwingliche zuverlässige Energieversorgung zu sichern. Ziel ist es, gemeinsam mit unseren Kunden nachhaltige, ökonomisch und ökologisch sinnvolle Wege zu finden für die Erzeugung, Speicherung und effizientere Nutzung von Energie im breiten Spektrum ihrer jeweiligen Zielanwendung.

Die aktuelle Forschung wird naturgemäß sehr stark geprägt von der »Energiewende«, dem fortschreitenden energiepolitischen Umbruch in Deutschland hin zum Ausbau der erneuerbaren Energien. Die heute verfügbaren Technologien in den Bereichen Windenergie, Wasserkraft, Sonnenenergie, Bioenergie und Geothermie sind in vielen Fällen aber erst am Anfang ihrer Entwicklung und erfordern noch erhebliche Anstrengungen zur technischen Optimierung. Eine vor allem auf erneuerbaren Energien gegründete Energieversorgung wird außerdem einen weit dezentraleren Charakter haben als es bisher erforderlich war. Das bedeutet neue Infrastruktur, neue Speichertechnologien und neue Übertragungs- und Regeltechniken.

Begleitet werden muss die nachhaltige Energieversorgung mit regenerativen Energieträgern durch Energieeinsparung und höhere Energieeffizienz. Die hierzu noch notwendigen technologischen Sprünge können nur durch eine intensive Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und der Industrie erreicht werden. Dabei eröffnet die breite materialwissenschaftliche Basis des Fraunhofer ISC faszinierende

Möglichkeiten für kurz- und mittelfristige Lösungen. Beispielsweise bietet die konventionelle Energiewandlung auf der Basis fossiler Brennstoffe noch hohes Einsparpotenzial. Die effiziente Nutzung von Braun- bzw. Steinkohle hängt in besonderem Maße von moderner Kraftwerkstechnologie ab. Eine Optimierung der Verbrennungsprozesse und die Reinigung der Feuerungsanlagen von Abfallstoffen, insbesondere der anfallenden Schlacken, stehen dabei im Fokus bei der Entwicklung neuartiger Konzepte und Anlagen. Mit den am Center of Device Development (CeDeD) des Fraunhofer ISC entwickelten thermo-optischen Messgeräten (TOM) können Verbrennungs- und Reinigungsprozesse im Labormaßstab genau analysiert und Ansätze für deren Optimierung entwickelt werden. Damit lassen sich viele Tonnen Kohle für die gleiche nutzbare Energiemenge einsparen und so auch CO<sub>2</sub>-Emissionen senken.

Im Mittelpunkt des Geschäftsbereichs ENERGIE steht das im Oktober 2011 gegründete Zentrum für Angewandte Elektrochemie ZfAE, in dem vor allem an neuen Materialien und Komponenten für elektrochemische Energiespeicher gearbeitet wird. Elektrochemische Energiespeicher sind aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken: In jedem tragbaren elektronischen Gerät, in jedem Auto und in unzähligen anderen Bereichen des modernen Lebens werden sie täglich millionenfach eingesetzt. Neben den verschiedenen Batterien werden auch elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (Supercaps) eingesetzt, die kleine elektrische Energiepakete zwischenspeichern und damit vor allem die Batterien entlasten. Durch die Entwicklungen im ZfAE werden sowohl Elektromobilität als auch stationäre Energiespeicher für eine zuverlässige Energieversorgung aus regenerativen Energieträgern adressiert. Der aktuelle Fokus liegt auf der Materialentwicklung für sicherere und leistungsstärkere Lithiumionenbatterien sowie für hybride Systeme aus Doppelschichtkondensatoren und Batterien.



Schaltbare Fensterfarben mit elektrochromen Schichten

Besonders vielversprechend für die Verbesserung der Sicherheit von Lithiumionenbatterien sind nicht brennbare Polymerelektrolyte. Das Zentrum nutzt dabei die langjährige Erfahrung des Fraunhofer ISC auf dem Gebiet der anorganisch-organischen Hybridpolymere (ORMOCER®), um die bisher verwendeten leichtentzündlichen organischen Flüssigelektrolyte zu ersetzen. Das anorganische Polysiloxangerüst dieser Hybridpolymere sorgt für eine hohe thermische, mechanische und elektrochemische Belastbarkeit und damit für eine besonders hohe Sicherheit. Das Molekülgerüst lässt sich vielseitig funktionalisieren und an die jeweiligen Anforderungen anpassen. Somit wurden bereits stabile Elektrolyte mit Leitfähigkeiten von knapp 1 mS/cm hergestellt.

Basierend auf den Synthesekompetenzen des Fraunhofer ISC werden auch neue Elektrodenmaterialien für Lithiumionenbatterien und elektrochemische Doppelschichtkondensatoren entwickelt. Hier werden Materialien mit hoher spezifischer Kapazität synthetisiert, die im Betrieb hohe Spannungen und damit hohe Energiedichten erlauben, aufgrund ihrer Nanostrukturierung schnelles Laden und Entladen ermöglichen und die hohe Leistungsdichte der Energiespeicher sicherstellen.

---

### Verkapselung von Latentwärmespeichern

---

Neben der Speicherung elektrischer Energie kann auch die Wärmespeicherung die Energieeffizienz erhöhen. Hierfür nutzt man Latentwärmespeicher (oder auch »Phase Change Materials« PCM), welche beim Wechsel zwischen Aggregatzuständen die zu- oder abgeführte Wärmeenergie speichern. Das Fraunhofer ISC arbeitet an hybridpolymeren Mesoverkapselungen von PCM, die das kommerzielle Einsatzpotential von PCM noch deutlich steigern können, da sie besser in andere Materialien integriert werden können und einen schnellen Wärmeübergang zwischen Speicher material und Umgebung ermöglichen.

Thermische Energie wird üblicherweise als sogenannte fühlbare (oder auch »sensible«) Wärme gespeichert. Eine vorteilhafte Alternative dazu ist die Speicherung als latente (»verborgene«) Wärme. Hier ist die Wärmeenergie in einem Phasenübergang, meist dem zwischen flüssiger und fester Phase, enthalten. Populäres Beispiel dafür sind Handwärmer auf Natriumacetat-Basis, die zur Freisetzung von Wärmeenergie durch Knicken eines Metallplättchens gestartet und durch Erhitzen wieder geladen werden können. Die Speicherung von Energie kann hier ohne thermische Isolierung und auf kleinem Raum erfolgen.

Für technische Anwendungen sind derzeit eine Vielzahl an Speichersubstanzen und Behältergeometrien in der Diskussion. Das Fraunhofer ISC beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Mikroverkapselung von anorganischen Latentwärmespeichern. Eine solche Verkapselung ermöglicht die Integration in andere Materialien und einen schnellen Wärmeübergang zwischen Speicher material und Umgebung. Durch die Verkapselung in kleine Kugeln ergibt sich bei gleichem Gesamtvolumen eine viel größere zugängliche Oberfläche, durch die Wärme transportiert werden kann. Dieses Know-how wird derzeit auf die Herstellung von mesoverkapselten Zuckeralkoholen übertragen, die vielversprechende Eigenschaften in Bezug auf Einstellung der gewünschten Umwandlungstemperatur, Menge an gespeicherter Energie pro Volumen und Anforderungen an die Betriebssicherheit (Toxizität, Brandlast) aufweisen. Erste Versuche im Rahmen eines durch die EU geförderten Projekts führten zur erfolgreichen Verkapselung eines Zuckeralkohols in ca. 2 mm große Kapseln.



Staubabweisende Schichten für effiziente Solarenergienutzung

---

### **Ressourcenschonende Klimatisierung mit intelligenter Verschattung**

---

Ein bedeutender Anteil des Energieverbrauchs bei Gebäuden und Fahrzeugen wird für deren Klimatisierung aufgewendet. Eine innovative Lösung sind elektrochrome Fenster, auch »Smart Windows« genannt, deren Lichtdurchlässigkeit (Transmission) durch das Anlegen einer geringen Spannung verändert werden kann. Damit sind Energieersparnisse von bis zu 30 % erreichbar. Am Fraunhofer ISC sind hierzu inzwischen mehrere neue Materialsysteme entwickelt worden, deren Funktionalität weit über bereits kommerziell erhältliche Produkte hinausgehen. Der neue Typ der Smart Windows, der auf Metallo-Polyelektrolyten (MEPE) basiert, ermöglicht die Nutzung eines breiten Farbspektrums. Außerdem wurde eine weitere kosten- und energieeffiziente intelligente Verschattungstechnologie auf Basis leitfähiger Polymere in den Pilotlinienmaßstab hochskaliert. Das Projekt wurde in einem Konsortium von 17 Partnern aus 10 Ländern unter Federführung des Fraunhofer ISC durchgeführt und 2012 abgeschlossen. Die Ausrüstung oder Nachrüstung von elektrochromen Fensterscheiben für Fahrzeuge und Gebäude zur energiesparenden Beschattung wird in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Energieeffizienz leisten können (*mehr auf S. 65 und S. 78*).

---

### **Effiziente Solarenergienutzung**

---

Bei herkömmlichen Photovoltaik-Zellen und thermischen Solar Kollektoren können 10 % des einfallenden Lichts nicht zur Energieerzeugung genutzt werden, wobei der Großteil (8 %) wieder reflektiert wird. Erfolgreich kommerzialisierte Antireflex-Schichten des Fraunhofer ISC erniedrigen den Reflexionsgrad deutlich und erhöhen somit die Energieausbeute. Bei PV-Modulen sind damit 3,5 – 4 % höhere Jahresleistungen möglich, bei solarthermischen Anlagen 7 – 8 %.

Die neuentwickelten staubabweisenden Beschichtungen ermöglichen nachhaltige Selbstreinigungseffekte auf Photovoltaik-Modulen. Damit wird erstmalig der effiziente Einsatz von Solaranlagen insbesondere in staubbelasteten Wüstengebieten oder auch in ariden Gebieten Südeuropas ermöglicht.

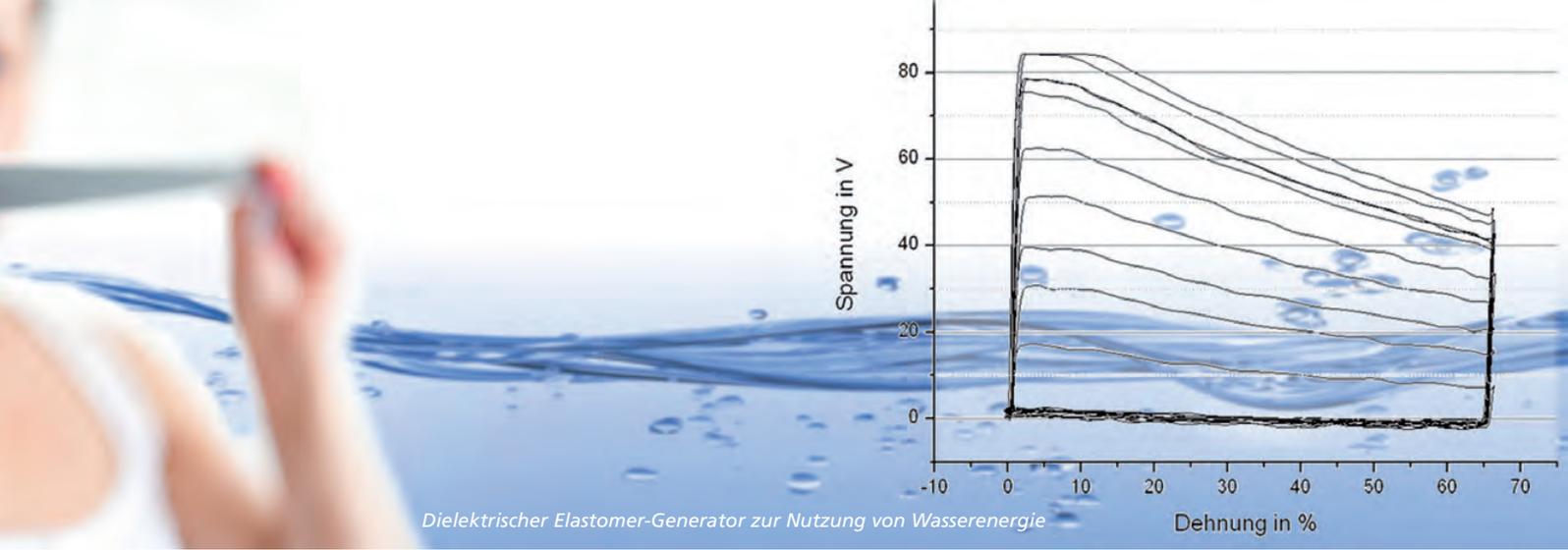
Auch bei Photovoltaik-Systemen der neuesten Generation spielen die Entwicklungen des Kompetenzbereichs Werkstoffchemie eine wichtige Rolle. So tragen Lichtstreuende Schichten zur Verbesserung des Wirkungsgrades von siliziumbasierten Dünnschichtsolarzellen bei. Transparente Barrierschichten auf Folien für die organische Photovoltaik sind essentiell zum Schutz der organischen Solarzellen vor Umwelteinflüssen. Diese sogenannten UltrabARRIERE-Folien werden im Rahmen der Fraunhofer-Allianz POLO entwickelt, koordiniert vom Fraunhofer ISC. Wichtig sind diese hochdichten Folien auch für die Herstellung von dauerhaften energiesparenden organischen Leuchtdioden (OLED).

---

### **Smarte Wege der Energiewandlung**

---

Der fortschreitende Einsatz mikrotechnischer Systeme, etwa in den Bereichen Sensorik, Kommunikationsgeräte, Ortungs- und Überwachungssysteme, mit einem Energiebedarf zwischen 1 und 100 mW erfordert spezielle Lösungen bei deren sicherer und autonomer Energieversorgung. Aufsetzend auf langjährigen Erfahrungen des Centers Smart Materials CeSma wurden in einem Verbundprojekt sogenannte »Energy Harvester« auf der Basis piezoelektrischer Generatoren entwickelt. Die smarten Energiewandler wurden z. B. eingesetzt, um die Sensorik zur Strukturüberwachung einer Autobahnbrücke mit Strom zu speisen, der aus den verkehrsbedingten Vibrationen der Brücke mit den Piezogeneratoren erzeugt wurde (*mehr auf Seite 74*).



Dielektrischer Elastomer-Generator zur Nutzung von Wasserenergie

## DEGREEN - zukunftsweisende Technologien zur Nutzung von Wind- und Wasserenergie

Vollkommen neue Wege bei der Stromerzeugung beschreitet das Fraunhofer ISC mit dem Projekt DEGREEN. Dabei wird mit speziellen elastischen Kunststofffolien, die wie ein dehnbare Kondensator funktionieren, mechanische in elektrische Energie umgewandelt. Dezentrale Anlagen zur Nutzung von Wind- und Wasserkraft sollen auf dieser Basis entwickelt werden, die schon im Bereich von wenigen kW effizient Energie erzeugen. Wind und Wasser zur Energieversorgung zu nutzen, setzt bis dato den Einsatz von Wind- und Wasserrädern, Turbinen, Staustufen etc. voraus. Die damit verbundenen optischen, akustischen und biologischen Störfaktoren rücken zunehmend in die öffentliche Kritik, neue Lösungen sind daher gesucht.

Im Projekt DEGREEN entwickelt das Center Smart Materials CeSMa nun mithilfe von dielektrischen Elastomer-Generatoren (DEG) neue Technologien zur effektiven, umweltschonenden Energiewandlung, die ohne störende Begleiterscheinungen herkömmlicher Techniken auskommen. Die hohe Dehnbarkeit der dielektrischen Elastomerfolien, deren Oberflächen mit stark dehnbaren Elektroden beschichtet sind und die dadurch wie ein Kondensator wirken, erlaubt die Nutzung eines neuen Umwandlungsprinzips von mechanischer in elektrische Energie. Wird die Folie durch Wind oder Wasser mechanisch gedehnt, ändert sich die elektrische Kapazität. Damit lässt sich in einer elektronischen Schaltung ein Zwischenspeicher laden. Ziel sind modular aufgebaute DEG mit einer elektrischen Ausgangsleistung bis zu 1 kW.

In der Folge können Energieversorgungskonzepte entwickelt werden, die eine effektive, umweltschonende und dezentrale Energieversorgung ländlicher Regionen ermöglichen. Denn gerade dort sind dezentrale Energieversorgungskonzepte interessant, weil sie neue Stromtrassen entbehrlich machen. Ein möglicher Einsatzbereich könnten z. B. Ladestationen für Elektrofahrzeuge sein, die weit ab von Stromleitungsnetzen installiert werden können. Elastomermaterialien sind somit der Schlüssel zu einer neuen Generation von Generatorsystemen zur Energiewandlung. Mit seiner Unterstützung für das Forschungsprojekt DEGREEN fördert der Freistaat Bayern zukunftsweisende Technologien für die Energiewende.

Der Geschäftsbereich ENERGIE wendet sich mit seinen Leistungen nicht nur an die Großindustrie, sondern, wie einige der ausgewählten Projektbeispiele zeigen, ausdrücklich auch an klein- und mittelständische Unternehmen. In diesem Sinne freuen wir uns auf eine konstruktive, spannende und inspirierende Zusammenarbeit mit unseren Partnern und Kunden, um gemeinsam mit ihnen die kurz- und mittelfristigen Herausforderungen anzunehmen und unsere Lebensbedingungen erfolgreich mitzugestalten.

### Kontakt

Dr. Victor Trapp

☎ +49 931 4100-370

victor.trapp@isc.fraunhofer.de



---

## ZENTRUM FÜR ANGEWANDTE ELEKTROCHEMIE

DR. VICTOR TRAPP, HENNING LORRMANN

Elektromobilen gehört die Zukunft! Angesichts steigender Spritkosten und immer fortschrittlicherer Speichertechnologien kann diese Aussage kaum noch bestritten werden. Entgegen aller Prognosen und Zielvorgaben wird der Begriff »Elektromobil« heute jedoch nicht mehr alleine durch Elektroautos repräsentiert. Wir werden mehr und mehr von ganz unerwarteter Seite (elektro)mobil: Während in Deutschland bis Anfang 2012 erst rund 4500 Elektroautos registriert wurden, waren zum gleichen Zeitpunkt bereits über 300 000 Elektrofahräder, sogenannte PEDELECS, auf Straßen, Parks und Radwegen unterwegs. In China fahren mittlerweile bereits über 150 Millionen Fahrräder elektrisch. Und der Markt wächst rasant weiter – um knapp 30 % im Vergleich zum Vorjahr. Wo sich das Ziel, bis 2020 eine Million Elektroautos auf den Markt zu bringen, für Regierung und Automobilindustrie zu einem echten Kraftakt entwickelt, hat sich wie von selbst bereits ein millionenschwerer Zweirad-Markt entwickelt.

