



**Fraunhofer** Institut  
Fertigungstechnik  
Materialforschung



**07/08**

**Jahresbericht  
2007/2008**

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung (IFAM)

**Jahresbericht 2007/2008**



# Inhalt

## Das Institut im Profil

Vorwort .....	4
Das Institut im Profil .....	8
Kurzporträt und Organigramm .....	9
Das Institut in Zahlen .....	10
Das Kuratorium des Instituts .....	12
Forschung in unmittelbarer Nachbarschaft .....	13
Die Fraunhofer-Gesellschaft .....	14
Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile .....	15
Fraunhofer-Themenverbund Adaptronik .....	16
Fraunhofer-Themenverbund Nanotechnologie .....	17
Fraunhofer-Themenverbund Polymere Oberflächen (POLO) .....	17
Fraunhofer-Themenverbund Numerische Simulation .....	18
Fraunhofer-Allianz Photokatalyse .....	18
Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping .....	19
Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik .....	19
Fraunhofer Technology Academy .....	20
Fraunhofer-Netzwerk Windenergie .....	21

## Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe

Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe .....	23
Kompetenzen und Know-how .....	24
Arbeitsgebiete und Ansprechpartner .....	26
Ausstattung .....	27
Lost-Foam-Verfahren zur Herstellung von Kleinbauteilen .....	28
Aluminiumschwämme in der Klimatechnik .....	31
Sichere Elektronikkühlung durch Miniaturwärmerohre aus Kupfer ....	34
Neuartige Mikrosysteme für die innovative Synthese von ionischen Flüssigkeiten – NEMESIS .....	37
Realisierung des Shape-Memory-Effekts von Nickel-Titan durch $\mu$ -MIM .....	41
Materialien für die Wasserstoffspeicherung Verbesserte Speicherkapazität und Kinetik durch Nanostrukturierung ...	45
Der innovative Wachstumskern inno.zellmet .....	48
Werkstoffentwicklung für Schäume auf Ni-Basis für Anwendungen in der Abgasnachbehandlung .....	51

## Bereich Klebtechnik und Oberflächen

Bereich Klebtechnik und Oberflächen .....	55
Kompetenzen und Know-how .....	56
Arbeitsgebiete und Ansprechpartner .....	58
Ausstattung .....	59
Ökonomische Aspekte der Klebtechnik transparent gemacht: Was kostet das Kleben? .....	60
DIN-Norm im Schienenfahrzeugbau – vom IFAM mitentwickelt, vom IFAM überwacht .....	63
Verhinderung von Eishaftung und Eiswachstum an Oberflächen: Eine Problemstellung, zwei Lösungsansätze .....	65
Hochfester Polyurethan-Klarlack – dank einer neuartigen Stabilisierung von Nanopartikeln .....	69
PermaCLEAN <sup>PLAS®</sup> : Neue Beschichtung ermöglicht kostengünstige, umweltfreundliche Entlackung .....	72
Entwicklung lagerstabiler 1-K-Reaktivharzformulierungen durch chemisch modifizierte Nanozeolithe mit Controlled-Release-Funktionalität ...	76
Schwingfestigkeitsprüfung zur Qualifizierung von Faserverbundkunststoffen für Offshore-Windenergieanlagen ...	81
Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik CWMT .....	89
Aeroelastisch-hydrodynamische Simulation optimiert Offshore-Windenergieanlagen .....	90
Das Kleben hat Zukunft: Ein Festkolloquium.....	96

Sehr geehrte Damen und Herren,  
 liebe Geschäftsfreunde und Kooperationspartner,  
 liebe Förderer des Fraunhofer IFAM,



Institutsleitung Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse (links),  
 Dr.-Ing. Helmut Schäfer.

dieser Jahresbericht ist ein Zeugnis der erfolgreichen Geschäftstätigkeit unseres Instituts im vergangenen Jahr. Beide Institutsteile blicken auf eine äußerst positive Entwicklung zurück – sowohl inhaltlich als auch von den Zahlen her. Es ist uns gelungen, den Wachstumskurs der vergangenen Jahre 2007 fortzusetzen. Dies bildet sich nicht nur in der Einwerbung zahlreicher neuer Projekte ab, sondern auch beim personellen Zuwachs. Die Zahl der Mitarbeiter im Gesamtinstitut ist in den vergangenen zwölf Monaten um rund 9 Prozent gestiegen; eine Entwicklung, die auch für die Zukunft fest eingeplant ist. Innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft zählt das Institut mittlerweile zu den größten Einrichtungen. Der große Querschnitt der im IFAM bearbeiteten Themenstellungen verankert unsere Forschungs- und Entwicklungsleistungen heute in vielen unterschiedlichen Märkten. Unsere Aktivitäten am IFAM sind nicht auf eine Nische fokussiert, sondern sehr breit angelegt.

Die Anstrengungen des Institutsteils Formgebung und Funktionswerkstoffe zur Anbahnung neuer

Kundenbeziehungen haben sich nachhaltig ausgezahlt. Auch der Institutsteil Klebtechnik und Oberflächen ist auf Projektebene 2007 überaus erfolgreich geblieben. Insbesondere die enge Partnerschaft mit dem Flugzeugbauer Airbus hat sich hier einmal mehr als ein Motor bedeutender Geschäftstätigkeit erwiesen. Zudem führte die intensive Beantragung von Fördermitteln dazu, dass auf dieser Ebene zahlreiche Projektanträge beider Institutsteile aussichtsreich beschieden wurden. Insgesamt wird deutlich, dass die Nachfrage der deutschen Industrie nach neuen Lösungen zur Sicherung der Technologieführerschaft im globalen Wettbewerb vor allem durch Institute wie dem Fraunhofer IFAM befriedigt wird.

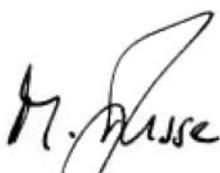
Stellvertretend für viele innovative Projekte, die das IFAM 2007 zusammen mit seinen Industriepartnern begonnen hat, sei an dieser Stelle das neue regionale Innovationscluster »Multifunktionale Materialien und Technologien« – MultiMaT – genannt. Ziel dieses Clusters ist es, durch die Entwicklung konkreter Innovationen im Bereich multifunktionaler Materialien und deren Verarbeitung die Technologieführerschaft für die Region Bremen zu erringen. Nach intensiver Vorarbeit befindet sich nun ein Netzwerk im Aufbau, dem neben den beiden Institutsteilen weitere materialwissenschaftliche Forschungseinrichtungen sowie kleine, mittlere und große Unternehmen angehören. In der Region Bremen starke Branchen wie die Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, Windenergie-, Schiffbau- und Meerestechnik haben einen hohen Bedarf an neuen multifunktionalen Materialien und deren Verarbeitung. Dieser Bedarf soll durch gezielte Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Innovationscluster gedeckt werden. In zunächst fünf Pilotprojekten werden dabei grundlegende Forschungsergebnisse in enger Zusammenarbeit mit den Partnern erarbeitet und in konkrete Anwendungen umgesetzt. Die breite Kompetenz des IFAM bei der Materialforschung und -entwicklung sowie den Verarbeitungstechnologien ist ein wichtiger Grundpfeiler

für eine erfolgreiche Arbeit dieses Clusters. Ein besonderes Merkmal der jüngeren Vergangenheit war auch die stärkere Verzahnung mit der Universität Bremen. Im Rahmen der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder war das IFAM eng in die Bremer Aktivitäten eingebunden. Beim Antrag für das ingenieurwissenschaftliche Exzellenzcluster »Merging Technologies for Sensorial Materials and Smart Products«, in dem die Entwicklung intelligenter Bauteile im Mittelpunkt stand, wirkte das Institut federführend. Auch beim Antrag für die Graduiertenschule »Multi-Scale Design of Functional Hybrid Materials and Devices« war das Institut stark eingebunden. Beide Anträge wurden nachdrücklich positiv beurteilt, erhielten letztlich jedoch nicht den Zuschlag. Dennoch trägt das Engagement innerhalb der Exzellenzinitiative Früchte, weil es die Zusammenarbeit mit wichtigen wissenschaftlichen Instituten der Universität Bremen – insbesondere im Fachbereich Produktionstechnik – intensiviert hat. Der verstärkte interdisziplinäre Gedankenaustausch hat zu neuen Themenfeldern geführt, die in Zukunft gemeinsam von Wissenschaftlern des IFAM, der Universität Bremen und der Jacobs University Bremen weiterentwickelt werden sollen. Während der Institutsteil Formgebung und Funktionswerkstoffe durch die Professur für endformnahe Fertigungstechniken bereits in den Fachbereich Produktionstechnik eingebunden ist, strebt der Institutsteil Klebtechnik und Oberflächen möglichst kurzfristig die Wiederbesetzung »seines« Lehrstuhls an der Universität Bremen an.

Traditionell enge Beziehungen bestehen für das gesamte IFAM zu weiteren Fachbereichen sowie zu zahlreichen Instituten in Bremen. Die Kooperationen sowohl mit der Bremer Wissenschaftsszene als auch insbesondere mit der Bremer Wirtschaft wollen wir weiter ausbauen.

Dieser Jahresbericht informiert Sie mit zahlreichen Projektberichten und Trendartikeln über die positive Entwicklung des Instituts. Dieser Erfolg mit starkem Wachstum auf allen Ebenen fußt vor allem auf dem unablässigen und ideenreichen Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Ihnen gilt unser ganz besonderer Dank. In Zeiten eines Mangels an Naturwissenschaftlern und Ingenieuren in Deutschland sind viele Aufgaben momentan nur mit zusätzlichem Einsatz zu bewältigen. Die Leidenschaft und das Interesse, mit denen sich die IFAM-Beschäftigten diesen Herausforderungen stellen, sind bewundernswert. Stolz sind wir darauf, dass sich trotz attraktiver Angebote aus Wirtschaft und Industrie viele neue Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für eine Tätigkeit in unserem Institut entschieden haben. Das IFAM bietet eine Kombination von Kreativitäts- und Gestaltungsfreiräumen sowie wissenschaftlicher und unternehmerischer Freiheit, die es in dieser Form im industriellen Umfeld kaum gibt. Die Möglichkeit der eigenverantwortlichen Gestaltung von Arbeitsfeldern und Arbeitsinhalten wirkt überaus positiv und setzt offenbar die Kräfte frei, die unser erfolgreiches Wirken erst möglich machen. Dafür bedanken wir uns recht herzlich.

Viel Spaß beim Lesen dieses Jahresberichtes wünschen Ihnen



Matthias Busse



Helmut Schäfer

Bremen im März 2008



# Das Institut im Profil



## Das Institut im Profil

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung leistet aktive Forschungs- und Entwicklungsarbeit in den Bereichen

### Formgebung und Funktionswerkstoffe, Klebtechnik und Oberflächen.

Der Institutsbereich Formgebung und Funktionswerkstoffe konzentriert sich an den Standorten Bremen und Dresden auf drei Kernkompetenzen: Gießerei- und Leichtmetalltechnologie, Mikro- und Nanostrukturierung, Pulver- und Sintertechnologie. Diese spiegeln sich in den Arbeitsgebieten der sieben Kompetenzfelder:

- Funktionsstrukturen
- Gießereitechnik
- Leichtbauwerkstoffe und Analytik
- Mikrofertigung
- Pulvertechnologie
- Sinter- und Verbundwerkstoffe
- Zelluläre Werkstoffe.

Die genannten Kompetenzen adressieren mit Blick auf den Markt insbesondere die Geschäftsfelder Metalle – Präzisionsbauteile und Prozesse, Hochleistungswerkstoffe und funktionelle Oberflächen, Medizintechnik und Biomaterialien sowie den Leichtbau. Das Spektrum der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt schwerpunktmäßig im Dreieck Werkstoff – Formgebung – Bauteil.

Im Hinblick auf den anhaltenden Trend zum Leichtbau ist die Reduzierung des Materialeinsatzes in Fahrzeugen, Maschinen und Geräten eine ständige Forderung der Industrie. Mit diesem Fokus sind in den letzten Jahren neuartige Leichtbauwerkstoffe und gießtechnische Verfahren entwickelt worden.

Neue Perspektiven im Bereich der Miniaturisierung von Bauteilen werden z. B. durch das  $\mu$ -MIM-Verfahren aufgezeigt. Die Anwendungsgebiete der bisher gefertigten Teile liegen in der Mikroantriebstechnik, der Elektronik und der Medizintechnik.

Bei der Entwicklung neuer Werkstoffe und Bauteile ist aber nicht nur die Verbesserung der mechanischen Kennwerte bzw. der Formgebung gefragt. Vielmehr rücken zunehmend sogenannte »intelligente Werkstoffe« (smart materials) in den Blickpunkt des Interesses. Das Fraunhofer IFAM entwickelt Fertigungsprozesse zur Integration von Funktionen in Werkstoffe und Bauteile.

Ziel ist es, Bauteile mit funktionalen Eigenschaften zu versehen, wobei Struktur- und Funktionswerkstoffe fertigungstechnisch zu »intelligenten Bauteilen« (smart products) integriert werden.

Der Institutsbereich Klebtechnik und Oberflächen bietet der Wirtschaft qualifizierte Entwicklungen für die Klebtechnik, Plasmatechnik und Lacktechnik an.

Die Leistungen des Institutsbereichs werden von vielen industriellen Partnern aus sehr unterschiedlichen Branchen nachgefragt. Die wichtigsten Märkte und Kunden sind zurzeit der gesamte Fahrzeugbau – Luft, Straße, Schiene, Wasser – sowie dessen Zulieferer, der Maschinen- und Anlagenbau, die Elektro- und Elektronikindustrie, der Haushaltsgerätebau, die Medizintechnik sowie die Informations- und Kommunikationstechnik.

Ein Angebot, das die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ergänzt und von allen Branchen genutzt wird, ist die zertifizierende Weiterbildung im Bereich der Klebtechnik. Nach der erfolgreichen Implementierung des klebtechnischen Personalqualifizierungskonzeptes im deutschsprachigen Raum und der Durchführung von Weiterbildungslehrgängen in weiteren europäischen Ländern werden die Lehrgänge jetzt auch in den USA für multinational tätige Unternehmen angeboten.

Das Arbeitsgebiet Klebtechnik gliedert sich in die Arbeitsgruppen Klebstoffe und Polymerchemie, Biomolekulares Oberflächen- und Materialdesign, Anwendungstechnik, Fertigungstechnik, Kleben in der Mikrofertigung, Werkstoffe und Bauweisen.

Die Plasmatechnik mit ihren Arbeitsgruppen Niederdruck-Plasmatechnik und Atmosphärendruck-Plasmatechnik sowie die Lacktechnik sind im Arbeitsgebiet Oberflächen zusammengefasst. Ergänzt werden beide Arbeitsgebiete durch die Adhäsions- und Grenzflächenforschung mit den Arbeitsgruppen Angewandte Oberflächen und Schichtanalytik, Elektrochemie und Molecular Modelling.

Gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit betreibt der Bereich Klebtechnik und Oberflächen das Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik CWMT.

## Kurzporträt und Organigramm

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM wurde 1968 als Arbeitsgruppe für angewandte Materialforschung gegründet und 1974 als Institut in die Fraunhofer-Gesellschaft eingegliedert. Als Vertragsforschungsinstitut mit neuen Schwerpunkten und systematischer Erweiterung entstand eine enge Kooperation mit der Universität Bremen. Die Institutsleiter wurden auf die Lehrstühle im Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen berufen.

Das Institut hat Standorte in Bremen, Bremerhaven und Dresden.

Seit 2003 leitet Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse als Mitglied der Institutsleitung den Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe und führt die Geschäfte des gesamten Instituts seit April 2006.

Seit 2007 ist Dr.-Ing. Helmut Schäfer Mitglied der Institutsleitung und leitet den Bereich Klebtechnik und Oberflächen.

In den Arbeitsgebieten Formgebung und Funktionswerkstoffe sowie Klebtechnik und Oberflächen zählt das Institut als neutrale, unabhängige Einrichtung zu den größten in Europa.

Es gehört zum Verbund der 56 Institute der gemeinnützigen Fraunhofer-Gesellschaft. Die Gesellschaft betreibt derzeit an über 40 Standorten in ganz Deutschland rund 80 Forschungseinrichtungen. Rund 13 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von über 1,3 Milliarden Euro. Davon entfallen mehr als eine Milliarde Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Für rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft Erträge aus Aufträgen der Industrie und öffentlich finanzierten Forschungsprojekten.

2007 betrug der Gesamthaushalt des IFAM rund 27 Millionen Euro, beschäftigt waren 343 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon 89 Prozent im wissenschaftlich-technischen Bereich.

→ Professor Dr.-Ing. Matthias Busse  
(geschäftsführend)  
Leitung Formgebung und Funktionswerkstoffe

Dr.-Ing. Frank Petzoldt  
(Stellvertreter)

Professor Dr.-Ing. Bernd Kieback  
Standort Dresden

→ Dr.-Ing. Helmut Schäfer  
Leitung Klebtechnik und Oberflächen

Priv.-Doz. Dr. habil. Andreas Hartwig  
(Stellvertreter)

Priv.-Doz. Dr. habil. Hans-Gerd Busmann  
Standort Bremerhaven CWMT

→ Andreas Heller  
Verwaltungsleitung

## Das Institut in Zahlen

### Haushalt

Der Gesamthaushalt des IFAM (Aufwendungen und Investitionen) im Jahre 2007 setzte sich zusammen aus den Haushalten der beiden Institutsteile Formgebung und Funktionswerkstoffe sowie Klebtechnik und Oberflächen und dem CWMT.

**Das vorläufige Haushaltsergebnis betrug insgesamt 27,1 Millionen Euro. Die einzelnen Institutsteile erreichten nachstehende Ergebnisse:**

#### Formgebung und Funktionswerkstoffe Bremen

Betriebshaushalt (BHH)	6,0 Mio. Euro
eigene Erträge	3,9 Mio. Euro
davon	
Wirtschaftserträge	2,3 Mio. Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	1,6 Mio. Euro
Investitionshaushalt (IHH)	1,9 Mio. Euro

#### Formgebung und Funktionswerkstoffe Dresden

Betriebshaushalt (BHH)	3,0 Mio. Euro
eigene Erträge	2,4 Mio. Euro
davon	
Wirtschaftserträge	1,3 Mio. Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	1,1 Mio. Euro
Investitionshaushalt (IHH)	0,1 Mio. Euro

#### Klebtechnik und Oberflächen Bremen

Betriebshaushalt (BHH)	11,8 Mio. Euro
eigene Erträge	9,6 Mio. Euro
davon	
Wirtschaftserträge	7,2 Mio. Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	2,4 Mio. Euro
Investitionshaushalt (IHH)	2,0 Mio. Euro

#### Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik (CWMT)

##### Bremerhaven

Betriebshaushalt (BHH)	2,0 Mio. Euro
eigene Erträge	1,8 Mio. Euro
davon	
Wirtschaftserträge	0,1 Mio. Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	1,7 Mio. Euro
Investitionshaushalt (IHH)	0,3 Mio. Euro

### Investitionen

Im IFAM wurden 2007 Investitionen in Höhe von 4,3 Millionen Euro getätigt. Sie verteilen sich wie angegeben auf die verschiedenen Institutsteile. Die wichtigsten Anschaffungen sind aufgeführt.

#### Formgebung und Funktionswerkstoffe Bremen (1,9 Mio. Euro)

- Prozessor-Tensiometer
- 3-D-Printer
- Werkzeug für das Spritzprägen von Metallpulverfeedstock
- Lasersinteranlage
- Sinterofen
- Planeten-Schnellmischer
- Tisch-Elektronenmikroskop
- Mikro-Compounder
- Mikro-Spritzgussmaschine
- ThermoCalc Software

#### Formgebung und Funktionswerkstoffe Dresden (0,1 Mio. Euro)

- Umrüstung MUT-Wasserstoffofen
- Meltspinner

#### Klebtechnik und Oberflächen Bremen (2,0 Mio. Euro)

- Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie (LIF)
- Infrarotkamera
- Optical Stimulated Electron Emission (OSEE)
- Gamry Potentiostat
- Korrosionsprüfkammer
- Mikroskop mit Zusatzgerät zur Ermittlung von Oberflächentopographie
- Anlage zur Prüfung der Ringleitungsbeständigkeit von Lacken
- CO<sub>2</sub>-Schneestrahlnreinigung (mobil)
- Sputterquelle 1000 mm
- Excimer-Beschichtungssystem
- Biaxiales Extensometer
- Trennschleifmaschine
- Autoklav

## Personalentwicklung

Am 31. Dezember 2007 waren am IFAM insgesamt 343 Personen (davon 89 Prozent im wissenschaftlich-technischen Bereich) tätig. Im Vergleich zum Vorjahr konnte das Institut bei der Zahl der fest angestellten Mitarbeiter einen Zuwachs von 9 Prozent verzeichnen.

## Personalstruktur 2007

Wissenschaftler	135
Technische Mitarbeiter	84
Verwaltung/Interne Dienste und Azubis	37
Doktoranden, Praktikanten und Hilfskräfte	87

Entwicklung BHH und IHH

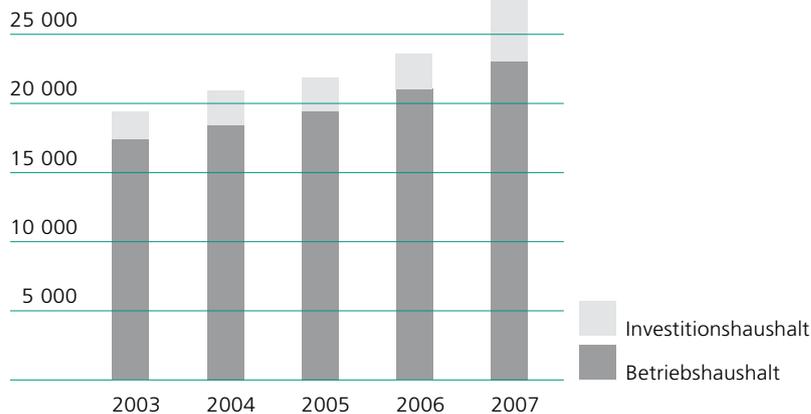


Abb. 1: Aufwendungen (BHH und IHH)

Ertragsentwicklung Betriebshaushalt



Abb. 2: Erträge (BHH) »IFAM-Gesamt«

Personalentwicklung

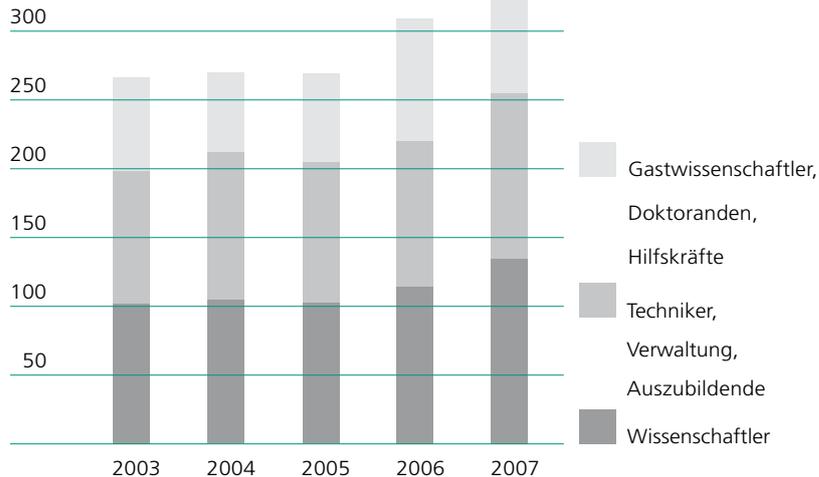


Abb. 3: Personalentwicklung »IFAM-Gesamt«

## Das Kuratorium des Instituts

### Mitglieder

#### A. Picker

Vorsitzender  
Henkel Adhesives Technologies  
Japan, Tokyo

#### Prof. Dr. M. Dröscher

Evonik Industries AG  
Düsseldorf

#### Prof. Dr.-Ing. O. R. Fischer

Deutsche Forschungsgemeinschaft  
Bonn

#### Prof. Dr. R. X. Fischer

Universität Bremen  
Bremen

#### M. Grau

Mankiewicz Gebr. & Co.  
Hamburg

#### H.-H. Jeschke

HDO Druckguss- und Oberflächen-  
technik GmbH  
Paderborn

#### Prof. Dr. J. Klenner

Airbus S.A.S.  
Toulouse, Frankreich

#### V. Kühne

CGTech Deutschland GmbH  
Köln

#### Dr. J. Kurth

KUKA Roboter GmbH  
Gersthofen

#### R. Nowak

Glatt GmbH  
Binzen

#### Dr. R.-J. Peters

VDI-Technologiezentrum GmbH  
Düsseldorf

#### Dr. W. Schreiber

Volkswagen AG  
Wolfsburg

#### J. Tengzelius M. Sc.

Höganäs AB  
Höganäs, Schweden

#### C. Weiss

BEGO Bremer Goldschlägerei  
Bremen

#### Dr.-Ing. G. Wolf

VDG Verein Deutscher Gießereifachleute  
Düsseldorf

#### MinR Dr. rer. nat. R. Zimmermann

Sächsisches Staatsministerium für  
Wissenschaft und Kunst  
Dresden

#### Staatsrat Dr. G. Wewer (bis Juni 2007)

Der Senator für Bildung  
und Wissenschaft der  
Freien Hansestadt Bremen  
Bremen

#### Staatsrat C. Othmer (im Juni 2007)

Die Senatorin für Bildung  
und Wissenschaft der  
Freien Hansestadt Bremen  
Bremen

### Gäste

#### K. Dröder

Volkswagen AG  
Wolfsburg

#### Dr. S. Kienzle

Daimler AG  
Ulm

## Forschung in unmittelbarer Nachbarschaft

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) liegt nicht unweit der BEGO GmbH & Co. KG im Technologiepark Bremen. Die faszinierende Idee vom Leben, Arbeiten und gegenseitigen Profitieren in einer Wissensgesellschaft wird hier konsequent Tag für Tag umgesetzt. Schon der indische Brahmane Jiddu Krishnamurti stellte fest: »Um weit zu kommen, muss man in der Nähe beginnen«.

In erster Linie ist es die wissenschaftliche Nähe unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeit bei der BEGO zu der des IFAM, die zu einer Symbiose geworden ist und somit eindrucksvoll Wissenschaft und Praxis miteinander verbindet. Vordenken und die Umsetzung der Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung mittels angewandter Forschung sind besondere Stärken der Wissenschaftler des IFAM, die wir als BEGO sehr schätzen gelernt haben. Mit einem Großprojekt zum Themenbereich »Selektives Laser Melting« startete vor einigen Jahren eine enge Kooperation zwischen dem IFAM und der BEGO, die sich bis heute in kleineren und größeren Projekten in den Forschungsbereichen der Formgebung und Funktionswerkstoffe sowie der Oberflächentechnik fortsetzt. Dank des speziellen und fachspezifischen Wissens der Wissenschaftler des IFAM, und damit der Nähe zu unseren Produkten und Prozessen, konnten wichtige Neuheiten (fort-) entwickelt werden. Diese sind nicht nur heute für uns als Unternehmen wichtig, sondern werden auch die Zukunft des Unternehmensgeschehens bedeutend mitbestimmen.

Auch die räumliche Nähe des IFAM zur BEGO ist von großer Bedeutung. In direkter Nachbarschaft können so Informationen sehr schnell fließen und das Wissen im intensiven persönlichen Kontakt zwischen Fachleuten ausgetauscht werden, welches das Forschungs- und Entwicklungsfortkommen überaus positiv beeinflusst. Als regionaler Wissenschaftsdienstleister liefert das IFAM nicht nur fachliches Know-how, sondern macht auch durch eine äußerst umfangreiche Maschinenqualifizierung eine zeitweilige Nutzung von Geräten für Forschungs- und Entwicklungsprojekte möglich.

Aber nicht nur die wissenschaftliche und räumliche Nähe sind bedeutende Faktoren für eine erfolgreiche Zusammenarbeit, sondern insbesondere auch der persönliche Kontakt unter Wissenschaftlern und Fachleuten. Schon das eine oder andere Mal wurden beim gemeinsamen Mittagessen in der BEGO-Kantine »Casino« interessante und wertvolle (Fach-)Gespräche geführt. Die über die Zeit entstandene offene und persönliche Beziehung zwischen den Mitarbeitern des IFAM und der BEGO trägt sicherlich in besonderem Maße zu einer vertraulichen und vertrauensvollen Zusammenarbeit bei.

Der vorliegende Jahresbericht macht deutlich, wie umfassend und erkenntnisreich das IFAM im vergangenen Jahr gearbeitet hat und zeigt damit, wie wichtig die Forschung für unser tägliches Leben ist. Es sind vor allem die sehr engagierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IFAM, die Tag für Tag die Nähe nutzen, ihr Wissen austauschen und anwendungsorientiert einsetzen – und damit die Zukunft mitgestalten. Wünschen wir dem IFAM für die nächsten Jahre weiterhin die notwendige Nähe für seine bedeutungsvolle Arbeit.



Christoph Weiss  
Geschäftsführender  
Gesellschafter der  
BEGO Unternehmens-  
gruppe sowie Mitglied  
des Kuratoriums.

## Die Fraunhofer-Gesellschaft

Forschung für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung für die Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand. Im Auftrag von Ministerien und Behörden des Bundes und der Länder werden zukunftsrelevante Forschungsprojekte durchgeführt, die zu Innovationen im öffentlichen Nachfragebereich und in der Wirtschaft beitragen.

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 Weiterentwicklung, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen auch für Information 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, in anderen Bereichen der Wissenschaft, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studentinnen und Studenten an Fraunhofer-Instituten eröffnen sich wegen der

praxisnahen Ausbildung und Erfahrung hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit mehr als 80 Forschungseinrichtungen, davon 56 Institute, an 40 Standorten in ganz Deutschland. 13 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,3 Milliarden Euro. Davon fallen mehr als eine Milliarde Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Nur ein Drittel wird von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen erarbeiten können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Niederlassungen in Europa, in den USA und in Asien sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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

## Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile bündelt die Kompetenzen der materialwissenschaftlich orientierten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft und des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik als ständigem Gastmitglied.

Fraunhofer-Materialforschung umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien über die Herstelltechnologie im industrienahen Maßstab, die Charakterisierung der Eigenschaften bis hin zur Bewertung des Einsatzverhaltens. Entsprechendes gilt für die aus den Materialien hergestellten Bauteile und deren Verhalten in Systemen. In all diesen Feldern werden neben den experimentellen Untersuchungen in Labors und Technika gleichrangig die Verfahren der numerischen Simulation und Modellierung eingesetzt. Stofflich deckt der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile den gesamten Bereich der metallischen, anorganisch-nicht-metallischen, polymeren und aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugten Werkstoffe ab.

Mit Schwerpunkt setzt der Verbund sein Know-how in den volkswirtschaftlich bedeutenden Handlungsfeldern Energie, Gesundheit, Mobilität, Informations- und Kommunikationstechnologie sowie Bauen und Wohnen ein, um über maßgeschneiderte Werkstoff- und Bauteilentwicklungen Systeminnovationen zu realisieren.

Mittelfristige Schwerpunktthemen des Verbundes sind unter anderem:

- Steigerung der Effizienz von Systemen der Energiewandlung und Energiespeicherung
- Verbesserung der Biokompatibilität und Funktion von medizin- oder biotechnisch eingesetzten Materialien
- Erhöhung der Integrationsdichte und Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Bauteilen der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik
- Erhöhung von Sicherheit und Komfort sowie Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in den Bereichen Verkehrstechnik, Maschinen- und Anlagenbau

Beteiligt sind die Fraunhofer-Institute für:

- Angewandte Polymerforschung IAP
- Bauphysik IBP
- Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
- Chemische Technologie ICT
- Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
- Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI
- Keramische Technologien und Systeme IKTS
- Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI
- Silicatiforschung ISC
- Solare Energiesysteme ISE
- Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM (Gast)
- Werkstoffmechanik IWM
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

### Ansprechpartner

#### Verbundvorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit  
und Systemzuverlässigkeit LBF  
Bartningstraße 47  
64289 Darmstadt  
Telefon: +49 6151 705-222  
Fax: +49 6151 705-305

#### Stellvertretender Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Peter Elsner  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7  
76327 Pfinztal  
Telefon: +49 721 4640-401  
Fax: +49 721 4640-111

#### Geschäftsstelle:

Dr. phil. nat. Ursula Eul  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit  
und Systemzuverlässigkeit LBF  
Bartningstraße 47  
64289 Darmstadt  
Telefon: +49 6151 705-262  
Fax: +49 6151 705-214

[www.werkstoffe-bauteile.de](http://www.werkstoffe-bauteile.de)

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute EMI, IAP, IBP, ICT, IFAM, IKTS, ISC, ISE, ITWM (Gast), IWM, IZFP, LBF, WKI

## Fraunhofer-Themenverbund Adaptronik

Die adaptive Strukturtechnologie, kurz Adaptronik genannt, integriert aktorische und sensorische Funktionen vornehmlich auf Basis multifunktionaler Materialsysteme strukturkonform in die mechanischen Lastpfade von Strukturen und verknüpft diese durch regelungstechnische »Intelligenz«. Hierdurch können Strukturen ihren mechanischen Zustand selbst erkennen und aktiv auf ihn reagieren. Damit lassen sich adaptive Strukturssysteme realisieren, d. h. Strukturen, die sich an veränderliche Betriebsbedingungen selbstständig anpassen.

Dieses Prinzip macht für Produktentwicklung und -optimierung eine Verschiebung technischer und wirtschaftlicher Machbarkeitsgrenzen greifbar, die heute bei der Verwendung konventioneller passiver, aber auch mechatronischer strukturmechanischer Methoden und Verfahren nicht hinreichend erreicht werden können. Die Einbeziehung der Adaptronik in die Entwicklung technischer Systeme ist Basis für die Realisierung einer neuen Klasse intelligenter, zukunftsfähiger Produkte.

Durch den Ansatz der Integration aktiver mechanischer Funktionen können moderne Leichtbaustrukturen vibrations- und lärmarm sowie formstabil und selbstüberwachend ausgeführt werden. Die Adaptronik bietet Optimierungspotenzial besonders in den Bereichen der Fahrzeugtechnik,

dem Werkzeugmaschinen- und Anlagenbau, der Medizin, Luft- und Raumfahrttechnik, der Optik und der Verteidigungstechnik. Solche aktiven Strukturen erfüllen Forderungen nach einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, der Effizienz, der Leistungsfähigkeit sowie anderer Charakteristika von Systemen. Dazu zählen, neben wirtschaftlichem Materialeinsatz, Funktionserweiterung und Komfortsteigerung, auch Sicherheitsaspekte wie die Optimierung fahrzeugtechnischer Crasheigenschaften oder die Schadensüberwachung.

Zwölf Fraunhofer-Institute haben ihre technologischen Kompetenzen im Bereich der adaptiven Struktursysteme zusammengeschlossen und den Fraunhofer-Themenverbund Adaptronik gegründet. Damit werden im industriellen und wissenschaftlichen Bereich gemeinsame FuE-Dienstleistungen entlang der gesamten Entwicklungskette angeboten. Ziel der Fraunhofer-Partner ist es, die Adaptronik kommerziell nutzbar zu machen und in wettbewerbsfähige Anwendungen zu überführen.