Ein ebenso großes Potenzial bieten stationäre Energiespeicher. Der steigende Anteil an regenerativen Energieträgern wie Wind- und Wasserkraft sowie Solarenergie stellt die Energieversorger vor immer neue Herausforderungen. Zur Speicherung der Energie dezentral direkt am Erzeugungsort wächst der Bedarf an stationären Speichern. Nach einer Vorhersage der Unternehmensberatung Roland Berger wird sich für stationäre Speicher auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie zusammen mit Freizeitfahrzeugen und mobilen Maschinen (z. B. elektrisch betriebenen Gabelstaplern) bis zum Jahr 2020 ein Markt von 4 Mrd. Euro entwickelt haben. Das Zentrum für Angewandte Elektrochemie ZfAE hat es sich zur Aufgabe gemacht, diese Entwicklungen durch Material- und Verfahrensentwicklung,

analytische Untersuchungen und Lebensdauerbetrachtungen voranzutreiben. So werden neben neuartigen Anoden- und Kathodenmaterialien mit erhöhter Speicher- und Leistungsdichte auch sichere Hybridelektrolyte erforscht. Die Materialien werden direkt im Haus durch eine Vielzahl von Methoden analysiert und qualifiziert. Gleichzeitig arbeitet das Zentrum auch in enger Kooperation mit Industrie- und Forschungspartnern bei der Entwicklung der verschiedenen Zellkomponenten oder z. B. der Entwicklung eines Messzyklus zur realen Abbildung der Belastungsprofile von PEDELECs zusammen. Die Verfahren zur Herstellung werden dabei exakt an die jeweiligen Anforderungen angepasst, um eine maximale Leistungsfähigkeit aller Bausteine zu gewährleisten.

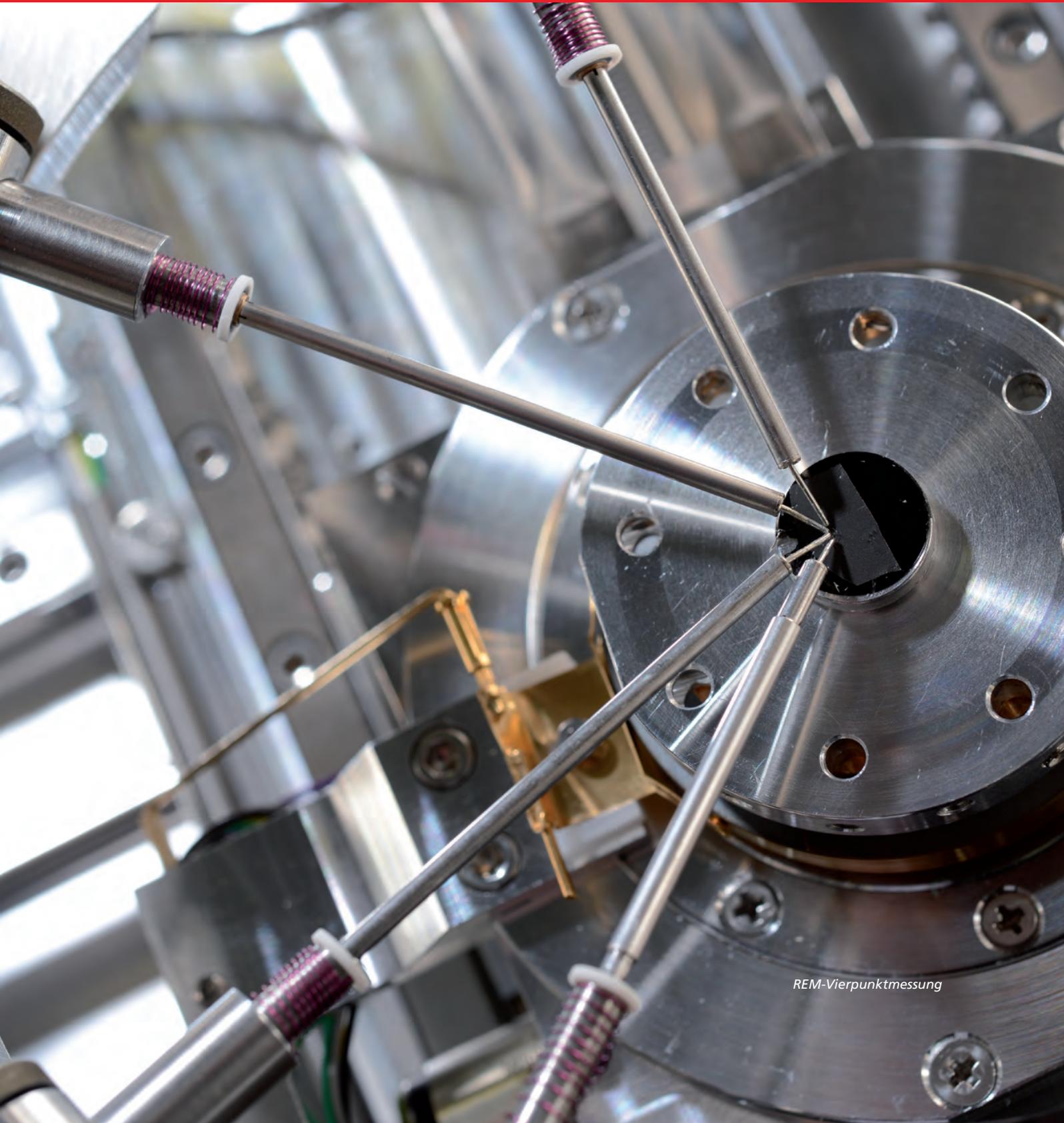
Die Arbeiten des ZfAE sind dabei in drei einander unterstützende Bereiche gegliedert: Materialentwicklung, Prozessentwicklung sowie elektrochemische Charakterisierung und Post-Mortem-Analytik.

---

### Elektroden

---

Die Herstellung von Phosphaten und Oxiden als Elektrodenmaterialien über die Hydrothermalsynthese konnte auf eine Vielzahl von Übergangsmetallen angewandt werden. Dadurch ist es jetzt möglich, Elektrodeneigenschaften wie Energiedichte und Spannungsbereich gezielt einzustellen. Eine hohe Kristallinität mit gutem Zugang der Lithium-Ionen in das Innere der Partikel ermöglicht eine höhere Leistungsdichte im Vergleich zu herkömmlichen kompakten Partikeln.



REM-Vierpunktmessung

Schädliche Prozesse an der Elektroden/Elektrolyt-Grenzfläche, bedingt durch die Entwicklung hin zu hohen Redoxpotentialen und dem Auslaugen der Materialien, sind wichtige Ursachen für ein vorzeitiges Altern der Zelle. Um diesem entgegenzuwirken, wurde eine Methode entwickelt, Aktivmaterialien mit einer künstlichen Schutzschicht (solid electrolyte interface, SEI) zu ummanteln. Die Ergebnisse dieser Arbeit konnten erfolgreich in eine Patentanmeldung überführt werden. Gemeinsam mit dem Fraunhofer ISIT wird die industrielle Umsetzung in einem Fraunhofer-internen Projekt vorbereitet.

## Elektrolyte

Inhärent sichere Elektrolyte sind ein Ziel der Arbeiten mit anorganisch-organischen Hybridpolymeren. Durch Einarbeiten funktionalisierter Partikel und verschiedener Additive können die Eigenschaften sehr gut gesteuert und ausbalanciert werden. So müssen für Systeme mit hohen Leitfähigkeiten im Bereich von 1 mS/cm besonders stabile Komponenten eingesetzt werden. Mit speziellen Hochvoltspinellen und -olivinen wurden dafür im vergangenen Jahr Elektrolyte mit einem vergrößerten Spannungsbereich im Fraunhofer ISC entwickelt.

Die Rückbesinnung auf die Wurzeln des Fraunhofer-Instituts für Silicatsforschung, die Chemie der Silicate und Gläser, legte den Grundstein für die Entwicklung anorganischer Festkörperelektrolyte. Diese vereinen nahezu alle Forderungen von Industrie und Anwender nach nicht entflammaren Elektrolyten mit einer sehr hohen elektrochemischen Stabilität und einer hohen ionischen Leitfähigkeit. Zur Unterstützung steht uns dazu eine im Haus entwickelte vollautomatische Glasscreeninganlage zur Verfügung. Robotergesteuert können so bis zu 16 verschiedene Glasmodifikationen in einem Arbeitsgang hergestellt werden und für die Anwendung als Festkörperionenleiter untersucht werden. In Kombination mit den Hybridpolymeren werden noch offene Fragen zur mechanischen Flexibilität und der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt untersucht. Für die Anwendung als Elektrolyte in elektrochrom schal-

tenden Fenstern wurde ein Projekt zusammen mit einem Industriepartner initiiert, in dem es um die Anbindung der Hybridpolymere an die elektrochromen Schichten bei hoher optischer Transparenz geht.

## Verfahrensentwicklung

Zur Herstellung von Lithiumionenbatterien und Superkondensatoren von den Vorstufen über die Elektrodenbeschichtung bis hin zur fertigen Zelle sind eine Vielzahl aufeinanderfolgende Prozessschritte erforderlich. Für ein leistungsfähiges Produkt spielt die Entwicklung geeigneter Beschichtungs- und Fertigungsverfahren eine entscheidende Rolle. Deshalb wurden diese Prozessschritte im vergangenen Jahr nicht nur genau analysiert (z. B. durch Messung der Pastenrheologie), sondern auch sukzessive verbessert (z. B. durch Anpassen der Mischtechniken). Dazu wurden neue Verfahren entwickelt, gängige Lösungsmittel gegen gesundheitlich unbedenkliche Stoffe ausgetauscht oder durch eine trockene Route gänzlich auf diese verzichtet. Das Ändern eines Parameters erfordert dabei häufig die teilweise oder komplette Umstellung der Prozesskette. So muss für die trockene Beschichtung neuer Aktivmaterialien beispielsweise ein vollständig neues Bindersystem erarbeitet und geprüft werden. Um die Materialien auch potenziellen Kunden sowie Projektpartnern aus Industrie und Forschung zur Verfügung stellen zu können, wurde eine halbserielle Fertigung von mehrlagigen Pouchbagzellen bis zu einer Größe von DIN A5 aufgebaut.

## Alterungs- und Post-Mortem-Analytik – Qualitätssicherung für Batterien

Aus dem alltäglichen Leben sind mobile Geräte mit Lithium-Ionen-Akkus nicht mehr wegzudenken. In einigen Produktbereichen ermöglichen sie Wachstumsraten im zweistelligen Prozentbereich. Viele Hersteller sehen das Potenzial dieser Technologie (z. B. für elektrisch betriebene Fahrräder, akku-



Synthese von *Elektrodenmaterial*



*Elektrodenmaterialien*



*Minikalender*

betriebe Gartengeräte usw.), haben aber oft weder die nötigen Mittel noch den Einblick in die komplizierte Zellchemie, um die zugekauften Zellen quantitativ auf ihre Eigenschaften hin zu überprüfen. Das ZfAE bietet sich hier als Partner an. Ein fundiertes Wissen um jeden Bestandteil der Batterie, kombiniert mit der nötigen Messtechnik, ermöglicht es, vor der Investition in Batteriezellen und -packs eines bestimmten Herstellers diese ausführlich auf ihre Eigenschaften zu prüfen. Die Prüfung kann sich dabei auf einen unabhängigen Abgleich der nominellen mit der gemessenen Kapazität begrenzen. Bei Bedarf ist es z. B. auch möglich, die Zelle unter Inertatmosphäre in ihre Bestandteile zu zerlegen und die jeweiligen Anteile mit den Angaben aus dem Datenblatt abzugleichen oder die zu erwartende Lebensdauer mit realitätsnahen Testverfahren zu überprüfen. Das ausführliche Benchmarking der Zellen kann so im Zweifelsfall vor einer Fehlinvestition in Zellen mit mangelhafter Qualität oder falschen Eigenschaften schützen. Auch das beste Batteriepack ist vor einem Defekt nicht immer gefeit. Im Fall einer Kundenreklamation bietet das ZfAE an, die Ursache des Defekts durch nichtinvasive Methoden (Computertomographie, impedanzspektroskopische Analyse) oder an den einzelnen Komponenten der geöffneten Zelle aufzuspüren.

---

## Elektrochromie

---

Die Möglichkeit, Fenster auf Knopfdruck von transparent zu blau (oder zu einer nahezu beliebigen anderen Farbe) zu schalten, bietet neben neuer Designvielfalt auch ganz erhebliche energetische Vorteile. In Zusammenarbeit mit dem Center Smart Materials, der Universität Würzburg, dem Karlsruher Institut für Technologie und der Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin wurden im vergangenen Jahr zwei, vom BMBF und der EU geförderte Projekte mit Erfolg abgeschlossen. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für neue öffentlich geförderte und Industrieprojekte.

Neben anwendungsorientierter Grundlagenforschung an Metallo-Polyelektrolyten und anderen leitfähigen Polymeren geht es in diesen Projekten vornehmlich darum, die Ergebnisse aus dem Labor in den Technikumsmaßstab und schließlich die industrielle Anwendung zu überführen. Zu diesem Zweck wird im neuen Technikumsgebäude am Standort Neunerplatz eine Anlage geplant, die eine vollautomatische Beschichtung auf transparente, leitfähige Folien im Rolle-zu-Rolle-Verfahren leisten kann. Die Anwendungsfelder dieser »transparenten Batterie« sind dabei äußerst vielfältig und gehen über die klassische Fassadenverglasung weit hinaus: Da sie im geschalteten wie auch im ungeschalteten Zustand keine Energiezufuhr benötigen und als Substrat sowohl herkömmliches Floatglas als auch flexible Folien in Frage kommen, eignen sich die Systeme im Architekturbereich daher nicht nur für Neubauten, sondern auch für die Nachrüstung bestehender Verglasungen. Außerdem können sie aufgrund der flexiblen Formgebung auch für gebogene Fensterflächen eingesetzt werden, z. B. als Flugzeugkabinenfenster, in Automobilen, in Visieren von Motorradhelmen oder als Sichtfenster in Kühlschränken.

## Kontakt

**Dr. Victor Trapp**

☎ +49 931 4100-370

[victor.trapp@isc.fraunhofer.de](mailto:victor.trapp@isc.fraunhofer.de)

**Henning Lorrmann**

☎ +49 931 4100-519

[henning.lorrmann@isc.fraunhofer.de](mailto:henning.lorrmann@isc.fraunhofer.de)

## KONZEPTSTUDIEN FÜR NEUARTIGE LITHIUM-IONEN-ZELLEN

HANNE ANDERSEN

Zusammen mit zwei Fraunhofer-Instituten und fünf Universitätspartnern wurden im Projekt »Konzeptstudien für neuartige Lithium-Ionen-Zellen auf Basis von Werkstoff-Innovationen« (KoLiWiIn) durchgeführt. Der Fokus des vom BMBF geförderten Projekts lag auf der Entwicklung neuartiger Anodenmaterialien. Die material- und strukturabhängigen Eigenschaften wurden neben elektrochemische Methoden auch durch Multiskalensimulationen untersucht. Ziel war, Lithium-Ionen-Batterien schneller, sicherer und kleiner zu machen. Das beinhaltet die Erhöhung der Energie- und Leistungsdichte gegenüber dem Stand der Technik und eine Erhöhung der Sicherheit durch Verwendung unkritischer Elektrolyt- und Elektrodenaktivmaterialien.

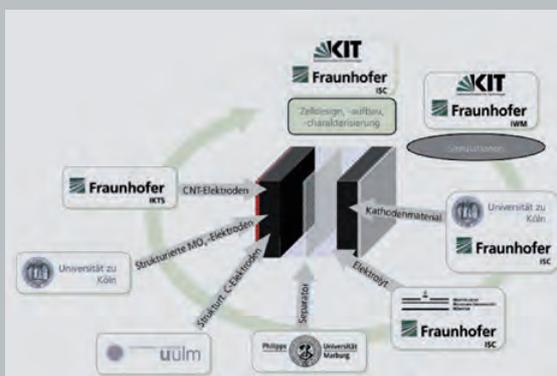
### Aufbau des KoLiWiIn-Projekts

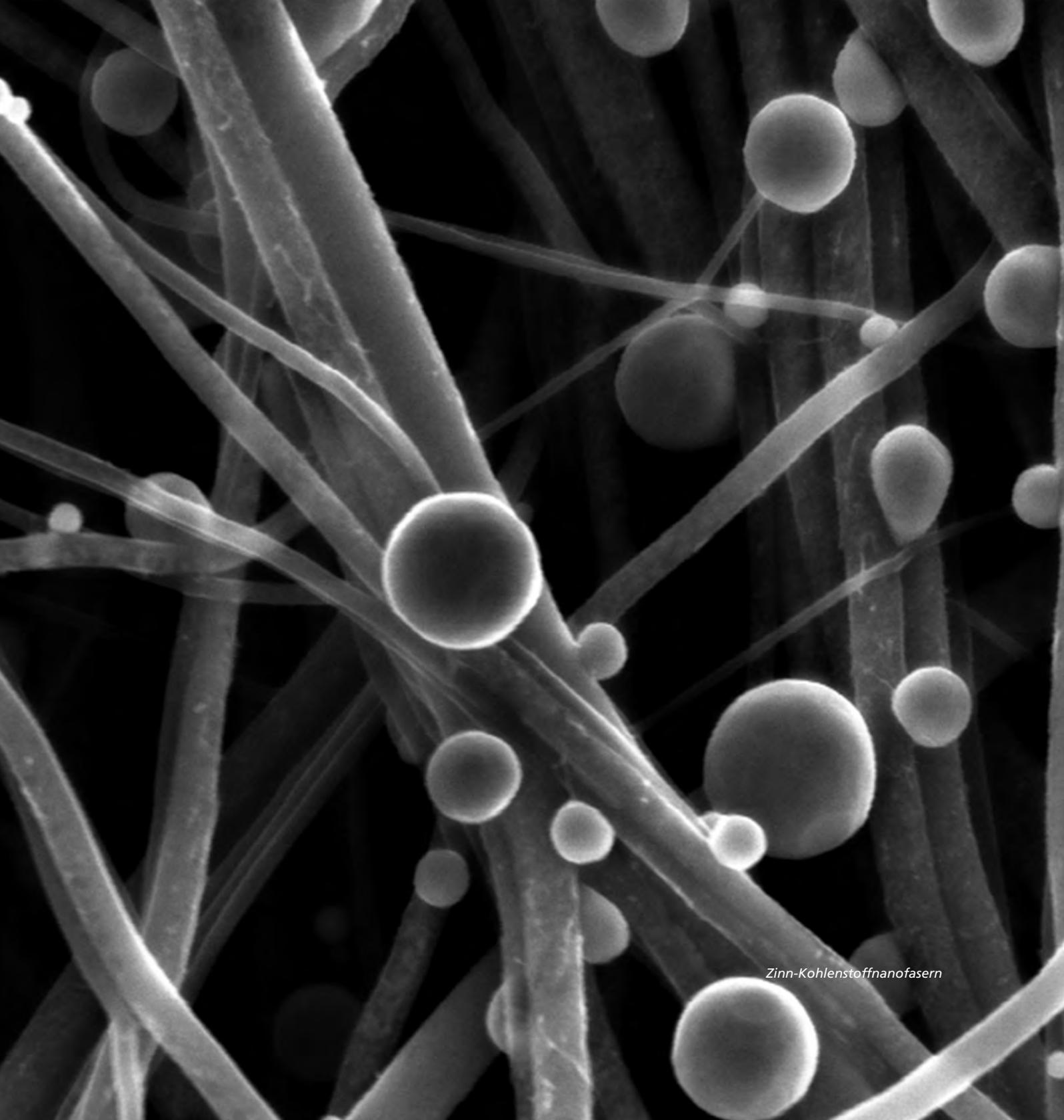
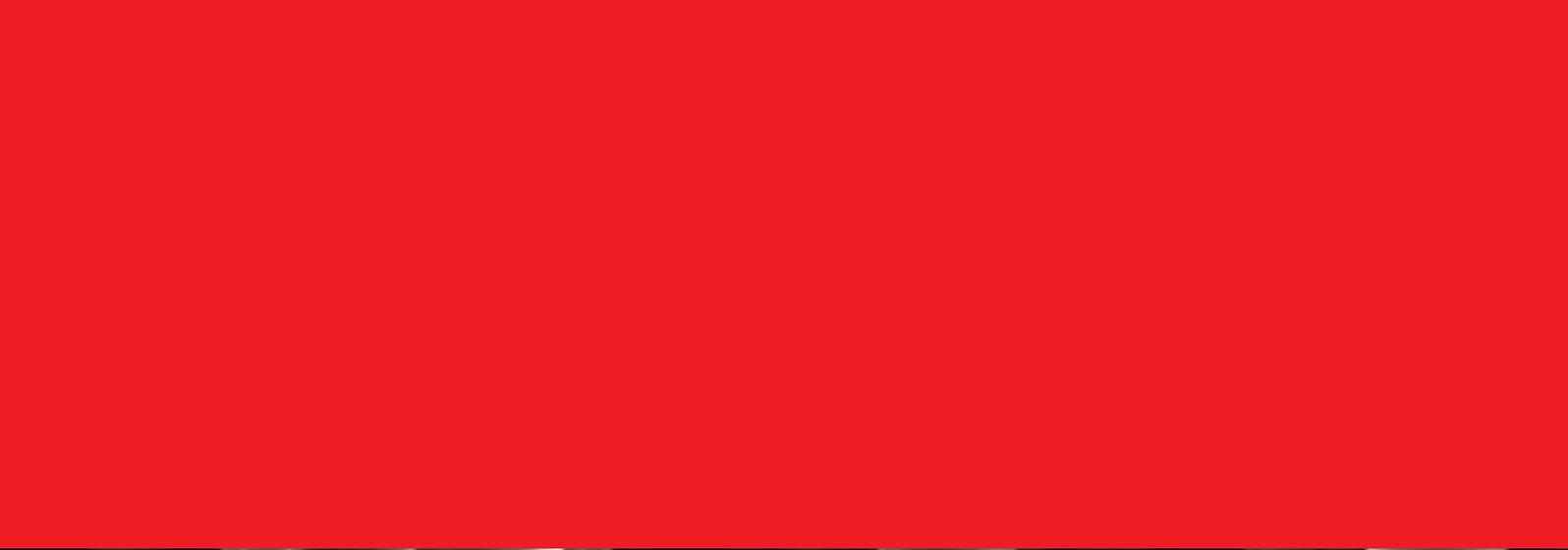
Für die Leistungsfähigkeit einer Batterie sind die Einzelkomponenten Anode, Kathode, Separator und Elektrolyt von Bedeutung, ebenso wie die optimale Abstimmung dieser Komponenten aufeinander. Dazu werden profundes Material-Know-how und die genaue Kenntnis der elektrochemischen Vorgänge beim Zusammenspiel aller Komponenten in den unterschiedlichen Belastungszuständen einer Batteriezelle benötigt. KoLiWiIn setzte hier in der Erforschung dieser Grundlagen an.