### Ansprechpartner

#### Verbundvorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka  
 Institutsleiter Fraunhofer-Institut für  
 Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF  
 Bartningstraße 47  
 64289 Darmstadt

#### Geschäftsführer:

Dr.-Ing. Tobias Melz  
 Fraunhofer-Themenverbund Adaptronik  
 Postfach 10 05 61  
 64205 Darmstadt  
 Telefon: +49 6151 705-236  
 Fax: +49 6151 705-214  
 E-Mail [info@adaptronik.fraunhofer.de](mailto:info@adaptronik.fraunhofer.de)

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute EMI, IAIS, IFAM, IIS, IKTS, ISC,  
 IST, ITWM, IWM, IWU, IZFP, LBF

## Fraunhofer-Themenverbund Nanotechnologie

Das Schlagwort Nanotechnologie umfasst heute ein breites Spektrum von neuen Querschnittstechnologien mit Werkstoffen, Bauteilen und Systemen, deren Funktion und Anwendung auf den besonderen Eigenschaften nanoskaliger (<100 nm) Größenordnung beruhen. Und Nanotechnologie ist fester Bestandteil unseres alltäglichen Lebens: Zum Beispiel sorgen Nanopartikel in Sonnencremes für den Schutz der Haut vor UV-Strahlung oder verstärken Autoreifen; mit Nanotechnologie werden pflegeleichte und kratzgeschützte Oberflächen erreicht, und ultradünne Schichten sind wesentliche Bestandteile z. B. von Datenspeichern.

Die Technologie wird bereits quer durch Branchen und Industriezweige für unterschiedlichste Anwendungen genutzt und ist weltweit für einen Umsatz von 80–100 Milliarden Euro verantwortlich. In der Fraunhofer-Gesellschaft ist fast ein Drittel aller Institute auf diesem Gebiet tätig. Im Fraunhofer-Verbund fokussieren sich die

Aktivitäten auf Leitthemen wie multifunktionelle Schichten beispielsweise für den Automobilbereich, das Design spezieller Nanopartikel als Trägersubstanzen für Biotechnik und Medizin sowie neuartige Aktuatoren auf der Basis von Kohlenstoffnanoröhren.

### Ansprechpartner

**Verbundvorsitzender und Leiter der Geschäftsstelle:**  
Dr. Karl-Heinz Haas  
Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC  
Neunerplatz 2  
97082 Würzburg  
Telefon: +49 931 4100-500  
Fax: +49 931 4100-559  
E-Mail karl.heinz.haas@isc.fraunhofer.de

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute IAO, IAP, ICT, IFAM, IFF, IGB, IISB, IKTS, IOF, IPA, ISC, ISE, ITEM, IWM, IWS, IZFP, IZM, LBF, TEG, UMSICHT

## Fraunhofer-Themenverbund Polymere Oberflächen (POLO)

Der Themenverbund POLO (Polymere Oberflächen) fasst die Kernkompetenzen von sieben Fraunhofer-Instituten auf dem Gebiet der Entwicklung von polymeren Produkten mit funktionellen Oberflächen, Grenzflächen oder dünnen Schichten strategisch und operativ zusammen und betreibt eine gemeinsame Vermarktung. Dadurch vermittelt er einen deutlich erweiterten Leistungsumfang gegenüber dem Angebot der einzelnen Institute.

Der Verbund erarbeitet wesentliche Vorentwicklungsergebnisse und dazugehörige Schutzrechte für Polymerprodukte mit neuen oder entscheidend verbesserten Eigenschaften.

Die bereits entwickelten Produkte in den Arbeitsgebieten »Flexible Ultra-Barrieren« und »Antimikrobiell wirksame Polymeroberflächen« zielen auf

Anwendungen in der optischen und optoelektronischen Industrie, der Verpackungswirtschaft, der Textilindustrie, der medizinischen Industrie, der Automobilindustrie und der Bauwirtschaft ab.

### Ansprechpartnerin

**Verbundvorsitzende:**  
Dr. Sabine Amberg-Schwab  
Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC  
Neunerplatz 2  
97082 Würzburg  
Telefon: +49 931 4100-620  
Fax: +49 931 4100-698  
E-Mail sabine.amberg-schwab@isc.fraunhofer.de

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute FEP, IAP, IFAM, IGB, IPA, ISC, IVV

## Fraunhofer-Themenverbund Numerische Simulation von Produkten, Prozessen

Im Fraunhofer-Themenverbund Numerische Simulation von Produkten, Prozessen bündeln 20 Fraunhofer-Institute ihre Kompetenzen, die

sich mit der Entwicklung und Verbesserung von Simulationsverfahren beschäftigen. Die Simulation von Produkten und Prozessen spielt heute eine entscheidende Rolle in allen Phasen des Lebenszyklus eines Produkts, von der modellgestützten Materialentwicklung über die Simulation des Herstellprozesses bis zum Betriebsverhalten und der Platzierung des Produkts am Markt.

Das Ziel des Themenverbunds ist es, institutsübergreifende Aufgabenstellungen aufzugreifen und als Ansprechpartner für öffentliche und industrielle Auftraggeber die Interessen der im Verbund zusammengeschlossenen Institute zu vertreten. Insbesondere die Bündelung der Kompetenzen aus dem IuK-Bereich mit dem Werkstoff- und Bauteil-Know-how sowie mit der Oberflächen- und Produktionstechnik verspricht innovative Ergebnisse.

### Ansprechpartner

#### Verbundvorsitzender und Leiter der Geschäftsstelle:

Andreas Burblies  
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM  
Wiener Straße 12  
28359 Bremen  
Telefon: +49 421 2246-183  
Fax: +49 421 2246-77183  
E-Mail [andreas.burblies@ifam.fraunhofer.de](mailto:andreas.burblies@ifam.fraunhofer.de)

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute EMI, FIRST, IFAM, IGD, IIS/EAS, IKTS, ILT, IPA, IPK, IPT, ISC, IST, ITMW, IWM, IWS, IWU, IZFP, LBF, SCAI, UMSICHT

## Fraunhofer-Allianz Photokatalyse

### Ansprechpartner

#### Gesamtprojektleitung:

Dr. Michael Vergöhl  
Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST  
Bienroder Weg 54 E  
38108 Braunschweig  
Telefon: +49 531 2155-640  
Fax: +49 531 2155-900  
E-Mail [michael.vergoehl@ist.fraunhofer.de](mailto:michael.vergoehl@ist.fraunhofer.de)

#### Marketing und Kommunikation:

Dr. Simone Kondruweit  
Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST  
Bienroder Weg 54 E  
38108 Braunschweig  
Telefon: +49 531 2155-535  
Fax: +49 531 2155-900  
E-Mail [simone.kondruweit@ist.fraunhofer.de](mailto:simone.kondruweit@ist.fraunhofer.de)

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute FEP, ICT, IFAM, IGB, IME, ISC, ISE, IST

Photokatalytisch aktive Schichtsysteme mit selbstreinigenden, antibakteriellen, bewuchshemmenden oder beschlagsmindernden Eigenschaften stehen im Mittelpunkt der FuE-Aktivitäten der Fraunhofer-Allianz Photokatalyse.

Ziel der Allianz ist die Entwicklung neuer Material- und Schichtkonzepte für leistungsfähigere Photokatalysatoren sowie deren Applikation auf unterschiedlichsten Substraten wie Glas, Kunststoffen und Metallen.

Die Kompetenzen der acht beteiligten Institute sind breit gefächert und umfassen: Material-, Schicht- und Prozessentwicklung, Analytik und Messtechnik für die biologische Wirksamkeit sowie für ökotoxikologische Umweltauswirkungen.

## Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping

Rapid Tooling und Rapid Manufacturing für die extrem rasche und erfolgreiche Umsetzung von Produktinnovationen und kleinen Fertigungsserien zur Erhöhung der Leistungs- und Konkurrenzfähigkeit von kleinen und mittelständischen Unternehmen – dafür erforschen und entwickeln die Mitgliedsinstitute der Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping neue Konzepte, Technologien und Prozesse. Die Allianz gilt als größtes interdisziplinäres europäisches Kompetenznetz für High-Speed-Prozesse zur Verarbeitung von Metallen und Kunststoffen sowie anderen Nichtmetallen in kleinen Serien sowie in der Ur- und Umformtechnik.

Die Leistungsangebote liegen in der Entwicklung und Umsetzung innovativer Konzepte, Verfahren und Lösungen für effiziente und wettbewerbsfähige Produkt- und Werkzeugentwicklungsprozesse. Ein breites Kompetenzspektrum umfasst verschiedene Bereiche der Produkt- und Prozes-

soptimierung zur Erschließung von Leistungs- und Wettbewerbspotenzialen: virtuelle und andere computergestützte Produktplanungsmethoden und -techniken, Entwicklung und Integration von Verfahren, Werkstoffen und Prozessen.

### Ansprechpartner

#### Sprecher der Allianz:

Dr. Rudolf Meyer  
Fraunhofer-Allianz Rapid Prototyping  
Sandtorstraße 22  
39106 Magdeburg  
Telefon: +49 391 4090-510  
Fax: +49 391 4090-512  
E-Mail [rudolf.meyer@iff.fraunhofer.de](mailto:rudolf.meyer@iff.fraunhofer.de)

#### Mitglieder

Fraunhofer-Institute ICT, IFAM, IFF, IGD, IKTS, ILT, IOF, IPA, IPK, IPT, IWM, IWS, IZM

## Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik

Die Reinigung von Oberflächen ist in einer Reihe inhaltlich unterschiedlich ausgerichteter Fraunhofer-Institute Forschungsgegenstand. Kein Institut beschäftigt sich ausschließlich mit der Reinigungstechnik. In der Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik werden die Kompetenzen der einzelnen Institute gebündelt, sodass die gesamte Prozesskette der Reinigung angeboten werden kann.

Diese umfasst neben unterschiedlichen Reinigungsverfahren die vor- und nachgelagerten Prozesse. Vorgelagerte Prozesse beschäftigen sich mit Fragestellungen der Prozessanalyse, um Verunreinigungen zu vermeiden oder den Reinigungsaufwand zu vermindern. Nachgelagerte Prozesse sind die Kontrolle des Reinigungserfolgs in der Qualitätssicherung, die Trocknungstechnologie bei nasschemischen Reinigungsverfahren sowie die Entsorgung der Verunreinigung und der Reinigungshilfsstoffe im Rahmen des Umweltschutzes.

Damit das gesamte Feld der Reinigungstechnik branchenübergreifend abgedeckt werden kann,

sind in der Allianz Reinigungstechnik die Geschäftsfelder Bauwerksreinigung, Reinigung in hygienerelevanten Bereichen, Reinigung in der Mikrosystemtechnik, Oberflächenreinigung vor der Beschichtung sowie die Bauteilreinigung definiert.

### Ansprechpartner

#### Sprecher der Allianz:

Dipl.-Ing. Mark Krieg  
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK  
Pascalstraße 8/9  
10587 Berlin  
Telefon: +49 30 39006-159  
Fax: +49 30 3911037  
E-Mail [mark.krieg@ipk.fraunhofer.de](mailto:mark.krieg@ipk.fraunhofer.de)

#### Mitglieder

Fraunhofer-Institute FEP, ICT, IFAM, IFF, IGB, ILT, IPA, IPK, IST, IVV, IWS

## Fraunhofer Technology Academy

Die Fraunhofer-Gesellschaft ist die führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung in Europa und hat die Funktion eines Innovationsmotors für die Wirtschaft. Um eine erfolgreiche Umsetzung von Innovationen in der Wirtschaft zu fördern, setzt die Fraunhofer-Gesellschaft systematisch auf die Komponenten Auftragsforschung für die Wirtschaft, Ausgründung von Unternehmen und den Transfer durch Köpfe. Die Fraunhofer Technology Academy erweitert dieses Spektrum nun um das Instrument professioneller Weiterbildung für Fach- und Führungskräfte.

Das gekonnte Zusammenspiel von Management und Einsatz innovativer Technologien ist heute der Schlüssel zum Erfolg. Mit der Fraunhofer Technology Academy bieten wir qualifizierten Bewerbern die Möglichkeit, sich das Rüstzeug für eine innovationsgeprägte Welt anzueignen. In Kooperation mit exzellenten universitären Partnern können Teilnehmer angesehene Abschlüsse erwerben – von qualifizierten Zertifikaten bis hin zu unterschiedlichen Master-Degrees.

Mit diesem Weiterbildungsangebot trägt die Fraunhofer-Gesellschaft dazu bei, eine neue Innovationskultur in Deutschland zu gestalten. Ziel ist es, Fach- und Führungskräfte zu qualifizieren, damit diese neue, bessere, einzigartige Produkte sowie innovative Verfahren und Dienstleistungen entwickeln.

Die Fraunhofer Technology Academy stellt Wissen aus innovativen Technologiefeldern zur Verfügung, das für die Märkte von morgen entscheidend sein wird. Die enge Verbindung von Forschung und Praxis und die ständige Rückkopplung mit Marktentwicklungen führen zu einem optimalen Zuschnitt der Kurse. Die Fraunhofer Technology Academy konzentriert sich dabei auf die Bereiche Technologiewissen und Technologiemanagement.

### Kooperationspartner

Universität St. Gallen und die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen

### Ansprechpartner

Fraunhofer-Gesellschaft:  
Dr. Roman Götter  
Hansastraße 27C  
80686 München  
Telefon: +49 89 1205-1116  
E-Mail: [roman.goetter@zv.fraunhofer.de](mailto:roman.goetter@zv.fraunhofer.de)

### Mitglieder

Beteiligte Institute: Klebtechnisches Zentrum im IFAM, IML, IWS, UMSICHT

## Fraunhofer-Netzwerk Windenergie

Die nachhaltige Energieversorgung durch erneuerbare Energien gilt als zentrale Zukunftsaufgabe für das 21. Jahrhundert. Unter quantitativen energie-wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die Windenergie bei netzgebundenen Großturbinen global von Bedeutung. Bereits heute schon ist die Windenergie wirtschaftlich konkurrenzfähig und hat einen bedeutsamen Markt geschaffen.

Das Fraunhofer-Netzwerk Windenergie ist das Portal zu diesem Markt. Als größte Organisation für angewandte Forschung in Europa hat sich die Fraunhofer-Gesellschaft zur Aufgabe gemacht, die Innovationsfähigkeit der Windenergie zu stärken. Von der Windenergieeinspeisung ins europäische Verbundnetz bis zur Betriebsführung einzelner Windkraftanlagen im lokalen Energiesystem, von der Anlagensimulation, -steuerung und -wartung bis zur Entwicklung und Prüfung von Materialien und Komponenten präsentieren Fraunhofer-Institute ein einzigartiges Spektrum an Spitzenforschung und Dienstleistungen.

Entwicklung und Betriebsführung von Windenergieanlagen sowie deren Integration ins Stromnetz sind komplexe Aufgaben. Der Fraunhofer-Verbund Energie hat daher zusammen mit sechs weiteren Fraunhofer-Instituten aus den Bereichen Materialforschung, Betriebssicherheit, Simulation und Leistungselektronik das Fraunhofer-Netzwerk Windenergie ins Leben gerufen. Zusammen bieten zehn Institute ein durchgehendes Kompetenzspektrum für die Auslegung und den Betrieb von Energiesystemen mit angekoppelten Windturbinen.

Im Bereich Forschung und Entwicklung gehören hierzu Vorhersageverfahren für Windenergie auf verschiedenen Zeitskalen, Methoden des Lastmanagements und der Netzauslegung, Algorithmen für Leittechnik und Simulationswerkzeuge sowie zerstörungsfreie Prüfmethode für Anlagenkomponenten.

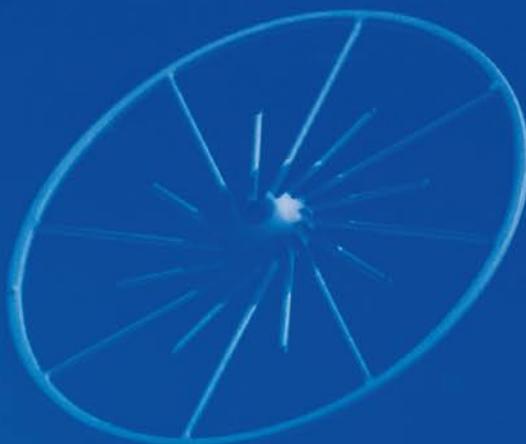
### Ansprechpartner

#### Koordination Fraunhofer-Netzwerk Windenergie:

Dr. Mario Ragwitz  
 Fraunhofer-Institut für System- und  
 Innovationsforschung ISI  
 Breslauer Straße 48  
 76139 Karlsruhe  
 Telefon: +49 721 6809-157  
 E-Mail [info@windenergie.fraunhofer.de](mailto:info@windenergie.fraunhofer.de)

### Mitglieder

Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik CWMT, Fraunhofer-Anwendungszentrum Systemtechnik IITB/AST, Fraunhofer-Institute IFF, IIS/EAS, ISE, ISI, ITWM, IZFP, WKI



# Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe

Ergebnisse   Anwendungen   Perspektiven



Vortexmischer.

## Kompetenzen und Know-how

Der Transfer von anwendungsorientierter Grundlagenforschung in produktionstechnisch umsetzbare Lösungen oder bauteilbezogene Entwicklungen ist eine Aufgabe, die eine ständige Erweiterung der Wissensbasis und der Methodenkompetenz erfordert. Deshalb hat der kontinuierliche Ausbau von spezifischen Kompetenzen und Know-how des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung – Formgebung und Funktionswerkstoffe – einen hohen Stellenwert. Auf der Basis unserer Kernkompetenzen Pulver- und Sintertechnologie, Gießerei- und Leichtmetalltechnologie sowie Mikro- und Nanotechnologie erarbeiten wir innovative und wirtschaftliche Lösungen für unsere Kunden.

Zunehmend spielen bei der Erarbeitung von komplexen Systemlösungen Netzwerke von Partnern aus der Wirtschaft und Forschungseinrichtungen eine wichtige Rolle. Hier sind, insbesondere an den Schnittstellen der unterschiedlichen Fachrichtungen, Methodenkompetenz und exzellentes Fachwissen gefordert. Die Kompetenz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im IFAM und die Vernetzung mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft sind der Garant für die Erarbeitung innovativer Lösungen für die Wirtschaft.

Das Spektrum unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten reicht dabei von anwendungsorientierter Grundlagenforschung bis hin zur Umsetzung in Produkte und der Unterstützung bei der Fertigungseinführung.

Multifunktionsbauteile mit integrierter Sensorfunktion stellen spezifische Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe. Durch Kombinationen verschiedener Werkstoffe in einer Komponente können Eigenschaften lokal maßgeschneidert werden. Diese Materialkombinationen zu gestalten und in Fertigungsprozessen zu beherrschen, ist eine wesentliche Aufgabe beim Ausbau der Kompetenz. Die Bandbreite reicht hier von Materialkombinationen Metall–Metall, Metall–Keramik bis hin zu Kombinationen mit CFK.

Fertigungsverfahren wie Spritzguss finden heute Anwendung bei der Herstellung von geometrisch anspruchsvollen Bauteilen aus zahlreichen metallischen Legierungen und aus keramischen Werkstoffen. Es ist jetzt gelungen, die unterschiedlichen Eigenschaften von Werkstoffen auch gezielt

lokal im Bauteil zur Anwendung zu bringen. So lassen sich Werkstoffeigenschaften wie z. B. hartweich, dicht-porös, Werkstoffe mit sensorischen Eigenschaften oder auch teure und billige Werkstoffe maßgeschneidert in Bauteile integrieren. Besonders interessant sind diese Entwicklungen in der Mikrobauteilfertigung, wo durch solche integrierten fertigungstechnischen Lösungen die Einsparung der Mikromontage erreicht werden kann.

Besonders für die Entwicklung des »INKtelligent printing®« sind Formulierungen von funktionellen Tinten und Pasten sowie Kenntnisse zu deren Applikation auf Komponenten erarbeitet worden. Damit ist es möglich, Bauteile mit Sensorik auszustatten und so z. B. Betriebs- oder Umgebungsbedingungen zu erfassen.

Mit modernster Gießereierrichtung und Analytik sowie einem umfassenden Know-how zur Verarbeitung von Aluminium- und Magnesiumlegierungen mittels Druckguss hat sich das IFAM gut im Markt positioniert. Neben der Optimierung der Gießprozesse mit Dauerform wird der Kompetenzausbau mit dem Lost-Foam-Gießverfahren kontinuierlich vorangetrieben. Bei der jüngsten Entwicklung des »CASTronics®« wird ein verfahrenstechnischer Ansatz verfolgt, der es den Gießereien erlauben soll, Funktionskomponenten direkt im Gießprozess selbst zu integrieren.

Die Umsetzung von zellularen metallischen Werkstoffen in Produkte ist auf einem hohen Know-how-Stand. Hier werden spezielle Lösungen für Märkte wie z. B. den Dieselpartikelfilter erarbeitet und damit das Prozesswissen kontinuierlich erweitert.

### Perspektiven

Das eigene Themenportfolio wird kontinuierlich mit den Bedürfnissen des Marktes abgeglichen und daraus werden neue technologische Herausforderungen abgeleitet. Hierbei spielen Fragen der Produktinnovation unter strikten wirtschaftlichen Randbedingungen eine genauso wichtige Rolle wie der Beitrag der Forschungsergebnisse zur Verbesserung der Lebensqualität und einer nachhaltigen Entwicklung für die Bereiche Transport, Energie, Medizin und Umwelt.

Auch weiterhin sind Werkstoffe und deren Verarbeitung bei allen Produktinnovationen wesentliche Erfolgsfaktoren. Besonders ist dies für die Urformverfahren hervorzuheben, da im Fertigungsprozess gleichzeitig Werkstoffeigenschaften und die Bauteilgeometrie beeinflusst werden können. Der sich daraus ergebende Markt wächst aufgrund zunehmender Produktkomplexität.

Werkstoffeigenschaften und Technologien für strukturelle und funktionelle Anwendungen werden maßgeschneidert und charakterisiert. Hierzu werden Hochleistungswerkstoffe, Verbundwerkstoffe, Gradientenwerkstoffe und smart materials weiterentwickelt sowie Fertigungstechnologien zur Integration der Eigenschaften in Komponenten erarbeitet.

Die Vertiefung der Werkstoffkompetenz in den speziellen Bereichen der Funktionswerkstoffe wie z. B. den Thermal-Management-Materialien, thermoelektrischen und magnetokalorischen Werkstoffen sowie Nanokompositen eröffnen Chancen für Produktentwicklungen mit bestehenden Kunden und zur Erweiterung des Kundenkreises.

Von besonderer Bedeutung für zukünftige Prozess- und Produktweiterentwicklungen ist die Simulation aller für die Bauteilherstellung erforderlichen Prozessschritte. Sowohl für gießtechnisch als auch pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile wird angestrebt, die Eigenschaften der Komponenten bereits vor deren Herstellung vorhersagen zu können und so robuste Fertigungsprozesse zu entwickeln und die Bauteilherstellung besonders effizient zu gestalten.

In Zukunft soll der Bereich Medizintechnik und Biomaterialien weiter erschlossen werden. Eine enge Kooperation im Netzwerk mit institutionellen Partnern ergänzender Kompetenz sowie Unternehmen und klinischen Partnern wird hier aufgebaut. Die Themen reichen von der Rapid-Manufacturing-Prozesskette zur Fertigung individueller metallischer Bauteile bis hin zur gezielten Strukturierung von Oberflächen für das Zellwachstumsmanagement.

Das große Potenzial der direkten Integration von Funktionen in metallische Bauteile, aber auch auf CFK-Komponenten wird auf der Basis eines sich ständig erweiternden Know-how im IFAM in der

Prozesskette vom Werkstoff zum intelligenten Bauteil erschlossen. Hierzu sollen zunehmend produktspezifische Lösungen für unterschiedliche Branchen erarbeitet werden.

Von wachsendem Interesse sind für die zyklischen Fertigungsprozesse zur Herstellung metallischer Komponenten Fragen der Qualitätskontrolle im Produktionsprozess. Hierzu wird Methodenkompetenz erarbeitet, um selbstlernende Systeme mit dem jeweiligen Fertigungsverfahren zu verknüpfen.

# Arbeitsgebiete und Ansprechpartner

## Institutsleitung Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse

### Standort Bremen

#### Pulvertechnologie

Pulvermetallurgische Formgebung; Warmkompaktieren zur Herstellung hochdichter Sinterteile; Metallpulverspritzguss; 2-Komponenten-Spritzguss; Prozess- und Materialentwicklung; Rapid Manufacturing; Lasersintern; Siebdruck; Simulation.  
Dr.-Ing. Frank Petzoldt  
Telefon: +49 421 2246-134  
E-Mail frank.petzoldt@ifam.fraunhofer.de

#### Funktionsstrukturen

Nanopulver; Nanosuspensionen; nanoporöse Schichten; Funktionsintegration; INKtelligent printing®; Ink-Jet-Printing; Aerosol-Printing (M³D®); Sonderanlagen.  
Dr. rer. nat. Volker Zöllmer  
Telefon: +49 421 2246-114  
E-Mail volker.zoellmer@ifam.fraunhofer.de

#### Mikrofertigung

Mikrospritzguss für Metalle, Kunststoffe und Nanokomposite; Mikrostrukturierung; Serienfertigung von Miniaturbauteilen; 2-Komponenten-Spritzguss für Mikroteile; Mikroreaktionstechnik; Mikrofluidik.  
Dr.-Ing. Astrid Rota (bis 31.3.2008)  
Dr.-Ing. Frank Petzoldt (ab 1.4.2008)  
Telefon: +49 421 2246-134  
E-Mail frank.petzoldt@ifam.fraunhofer.de

#### Leichtbauwerkstoffe und Analytik

Funktionsintegrierter Leichtbau, zelluläre Leichtbaukomponenten; funktionale, offenporöse Metallschaumstrukturen; Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen; Produktionsverfahren für Metallschaumbauteile.  
Dr.-Ing. Gerald Rausch  
Telefon: +49 421 2246-242  
E-Mail gerald.rausch@ifam.fraunhofer.de

#### Gießereitechnik

Zink-, Aluminium-, Magnesium-Druckguss; Thixocasting; Aufmusterung von Druckgussformen; Lost-Foam-Verfahren; Sandguss; Simulation.  
Dipl.-Ing. Franz-Josef Wöstmann  
Telefon: +49 421 2246-225  
E-Mail franz-josef.woestmann@ifam.fraunhofer.de

### Dienstleistungszentren und Ansprechpartner

#### Anwenderzentrum Metallpulverspritzguss

Dipl.-Ing. Lutz Kramer  
Telefon: +49 421 2246-217  
E-Mail forming@ifam.fraunhofer.de

#### Anwenderzentrum Functional Printing

Dr.-Ing. Dirk Godlinski  
Telefon: +49 421 2246-230  
E-Mail printing@ifam.fraunhofer.de

#### Anwenderzentrum Rapid Prototyping

Dipl.-Ing. Claus Aumund-Kopp  
Telefon: +49 421 2246-226  
E-Mail rapid@ifam.fraunhofer.de

#### Anwenderzentrum funktionsintegrierte Gussteile

Dr.-Ing. Jörg Weise  
Telefon: +49 421 2246-125  
E-Mail casting@ifam.fraunhofer.de

#### Dienstleistungszentrum Materialographie und Analytik

Jürgen Rickel  
Telefon: +49 421 2246-146  
E-Mail juergen.rickel@ifam.fraunhofer.de

#### Demonstrationszentrum SIMTOP

Andreas Burblies  
Telefon: +49 421 2246-183  
E-Mail info@simtop.de

### Standort Dresden

#### Pulvermetallurgie und Verbundwerkstoffe

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kieback  
Telefon: +49 351 2537-300  
Fax: +49 351 2537-399  
Internet: www.ifam-dd.fraunhofer.de  
Adresse: Winterbergstraße 28  
01277 Dresden

#### Zelluläre metallische Werkstoffe

Fasermetallurgie; hochporöse Strukturen; metallische Hohlkugelstrukturen; offenzellige PM-Schäume; Siebdruckstrukturen; 3-D-Drahtstruktur; Anwendungen für z. B. Leichtbaustrukturen; Crashabsorber; Wärmetauscher; Katalysatorträger.  
Dr.-Ing. Günter Stephani  
Telefon: +49 351 2537-301  
E-Mail guenter.stephani@ifam-dd.fraunhofer.de

#### Sinter- und Verbundwerkstoffe

Hochtemperaturwerkstoffe; Aluminide (NiAl-Schaum); nanokristalline Werkstoffe; Werkstoffe für tribologische Beanspruchungen; Sputtertargets; Pulvermodifizierung; Werkstoffe für die Wasserstoffspeicherung.  
Dr.-Ing. Thomas Weißgärber  
Telefon: +49 351 2537-305  
E-Mail thomas.weissgaerber@ifam-dd.fraunhofer.de

### Dienstleistungszentrum und Ansprechpartner

#### Demonstrationszentrum Zelluläre Werkstoffe

Dr.-Ing. Günter Stephani  
Telefon: +49 351 2537-301  
E-Mail guenter.stephani@ifam-dd.fraunhofer.de

# Ausstattung

## Bauteilfertigung

- Metallpulverspritzgussanlagen (Schließkraft 20 t und 40 t)
- Fertigungszelle Mikrospritzguss
- Heißpresse (Vakuum, Schutzgas, 1800 °C)
- Uniaxiale Pulverpressen (bis 1000 t)
- Pulverpresse zur Warmkompaktierung (125 t)
- Strangpresse (5 MN)
- Anlagen zum Rapid Prototyping durch Lasersintern, 3-D-Printing
- Kaltkammer-Druckgussmaschine (echtzeitgeregelt, Schließkraft 660 t)
- Warmkammer-Druckgussmaschine (echtzeitgeregelt, Schließkraft 315 t)
- Pilotanlagen zur Herstellung von Metallschaumbauteilen
- 2-Komponenten-Spritzgussmaschine
- Mikrowellenanlage
- Siebdruckmaschine
- Modellfertigung Lost-Foam-Verfahren

## Mikro- und Nanostrukturierung

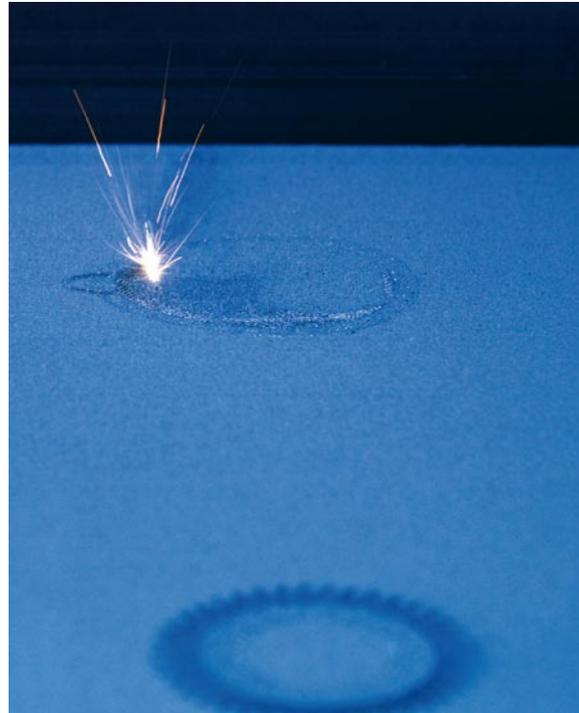
- Ink-Jet-Printing-Technologien
- Aerosol-Printing-Technologie (Maskless Mesoscale Material Deposition M<sup>3</sup>D®)
- Mikrofertigungszelle
- Vierpunkt-Spitzenmessplatz
- Tintenteststand – Drop on demand
- Sputtertechnologie

## Thermische/chemische Behandlung von Formteilen

- Anlage zur chemischen Entwachsung von Spritzgussteilen
- Diverse Sinteröfen (bis 2400 °C, Schutzgas, Wasserstoff, Vakuum)

## Werkstoffsynthese und -verarbeitung

- Anlagen zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen (Sedimentation, Nasspulverspritzen)
- Anlagen zur Herstellung metallischer Nanopulver und Nanosuspensionen
- Teststand zur Charakterisierung funktioneller Tinten für Ink-Jet-Printing-Verfahren
- Schmelzextraktionsanlage (Metallfasern)
- Zentrifugalmühle zum Hochenergiemahlen von metallischen und keramischen Pulvern (5–10 kg Mahlgutmenge, auch Schutzgas, Vakuum)



Lasersintern.

- Schnellmischer und Scherwalzenextruder zur MIM-Feedstockherstellung
- Windsichter zur Klassierung von Pulvern

## Instrumentelle Analytik

- FEM-Rasterelektronenmikroskopie mit EDX
- Röntgenfeinstrukturanalyse
- Isolationswiderstand
- Thermoanalytik mit DSC, DTA, TGA
- Sinter-/Alpha-Dilatometrie (akkreditiertes Labor)
- Pulvermesstechnik mit BET-Oberfläche und Lasergranulometrie
- Rheometrie
- Spurenelementanalyse (C, N, O, S)
- Materialographie
- Emissionsspektrometer zur Elementanalyse in Al-, Mg-, Zn-Legierungen
- Mikrozugprüfmaschine
- Röntgen-Tomograph (160 kV)
- Tensiometer
- Partikelgrößenanalyse
- 2-D / 3-D Laser-Oberflächen-Profilometrie

## Rechner

- Hochleistungs-Workstations mit Software zur nichtlinearen FE-Analyse, zur Formfüll- und Erstarrungssimulation sowie zur Bauteiloptimierung

# Lost-Foam-Verfahren zur Herstellung von Kleinbauteilen

## Ausgangssituation

Beim Lost-Foam-Gießverfahren werden Gießmodelle aus aufgeschäumtem Polystyrol (EPS) hergestellt, mit einem Keramikschlicker umhüllt und in binderlosem Sand eingebettet. Beim anschließenden Gießprozess führt die Wärme der Metallschmelze zur Zersetzung des EPS-Modells, und das ursprünglich vom Modell eingenommene Volumen wird durch die Schmelze abgebildet. Auf diese Weise ist die Darstellung extrem komplexer Bauteilgeometrien möglich. Der Entformungsaufwand für die Bauteile ist sehr niedrig. Das Lost-Foam-Verfahren ist im Vergleich zu konventionellen Sandgussverfahren umweltschonend. Der Einsatz dieser Gießtechnologie ist in Europa allerdings zurzeit noch auf vergleichsweise wenige Serienbauteile begrenzt (z. B. BMW-Zylinderkopf für Sechszylinder).

## Herausforderung

Um eine Erweiterung des Einsatzspektrums des Lost-Foam-Verfahrens zu erreichen, werden weltweit aktuell verschiedene Entwicklungsrichtungen verfolgt. Hierzu gehören insbesondere die Verbesserung des Herstellungsprozesses und der Qualitätskontrollmethoden für die geschäumten Modelle, die Verbesserung der Oberflächenqualität von Modellen und Gussteilen, die Verwendung alternativer Modellmaterialien mit verbessertem Zersetzungsverhalten sowie die Erweiterung des Gießprozesses auf bisher nicht eingesetzte Legierungsgruppen wie z. B. Magnesium.

## Aktuelle Arbeiten

Aktuelle Forschungsaktivitäten am Fraunhofer IFAM richten sich u. a. darauf, die bestehenden technischen Beschränkungen des Lost-Foam-Verfahrens – eine für Kleinteile ungeeignete Oberflächenqualität (Abb. 1) und die Beschränkung auf große Bauteile – aufzuheben und somit eine Verfahrensanwendung auf ein Bauteilspektrum zu ermöglichen, welches bisher z. B. dem Feinguss vorbehalten war.

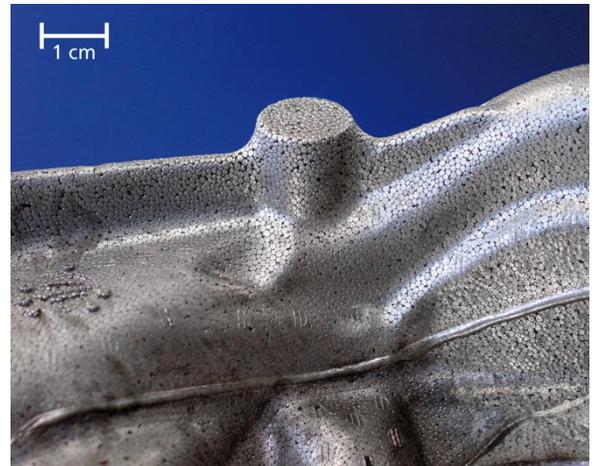


Abb. 1: Oberfläche eines Aluminium-Lost-Foam-Serienbauteils.