10-jährige Erfahrung in der Materialentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien prädestinierte das Fraunhofer ISC für die Übernahme der Projektkoordination. Hauptziele waren die Entwicklung und Umsetzung eines neuen Zellenaufbaus, seiner Charakterisierungsmöglichkeiten und weiterer Optimierungsstrategien für leistungsfähigere und sichere Komponenten zukünftiger Li-Ionen-Batterien.

Auf dem Gebiet der Funktionselektroden lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung »nanostrukturierter Anoden«. Hier verfolgten die Projektpartner (Fraunhofer IKTS, Universität zu Köln und Universität Ulm) unterschiedliche Ansätze, die im Lauf des Projekts evaluiert wurden.

Konzeptstudien für neuartige Lithium-Ionen-Zellen auf der Basis von Werkstoff-Innovationen (KoLiWiIn)





Zinn-Kohlenstoffnanofasern

Neue Ansätze für innovative Separatoren mit gerichteter Porosität wurden an der Universität Marburg entwickelt. Die Auswahl von Elektrolyten und Leitsalzen und eine Untersuchung der Wechselwirkungen mit den Elektroden wurden am Fraunhofer ISC und an der Universität Münster durchgeführt. Gestützt wurden die Arbeiten durch Multiskalensimulationen (Fraunhofer IWM) und durch die elektrochemische Charakterisierung und Modellierung (Karlsruher Institut für Technologie). Damit wurde die gesamte Lithium-Ionen-Zelle untersucht und die komplementären Kompetenzen der Partner ideal eingesetzt. Seitens der Industrie wurde das Konsortium von der Firma Varta Microbatteries GmbH aktiv unterstützt.

## Neue Anodenmaterialien für mehr Leistung

In Zusammenarbeit mit der Universität zu Köln fanden unterschiedliche Entwicklungen an der Nanodrahtanode mit Elementen wie Zinn, Germanium und Silizium statt. Mittels Gasphasenabscheidung wurden Nanodraht-SnO<sub>2</sub> mit einer sehr hohen Ausgangsladung hergestellt. Durch Änderung des Stromableiters zu metallischen Schäumen statt glatten Folien konnten Ladung und Stabilität des Materials deutlich erhöht werden. Um die negativen Effekte der bekannten Volumenänderungen Sn-haltiger Anodenmaterialien während des Ladens und Entladens zu verringern, wurde eine Kohlenstoff-Matrix geschaffen. Mittels Elektrospinning konnten dafür flexible Zinn-Kohlenstoffnanofasern hergestellt werden, deren elektrochemische Eigenschaften den Stand der Technik deutlich übertreffen.

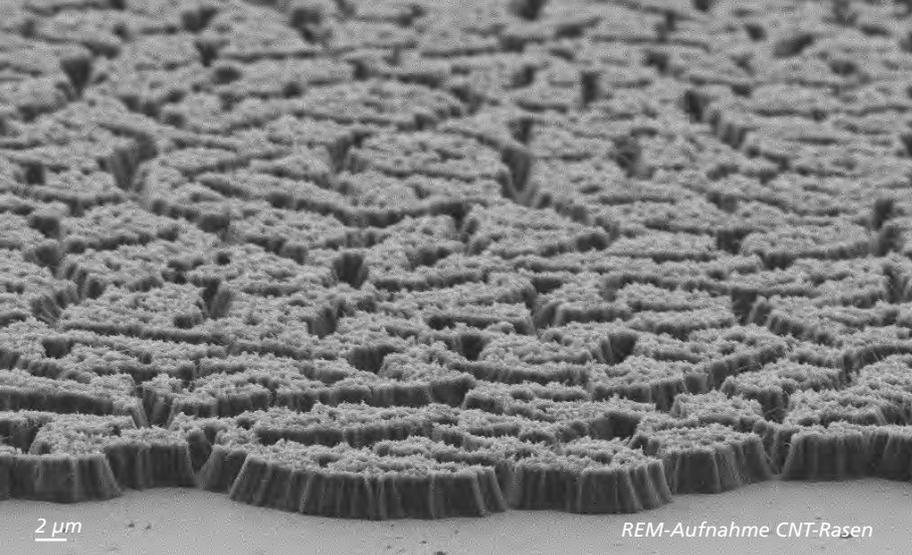
Einen zweiten Lösungsansatz für das Problem der Volumenänderung verfolgte die Universität Münster mit Polymerbeschichtungen auf den Anodenmaterialien. Durch eine externe Schutzschicht konnte die Stabilität der Sn-Anoden verbessert und so eine deutliche Erhöhung der Lebensdauer erzielt werden.

Anoden auf Basis von Nano-Kohlenstoffen wurden am Fraunhofer IKTS und an der Universität Ulm hergestellt: Zum einen wurden CNT-Rasen auf unterschiedlichen Substraten mittels Gasphasenabscheidung abgeschieden. Zum anderen wurden poröse Kohlenstoffmonolithe mit einer sehr hohen Leitfähigkeit auf Basis von Silicatemplaten synthetisiert. Eine erfolgreiche Dotierung mit Silizium wurde bei beiden Anodenmaterialien realisiert, damit konnte die angestrebte Erhöhung der Ladungskapazität erreicht werden, die für leistungsfähigere Batteriezellen benötigt wird.

An der Universität Marburg wurden die quaternären Lithiumchalcogenidometallate Li<sub>4</sub>MnSn<sub>2</sub>Se<sub>7</sub> und Li<sub>4</sub>MnGe<sub>2</sub>S<sub>7</sub> erstmals als neuartiges Elektrodenmaterial hergestellt und elektrochemisch charakterisiert. Sie zeigten vielversprechende Eigenschaften gegenüber dem Stand der Technik, insbesondere bei spezifischer Ladung und Stabilität beim Zyklisieren.

## Korrespondierende Funktionskathoden

Als kommerzielles Kathodenmaterial wird meistens LiCoO<sub>2</sub> in der Lithium-Ionen-Batterie benutzt. Um die Batterie sicherer – und unabhängig von der Verfügbarkeit von Cobalt – zu machen, ist ein Ersatz nötig. Aus diesem Grund wurden am Fraunhofer ISC LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-Kathoden hergestellt. Das Material verbessert den Stand der Technik durch höhere theoretische Ladung, Energiedichte und Sicherheit. Mit einem metallischen, porösen Stromableiter konnte eine optimierte Haftung zum Substrat erreicht werden. Das poröse Substrat ermöglichte zusätzlich eine höhere Beladung des Kathodenmaterials. Weitere Kathodenmaterialien wurden an der Universität zu Köln mittels Elektrospinning hergestellt. Vorteil des Verfahrens ist die selbsttragende, binderfreie Elektrode und gute Skalierbarkeit. LiFe<sub>1-y</sub>Mn<sub>y</sub>PO<sub>4</sub> mit einer Kohlenstoffbeschichtung zur Erhöhung der elektronischen Leitfähigkeit wies verbesserte elektrochemische Eigenschaften auf.



---

### **Für die Sicherheit – nicht brennbare Elektrolyte**

---

Wichtiger Bestandteil des Sicherheitskonzepts bei KoLiWln war jedoch der Ersatz lösemittelhaltiger und damit brennbarer Elektrolyte durch Feststoff-Ionenleiter. Die am Fraunhofer ISC entwickelten anorganisch-organischen Hybridpolymere eignen sich prinzipiell gut zur Aufnahme und zum Transport von Li-Ionen. Im Rahmen des Projekts konnten die Wissenschaftler des Fraunhofer ISC chemische Zusammensetzung und Struktur der Hybridpolymere so einstellen, dass wesentliche Eigenschaften wie Leitfähigkeit und elektrochemische Stabilität optimal an die Anforderungen der Lade- und Entladezyklen angepasst wurden. Ein Aufbau mit Standardelektrodenmaterialien überzeugte mit einem sehr stabilen Verhalten und guter Materialverträglichkeit.

---

### **Die Batteriezelle ist mehr als die Summe der Komponenten**

---

Die im Projekt entwickelten neuartigen Materialien und Strukturen wurden am Fraunhofer ISC in Halbzellen (Zellen, bei denen Kathode und Anode einzeln untersucht werden) getestet. So konnten die elektrochemischen Eigenschaften der neuartigen Anoden- und Kathodenmaterialien bewertet und geeignete Paare ausgewählt werden. Dabei zeigte sich, dass insbesondere das Dotierungsverfahren für die neuen Anodenmaterialien einen sehr guten Ausgleich zwischen Ladungskapazität und Zyklenstabilität ermöglicht.

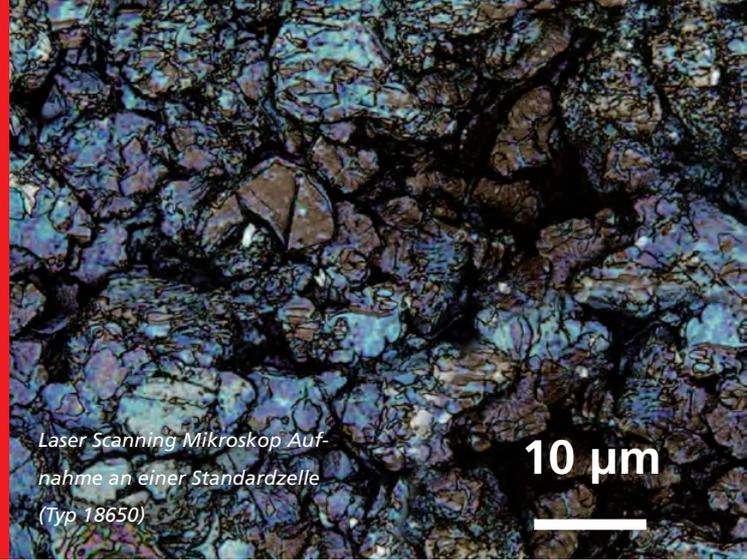
Abschließend wurden die ausgewählten Kombinationen testweise in Vollzellen elektrochemisch analysiert und mittels Zyklovoltammetrie und Zyklisierung mit konstanten Lade-/Entladeströmen charakterisiert, um die noch offenen Fragestellungen auf dem Weg zu einem neuen Lithium-Ionen-Zellen-Prototypen hinsichtlich Zellaufbau und Flächengeometrie genauer zu definieren. Ein Folgeprojekt soll hier ansetzen und die Basis für eine technologische Umsetzung schaffen.

#### **Kontakt**

**Hanne Andersen**

☎ +49 931 4100-959

[hanne.andersen@isc.fraunhofer.de](mailto:hanne.andersen@isc.fraunhofer.de)



Laser Scanning Mikroskop Aufnahme an einer Standardzelle (Typ 18650)

10 µm

## ALTERUNGS- UND POST-MORTEM-ANALYTIK

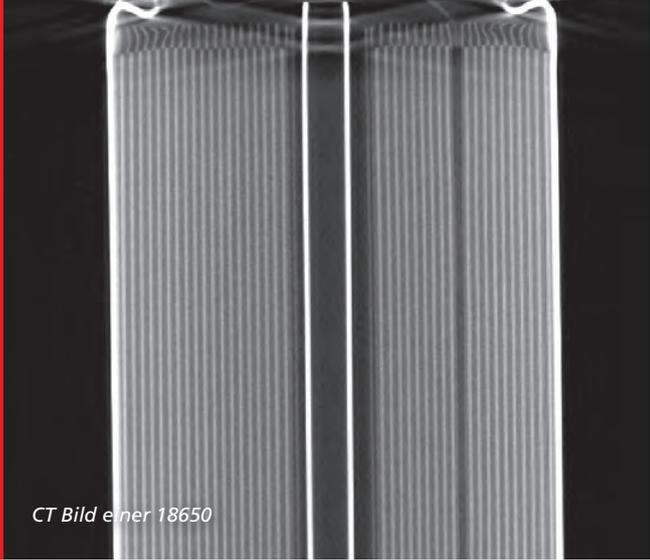
JANA MÜLLER

Die Entwicklung von lithiumbasierenden Batterien hin zu immer größeren Speicherdichten bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit und Sicherheit kann nur erfolgreich fortgeführt werden, wenn deren Alterungsprozesse und die Entstehung von Abnutzungserscheinungen besser verstanden wird. Grundlage dafür ist die stetige Verbesserung von Teilkomponenten des Gesamtsystems »Batterie«. Die erfolgreiche Einführung einer Alterungs- Post-Mortem-Analytik ermöglicht gezielte Alterung von Batterien verschiedenster Konfiguration. Degradationsmechanismen können somit effizient und zuverlässig untersucht werden, beispielsweise unter extremen klimatischen Bedingungen zur Überprüfung der Widerstandsfähigkeit der untersuchten Zelltechnologie. Gealterte Batterien werden zur Analyse in ihre Teilsysteme zerlegt und anschließend komponentenweise untersucht, so dass die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die parallel laufende Materialentwicklung einfließen können.

Diese Form der Analytik erfordert neben einem breiten Spektrum an Untersuchungsmethoden auch strikte Anforderungen an die Untersuchungsumgebung, da viele hochreaktive Materialien in der Batterie zum Einsatz kommen. Dazu wurden spezielle Arbeitsplätze eingerichtet, die Arbeiten unter Luft- und Feuchtigkeitsausschluss in sogenannten Gloveboxen erlauben. Als Meilenstein konnte hier eine Methode zum sicheren Öffnen verschiedener Batterietypen erfolgreich etabliert werden. Darüber hinaus werden Verfälschungen durch das entwickelte Präparationsverfahren bestmöglich vermieden. Validierte Analysemethoden umfassen unter anderem die Computertomographie und die Impedanzspektroskopie. Die Computertomographie als bildgebendes Verfahren erlaubt Einblicke in Produktionsfehler wie Kurzschlüsse, Delaminierung und Kontaktierungsprobleme, während die

Impedanzspektroskopie die Schnittstelle zwischen elektrischer Charakterisierung und materialwissenschaftlicher Untersuchung von Einzelkomponenten darstellt. Methoden zur gezielten Messung der Impedanz an Schlüsselementen des Lithium-Ionen Akkumulators konnten bereits erfolgreich unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt werden. Die dadurch erhaltenen Ergebnisse gehen über die Erkenntnisse aus klassischen Methoden weit hinaus. Weitere Informationen über die Zelle sind über ergänzende physikalische und chemische Methoden zugänglich. So werden Materialveränderungen ortsaufgelöst nachgewiesen und Degradationsprodukte mittels verschiedener chemischer Analysemethoden bestimmt. Die Kombination der vorgestellten Methoden ermöglicht es, materialspezifische oder durch die Umgebung bedingte Alterungsmechanismen sicher festzustellen. Die enge Zusammenarbeit mit dem zertifizierten Zentrum für Angewandte Analytik des Fraunhofer ISC sichert dabei einen höchst möglichen Standard der Untersuchungsmethodik.

Die erhaltenen Erkenntnisse dienen sowohl der Weiterentwicklung von Batteriedesign und -materialien als auch dem Zukunftsthema Recycling. Recyclinginitiativen sind auf verlässliche Daten bezüglich der zurückgewinnbaren Wertstoffe angewiesen. Hier besteht ein Datenbedarf, der mit den vorgestellten Methoden bedient werden kann. Recycling steht auch in dem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Projekt »Automotive Battery Recycling and 2nd Life (ABattReLife)« im Vordergrund, welches das Fraunhofer ISC zusammen mit internationalen Partnern aus Industrie und Forschung bearbeitet. Das Fraunhofer ISC liefert dabei Aufschluss über die Zellchemie und sowie zur Degradation der enthaltenen Wertstoffe. Dieses Projekt stellt



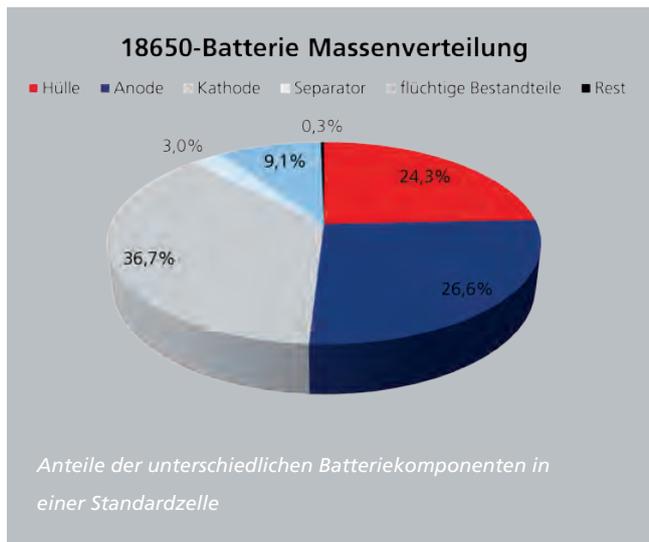
CT Bild einer 18650



Öffnen einer 18650 Batteriezelle unter Schutzgas

somit ein Paradebeispiel für das Anwendungsgebiet der Alterungs- und Post-Mortem-Analytik dar, in dem sich die Themen Alterung und Recycling nicht nur aufgrund der wissenschaftlichen Synergien, sondern auch marktwirtschaftlich zu nachhaltigen Konzepten ergänzen.

Die interdisziplinäre Arbeitsgruppe »Alterungs- und Post-Mortem-Analytik« ermöglicht Dienstleistungen sowohl für die Wissenschaft als auch für Industriekunden.



## Kontakt

Jana Müller

+49 931 4100-244

[jana.mueller@isc.fraunhofer.de](mailto:jana.mueller@isc.fraunhofer.de)

## ELEKTRODEN FÜR HYBRID-ENERGIESPEICHER

DR. UWE GUNTOW, DR. JOCHEN UEBE

Handys, MP3-Player und Laptops beziehen bereits im heutigen Alltag ihre Energie aus Lithium-Ionen-Batterien. Aber auch im Bereich der E-Mobilität, der mobilen Energieversorgung, im Maschinenbau, in der Automatisierungstechnik und als stationäre Speicher werden sich in Zukunft enorme Einsatzpotenziale für Energiespeicher ergeben. Den unterschiedlichen Anforderungen dieser Anwendungsbereiche muss ein idealer Energiespeicher jeweils angepasst werden. Maßgeschneiderte und in ihren Eigenschaften optimierte Aktivmaterialien stellen den Schlüssel für die Entwicklung von Energiespeichern mit verbesserten Energie- und Leistungsdichten sowie größerer Stabilität dar. Am Fraunhofer ISC wurde jetzt ein Verfahren entwickelt, mit dem Elektroden für maßgeschneiderte Energiespeicher realisiert werden können – hybride Energiespeicher, die Vorteile von Batterie (hohe Energiedichte) und Doppelschichtkondensator (hohe Leistungsdichte, schnelle Lade- und Entladevorgänge, hohe Lebensdauer) in sich vereinen.

### Energiespeicher für jeden Bedarf

Der Einsatz heute bestehender elektrischer Energiespeichersysteme unterliegt den Beschränkungen der verfügbaren Speichertechnologien. Im Wesentlichen wird dabei unterschieden zwischen zwei Technologien: Faraday'schen Speichern (Batterien, z. B. Lithium-Ionen-Batterien) und elektrostatischen Speichern (Doppelschichtkondensatoren, DLC). Lithium-Ionen-Batterien verfügen über hohe Energiedichten ( $> 100 \text{ kW/kg}$ ), sind jedoch in ihrer Leistungsfähigkeit, ihrer Zyklenzahl und ihrem Temperatureinsatzbereich eingeschränkt. Doppelschichtkondensatoren weisen deutlich höhere Zyklenzahlen auf und lassen sich in einem breiteren Temperaturbereich nutzen, verfügen jedoch für viele Anwendungen über zu geringe Energiedichten.

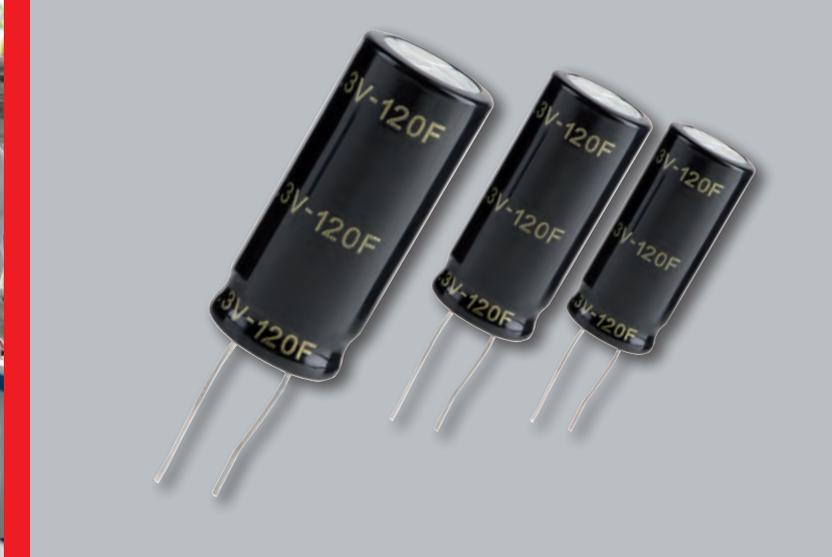
### Das Aktivmaterial – der Schlüssel zu neuen Speicherkonzepten

Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien oder Doppelschichtkondensatoren bestehen typischerweise aus dem Aktivmaterial, Leitadditiven, einem Polymerbinder und dem Stromableiter. Die eigentlichen Vorgänge zur Energiespeicherung – das Speichern von elektrischer Ladung – finden im Aktivmaterial statt. Im Fall der Lithium-Ionen-Batterien werden Lithium-Ionen in der Elektrode möglichst reversibel in die Gitterstruktur des Aktivmaterials eingebunden, man spricht von Interkalation bzw. De-Interkalation. Diese Vorgänge laufen sehr langsam und nicht immer vollständig reversibel ab. Auch die damit verbundenen volumetrischen Expansionen und Kontraktionen des Aktivmaterials führen dazu, dass die Anzahl der möglichen Lade- und Entladevorgänge begrenzt ist und die Lebensdauer abnimmt. Lithium-Ionen-Batterien stellen also über längere Zeit hohe Energiedichten zur Verfügung, dafür ist ihre Leistungsdichte deutlich niedriger als im Fall der Doppelschichtkondensatoren.

Bei den Doppelschichtkondensatoren findet dagegen die Ladungsspeicherung elektrostatisch an der Oberfläche des Aktivmaterials statt. Diese Speichervorgänge laufen im Vergleich zur Lithium-Ionen-Batterie deutlich schneller ab. Die Oberfläche des Aktivmaterials sollte möglichst hoch sein ( $> 2000 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Außerdem muss das Material eine geeignete Porenstruktur aufweisen, die für die jeweiligen Kationen und Anionen des Elektrolyten zugänglich ist. Um die notwendigen mechanischen, chemischen und elektrochemischen Stabilitäten zu erreichen, werden heute überwiegend Aktivkohlenstoffe als Aktivmaterialien eingesetzt. Da die Ladung elektrostatisch an der Oberfläche gespeichert wird, sind damit keine volume-



Kleinserienfertigung von Elektroden



trischen Expansionen und Kontraktionen des Aktivmaterials verbunden. Deshalb ist die Anzahl der möglichen Lade- und Entladevorgänge deutlich höher als im Fall der Lithium-Ionen-Batterien und damit auch die Lebensdauer des Systems. Doppelschichtkondensatoren bieten also als Kurzzeitspeicher hohe Leistungsdichten, jedoch dafür geringe Energiedichten.

Durch die Erhöhung des Batterieanteils im Aktivmaterial können die Eigenschaften bei Bedarf weiter in Richtung Lithium-Ionen-Batterie (höhere Energiedichte) verschoben werden. Im Vergleich zum Stand der Technik konnte mit den am Fraunhofer ISC modifizierten Aktivmaterialien eine deutliche Steigerung der Energiedichte bei gleichbleibender Leistungsdichte erreicht werden (siehe Grafik).

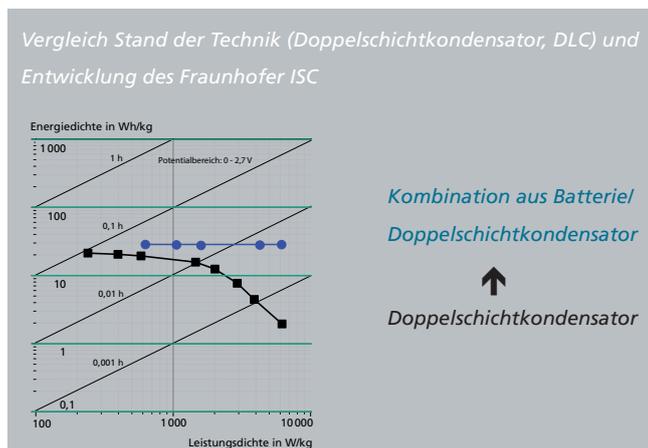
### Die Lösung – hybride Elektroden für maßgeschneiderte Energiespeicher

### Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten

Die Lösung ist ein Hybridspeicher aus Lithium-Ionen-Batterie und Doppelschichtkondensator, der die Vorteile der Lithium-Ionen-Batterie (hohe Energiedichte) und des Doppelschichtkondensators (schnelle Lade- und Entladevorgänge, hohe Zyklenfestigkeit, hohe Leistungsdichte) in sich vereint. Erreicht wird das durch ein innovatives Herstellungsverfahren für Aktivmaterialien in den Elektroden, das am Fraunhofer ISC entwickelt wurde. Dabei werden im Aktivmaterial Batteriematerialien und Aktivkohlenstoffe (Doppelschichtkondensator) miteinander kombiniert. Im Idealfall kann die durch die Poren bedingte hohe Oberfläche des Aktivkohlenstoffs nahezu vollständig zur Ladungsspeicherung ausgenutzt werden, sodass bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte auch eine höhere Energiedichte realisiert wird. Die Lade- und Entladevorgänge laufen dann sehr schnell ab.

Mit Energiespeichern, die diese verbesserten Aktivmaterialien enthalten, kann nun ein breiter Anwendungsbereich erschlossen werden:

- E-Mobilität (Automobile, Lastkraftwagen, E-Bikes, Sportboote, Gabelstapler und Reinigungsmaschinen)
  - Rekuperation der Bremsenergie von Automobilen, Straßenbahnen und Zügen
  - mobile Energieversorgung
  - unterbrechungsfreie Stromversorgung
  - Maschinenbau
  - Automatisierungstechnik
  - stationäre Energieversorgung (zum Ausgleich von Schwankungen bei Einspeisung und Nachfrage)
  - zur Zwischenspeicherung und Netzeinkopplung elektrischer Energie aus Quellen erneuerbarer Energien (Windkraftanlagen und Photovoltaik)
- und vieles mehr.



### Kontakt

Dr. Uwe Guntow  
 ☎ +49 931 4100-415  
 uwe.guntow@isc.fraunhofer.de

Dr. Jochen Uebe  
 ☎ +49 931 4100-923  
 jochen.uebe@isc.fraunhofer.de

---

## ENERGY HARVESTING – EIN KONZEPT ZUR NUTZUNG REGENERATIVER ENERGIEN

DIETER SPORN, DR. BERNHARD BRUNNER

Für die Wandlung von einer Energieform in eine andere gibt es neben den konventionellen, technisch ausgefeilten Methoden wie z. B. Generatoren auch eine Reihe von anderen Möglichkeiten der Gewinnung elektrischer Energie, z. B. aus der Umgebungstemperatur (thermoelektrisch), aus Vibrationen oder auch aus Luftströmungen. Für diese Techniken, insbesondere kleinere Mengen von Strom aus der Umgebung zu erzeugen, hat sich der Begriff »Energy Harvesting« (wörtlich übersetzt Energie-Ernten) eingebürgert, als Einsatzgebiet wird der autonome Betrieb mobiler Geräte mit geringer Leistung angestrebt. Wenn Drahtlostechnologien eingesetzt werden, können durch Energy Harvesting Einschränkungen durch kabelgebundene Stromversorgung vermieden werden.

Die Entwicklung neuartiger »Energy Harvester« (EH) schafft eine technische Basis zur langfristigen, sicheren und autonomen Versorgung vorwiegend mikrotechnischer Systeme mit moderatem Energiebedarf zwischen 1 und 100 mW. Mit diesen autonomen Konzepten kann eine Vielzahl von Anwendungen aus dem Bereich mobil eingesetzter sowie schwer zugänglicher Systeme bedient werden. Beispiele sind Implantate und Notfallsender, aber auch die Versorgung von Kommunikations- und Multimediageräten, Sensornetzwerken, Lokalisierungs- und Überwachungssystemen in Flugzeugen, Offshore-Windkraftanlagen, Sicherheitssystemen etc. Hierbei liegen auch die wirtschaftlichen Vorteile (z. B. Wartungsfreiheit) einer kostengünstigen effizienten, autonomen Energieversorgung auf der Hand.

Aufbauend auf früheren CeSma-Entwicklungen auf dem Gebiet piezoelektrischer Dünnschicht-Materialien und den Komponenten daraus, wurden im vom BMBF geförderten Verbundprojekt »Piezo-EN« piezoelektrische Generatoren für einen EH entwickelt und getestet. Die piezoelektrischen Wandler zeichnen sich durch hohe elektromechanische Koppelfaktoren, durch einfaches, mechanisch robustes und sehr flexibles Systemdesign, günstige Preise und geringes Gewicht aus. Dabei sind diese Energiewandler unabhängig von Sonneneinstrahlung oder Temperatur und weisen eine sehr lange Lebensdauer auf. Vorteilhaft wirkt sich zudem die schwingungsdämpfende Wirkung des elektromechanischen Energieentzugs auf die mechanische Basisstruktur aus. Innerhalb des Projekts sollten die Entwicklungsergebnisse in Form von Demonstratoren an mehreren Endanwendungen erprobt werden. Eine davon war die Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring) an Brücken.

---

### Piezoelektrische Flächenwandler

---

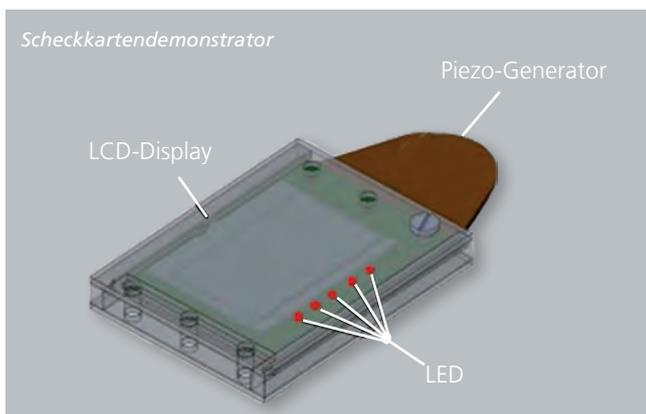
Bestimmte kristalline Materialien reagieren auf mechanische Verformung mit einer Änderung ihres elektrischen Potentials. Die Verformung führt in der Kristallebene zu einer Ladungstrennung, dem sogenannten Piezoeffekt. So entstehen bei der Verformung Spannungsimpulse, die durch eine geeignete elektrische Schaltung aufgenommen werden können, ein elektro-mechanischer Spannungswandler. Im Projekt wurden piezoelektrische Dünnschichten aus der Materialentwicklung des Fraunhofer ISC als große (100 cm<sup>2</sup>) Flächenwandler zur



2. EH-Demonstrator; Anwendung Autobahnbrücke

elektromechanischen Energiewandlung hergestellt, elektrotiert und evaluiert. Die Schichtdicke, die Geometrie und die elektrische Kontaktierung wurden bzgl. der maximalen Energieausbeute in den Demonstratoren optimiert und Untersuchungen zur elektrischen Anpassung an die Wandlerelektronik durchgeführt. Lebensdaueruntersuchungen bewiesen die Einsatzfähigkeit dieser Wandleraufbauten auch bei sehr starken zyklischen Dehnungsbelastungen von bis zu 0,2 % in bis zu 100 Mio. Zyklen. In Versuchsaufbauten wurde die Energieausbeute bestimmt. Bei der piezokeramischen Dünnschichtfolie mit einer Fläche von ca. 100 cm<sup>2</sup> liegt sie bei etwa 10 µW bei einer Ausgangsspannung von 0,6 V. Diese Spannung ist aber zu gering, um Gleichrichterdiode der Energiewandlerschaltung direkt anzusteuern. Durch Reihenschaltungen mehrerer Piezoschichten auf einem gemeinsam in Phase betriebenen mechanischen Demonstrator konnten höhere Ausgangsspannungen und damit Leistungen von einigen mW im Frequenzbereich um 1–10 Hz erreicht werden.

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern INVENT sowie Fraunhofer IIS und IZM wurde ein Scheckkartendemonstrator entwickelt, der die Möglichkeit einer mobilen Stromversorgung veranschaulicht. Dabei übernahm das Fraunhofer ISC die Schaltungsentwicklung des energieverbrauchsaarmen Sensors, der Temperatur- und Bewegungsdaten auf einem Display darstellt.



Ein EH-Demonstrator, der mit oben beschriebenen Piezowandlern ausgestattet war, wurde von der Firma Wölfel Beratende Ingenieure & Co. KG für den Einsatz in einer Autobahnbrücke aufgebaut und zum Testeinsatz gebracht.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten für den Einsatz des entwickelten Mikrosystems zur autarken Energieversorgung über intelligente Piezogeneratoren werden vom Projektpartner Wölfel Beratende Ingenieure bzgl. der Strukturüberwachung von Brücken als sehr hoch eingeschätzt. Eine Übertragung in andere autonome Strukturüberwachungsaufgaben, z. B. in Windkraft-Rotorblättern sowie Chemie-/Kraftwerksanlagen würde den derzeitigen Aufwand und die Möglichkeiten bei der Kontrolle dieser Anlagen deutlich vereinfachen.

Am weitesten fortgeschritten ist der Einsatz der Überwachungstechniken bei Rotorblättern von Windkraftanlagen. Hersteller und Betreiber von Windkraftanlagen zeigten starkes Interesse an der Installation des Systems auf einer Testanlage. Nach erfolgreicher Durchführung dieser Testinstallation kann von Folgeaufträgen in den nächsten Jahren insbesondere bei der Weiterentwicklung der energieoptimierten Sensorknoten ausgegangen werden.

## Kontakt

**Dieter Sporn**

☎ +49 931 4100-400

dieter.sporn@isc.fraunhofer.de

**Dr. Bernhard Brunner**

☎ +49 931 4100-416

bernhard.brunner@isc.fraunhofer.de

## RESSOURCENEINSPARUNG DURCH PROZESS-OPTIMIERUNG IN DER KRAFTWERKSTECHNIK

DR. ANDREAS DIEGELER

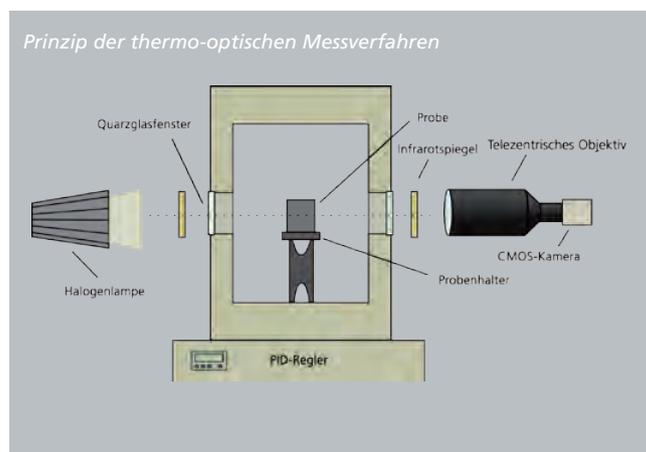
### Einsatz thermo-optischer Messverfahren bei der Bewertung von Braun- und Steinkohleschlacke

Aufgrund der Energiewende und der Abkehr von der Atomkraft gewinnen alternative Energiequellen immer mehr an Bedeutung. Da sich aber die Stromversorgung alleine durch diese Energiequellen nicht sicherstellen lässt, rücken die herkömmlichen Energieträger auf fossiler Basis wieder mehr in den Vordergrund. Dazu zählen im Wesentlichen Mineralöl, Erdgas, Braun- und Steinkohle. Im Jahre 2011 betrug dabei der Anteil der Braunkohle am Energiemix in Deutschland 24,5%, der Anteil der Steinkohle 18,3% (Quelle: AG Energiebilanzen). Die geschätzten Vorräte vor allem an Braunkohle belaufen sich auf ca. 40 Mrd. Tonnen, die durch moderne Technologien gewinnbar sind. Diese Vorräte reichen für mehrere Generationen, wenn sie effizient genutzt werden.