Hierfür müssen vordringlich folgende Fragestellungen gelöst werden:

- die Verbesserung der Oberflächengüte der EPS-Modelle
- die Darstellung kleiner Strukturdetails in den EPS-Modellen
- die Entwicklung einer angepassten Gießtechnologie für die Formfüllung bei sehr kleinen Bauteilen (Überwindung von Kapillarkräften)
- die Entwicklung von an den Prozess angepassten Schlichte- und Formmaterialien
- die Untersuchung der Gefügeausbildung der Lost-Foam-gegossenen Bauteile im Vergleich mit feingegossenen Bauteilen nach dem Stand der Technik

In den bisher durchgeführten Untersuchungen konnten durch Verfahrensoptimierungen die Oberflächengüte und Konturschärfe der EPS-Modelle bereits deutlich gegenüber dem Stand der Technik verbessert werden. Dies ist qualitativ an den Schaummodellen zu beobachten, wurde aber auch quantitativ mittels Interferometrie nachgewiesen (Abb. 2 und 3). Die Fertigung von EPS-Modellen mit sehr dichten Oberflächen und exakter Abformung bis in den Bereich von wenigen 10 Mikrometer ist nun möglich.

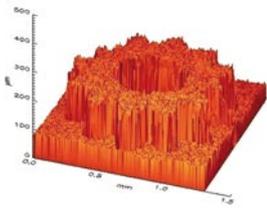


Abb. 2: Interferometermessung eines EPS-Modells einer Mikrozahnradstruktur.

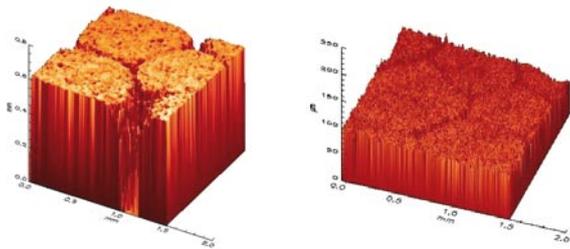
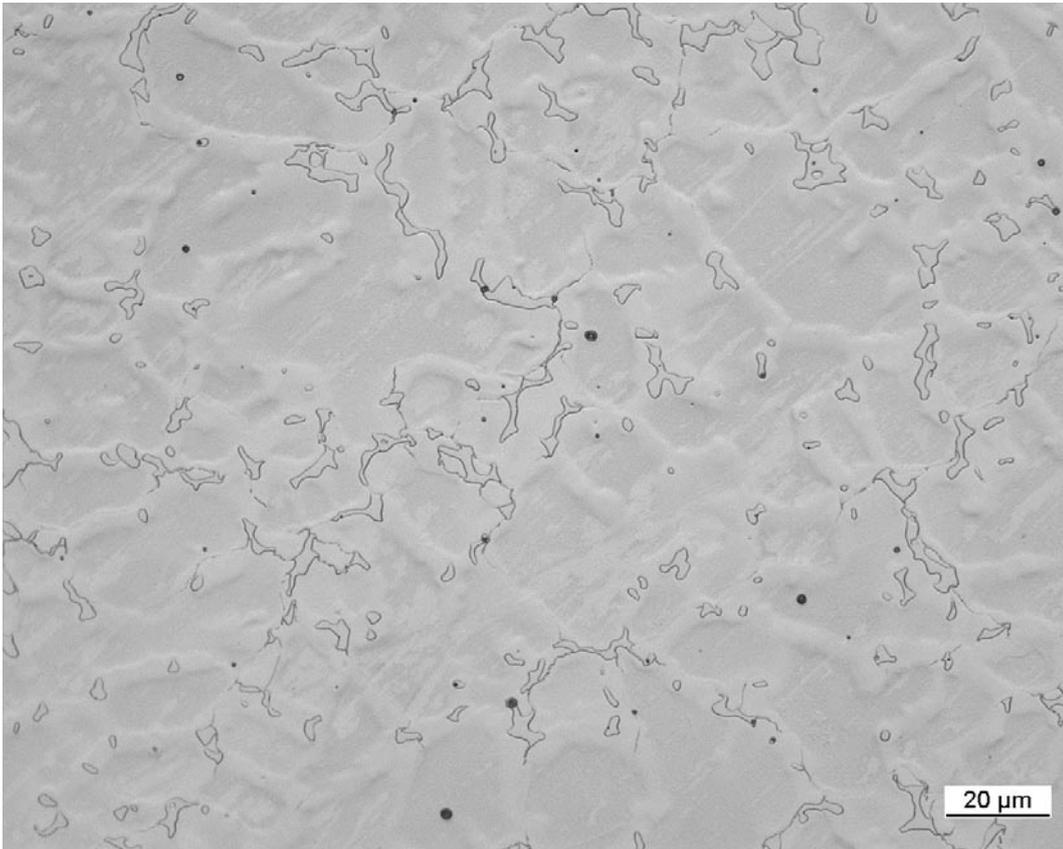


Abb. 3: Vergleich der Oberflächenrauheiten eines konventionell gefertigten EPS-Bauteils (links) und eines verbesserten EPS-Modells für das Lost-Foam-Gießen (rechts).



Abb. 4: Demonstrator-EPS-Modell und Gussteil.

Weiterhin wurden in Kooperation mit der Firma BEGO Bremer Goldschlägerei Wilh. Herbst GmbH & Co. KG verschiedene Gießprozesse auf ihre Anwendbarkeit für die Herstellung kleiner Bauteile mittels des Lost-Foam-Verfahrens untersucht. Das Kernproblem liegt hierbei darin, genügend thermische Energie für die Zersetzung des EPS-Modells aufzubringen und Kapillarkräfte zu überwinden, welche einer konturgenauen Ausformung des Gussteils entgegenwirken. Der technologische Durchbruch wurde durch die zusätzliche Applikation eines Vakuumsystems am Boden der Gießform erzielt. Dieses erzeugt einen Unterdruck beim Gießprozess, der die EPS-Gase durch den Schlicker aus der Form und die Schmelze in den Hohlraum zieht. Mit diesem System und zusätzlichen Anpassungen der Zusammensetzungen von Formsand und Modellschichten konnten komplette Formfüllungen und somit sehr gute Gussergebnisse erreicht werden (Abb. 4). Als Versuchsliegierung wurde Wirobond C (Co61Cr26Mo6W5Si-FeCe) der Firma BEGO verwendet. Dabei handelt es sich um eine im Bereich der Dentalmedizin sehr häufig eingesetzte Legierung, für welche sehr



**Abb. 5:** Gefüge eines mittels Lost-Foam-Technologie hergestellten Wirobond-C-Bauteils.

umfangreiche Erfahrungen hinsichtlich Gießverhalten und Eigenschaften vorliegen. Die mit dem Lost-Foam-Verfahren erreichte Gefügeausbildung ist vergleichbar mit der konventionell mittels Dentalfeinguss hergestellter Bauteile (Abb. 5).

### Ausblick

Mit den bisher erreichten Ergebnissen konnte eine deutliche Erweiterung des Bauteilspektrums für das Lost-Foam-Verfahren im Labormaßstab

erreicht werden. Bereits hier zeigten sich deutliche Produktivitätsvorteile dieses Verfahrens gegenüber bisher üblichen Verfahren wie dem Feinguss. Das Einsatzspektrum der neu entwickelten Lost-Foam-Verfahrensvariante wird insbesondere im Bereich der Kleinserienfertigung von Bauteilen aus hochschmelzenden Legierungen gesehen. Darüber hinaus können die Untersuchungsergebnisse auch für die Verbesserung der konventionellen Lost-Foam-Verfahrenstechnologie verwendet werden und dort zu einer verbreiterten Akzeptanz dieses hochproduktiven Verfahrens führen.

#### Ansprechpartner

Franz-Josef Wöstmann  
Telefon: +49 421 2246-225  
E-Mail [casting@ifam.fraunhofer.de](mailto:casting@ifam.fraunhofer.de)

#### Institut

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM,  
Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe,  
Bremen

# Aluminiumschwämme in der Klimatechnik

## Ausgangssituation

Künstliche Klimatisierung umgibt uns allgegenwärtig. Sie ist notwendig für die Transportkühlung von Lebensmitteln und bringt uns Annehmlichkeiten im alltäglichen Leben – denken wir an die Klimatisierung im Pkw und in Gebäuden. Kältetechnische Anwendungen werden immer noch vorwiegend durch die weit entwickelten Kompressionskälteverfahren dominiert, die allerdings den Nachteil eines hohen Energieverbrauchs aufweisen. Dabei handelt es sich bei der Gebäudeklimatisierung um einen hohen Strom- und im Pkw um einen hohen Treibstoffverbrauch.

Um verantwortungsvoll mit unseren natürlichen Ressourcen beim Thema Klimatisierung umzugehen, sollten thermisch angetriebene Verfahren eingesetzt werden, die Abwärme aus technischen Prozessen nutzen bzw. Energie aus erneuerbaren Quellen verwenden. Doch für den in der Pkw- und Gebäudeklimatisierung benötigten Leistungsbereich von bis zu 20 Kilowatt scheitert dieser Ansatz bisher an dem Vorhandensein von kompakten und kostengünstigen Geräten. Eine Chance bietet hier die Nutzung der physikalischen Adsorption von Gasen in hochporösen Festkörpern. Bisher sind auf dieser Basis nur Prototypen hergestellt worden. Der Grund der fehlenden Umsetzung in den Markt liegt in der zu geringen Leistungsdichte gegenüber den kommerziellen Kompressionskältemaschinen.

Um die neue, wirtschaftlich interessante und umweltfreundliche Technologie der Adsorptionskälteverfahren auf dem Markt zu etablieren, besteht das vorrangige Ziel in der Erhöhung der Leistungsdichte im Vergleich zu Anlagen mit dem bisherigen Stand der Technik. Zum besseren Verständnis wird im Folgenden kurz auf den Grundprozess eingegangen.

Das Kernstück einer Adsorptionskältemaschine bildet der Adsorber, in dem Verdampfung und Kondensation des Arbeitsmittels stattfinden. Er besteht aus einer offenporösen Trägerstruktur und ist mit einem Sorptionsmittel (Adsorbens) beschichtet. Zwischen der Trägerstruktur und dem Adsorbens muss ein enger volumetrischer Verbund vorliegen, um die entstehende Adsorptionswärme möglichst schnell und verlustfrei zum

Wärmeträgerfluid zu transportieren. Das setzt eine hohe Wärmeleitfähigkeit der Trägerstruktur voraus. Die Effektivität des Adsorbens wird positiv beeinflusst, je mehr davon in dünner Schicht auf die Trägerstruktur aufgebracht werden kann. Deshalb wirken sich eine hohe offene Porosität und eine große innere Oberfläche der Trägerstruktur positiv auf das Adsorptionsverhalten aus.

## Motivation und Ziele

Die Entwicklung einer Adsorbertechnologie mit hoher Leistungsdichte für den kleinen Leistungsbereich bis 20 Kilowatt in der Klimatisierung bildet die Zielstellung in dem Fraunhofer-internen Projekt WISA »Thermisch angetriebene Hochleistungskälteverfahren«. Die Aufgaben sind aufgegliedert in die Herstellung einer geeigneten offenporösen Trägerstruktur, die Herstellung des Werkstoffverbunds Trägerstruktur-Sorptionsmittel sowie die des Gesamtadsorbers mit Wärmetauscher, begleitende Modellierung und Optimierung und letztendlich die Entwicklung eines Prototypen.

Für die offenporöse Trägerstruktur eignen sich gemäß den oben genannten Anforderungen die nach dem Schmelzinfiltrationsverfahren am IFAM Bremen hergestellten offenporösen Aluminiumschwämme. Sie bieten alle wichtigen funktionellen Eigenschaften auf einen Blick: Sie sind gut von Flüssigkeiten oder Gasen durchströmbar, haben eine hohe offene Porosität und eine große spezifische Oberfläche, sind korrosionsbeständig und besitzen zusätzlich eine ausreichende Festigkeit, um auch als selbsttragende Struktur zu wirken.

Die Herstellung erfolgt reproduzierbar und sehr zuverlässig durch die Infiltration von Polystyrolgranulaten mit Aluminiumschmelze. Die Polystyrolgranulate werden als Erstes durch Wärmebehandlung miteinander versintert. Die Schmelzinfiltration erfolgt mit einem Druckgussprozess, der mit hohen Metallfüllgeschwindigkeiten und Drücken arbeitet sowie eine sehr rasche Abkühl- und Erstarrungsgeschwindigkeit aufweist. Diese Bedingungen erlauben trotz der beachtlichen Schmelzpunktunterschiede von Polystyrol und Aluminium die Nutzung von Polymergranulaten als Platzhalter für die spätere Porenstruktur. Durch thermische Pyrolyse wird der Polystyrolanteil des Verbunds



Abb. 1: Eine Platzhalterstruktur aus Polystyrol mit dem daraus entstandenen Aluminiumschwamm.

Aluminium-Polystyrolgranulat vollständig entfernt und der Aluminiumschwamm sichtbar gemacht. Mit diesem Verfahren werden reproduzierbar Porenstrukturen mit Porositäten im Bereich von 60 bis 83 Prozent und Porengrößen von größer 1,5 Millimeter hergestellt. Durch die direkte Abbildung der Platzhalter können je nach gewünschter Anwendung sowohl homogene als auch gezielt gradierte Porenstrukturen erstellt werden (Abb. 1).

### Aktuelle Arbeiten und Ergebnisse

Um diese neue Adsorbentechnologie auf dem Markt zu etablieren, muss der Aluminiumschwamm hinsichtlich seiner offenporösen Struktur optimiert werden. Entscheidend ist eine sehr hohe offene Porosität mit feiner Porenstruktur und damit hoher spezifischer Oberfläche, damit möglichst viel Adsorbens aufgebracht werden kann. Des Weiteren wird eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit benötigt, um die Temperatur rasch an das Wärmeträgerfluid abgeben zu können. Diese Optimierung erfordert Kompromisse: Mit zunehmender Porosität sinkt der Anteil des Aluminiums in der Gesamtstruktur und damit auch dessen Beitrag zur Wärmeleitfähigkeit. In Abbildung 2 wird die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der offenen Porosität bei den

Aluminiumschwammstrukturen veranschaulicht. Dennoch wird mit den durchschnittlich eingesetzten Porositäten der Aluminiumschwämme etwa ein Zehntel der Wärmeleitfähigkeit des Matrixmaterials erreicht, was durchaus noch einem sehr hohen Wert entspricht.

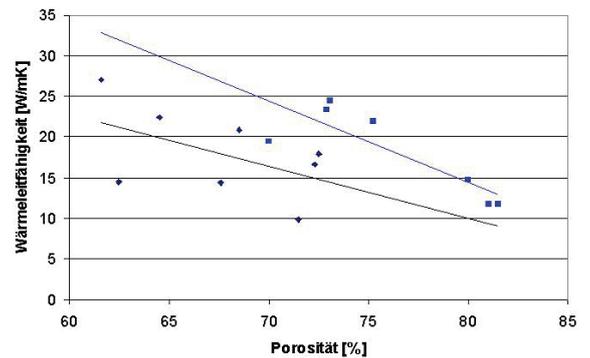


Abb. 2: Einfluss von offener Porosität und Legierung auf die Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumschwämmen.

Neben weiteren wichtigen Eigenschaften, wie Durchströmbarkeit mit Flüssigkeiten und Gasen, die für die hier vorgestellten Aluminiumschwämme gegeben ist, ist besonders eine fest haftende und dichte Beschichtung mit dem Adsorbens auf der Aluminiumschwammstruktur von Bedeutung. Hierdurch wird die Qualität der ablaufenden Adsorptions- und Desorptionsprozesse entscheidend beeinflusst. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Aufkristallisierung von Zeolithen als Adsorbens sehr zuverlässig für die Aluminiumschwämme funktioniert. Diese Beschichtung wird im Rahmen des Projekts an der Universität Erlangen und bei der Sortech AG durchgeführt. Beispiele einer erzeugten Struktur zeigen die Abbildungen 3 und 4 in einer Übersichtsaufnahme eines Schwamms und im Detail einer REM-Aufnahme. Die Qualität des Verbunds Aluminiumschwamm-Adsorbens wird am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE mittels Messungen der Adsorptionskinetik überprüft. Die Ergebnisse in direkter Korrelation zur verwendeten Schwammstruktur lassen Rückschlüsse für eine weitere Optimierung der Trägermatrix zu.

Das Potenzial, mit den Aluminiumschwammstrukturen als Trägermaterial im Adsorber eine wesentlich höhere Leistungsdichte als mit dem bisherigen Stand der Technik umsetzen zu können, wird als

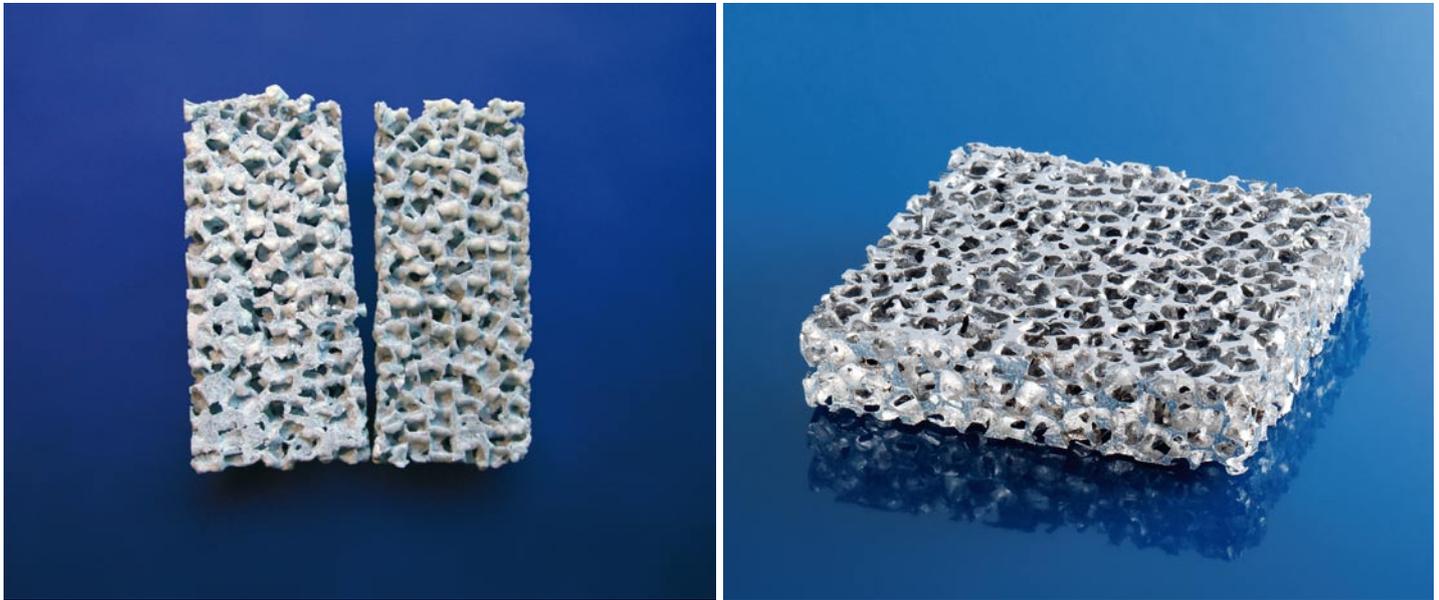
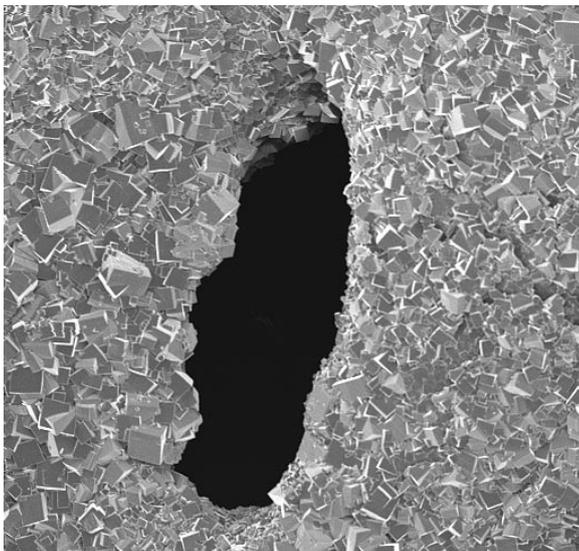


Abb. 3: Bild links: Aufkristallisierte Zeolithstruktur auf Aluminiumschwamm (Lehrstuhl für chemische Reaktionstechnik Universität Erlangen). Bild rechts: Aluminiumschwamm ohne Zeolithstruktur.

sehr hoch eingeschätzt. Dieses innovative Material gibt uns die Chance, eine neue und umweltfreundlichere sowie wirtschaftliche Technologie für die Klimatisierung im kleinen Leistungsbereich im Automobilssektor und in der Gebäudetechnik zu entwickeln.

#### Projektpartner

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystem ISE  
 Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM  
 Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV  
 Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Dresden



JB-192

1mm

Abb. 4: REM-Aufnahme der Zeolithkristalle auf dem Aluminiumschwamm.

#### Ansprechpartner

Andrea Berg  
 Telefon: +49 421 2246-210  
 E-Mail: andrea.berg@ifam.fraunhofer.de

#### Institut

Fraunhofer-Institut für  
 Fertigungstechnik und  
 Angewandte Materialforschung IFAM,  
 Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe,  
 Bremen

# Sichere Elektronikkühlung durch Miniaturwärmerohre aus Kupfer

## Ausgangssituation

Miniaturwärmerohre werden heute zunehmend in der Elektronikkühlung eingesetzt und dies sowohl in terrestrischen als auch in Raumfahrtanwendungen. Die Herausforderungen der heutigen Entwicklungen liegen in der Reduzierung der hohen Fertigungskosten, geringen Übertragungsleistungen bei niedrigen Temperaturen und in der Aufgabe, reproduzierbare Einheiten herzustellen.

Wärmerohre werden im großen Stil z. B. in der Raumfahrt zur Kühlung von Elektronikern mit hoher Verlustleistung eingesetzt. Überwiegend wird dabei die Materialkombination Aluminium/Ammoniak eingesetzt. Wärmerohrprofile aus Aluminium lassen sich sehr gut, kostengünstig und reproduzierbar mit dem Strangpressverfahren herstellen. Ammoniak hat den Vorteil, dass es sehr günstige Transporteigenschaften besitzt und dass es erst bei sehr niedrigen Temperaturen gefriert (minus 80 °C). Der große Nachteil des Ammoniaks ist jedoch seine toxische Eigenschaft.

Für terrestrische Anwendungen und wegen zunehmender Sicherheitsbedenken in der Raumfahrt wird nach Möglichkeiten gesucht, harmlose Flüssigkeiten einzusetzen, wobei in erster Linie an Wasser und Alkohol gedacht wird. Wasser hat sehr gute Übertragungseigenschaften, gefriert aber bereits bei 0 °C. Methanol hat noch brauchbare Eigenschaften zeichnet sich jedoch durch niedrige Arbeitstemperaturen aus (bis minus 60 °C).

Ein geeignetes Wärmerohrmaterial ist z. B. Kupfer oder rostfreier Stahl, wobei Kupfer wegen seiner hohen thermischen Leitfähigkeit bevorzugt wird. Beide Materialien haben jedoch den Nachteil, dass Miniaturprofile über das Strangpressen nicht ohne Weiteres herstellbar sind.

Zur Gewährleistung der Sicherheit bei der Bedienung eines Massenmarktes, z. B. Computer, ist demnach die Materialkombination Kupfer/Wasser eine sowohl technisch als auch wirtschaftlich sinnvolle Alternative zum Stand der Technik.

## Aufgabe

Zielsetzung dieses Projektes ist es, für das Material Kupfer einen neuen Fertigungsprozess zu entwickeln, um die genannten Nachteile zu überwinden. Ansatz ist hier, das Kupfer durch einen Pulverextrusionsprozess in die gewünschte Geometrie für Miniaturprofile zu überführen. Hierbei wird das Bauteil durch das Extrudieren eines Kupfer-Bindemittel-Gemischs, dem Feedstock, erzeugt. Dabei bestimmt die Geometrie des Extruderauslasses (die Matrize oder das Werkzeug) die Geometrie des Bauteilquerschnitts. Die Bauteillänge ist theoretisch endlos, praktisch jedoch begrenzt durch die Länge der für die nachfolgend notwendigen Arbeitsschritte eingesetzten Öfen.

Das extrudierte Bauteil, der Grünkörper, wird nach der Formgebung thermisch entbindert und gesintert. Die Entbinderung ist notwendig, um organische Anteile des Metall-Bindemittel-Gemischs (Feedstock) vor dem eigentlichen Sintern der Metallanteile zu entfernen. Beim Sintervorgang schrumpft das Bauteil auf seine endgültige Größe.

Für die Extrusionsexperimente wurden mehrere Feedstock-Ansätze vorbereitet. Die Mischungen der genutzten Feedstocks basieren auf Polymeren und Wachsen und werden in ähnlicher Zusammensetzung für den Metallpulver-Spritzguss eingesetzt.

Herausforderung beim Extrudieren ist die richtige Temperaturführung der Temperierzonen des Extruders. Weil der Extruder beim Aufheizen bzw. Abkühlen eine gewisse thermische Trägheit aufweist und der Feedstock sehr stark auf Temperaturänderungen reagiert, waren einige Versuche notwendig, um ein adäquates Temperaturprofil einzustellen. Als Kriterien für die Anwendbarkeit des Temperaturprofils dienen dabei die Homogenität des Materials, die Stabilität der geometrischen Form des die Düse verlassenden Extrudats sowie die makroskopische Qualität seiner Oberfläche.

Getestet wurden im Hinblick auf das Projektziel der Herstellung von Minaturprofilen zwei verschiedene Extrusionsprofile: ein Profil mit kammähnlicher Struktur und einer Einzelkanalbreite von 0,7 Millimetern und ein weiteres Profil mit invertierter Kammstruktur und einer Einzelkanalbreite von 0,35 Millimetern (Abb. 1).

Beim Extrudieren variierten Oberflächenqualität, Form und generelle geometrische Stabilität während der ersten Versuche erheblich. Im Weiteren wurden optisch einwandfreie Proben mit guter Dimensionstreuung, guter Oberfläche und guter Reproduzierbarkeit der kammähnlichen Profile erzeugt (Abb. 2). Eine geänderte Temperaturführung in Kombination mit einem granulierten Feedstock ermöglicht die Herstellung eines invertierten Kammprofils.

Die chemische Entbinderung aller Profile mit n-Hexan bei Raumtemperatur bereitete keinerlei Schwierigkeiten. Keine der Proben zeigte sichtbare Defekte wie beispielsweise Risse oder Fehlstellen. Die thermische Entbinderung und Sinterung aller extrudierten und anschließend chemisch entbünderten Profile ergab ebenfalls makroskopisch dichte Teile ohne Risse.

### Ergebnis und Perspektive

Die Extrusion modifizierter MIM-Feedstocks auf Kupferpulverbasis ist möglich. Dies ist ein viel versprechender Ansatz, lineare Strukturen hoher Komplexität zu geringen Produktionskosten herzustellen, und daher eine sinnvolle Alternative zu bisherigen Herstellungsprozessen entsprechender Wärmerohre.

Gleichwohl müssen die notwendigen Feedstock-Formulierungen und Extrusionsparameter sorgfältig abgestimmt werden, um entsprechende formstabile und mit guter Oberfläche versehene Grünteile zu erzeugen. Dies betrifft insbesondere die Temperaturführung während der Extrusion, um Produktgeometrie und -stabilität miteinander ins Gleichgewicht zu bringen. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Formstabilität des Extrudats wird in der Nachschaltung einer Kalibrierlinie im Anschluss an das Extrusionswerkzeug gesehen. Wie erwartet war die Extrusion des Feedstocks

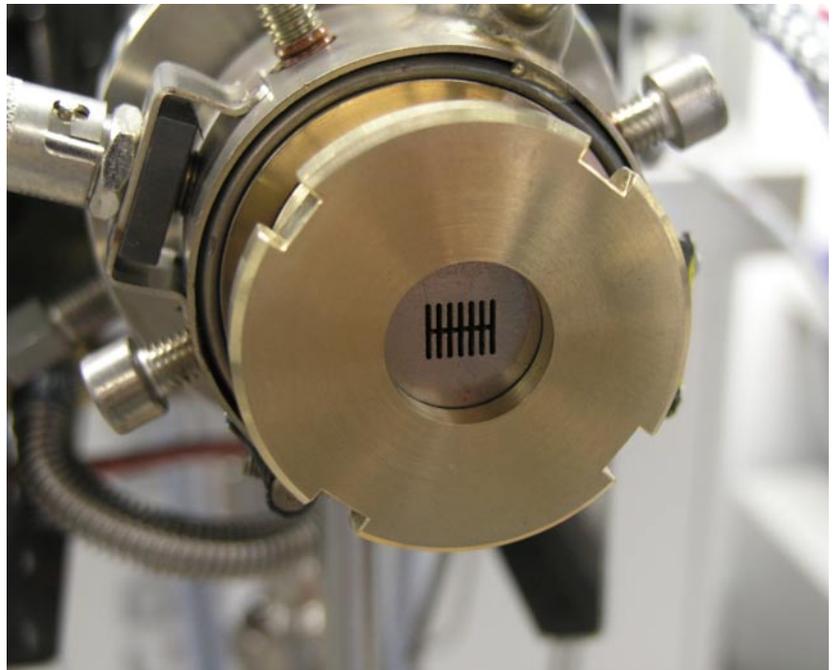


Abb. 1: Werkzeug (Düse) für kammähnliches Profil – Stegbreite 0,70 Millimeter.

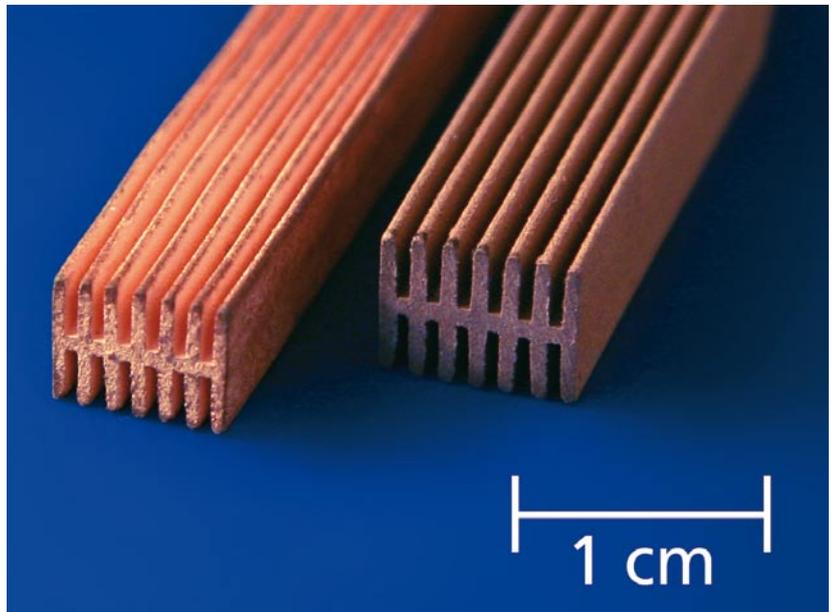


Abb. 2: Gesintertes kammähnliches Profil (links) und Grünteil (rechts).

basierend auf gasverdüstem Pulver erfolgreicher als die des auf wasserverdüstem Pulver basierenden Feedstocks. Die gasverdüστε Materialart mit sphärischen Partikeln wird auch für eine eventuelle Weiterführung des Projektes empfohlen. Die Reduzierung des Binderanteils von 50 Prozent auf 35 Prozent war ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung verbesserter Form- und Dimensionstreue.

Weitere Perspektiven zur Verbesserung des Wirkungsgrades des Wärmerohres ergeben sich aus der grundsätzlichen Möglichkeit, beim abschließenden Entbindern und Sintern des Miniaturwärmerohres die Porosität des Werkstoffs und damit die Größe und Beschaffenheit seiner inneren Oberfläche gezielt einzustellen.

### **Auftraggeber**

Freie Hansestadt Bremen  
BIA Bremer Innovations-Agentur GmbH

### **Projektpartner**

OHB-System AG, Bremen  
BEGO Medical GmbH, Bremen

### **Ansprechpartner**

Frank Petzoldt  
Telefon: +49 421 2246-134  
E-Mail frank.petzoldt@ifam.fraunhofer.de

Claus Aumund-Kopp  
Telefon: +49 421 2246-226  
E-Mail claus.aumund-kopp@ifam.fraunhofer.de

### **Institut**

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM,  
Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe,  
Bremen

## Neuartige Mikrosysteme für die innovative Synthese von ionischen Flüssigkeiten – NEMESIS

Das Verbundprojekt NEMESIS steht für die Entwicklung eines Mikroreaktionssystems für die Synthese ionischer Flüssigkeiten, einer neuen, innovativen Klasse von Materialien (Lösungsmitteln). Ziel des Projektes ist es, ein Mikroreaktorsystem zu entwickeln, in dem die Synthese von ionischen Flüssigkeiten kontinuierlich, mit hohem Reinheitsgrad und reduzierter Synthesezeit durchgeführt werden kann.

Die Aufgabe des IFAM in diesem Projekt besteht in der Entwicklung eines modularen Konzeptes des Mikroreaktorsystems sowie eines modularen Spritzgusswerkzeugs und dem Design, der Materialauswahl, der Feedstock-Entwicklung und der Fertigung der benötigten mikrofluidischen Komponenten durch den Mikro-Metallpulver-Spritzguss ( $\mu$ -MIM). In der ersten Hälfte des Projektes wurde ein Mikroreakortestsystem entwickelt (Abb. 1), welches die kontinuierliche Synthese von ionischen Flüssigkeiten ermöglicht.

Dabei wurden vom IFAM, neben der Mitarbeit an der Konzeption des Systems und der EMSR-Technik, die benötigten Mischer zusammen mit dem UFT der Universität Bremen ausgelegt, konstruiert und durch den Mikrospritzguss gefertigt. Des Weiteren wurde ein modulares Spritzgusswerkzeug entwickelt, welches es ermöglicht, die verschiedensten Mischergeometrien abzuformen. Dies ist entscheidend, damit flexibel und kostengünstig auf eventuelle Geometrieadjustierungen eingegangen werden kann. Das modulare Spritzgusswerkzeug ist in Abbildung 2 dargestellt. Zu dem Werkzeug wurden 13 Formeinsätze konstruiert und gefertigt.

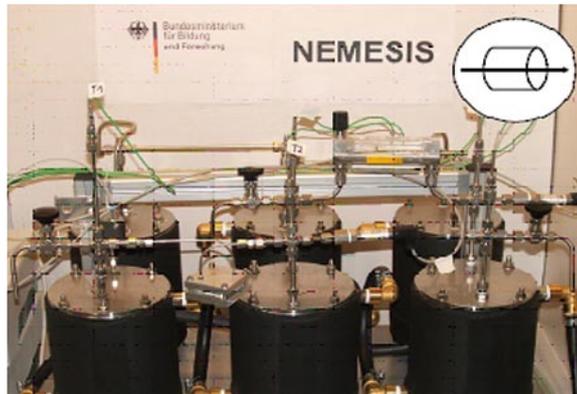


Abb. 1: Darstellung des Mikroreakortestsystems für die Synthese ionischer Flüssigkeiten.

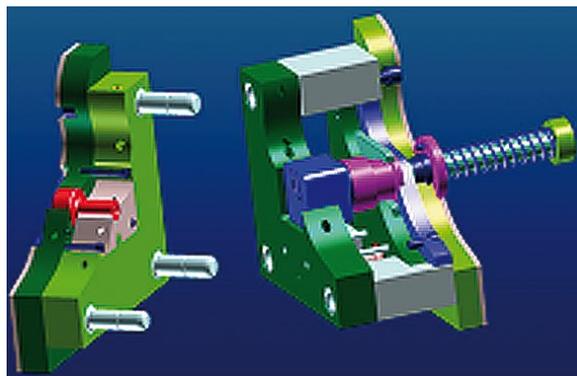


Abb. 2: Modulares Spritzgusswerkzeug für die Arburg 320C.

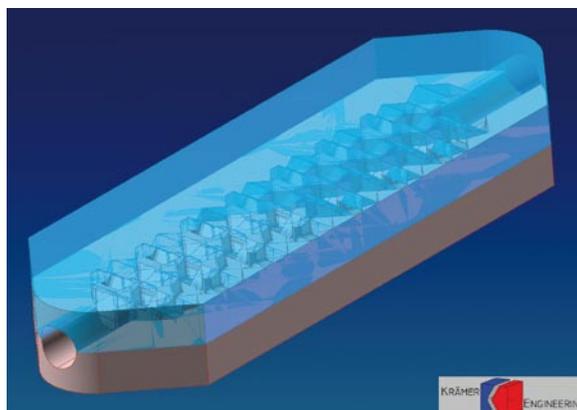
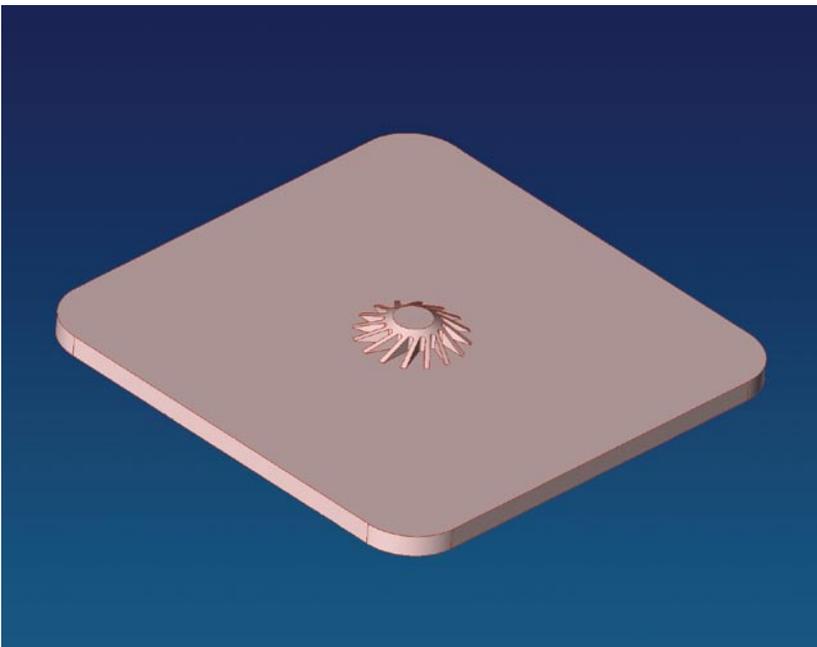
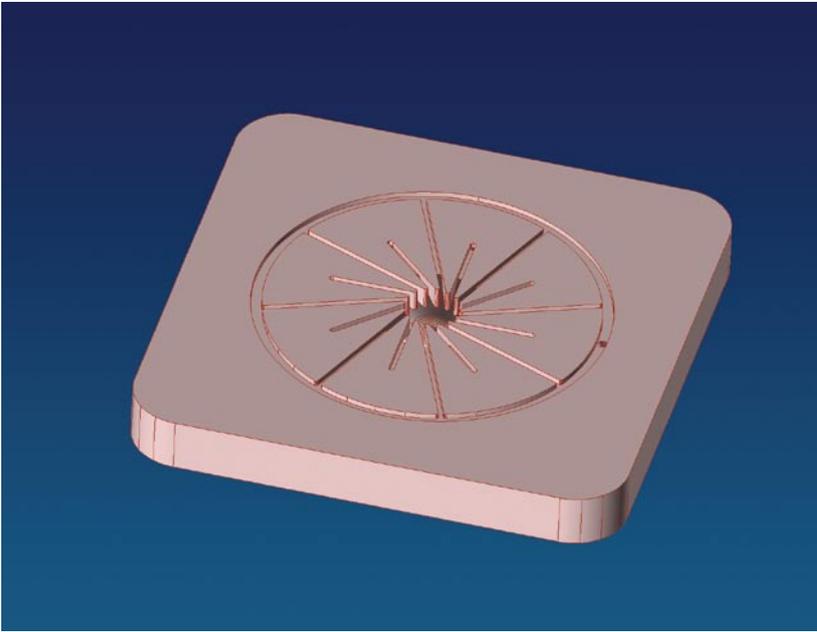


Abb. 3a: Bauteilzeichnung des Raupenmischer mit einem Zu- und Ablaufkanal von 4 mm Durchmesser.



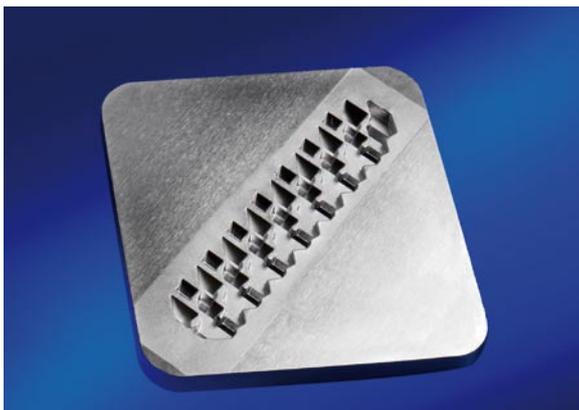
**Abb. 3b:** Bauteilzeichnung des Vortextmischers (Kanalbreite 500 Mikrometer) mit Abdeckung. Dieser dient zur optimalen Durchmischung der Edukte bei der Synthese der ionischen Flüssigkeiten.

Durch die Modularität des neuen NEMESIS-Spritzgusswerkzeuges ist es möglich, mit einem Werkzeug die verschiedensten Geometrien zu fertigen. Durch diese Flexibilität können die Stückkosten bei der Produktion gesenkt werden. Zusätzlich konnte die Umrüstzeit bei Werkzeugwechsel deutlich von bisher einem halben Tag auf unter 15 Minuten reduziert werden. In Abbildung 3a und 3b sind zwei verschiedene Mischerstrukturen dargestellt, die in diesem Projekt entwickelt und als Formeinssatz für das modulare Werkzeug von der Firma Krämer Engineering gefertigt wurden.

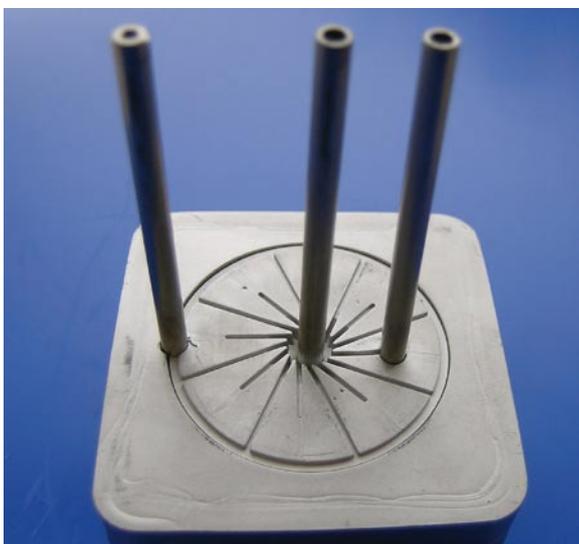
Die durch  $\mu$ -MIM gefertigten Edelmischern sind in Abbildung 4 dargestellt. Bei dem Verfahren wird Metallpulver mit einem Bindersystem zu einem Feedstock vermischt. Durch Erwärmen wird der Feedstock fließfähig gemacht und kann nun auf einer herkömmlichen Spritzgussmaschine in ein Werkzeug (vgl. Abb. 2) eingespritzt werden. Der Feedstock kühlt ab und verfestigt sich. Der in den entstandenen Bauteilen enthaltene Binder wird über einen thermischen Prozess ausgetrieben. Durch eine weitere Wärmebehandlung wird das Bauteil verdichtet (gesintert). Beim Sinterprozess erfährt das Bauteil einen Schrumpf, der bei den dargestellten Mischern etwa 10 Prozent beträgt. Die so entstandenen metallischen Bauteile, in diesem Fall Vortex- und Raupenmischer, können nun zur Synthese ionischer Flüssigkeiten eingesetzt werden. Der Vortextmischer (Abb. 4a) dient zur optimalen Vermischung der Edukte zu Beginn der Reaktionsstrecke. Der Raupenmischer (Abb. 4b) hingegen ist so ausgelegt, dass die ionische Flüssigkeit, die im Laufe der Reaktion immer hochviskoser wird, eine bessere Durchmischung erfährt. Dies ist notwendig, um möglichen Entmischungen während der Reaktion entgegenzuwirken.



**Abb. 4a:** Darstellung des über Metallpulver-Spritzguss gefertigten Vortexmischers (Mischbereich).



**Abb. 4b:** Darstellung des über Metallpulver-Spritzguss gefertigten Raupenmischers.



**Abb. 5:** Darstellung des fertigen Vortexmischers mit Anschlüssen. Die Bauteile sind im Co-Sinterverfahren zusammengefügt, sodass keine Dichtungen mehr notwendig sind.

Damit die in Abbildung 4 dargestellten Mischer in das neue Mikrosystem zur Synthese von ionischen Flüssigkeiten integriert werden können, ist es notwendig, Zu- und Abläufe in die Bauteile zu integrieren. Zudem soll auf normalerweise notwendige Dichtungsmaterialien verzichtet werden. Hier werden wiederum die Vorteile der Pulvermetallurgie ausgenutzt, indem die metallischen Anschlüsse in die Bauteile während des Sinterprozesses integriert werden. Auf diese Weise schrumpft das Material um die Röhrchen herum und es entsteht ein dichter Übergang zwischen Bauteil und Anschlüssen (Abb. 5). Weiterhin in Abbildung 5 zu sehen, ist das Co-Sintern von Bauteilen. Hier werden mehrere Bauteile während des thermischen Entbinderns und Sinterns aufeinander gelegt und unter Druck im Sinterprozess miteinander verbunden. So können die Bauteile möglichst klein gehalten werden, und es sind keine Halterungen mit Dichtungen notwendig, um die Mischer in der Mikroreaktoranlage einsetzen zu können.

Das Verfahren des Co-Sinterns wurde ebenfalls bei den Raupenmischern angewendet. Hier ist es nicht möglich, die Anschlüsse mit einzusintern, da diese sich direkt im Grenzbereich der beiden Mischerhälften befinden. Die Zu- und Abläufe werden anschließend in den Mischer mit eingebracht. Dazu wird ein Gewinde in den Mischer und auf die Anschlussröhrchen geschnitten und fest verschraubt (Abb. 6).



**Abb. 6:** Co-gesinterter Raupenmischer mit verschraubten Anschlüssen.

## Ergebnisse und Perspektiven

Durch das NEMESIS-Projekt konnte gezeigt werden, dass das Metallpulver-Spritzgussverfahren zur Herstellung metallischer Mischer für Anwendungen in der chemischen Industrie geeignet ist. Die Schwierigkeit, die es zu überwinden galt, war, relativ große Bauteile mit filigranen Strukturen zu fertigen. Dies konnte durch die Entwicklung einer geeigneten Prozessführung realisiert werden. Es resultierten daraus rissfreie Bauteile mit Mischerstrukturen im Mikrometer-Bereich, die eine sehr gute Kantenschärfe aufweisen. Des Weiteren ist die Entwicklung eines modularen Werkzeuges für den Metallpulver-Spritzguss gelungen. Zusätzlich wurde das Co- bzw. Einsintern von metallischen Komponenten in diesem Projekt entwickelt, und es konnten gasdichte Verbindungen in den verschiedenen Mischern realisiert werden.

In Zukunft wird der Aspekt des Co- und Einsinterns von metallischen Komponenten weiter untersucht, und das Design der Mischer wird an die Gegebenheiten der zweiten Testanlage angepasst, die bis Projektende gebaut werden wird. Zusätzlich wird sich das Fraunhofer IFAM an der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik der zweiten Testanlage beteiligen.

## Auftraggeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) durch den Förderträger VDIVDE-IT in Berlin. Förderkennzeichen: 16SV1964

## Projektpartner

Ionic Liquids Technologies GmbH & Co. KG, Denzlingen (Kordinator)  
 BIAS Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik GmbH, Bremen  
 Merck KGaA, Darmstadt  
 Schulz Automatisierungstechnik GmbH  
 Universität Bremen, UFT

## Projektlaufzeit

1. Januar 2005 bis 30. September 2008

### Ansprechpartner

Natalie Salk  
 Telefon: +49 421 2246-175  
 E-Mail: natalie.salk@ifam.fraunhofer.de

### Institut

Fraunhofer-Institut für  
 Fertigungstechnik und  
 Angewandte Materialforschung IFAM,  
 Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe,  
 Bremen

# Realisierung des Shape-Memory-Effekts von Nickel-Titan durch $\mu$ -MIM

## Ausgangssituation

Auf dem Gebiet der intermetallischen Werkstoffe wird für Automobil- und Luftfahrtanwendungen vor allem den sogenannten »smart materials« ein hohes zukünftiges Anwendungspotenzial attestiert. Der bekannteste Vertreter dieser Werkstoffklasse, Nickel-Titan (NiTi), kann je nach Zusammensetzung und Vorbehandlung als superelastisches oder als Formgedächtnismaterial vorliegen. NiTi wird für verschiedene Aktuatoranwendungen bereits meist in Form von Drähten, Rohren oder dünnen Blechen industriell eingesetzt. Im Projekt NiTiBiT (Nickel-Titanium for biomedical and transport applications) werden nun auch pulvermetallurgische Fertigungsprozesse hinsichtlich ihrer Eignung für eine kostengünstige und nachbearbeitungsarme Herstellung kleiner, komplexer Komponenten untersucht. Das Projekt ist Teil des europäischen Network of Excellence »Knowledge-based Multicomponent Materials for Durable and Safe Performance (KMM)« mit einem Konsortium aus 34 internationalen Partnern.

## Projektbeschreibung

Aufgabe des IFAM innerhalb des Projekts ist es, das Mikro-Metallpulver-Spritzgießen ( $\mu$ -MIM) zur Herstellung filigraner Komponenten aus NiTi zu entwickeln. Betrachtet wird dabei die gesamte Prozesskette von der Pulverauswahl und -aufbereitung über die Entbinderungs- und Sintertechnik bis hin zur Charakterisierung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Als wesentliche Herausforderung ist dabei anzusehen, die den superelastischen bzw. den Formgedächtniseffekt bestimmende Phasenumwandlungstemperatur von Martensit zu Austenit reproduzierbar einzustellen. Die Umwandlungstemperatur kann sich bei einer Änderung des Nickel-Titan-Verhältnisses um lediglich  $\pm 2$  Atomprozent bereits um bis zu 350 °C verschieben. Hinzu kommt, dass Umwandlungstemperatur und mechanische Eigenschaften von Nickel-Titan stark vom Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalt beeinflusst werden. Diese Verunreinigungen müssen deshalb möglichst gering gehalten werden. Damit ergibt sich eine besondere Herausforderung hinsichtlich der Entbinderungs- und Sintertechnik, da speziell im  $\mu$ -MIM-Prozess sehr feine und daher für die Aufnahme

von Sauerstoff und Kohlenstoff anfälligere Pulver verarbeitet werden. Im Folgenden werden die Prozessentwicklungen geschildert und die erzielten Werkstoffeigenschaften vorgestellt.

## Ergebnisse

Als Ausgangswerkstoff wurde ein vorlegiertes Pulver mit einem Ni-Ti-Verhältnis von 50,7 zu 49,3 Atomprozent genutzt. Die mittlere Pulverpartikelgröße betrug 11 Mikrometer, die nominelle Umwandlungstemperatur des Materials lag bei 37 °C. Abbildung 1 zeigt eine REM-Aufnahme des Pulvers. Es lag eine für den MIM-Prozess wünschenswerte, überwiegend sphärische Partikelform vor.

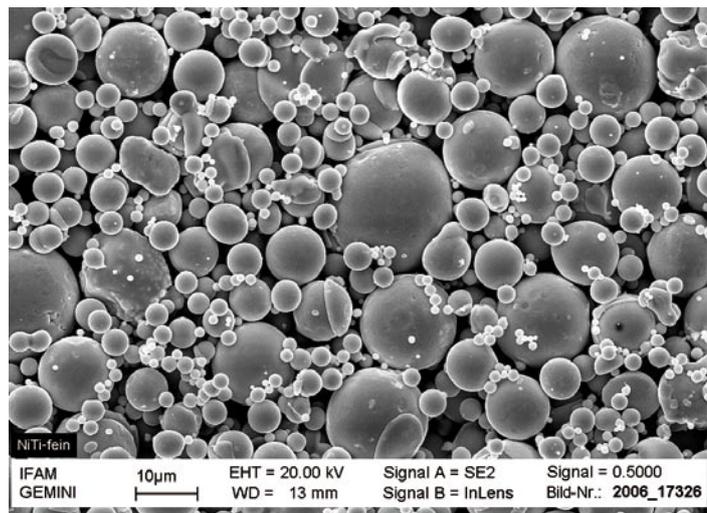


Abb. 1: NiTi-Pulver im REM.

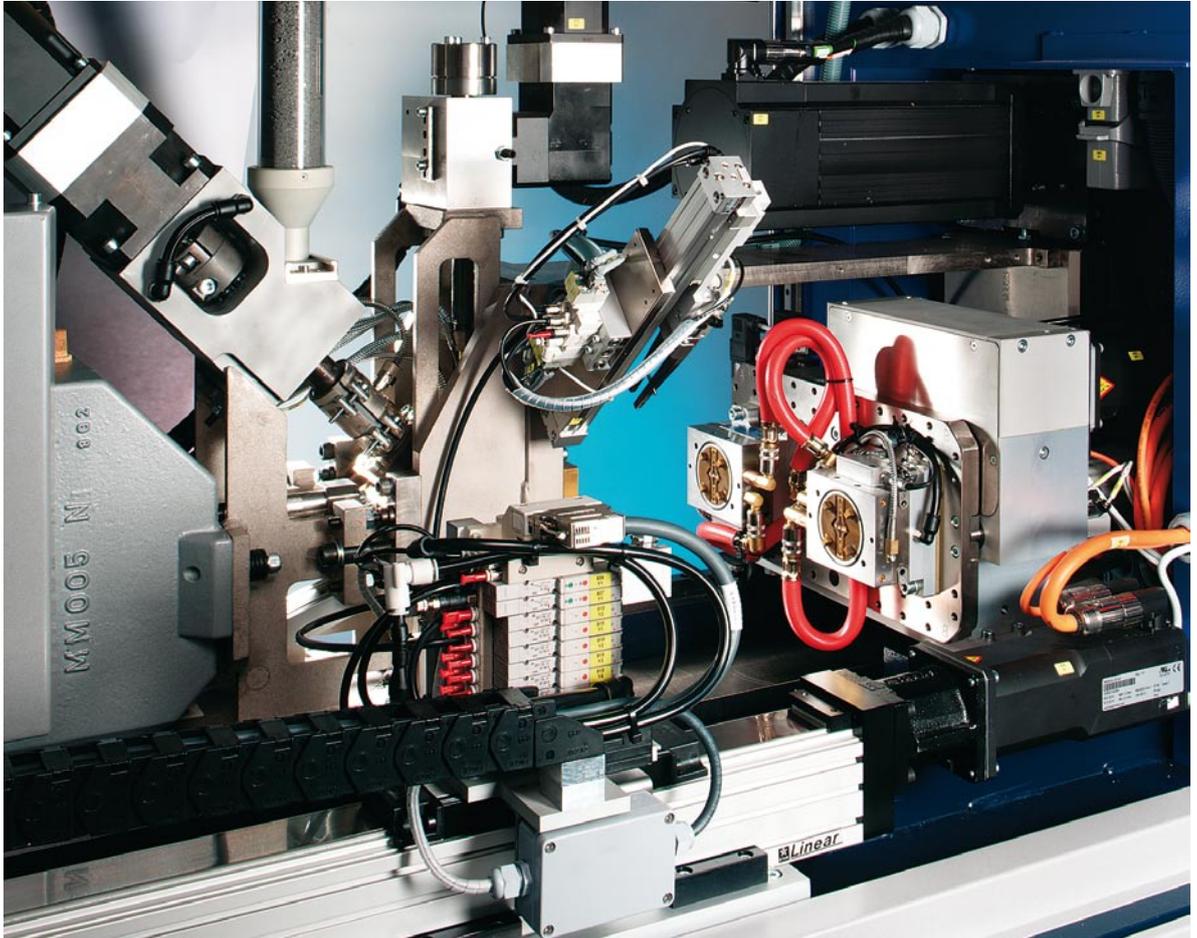


Abb. 2: Mikrospritzgießmaschine Battenfeld Microsystem 50.

Programm Nr.	Aufheizrate [K/min]	Sinter-temperatur [°C]	Haltezeit [h]
1	5	1200	6
2	5	1230	6
3	5	1250	6
4	5	1270	6
5	10	1270	6
6	15	1270	6

Tab. 1: Sinterprogramme.

Zur Aufbereitung der Formmasse (Feedstock) wurde ein Binder auf Basis von Wachsen und Polymeren genutzt. Das Volumenverhältnis von Pulver zu Binder betrug 65 zu 35 Prozent. Das Mischen von Pulver und Binder geschah zunächst auf einem Doppelschaufelknetter, abschließend wurde die Formmasse auf einem Scherwalzenextruder endgültig homogenisiert. Das Spritzgießen erfolgte auf einer Mikrospritzgießmaschine, dem Microsystem 50 der Firma Battenfeld (Abb. 2). Es wurden verschiedene Testproben sowie kleine Zugstäbe mit einer Länge von 26 Millimetern und einem Prüfquerschnitt von einem Quadratmillimeter abgeformt. Anschließend wurden die Proben chemisch und thermisch entbindert und unter verschiedenen Prozessbedingungen gesintert. Die unterschiedlichen Sinterprogramme sind in Tabelle 1 aufgeführt.

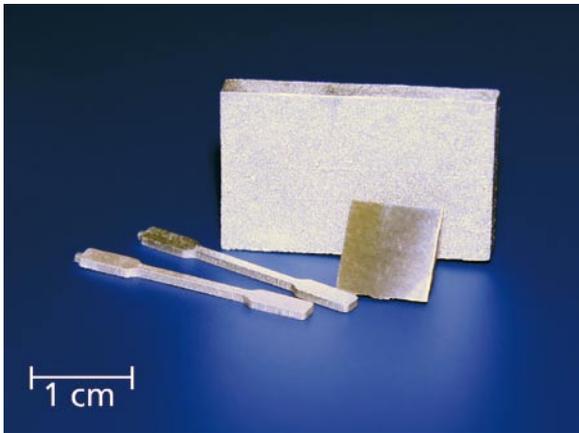


Abb. 3: Proben aus NiTi nach der Sinterung.

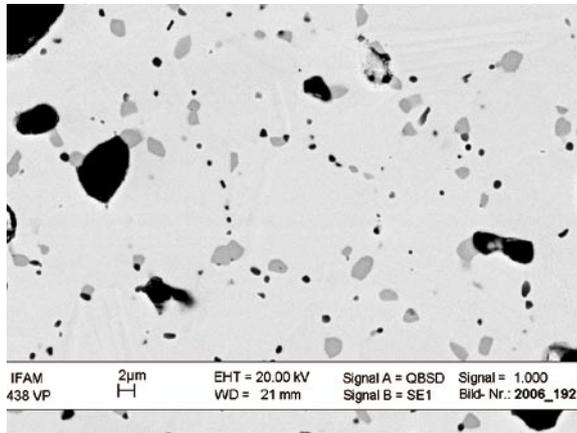


Abb. 5: REM-Aufnahme eines typischen NiTi-Gefüges (Programm 3).

Abbildung 3 zeigt einige Proben nach der Sinterung. Dichtemessungen nach den Sinterungen ergaben einen Anstieg der Dichte von 90 Prozent auf 96–97 Prozent mit steigenden Sintertemperaturen (Sinterprogramme 1 bis 4). Zugleich wurde bei den höheren Sintertemperaturen eine Verringerung der Streuung zwischen den einzelnen Messwerten erfasst (Abb. 4).

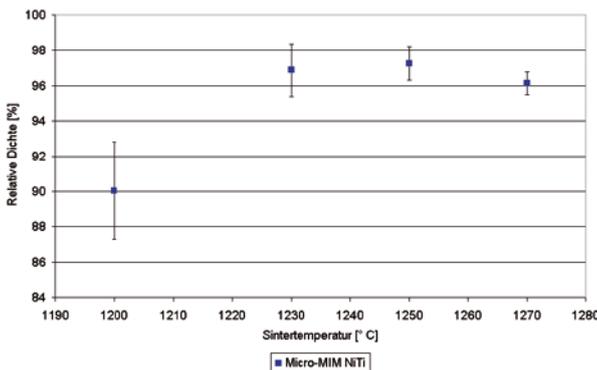


Abb. 4: Einfluss der Sintertemperatur auf die Dichte.

Aus den Gefügeanalysen ergab sich für alle Sinterbedingungen grundsätzlich ein mehrphasiges Gefüge mit einer im REM hellgrau erscheinenden Matrix. Ein solches typisches Gefüge ist in Abbildung 5 dargestellt. Die hellgraue Matrix wurde durch Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) als NiTi mit einem Atomverhältnis von 1 zu 1 identifiziert. Die dunkelgrauen Phasen bestehen demnach aus NiTi<sub>2</sub>. Auf den Korngrenzen

erkennbare kleine schwarze Punkte sind Ti-reiche Einschlüsse. Die in der Aufnahme erkennbaren größeren schwarzen Bereiche sind Poren. Als erstes positives Ergebnis bleibt festzuhalten, dass die gewünschte NiTi-Phase den überwiegenden Gefügeanteil ausmacht, wenn auch noch kein ideal einphasiges NiTi-Gefüge erreicht wurde.

Die Messungen der Kohlenstoff- und Sauerstoffgehalte zeigten einen deutlichen Einfluss der Heizraten auf die entsprechenden Anteile auf. So sank sowohl der Sauerstoff- als auch Kohlenstoffanteil, wenn das Aufheizen nicht mit 5 K/min, sondern mit 10 oder 15 K/min erfolgte. Als Ursache hierfür kommt die insgesamt verringerte Sinterzeit in Betracht, die wahrscheinlich zur Verminderung der Aufnahme von Sauerstoff aus der Prozessatmosphäre beiträgt. Die Messwerte sind in Abbildung 6 aufgetragen.

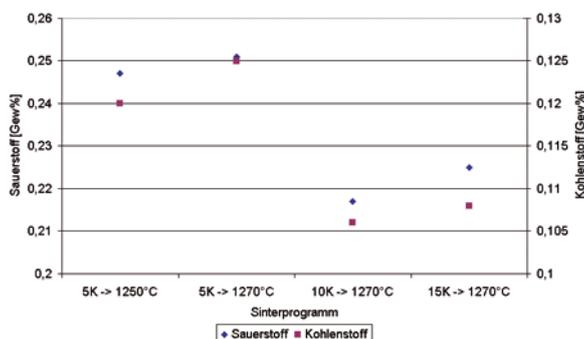


Abb. 6: Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalte der NiTi-Proben.

Die mechanischen Eigenschaften der NiTi-Zugproben wurden durch Mikrozugversuche bei Raumtemperatur getestet. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abb. 7) zeigt, dass hohe Zugfestigkeiten bis zu 1000 MPa und Dehnungen von 14 Prozent erreicht werden. Im Bereich von 450 MPa wurde ein ausgeprägtes Plateau registriert. Dies verdeutlicht, dass Teile des Gefüges die für den Formgedächtniseffekt charakteristische, spannungsinduzierte martensitische Umwandlung aufweisen. Während die DSC (Differential Scanning Calometrie) des Pulvers eine Umwandlungstemperatur von 37 °C ergab, wurden an den Sinterteilen Umwandlungstemperaturen mit 19–22 °C bestimmt. Diese Verschiebung der Umwandlungstemperatur ist vermutlich auf die Bildung von  $\text{Ni}_2\text{Ti}_4\text{O}_x$ -Oxiden zurückzuführen, die zu einer Verringerung des Ti-Anteils in der Matrix und damit zu einer Verringerung der Umwandlungstemperatur führen können. Bei den Partnern werden derzeit Tests über das Verhalten bei zyklischer Verformung sowie Gefügeveränderungen nach Impulsstrombehandlung (zur Kornfeinung) durchgeführt.

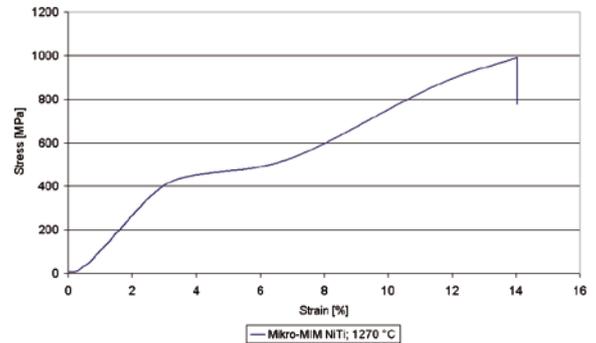


Abb. 7: Spannungs-Dehnungs-Verhalten von MIM-NiTi nach Sinterung 5.

### Perspektive

Die beschriebenen Entwicklungen des  $\mu$ -MIM von Nickel-Titan haben im Laufe des Projektes zum Design eines Demonstrators geführt, der im Automobil als Dichtungselement eingesetzt werden könnte. Anhand dieses Bauteils werden die Werkstoffeigenschaften im nun anbrechenden letzten Projektjahr für die Anwendung optimiert. Angestrebt wird eine Umwandlungstemperatur von 60 °C. Bei einer erfolgreichen Prozessentwicklung besteht die Aussicht, in direkten Nachfolgeprojekten weitere Anwendungen zu erschließen.

### Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Network of Excellence »Knowledge-based Multicomponent Materials for Durable and Safe Performance (KMM)« im sechsten Forschungsrahmenprogramm der EU gefördert ([www.kmm-noe.org](http://www.kmm-noe.org)).

#### Ansprechpartner

Philipp Imgrund  
 Telefon: +49 421 2246-216  
 E-Mail [philipp.imgrund@ifam.fraunhofer.de](mailto:philipp.imgrund@ifam.fraunhofer.de)

#### Institut

Fraunhofer-Institut für  
 Fertigungstechnik und  
 Angewandte Materialforschung IFAM,  
 Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe,  
 Bremen

# Materialien für die Wasserstoffspeicherung

## Verbesserte Speicherkapazität und Kinetik durch Nanostrukturierung

### Motivation

Im Hinblick auf den weltweiten Klimawandel, auf geopolitische Abhängigkeiten bezüglich fossiler Energieträger sowie auf die globale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie wird Wasserstoff als sauberer, sicherer und innovativer Energieträger der Zukunft angesehen. Bei der Realisierung eines wasserstoffbasierten Energiekreislaufs spielt die Frage seiner Speicherung eine entscheidende Rolle. Besonders für portable und mobile Anwendungen ist die Technologie einer verlässlichen, volumeneffizienten, leichtgewichtigen sowie kostengünstigen Wasserstoffspeicherung nach wie vor ein unbefriedigend gelöstes Problem.

Die technisch bereits mögliche Speicherung von Wasserstoff sowohl im komprimierten als auch im flüssigen Zustand stellt einerseits extrem hohe Anforderungen an die Systemsicherheit. Andererseits kann mit diesen Formen der Speicherung das vom US Department of Energy angestrebte Ziel einer gravimetrischen Wasserstoffspeicherdichte von 6 Gewichtsprozent nicht erfüllt werden (Abb. 1).

Daher werden verschiedene anorganische Materialien, d. h. Wasserstoff-Feststoffspeicher, als äußerst vielversprechende Alternativen angesehen, wie beispielsweise Metallhydride, Komplexhydride, Kohlenstoff-Nanostrukturen und Kompositwerkstoffe (Abb. 1 und 2). Die technologische Umsetzung des hierzu vorhandenen materialwissenschaftlichen Grundlagenwissens in praktikable Systemlösungen ist Gegenstand zukünftiger Anwendungsforschung und Entwicklung.

### Neue Arbeitsrichtung

Vor diesem Hintergrund wurde im September 2007 am IFAM Dresden eine neue Arbeitsgruppe »Wasserstoffspeicherung« etabliert. Unter Ausnutzung des bereits erreichten Grundlagenwissens ist deren Aufgabe die Entwicklung reversibler Feststoffspeichersysteme bis zum Pilotmaßstab für portable, mobile sowie stationäre Anwendungen. Im Fokus der Arbeiten werden Metallhydride, magnesiumbasierte Leichtmetallhydride, Komplexhydride sowie Kompositmaterialien stehen, welche in nanostrukturierter Form eingesetzt werden. Wegen der sehr hohen »inneren

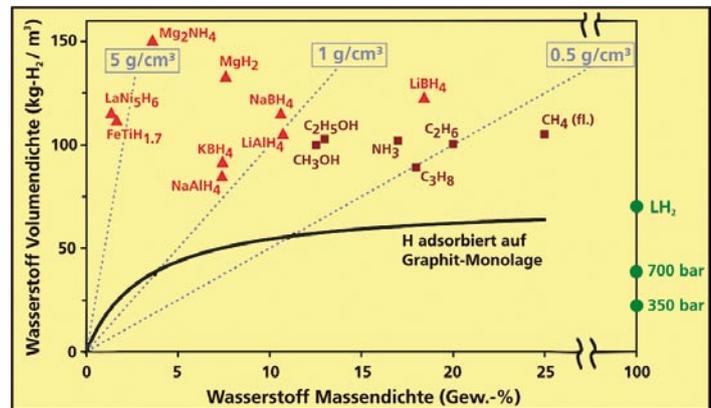


Abb. 1: Vergleich verschiedener Formen der Wasserstoffspeicherung hinsichtlich ihrer volumetrischen und gravimetrischen Wasserstoffspeicherdichte. Metall- und Komplexhydride sind rot markiert.

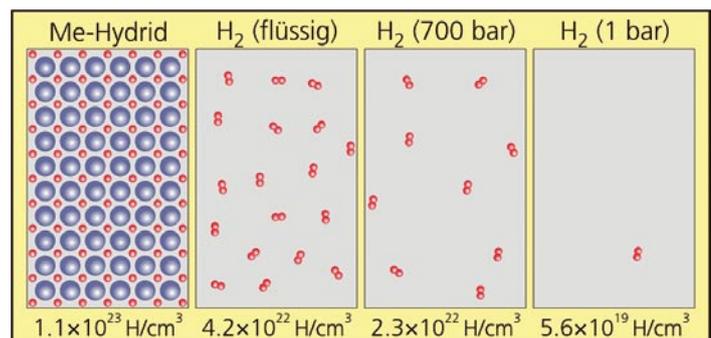
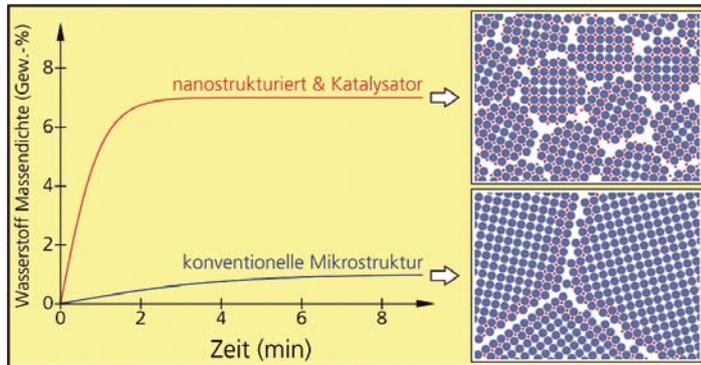


Abb. 2: Schematischer Vergleich volumetrischer Wasserstoffspeicherdichten: Metallhydrid, Flüssigwasserstoff, komprimierter Wasserstoff, Wasserstoff unter Normalbedingungen.