Die Effizienz bei der Nutzung der Braun- bzw. Steinkohle hängt in besonderem Maße von moderner Kraftwerkstechnologie ab. Die Optimierung der Verbrennungs- und Reinigungsprozesse und die Verwertung der Abfallstoffe, insbesondere der anfallenden Schlacken, stehen dabei im Fokus bei der Entwicklung neuartiger Konzepte und Anlagen.

Am Fraunhofer ISC werden seit über 20 Jahren neue Verfahren entwickelt, die thermische Prozesse bei der Materialentwicklung analysieren, bewerten und optimieren. Dazu gehören die sogenannten thermo-optischen Messverfahren, kurz TOM genannt. Sie wurden bis zum heutigen Zeitpunkt soweit verfeinert, dass sie industriell für eine Vielzahl von Anwendungen in den Entwicklungsabteilungen von Firmen und Universitäten nutzbar sind. Dazu zählen beispielsweise auch die RWE als Energieversorger im Bereich Braunkohle und die Bergakademie Freiberg im Bereich Steinkohle.

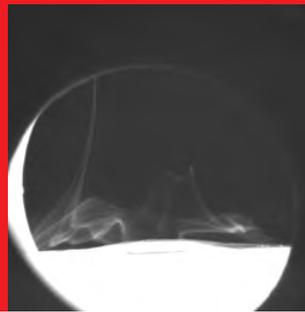
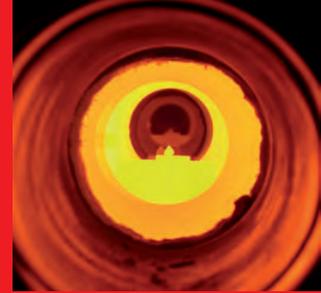
Die TOM-Verfahren werden bei diesen Kooperationspartnern für die Schlackebewertung und die Analyse von Brennprozessen eingesetzt, um im Labormaßstab Kenntnisse über die ablaufenden Prozesse und deren Optimierungsmöglichkeiten zu gewinnen.





TOMMI TLF

Thermischer Prozess von Braunkohlerestschlacke bei 1100 °C



Thermischer Prozess von Steinkohleverflüssigung bei 1950 °C

Hauptbestandteil des Messsystems ist ein Ofen, der mit verschiedenen Heizeinsätzen ausgestattet werden kann, je nach Probenmaterial, gewünschter Umgebungsatmosphäre und Untersuchungstemperatur. Das System kann unter kontrollierter Atmosphäre auf bis zu 2400 °C gefahren werden. Um das Verhalten des Materials, in diesem speziellen Fall Schlacke, analysieren zu können, sind an beiden Seiten des Ofens entlang einer horizontalen Achse zwei Sichtfenster angebracht. Das linke Sichtfenster wird dabei als Beleuchtungsöffnung verwendet, das rechte als Beobachtungsfenster. Eine starke LED-Lichtquelle und eine ausgefeilte Optik mit CMOS-Kamera ermöglichen eine Bildanalyse der Konturänderung einer in der optischen Achse platzierten Probe beim Durchlaufen der thermischen Prozesse. Diese Konturänderung wird mit einer Auflösung von bis zu 0,4 µm aufgezeichnet. Im Fall der Schlacke kann durch genaue Einstellung der Atmosphäre im Ofen das Verhalten beim Erweichen und Schmelzen unter Industriebedingungen untersucht werden. Diese Daten werden benötigt, um Heizprozesse anzupassen und zu optimieren, respektive sehr große Mengen an Energie zu sparen. Im Fall der Braunkohle sind Temperaturbereiche von 800 °C – 1300 °C interessant, bei der Steinkohle kann der Temperaturbereich bis 2000 °C steigen, je nachdem, wie hoch der SiO<sub>2</sub>-Gehalt der Probe ist.

Das Verfahren wird zurzeit bei beiden Materialgruppen erfolgreich eingesetzt. Im Fall der Braunkohleverfeuerung konnte der Reinigungsprozess im Hochofen durch Herabsetzen der Temperatur und Zugabe von Mischgasen optimiert werden.

Im Hinblick auf die verwendeten Mengen zu erhaltender Braunkohle in einem Heizkraftwerk, die im Bereich von mehreren Tausend Tonnen im Betrieb liegen, führt eine Temperaturenniedrigung von nur 50 °C zu einer Energieersparnis von mehreren 1000 kWh. Das Bild oben rechts zeigt einen Blick in den Ofen beim Erhitzen von Braunkohlerestschlacke bei 1100 °C.

## Kontakt

Dr. Andreas Diegeler

☎ +49 9342 9221-702

andreas.diegeler@isc.fraunhofer.de

## INNOVATIVE ABSCHATTUNG

DR. UWE POSSET

Das im siebten Rahmenprogramm der EU-Kommission (FP7) geförderte Projekt INNOSHADE – Innovative Shading Appliances – hatte zum Ziel, eine zuvor entwickelte kosten- und energieeffiziente intelligente Verschattungstechnologie auf Basis elektrochromer (EC) Elemente in den Pilotlinienmaßstab hochzuskalieren und so zu validieren. Das Vorhaben wurde in einem Konsortium von 17 Partnern aus 10 Ländern unter Federführung des Fraunhofer ISC durchgeführt und kürzlich mit vielversprechenden Ergebnissen abgeschlossen.

EC-Elemente sind üblicherweise aus einer farbaktiven Arbeitselektrode und einer entsprechend konzipierten Ionenspeicherschicht (Gegenelektrode) aufgebaut, die über eine elektrisch isolierende, aber ionenleitende Schicht miteinander in Verbindung stehen. Bei Anlegen einer elektrischen Spannung finden in den Elektrodenschichten Redoxvorgänge statt, die Änderungen im optischen Absorptionsverhalten zur Folge haben. Mit einer hierauf basierenden Farbwechseltechnologie lassen sich schaltbare Fenster »Smart Windows« herstellen, mit denen der Klimatisierungsaufwand in Gebäuden und Fahrzeugen drastisch gesenkt werden kann. Neben dem Komfortaspekt der individuellen Steuerung des Lichteinfalls hat die Technologie somit enormes Potenzial für Energieeinsparungen. Bisher kommerziell verfügbare EC-Systeme weisen eine Reihe von Nachteilen und Vermarktungshürden auf, allen voran einen hohen Preis, lange Schaltzeiten und nicht zuletzt ein hohes, der glasbasierten Konstruktion geschuldetes Gewicht, das viele Anwendungen ausschließt. Für eine kostengünstige, kunststoffbasierte EC-Technologie besteht große Nachfrage.

### Elektrochrome Folienlamine

Kern der Entwicklung in INNOSHADE war ein neuartiges Nanokomposit aus leitfähigen elektrochromen Polymeren und Polysiloxanen, das sich durch außergewöhnliche elektro-optische Eigenschaften auszeichnet: Als dünne Schicht auf eine transparente Kunststoffelektrode aufgebracht, kann das Material seine Farbintensität und somit Lichtdurchlässigkeit bei Anlegen einer geringen Spannung innerhalb weniger Sekunden mit hohem optischen Kontrast ändern. Das elektro-optisch aktive Polymer ist aus speziell modifizierten EDOT-Einheiten (3,4-Ethylendioxythiophen) aufgebaut und besitzt hohe Färbefizienz, was sich in geringem Energieverbrauch während des Schaltvorgangs äußert. Das Material wird über ein proprietäres Polymerisationsverfahren bei niedriger Temperatur über Rolle-zu-Rolle-Verfahren aufgebracht. Die daraus hergestellten Folienlamine sind mechanisch flexibel und können auf beliebige Oberflächen aufgezogen oder in bestehende Fenstersysteme integriert werden (Retrofit).

### Potenzielle Anwendungen

Die Technologie ist nützlich, wo immer die elektrische Modulation der Lichtdurchlässigkeit erwünscht ist, sei es aus Komfortgründen oder aus Gründen der Sicherheit und Energieeinsparung. Während des INNOSHADE-Vorhabens wurden die EC-Folien einer Reihe von Anwendungsprüfungen unterworfen, um die Leistungsfähigkeit der Technologie zu ermitteln.



*Mögliche Anwendung für innovative Abschattung*  
© Knud Dobberke

# ENERGIE



Anwendung der Innoshade-  
Technologie – Flugzeug-  
kabinenfenster im A320

Die dabei primär ins Auge gefassten Anwendungen waren zu- nächst ophthalmische Linsen (Sonnenbrillen), Haushaltsgeräte (Türen in Kühlschränken und Öfen) sowie Automobil- und Flugzeugkabinenfenster.

## Vorteile des neuen Eigenschaftsprofils

- Skalierbare, kosten- und ressourceneffiziente EC-Technologie, kompatibel mit Kunststoffsubstraten
- Nasschemisch über Rolle-zu-Rolle-Verfahren prozessierbar
- Elektrisch kontrollierbarer, kontinuierlicher Farbwechsel zwischen farblos und tiefblau
- Kurze Ansprechzeiten bei großen Flächen bei gleichzeitig geringem Energieverbrauch
- Neuartige transparente Hybridelektroden mit geringem Flächenwiderstand

## Erfolgreich gelöste Schlüsselschritte

- Hochskalierung der chemischen Vorstufensynthesen in den Pilotlinienmaßstab
- Ermittlung zentraler Struktur-Eigenschaftsbeziehungen in der Rolle-zu-Rolle-Verarbeitung von EC-Schichten
- Optimierung des Primärenergieverbrauchs durch Einbeziehung von Ökobilanzierungsergebnissen (Life Cycle Assessment)
- Anpassung von Beschichtungs- und Laminierungstechnik inklusive der Herstellung hochpräziser Maschinenbauteile, Auftragsmodule und Pumpen
- Entwicklung wirtschaftlicher Assemblierungsverfahren
- Entwicklung von ECUs (electrical control units) zur elektrischen Ansteuerung
- Umfassende Anwendungsprüfung
- Herstellung von Demonstratoren für die Zielanwendungen

## Umweltfreundliche Gesamtbilanz

Um eine kostengünstige und energieeffiziente Lösung für EC-Elemente zu entwickeln, wurden verschiedene Herstellungsoptionen durchgespielt. Die Machbarkeit einer Hochdurchsatzproduktion der EC-Elementkomponenten konnte anhand von kontinuierlichen und semi-automatischen Beschichtungsverfahren gezeigt werden. Die erforderliche Homogenität der Schichtdicken ließ sich durch Einsatz hochpräziser Düsen- und Pumpentechnik erzielen; Weißlichtinterferometrie diente zur In-line-Qualitätskontrolle. Die Ergebnisse einer kompletten Ökobilanzierung inklusive Benchmarking belegten die Umweltfreundlichkeit der Technologie und zeigten beträchtliche Energieeinsparpotenziale auf.

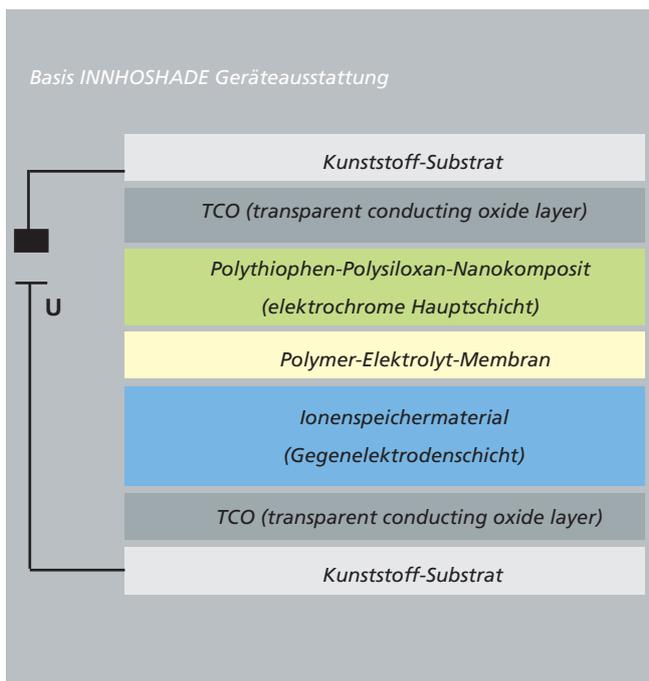
- Optischer Kontrast: ca. 60 %, Schaltzeit: etwa 20 s pro Schaltvorgang für 30 x 45 cm<sup>2</sup>
- Stromverbrauch: 160 mA pro Schaltvorgang für 0 x 45 cm<sup>2</sup> ; Spannung: -1.5 bis +1.5 V<sub>cc</sub>
- Zyklfestigkeit: >120.000 unter Laborbedingungen (entspricht 20 Schaltvorgängen pro Tag für 20 Jahre)
- Thermische Stabilität: Betrieb -25 bis +80 °C (Survival -50 bis +120 °C).



Herstellung von Demonstratoren © EADS

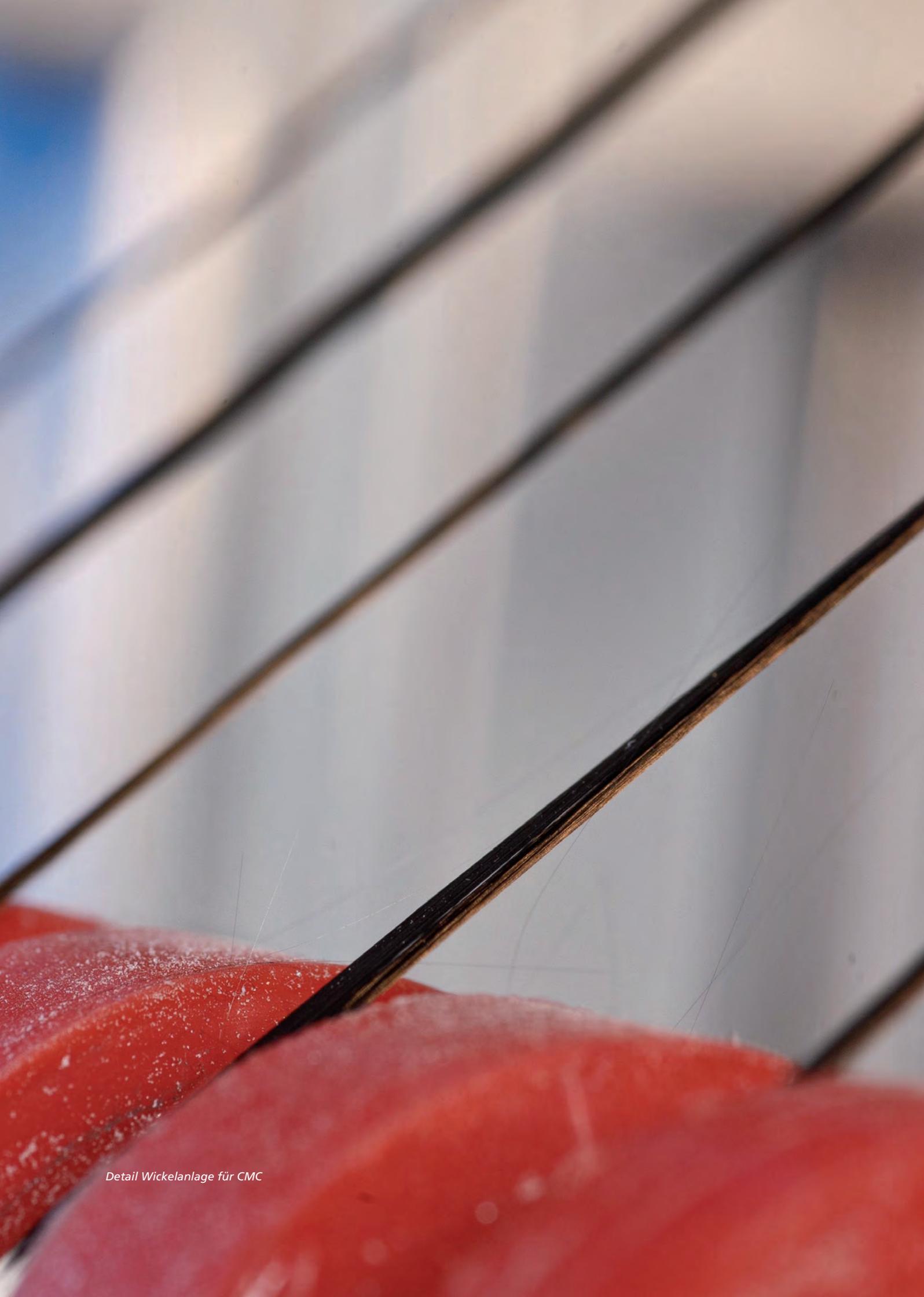
## INNOSHADE ebnet den Weg für neue Produkte

Kurzgefasst bietet die INNOSHADE-Technologie ein neues Konzept zur intelligenten Verschattung, das im Hinblick auf grundlegende Aspekte wie Schaltzeit, Zyklusfestigkeit, Gewicht, Flexibilität und Herstellungskosten ein einzigartiges Eigenschaftsprofil bietet, welches aus dem Einsatz von kontinuierlicher Herstellungsverfahren erwächst. Der hohe Anteil an industriellen Forschungspartnern in INNOSHADE (> 50 %, fünf KmU, vier Global Player) spiegelt die attraktiven wirtschaftlichen Perspektiven des Projekts. Derzeit werden verschiedene Optionen für die Umsetzung der Ergebnisse geprüft. Ziel ist, eine Prototypenfertigung in Europa zu installieren, um interessierte Kunden aus der Industrie mit der neuen Technologie bemustern zu können.



## Kontakt

Dr. Uwe Posset  
 ☎ +49 931 4100-638  
 uwe.posset@isc.fraunhofer.de



*Detail Wickelanlage für CMC*

# **FRAUNHOFER- ZENTRUM HTL**

---

---

# DAS FRAUNHOFER-ZENTRUM HTL

PD DR. FRIEDRICH RAETHER

In Deutschland werden ca. 7 % der Primärenergie für die Wärmebehandlung von Werkstoffen im Temperaturbereich oberhalb 1000 °C aufgewendet. Dies entspricht einer Gesamtenergie von 1000 PJ pro Jahr oder umgerechnet 30 Kernkraftwerken mit einer mittleren Leistung von 1 GW. Den größten Energieverbrauch hat die Eisen- und Stahlindustrie, aber auch Steine und Erden sowie die Glas- und Keramikindustrie tragen wesentlich zu den hohen Verbrauchswerten im Hochtemperaturbereich bei. Bei der Energieerzeugung aus fossilen Energieträgern lässt sich die Effizienz im Hochtemperaturbereich ebenfalls verbessern. So steigt der Wirkungsgrad von Gasturbinen deutlich mit der Turbineneintrittstemperatur der Gase an. Dies gilt nicht nur für stationäre Gasturbinen, sondern gleichermaßen für Fluggasturbinen. Eine Verbesserung der Energieeffizienz von Hochtemperaturprozessen würde sich also nachhaltig auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirken. Sie könnte relativ rasch umgesetzt werden, ohne dass dafür – wie bei der Erzeugung regenerativer Energie – erst neue Infrastruktur zur Energieverteilung und -speicherung geschaffen werden muss.