**Abb. 3:** Schematische Darstellung des Wasserstoffspeicherverhaltens nanokristalliner, katalysatorversetzter Materialien im Vergleich zu herkömmlichen mikrokristallinen Materialien.

Oberfläche« (Korngrenzen, Versetzungen) und des Defektreichtums können somit sowohl eine höhere Speicherkapazität als auch eine erhöhte Reaktionskinetik erreicht werden (Abb. 3). Außerdem werden katalytisch wirkende, nanodisperse Partikel zum Einsatz kommen, um eine Senkung der für die Absorption und Desorption zu überwindenden Reaktionsbarrieren zu erzielen.

Der Aufbau dieser neuen Arbeitsgruppe geschieht im Rahmen des Fraunhofer-internen Förderprogramms »Fraunhofer Attract« innerhalb eines Zeitraums von fünf Jahren. Die Gruppe wird von Herrn Lars Röntzsch (Physiker) geleitet. Er hat sich im Rahmen seiner Promotion am Forschungszentrum Dresden-Rossendorf intensiv mit der Synthese von Nanostrukturen und deren Modifizierung über externe Kräfte und Felder auseinandergesetzt und verfügt somit über ein sehr fundiertes Wissen der atomistischen Reaktionskinetik kondensierter Materie, das für die sehr komplexen Mechanismen der Wasserstoffsorption in Feststoffen erforderlich ist. Die volle Funktionsfähigkeit der neuen Arbeitsgruppe wird nach einem Zeitraum von 3–4 Jahren erwartet. Die Forschergruppe soll in diesem Stadium aus drei Wissenschaftlern bestehen.

### Projektziele

Aufbauend auf Erkenntnissen der materialwissenschaftlichen Grundlagenforschung zielt das Attract-Projekt auf die Entwicklung und Erprobung zuverlässiger Wasserstoffspeichersysteme für portable, mobile und stationäre Applikationen,

die hohe Wasserstoffspeicherdichten sowie eine höhere Reaktionskinetik der Be- und Entladung als konventionelle Systeme dieser Art aufweisen.

Im materialwissenschaftlichen Fokus des Projekts stehen Untersuchungen zur Nanostrukturierung und katalytischen Aktivierung für die Feststoffspeicherung von Wasserstoff geeigneter Stoffklassen. Zur Materialsynthese wird hauptsächlich auf am Fraunhofer IFAM Dresden etablierte Technologien (Hochenergiemahlen, Melt Spinning) zurückgegriffen. Neben den konventionellen Strukturanalysemethoden (XRD, REM, TEM) dienen thermische Analysemethoden (hauptsächlich Thermogravimetrie unter Wasserstoffhochdruck und Hochtemperatur) der Ermittlung der Reaktionskinetik der Wasserstoffsorption (d. h. Be- und Entladung der Feststoffe mit Wasserstoff).

Ausgehend von den grundlegenden Untersuchungen zur mechanischen Modifizierung und Aktivierung der Feststoffspeicher sollen Verfahrenstechniken und Untersuchungsmethoden für Wasserstoffspeicherwerkstoffe und -systeme geschaffen werden, die Entwicklungsarbeiten mit praktisch relevanten Stoffmengen gestatten. In der fortgeschrittenen Projektphase sollen Industriekooperationen in stärkerem Maße aufgebaut werden. Dafür müssen die werkstofforientierten Kompetenzen auf Systemkompetenzen erweitert werden, die Wärme- und Druckmanagement des Feststoffspeichers ebenso wie Sicherheitsaspekte einbeziehen, sodass industriellen Projektpartnern prototypische Speichersysteme für ausgewählte Anwendungen präsentiert und zur Verfügung gestellt werden können.

### Strategische Einbettung

Der Institutsteil Dresden des Fraunhofer IFAM verfügt auf den Gebieten Pulvermodifizierung und -verarbeitung über langjährige Kompetenzen zur Nanostrukturierung vorwiegend metallischer Materialien. An diese Kompetenzen knüpft die neue Arbeitsrichtung unmittelbar an, indem vorhandene und neue Technologien genutzt werden sollen, um durch Nanostrukturierung Wasserstoffspeichermaterialien in ihren Be- und Entladecharakteristiken gezielt zu verändern. Zum Thema Wasserstofftechnologien werden am Fraunhofer

IFAM Dresden bereits Projekte zur Wasserstoffgewinnung über katalytisches Reforming und zur Wasserstoffspeicherung in Metallhohlkugeln bearbeitet. Die vorgesehenen Forschungsaktivitäten knüpfen somit an vorhandene Kompetenzen an und stellen eine gewünschte Erweiterung der an Funktionseigenschaften orientierten bisherigen Werkstoffforschung dar.

Auch wenn die geplanten Arbeiten zur Wasserstoffspeicherung ein klar umrissenes Teilgebiet der wasserstoffbasierten Technologien mit einem eigenen Kreis von Kooperationspartnern in der Industrie umfassen, wird durch dieses Vorhaben die Systemkompetenz der Fraunhofer-Gesellschaft zur Nutzung von Wasserstoff als sekundärem Energieträger erweitert. Anknüpfungspunkte werden zu folgenden Fraunhofer-Instituten gesehen, in denen bereits Kompetenzen zu Wasserstofftechnologien bestehen: IKTS Dresden (Brennstoffzellen), ISE Freiburg (Wasserstoff-erzeugung, Mikroenergie-technik), ICT Pfinztal (Wasserstoffsicherheitstechnik), IVI Dresden (mobile Wasserstoffinfrastruktur, Brennstoffzellen in der Verkehrstechnik), IGB Stuttgart (Wasserstoff-erzeugung über Membrantechnologie, Wasserstoffreinigung), ISI Karlsruhe (Energiepolitik und Energiesysteme). Da es sich bei dem Thema um eine sehr komplexe Umstellung von technischen und wirtschaftlichen Strukturen in größtem Ausmaß handelt, wird eine von der Erzeugung über die Speicherung bis zur Nutzung von Wasserstoff reichende Kompetenz die Wettbewerbsposition der Fraunhofer-Gesellschaft und ihrer Institute weiter verbessern.

#### **Ansprechpartner**

Lars Röntzsch  
Telefon: +49 351 2537-411  
E-Mail [lars.roentzsch@ifam-dd.fraunhofer.de](mailto:lars.roentzsch@ifam-dd.fraunhofer.de)

#### **Institut**

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM,  
Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe,  
Dresden

## Der innovative Wachstumskern inno.zellmet

inno.zellmet ist ein großes BMBF-gefördertes Projekt, welches sich zum Ziel gesetzt hat, die Kommerzialisierung von multifunktionalen zellularen Metallen auf Faser- und Hohlkugelbasis voranzutreiben. Herzstück ist die sogenannte Technologieplattform, die in den Bereichen Herstellung, Veredelung, Fertigbearbeitung und Charakterisierung dieser Werkstofffamilie weiterentwickelt wird. Sechs Forschungseinrichtungen und 17 Industriepartner werden dafür im Rahmen der BMBF-Initiative »Unternehmen Region« über drei Jahre mit annähernd vier Millionen Euro gefördert.

Die Bearbeitung erfolgt im Rahmen von vier parallel laufenden Verbundprojekten, welche sich verschiedenen Schwerpunktthemen widmen. Ein zentrales Management, welches durch einen Vertreter aus dem Fraunhofer IFAM Dresden und einen Vertreter des Projektpartners Glatt Systemtechnik GmbH gestellt wird, übernimmt die übergeordnete Steuerung, und Task Groups kümmern sich um Querschnittsthemen wie Fertigbearbeitung, Charakterisierung oder Marketing. Das Projekt startete im März 2005. Die erste Phase wird im Februar 2008 abgeschlossen sein.

Die technologische Basis für die angestrebten Entwicklungen wurde bereits in den 1990er Jahren durch die Arbeiten des Fraunhofer IFAM Dresden im Bereich versinterter Kurzfaserverstrukturen und metallischer Hohlkugelstrukturen (Abb. 1) gelegt. Die Herstellungswege sind in einer Reihe von Veröffentlichungen ausführlich beschrieben worden

[1 und 2] und sollen hier nicht weiter behandelt werden. Durch die pulvermetallurgischen Verfahrensrouten lassen sich beide Werkstoffe in einer nahezu unbegrenzten Vielzahl von Metallen und Legierungen bis hin zu intermetallischen Verbindungen, Edel- und Refraktärmetallen sowie Sonderwerkstoffen mit magnetostriktiven und Formgedächtniseigenschaften herstellen. Die Werkstoffe werden vom Fraunhofer IFAM Dresden und von der im Wachstumskern eng kooperierenden Firma Glatt GmbH aus Dresden an die Entwicklungspartner geliefert.

Zielanwendungen für diese »konstruierten« Werkstoffe liegen auf den Gebieten Leichtbau, dezentrale Energieversorgung, Medizin- und Biotechnologie sowie Geräuschdämmung und Explosionsschutz für stationäre Anlagen. Abbildung 2 zeigt die Hauptthemen und Entwicklungsziele der vier Verbundprojekte in der Übersicht. Im Folgenden sollen zwei dieser Entwicklungsrichtungen exemplarisch vorgestellt werden.

Metallische Hohlkugelstrukturen zeigen gute breitbandige Schallabsorptionseigenschaften. Die Eigenschaften können durch Änderung von Kugeldurchmesser, Wandstärke, Schalendicke und anderen Parametern auf ein bestimmtes Frequenzspektrum eingestellt werden. Da sie gleichzeitig aufgrund der darstellbaren Materialvielfalt eine hohe Beständigkeit gegenüber thermischer und mechanischer Beanspruchung aufweisen, eröffnet dieser Werkstoff besondere



Abb. 1: Beispiele für versinterter Kurzfaserverstrukturen (links) und Hohlkugelstrukturen (rechts).

Projekt	Entwicklungsziele	Anwendungsgebiete
MAKOMP	Leichte und steife Hohlkugelkomposite; Verbindungstechnologie	Schnelllaufende Maschinenteile in Laserschneid- und Verpackungsmaschinen
MASCHA	Selbsttragende, schalldämmende Hohlkugelstrukturen; Sintertechnologie	Schalldämmung und -dämpfung für Werkzeugmaschinen und Luftabsaugungen
CASMEDUM	Metallfaserstrukturen mit hoher spezifischer Oberfläche; funktionelle Beschichtungen für Faserstrukturen	Biosensoren, Sauerstoffgeneratoren, katalytische Luft- und Wasserreinigung
HOTFAS	Große hochtemperaturbeständige Faserstrukturen; Endbearbeitung	Explosionsschutzeinrichtungen, Regeneratoren für Stirling-Maschinen, poröse Oberflächenbrenner

Abb. 2: Übersicht über die Ziele und Anwendungsgebiete des Wachstumskerns.

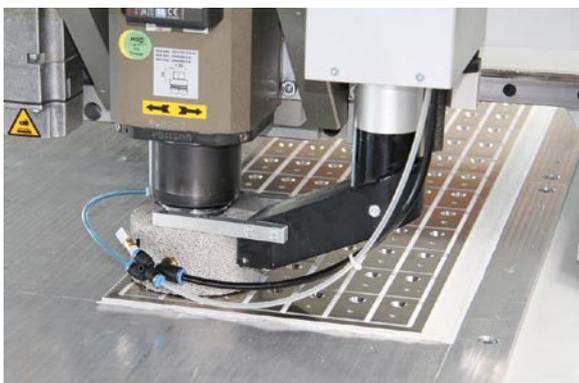


Abb. 3: Hohlkugelstruktur zur Schallkapselung eines Hochgeschwindigkeitsfräasers.

Designmöglichkeiten für Schallabsorber unter anspruchsvollen Umgebungsbedingungen. Zusammen mit den MASCHA-Projektpartnern Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH und dem Maschinenhersteller Portatec GmbH wurde beispielsweise eine Kapselung für einen Hochgeschwindigkeitsfräskopf (Abb. 3) entwickelt. Die Hohlkugelstruktur aus einem rostfreien Chrom-

Nickel-Stahl ersetzt hier eine massive Glocke aus Aluminium und bringt neben der Gewichtersparnis eine Verringerung der gemessenen Schallpegel um bis zu 6 Dezibel (Tabelle 1).

Im Projekt HOTFAS wird unter anderem eine versinterte Faserstruktur für den Einsatz als poröser Oberflächenbrenner entwickelt. Diese Art von Brennern weist besonders vorteilhafte Eigenschaften wie hohe Leistungsdichte und damit kompaktes Design, sehr hohe Modulationsfähigkeit und gleichzeitig sehr niedrige Emissionen auf. Diese Eigenschaften lassen sich durch die Flammstabilisierung in einer mikroporösen Struktur, die mit regelmäßigen Makroporen versehen ist, erzielen. Solche Brenner werden heute vorzugsweise aus Spezialkeramiken hergestellt. Für nicht stationäre Anwendungen existieren allerdings noch keine Lösungen, die robust genug wären, die dabei auftretenden mechanischen Beanspruchungen zu ertragen. Hier sind metallische Lösungen vorteilhaft, die zusammen mit der Firma Amovis GmbH für den Einsatz in einer Auxiliary Power Unit für Schienenfahrzeuge entwickelt werden.

Spindel-drehzahl	Vorschub [m/min]	Schalldruckpegel [dB(A)]	
		massive Glocke	MHKS-Glocke
20000	3,0	74,0	72,0
25000	3,6	77,0	74,0
30000	4,5	81,0	75,5
35000	5,1	83,5	77,5

Tab. 1: Gemessene Schallpegel in Abhängigkeit von der Spindeldrehzahl.

Die dafür benötigte hohe Oxidationsbeständigkeit erfordert ein besonders widerstandsfähiges Material. Üblicherweise werden hier die bekannten FeCrAl-Werkstoffe eingesetzt, die sich mit einer Aluminiumoxidschicht schützen. Die Lebensdauer ist daher durch den Aluminiumvorrat der Legierung bestimmt, welcher in der Regel bei 5 Prozent liegt und bei konventioneller Fertigung nicht signifikant überschritten werden kann. Mithilfe des hier verfolgten Lösungsansatzes, die metallischen Fasern durch Schmelzextraktion herzustellen, kann der Aluminiumgehalt auf bis zu 15 Prozent gesteigert werden.

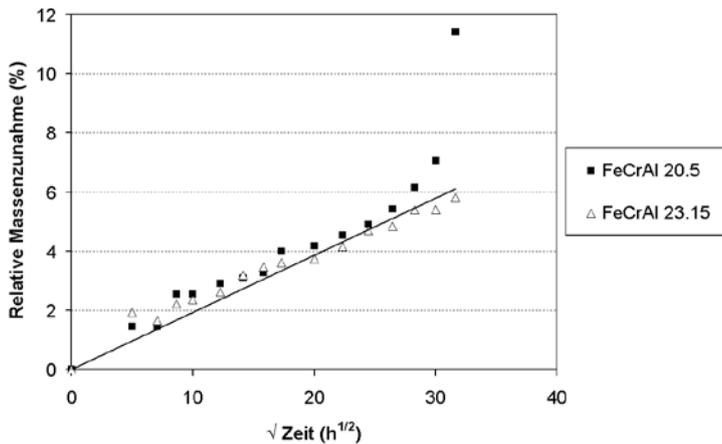


Abb. 4: Relative Massenzunahme bei 1000 °C an Luft für versinterte Faserstrukturen mit einer Porosität von 75 Prozent in Abhängigkeit von der Zeit und dem Aluminiumgehalt.

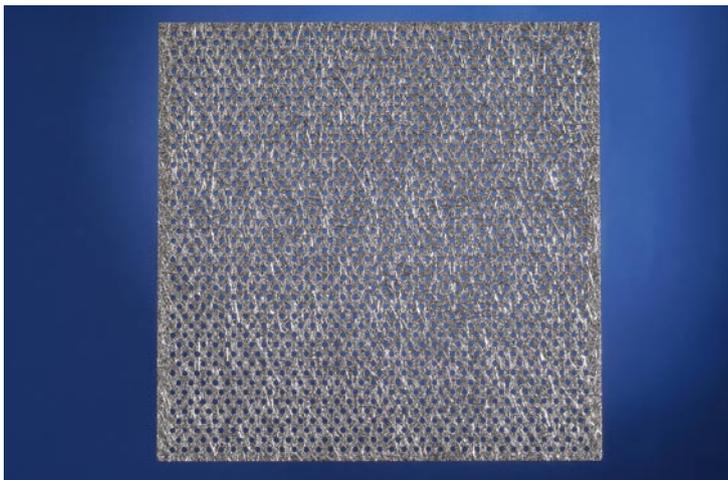


Abb. 5: Brennerplatte aus versinterten FeCrAl-Fasern.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse eines Oxidationstests an Luft bei 1000 °C von zwei versinterten Faserstrukturen mit unterschiedlichen Aluminiumgehalten dargestellt. Es wird deutlich, dass beide Proben mit derselben Geschwindigkeit oxidieren und die übliche parabolische Massenzunahme aufgrund des dabei gebundenen Sauerstoffs zeigen. Der Aluminiumvorrat der Probe mit 5 Gewichtsprozent Aluminium ist bereits nach 600 Stunden Auslagerungszeit erschöpft, und die Oxidationsgeschwindigkeit erhöht sich deutlich, sodass es kurz darauf zu katastrophalem Versagen kommt. Dagegen zeigt die Probe mit erhöhtem Aluminiumgehalt eine deutlich höhere Lebensdauer, die während der Auslagerungsdauer von 1000 Stunden noch nicht erreicht wird. Durch Extrapolation der Messung kann man für diese Probe eine deutlich erhöhte Lebensdauer von 2500 Stunden errechnen.

Neben der Entwicklung eines geeigneten Werkstoffs ist auch die Makroporosität entscheidend für die Funktionalität der Brennerplatte. Hierfür wurden geeignete Verfahren zur kostengünstigen Einbringung einer Vielzahl von Bohrungen in die Faserstruktur in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Pretec GmbH und proforma GmbH entwickelt. Mit Strahlverfahren werden pro Brennerplatte bis zu 800 Öffnungen mit einem Durchmesser von ca. einem Millimeter eingebracht (Abb. 5). Mit diesen Strukturen werden bereits jetzt Verbrennungseigenschaften erzielt, die weitgehend dem Stand der Technik entsprechen. Zurzeit werden Dauertests und Emissionsmessungen durchgeführt. Die Einführung in eine Kleinserie ist für 2009 geplant.

#### Ansprechpartner

Sekretariat inno.zellmet  
 Thomas Studnitzky  
 c/o Fraunhofer IFAM Dresden  
 Telefon +49 351 2537-339  
 E-Mail info@innozellmet.de  
 www.innozellmet.de

#### Institut

Fraunhofer-Institut für  
 Fertigungstechnik und  
 Angewandte Materialforschung IFAM,  
 Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe,  
 Dresden

#### Literatur

[1] O. Andersen, C. Kostmann, G. Stephani, G. Korb: Application-related properties of sintered metallic fiber structures. Cellular Metals and Metal Foaming Technology (MetFoam 2003), Berlin, Verlag MIT Publishing, Bremen, 2003, S. 481–486.

[2] U. Waag, L. Schneider, P. Löhman, G. Stephani: Metal Powder Report 55 (2000) 1, S. 29.

# Werkstoffentwicklung für Schäume auf Ni-Basis für Anwendungen in der Abgasnachbehandlung

## Ausgangssituation

Eine Reihe Nickel-basierter (z. B. Inconel®) und Eisen-basierter (z. B. Incoloy® oder FeCrAlloy®) Legierungen sind speziell für den Einsatz bei hohen Temperaturen in korrosiven Umgebungen entwickelt worden. Ein Teil dieser Anwendungen, wie z. B. Dieselpartikelfilter (DPF), Wärmetauscher und Katalysatorträger, benötigt offenzellige poröse Strukturen mit speziell auf die Bedingungen angepassten Materialeigenschaften. Diese Anforderungen werden durch hochtemperatur- und korrosionsbeständige metallische Schäume der oben genannten Legierungsklassen realisiert. Grundlage der dazu entwickelten Technologie ist ein Nickelmetallschaum, welcher kommerziell in großen Mengen verfügbar ist und hauptsächlich für den Batteriemarkt hergestellt wird. Das am IFAM Dresden entwickelte Verfahren ermöglicht, den Nickelschaum in hochtemperaturbeständige Materialien umzuwandeln, indem dieser mit einem hochlegierten Metallpulver beschichtet und anschließend wärmebehandelt wird (Abb. 1). Dabei erfolgen eine Versinterung der Pulverteilchen mit den Schaumstegen und ein Konzentrationsausgleich der Legierungselemente durch Diffusion, sodass im Ergebnis des Fertigungsprozesses ein homogener hochtemperaturbeständiger Metallschaum vorliegt.

## Aufgabe

Die zunächst auf Basis von Inconel® 625 gefertigten Schäume zeigten bereits eine hohe Oxidationsbeständigkeit bei Temperaturen bis 800 °C und eine ausgezeichnete Resistenz gegen Schwefelsäure. Der erfolgreiche Test erster Prototypen und das hohe Kundeninteresse motivierten zur weiteren Intensivierung der Entwicklungsarbeiten, brachten aber auch neue Herausforderungen mit sich. Für die Anwendung als DPF oder Dieseloxydationskatalysator (DOC) wird auf das Trägermaterial eine katalytisch wirksamen Schicht (Washcoat) aufgebracht, welche die Rußverbrennungstemperatur verringert und die Effizienz der Gasumwandlung (z. B. CO in CO<sub>2</sub>) erhöht. Dabei muss die Aktivität des Washcoat über die gesamte Lebensdauer des Filters bzw. Katalysators erhalten bleiben. Elemente wie z. B. Chrom können jedoch bei erhöhten Temperaturen aus dem Metallschaum in

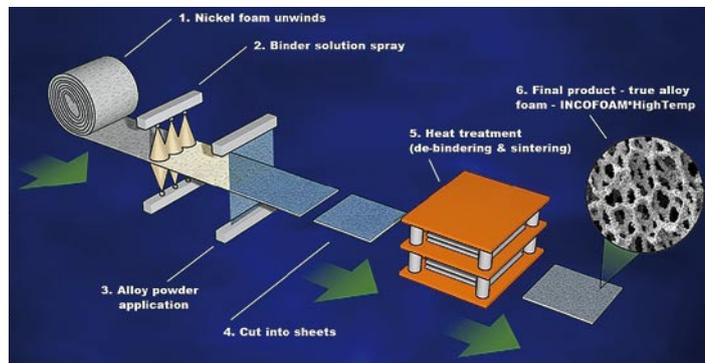


Abb. 1: Technologie zur Herstellung von hochtemperaturbeständigen Schäumen (INCOFOAM®HighTemp) aus kommerziell gefertigten Nickelschäumen (INCOFOAM®) durch einen Beschichtungs- und Wärmebehandlungsprozess.

den Washcoat diffundieren und lassen ihn altern, sodass die katalytische Aktivität mit zunehmender Betriebsdauer abnimmt. Daraus resultierte die Aufgabe, eine Legierung zu entwickeln, welche in der Lage ist, eine Diffusionsbarriere an der Oberfläche auszubilden, und insbesondere die Chrommigration vom Trägermaterial in den Washcoat verhindert. Als solche Barriere kommt z. B. eine  $\alpha$ -Aluminiumoxidschicht in Betracht. Diese könnte durch Oxidation im Anschluss an den Sinterprozess ausgebildet werden. Voraussetzung dafür ist ein ausreichender Aluminiumgehalt in der Legierung.

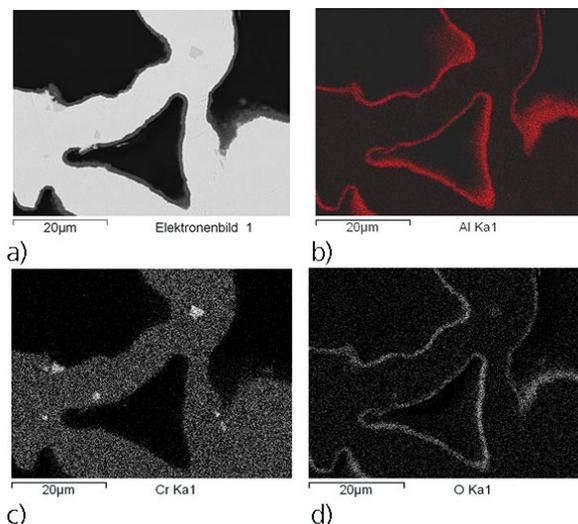
## Ergebnis

Auf Basis bekannter Aluminiumoxidbildner wie FeCrAlloy® wurde eine auf den Nickelschaum zugeschnittene FeNiCrAl-Legierung entwickelt, wobei der Nickelgehalt, welcher hauptsächlich vom Schaumsubstrat stammt, die Ausbildung einer  $\gamma$ -Matrix bewirkt und damit die Duktilität sowie die Umformbarkeit des legierten Schaums positiv beeinflusst. Die Prozessparameter zur Legierung des Schaums (insbesondere die Sinterbedingungen) für diese neue Legierung wurden erfolgreich optimiert. Nun bestand die Herausforderung darin, derartige Oxidationsbedingungen zu schaffen, dass sich ausschließlich eine homogene Aluminiumoxidschicht ausbildet, ohne dass die mechanischen Eigenschaften signifikant beeinträchtigt werden. Während FeCrAl-Legierungen mit  $\alpha$ -Matrix bekanntlich an Luft bei Temperaturen oberhalb 900 °C eine Aluminiumoxidschicht ausbilden, ist die Diffusionsgeschwindigkeit des Aluminiums

in der  $\gamma$ -Matrix der FeNiCrAl-Legierung wesentlich geringer, sodass sich Mischoxide, vor allem aber Chromoxid, bilden. Zudem verursacht der hohe Stickstoffanteil der Luft die Bildung von Aluminiumnitrid, welches zu einem Duktilitätsverlust des Materials führt. Insbesondere die Verarmung von Aluminium wirkt sich nachteilig auf die Bildung einer wirksamen Diffusionsbarriere aus.

Zur Lösung des Problems wurden die Sauerstoffpartialdrücke der möglichen Metalloxidgleichgewichte im FeNiCrAl-System betrachtet. Daraus lässt sich ableiten, dass z. B. bei Temperaturen  $>1000\text{ }^\circ\text{C}$  und bei Sauerstoffpartialdrücken von  $<10^{-21}$  bar die Bildung von Fe-, Ni- und Cr-Oxiden unterdrückt wird, während sich reines Aluminiumoxid ausbilden kann (Abb. 2).

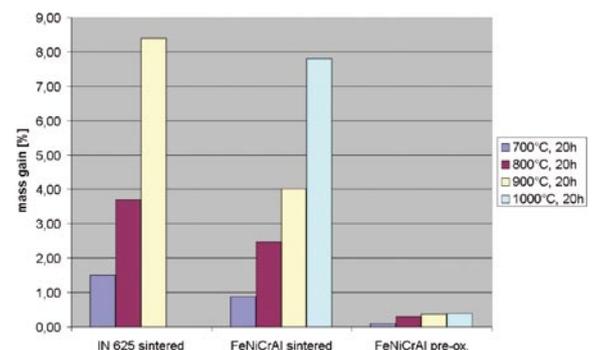
Mit zunehmender Temperatur verschieben sich die Gleichgewichte zu höheren Partialdrücken. Auf Basis dieser Erkenntnis wurden Oxidationsversuche unter stickstofffreien, inerten und reduzierenden Atmosphären mit entsprechend niedrigen Sauerstoffpartialdrücken durchgeführt. Zur Charakterisierung der Qualität der Schichten wurden die voroxidierten Schäume zunächst an Luft ausgelagert und die Massezuwächse ermittelt. Je homogener die Aluminiumoxidschicht ausgebildet ist, desto geringer ist die durch Oxidation zu erwartende Massezunahme, da die Sauerstoffdiffusion ins Materialinnere durch die Oberflächenpassivierung behindert wird. Von einer derartig



**Abb. 2:** Elementverteilung (EDX mappings) einer nach dem neuen Verfahren voroxidierten und anschließend 20 Stunden lang bei 1000 °C unter Luft gealterten Probe mit homogener Aluminiumoxidschicht: a) BSE-Bild, b) Aluminium, c) Chrom, d) Sauerstoff.

ausgebildeten Passivierungsschicht ist auch eine effektive Verminderung der Chromdiffusion zu erwarten. Das wurde durch Untersuchungen an mit Washcoat beschichteten und anschließend gealterten Proben bestätigt. Es konnten weder Chrom im Washcoat noch signifikanter Abfall der Washcoat-Aktivität in sogenannten »CO-Light-Off«-Tests nachgewiesen werden. Dabei wird die Temperatur ermittelt, bei der 50 Prozent des CO zu CO<sub>2</sub> umgewandelt werden. Diese sollte möglichst niedrig sein, damit auch im kalten Abgasstrang die Effizienz möglichst hoch ist. Während sich die »Light-Off«-Temperatur bisher über die Lebensdauer um bis zu 100 K erhöhte, beträgt die Temperaturdifferenz mit Voroxidation nach dem neuen Verfahren nur noch  $<15\text{ K}$ . Damit wurde das wichtigste Ziel erreicht, wobei sich noch weitere Vorteile für die Materialeigenschaften ergaben.

Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt die Massezunahmen nach Auslagerung von Schaumproben aus der neuen FeNiCrAl-Legierung im gesinterten und voroxidierten Zustand im Vergleich zum Schaum aus Inconel® 625 bei Temperaturen von 700–1000 °C an Luft. Die neu entwickelte aluminiumhaltige Legierung zeigt bereits im Sinterzustand gegenüber Inconel® bei Temperaturen  $>900\text{ }^\circ\text{C}$  eine wesentlich geringere Massezunahme, d. h. höhere Oxidationsbeständigkeit, die auf die Ausbildung einer Aluminiumoxidschicht zurückzuführen ist. Die Inconel®-Legierung enthält kein Aluminium. Deren Oxidationsbeständigkeit wird nur durch eine Schutzschicht aus Chromoxid gewährleistet, die jedoch oberhalb 900 °C nicht mehr stabil ist, sodass bei 1000 °C das Material schließlich vollständig zerstört wird. Durch Voroxi-



**Abb. 3:** Vergleich der Massezunahme von Inconel® 625 (IN 625) und der FeNiCrAl-Legierung in gesintertem und voroxidiertem Zustand (Bemerkung: kein Messwert für IN 625 bei 1000 °C, da komplett zerstört durch Oxidation).

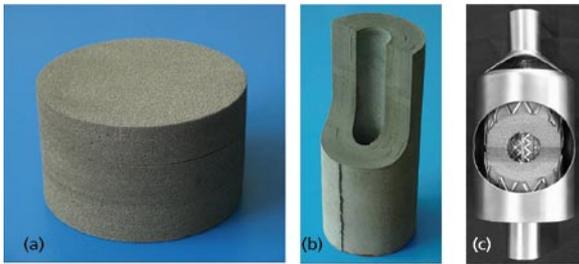


Abb. 4: Designs für Dieselpartikelfilter: a) Axialfilter, b) Radialfilter aus gewickelten Schaumlagen, c) gekapselter Filter.

dition nach dem neu entwickelten Verfahren wird die Oxidationsbeständigkeit der FeNiCrAl-Legierung auf mehr als das 20-fache verbessert. Derzeit läuft die Schaumfertigung auf Basis der am Fraunhofer IFAM Dresden entwickelten Technologie im Rahmen einer Pilotanlage. Dazu haben die Süd-Chemie AG, ein führender Hersteller von Katalysatoren, und Inco ECM GmbH, ein Tochterunternehmen des führenden Anbieters von Nickel und Nickelspezialprodukten CVRD Inco Limited, ein Joint Venture gegründet, das den Namen Alantum trägt. Der derzeitige Entwicklungsschwerpunkt liegt auf Dieselpartikelfiltern und Dieseloxydationskatalysatoren. Prototypen mit unterschiedlichem Design wie in Abbildung 4 dargestellt, befinden sich derzeit auf dem Teststand.

Hervorzuheben ist die hohe Designflexibilität aufgrund des in einem weiten Porengrößenbereich verfügbaren Schaummaterials. Durch Kombination verschiedener Schaumqualitäten kann der Druckverlust minimiert werden. Ein 2,5-Liter-Rußpartikelfilter aus Schäumen mit gradierter Porosität hat einen geringeren Druckverlust als ein SiC-Filter mit 4 Liter Volumen (Abb. 5). Ein weiterer Vorteil besteht zum Beispiel in der hohen katalytischen Effizienz als Dieseloxydationskatalysator. Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt deutlich, dass die Emission von Kohlenwasserstoffen beim Einsatz eines Schaum-DOC mit nur ca. 30 Prozent des Volumens eines konventionellen Cordierit-Katalysators vergleichbar ist. Die Ursache liegt in der im Vergleich zu stranggepressten keramischen Strukturen höheren spezifischen Oberfläche und der Erzeugung einer turbulenten Strömung beim Schaummaterial, was zu intensiverem Kontakt des Washcoat mit dem Abgas führt. Die Verringerung von bis zu 70 Prozent Volumen spart nicht nur Bauraum, sondern auch Kosten, da eine entspre-

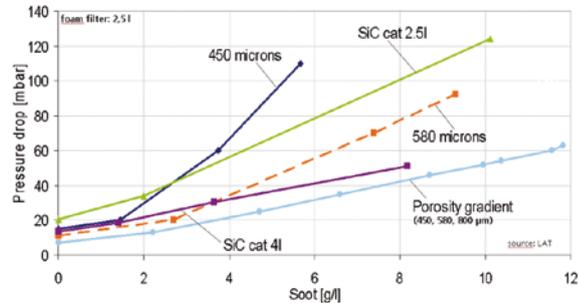


Abb. 5: Druckverlust in Abhängigkeit von der Rußbelastung von Filtern aus Schaummaterial im Vergleich zu kommerziellen SiC-Filtern (Motordrehzahl: 1700 RPM, Quelle: LAT, Thessaloniki).

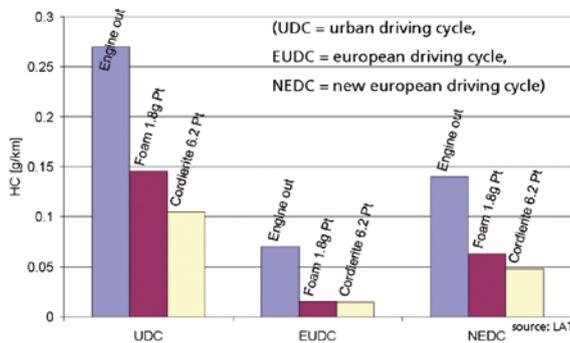


Abb. 6: Vergleich der Kohlenwasserstoffemission ohne Dieseloxydationskatalysator (DOC), mit Schaum-DOC und kommerziellem Cordierit-DOC mit dreifachem Volumen des Schaumkatalysators.