Das Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL trägt auf drei Gebieten zur Verbesserung der Energieeffizienz von Hochtemperaturprozessen in der Industrie bei:

- Hochtemperaturbeständige Materialien
- Bauteile und Systeme für Hochtemperaturanwendungen
- Charakterisierung und Optimierung von Hochtemperaturprozessen

Als hochtemperaturbeständige Materialien werden keramische Komposite, Fasern und Beschichtungen entwickelt. Die Kompetenz des Zentrums HTL umfasst die chemische Synthese der Ausgangsstoffe ebenso wie das Up-Scaling in den Techniksmaßstab und das Materialdesign am Computer. Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung keramischer Fasern inklusive der geeigneten Faserbeschichtungsverfahren. Am Zentrum HTL werden sowohl oxidkeramische Fasern, z. B. aus Aluminiumoxid, Zirkoniumoxid oder Mullit, als auch nichtoxidische Fasern aus Siliziumcarbid hergestellt.

Bauteile aus Ceramic Matrix Composites (CMC) werden bis zu Größen von ca. 700 mm entworfen und als Prototypen oder Kleinserien gefertigt. Dabei können alle Arten von Fasern verarbeitet werden: Endlosfasern oder Kurzfasern, oxidische oder nichtoxidische Fasern, Gewebe oder Faserovings. Die Matrix wird über keramische Schlicker, Polymere oder Siliziumschmelzen aufgebaut. Das Bauteildesign erfolgt über Computersimulationen des Einsatzverhaltens, die Bauteilprüfung über zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Computertomographie.

Für die Charakterisierung von Materialien bei hohen Temperaturen werden am Zentrum HTL spezielle thermo-optische Prüfverfahren entwickelt, mit denen thermische und mechanische Materialkennwerte von kleinen Bauteilen oder großen Proben bis zu Temperaturen von 2100 °C bestimmt werden. Außerdem werden Materialveränderungen bei Wärmebehandlungsprozessen in situ gemessen. Die Messdaten dienen zur Simulation der Wärmebehandlungsprozesse und zur Optimierung der Energieeffizienz am Computer.

---

### **Herstellung von Isolationsfasern aus umweltfreundlichen Rohstoffen**

---

Keramische Fasern werden als hochwertige Isolationsmaterialien für Hochtemperaturanwendungen eingesetzt. In periodisch betriebenen Öfen sind dadurch beispielsweise Energieeinsparungen von bis zu 30 % möglich. Die derzeit am Markt erhältlichen Fasern basieren allerdings auf einer chlorhaltigen Ausgangsverbindung. Dadurch entstehen bei der Faserherstellung große Mengen von Chlorwasserstoff (HCl) und darüber hinaus auch hochgiftige Dioxine. Am Zentrum HTL wird ein alternativer, chlorfreier Rohstoff zur Herstellung der Isolationsfasern entwickelt. Dazu wird unter Berücksichtigung von Kostenaspekten der Chemismus der Ausgangsverbindungen modifiziert, sodass bei der Faserherstellung die Entstehung von HCl und Dioxinen komplett vermieden wird. Die entwickelten Rohstoffe können im Schleuderspinnverfahren zu Keramikfasern mit den anvisierten Faserdurchmessern und mit der gewünschten Zusammensetzung verarbeitet werden.

In naher Zukunft soll der Übertrag der Entwicklungen in die Produktion beim Kunden erfolgen. Durch die Vermeidung der HCl- und Dioxinemissionen können die energieintensiven Prozesse der Abgasnachbehandlung und der Rückgewinnung von HCl bei der Faserherstellung im Vergleich zum aktuellen Verfahren entfallen. Dadurch wird zusätzlich mit einer Strom-einsparung von knapp 25 % bei der Faserherstellung gerechnet. Durch Anpassung der Verarbeitungseigenschaften und des Herstellverfahrens besteht prinzipiell auch die Möglichkeit, die entwickelten Rohstoffe zu keramischen Verstärkungsfasern zu verarbeiten. Diese werden in Hochleistungsverbundwerkstoffen eingesetzt.

---

### **Energieeffizienzsteigerung von Brennprozessen durch faserverstärkte Brennhilfsmittel**

---

Brennhilfsmittel (BHM) sind bei der Wärmebehandlung von Produkten aus Glas, Keramik oder Metallen unabdingbar. Ihnen fällt eine Stütz-, Fixierungs- oder Kapselungsfunktion während des Brennvorgangs zu. Die BHM müssen ebenso wie das Brenngut aufgeheizt werden, was zu einer Erhöhung des notwendigen Energieaufwands führt. Durch eine Verringerung der Masse und somit auch der Wärmekapazität der BHM kann der Energieverbrauch im Wärmebehandlungsprozess gesenkt werden. Dies ist zum Beispiel durch eine dünnwandigere Auslegung der BHM und/oder eine Erhöhung der Porosität realisierbar, wenn gleichzeitig die mechanischen Eigenschaften erhalten bleiben.

In einem Verbundvorhaben des Zentrums HTL mit der Firma Rauschert sollen die mechanischen und thermischen Eigenschaften der BHM durch eine Faserverstärkung sowie eine Optimierung der Werkstoff-Mikrostruktur verbessert werden. Die BHM-Grünkörper sollen durch Spritzgussprozesse endformnah hergestellt werden. Die Vorteile der Faserverstärkung liegen in einer höheren Schadenstoleranz, Temperaturwechselbeständigkeit und Thermoschockbeständigkeit im Vergleich zu monolithischen Keramiken.



Niederdruckturbinen (Quelle: MTU Aero Engines)

### Inhärent sicherer und energieeffizienter LSI-Prozess

Siliziumcarbid wird für Komponenten in der Fluidtechnik (Dicht- und Gleitringe) sowie der Wärmetechnik (Brennhilfsmittel, Tiegel, Heizer, Wärmetauscher) und Friktionstechnik (Bremsen, Kupplungen) eingesetzt. Es entfaltet seine Stärken besonders, wenn ungünstige Umgebungsbedingungen wie Reibverschleiß, hohe Temperaturen oder aggressive Medien vorhanden sind. Siliziumcarbid kann über eine Festphasen- oder Flüssigphasensinterung verdichtet werden. Die Sinterung findet bei sehr hohen Temperaturen zwischen 1700 °C und 2100 °C statt und hat einen entsprechend hohen Energieverbrauch.

Alternativ kann ein porenfreier SiC-Werkstoff auch durch Infiltration einer Siliziumschmelze in eine poröse Preform aus Kohlenstoff und Siliziumcarbid erzeugt werden (engl. Liquid Silicon Infiltration = LSI). Mit dem LSI-Prozess werden SiC-Keramiken endformnah bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen (Schmelzpunkt Silizium: 1410 °C) hergestellt.

Im Verbundprojekt ISE-LSI soll das Verständnis der Prozesskinetik durch In-situ-Messungen des LSI-Prozesses an den thermo-optischen-Messanlagen des Zentrums HTL vertieft werden. Der Prozess soll anschließend am Computer simuliert und der Energiebedarf deutlich reduziert werden.

### Keramischer Hochtemperatur-Leichtbauwerkstoff für die Anwendung in Fluggasturbinen

Im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms IV des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) wurden in Zusammenarbeit mit MTU Aero Engines oxidkeramische Verbundwerkstoffe (OFC) für die Anwendung in Fluggasturbinen entwickelt. Die Materialien auf der Basis einer Zirkonoxid-Matrix wurden unter Verwendung von Nextel™ 610-Fasern über das Wickelverfahren hergestellt. Die Wahl des Matrixwerkstoffs ist durch die hervorragende Heißgaskorrosionsbeständigkeit von Zirkonoxid begründet.

Die keramischen Composite wurden in Form von mehrlagigen, planaren Wickelkörpern mit einer Faserorientierung von 0°/90° gefertigt, um eine vergleichende Betrachtung mit laminierten OFC-Werkstoffen zu ermöglichen. Mittels Raumtemperatur-Biegeversuchen konnten bei den neuentwickelten ZrO<sub>2</sub>-Verbundmaterialien mechanische Eigenschaften auf dem Niveau von kommerziell erhältlichen OFC-Werkstoffen nachgewiesen werden. Des Weiteren wurden die Werkstoffe mittels Hochtemperatur-Biegeversuchen im Temperaturbereich bis 1000 °C charakterisiert. Durch Heißgaskorrosionstests bei MTU Aero Engines konnte eine Beständigkeit der untersuchten Werkstoffproben unter zyklischer Temperaturbeanspruchung über mehrere hundert Stunden nachgewiesen werden.



### Neuentwicklung thermo-optischer Messanlagen

Die hohe Leistungsfähigkeit der bestehenden thermo-optischen Anlagen wurde durch gezielte Optimierung der Komponenten deutlich gesteigert und durch eine Vielzahl weiterer Messmöglichkeiten ergänzt. Die Basiskomponenten Ofen, optischer Strahlengang und Messsoftware wurden dazu einem Redesign unterzogen. Ziel war eine deutlich verbesserte Temperaturhomogenität des Ofens, ein robusterer Abbildungsprozess mit der maximal erzielbaren optischen Auflösung und eine benutzerfreundlichere Bedienbarkeit der Anlagen. Zusätzlich wurden neue Messmöglichkeiten evaluiert:

- Temperatur-/Wärmeleitfähigkeit
- E-Modul
- Wärmeausdehnung
- Wärmekapazität
- Thermoschockbeständigkeit
- Thermozykliefähigkeit
- Emissivität
- Rissuferreibung.

Diese sollen in einer neuen thermo-optischen Messanlage TOM-wave integriert werden, die gerade als Prototyp entwickelt wird. In TOM-wave werden Proben in kontrollierter Atmosphäre bis zu Temperaturen von 1800 °C vorgeheizt. Die Messsignale werden durch einen CO<sub>2</sub>-Laser erzeugt, der die Proben zusätzlich aufheizt. Die Laseroptik wird an die unterschiedlichen Messanforderungen angepasst. Die Detektion der Messsignale erfolgt akustisch bzw. pyrometrisch.

Durch diese Entwicklung bieten die TOM-Anlagen nun ein noch breiteres Spektrum an Messmöglichkeiten für die Entwicklung und Optimierung von Hochtemperaturmaterialien.

### Verbesserung der Energieeffizienz von Rollenöfen

Viele Wärmebehandlungsprozesse werden in kontinuierlichen Ofenanlagen durchgeführt. Diese besitzen einen hohen Durchsatz und auch eine hohe Energieeffizienz, weil das Ofenmaterial auf gleichbleibender Temperatur bleibt und nicht, wie bei periodisch beheizten Anlagen, bei jedem Zyklus mit aufgeheizt werden muss. Unter den kontinuierlich arbeitenden Öfen erfreuen sich Rollenöfen steigender Beliebtheit. Dabei wird das Brenngut durch zahlreiche parallel angeordnete, sich drehende Transportrollen durch den Ofen bewegt. Die Rollen ragen seitlich aus dem Ofen heraus und werden mit einem Motor angetrieben. Rollenöfen werden relativ flach gebaut, weil durch die geringe Höhe der Brennstapel Temperaturgradienten im Brenngut und Strahlungsverluste im Ofen minimiert werden.

Der Durchsatz und die Energieeffizienz werden durch die Breite des Ofenschachts bestimmt. Dieser ist durch die Spannweite der Transportrollen limitiert. Im Projekt wird der Energiefluss in Rollenöfen mit Finite-Elemente-Methoden simuliert. Das Einsatzverhalten geeigneter Hochtemperaturmaterialien wird mit den thermooptischen Messmethoden untersucht. Daraus werden Konzepte für einen energieeffizienteren Betrieb der Rollenöfen entwickelt.

### Kontakt

Dr. Friedrich Raether

☎ +49 921 786931-60

friedrich.raether@isc.fraunhofer.de

# KRIECHBESTÄNDIGE METALL-HYBRID-KERAMIKBAUTEILE FÜR HÖCHSTTEMPERATUR-DAMPFANWENDUNGEN IN KRAFTWERKEN

DR. JENS SCHMIDT

## Ressourceneffizienz bei Energieerzeugung

Vor dem Hintergrund eines weltweit steigenden Energiebedarfs bei gleichzeitiger Verknappung von Rohstoffen ist die Steigerung der Ressourceneffizienz bei der Energieerzeugung eine unabdingbare Notwendigkeit und daher ein bedeutendes Handlungsfeld für Wissenschaft und Forschung. Im Kraftwerksbereich ermöglicht die Erhöhung der Betriebstemperatur unmittelbar eine Steigerung des Wirkungsgrads und somit eine effizientere Energieträgerausnutzung.

Eine werkstoffspezifische Limitation für höhere Betriebstemperaturen ist beim derzeitigen Stand der Technik in Form von Heißdampfleitungen aus Stahl gegeben. Aufgrund von Kriechverformungen, welche zum Versagen der Rohrleitung führen, liegt die Einsatzgrenze für Stahl-Rohrleitungen unterhalb von 600 °C bei einem Innendruck von 250 bar. Ziel muss es daher sein, durch eine Armierung mit faserverstärkten keramischen Verbundwerkstoffen (CMC) die Kriechverformung der Stahlrohrleitung zu behindern und damit eine Steigerung der Betriebstemperatur und der Standzeit zu ermöglichen.

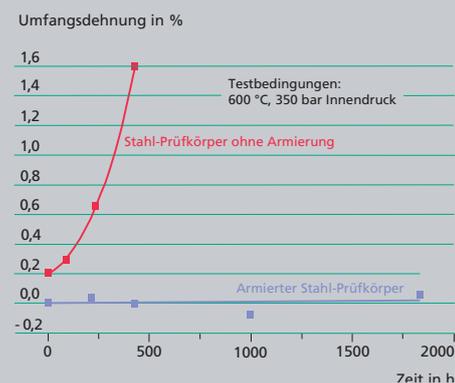
Im Rahmen des BMBF-Förderprogramms »Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING« entwickelt das Fraunhofer ISC am Zentrum HTL im Verbundprojekt »Compound-Rohre« gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft grundlegende Konzepte und Verfahrensweisen zur Armierung von Heißdampfleitungen mit CMC. Hierbei soll nachgewiesen werden, dass die Kriechverformung von

Heißdampfleitungen aus Stahl unter überkritischen Bedingungen von der keramischen Armierung wirksam behindert wird.

## Funktionstrennung der Komponenten

Eine wesentliche Grundidee beim Konzept der CMC-armierten Heißdampfleitung ist die Funktionentrennung der Komponenten. Das Stahl-Innenrohr übernimmt die Funktion der gasdichten, korrosionsstabilen Medienleitung und der temperaturstabile CMC-Mantel begrenzt die Kriechverformung des Innenrohrs. Um die unterschiedliche Wärmedehnung von Stahlrohr und CMC-Mantel zu kompensieren, wird ein Interphasenmaterial zwischen den beiden Hauptkomponenten integriert.

Prüfstandsversuche – Kriechverformung eines Stahl-Prüfkörpers mit und ohne Armierung bei 600 °C und 350 bar Innendruck





50 mm

Prüfkörper aus Stahl ohne (oben) und mit CMC-Armierung (unten)

In den Versuchen zur Herstellung von derartigen Compoundrohren wurden unterschiedliche Fasertypen in Verbindung mit einer precursorbasierten Matrix zu einem Armierungsmaterial verarbeitet, welches auch ohne Einsatz eines Ofens direkt an Luft keramisiert werden kann. Die Kriechbeständigkeit und Festigkeit der Fasern wurden mit Kriechverformungs- und Zugtests unter kraftwerksrelevanten Bedingungen untersucht, um die am besten geeigneten Fasertypen zu bestimmen. Die Abhängigkeit der Festigkeit vom Wickelwinkel bei Wickelkörpern wurde mittels Split-Ring-Test an zylindrischen Probenkörpern ermittelt. Durch Zeitstandsversuche an Luft wurde das Kriechverhalten armierter Stahlrohre gemessen.

#### Vom Labor zum Langzeittest im Kraftwerk

Mit oxidkeramischen Fasern, die auch bei hohen Anwendungstemperaturen zugfest sind, konnte die Machbarkeit des Metall-Keramik-Hybridrohrkonzepts nachgewiesen werden. Vom Zentrum HTL wurde ein Nasswickelprozess zur Herstellung von Faserarmierungen mit einer 4-Achsen-Wickelmaschine erarbeitet. Die Verarbeitung konnte sowohl mit Faserrovings als auch zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt mit Gewebe demonstriert werden, wobei aus Spannungsgründen eine unidirektionale Armierung des Metallrohrs angestrebt wurde. Durch den Einsatz von kommerziell verfügbaren Precursoren als Matrix und einem Polymerinfiltrationsprozess konnte nachgewiesen werden, dass auch niedrige Prozesstemperaturen möglich sind, um eine Verbundkeramik zu erzeugen. Auf diese Weise konnten zahlreiche Prüfkörper mit Keramik armiert und für Prüfstandsversuche zur Verfügung gestellt werden.

In Zeitstandsversuchen wurde beim Projektpartner Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) der Nachweis erbracht, dass durch die CMC-Armierung von Stahl-Prüfkörpern die Kriechverformung bei überkritischen Versuchsparametern – Maximaltemperatur von 600 °C und 350 bar Innendruck – signifikant verringert wird. So konnte die Lebensdauer der Stahl-Prüfkörper mindestens um den Faktor 4 gesteigert

werden. Die Makrostruktur der Wicklung bei diesen Modellkörpern (L~380 mm und Ø 34 mm) sowie die Interphase zum Metallrohr wurde durch zerstörungsfreie Untersuchungen anhand hochauflösender Computertomographiebilder vor und nach Zeitstandsversuchen charakterisiert. Hierbei zeigte sich, dass auch bei langen Prüfzeiten von bis zu 2000 Stunden keine Werkstoffschäden im Keramikmantel erkennbar sind. Die Übertragbarkeit des Compoundrohr-Konzepts vom Labormaßstab in einen Feldversuch konnte in der Schlussphase des Projekts direkt im Großkraftwerk Mannheim demonstriert werden. Hierbei wurde eine Heißdampf-Rohrleitung mit einem Keramikmantel von ca. 300 mm Breite und einer Wandstärke von 14 mm armiert sowie mit Thermoelementen und Dehnungssensoren instrumentiert. Die applizierte CMC-Armierung wird in den folgenden Monaten im Kraftwerksbetrieb evaluiert. Die Versuchsdauer beträgt zunächst ein Jahr und die Qualität des keramischen Fasermantels soll beim nächsten Revisionstermin im Jahr 2013 überprüft werden.

#### Eine übertragbare Technologie

Es ist geplant, die erzielten Erkenntnisse zur Armierung von Stahlrohren mit CMC und die Qualitätsprüfung der Hybridstrukturen auf größere Rohrabmessungen zu übertragen und an die komplexen geometrischen Anforderungen im Kraftwerk wie beispielsweise Rohrbögen oder -abgänge anzupassen. Eine Übertragbarkeit des hybriden Werkstoffkonzepts auf andere mit hoher Prozesstemperatur und Innendruck belastete Behälter ist mit der entwickelten Technologie möglich. Ein besonderes Augenmerk muss jedoch auf die Reduzierung der Fertigungskosten gerichtet werden. Hierfür sind eine Teilautomatisierung der einzelnen Fertigungsschritte und eine weitere Optimierung der Prozessparameter erforderlich.