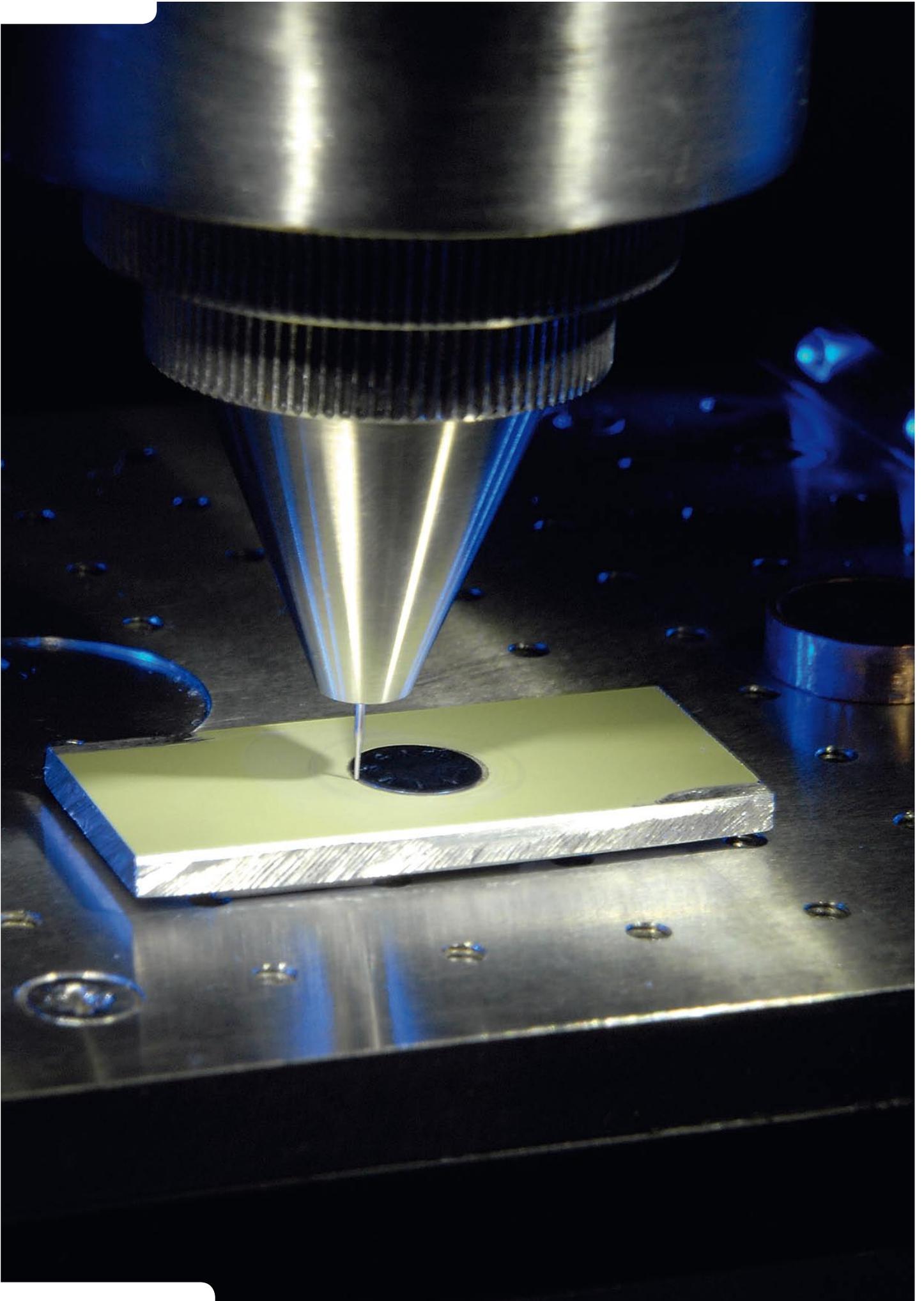
chend geringere Menge an Platin benötigt wird, welches der Washcoat enthält. Das aufgrund der herausragenden Materialeigenschaften große Interesse der Automobil- und Zulieferindustrie bestätigt das hervorragende Anwendungspotenzial der entwickelten hochtemperaturbeständigen Schäume. Material und Bauteildesign werden kundenspezifisch weiterentwickelt. Das Fraunhofer IFAM Dresden gewährleistet dazu im engen Kontakt mit Anwendern eine kontinuierliche Materialoptimierung und -anpassung für den jeweiligen Einsatzfall.

**Auftraggeber**  
CVRD INCO Limited, Kanada

**Ansprechpartner**  
Gunnar Walther  
Telefon: +49 351 2537-340  
E-Mail: [gunnar.walther@ifam-dd.fraunhofer.de](mailto:gunnar.walther@ifam-dd.fraunhofer.de)

Burghardt Klöden  
Telefon: +49 351 2537-384  
E-Mail: [burghardt.kloeden@ifam-dd.fraunhofer.de](mailto:burghardt.kloeden@ifam-dd.fraunhofer.de)

**Institut**  
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe, Dresden



# Bereich Klebtechnik und Oberflächen

Ergebnisse Anwendungen Perspektiven



Raster-Kelvin-Sonde.

## Kompetenzen und Know-how

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung – Institutsteil Klebtechnik und Oberflächen – ist die europaweit größte unabhängige Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der industriellen Klebtechnik. Mehr als 130 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bearbeiten hier industrienah Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zur Kleb- und Oberflächentechnik. Die Aktivitäten reichen von der Grundlagenforschung bis hin zur technischen Umsetzung und Markteinführung neuer Produkte. Industrielle Einsatzfelder sind überwiegend der Fahrzeug- und Anlagenbau, die Energietechnik mit dem Schwerpunkt Wind- und Solarenergie, die Mikrofertigung sowie die Verpackungs- und Elektroindustrie.

Der Arbeitsbereich Klebtechnik befasst sich mit der Entwicklung und Charakterisierung von Klebstoffen, mit der beanspruchungsgerechten konstruktiven Auslegung und Simulation von Kleb- und Hybridverbindungen sowie deren Charakterisierung, Prüfung und Qualifizierung. Planung und Automatisierung ihrer industriellen Fertigung ergänzen diese Arbeiten. Einen weiteren Schwerpunkt bilden Prozess-Reviews und zertifizierende Weiterbildungen in der Klebtechnik. Der Arbeitsbereich Oberflächen gliedert sich in die Gebiete Plasmatechnik und Lacktechnik. Maßgeschneiderte Oberflächenmodifizierungen – beispielsweise kleb- und beschichtungsgerechte Oberflächenvorbehandlungen oder korrosionsschützende Beschichtungen – erweitern das industrielle Einsatzspektrum vieler Werkstoffe deutlich oder machen deren technische Verwendung überhaupt erst möglich.

Ein von beiden Bereichen bearbeitetes Feld ist die Oberflächen- und Grenzflächenanalytik. Das dort erlangte Basiswissen trägt zur Sicherheit und Zuverlässigkeit von Klebverbindungen und Beschichtungen bei.

Der Institutsteil Klebtechnik und Oberflächen ist nach DIN EN ISO 9001:2000 zertifiziert, das Werkstoffprüflabor zusätzlich nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditiert. Das Klebtechnische Zentrum ist über DVS-PersZert® nach DIN EN ISO/IEC 17024 als akkreditierte Personalqualifizierungsstelle für die klebtechnische Weiterbildung international anerkannt. Das Kunststoff-Kompetenzzentrum ist gemäß der Anerkennungs- und

Zulassungsverordnung – Weiterbildung (AZWV) zugelassen. Die »Anerkannte Stelle« für das Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen ist nach DIN 6701-2 und partiell nach DIN EN 45012:1998 durch das EBA akkreditiert.

### Perspektiven

Die Industrie stellt an die Prozesssicherheit bei der Einführung neuer Technologien sowie der Modifizierung bereits genutzter Technologien hohe Anforderungen. Sie sind für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Institutsteil Klebtechnik und Oberflächen maßgebend und richtungweisend. Gemeinsam mit den Auftraggebern werden innovative Produkte entwickelt, die anschließend von den Unternehmen erfolgreich auf den Markt gebracht werden. Die Fertigungstechniken spielen dabei eine immer wichtigere Rolle, weil die hohe Qualität und Reproduzierbarkeit der Fertigungsprozesse wesentliche Voraussetzungen für den Markterfolg sind.

So ist die Klebtechnik im gesamten Fahrzeugbau eine schon länger eingeführte Technologie, deren Potenzial jedoch noch nicht voll ausgeschöpft wird. Leichtbau für den ressourcenschonenden Transport, Recycling und die damit verbundene Frage nach einer gezielten Lösbarkeit von Klebverbindungen sowie der Einsatz von nanoskaligen Materialien bei der Klebstoffentwicklung und -modifizierung sind nur einige Beispiele für die breit gefächerten Tätigkeiten des Instituts. Um weitere Branchen für die Klebtechnik zu gewinnen, gilt für alle Arbeiten der Anspruch:

### **Der Prozess Kleben beziehungsweise das geklebte Produkt soll noch sicherer werden!**

Dieses Ziel lässt sich nur erreichen, wenn alle Stufen der klebtechnischen Fertigung bei der Herstellung von Produkten zusammengefasst und einer ganzheitlichen Betrachtung unterzogen werden.

**Dazu gehören:**

- Anwendungsspezifische Klebstoffauswahl und -qualifizierung, ggf. -modifizierung
- Klebgerechte Gestaltung und Auslegung von Strukturen mit numerischen Methoden (z. B. FEM)
- Vorbehandlung der Oberflächen und Erarbeitung von Korrosionsschutzkonzepten
- Entwicklung klebtechnischer Fertigungsschritte mittels Simulation und Integration in den Fertigungsablauf der Produkte
- Auswahl und Dimensionierung der Applikationseinrichtungen
- Klebtechnische Personalqualifizierung aller, die an der Entwicklung und Fertigung von Produkten beteiligt sind

In allen Bereichen setzt das IFAM verstärkt auf rechnergestützte Methoden. Beispielhaft sind hier die Digitalisierung von Prozessen im Bereich der Fertigungsplanung und die Multiskalen-Simulation von der Molekular-Dynamik in molekularen Dimensionen bis hin zu makroskopischen Finite-Element-Methoden bei der numerischen Beschreibung von Werkstoffen und Bauteilen. Verschiedene spektroskopische, mikroskopische und elektrochemische Verfahren geben einen Einblick in die Vorgänge bei der Degradation und Korrosion von Werkstoffverbunden. Mit diesen »instrumentierten Prüfungen« und begleitenden Simulationsrechnungen werden im IFAM Erkenntnisse gewonnen, die empirische Testverfahren auf der Basis von standardisierten Alterungs- und Korrosionstests nicht bieten.

Weitere wichtige Fragestellungen für die Zukunft lauten: Wo und wie wird in der Natur geklebt? Was können wir daraus für die industrielle Klebtechnik lernen? Untersucht wird bereits der Weg von der Bioadhäsion auf molekularer Ebene bis zu makroskopischen Klebstoffen aus Proteinen. Der Anspruch, Prozesse und Produkte noch sicherer zu machen, wird jedoch nicht nur auf die Klebtechnik beschränkt. Er gilt genauso für die Plasma- und Oberflächentechnik. Branchen mit hohen Ansprüchen an die Oberflächentechnik greifen auf das hohe technologische Niveau des Instituts zurück. Deshalb zählen auf diesem Gebiet namhafte Unternehmen insbesondere aus dem Flugzeug- und Automobilbau zu den Auftraggebern.

**Arbeitsschwerpunkte**

- Formulierung und Erprobung neuer Polymere für Klebstoffe, Laminier-/Gießharze, bis hin zur industriellen Einführung
- Entwicklung von Zusatzstoffen (Nanofüllstoffen, Initiatoren etc.) für Klebstoffe
- Synthese von Polymeren mit Überstruktur und Biopolymeren
- Computergestützte Materialentwicklung mit quanten- und molekularmechanischen Methoden
- Internationalisierung der Lehrgänge zum/zur Klebpraktiker/-in, Klebfachkraft, European Adhesive Engineer (Klebfachingenieur/-in)
- Fertigungstechnik
- Entwicklung innovativer Verbindungskonzepte z. B. für den Fahrzeugbau (Kleben, Hybridfügen)
- Applikation von Kleb-/Dichtstoffen, Vergussmassen (Mischen, Dosieren, Auftragen)
- Kleben in der Mikrofertigung (z. B. Elektronik, Optik, Adaptronik)
- Rechnergestützte Fertigungsplanung
- Ökonomische Aspekte der Kleb-/Hybridfügetechnik
- Konstruktive Gestaltung geklebter Strukturen (Simulation des mechanischen Verhaltens geklebter Verbindungen und Bauteile mithilfe der Methode der Finiten Elemente, Prototypenbau)
- Entwicklung von umweltverträglichen Vorbehandlungsverfahren für das langzeitbeständige Verkleben von Kunststoffen und Metallen
- Funktionelle Beschichtungen durch Plasmaverfahren
- Qualifizierung von Beschichtungsstoffen und Lackierverfahren
- Entwicklung von Lackrezepturen für Spezialanwendungen
- Kennwertermittlung, Schwing- und Betriebsfestigkeit von Kleb- und Hybridverbindungen
- Werkstoffmodellgesetze für Klebstoffe und polymere Werkstoffe (quasi-statisch und Crash)
- Bewertung von Alterungs- und Degradationsvorgängen in Materialverbunden
- Elektrochemische Analytik
- Bewertung und Entwicklung neuer Korrosionsschutzsysteme
- Analyse klebtechnischer Entwicklungs- und Fertigungsprozesse

# Arbeitsgebiete und Ansprechpartner

## Institutsleitung Dr.-Ing. Helmut Schäfer

### Klebtechnik

Dr.-Ing. Helmut Schäfer  
Telefon: +49 421 2246-401  
E-Mail [helmut.schaefer@ifam.fraunhofer.de](mailto:helmut.schaefer@ifam.fraunhofer.de)

**Klebstoffe und Polymerchemie**  
Entwicklung und Charakterisierung von Polymeren; Nanokomposite; Netzwerkpolymere; Formulierung von Klebstoffen und Funktionspolymeren; chemische und physikalische Analytik.

Dr. Andreas Hartwig  
Telefon: +49 421 2246-470  
E-Mail [andreas.hartwig@ifam.fraunhofer.de](mailto:andreas.hartwig@ifam.fraunhofer.de)

### Biomolekulares Oberflächen- und Materialdesign

Peptid- und Proteinchemie; Strukturaufklärung von Proteinen an Oberflächen und in Lösungen; marine Proteinklebstoffe.

Dr. Klaus Rischka  
Telefon: +49 421 2246-482  
E-Mail [klaus.rischka@ifam.fraunhofer.de](mailto:klaus.rischka@ifam.fraunhofer.de)

### Klebtechnische Fertigung

Fertigungsplanung; Dosier- und Auftragstechnik; Automatisierung; Hybridfügen; Fertigung von Prototypen; Auswahl, Charakterisierung, Qualifizierung von Kleb-, Dicht- und Beschichtungsstoffen; Schadensanalyse.

Dipl.-Ing. Manfred Peschka  
Telefon: +49 421 2246-524  
E-Mail [manfred.peschka@ifam.fraunhofer.de](mailto:manfred.peschka@ifam.fraunhofer.de)

### Kleben in der Mikrofertigung

Elektrisch/optisch leitfähige Kontaktierungen; adaptive Mikrosysteme; Dosieren kleinster Mengen; Eigenschaften von Polymeren in dünnen Schichten; Fertigungskonzepte.

Dipl.-Ing. Manfred Peschka  
Telefon: +49 421 2246-524  
E-Mail [manfred.peschka@ifam.fraunhofer.de](mailto:manfred.peschka@ifam.fraunhofer.de)

### Werkstoffe und Bauweisen

Werkstoff- und Bauteilprüfung; Faserverbundbauteile; Leicht- und Mischbauweisen; Auslegung von strukturellen Klebverbindungen.

Dr. Markus Brede  
Telefon: +49 421 2246-476  
E-Mail [markus.brede@ifam.fraunhofer.de](mailto:markus.brede@ifam.fraunhofer.de)

### Weiterbildung/Technologietransfer

Qualifizierung zum/zur Klebpraktiker/-in, Klebfachkraft, Adhesive Bonding Engineer (Klebfachingenieur/-in) mit europaweit anerkannten DVS®-EWF-Zeugnissen; Inhouse-Lehrgänge; Beratung; Fertigungsqualifizierung; Studien; Arbeits- und Umweltschutz.

Prof. Dr. Andreas Groß  
Telefon: +49 421 2246-437  
E-Mail [andreas.gross@ifam.fraunhofer.de](mailto:andreas.gross@ifam.fraunhofer.de)

### Prozess-Reviews

Analysen von Entwicklungs- und/oder Fertigungsprozessen unter klebtechnischen Aspekten und unter Berücksichtigung der Richtlinie DVS® 3310; Prozess- und Schnittstellen; Design; Produkt; Nachweis der Gebrauchssicherheit; Dokumente; Fertigungsumgebung.

Dr. Dirk Niermann  
Telefon: +49 421 2246-439  
E-Mail [dirk.niermann@ifam.fraunhofer.de](mailto:dirk.niermann@ifam.fraunhofer.de)

### Oberflächentechnik

Dr. Alfred Baalman  
Telefon: +49 421 2246-473  
E-Mail [alfred.baalman@ifam.fraunhofer.de](mailto:alfred.baalman@ifam.fraunhofer.de)

### Niederdruck-Plasmatechnik

Oberflächenmodifizierung (Reinigung, Aktivierung für z. B. Verkleben, Bedrucken, Lackieren) und Funktionsschichten (z. B. Haftvermittlung, Korrosionsschutz, Kratzschutz, Easy-to-clean, Trennschicht, Permeationsbarriere) für 3-D-Teile, Schüttgut, Bahnware; Anlagenkonzepte und Pilotanlagenbau.

Dr. Klaus Vissing  
Telefon: +49 421 2246-428  
E-Mail [klaus.vissing@ifam.fraunhofer.de](mailto:klaus.vissing@ifam.fraunhofer.de)

### Atmosphärendruck-Plasmatechnik

Oberflächenmodifizierung (Reinigung, Aktivierung für z. B. Verkleben, Bedrucken, Lackieren) und Funktionsschichten für Inline-Anwendungen bei 3-D-Teilen, Bahnware.

Dr. Uwe Lommatzsch  
Telefon: +49 421 2246-456  
E-Mail [uwe.lommatzsch@ifam.fraunhofer.de](mailto:uwe.lommatzsch@ifam.fraunhofer.de)

### Lacktechnik

Prüfung und Beratung auf dem Gebiet der Farben, Lacke und Beschichtungsstoffe; Charakterisierung und Qualifizierung von Lacksystemen; Farbmanagement.

Dr. Volkmar Stenzel  
Telefon: +49 421 2246-407  
E-Mail [volkmar.stenzel@ifam.fraunhofer.de](mailto:volkmar.stenzel@ifam.fraunhofer.de)

### Adhäsions- und Grenzflächenforschung

Dr. Stefan Dieckhoff  
Telefon: +49 421 2246-469  
E-Mail [stefan.dieckhoff@ifam.fraunhofer.de](mailto:stefan.dieckhoff@ifam.fraunhofer.de)

### Angewandte Oberflächen- und Schichtanalytik

Oberflächen-, Grenzflächen-, Schichtanalytik; Untersuchung von Adhäsions-, Trenn- und Degradationsmechanismen; Analyse reaktiver Wechselwirkungen an Werkstoffoberflächen; Schadensanalyse; Mikrotribologie.

Dr. Ralph Wilken  
Telefon: +49 421 2246-448  
E-Mail [ralph.wilken@ifam.fraunhofer.de](mailto:ralph.wilken@ifam.fraunhofer.de)

### Elektrochemie

Korrosion an metallischen Werkstoffen, unter Beschichtungen und in Klebverbindungen; Untersuchung von Anodisierschichten; elektrolytische Metallabscheidung.

Dr.-Ing. Peter Plagemann  
Telefon: +49 421 2246-530  
E-Mail [peter.plagemann@ifam.fraunhofer.de](mailto:peter.plagemann@ifam.fraunhofer.de)

### Applied Computational Chemistry

Modellierung molekularer Mechanismen bei Adhäsions- und Degradationsphänomenen; Strukturbildung an Grenzflächen; Anreicherungs- und Transportprozesse in Klebstoffen und Beschichtungen.

Dr. Peter Schiffels  
Telefon: +49 421 2246-567  
E-Mail [peter.schiffels@ifam.fraunhofer.de](mailto:peter.schiffels@ifam.fraunhofer.de)

### Dienstleistungszentren

#### Klebtechnisches Zentrum

Prof. Dr. Andreas Groß  
Telefon: +49 421 2246-437  
E-Mail [andreas.gross@ifam.fraunhofer.de](mailto:andreas.gross@ifam.fraunhofer.de)  
Internet [www.kleben-in-bremen.de](http://www.kleben-in-bremen.de)

#### Technologiebroker

Dr.-Ing. Helmut Schäfer  
Telefon: +49 421 2246-401  
E-Mail [helmut.schaefer@ifam.fraunhofer.de](mailto:helmut.schaefer@ifam.fraunhofer.de)

#### Anerkannte Stelle nach DIN 6701-2

Dr. Dirk Niermann  
Telefon: +49 421 2246-439  
E-Mail [dirk.niermann@ifam.fraunhofer.de](mailto:dirk.niermann@ifam.fraunhofer.de)

# Ausstattung

## Bereich Klebtechnik und Oberflächen

- Niederdruck-Plasmaanlagen für 3-D-Teile, Schüttgut und Bahnware bis 3 m<sup>3</sup> (HF, MW)
- Atmosphärendruck-Plasmaanlagen für 3-D-Teile und Bahnware
- Robotergeführte Atmosphärendruck-Plasmaanlage (6-achsig) zur flächigen und Linienbehandlung und -beschichtung
- Laserscanner zur 3-D-Vermessung von Bauteilen bis 3500 mm
- Universalprüfmaschinen bis 400 kN
- Anlagen zur Werkstoff- und Bauteilprüfung für hohe Belastungs- und Verformungsgeschwindigkeiten bei ein- und mehrachsigen Spannungszuständen
- All-Electric Labornietautomat mit halbautomatischer Installation von ein- und zweiteiligen Verbindungselementen, C-Bügel-Bauweise mit 1,5 m Rahmentiefe, max. Stauchkraft: 70 kN, Bohrspindel für Drehzahlen bis 18000 U/min und Bohrinnenschmierung sowie Hochgeschwindigkeitsarbeitsraumüberwachung
- Labor-Vakuumpresse mit PC-Steuerung zur Herstellung von Multilayer-Prototypen
- 300-kV- und 200-kV-Transmissionselektronenmikroskope mit EDX, EELS und 3-D-Tomograph
- Oberflächenanalytiksysteme und Polymeranalytik mit ESCA, UPS, ToF-SIMS, AES und AFM
- Chromatographie (GC-MS, Headspace, Thermodesorption, HPLC)
- Thermoanalyse (DSC, modulierte DSC, DMA, TMA, TGA, Torsionspendel)
- MALDI-TOF-MS zur Proteincharakterisierung
- Peptidsyntheseautomat
- Lichtstreuung zur Charakterisierung trüber Dispersionen
- Spektroskopisches Ellipsometer
- LIBS (Laserinduced Breakdown Spectroscopy)
- Technikum für organische Synthese
- IR-, Raman-, UV-VIS-Spektrometer
- IR-VCD-Spektrometer (Infrared Vibrational Dichroism)
- Rheologie (Rheolyst AR 1000 N, ARES – Advanced Rheometric Expansion System)
- Wärmeleitfähigkeitsmesseinrichtung
- Dielektrimeter
- Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und Rauschanalyse (ENA)
- Doppelschnecken-Extruder (25/48D) und Knetzer zum Einarbeiten von Füllstoffen in Polymere
- Einschnecken-Messextruder (19/25D) zur



Transmissionselektronenmikroskop.

- Charakterisierung der Verarbeitungseigenschaften von Polymerkompositen
- 12-achsiger Roboter zur Fertigung von Mikroklebverbindungen
- Linux PC-Cluster mit 64 CPUs
- Wave Scan DOI
- Farbmessgerät MA 68 II
- Labordissolver
- Haze Gloss
- Lackapplikationsautomat
- Lacktrockner mit entfeuchteter Luft
- Prüfringleitung für Lackbelastungstests
- Vollklimatisierte Lackierkabine
- Raster-Kelvin-Sonde
- 6-Achsen-Industrieroboter, 125 kg Traglast, auf zusätzlicher Linearachse, 3000 mm
- Einkomponenten-Kolbendosiersystem SCA SYS 3000/Sys 300 Air
- Einkomponenten/Zweikomponenten-Zahnraddosiersystem t-s-i, umrüstbar auf Exzenter-schneckenpumpen
- Materialzuführungen, von 320-ml-Eurokartusche bis 200-l-Fass, beliebig mit dem t-s-i-Dosiersystem kombinierbar
- PUR-Hotmeltdosierer für wahlweise Raupen- oder Swirlapplikation aus 320-ml-Eurokartusche (Eigenentwicklung)
- Fluoreszenzmikroskop

## Ökonomische Aspekte der Klebtechnik transparent gemacht: Was kostet das Kleben?

Das Kleben hat sich allgemein als qualitativ hochwertige Füge-technik durchgesetzt. Auch Branchen und Industriebereiche, für die bislang andere Verbindungsarten näherlagen, interessieren sich zunehmend für die flexiblen und vielfältigen Möglichkeiten der Klebtechnik. Doch das Kleben ist auch eine besondere Füge-technik: Sie unterscheidet sich von bewährten Methoden wie Nieten, Löten oder Schweißen durch völlig anders geartete, komplexere Prozesse und Qualitätssicherungsverfahren. Wenn das Kleben eine andere Füge-technik ablösen oder ergänzen soll, sind oftmals bedeutende Investitionen in Mensch und Maschine notwendig. Unternehmen – vor allem solche, die bislang wenig oder keine Erfahrungen mit der Klebtechnik gemacht haben – stellen daher berechtigterweise die Frage, was die Einführung klebtechnischer Lösungen kostet.

In den vergangenen Jahren wurden im Fraunhofer IFAM Werkzeuge und Methoden entwickelt, um die ökonomischen Aspekte von klebtechnischen Projekten strukturiert und transparent darzustellen. In Machbarkeitsstudien kann nicht nur die technische Realisierbarkeit eines klebtechnischen Prozesses nachgewiesen, sondern auch der zu erwartende finanzielle Aufwand für verschiedene Lösungsvarianten herausgearbeitet werden. Die Frage nach den Kosten, die eine Anwendung der Klebtechnik verursacht, kann in beliebiger Tiefe beantwortet werden.

Am Einsatz der Klebtechnik interessierte Unternehmen benötigen in der Regel Entscheidungshilfen, bevor sie neue Herstellungsprozesse implementieren und die dafür notwendigen Geräte anschaffen. Bei allen Vorzügen, die die Klebtechnik hat, muss sie sich nicht nur technisch, sondern auch von den Kosten her gegenüber anderen Füge-techniken behaupten. Ist die Entscheidung für den Einsatz des Klebens gefallen, sind oft mehrere Herstellungsvarianten machbar. Alle wichtigen Aspekte der unterschiedlichen Möglichkeiten technisch und ökonomisch zu vergleichen und anschaulich darzustellen, ist eine der grundlegenden und wichtigen Dienstleistungen des Instituts. Dabei ist eine erste, einfache Berechnung als Teil einer technischen Aufgabenbearbeitung ebenso möglich wie eine umfassende ökonomische Projektanalyse mit der detaillierten Berechnung aller relevanten Schritte.

### Anforderungsliste führt zu einem ersten Grobkonzept

Ökonomische Vorteile ergeben sich für Anwender der Klebtechnik nicht automatisch dadurch, dass die bisherige Füge-technik durch eine andere ersetzt wird. Um alle Vorzüge des Klebens – auch wirtschaftliche – auszuschöpfen, ist ein angepasstes Design von Produkt und Prozess notwendig. Um die verschiedenen Möglichkeiten der Realisierung darzustellen, ist eine Situationsanalyse beim Kunden notwendig. Auf der Basis einer Anforderungsliste lässt sich zunächst ein Grobkonzept der klebtechnischen Fertigung erstellen. Es kann einzelne Prozessschritte – etwa die Klebstoffapplikation – als manuelle, mechanisierte oder vollautomatische Schritte abbilden. Bereits diese Grobkonzepte zeigen Engpässe oder Problemlagen in der Fertigung auf. Sie ermöglichen eine erste Aufwandsabschätzung hinsichtlich des Personals, der Investitionskosten, der Projektkosten und der Projektdauer.

Bei einer detaillierten Beschreibung wird der konzeptionelle Ablauf verschiedener Fertigungsabläufe unter anderem auch grafisch dargestellt. Die einzelnen Prozessschritte und die dazugehörigen Betriebsmittel und Anlagen werden exakt beschrieben. Auch die spezifische Qualifizierung des Personals (u. a. nach Richtlinien des Deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. DVS) spielt eine wichtige Rolle. So sind je nach Fertigungskonzept für bestimmte Qualitätsanforderungen ausgebildete Klebfachkräfte notwendig, die den Prozess überwachen. Denn eine Entscheidung für die Klebtechnik bedeutet nicht nur eine Investition in Maschinen, sondern auch in die Köpfe der Anwender: Erfolgreiches Kleben will gelernt sein.

### Maßnahmenplan berücksichtigt alle wichtigen Aspekte

Sämtliche Aspekte dieser Art fließen in einen Maßnahmenplan ein, der vom Aufbau des Projektteams über die Klebstoffauswahl, die Personalqualifizierung und den Anlagenaufbau bis zur Inbetriebnahme und Anlaufphase reicht – aufgeschlüsselt für verschiedene Fertigungsalternativen wie manuelle oder vollautomatische Applikation. Dabei sind beispielsweise bei der Entwicklung und



Manuell oder automatisch kleben? – Welche Variante unter technischen und ökonomischen Aspekten ein Optimum darstellt, beantwortet das im Fraunhofer IFAM entwickelte Tool.

Bewertung eines Konzeptes für die manuelle klebtechnische Fertigung auch Größen wie die Anzahl der benötigten Personen pro Schicht von großer Bedeutung. Im Hinblick auf die laufenden Kosten kann so eine Kapazitätsplanung durchgeführt werden, die auf der geschätzten Leistung jedes Werkers für die jeweiligen Prozessschritte während der Arbeitszeit basiert.

Bei einer Abwägung zwischen manueller und automatisierter Fertigung lassen sich die Personalkosten mit den Geräteinvestitionen vergleichen. Bei den Personalkosten fallen neben Löhnen auch Größen wie Schulungskosten, Arbeitsausfall und Einarbeitungskosten an; im Vergleich dazu sind bei automatisierter Fertigung wesentlich höhere Geräteinvestitionen notwendig. Eine Gesamtkostenübersicht für die manuelle oder die automatisierte Fertigung berücksichtigt sämtliche Parameter wie effektive Arbeitszeiten, technische Verfügbarkeit, Lohnkosten, Nutzungsdauer, Abschreibung, Zinsen, Energiekosten und vieles mehr. Dadurch wird ein realitätsnaher Kostenvergleich möglich. Er verdeutlicht die Stückkostenvorteile der jeweiligen Investitionsalternativen. Damit können auch die entsprechenden Amortisationszeiten berechnet werden. So ist beispielsweise denkbar, dass sich eine zunächst wesentlich höhere Inves-

tionssumme in die automatische Fertigung ab einer bestimmten Stückzahl »rechnet« und somit die bessere Variante gegenüber den zunächst vermeintlich geringeren Kosten der manuellen Fertigung ist.

Ebenso wie die reinen Kosten kann das Fraunhofer IFAM auch das technische Risiko des Klebtechnikeinsatzes abschätzen. Dabei spielen Fragen der technischen Diskrepanz, der technischen Unsicherheit und der Komplexität des Produktes bzw. des Projektes eine Rolle. Die technische Diskrepanz bezeichnet die Differenz zwischen dem nutzbaren Know-how der bisherig eingesetzten Technologie und der »neuen« Technologie. Bei der technischen Unsicherheit geht es darum, inwieweit die technische Realisierung den Anforderungen des geplanten Systems entspricht. Die Komplexität des Systems betrifft sämtliche Bestandteile und Komponenten eines geschlossenen Systems in ihrer gegenseitigen Abhängigkeit und Wechselwirkung. Ein Beispiel für die vielfältigen Aspekte bei der Abschätzung des technischen Risikos ist die Frage nach dem am besten geeigneten Klebstoff. Dabei müssen Faktoren wie die Klebstoffverfügbarkeit, die Zahl der Klebstoffalternativen und der Aufwand einer eventuellen Neuformulierung des Klebstoffs diskutiert werden.

Ein wesentlicher Risikofaktor liegt nicht nur in der Frage der technischen Realisierbarkeit, sondern auch bei der generellen Umsetzungsfähigkeit von Automatisierungsprojekten eines Unternehmens. Nicht selten scheitern Technologieprojekte aus menschlichen oder organisatorischen Gründen. Damit ein Projekt erfolgreich umgesetzt werden kann, spielen drei Erfolgsfaktoren eine Schlüsselrolle:

1. die aktive Verankerung des Projektes im Management und bei allen Betroffenen sowie die entsprechende Motivation der Mitarbeiter,
2. die Kenntnis des Standes der Technik und
3. der Innovationsgrad der Produktion.

### **Realistische Selbsteinschätzung erhöht die Erfolgsaussichten**

Unter diesen Gesichtspunkten kann beispielsweise eine Befragung durchgeführt werden, inwieweit diese Erfolgsfaktoren beim Hersteller erfüllt werden. Dabei kommt es auf eine möglichst realistische Selbsteinschätzung an. Die verschiedenen gewichteten Ergebnisse lassen die Berechnung einer Erfolgswahrscheinlichkeit zu, die eine weitere wichtige Entscheidungsgrundlage sein kann.

In den vom Fraunhofer IFAM entwickelten effizienten Bewertungen für die Einführung von klebtechnischen Fertigungen im Unternehmen werden klassische Investitionsmethoden mit den speziellen Herausforderungen der klebtechnischen Technologiequalifizierung vereint. Als solide und transparente Informationsgrundlage für Entscheidungsträger erlauben sie die ganzheitliche Bewertung eines klebtechnischen Projekts – damit das Kleben nicht nur technisch, sondern auch ökonomisch zu einem vollen Erfolg wird!

#### **Ansprechpartner**

Manfred Peschka  
 Telefon: +49 421 2246-524  
 E-Mail [manfred.peschka@ifam.fraunhofer.de](mailto:manfred.peschka@ifam.fraunhofer.de)

#### **Institut**

Fraunhofer-Institut für  
 Fertigungstechnik und  
 Angewandte Materialforschung IFAM,  
 Bereich Klebtechnik und Oberflächen,  
 Bremen

## DIN-Norm im Schienenfahrzeugbau – vom IFAM mitentwickelt, vom IFAM überwacht

### Aufgabe und fachliche Verpflichtung: Das Fraunhofer IFAM ist seit Dezember 2006 »Anerkannte Stelle« des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA) für die Klebtechnik

Die Erfolgsgeschichte der Klebtechnik im Transportmittelbau ist bekannt: Durch einen optimalen Materialmix sind Schienenfahrzeuge, Flugzeuge, Automobile und Schiffe in den vergangenen Jahren immer leichter geworden. Sie erreichen dadurch höhere Geschwindigkeiten bei geringerem Verbrauch und sind kostengünstiger produzierbar. Die Verbindung der verschiedenartigen Werkstoffe wurde nur durch den intelligenten Einsatz der Klebtechnik möglich. Das führte zu erheblichen Steigerungsraten beim Einsatz von Klebstoffen, was sich auch in Zukunft fortsetzen wird. Im Bereich des Schienenfahrzeugbaus hat die deutlich gestiegene Bedeutung des Klebens jetzt zu einer neuen DIN-Norm geführt – der DIN 6701-2 für das Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen. Initiiert wurde diese Norm durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA). Diese staatliche Aufsichts- und Genehmigungsbehörde beauftragte das Fraunhofer IFAM mit der Wahrnehmung ihrer Interessen, da es in Europa das größte Know-how in Sachen Kleben hat: Seit Dezember 2006 ist das IFAM damit »Anerkannte Stelle« des Eisenbahn-Bundesamtes für die Klebtechnik.

In dieser Funktion achtet das IFAM darauf, ob die klebtechnischen Anwenderbetriebe im Schienenfahrzeug- und -fahrzeugteilebau die Qualitätsstandards einhalten, die in der entsprechenden DIN-Norm 6701-2 festgelegt sind. Alle Firmen, die in dieser Branche klebtechnische Arbeiten ausführen, mit geklebten Produkten handeln oder sonstige Dienstleistungen im Bereich der klebtechnischen Konstruktion und Auslegung anbieten, müssen seit Anfang 2007 über eine entsprechende Zulassung verfügen. Diese vergibt nun das Fraunhofer IFAM als größere von insgesamt zwei zertifizierenden Stellen in Deutschland.