#### Kontakt

Dr. Jens Schmidt

☎ +49 921 786931-25

[jens.schmidt@isc.fraunhofer.de](mailto:jens.schmidt@isc.fraunhofer.de)

# LOW-COST-TECHNOLOGIEN ZUR HERSTELLUNG VON CERAMIC MATRIX COMPOSITES

DR. LIVIU DAN TOMA, DR. ANDREAS NÖTH

## CMC - unerschwinglich für den Massenmarkt?

Keramische Verbundwerkstoffe (Ceramic Matrix Composites, CMC) bestehen aus keramischen Fasern und einer keramischen Matrix. Im Gegensatz zu monolithischen Keramiken weisen diese Werkstoffe bei einer geeigneten Faser-Matrix-Anbindung ein schadenstolerantes Verhalten und somit keinen Sprödbruch auf. Gegenüber Metallen bestehen Vorteile bei Gewicht, Korrosionsbeständigkeit und den mechanischen Hochtemperatureigenschaften.

Allerdings sind CMC aufgrund der hohen Fertigungskosten derzeit nur in High-End-Anwendungen wie beispielsweise in Luft- und Raumfahrt oder im Motorsport einsetzbar. In einem Fraunhofer-internen Forschungsvorhaben zur markt-orientierten strategischen Vorlaufforschung wird am Zentrum HTL gemeinsam mit anderen Fraunhofer-Instituten eine Technologie entwickelt, die eine deutliche Absenkung der Fertigungskosten von CMC um mindestens 25 % ermöglicht. Damit soll der Zugang dieser Werkstoffklasse zu Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau, im Fahrzeugbau und in der Förder- und Energietechnik ermöglicht werden.

## Neue Wege zu günstigerer Fertigung

Am Zentrum HTL wird die Idee realisiert, Produktionsverfahren aus der Kunststofftechnik zu adaptieren, um CMC-Halbzeuge herzustellen. Die Verfahren sollen die Fertigung der Komponenten in hoher Stückzahl und komplexen, endkonturnahen Geometrien ermöglichen. Dazu werden spezielle Si-Polymere entwickelt, welche mit keramischen Kurzfasern versetzt werden und dann in Formgebungstechnologien wie Pressen und Spritzgießen verarbeitet werden können. Durch einen Pyrolyseprozess werden die Si-Polymere nach der Formgebung in eine SiC-Matrix umgewandelt, die homogen verteilte Keramikfasern enthält. Alternativ kann das CMC-Bauteil auch über eine Silizium-Schmelzinfiltration (LSI: Liquid Silicon Infiltration) verdichtet werden.

Um ein schadenstolerantes Verhalten der CMC-Werkstoffe zu erreichen, muss eine schwache Anbindung der Fasern an die Matrix realisiert werden. Deshalb wurde im Projekt eine Faserbeschichtung entwickelt, welche bei mechanischer Zugbelastung der Bauteile sogenannte Faser-Pull-Out-Effekte erlaubt und damit ein quasi-duktilen Werkstoffverhalten ermöglicht. Als Faserbeschichtungstechnologie wurde aus Kostengründen eine nasschemische Route gewählt. Die Herstellung der Ausgangsmischungen aus Keramikfasern und Si-Polymeren erfolgte gemeinsam mit Kollegen vom Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum (Fraunhofer PAZ).



Anlage zur kontinuierlichen Beschichtung von Fasern



Beschichtung von textilen Halbzeugen mit Polymeren

Die Si-Polymere wurden in gelöster Form zusammen mit den Keramikfasern in einem Doppelschneckenextruder compoundiert. Die Fasern wurden dabei als Endlosfasern von einer Spule zugeführt und durch Scherkräfte im Extruder zerkleinert. Auf diese Weise konnten Si-Polymermassen mit homogen verteilten Keramikkurzfasern hergestellt werden.

Die Formgebung erfolgte durch Warmpressen bei Temperaturen von ca. 300 °C und Drücken von ca. 20 MPa. Ein wichtiges Einsparpotenzial ergibt sich durch die endkonturnahe Fertigung der CMC-Bauteile im Presswerkzeug, wodurch der Aufwand für die teure Nachbearbeitung minimiert werden kann. Die Presszyklen wurden entsprechend optimiert.

Alternativ werden beim Fraunhofer IKTS Spritzgussverfahren zur Formgebung erprobt. Im Anschluss an die Formgebung bietet der LSI-Prozess eine gute Möglichkeit zur vollständigen Verdichtung der CMC-Preformen. Hierfür wurde eine Beschichtung entwickelt, die Carbon-Kurzfasern vor dem Angriff der Si-Schmelze bei der Flüssigsilizierung wirksam schützt. Gleichzeitig konnte über die Beschichtung die benötigte schwache Anbindung der Fasern an die Matrix und damit das gewünschte schadenstolerante Verhalten nachgewiesen werden.

### Optimierung Verfahrensparameter

Derzeit wird der Zusammenhang der Verfahrensparameter bei Formgebung und Wärmebehandlung auf die Werkstoffeigenschaften wie Dichte, Porosität, Mikrostruktur und Biegefestigkeit erarbeitet. Die bis dato erzielten Projektergebnisse sind vielversprechend. Gelingt es, in dem Vorhaben bei signifikanter Reduzierung der Fertigungskosten den Stand der Technik bezüglich der Werkstoffeigenschaften zu erreichen, so wird erwartet, dass die CMC-Bauteile neue Märkte und Anwendungen im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus, des Fahrzeugbaus oder in der Energietechnik erschließen können.

### Kontakt

Dr. Liviu Dan Toma

☎ +49 921 786931-26

[liviudan.toma@isc.fraunhofer.de](mailto:liviudan.toma@isc.fraunhofer.de)

Dr. Andraes Nöth

☎ +49 931 4100-450

[andreas.noeth@isc.fraunhofer.de](mailto:andreas.noeth@isc.fraunhofer.de)

---

# ENERGIEEFFIZIENZ BEI DER WÄRMEBEHANDLUNG VON KERAMIKEN

PD DR. FRIEDRICH RAETHER, RALF HERBORN

---

## **Energieverbrauch bei Entbinderung, Sinterung und Endbearbeitung**

---

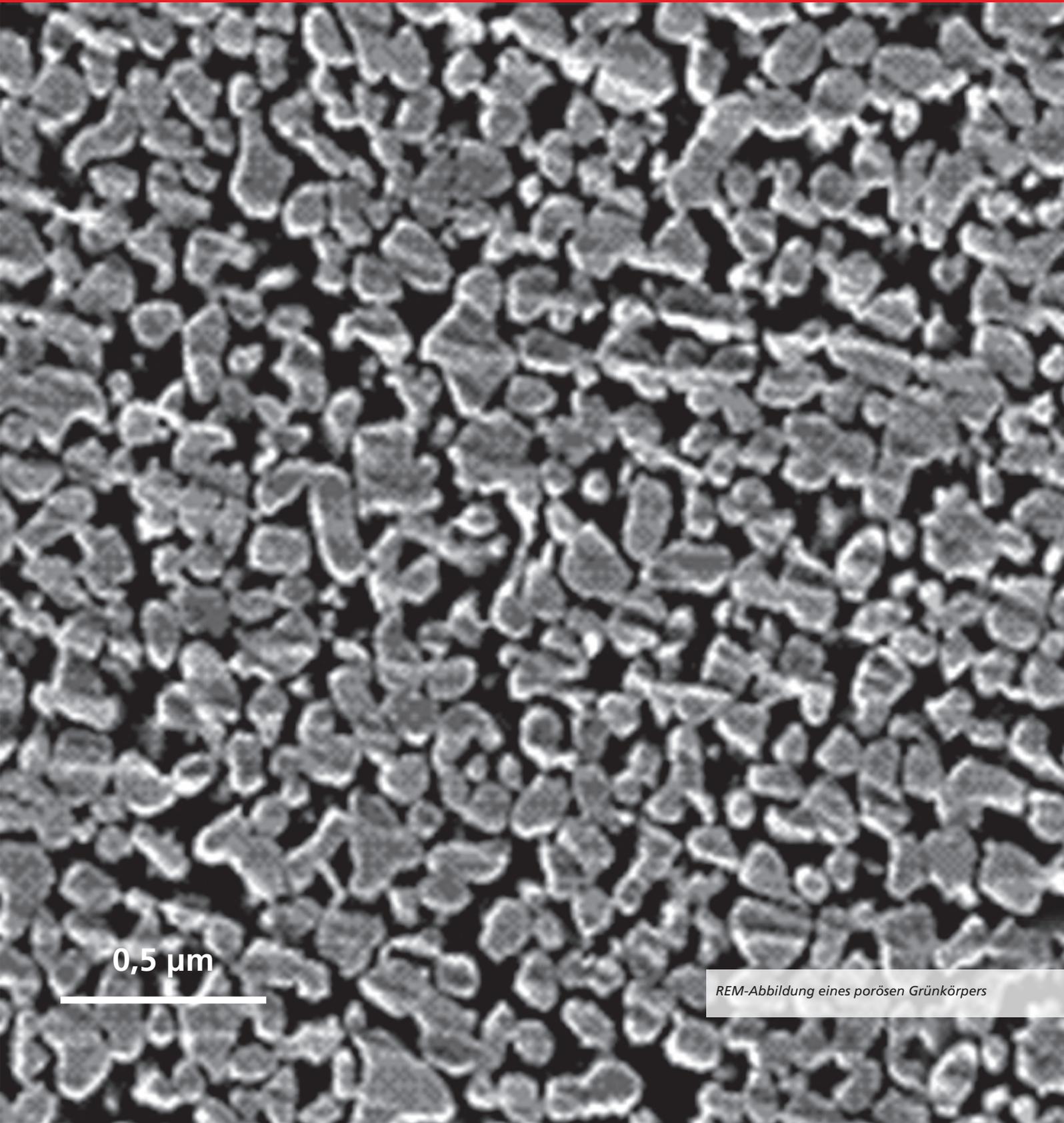
Zunehmend werden Ökosiegel verwendet, die für den Kunden deutlich sichtbar den Energieverbrauch beim Betrieb von technischen Produkten dokumentieren. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis auch der Energieverbrauch bei der Herstellung der Produkte kritisch bewertet wird. Dann zahlt es sich aus, wenn alle Komponenten möglichst energiesparend produziert worden sind. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz wird deshalb bei der Akzeptanz von Werkstoffen eine wachsende Rolle spielen.

Bei der Herstellung von technischen Keramiken ist meist die Wärmebehandlung der energieaufwendigste Schritt. Sie besteht aus der Entbinderung und der anschließenden Sinterung. Bei der Entbinderung werden die für die Formgebung benötigten organischen Additive bei Temperaturen zwischen 200 °C und 600 °C verbrannt bzw. pyrolysiert. Die Entbinderung muss schonend durchgeführt werden, damit die Keramikteile nicht durch zu hohe Druck- bzw. Temperaturgradienten beschädigt werden. Entbinderungszyklen können deshalb einige Tage andauern.

Bei der Sinterung erfolgt die Verdichtung der porösen Formkörper zu einem weitgehend porenfreien Endprodukt. Die Sinterung findet je nach Keramikmaterial bei Temperaturen zwischen 1000 °C und 2200 °C statt. Sie benötigt inklusive Aufheizen und Abkühlen des Brennguts viele Stunden oder sogar einige Tage, je nach Materialzusammensetzung, Form und Größe der Produkte.

Im Anschluss an die Sinterung werden Keramikbauteile in der Regel mechanisch nachbearbeitet, um die Oberflächen zu glätten bzw. das Endmaß genau einzuhalten. Aufgrund der hohen Härte der Keramiken wird auch zur Endbearbeitung ein hoher Energieaufwand benötigt.

Um nachzuweisen, dass sich der Energieaufwand bei der Herstellung technischer Keramiken signifikant reduzieren lässt, wurde Mitte 2009 das vom BMBF geförderte Verbundprojekt ENITEC gestartet. Drei Keramikhersteller, zwei Ofenbauer und zwei Forschungsinstitute schlossen sich zusammen, um an sehr unterschiedlichen Keramiken zu zeigen, dass eine Energieeinsparung von mindestens 40 % gegenüber dem Stand der Technik möglich ist, ohne die Qualität der Keramiken zu beeinträchtigen. Exemplarisch wurden so unterschiedliche Keramiken wie Dentalimplantate aus Zirkoniumoxid, Gleitringe aus Siliziumcarbid und Hochspannungsisolatoren aus Porzellan untersucht.



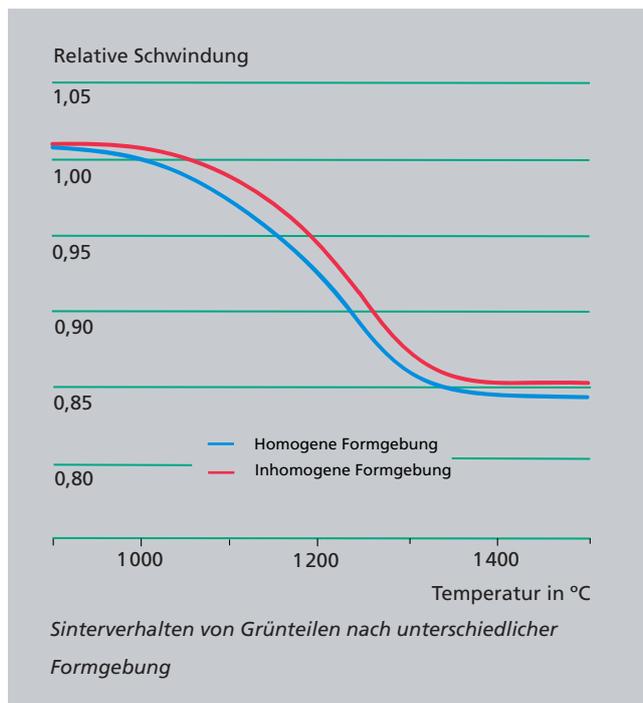
0,5  $\mu\text{m}$

REM-Abbildung eines porösen Grünkörpers



## Bewertung der Formgebung

Am Zentrum HTL wurden im Projekt ENITEC drei Verfahren entwickelt, mit denen sich die Qualität der Formgebung auf unterschiedlichen Größenskalen vom Submikrometerbereich bis hin zu einigen Zentimetern messen lässt.



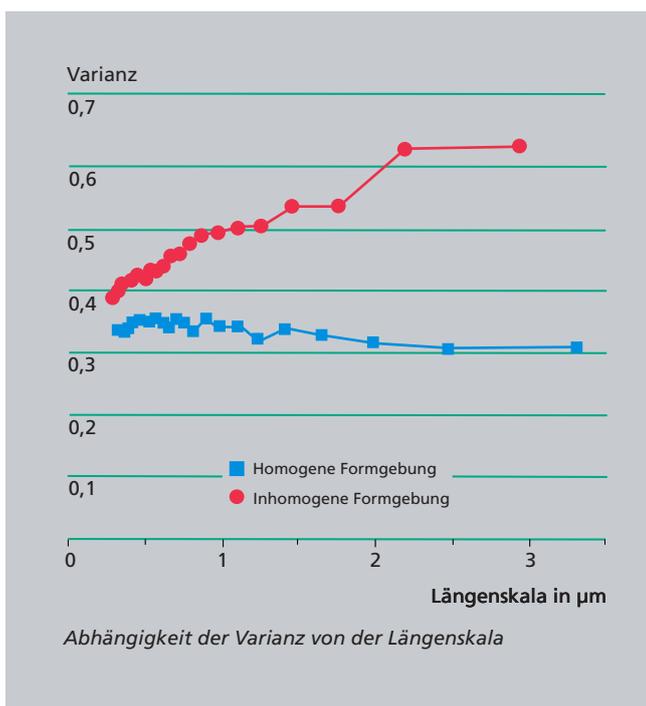
Für Untersuchungen auf der Submikrometerskala werden die empfindlichen Grünteile mittels Ionenstrahltechnik (Cross Section Polishing) nahezu frei von Artefakten präpariert. Anschließend werden sie im Rasterelektronenmikroskop mit hohem Kontrast abgebildet. Die Homogenität der Porenverteilung wird mit einer eigens entwickelten Software bestimmt. Die Verbesserung der Homogenität geht mit einer deutlichen Absenkung der benötigten Sintertemperatur einher. Auf einer mittleren Größenskala wurden Immersionsmethoden zur Bewertung der Grünteile entwickelt.

Dabei wurden Flüssigkeiten identifiziert, die den gleichen Brechungsindex haben wie die Keramiken. Diese Flüssigkeiten werden in die Grünteile infiltriert, sodass sich Poren und Keramikpartikel optisch nicht mehr unterscheiden und die Grünteile transparent werden. Im Lichtmikroskop können dann einzelne Fehler im Größenbereich von ca. 20 µm bis zu einigen Millimetern identifiziert werden. Diese werden durch eine Zielpräparation freigelegt und untersucht, sodass die Fehlerursachen im Prozess abgestellt und Ausschussraten reduziert werden können. Größere Poren werden durch teilweises Abziehen der Flüssigkeit erkannt. Im Beispiel war das Grünteil durch Trockenpressen aus einem Sprühgranulat hergestellt worden. Nach dem Abziehen der Flüssigkeit wurden die Zwickel zwischen den einzelnen Granulen sichtbar, woraus gefolgert wurde, dass der Pressdruck erhöht und/oder die Granulatfestigkeit abgesenkt werden müssen.

Die Homogenität der Porenverteilung auf der Bauteilgrößenskala entscheidet wesentlich über den Verzug bei der Sinterung und damit über die endformnahe Herstellung der Keramikteile. Zur Messung der Porenverteilung wurden unterschiedliche Röntgenverfahren untersucht. Die genauesten Messergebnisse wurden jedoch erzielt, indem zylindrische Bohrkerne aus den Grünteilen entnommen und anschließend in den thermo-optischen Anlagen des Zentrums HTL gesintert wurden. Durch zahlreiche Messfenster, die entlang der Achse der Bohrkerne positioniert wurden, konnte deren radiale Schwindung beim Sintern mit einer Genauigkeit von ca. 10 µm gemessen werden. Daraus ließen sich rechnerisch Porositätsschwankungen in den Grünteilen im Bereich von 0,1% ermitteln. Diese Genauigkeit war ausreichend, um Grünteile für ein endbearbeitungsfreies Herstellverfahren zu qualifizieren.

Durch Trockenpressen hergestellte Grünprobe im Lichtmikroskop nach Infiltration mit Immersionslösung. Die Zwikel zwischen den Granulen sind deutlich sichtbar.

500  $\mu\text{m}$



### Optimierung der Wärmebehandlung

Eine weitere Aufgabe des Zentrums HTL im Projekt ENITEC war die Weiterentwicklung der In-situ-Messtechnik zur Untersuchung der Vorgänge während der Wärmebehandlung. Hier wurde insbesondere die Schalldetektion als sehr empfindliche Messmethode identifiziert, mit der Schäden an den Grünteilen bei zu raschem Aufheizen erkannt werden können. Mittels Schalldetektion wurde z. B. die maximal zulässige Aufheizrate bestimmt, bei der noch keine Risse beim Entbindern von Grünteilen auftreten. Die Kinetic-Field-Technik, die bereits aus früheren Untersuchungen bekannt war, wurde im Projekt ENITEC weiter qualifiziert und universell eingesetzt, um die Reaktionskinetik thermisch aktivierter Prozesse zu berechnen. Temperaturverteilung und Energieverbrauch in stationären Ofenanlagen wurden mit FE-Methoden simuliert. Die Zusammen-

führung von Kinetic-Field-Technik und Ofensimulation erlaubt eine gezielte Minimierung des Energieverbrauchs, ohne dass dabei die Qualität der gesinterten Keramiken beeinträchtigt wird.

Das Projekt wurde 2012 erfolgreich abgeschlossen. Wesentliche Erfolgskriterien bei der Energieeinsparung waren: eine Formgebung mit hoher Qualität, die Optimierung der Brennhilfsmittel, die Minimierung von Wärmeverlusten aus den Öfen, die gezielte Optimierung der Temperaturzyklen und die Minimierung des Nachbearbeitungsaufwands.

Die Erkenntnisse aus ENITEC bilden die Grundlage für ein größer angelegtes Forschungsprojekt am Fraunhofer-Zentrum HTL, das vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie gefördert werden wird. Das Projekt zielt auf eine Verbesserung von Energieeffizienz und  $\text{CO}_2$ -Bilanzen in industriellen Wärmebehandlungsprozessen allgemein. In diesem Bereich werden allein 12 % der in Deutschland eingesetzten Primärenergie verbraucht. Auf Hochtemperaturprozesse oberhalb von 1000 °C entfallen dabei rund 7 %, das entspricht der Leistung von rund 30 Kraftwerken. Gelingt es hier, den Energieverbrauch signifikant zu senken, wird dies ein spürbarer Beitrag zur Energiewende in Deutschland und beim Erreichen der vereinbarten  $\text{CO}_2$ -Emissionsziele sein.

### Kontakt

PD Dr. Friedrich Raether

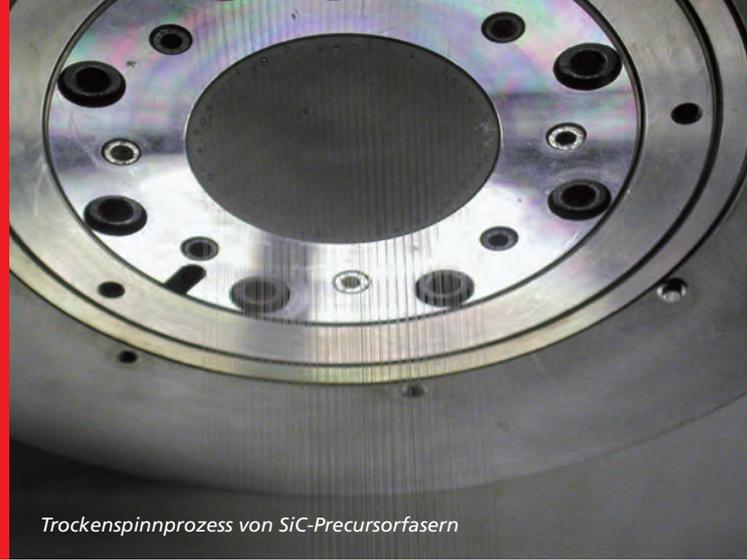
☎ +49 921 786931-60

friedrich.raether@isc.fraunhofer.de

Ralf Herborn

☎ +49 931 4100-410

ralf.herborn@isc.fraunhofer.de



Trockenspinprozess von SiC-Precursorfasern

# ENTWICKLUNG EINER EUROPÄISCHEN SiC-FASERFERTIGUNG

ARNE RÜDINGER

## Innovationsdruck auf dem europäischen Markt

Für europäische Unternehmen aus der Luft- und Raumfahrt sowie der Energietechnik hat der Zugang zu Hochleistungsfasern aus Siliziumcarbidkeramik strategische Bedeutung. Bisher fertigen nur drei Produzenten in Übersee Fasern dieses Typs. Der Fasererwerb ist an Auflagen gebunden, die europäische Hersteller nicht erfüllen können, wie etwa eine Offenlegung der Entwicklung beim Anwender. Die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen im Markt keramischer Faserverbundwerkstoffe (CMC) hängt somit von der Verfügbarkeit einer technisch gleichwertigen und preiswerten SiC-Faser aus unabhängiger europäischer Quelle ab. Durch zukünftige international festgelegte Grenzwerte für Schadstoff- und Geräuschemissionen sowie Kerosinverbrauch entsteht in der Luftfahrtbranche zusätzlicher hoher Innovationsdruck. Die Anforderungen können nur durch den Einsatz neuer Werkstoffe erfüllt werden, unter denen die CMC zu den aussichtsreichsten Kandidaten gehören. Eine eigenständige SiC-Faserfertigung soll bei der Firma SGL Carbon GmbH, Meitingen, aufgebaut werden. Die Faserentwicklung wird im Rahmen zweier durch den Freistaat Bayern geförderter Verbundprojekte – SiC-Tec 1 und SiC-Tec 2 – gemeinsam von SGL und dem Zentrum HTL durchgeführt.

## Kostengünstige Herstellung und Aufbau von Lieferketten

Im Rahmen des Projekts SiC-Tec 1 wurde ein Faserherstellungsprozess entwickelt, der sich durch zwei grundlegende Neuerungen gegenüber dem Stand der Technik auszeichnet:

- Verwendung eines preiswerten Ausgangsmaterials für die Herstellung eines spinnbaren Polymers
- Spinnen der thermisch verarbeitbaren Grünfaser aus einer Polymerlösung

Im aktuellen Projekt SiC-Tec 2 soll ein Up-Scaling der Faserherstellung erfolgen. Eine Voraussetzung für die erfolgreiche kommerzielle Umsetzung speziell bei Herstellern von Flugzeugtriebwerken sind deren frühzeitige Einbindung als Anwender von SiC/SiC-CMC und der Aufbau der zukünftigen Lieferkette. Hieraus leiten sich für das Vorhaben SiC-Tec 2 folgende zusätzliche Ziele ab:

- Weiterverarbeitung der entwickelten Faser (Beschichtung, textile Preforms)
- Optimierung eines Matrixpolymers für den Einsatz in SiC/SiC-CMC
- Frühe Zusammenarbeit mit europäischen Herstellern von SiC/SiC-CMC und von Flugzeugtriebwerken zum Aufbau einer Lieferkette für SiC/SiC-CMC



Spule mit SGL-ISC SiC-Keramikfaser;  
100 Filamente, > 100 m

## Aufgaben der Projektpartner

Das Konsortium im Projekt SiC-Tec 2 deckt alle Phasen der Wertschöpfungskette ab. Neben SGL als künftigen Faserhersteller ist der in Würzburg angesiedelte Teil des HTL zur wissenschaftlichen Unterstützung der Polymersynthese und Faserentwicklung am Projekt beteiligt. Grundlage bilden hier vor allem der im Rahmen des Projekts SiC-Tec 1 errichtete Vernetzungsreaktor und die Faserziehanlage. Partner auf Anwenderseite ist die MTU Aero Engines GmbH, München, ein weltweit tätiger Hersteller und Zulieferer von Flugzeugtriebwerken und -komponenten. MTU liefert Vorgaben zu einem Demonstratorbauteil, welches charakteristische Designdetails von bestimmten Bauteilen aus Flugzeugtriebwerken abbildet. Das Demonstratorbauteil wird zu Projektende von der MTU getestet, um die grundsätzliche Eignung der hierfür entwickelten SiC-Fasern bewerten zu können. Die MT Aerospace AG ist bereits Hersteller von SiC/SiC-CMC-Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt und wird zu bestimmten Meilensteinen der Faserentwicklung die SiC-Fasern bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit testen.

## Werkstoffbasis und Herstelltechnik

Die Faserherstellung an der bestehenden Faserspinnanlage des Zentrums HTL wird in zwei Schritten auf 300 Filamente hochskaliert. Neben dem Spinnprozess sind dafür auch die Trocknung, Pyrolyse und Sinterung der Fasern zu optimieren. Die zu erreichenden Fasereigenschaften sind in nebenstehender Tabelle zusammengefasst.

Wesentlich für die Anwendung der Fasern ist eine nachfolgende Faserbeschichtung, die vor Korrosion schützt und eine gezielt einstellbare Anbindung an die umgebende Matrix erlaubt. Nur so kann der Pull-out-Effekt zur gewünschten Steigerung der Bruchzähigkeit genutzt werden. Im nächsten

Schritt soll die textile Verarbeitbarkeit der beschichteten Fasern geprüft werden. Hierzu werden diese gewickelt bzw. zu Gewebe verarbeitet und die Prozessparameter optimiert.

Für den Aufbau einer SiC-Matrix, in die die Fasern eingebettet werden, wird ein am Zentrum HTL hergestellter Polysilan-Polycarbosilan-Precursor verwendet. Er wird durch Variation der Prozessparameter während der thermischen Vernetzungsreaktion bzw. durch Zugabe zusätzlicher Polymere oder Reaktivstoffe optimiert, damit eine für die Polymerinfiltration geeignete Viskosität und eine hohe keramische Ausbeute erreicht werden. Die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften der im Projekt entwickelten CMC-Teile werden gemessen und mit den Eigenschaften von CMC-Teilen verglichen, die bei der Firma MT Aerospace über Gasphaseninfiltration hergestellt wurden.

### Angestrebte Eigenschaften der SiC-Fasern

Eigenschaften/Merkmale

Zugfestigkeit	> 1,5 GPa
E-Modul	> 150 GPa
Zahl der Fasern im Bündel	300
Bündellänge	500 m

### Kontakt

Arne Rüdinger

☎ +49 931 4100-433

arne.ruedinger@isc.fraunhofer.de

# PROJEKTINFORMATIONEN

## ENERGIE

*Konzeptstudien für neuartige Lithium-Ionen-Zellen auf der Basis von Werkstoff-Innovationen »KoLiWIN«*

Teilvorhaben: Elektrodenbeschichtung, hybride Elektrolyte und elektrochemische Charakterisierung

Förderung durch das BMBF

FKZ 03SF0343A

Laufzeit: 1.7.2009 - 30.6.2012

*Projekt Piezo\_EN, Autarke Energieversorgung über intelligente Piezogenerator / Lithium-Akkumulator-Mikrosysteme*

Förderung durch das BMBF

FKZ 16SV3404

Projektpartner: Fraunhofer IIS, Erlangen; Fraunhofer LBF, Darmstadt; Fraunhofer IZM, Berlin; Wölfel Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, Höchberg, VARTA Microbattery GmbH, Ellwangen; OttoBock HealthCare GmbH, Duderstadt; Bayer Material Science AG, Leverkusen; INVENT GmbH, Braunschweig

Laufzeit: 01.04.2008 - 30.09.2011

*Innovative Switchable Shading Appliances based on Nanomaterials and Hybrid Electrochromic Device Configurations (INNOSHADE)*

Förderung durch Europäische Kommission (FP7),

Vertragsnummer 200431

Partner: Centro de Tecnologias Electroquimicas (E), National Institute of Chemistry (SLO), GORENJE Group (SLO), CNRS (F), Institut de Recherche d'HydroQuebec (CN), INSTM c/o Universita Milano-Bicocca (INSTM-UMIB) (I), ESSILOR International (F), MASER Microelectrónica S.L./E, ARCELIK A.S. (TR), SOLEMS S.A. (F), Universidade do Minho c/o Departamento de Fisica (PT), EADS Deutschland GmbH, LCS Life Cycle Simulation GmbH, Coatema Coating Machinery GmbH, Centrum organické chemie s.r.o. (CZ), Hanita Coatings RCA Ltd. (IL).

Laufzeit 1.9.2008 - 31.12.12

*Projekt DEGREEN - Dielektrische Elastomer-Generatoren für regenerative Energien*

Förderung durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

Laufzeit: 1.6.2012 - 31.5.2017

*Entwicklung und Charakteristik nanoskaliger Elektroden-Komposite für EnergyCap: Hochleistungsspeicher für Anwendungen im Bereich der erneuerbaren Energieversorgung, mobiler Bordnetze und Traktionsanwendungen EnergyCap*

Förderung durch das BMBWi

FKZ AZ0327822B

Partner: BMW Forschung und Technik GmbH, München; Freudenberg Vliesstoffe KG, Weinheim; Liebherr-Werk Biberach GmbH; Merck KGaA, Darmstadt; RWTH Aachen; Siemens AG, München; SGL Carbon GmbH, Meitingen; WIMA Kondensatoren GmbH & Co. KG, Berlin, ZSW, Ulm  
Assoziierter Partner ohne Förderung: ENERCON GmbH, Aurich  
Laufzeit 1.7.2009 - 31.3.2012

*»Sugar Alcohol based Materials for Seasonal Storage Applications« SAM.SSA,*

Förderung durch die EU, Vertragsnummer 296006

Partner: Centre National de la Recherche Scientifique (F); Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (F); Institut Jean Lamour (F); RHODIA Operations (F); National R&D Institute for non-ferrous and rare metals (ROM); Technical University of Eindhoven (NL); CIC Energigune (E); AIDICO – Instituto Tecnológico de la Construcción (E); Phase Change Materials Product Limited (UK); EURICE GmbH; Fraunhofer ISE

Laufzeit: 1.4.2012 - 31.3.2015

## HTL

*ENITEC - Effiziente Niederenergie Entbinderungs- und Sinter-  
technik in der Keramikherstellung*

Förderung durch das BMBF

FKZ 02P02025

Partner: CeramTec AG (Plochingen), Lapp Insulators GmbH &  
Co. KG (Wunsiedel), BCE Spezialkeramik (Mannheim), Eisen-  
mann Maschinenbau KG (Böblingen), FCT Systeme GmbH

Laufzeit: 1.7.09 - 30.6.12

*LC-CMC: Low-Cost-Technologien für die Herstellung von  
Bauteilen aus Ceramic Matrix Composites*

Förderprojekt der Fraunhofer-Gesellschaft – Marktorientierte  
Vorlauforschung – MAVO

Laufzeit: 1.2.2010 - 30.1.2013

*SiC-Tec 2*

Förderung durch den Freistaat Bayern / PTJ »Neue Werkstoffe  
in Bayern«, Fraunhofer ISC im Unterauftrag,

Partner SGL-Carbon GmbH, Meitingen, MTU Aero Engines  
GmbH München, MT Aerospace AG Augsburg

Laufzeit 30.6.2010 - 31.12.2013

*Compound-Rohre - Ressourceneffiziente faserummantelte  
Stahlrohre für Höchsttemperaturanwendungen*

Förderung durch das BMBF

FKZ: 03X3529

Projektpartner: EnBW Kraftwerke, Großkraftwerk Mannheim  
AG; Schunk Kohlenstofftechnik GmbH, Heuchelheim;  
Materialprüfungsanstalt (MPA), Universität Stuttgart;  
Universität Bayreuth, Lehrstuhl Keramische Werkstoffe (CME);  
Universität Haifa, Technion Materials Engineering, Haifa, (IL)

Laufzeit 01.06.2009 - 31.12.2012

*Herstellung von Isolationsfasern aus umweltfreundlichen  
Rohstoffen*

Förderung durch die DBU,

Projektpartner Fa. Rath GmbH

*Entwicklung von kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen für  
den Einsatz als Brennhilfsmittel (CMC-BHM)*

Förderung durch das Programm Neue Werkstoffe in Bayern

FKZ NW-1205-0005

Partner Rauschert GmbH

Laufzeit 1.10.2012 - 30.9.2015

*Inhärent sicherer und energieeffizienter LSI-Prozess - ISE-LSI,*

Förderung durch die Bayrische Forschungstiftung,

FKZ AZ-972-11,

Laufzeit: 15.6.2011 - 15.6.2014.

## UMWELT

*DIBBIOPACK – Development of injection and blow extrusion  
molded biodegradable and multifunctional packages by nano-  
technology: Improvement of structural and barrier properties,  
smart features and sustainability*

Förderung durch die EU (FP7)

Laufzeit: 1.3.2012 - 29.2.2016

[www.dibbiopack.eu](http://www.dibbiopack.eu)

*PlasmaNice – Atmospheric Plasmas for Nanoscale Industrial  
Surface Processing*

Förderung durch die EU (FP7)

FKZ 211473

Partner: Tampere University of Technology (FIN); Flemish  
Institute for Technological Research (B); Technical Research  
Centre of Finland (FIN); University of Technology Eindhoven

---

---

# PROJEKTINFORMATIONEN

---

(NL); Jozef Stefan Institute (SL); Stora Enso Oyj (FIN); AFS  
Entwicklungs- und Vertriebs GmbH; Segers & Balcaen (B); Print  
2000 Nyomda Kft (HU); SurA Chemicals GmbH (D); Sappi  
Netherlands Services B.V. (NL); Technical University of Denmark  
(DK); 2B Consulenza Ambientale de Leo Breedveld (IT);  
<http://hlab.ee.tut.fi/plasmanice/home>

## GESUNDHEIT

*Fraunhofer-Attract-Projekt:*  
*Zellbasierte Assays auf 3D-bottom-up-nanostrukturierten*  
*Oberflächen für regenerative Implantate und Trägerstrukturen*  
*3DNanoZell*  
Laufzeit: 1.1.2013 - 31.12.2018

*Chairside – Volkskrone: Kostengünstiger, hochwertiger*  
*Zahnersatz*  
Förderung durch die Fraunhofer-Gesellschaft als  
marktorientiertes Eigenforschungsprojekt  
Laufzeit: 12.10.2009 - 30.4.2012

*All-in-One Adhäsive: Einfach applizierbare, langzeitstabile*  
*Materiallösung für die Dentalmedizin*  
Förderung durch die Fraunhofer-Gesellschaft  
marktorientiertes Eigenforschungsprojekt  
Laufzeit: 1.11.2008 - 30.4.2011



---

---

# FRAUNHOFER

---

---

## Die Fraunhofer-Gesellschaft

---

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 66 Institute und selbstständige Forschungseinrichtungen. Rund 22 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,9 Milliarden Euro. Davon fallen 1,6 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Niederlassungen sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787 – 1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.



---

---

# IMPRESSUM

---

## Redaktion

Marie-Luise Righi  
Katrin Selsam-Geißler  
Martina Hofmann  
Prof. Dr. Gerhard Sextl

## Grafiken und Diagramme

Winfried Müller  
Katrin Selsam-Geißler

## Layout und Produktion

Katrin Selsam-Geißler  
Frank-Wolf Zürn, Profil G.b.R., Reichenberg

## Übersetzung

Burton, Van Iersel & Whitney GmbH, München

## Bildquellen

Titelbild: Frank-Wolf Zürn, Portraits: Katrin Heyer,  
Prof. Dr. Gerhard Sextl S. 35, Simona Babonea S. 36  
Objektfotos: Knud Dobberke und  
Katrin Heyer S. 15, 103, Wolfram Scheide S. 17,  
Marie-Luise Righi S. 37, G. Scheffler S. 37,  
Respondek S. 41 rechts, Wikipedia S. 58,  
Katharina Müller, Pixelio, S. 62 links (Hintergrund),  
Frank-Wolf Zürn S. 62 (Vordergrund),  
EADS S. 83, MTU Aero Engines S. 88,  
Fotostudio Thomas Köhler, Bayreuth  
S. 84, S. 89 (rechts) und S. 92, S. 93, S. 96

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier.

Das Kopieren und Weiterverwenden von Inhalten ohne  
Genehmigung der Redaktion ist nicht gestattet.

© Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC, Würzburg 2012

## Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC  
Neunerplatz 2  
97082 Würzburg  
☎ +49 931 4100 0  
marie-luise.righi@isc.fraunhofer.de  
**www.isc.fraunhofer.de**

## Anschriften weiterer Standorte

Fraunhofer ISC - Außenstelle Bronnbach  
Bronnbach 28  
97877 Wertheim-Bronnbach  
☎ +49 9342 9221-702

Fraunhofer-Zentrum für Hochtemperatur-Leichtbau HTL  
Gottlieb-Keim-Str. 60  
95448 Bayreuth  
☎ +49 921 786931-20  
htl.info@isc.fraunhofer.de  
**www.htl.fraunhofer.de**

Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und  
Ressourcenstrategie IWKS  
Brentanostraße 2, 63755 Alzenau  
sowie im Industriepark Hanau-Wolfgang, 63457 Hanau  
☎ +49 6023 32039-801  
iwks.info@isc.fraunhofer.de  
**www.iwks.fraunhofer.de**