### Expertenkommission unter IFAM-Leitung

Das Eisenbahn-Bundesamt hat diese Norm angesichts der mittlerweile großen Bedeutung des Klebens im Schienenfahrzeugsektor initiiert, vergleichbar den seit Jahrzehnten bestehenden



Urkunde.

DIN-Normen beim Schweißen. Die DIN 6701-2 dient der Qualitätssicherung und der Sicherheit, um beispielsweise Schäden mit der Gefahr weitreichender Folgen aufgrund schadhafter Klebverbindungen von vornherein zu vermeiden. Um eine entsprechende DIN-Norm zu etablieren, beschäftigte sich eine Expertenkommission unter Leitung des Fraunhofer IFAM mehrere Jahre lang intensiv mit den grundlegenden Anforderungen. Beteiligt waren an dieser fachlichen Runde Anwenderbetriebe, Klebstoffhersteller, Forschungseinrichtungen und Aufsichtsbehörden. Auch nach der Schaffung der DIN-Norm wird der EBA-Arbeitskreis DIN 6701 weitergeführt. Obmann ist Professor Dr. Andreas Groß vom IFAM; außerdem sitzen als Fachvertreter Dr. Markus Brede und Dr. Dirk Niermann für das Institut mit in diesem Gremium.

Mit der DIN 6701 ist Deutschland weltweit Vorreiter: Nirgendwo sonst gibt es eine derart umfassende Qualitätsnorm für die Anwendung der Klebtechnik im Schienenfahrzeugbereich. Das kann Folgen haben, die sich auch für das IFAM sehr positiv auswirken würden: Die »verwandte« DIN 6700 für das Schweißen im Schienenfahrzeugbau war ebenfalls weltweit Vorreiter und hat sich, weil qualitativ hervorragend, überall als schweißtechnischer Gradmesser in der Branche durchgesetzt. Eine ähnliche Entwicklung ist für die Klebtechniknorm zu erwarten. Obwohl formal nur für den Aufsichtsbereich des Eisenbahn-Bundesamtes geschaffen, wird diese Norm aller Wahrscheinlichkeit nach – das zeigen die Schweißnormen – auch darüber hinaus als Referenz für

die Qualitätsstandards der klebtechnischen Anwenderbetriebe, für Konstruktionsvorgaben sowie Ausführungsregeln und die Qualitätssicherung gelten. Bestellt beispielsweise China bei einem kanadischen Unternehmen einen Personenzug, so ist durchaus damit zu rechnen, dass auch hier schon bald der DIN-6701-Maßstab angelegt wird.

### Klebtechnik wird noch verlässlicher

Die Norm selbst ist in mehrere Teile gegliedert. Den ersten Teil bildet ein Glossar der Fachbegriffe, gefolgt von einer detaillierten Beschreibung des Zulassungsverfahrens für Unternehmen. Im dritten Abschnitt werden Berechnungen und Konstruktionen von Klebverbindungen im Schienenfahrzeugbau beschrieben; der vierte Teil regelt die richtige Anwendung von Klebstoffen. Für das IFAM wie auch die gesamte Klebstoffindustrie und die Anwender ist die DIN 6701 vor allem deshalb bedeutend, weil sie die Klebtechnik in dem wichtigen und großen Anwendungsbereich des Schienenfahrzeug- und -fahrzeugteilebaus noch verlässlicher macht. Eisenbahnunglücke, die auf schadhafte Klebverbindungen zurückzuführen sind, hätten für die Klebstoffbranche verheerende Folgen. Attraktiv für das Institut ist aber auch die fachliche Beteiligung. Organisatorisch streng von der Zertifizierungsstelle getrennt, stehen andere IFAM-Bereiche mit dem umfassenden Wissen in der Klebtechnik für Unternehmen als Partner zur Verfügung. In gemeinsamen Projekten kann die Erfüllung von Zulassungskriterien schnell und sicher erarbeitet werden. Und bei der Ausbildung von Fachkräften auf verschiedenen Ebenen für die

fehlerfreie, intelligente Anwendung der Klebtechnik ist das Fraunhofer IFAM weltweit führend.

Die Zulassung selbst verläuft nach einem festgelegten Plan. Ein Unternehmen, das mit einer oder mehreren Betriebsstätten die Zertifizierung anstrebt, kann sich auf den Internetseiten ([www.ifam.fraunhofer.de](http://www.ifam.fraunhofer.de)) informieren und dort einen Zulassungsantrag herunterladen. Auf der Webseite befindet sich auch ein Link zum Online-Register (<https://www.din6701.de>), das alle bereits DIN-6701-zertifizierten Firmen auflistet – ein zusätzlicher Ansporn für noch nicht zugelassene Betriebe, dort ebenfalls Aufnahme zu finden. Nachdem die Bedarfe vorab konkretisiert wurden, wird das Unternehmen von IFAM-Prüfern je nach Größe ein bis zwei Tage lang vor Ort auf die Einhaltung bzw. Erfüllung sämtlicher DIN-6701-Bestimmungen hin untersucht. Bei erfolgreichem Bestehen wird die Zulassung für die jeweilige Betriebsstätte mitsamt Urkunde vergeben. Sie ist maximal drei Jahre gültig, dann muss eine erneute Überprüfung vorgenommen werden.

Eine der ersten Firmen, die schon Anfang 2007 zugelassen wurde, war die Stadler Pankow GmbH in Berlin. Der in der Branche angesehene Hersteller baut sowohl Straßen- als auch Eisenbahnen. Kurze Zeit später erlangte mit der Bombardier Transportation GmbH in Hennigsdorf bei Berlin ein weiterer bekannter Hersteller die Zulassung. Wie alle namhaften Hersteller nutzen sie heute die Klebtechnik in umfassender Weise, um die Kundenwünsche nach modernem Design, optisch ansprechenden Bauweisen, geringem Gewicht, Torsionssteifigkeit oder Komfort zu erfüllen. Die Zahlen sprechen für sich: Wurden in den 1980er-Jahren noch rund 10 Kilogramm Klebstoff beim Bau eines Nahverkehr-Triebwagens eingesetzt, waren es 1996 schon 500 Kilogramm.



Klebtechnik im Schienenfahrzeugbau: Regionalzug FLIRT der Stadler Pankow GmbH (Bildquelle: Stadler Pankow GmbH).

#### Ansprechpartner

Dirk Niermann  
 Telefon: +49 421 2246-439  
 E-Mail [dirk.niermann@ifam.fraunhofer.de](mailto:dirk.niermann@ifam.fraunhofer.de)

#### Institut

Fraunhofer-Institut für  
 Fertigungstechnik und  
 Angewandte Materialforschung IFAM,  
 Bereich Klebtechnik und Oberflächen,  
 Bremen

## Verhinderung von Eishaftung und Eiswachstum an Oberflächen: Eine Problemstellung, zwei Lösungsansätze

Eine Erfolgsstory geht weiter: Auch 2007 haben die Aktivitäten des Fraunhofer IFAM in Richtung des technischen und biomolekularen Oberflächen- und Materialdesigns weitreichende Beachtung gefunden. Dabei stand insbesondere die Entwicklung neuer funktionaler und biomimetischer Oberflächen zur Verhinderung bzw. Verminderung von Eiswachstum im Fokus. In den drei Abteilungen Klebstoffe und Polymerchemie, Lacktechnik sowie Adhäsions- und Grenzflächenforschung des Fraunhofer IFAM werden momentan gleich zwei zukunftsweisende Projekte vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Wo sich die beteiligten Wissenschaftler 2007 gegen konkurrierende Vorhaben durchsetzen mussten, gelang dies auch: Überzeugende Konzepte und Forschungsergebnisse führten zur Bewilligung der anwendungsorientierten Vorhaben, die derzeit mit weiteren Partnern aus Forschung und Industrie vorangetrieben werden.

Wenn es um die Verminderung oder sogar völlige Unterbindung von Eisbildung an Oberflächen geht, werden Wirtschaft und Industrie hellhörig. Denn Eis an Oberflächen verursacht in vielen Bereichen hohe Kosten. Bekanntestes Beispiel ist die Enteisung von Flugzeugen. Erlebbar ist dies für Passagiere nur vor dem Start; doch auch während des Fluges wird enteist, wenn sich in großen Höhen Eiskristalle an den Tragflächen bilden. An Strommasten oder Windkraftanlagen kann Eisbildung – vor allem bei extremen Wetterlagen wie beispielsweise im November 2005 im Münsterland – zu großen Schäden führen. Und auch bei Schienenfahrzeugen, Schiffen, Automobilen oder Rollläden ist Vereisung ein großes Problem. Allen Bereichen gemein ist, dass sich Stillstands- und Wartungszeiten sowie aufwändige Reparaturen zu erheblichen finanziellen Mehrbelastungen aufsummieren – Kosten, die jedes Unternehmen und jeder Industriebereich lieber heute als morgen durch innovative Lösungen einsparen würde.

### Zwei parallele Lösungsansätze im Institut

Das Fraunhofer IFAM arbeitet mit zwei parallelen Ansätzen an diesen Lösungen. Die Arbeitsgruppe Biomolekulares Oberflächen- und Materialdesign verfolgt den Weg der Einbindung synthetisch hergestellter Anti-Freeze-Proteine in Lacke zu-



Immer wieder ein Ärgernis, wenn das Auto vereist.

sammen mit der Abteilung Lacktechnik, in der außerdem an Beschichtungen mit verminderter Eishaftung bzw. niedrigeren Gefrierpunkten gearbeitet wird. Neben grundsätzlichen Unterschieden gibt es bei beiden Ansätzen auch zahlreiche Überschneidungen, da neue Funktionen nur durch eine gezielte Modifikation der Lackoberfläche erzeugt werden können. Dieses Vorgehen wird zudem durch die Arbeitsgruppe Applied Computational Chemistry der Abteilung Adhäsions- und Grenzflächenforschung unterstützt. Durch die Computersimulation der chemischen Prozesse an den jeweiligen Grenzflächen sollen Materialeigenschaften im Vorfeld der Entwicklungen für die Lackformulierungen vorhergesagt und optimiert werden. Durch die strukturell verankerte enge Zusammenarbeit der Abteilungen lassen sich wertvolle Synergien realisieren, die rasche wissenschaftliche Fortschritte ermöglichen. Die fachübergreifende Kooperation von Chemikern, Biologen, Physikern und Lacktechnikern sowie der enge Austausch zwischen normalerweise getrennt agierenden Fachgebieten beschleunigen die Entwicklung hin zu konkreten Anwendungen.

Für die gewählte Vorgehensweise ist die Natur ein Vorbild. Dort gibt es beispielsweise Insekten, die bei minus 60 Grad »frostfrei« existieren können – ähnlich wie bestimmte Fische, die trotz niedrigster Temperaturen überleben. Gleichartige Phänomene finden sich auch bei Pflanzen. Sogenannte Frostschutzproteine – Anti-Freeze-Proteine oder kurz

AFP – verhindern dabei die Eisbildung. Ein Ansatz von Forschung und Entwicklung im IFAM ist die Verbindung von technischen Lackoberflächen mit synthetisch hergestellten AF-Proteinen. Dass dies zu frostresistenteren Oberflächen führt, wurde jetzt in einer Machbarkeitsstudie nachgewiesen.

Diese Studie hat eine Vorgeschichte. Bereits Anfang 2006 war das IFAM in einem Ideenwettbewerb des BMBF erfolgreich. »Bionik – Innovationen aus der Natur« ist der Titel dieses Bundeswettbewerbes, in dem aus 150 Projektskizzen 20 besonders überzeugende Vorhaben ausgewählt wurden – darunter auch das des IFAM. Ausgestattet mit BMBF-Mitteln sollten die Fraunhofer-Forscher in einer Machbarkeitsstudie die Praxistauglichkeit ihrer »Anti-Icing«-Ideen nachweisen.

»Biomimetische Frostschutzoberflächen auf Basis peptidfunktionalisierter Lacke« lautet der Titel dieser Machbarkeitsstudie, die am 19. und 20. Juni 2007 erfolgreich im Deutschen Technikmuseum Berlin vor den Augen und Ohren zahlreicher Gutachter und Experten präsentiert wurde. Ziel der Studie war es, Lackoberflächen mit Anti-Freeze-Proteinen auszurüsten und diese molekular-bionischen Oberflächen anschließend auf ihre Frostschutzwirkung hin zu überprüfen. Dazu mussten zunächst geeignete frostresistente Lebewesen ausgewählt werden, deren AF-Proteine sich als Vorbild für später synthetisch hergestellte Proteine eigneten. Mithilfe der chemischen Festphasenpeptidsynthese wurden schließlich Peptidsequenzen aus dem Fisch Winterflunder und dem Insekt Tannentriebwickler im Labormaßstab produziert und charakterisiert.

Die Anbindung der Peptide bzw. Proteine an kommerziell erhältliche Lacksysteme realisierten die IFAM-Wissenschaftler mit drei unterschiedlichen Strategien. So wurde zum Beispiel eine wässrige Proteinlösung mit einem Ultraschallzerstäuber auf den Lack aufgesprüht, wobei das Lacksystem aus einem Epoxidharz und einem Polyaminhärter bestand. Die Aminogruppen der Proteine reagierten mit den Epoxidgruppen an der Lackoberfläche und wurden durch Einpolymerisierung gebunden. In einem zweiten Ansatz gelang es, die Peptide photochemisch anzubinden. Dazu wurde in das Lacksystem ein photochemisch aktives Molekül integriert. Im dritten Fall wurden die Peptide über



Beispiel für das Vereisen von Wärmetauschern in Kühlgeräten.

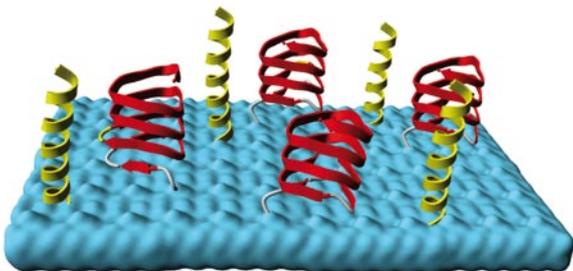
Linkermoleküle angebunden, die sich zwischen Lack und Peptid befinden – ein Ansatz, der sich bei den anschließenden Oberflächentests als besonders vielversprechend erweisen sollte. Bei dieser Art der Anbindung liegen die AF-Proteine beweglich auf der Oberfläche.

Für die verschiedenen Beschichtungen wurden anschließend in einer Bereifungskammer Referenzversuche durchgeführt. Dabei wurden Modelloberflächen mit und ohne Frostschutzprotein durch einen vorbeiziehenden Luftstrom bereift. Das Ergebnis zeigte, dass die mit AF-Peptiden funktionalisierte Oberfläche deutlich weniger Eisbildung aufwies als die Kontrolloberfläche. Eine ungleichmäßige Beschichtung mit AF-Peptiden führte auch zu einer ungleichmäßigen Bereifung. Grundsätzlich wurde nachgewiesen, dass die Ansätze zur Einbindung von AF-Peptiden in technische Oberflächen machbar sind und – auch unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit – ein großes Potenzial aufweisen. Die Machbarkeitsstudie benannte auch die kurz-, mittel- und langfristigen Entwicklungsschritte auf dem Weg zu einer technisch voll einsatzfähigen Frostschutzoberfläche. Dabei ist nicht nur der Schutz vor Vereisung ein Thema. Die Anknüpfung von Proteinen bzw. Peptiden kann generell auch genutzt werden, um technische Oberflächen mit anderen oder zusätzlichen Funktionen auszustatten. So ist eine »Anti-Soiling«-Beschichtung mit Enzymen denkbar, die beispielsweise Insekten auf Flugzeugtragflächen abbauen könnten – eine Anwendung, die zu deutlich besseren aerodynamischen Eigenschaften führen kann. Eine bessere Aerodynamik wiederum bedeutet geringeren Treibstoffverbrauch und damit – neben gesenkten Kosten – auch ein Plus für die Umwelt durch einen reduzierten CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

## Anti-Icing-Großprojekt mit namhaften Industriepartnern

Die Präsentation der Machbarkeitsstudie in Berlin überzeugte die Gutachter. Sie wählten aus den 20 Projekten sechs aus, die nun weitere drei Jahre gefördert werden – darunter auch den biomolekularen Anti-Icing-Ansatz des IFAM. In einem Großprojekt mit namhaften Industriepartnern sollen nun in den kommenden drei Jahren die grundsätzlichen Wirkmechanismen der Proteine sowie ihre Anbindung an Oberflächen weiter untersucht und schließlich in reale Anwendungen übertragen werden. Auf diesem Weg gibt es unzählige Detailfragen zu klären, die mit einer strikt anwendungsorientierten Grundlagenforschung beantwortet werden sollen. Das IFAM arbeitet dabei mit Firmen aus Luft- und Raumfahrt und dem Haushaltsgerätemarkt zusammen.

Bei den Lacktechnikern im IFAM ist Anti-Icing seit langer Zeit Thema. Hier wird an hochabriebfesten Beschichtungen mit verminderter Eishaftung gearbeitet, die beispielsweise in der Windenergiebranche von Interesse sind. Aber auch im Bereich der Kältetechnik sind eisabweisende Beschichtungen hochinteressant: Kältetechnische Wärmetauscher, die z. B. für niedrige Temperaturen in Kühlschränken oder -räumen sorgen, vereisen oftmals selbst und müssen dann wieder abgetaut werden. Diese Schritte mindern die Effizienz und führen ebenfalls zu Stillstandszeiten und damit Kosten. Allein ein Verhindern dieser Vereisungen kann durch Vermeidung von Abtauvorgängen zu Energieeinsparungen führen. Weitere Einsparungen von Kosten und Energie ergeben sich durch den möglichen Verzicht auf Abtauvorrichtungen.



Modell einer Lackoberfläche mit Anti-Freeze-Peptiden.

Derartige Möglichkeiten und Ziele decken sich mit den Bestrebungen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, das schon 2004 die Initiati-

ve »Forum Nachhaltigkeit« ins Leben gerufen hat. Ziel dieser mit zahlreichen Projekten und Millionenaufwand vorangetriebenen Aktivitäten ist es, Ergebnisse nachhaltiger Forschung in eine breite Nutzung zu überführen. Dazu sollen verschiedene Ansätze, die in vielen einzelnen Forschungsergebnissen erarbeitet wurden, sinnvoll miteinander verknüpft werden – mit dem Ergebnis einer nachhaltig wirkenden technologischen Schlüsselinnovation, die von Wirtschaft und Industrie in marktfähige Produkte umgesetzt wird.

Die zukunftssträchtigen Forschungsarbeiten der Abteilung Lacktechnik in Sachen Anti-Icing führten in diesem Zusammenhang dazu, dass das IFAM seit September 2007 als einer von insgesamt zehn Projektpartnern am BMBF-Projekt »Neue funktionale und biomimetische Oberflächen zur Verhinderung/Verminderung von Eiswachstum« beteiligt ist. Den größeren Rahmen bildet dabei die vom BMBF finanzierte »Forschungsagenda Oberfläche«, die von der Deutschen Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e. V. koordiniert wird. Hintergrund ist der unbestreitbar große Bedarf an neuen multifunktionalen Oberflächen für fast alle Branchen. Eine dieser wünschenswerten neuen Funktionen ist die Verhinderung der Vereisung von Oberflächen.

In der Vergangenheit hat es bereits verschiedene Versuche gegeben, diese Vereisung zu verlangsamen oder gar zu vermeiden. Dazu zählen passive Methoden wie Anstriche, die die Infrarotstrahlung absorbieren und so zu einer Erhöhung der Substrattemperatur führen. Im Sommer kann dies jedoch wiederum zu einer übermäßigen Erhitzung führen, was die Gefahr einer Substratschädigung mit sich bringt. Ein anderer Ansatz ist der Versuch der Herstellung eisabweisender Schichten. Dabei wurden verschiedene Verfahren bislang lediglich im Labormaßstab realisiert; die Umsetzung in großtechnische, marktreife Anwendungen gelang bislang jedoch nicht oder erwies sich wegen zu hoher Kosten als unrentabel.

### Ziel: Vereisung auf Oberflächen verhindern oder vermindern

In Zusammenarbeit mit neun weiteren Partnern will das IFAM im neuen BMBF-Projekt zwei unter-

schiedliche Lösungswege vorantreiben, um Vereisung auf Oberflächen zu vermindern oder ganz zu unterbinden. Zum einen soll der Tausalz-Effekt auch für Oberflächen nutzbar gemacht werden. Tausalz hat die Eigenschaft, den Gefrierpunkt durch einen löslichen Stoff abzusenken: Wasser gefriert so nicht bei null Grad, sondern erst bei wesentlich tieferen Temperaturen. Dieser Effekt lässt sich auf wasserlösliche Polymere übertragen und soll auch erhalten bleiben, wenn die Polymerketten nur an wenigen Punkten an die Oberfläche angebunden sind. Ein weiterer Ansatz umfasst die Erzeugung chemisch strukturierter Lackoberflächen, welche sich am Funktionsprinzip der Anti-Freeze-Proteine orientieren, aber proteinfrei funktionieren sollen.

In einem ersten Lösungsweg werden metallische Oberflächen wie Aluminium, Kupfer oder Stahl mit dünnen Schichten aus funktionellen Polymeren versehen. Die Anbindung an die Substratoberfläche wird durch spezifische Haft- und Ankergruppen hergestellt, die auf das jeweilige Substrat abgestimmt sind. Für die notwendige mechanische Stabilität dieser Schichten sorgt deren nachträgliche Vernetzung. Für die Senkung des Gefrierpunkts bieten sich zwei Möglichkeiten an. Zum einen ist dies die Ausnutzung des Tausalz-Effekts, indem Polyelektrolyte mit speziellen funktionellen Gruppen zur Anbindung an das Substrat verwendet werden. Durch die Veränderung der Wasserstruktur soll die Senkung des Gefrierpunkts

realisiert werden. Zum anderen ist die Erzeugung wasserabweisender oder wasserbindender Nanostrukturen durch die Verwendung von Polymeren denkbar, deren Struktur der von Anti-Freeze-Proteinen nachempfunden ist. Dabei werden zusätzlich zu den Haft- und Ankergruppen weitere reaktive Einheiten verwendet, die bestimmte Wechselwirkungen mit der Eisfläche eingehen. Ergebnis soll eine Veränderung der Kristallstruktur und damit eine Verminderung des Eiswachstums sein. Angestrebt wird eine Kombination aus beiden Methoden, um einen möglichst nachhaltigen Effekt zu erzielen.

Der zweite Lösungsweg umfasst die Erzeugung von strukturierten Oberflächenbeschichtungen, bei denen wasseranziehende und wasserabstoßende Bereiche deutlich voneinander abgegrenzt sind. Die wasseranziehenden Bereiche sollen dabei zunächst als Ausgangspunkt für das Eiswachstum dienen. Die diese umgebenden, abstoßenden Bereiche dienen dazu, den Anhaftungsbereich der Eiskristalle klein zu halten und ab Erreichen einer bestimmten Größe ein »Abtragen« der Eiskristalle durch Luft- und Wasserströmungen oder natürliche Schwingungen zu gewährleisten. Erste Experimente haben in dieser Richtung bereits zu Erfolgen geführt.

Bei der Schaffung derartig strukturierter Schichten greift die Abteilung Lacktechnik auf ihre langjährigen Erfahrungen bei der Oberflächenvorbehandlung, Lackentwicklung und Lackprüfung zurück. Institutsintern profitiert man vom umfangreichen Wissen im Bereich Plasmatechnik bei der Modifizierung von Oberflächen zu wasserabweisenden oder -anziehenden Oberflächen. Die ausgezeichnete technische Ausstattung des Instituts bietet verschiedene Möglichkeiten, um mit unterschiedlichen Methoden wasserabweisende Oberflächen mit wasseranziehenden Bereichen zu versehen. Als Ergänzung zu den oben beschriebenen experimentellen Lösungswegen werden rechnergestützt Haftungs- und Ablösemechanismen modelliert, die bei den zu entwickelnden Lacksystemen auftreten. Die Simulation von Anlagerungs- bzw. Ablösevorgängen bei verschiedenen Bedingungen und Parametern beschleunigt den Weg zu praktikablen Lösungen, die in diesem Projekt bis zur großtechnischen Anwendbarkeit und Funktionsfähigkeit weiterentwickelt werden sollen.

#### Ansprechpartner

Ingo Grunwald  
Telefon: +49 421 2246-630  
E-Mail [ingo.grunwald@ifam.fraunhofer.de](mailto:ingo.grunwald@ifam.fraunhofer.de)

Volkmar Stenzel  
Telefon: +49 421 2246-407  
E-Mail [volkmar.stenzel@ifam.fraunhofer.de](mailto:volkmar.stenzel@ifam.fraunhofer.de)

Ulrike Mock, Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen, vorher IFAM

#### Institut

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM,  
Bereich Klebtechnik und Oberflächen,  
Bremen

## Hochfester Polyurethan-Klarlack – dank einer neuartigen Stabilisierung von Nanopartikeln

Es ist eine echte Pein für jeden Besitzer hochwertiger Automobile: Plötzlich kommt der teure Wagen zerkratzt aus der Waschanlage. Gerade bei dunklen Fahrzeugen fallen solche Beschädigungen schnell ins Auge. Die Gefahr eines Kratzers besteht im Alltag häufig – nicht nur durch die genannten Waschanlagen, sondern auch durch Steinschlag oder Missgeschicke. Auch so mancher Käufer hochwertiger Designermöbel leidet, wenn auf der Oberfläche des edlen Teils im Gegenlicht die ersten Schrammen sichtbar werden.

In der Industrie sind deshalb die Anforderungen an kratzbeständige Oberflächen in den vergangenen Jahren fortwährend gestiegen. Erreicht wird dies mit Klarlacken, die Nanopartikel enthalten und dadurch wesentlich härter werden. Eine härtere Lackoberfläche ist unter anderem auch bei Lacken erwünscht, die noch umformbar sind und erst in ihrer Endform komplett aushärten. Dies ist bei den sogenannten Coil-Coating-Anwendungen der Fall, bei denen ein bandbeschichteter Verbundwerkstoff aus einem metallischen Trägermaterial und einer Beschichtung verarbeitet wird. Auch bei Folienapplikationen kommt es zunehmend auf Kratzfestigkeit an.

Die Steigerung der Kratzfestigkeit von Klarlacken wird vor allem durch die Beimischung von mikroskopisch kleinen quarzähnlichen Partikeln erreicht. Diese sind zumeist kleiner als 50 Nanometer und liegen damit unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts, die von etwa 400 bis 700 Nanometer reicht. Die Partikel sind somit für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar. Zwar nimmt durch die Zumischung zunächst die Dehnbarkeit des Lackes ab; diese kann jedoch wiederhergestellt werden, wenn die Partikel in ein weiches Harz implementiert werden, das die Flexibilität wieder erhöht.

### Gefahr beim Mischen zweikomponentiger Lacksysteme: die Flockulation

Ein großes Problem war bislang jedoch die richtige Verteilung der beigemischten anorganischen Festkörper. Mit zunehmender Menge der Feststoffe steigt zwar auch die Kratzfestigkeit des Lackes, doch neigen die Partikel zur Flockulation: Sie agglomerieren, ballen sich also zusammen. Die Folge



Lackoberflächen, so wie sie sich der Endkunde wünscht.



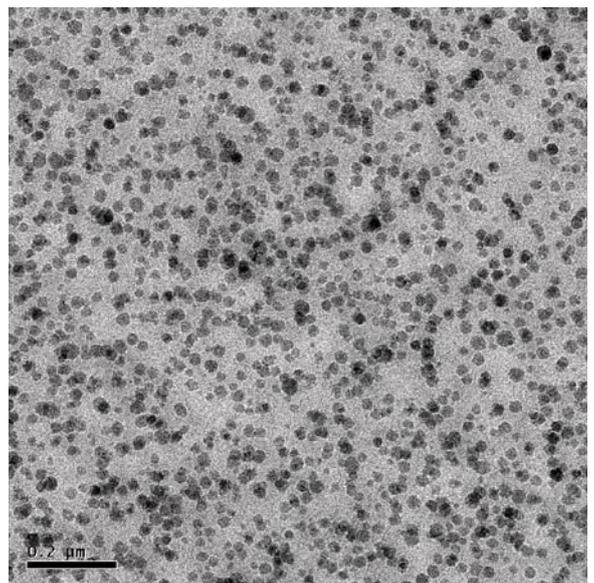
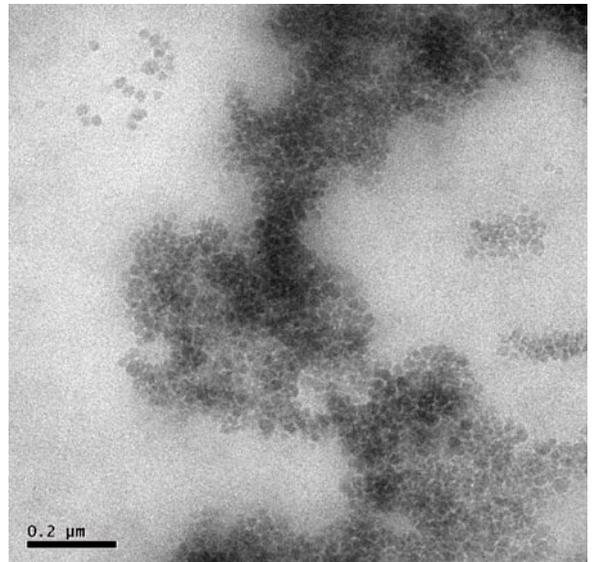
Lackschäden, die zurzeit bei den üblichen Lacken auftreten können.

ist eine Trübung des Klarlacks, wenn die Größe der Zusammenballungen im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts liegt – ein unerwünschter Effekt, der dennoch hin und wieder bei Autolacken auftaucht. Gerade beim Einsatz zweikomponentiger Lacksysteme besteht bei der Mischung von Stammlack und chemischem Härter die Gefahr der Flockulation. Neben der Trübung zieht diese Zusammenballung auch eine Verringerung der Kratzfestigkeit nach sich.

Der Abteilung Lacktechnik im Fraunhofer IFAM ist es jetzt in einem von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen »Otto von Guericke« e. V. (AiF) finanzierten Projekt zusammen mit Industriepartnern gelungen, die Nanopartikel in einem Dual-Cure-Lack so zu stabilisieren, dass sie gleichmäßig verteilt eingebettet sind. Sie verstärken damit die Kratzfestigkeit erheblich und bleiben absolut trübungsfrei. Durch die gleichmäßige Verteilung ist ein Nanopartikelgehalt von bis zu 25 Prozent – bezogen auf den Festkörper – möglich.

Zweikomponentige Dual-Cure-Lacksysteme sind in mehrfacher Hinsicht attraktiv. Bei der Klarlackierung von höherwertigen Fahrzeugen sind sie eine neue und hochinteressante Möglichkeit, weil sie zwei getrennt wirkende Aushärtemechanismen aufweisen. Sie härten einerseits durch die Bestrahlung mit UV-Licht aus, andererseits durch eine langsame chemische Reaktion. In der Automobilindustrie werden die Fahrzeuge lackiert; der Lack wird durch Wärme getrocknet, anschließend verleiht die UV-Strahlung dem Lack die endgültigen Gebrauchseigenschaften. In Schattenzonen, in die keine UV-Strahlung dringt, sorgt die chemische Nachreaktion für das gewünschte Ergebnis. Bei Folien- oder Coil-Coating-Anwendungen wiederum bietet ein Dual-Cure-Lacksystem ebenfalls Vorteile, weil das bereits lackierte Material noch umformbar ist. In der Endform wird die Lack-schicht dann durch die UV-Strahlung endgültig gehärtet.

Um die Flockulation der Nanopartikel in Dual-Cure-Lacksystemen zu vermeiden, unterzog das Arbeitsgebiet Lacktechnik die von der Firma Nanoresins AG (Geesthacht) hergestellten Nanokomposite einer Oberflächenbehandlung mit ungesättigten organischen Säuren. Im Rahmen



TEM-Aufnahmen des ausgehärteten Dual-Cure-Lacks, oben: Variante ohne Stabilisierung, unten: Variante mit Stabilisierung.

der umfangreichen Tests wurde bei einem zwei-komponentigen Dual-Cure-Lack zunächst ein Nanokomposit verwendet, das 40 Prozent Sol-Gel-basierte Partikel mit einer Größe von 20 Nanometern enthielt. Bei der Mischung zeigten sich bereits Unverträglichkeiten und eine Destabilisierung der Nanopartikel; im weiteren chemischen Prozess kam es zu Verballungen bis zu einer Größe im sichtbaren Bereich.

### Die Lösung: ungesättigte organische Säuren

Um die chemischen Prozesse zu verhindern, die letztlich diese Zusammenballung begünstigen, belegten die IFAM-Lackexperten die Partikeloberflächen daher mit ungesättigten organischen Säuren. Diese binden an der Oberfläche der Nanopartikel an und verhindern das Flockulieren. Zudem bleibt das Material flüssig und im gehärteten Zustand vollkommen trübungsfrei. Unter dem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) ist eine sehr gleichmäßige Verteilung der Nanopartikel in der Polymermatrix zu sehen.

Dank der organischen Säuren sind die Partikel im Bindemittel demnach optimal stabilisiert. Tests ergaben, dass sich durch die Zugabe der stabilisierten Sol-Gel-Nanopartikel die Abriebfestigkeit eines Dual-Cure-Lacksystems um 30 Prozent erhöhen lässt. Die neue Stabilisierungsmethode, für die im Arbeitsbereich Lacktechnik auch die ideale Dosierung des Stabilisators ermittelt wurde, ist mittlerweile zum Patent angemeldet worden.

Die Untersuchung wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen »Otto von Guericke« e. V. (AiF) gefördert (Förderkennzeichen: PRO INNO II, KF0100307SU5).

#### Ansprechpartner

Volkmar Stenzel  
Telefon: +49 421 2246-407  
E-Mail volkmar.stenzel@ifam.fraunhofer.de

Yvonne Wilke  
Telefon: +49 421 2246-613  
E-Mail yvonne.wilke@ifam.fraunhofer.de

Andreas Brinkmann  
Telefon: +49 421 2246-615  
E-Mail andreas.brinkmann@ifam.fraunhofer.de

#### Institut

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM,  
Bereich Klebtechnik und Oberflächen,  
Bremen

## PermaCLEAN<sup>PLAS</sup>®: Neue Beschichtung ermöglicht kostengünstige, umweltfreundliche Entlackung

Das industrielle Lackieren ist einer der anspruchsvollsten Schritte bei der Produktion von Gütern aller Art. Täglich werden allein in Deutschland viele tausend Tonnen Lackschichten mit schützenden, dekorativen oder speziellen technischen Eigenschaften aufgebracht.

Doch nicht nur das Lackieren selbst ist eine Herausforderung – auch die Anlagentechnik ist äußerst anspruchsvoll. So sind beispielsweise saubere Anlagenkomponenten eine unverzichtbare Voraussetzung für einen stabilen Lackierprozess: Regelmäßig müssen die Kammern, Maschinen und Werkzeuge entlackt werden, um reibungslos zu funktionieren – eine Notwendigkeit, die bislang aufwändig und teuer war und den Betriebsablauf störte. Dabei müssen beispielsweise für eine Lackierkabine in der Flugzeug- und Automobilindustrie mehrere hundert Quadratmeter Gitterroste regelmäßig entlackt werden.

Das Fraunhofer IFAM hat jetzt mit dem mittelständischen Serviceunternehmen Hugo Claus GmbH & Co. KG eine neue Entlackungstechnik entwickelt. Sie führt im Vergleich zu bisherigen Lösungen zu perfekten Entlackungsergebnissen und deutlich

niedrigeren Kosten. Mit einer neuartigen Entlackungsmaschine haben Großanwender nun die Möglichkeit, die Entlackung innerbetrieblich anzuwenden. Dadurch kann diese unerlässliche Nebenarbeit prozessnah und in den Betriebsablauf integriert ausgeführt werden. Für Unternehmen mit kleinerem Bedarf übernehmen dezentrale Servicezentren die Entlackung.

Wo gehobelt wird, da fallen Späne – und wo lackiert wird, landen die Farb- oder Beschichtungstropfen nicht nur auf dem Substrat, sondern auch auf Werkzeugen, Maschinen und Einrichtungen der Lackierkammer. Diese sind beispielsweise mit Gitterrosten ausgestattet, durch die ein großer Teil des überschüssigen Lackes fällt. Die Gitterroste selbst müssen regelmäßig entlackt werden – ein ungeliebter Vorgang, der zeit- und kostenintensiv ist. Verschiedene Ansätze hatten bislang nicht zu einer deutlichen Verbesserung der Situation geführt. Bei der thermischen Entlackung in Öfen musste viel Energie aufgewendet werden, anschließend mussten die so nur grob gereinigten Gitterroste noch mit Sandstrahltechnik weiter gesäubert werden. Auch die chemische Entlackung setzte sich aufgrund hoher Kosten nicht durch. Und schließlich wurde versucht, mit unterschiedlichsten Beschichtungen die Entfernung des Lackes in Hochdruckanlagen zu erleichtern – auch dies ein Ansatz, bei dem eine optimale Lösung nicht zur Verfügung stand.

Dem Fraunhofer IFAM und der Hugo Claus GmbH & Co. KG ist jetzt der Durchbruch gelungen. Die Firma aus Leonberg hat für Lackierbetriebe bereits ein Reinigungssystem für Förderketten und Laufschiene entwickelt, das seit geraumer Zeit erfolgreich eingesetzt wird. Die zusammen mit dem IFAM erarbeitete Entlackungstechnik wird das Geschäftsfeld nun erweitern. Ausgangspunkt für die Zusammenarbeit der beiden Partner war die erwähnte Suche nach einem effektiven Entlackungsverfahren für Gitterroste. Nach umfangreichen Voruntersuchungen mit verschiedenen neuen Verfahren favorisierte Hugo Claus eine Lösung durch Verwendung der Wasserhochdrucktechnik (WHD). Allerdings war dies bisher nur mit Drücken von 1500 bar und darüber möglich. Das erfordert einen enormen technischen Auf-



Die Wirkung der PermaCLEAN<sup>PLAS</sup>®-Beschichtung an einem verzinkten Gitterrost: Lackreste lassen sich mit Wasserhochdruck leicht entfernen.

wand und hohe Betriebskosten. Außerdem ist der Raumbedarf sehr groß und die entlackten Komponenten weisen merkliche Angriffsspuren auf, weshalb diese Systeme unwirtschaftlich sind.

Eine vom IFAM entwickelte Antihafbeschichtung auf der Basis eines Niederdruck-Plasmaverfahrens eröffnete der Hugo Claus GmbH & Co. KG ganz neue Möglichkeiten. Die inzwischen unter der Marke PermaCLEAN<sup>PLAS®</sup> auf den Markt gebrachte Schicht erlaubt eine Wasserhochdruck-Reinigungstechnik, die im mittleren Druckbereich arbeitet. Damit wurde der Aufbau einer kompakten Entlackungsmaschine möglich. Die beiden Komponenten PermaCLEAN<sup>PLAS®</sup>-Beschichtung und CLAUSwhd-Entlackungsanlage sind Synonyme für ein neues, sehr effizientes und kostengünstiges Entlackungskonzept.

### Ultradünne Antihafbeschichtung aus dem IFAM

PermaCLEAN<sup>PLAS®</sup> ist eine ultradünne plasmapolymere Antihafbeschichtung, die im IFAM in enger Zusammenarbeit der Abteilungen Lacktechnik sowie Plasmatechnik und Oberflächen entwickelt wurde. Im Institut wird seit Jahren fachübergreifend und mit großem Erfolg an Antihafbeschichtungen für unterschiedliche Anwendungen gearbeitet.

Die PermaCLEAN<sup>PLAS®</sup>-Schicht hat bei einer Dicke von weniger als 0,5 Mikrometern die Eigenschaft, dass auf ihrer Oberfläche gängige Lacksysteme nur extrem schwach haften. Sie widersteht problemlos Wasserhochdruck von 500 bar. Wichtig für die Lackiertechnikindustrie ist die Tatsache, dass selbst abgeriebene Beschichtungspartikel keine Kraterbildung beim Lack verursachen. Die Beschichtung zeigt zudem eine Haftung, die gegen Unterwanderung beständig ist. Dies gilt sowohl für Metalle als auch für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe. Voraussetzung ist jedoch eine sehr saubere Oberfläche, die insbesondere absolut frei von losen Korrosionsprodukten sein muss.

Erste Langzeittests bei einem Automobilhersteller haben gezeigt, dass die Wirkung von PermaCLEAN<sup>PLAS®</sup>-beschichteten Gitterrosten nach mehr als zwei Jahren und rund 400 Reinigungszy-



Mit dieser 5-m<sup>3</sup>-Niederdruck-Plasmaanlage lassen sich Bauteile mit der PermaCLEAN<sup>PLAS®</sup>-Beschichtung ausrüsten.

klen noch vorhanden ist. Sollte die Beschichtung jedoch irgendwann ihre Dienste versagen, kann sie einfach überbeschichtet werden.

Die Beschichtung wird in einem Niederdruck-Plasmareaktor appliziert, wodurch sich momentan eine maximale Bauteilgröße von 2,5 m × 1,1 m bei flachen Bauteilen und von 2,5 m × 0,75 m × 0,75 m bei dreidimensionalen Bauteilen ergibt. Die Komplexität der Bauteile spielt hingegen kaum eine Rolle.

Derzeit ist das neue Verfahren bei der Reinigung von Betriebsmitteln anwendbar, die mit Nasslacken kontaminiert sind. Es kann sich dabei neben den Gitterrosten auch um Gehänge, Haken und andere regelmäßig zu entlackende Betriebsmittel handeln. Für sehr filigrane Objekte eignet sich das Verfahren wegen des harten Wasserhochdruck-Aufpralls jedoch nicht. Erprobte Substrate für die Beschichtung sind bisher feuer- oder galvanisch verzinkte Oberflächen, Aluminium, Edelstahl und Kunststoffe. Auch lackierte Oberflächen können problemlos mit PermaCLEAN<sup>PLAS®</sup> beschichtet werden.



### Ausgereifte und skalierbare Maschinentechnik

Die Entlackungsmaschine besteht aus den Einheiten Entlackungsmodul, Pumpenaggregat und Wasseraufbereitung. Das Entlackungsmodul enthält im Wesentlichen das Düsensystem, die Transport- und Aufnahmeeinheiten für Düsen und Entlackungsgut sowie das Entsorgungssystem für die groben Lackreste. Je nach Entlackungsvolumen wird das Modul als Batch- oder Durchlaufsystem ausgeführt. Das Batchsystem hat einen Platzbedarf von ca. 20 Quadratmetern, der Anschlusswert für die elektrische Leistung beträgt 120 Kilowatt. Es bewältigt im Dreischichtbetrieb ein tägliches Entlackungsvolumen von bis zu 800 Gitterrosten oder vergleichbaren Betriebsmitteln. Mit der Durchlaufvariante lassen sich pro Tag bis zu 4000 Teile entlacken. Alle Maschinen arbeiten mit einem geschlossenen Wasserkreislauf. Wo früher mehrere Stunden für die Entlackung eines Bauteils benötigt wurden, reichen heute wenige Minuten aus.



Die Handhabung der Entlackungsmaschine ist denkbar einfach: Die Teile werden auf einen seitlich herausziehbaren Aufnah mewagen gestellt oder gehängt. Dieser Wagen wird eingeschoben. Nach Wahl der gewünschten Programmnummer erfolgt die Entlackung in einem automatisch ablaufenden Prozess. Dabei positioniert sich ein sich drehendes Düsenkreuz über die zu entlackenden Teile und fährt das Entlackungsgut, gesteuert über Linearachsen nach dem unter einer Nummer abgelegten Programm ab. Nach Beendigung des Prozesses zieht man den Aufnah mewagen wieder heraus und entnimmt die Teile. Dabei werden sie gleichzeitig von einer integrierten Düsenleiste abgeblasen. Bei der Durchlaufvariante der Entlackungsmaschine sind mehrere Düsenkreuze parallel im Einsatz und fest positioniert. Lediglich das Entlackungsgut wird linear durch die Maschine bewegt.

CLAUSwhd-Entlackungsanlage mit rotierenden Wasserhochdruckdüsen zur Reinigung von Gitterrosten (Bildquelle: Hugo Claus GmbH & Co. KG, Fotografin Britt Moulin).

Die direkten Kosten für die Entlackung liegen bei vergleichbaren Volumina deutlich unter denen herkömmlicher Verfahren. Der Kostenanteil für die Beschichtung fällt kaum ins Gewicht, da die Schicht eine hohe Lebensdauer hat. Der Wasserverbrauch ist vernachlässigbar. Während bei den konventionellen Verfahren bisher erhebliche Logistikkosten anfallen, sind mit der neuen Tech-

nologie auch betriebsinterne Lösungen realisierbar. Auch die Umlaufbestände – und der damit verbundene Kapitalbedarf – lassen sich erheblich reduzieren: Statt beispielsweise 750 Gitterroste vorzuhalten, von denen 250 ständig in der externen Reinigung sind, reichen bei einer betriebsinternen Lösung wesentlich weniger Roste.

Eine Entlackung direkt vor Ort beim Betreiber der Lackieranlage ist somit möglich, setzt aber ein gewisses Entlackungsvolumen voraus. Der Kunde kann die Technik mieten und mit eigenen Mitarbeitern betreiben. Die Hugo Claus Service GmbH übernimmt dabei die Wartung und technische Betreuung der Maschine. Der Kunde kann sich die Maschine aber auch von der Hugo Claus Service GmbH betreiben lassen. Bei diesem Modell zahlt er dann nur die Kosten für die entlackten Teile. Ein garantiertes Mindestentlackungsvolumen ist bei diesem Modell jedoch Voraussetzung. Kleinere Entlackungsvolumina will die Hugo Claus Service GmbH gebündelt in eigenen, dezentralen Servicestützpunkten abarbeiten. Ein erstes Zentrum ist bereits in Leonberg in Betrieb gegangen.

### Positive Umweltaspekte

Die Entlackung von Anlagenkomponenten erfolgt heute in der Regel mit chemischen und thermischen Verfahren. Diese produzieren in erheblichem Umfang umweltbelastende Stoffe, die dann am Ende des Prozesses in aufwendigen Anlagen wieder neutralisiert werden müssen. Dazu kommen umweltbelastende Logistikleistungen und ein nicht unerheblicher Materialbedarf, weil sich die Lebensdauer thermisch entlackter Komponenten verkürzt. Bei dem neuen Entlackungsverfahren fallen – ebenso wie bei dem Plasmabeschichtungsverfahren – praktisch keine umweltgefährdenden Stoffe an. Auch energetisch arbeiten die Entlackungsmaschinen hocheffektiv: Der für die Entlackung erforderliche Energieeinsatz liegt bei einem Bruchteil dessen, was bei konventionellen Anlagen notwendig ist. Insoweit ist die neue Technik auch unter Umweltgesichtspunkten ein großer Schritt nach vorne.

Die neue Technik ist zurzeit für Nasslacke auf Wasser- und Lösemittelbasis geeignet. Im Rahmen eines von der Deutschen Stiftung Umwelt (DBU)

geförderten Verbundprojektes erfolgt momentan die Weiterentwicklung der Beschichtung für Pulverlacke und Lacke, die bei der Kathodischen Tauchlackierung (KTL) zum Einsatz kommen. Zudem werden kostengünstige Verfahren untersucht, die die hohen Qualitätsanforderungen an die Komponentenoberflächen vor der Plasma-beschichtung gewährleisten können. Gearbeitet wird zudem an der Entwicklung von Entlackungsmodulen, die in Lackieranlagen integriert werden können.

#### Projektpartner

Hugo Claus GmbH & Co. KG, Leonberg

#### Ansprechpartner

Matthias Ott  
Telefon: +49 421 2246-495  
E-Mail [matthias.ott@ifam.fraunhofer.de](mailto:matthias.ott@ifam.fraunhofer.de)

Klaus Vissing  
Telefon: +49 421 2246-428  
E-Mail [klaus.vissing@ifam.fraunhofer.de](mailto:klaus.vissing@ifam.fraunhofer.de)

#### Institut

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM,  
Bereich Klebtechnik und Oberflächen,  
Bremen

# Entwicklung lagerstabiler 1-K-Reaktivharzformulierungen durch chemisch modifizierte Nanozeolithe mit Controlled-Release-Funktionalität

## Nanokomposite für die Klebtechnik

Moderne Klebstoffe, Dichtmassen und Oberflächenbeschichtungen enthalten neben hoch entwickelten organisch-chemischen Polymersystemen auch feste, häufig anorganische Füllstoffe. Der Umfang an jeweils eingesetztem Füllstoff ist von der speziellen Anwendung abhängig. So beeinflussen Füllstoffe wesentlich das Fließverhalten und die Applikationseigenschaften der nicht gehärteten fluiden Formulierung sowie das Verformungsverhalten, die Permeabilität und die Leitfähigkeit der gehärteten organisch-anorganischen Komposite. Für die Festigkeit und Beständigkeit von Verbunden aus Komposit und Füge teil spielt die Adhäsion zwischen dem Polymersystem und den Substraten oder Füllstoffen eine maßgebliche Rolle.

Werden nanoskalige Füllstoffe mit hohen spezifischen Oberflächen eingesetzt, so bestimmen die Polymer-Festkörper-Grenzschichten – die Interphasen – zunehmend die Eigenschaften des gesamten Komposits und damit die des Verbunds. Auf diesem Gebiet liegt ein traditioneller Arbeitsschwerpunkt des Fraunhofer IFAM. Im IFAM-Jahresbericht von 2004 berichtete Andreas Hartwig bereits unter der Überschrift »Anwendung von Nanokompositen in der Klebtechnik« über neuartige Komposite auf der Basis von Schichtsilikaten und von pyrogenen Kieselsäuren. So eignen sich Schichtsilikate – beispielsweise in der Form modifizierter Bentonite – als Additive für Brandschutzanwendungen oder als effektive Härtingsinitiatoren in Klebstoffformulierungen.

## Das Projekt NanoModule – Funktionsintegration durch Nanofüllstoffe

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts NanoModule verfolgt das IFAM zurzeit eine weiterführende Synthesestrategie zur Entwicklung neuartiger Nanopartikel als funktionelle Additive. Neben modifizierten Bentoniten und pyrogenen Kieselsäuren bilden Zeolithe die Basis der Entwicklung am IFAM. Zeolithe – umgangssprachlich auch als Molekularsiebe bezeichnet – sind poröse Materialien auf der Basis von Silikaten, welche sich strukturell durch wenige Nanometer große Hohl-

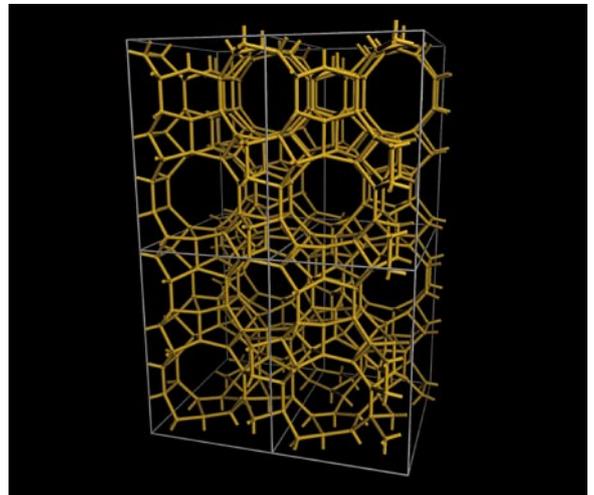


Abb. 1: Molekulares Modell eines typischen Vertreters der Substanzklasse der Zeolithe: In der Darstellung des  $2,5 \times 2,5 \times 5,3$  Nanometer großen Grundgerüsts entspricht jeder Schnittpunkt einem Silizium- oder Aluminiumzentrum.

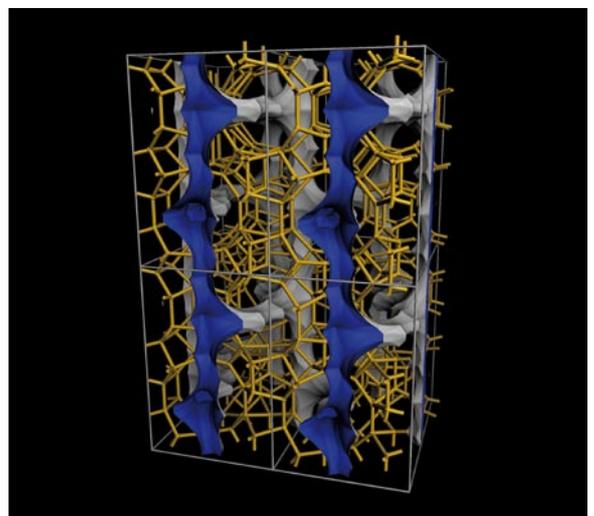


Abb. 2: Darstellung der für ein Lösungsmittelmolekül – beispielsweise Wasser – zugänglichen inneren Oberfläche des Zeoliths. Fremdionen sowie organische Moleküle lagern sich in die verzweigten Kanalstrukturen ein.

räume und Kanäle auszeichnen (Abb. 1 und 2). In die poröse Struktur können Fremdionen oder auch organische Moleküle eingelagert werden.

Ziel des BMBF-Projekts ist es, im Zuge einer Funktionsintegration nanoskalige Füllstoffe gezielt mit unterschiedlichen Funktionalitäten auszustatten und so die NanoModule zu komponieren. Bei den Zeolithen lassen sich dazu vor allem die Hohlräume und Kanalstrukturen ausnutzen.

Wirkstoffe – wie beispielsweise Härtingsbeschleuniger – werden in den Zeolithen immobilisiert, um Composite und Verbunde mit einem innovativen Eigenschaftsspektrum herstellen zu können. Durch Verwendung der Nanomodule in einkomponentig zu verarbeitenden Reaktivharzformulierungen sollen im Rahmen des BMBF-Projekts insbesondere das Härtingsverhalten sowie die Lagerbeständigkeit gesteuert werden.

Lagerbeständigkeit und Härtingsverhalten müssen gegenläufig optimiert werden, denn für die technische Anwendung sind sowohl eine niedrige Härtingstemperatur als auch eine hohe Lagerbeständigkeit bei Raumtemperatur zu gewährleisten. Die mechanischen Eigenschaften der Composite sollen im Vergleich zu konventionellen, also mit unverkapselten Härtingsbeschleunigern hergestellten Compositen verbessert werden.

### **Chemisch modifizierte Nanozeolithe als Controlled-Release-Additive**

Zeolithe eignen sich in vielfacher Hinsicht als Trägermaterial für die Verkapselung von Wirkstoffen im NanoModule-Projekt. Ein Grund ist die enorme Vielfalt bekannter Zeolithstrukturen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung sowie unterschiedlicher effektiver Porengrößen. Viele Strukturtypen sind synthetisch zugänglich und auch kommerziell erhältlich. Durch einen externen Stimulus – z. B. durch eine Temperaturerhöhung – lassen sich die im Zeolithgerüst immobilisierten Wirkstoffe freisetzen, was dann zu einer raschen Aushärtung des 1-K-Reaktivharzes führt.

Ein Füllstoff auf Zeolithbasis kann sein Potenzial insbesondere dann ausspielen, wenn die Ausmaße der Primärkristallite ebenfalls in der Größenordnung von Nanometern sind. Verbunden mit einer großen spezifischen Oberfläche erfolgt dann beim Erreichen der Release-Temperatur eine sofortige Freisetzung des Wirkstoffs aus dem Nanomodul. Eine Verringerung der Kristallitgröße auf Werte unter 0,1 Mikrometer führt zu einer drastischen Beschleunigung des effektiven Stofftransports. Gleichzeitig ist eine deutlich homogenere Verteilung der Wirksubstanzen im Komposit zu erwarten als bei einer Wirkstofffreisetzung aus mikroskaligen Kapseln. Für das Verbundvorhaben

konnte mit der Firma NanoScape AG ein erfahrener Partner gewonnen werden, der seit Jahren in der Synthese nanoskaliger Zeolithe führend ist und dieses Wissen gewinnbringend in das Konsortium einbringt.

### **Computergestützte Auswahl geeigneter Wirt-Gast-Systeme**

Der Vielfalt bekannter Zeolithe mit unterschiedlich dimensionierten Hohlräumen und Kanälen steht eine ebenso große Anzahl potenziell wirksamer Härtingsbeschleuniger gegenüber, wie z. B. auf der Basis von Salzen, Komplexen, Lewis-Säuren oder Derivaten von organischen Stickstoffbasen. Experimentell lassen sich nicht alle Kombinationen prüfen. Deshalb kommen am Fraunhofer IFAM Simulationsverfahren zum Einsatz, mit deren Hilfe die chemischen Wechselwirkungen in den Zeolithporen und damit die Immobilisierung organischer Moleküle in Kanälen und Hohlräumen vorhergesagt werden können. Im Computer lassen sich die molekularen Wechselwirkungen innerhalb der wenige Nanometer großen Hohlräume im Zeolith virtuell abtasten.

Ziel der Simulationen ist es, im Vorfeld vielversprechende Kombinationen aus Zeolith (Wirt) und Beschleunigermolekül (Gast) zu identifizieren. Diese Vorauswahl ermöglicht dann eine Fokussierung der Synthesearbeiten auf die aussichtsreichsten Kombinationen von Beschleunigermolekül und Zeolith. Als erstes Auswahlkriterium kann die sterische Hinderung in den Zeolithporen simuliert werden. Dabei zeigt sich bereits, dass für viele der potenziellen Beschleunigermoleküle passende Zeolithwirte existieren. Aus geometrischen Gründen ist aber nicht jeder Beschleuniger in den kleinsten Zeolithen immobilisierbar.

Als zweites Kriterium wird untersucht, wie stark die Gäste an den Wirt gebunden sind. Dabei zeigt sich, dass die chemische Wechselwirkung von Gast- und Zeolithmaterial entscheidend ist. Insbesondere können die Adsorptionseigenschaften sowie das Freisetzungsverhalten durch Dotierung des Zeolithgerüsts mit Fremdionen – im einfachsten Fall durch einen erhöhten Natrium- oder Aluminiumgehalt – entscheidend beeinflusst werden. Immobilisierte Alkali- oder Erdalkali-Kationen

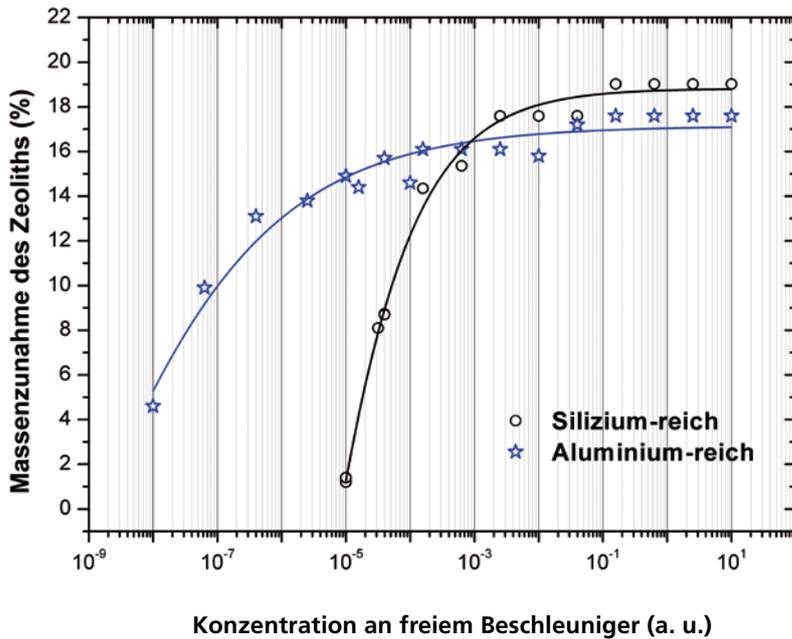


Abb. 3: Simulation der Beladung eines Zeolithgerüsts in Abhängigkeit von der Konzentration an freiem Wirkstoff in einer mobilen Phase. Ein höherer Aluminiumgehalt ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -Verhältnis) führt bereits bei niedrigerer Beschleunigerkonzentration zu einer deutlichen Massenzunahme des Nanomoduls.

wirken sich aber nicht nur auf die Oberflächenchemie, sondern auch auf die effektiven Porendurchmesser aus. Somit wird das dritte Kriterium für die Vorauswahl deutlich, denn schließlich sollen beladene Nanomodule in Anwendungen möglichst effektiv wirken können. In der molekularen Simulation kann der maximale Beladungsgrad eines Nanomoduls für jede mögliche Wirt-Gast-Kombination vorausgesagt werden. Wären die Beladungen zu niedrig, so wäre ein Einsatz der Füllstoffe unverhältnismäßig kostspielig.

Die Simulationen zeigen, wie empfindlich einerseits der Beladungsgrad und andererseits die Energetik der Anbindung vom Fremdionengehalt im Zeolithgerüst abhängen. Beispielhaft ist in Abbildung 3 dargestellt, wie die Aufnahmefähigkeit des nanoporösen Materials durch den Aluminiumanteil im silikatischen Gerüst beeinflussbar ist. Sowohl die Anbindung des Initiators als auch das Gesamtaufnahmevermögen lassen sich so durch Variation des Fremdionengehalts zielgenau steuern. Dasselbe gilt für die Release-Eigenschaften als technologisches Einsatzkriterium für Nanomodule. Durch eine Variation der Synthese der Wirtmaterialien ist das Release-Verhalten dann optimierbar.

### Gezielte Synthese und chemische Modifikation der Nanozeolithe

Entsprechend der Vorhersage der Computersimulation werden im Projekt beim Partner NanoScape AG gezielt chemisch modifizierte Zeolithe als Wirtmaterial für die Nanomodule hergestellt. So zeigt Abbildung 4 beispielhaft die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Zeolithpulvers, bei dem die chemische Zusammensetzung bezüglich der Wirkstoffbeladung optimiert werden konnte.

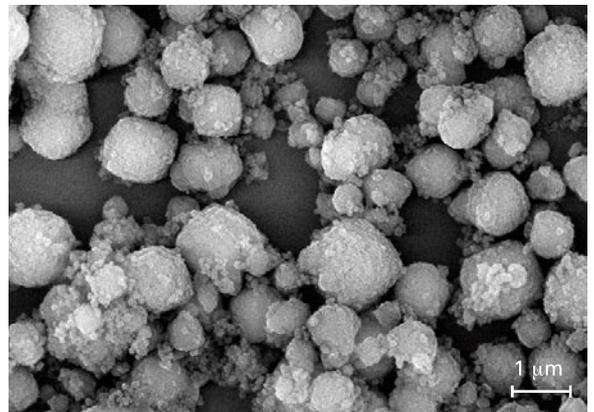


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Entwicklungsstufe für Nanomodule auf der Basis von Zeolithen, die wirksame Härtungsbeschleuniger enthalten.

In der Synthese der Nanomodule werden die Pulver am Fraunhofer IFAM im zweiten Schritt konditioniert, um so die Porenoberflächen optimal zugänglich und anbindungsfreudig zu gestalten. So können nach dem Konditionieren spezifische Oberflächen von mehreren  $100 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  in der Tieftemperaturstickstoffadsorption gemessen werden. Die am IFAM im Rahmen des Projekts entwickelten Verfahren zur Nanomodulesynthese ermöglichen insbesondere eine Kontrolle der Beladung und führen darüber hinaus zu einer bestimmten radialen Verteilung der Adsorbate im Zeolithkorn. Zusätzlich werden prozesstechnische Verfahren zur Modifikation der Wirte und zur Wirkstoffbeladung im Labor- und schließlich auch Technikumsmaßstab erarbeitet und auf industrielle Fertigungsbedingungen hochskaliert.

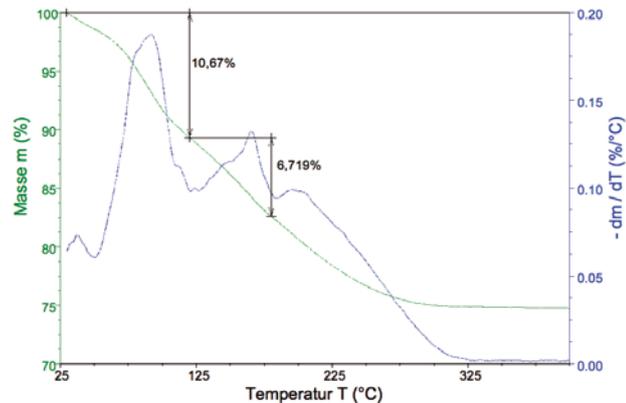
Das Freisetzungsverhalten der Beschleuniger aus den Nanomodulen wird am IFAM mittels thermoanalytischer Verfahren charakterisiert (Abb. 5). Es zeigt sich dabei, dass die aus der Simulation abge-

leitete Prognose einer Maximalbeladung von 20 Gewichtsprozent, welche bei einer Sättigung der Adsorptionsplätze erreicht werden kann, sehr gut mit dem experimentellen Befund übereinstimmt. Aus dem Vergleich der experimentellen Daten mit der Simulation ergeben sich wertvolle Hinweise für ein Maßschneidern der Adsorptionsprozesse sowie für die weitere Syntheseoptimierung. Der beobachtete Maximalwert von 20 Gewichtsprozent ist aus technologischer Sicht durchaus sinnvoll.

Darüber hinaus ergeben sich aus der thermoanalytischen Untersuchung Temperaturbereiche, innerhalb derer der Gewichtsverlust des erwärmten Nanomodulpulvers besonders stark ausgeprägt ist (Abb. 5). Ein stärker gebundenes Gastmolekül muss thermisch stärker aktiviert werden, um die Zeolithhohlräume zu verlassen. In der Folge desorbiert es bei höherer Temperatur als ein schwächer adsorbiertes Molekül. Die Desorptionstemperaturen sind also einerseits für die Bindungsstärke unterschiedlicher Oberflächengruppen für die Beschleunigermoleküle charakteristisch. Andererseits erlauben sie eine Abschätzung der Release-Temperatur von Beschleunigermolekülen in eine erwärmte Reaktivharzformulierung hinein. Eine zuverlässige Vorhersage dieser Desorptionstemperaturen auf der Basis von Simulationsrechnungen ist also für eine gezielte Materialentwicklung äußerst hilfreich.

Weiteres Vorgehen im BMBF-Projekt NanoModule  
Die vorliegenden Projektergebnisse für die Syntheseroute der Nanozeolithe und insbesondere das beschriebene thermische Release-Verhalten von verkapselten Wirkstoffen sind erfolversprechend. Nanomodule auf der Basis von Zeolithen sind synthetisch zugänglich. Für die Syntheseoptimierung lassen sich Computersimulationen zur Vorhersage von Materialeigenschaften einsetzen. Durch die Simulation kann eine zielgerichtete Entwicklung der multifunktionellen Materialien effektiv inspiriert und wegweisend begleitet werden.

Im weiteren Projektverlauf müssen die chemisch modifizierten Nanomodule jetzt ihre interessanten Release-Fähigkeiten in den Klebstoffformulierungen unter Beweis stellen. Als nächster Schritt steht an, die Controlled-Release-Funktionalität der Füllstoffe auf technologisch hochentwickelte Klebstoffformulierungen respektive Gießharz-



**Abb. 5:** Thermogravimetrische Analyse (TGA) eines wirkstoff-beladenen Nanomoduls auf Zeolithbasis. Der Massenverlust wird wesentlich durch die Freisetzung des Gastmoleküls bedingt. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass der Wirkstoff für die Beschleunigung der Polymerisation bereits ab etwa 95 °C freigegeben wird – eine für die technische Umsetzung relevante Freisetzungstemperatur.

**Auftraggeber**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
 Förderkennzeichen: Verbundprojekt FKZ 03X0026  
 »NanoChem – Chemische Nanotechnologien für neue Werkstoffe und Produkte« innerhalb des Rahmenprogramms »Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING«

**Projektpartner**

Siemens AG, Erlangen (Federführung)  
 Evonik Degussa GmbH, Rheinfelden und Hanau  
 Sika Technology AG, Zürich  
 Kömmerling Chemische Fabrik GmbH, Pirmasens  
 Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
 Technische Universität Kaiserslautern

**In Zusammenarbeit mit**

NanoScape AG, München  
 Universität des Saarlandes, Saarbrücken

**Ansprechpartner**

Michael Noeske  
 Telefon: +49 421 2246-475  
 E-Mail michael.noeske@ifam.fraunhofer.de

Peter Schiffels  
 Telefon: +49 421 2246-567  
 E-Mail peter.schiffels@ifam.fraunhofer.de

Jasmin Trautmann  
 Telefon: +49 421 2246-643  
 E-Mail jasmin.trautmann@ifam.fraunhofer.de

**Institut**

Fraunhofer-Institut für  
 Fertigungstechnik und  
 Angewandte Materialforschung IFAM,  
 Bereich Klebtechnik und Oberflächen,  
 Bremen

formulierungen abzustimmen. Zu diesem Zweck werden zunächst Komposite mit unterschiedlichen 1-K-Reaktivharzformulierungen und schließlich Klebungen hergestellt, anhand derer die Leistungsfähigkeit der innovativen Werkstoffe demonstriert wird. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Herstellungs- und Dispergierungsprozess der nanoskaligen Beschleunigersysteme, der unter anwendungsspezifischen Gesichtspunkten optimiert werden muss. Dasselbe gilt im Hinblick auf Fertigungskosten und -sicherheit.

Abschließend sollen im Projekt das mechanische und thermische Eigenschaftsspektrum der Nanokomposite durch die Härtingsbedingungen steuerbar sein. Die technologisch erforderlichen Anwendungseigenschaften werden von einem erfahrenen Konsortium vorgegeben. Das Erreichen der Vorgaben wird mithilfe der im Konsortium vielfältig vorhandenen analytischen Kompetenz zielgerichtet untersucht und unter technologisch relevanten Bedingungen geprüft.

Dieses Vorgehen erlaubt eine effektive und erkenntnisgesteuerte Optimierung der Polymersysteme. Deren Formulierung wird auf die Steuerung der Netzwerkstruktur und -dynamik sowie auf das Applikations-, Kohäsions-, Adhäsions-, Benetzungs- und Alterungsverhalten anwendungsspezifisch ausgerichtet.

Informationen zum aktuellen Projektfortschritt können auf der Internetseite [www.nanomodule.de](http://www.nanomodule.de) eingesehen werden.

# Schwingfestigkeitsprüfung zur Qualifizierung von Faserverbundkunststoffen für Offshore-Windenergieanlagen

## Einführung

Rotorblätter von Windenergieanlagen sind aufgrund der natürlichen Schwankungen der Windgeschwindigkeit einer stochastischen Wechselbelastung ausgesetzt. Diese Art der Belastung führt zur Ausbildung mikroskopisch kleiner Risse im Material, die mit steigender Anzahl der Belastungszyklen wachsen und schließlich zum Versagen führen können. Dies steht im Einklang mit der Beobachtung, dass die Festigkeit eines Materials mit steigender Anzahl von Belastungszyklen abnimmt.

Der Zusammenhang zwischen Belastung und ertragbarer Zyklenzahl wird durch die Wöhlerlinie beschrieben, deren Neigungs- und Lageparameter werkstoffabhängige Größen sind. Bei Kunststoffen hängt die Lage der Wöhlerlinie zudem stark von Temperatur und Feuchtigkeit ab. Die Parameter der Wöhlerlinie sind herausragende mechanisch-technologische Kenngrößen für die Qualifizierung von Faserverbundkunststoffen sowie notwendige Voraussetzung für die konstruktive Auslegung von Rotorblättern auf schwingende Beanspruchung.

Neue Faserverbundwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaften werden für den Bau von Offshore-Windenergieanlagen benötigt. Aufgrund der zunehmenden Leistung der Anlagen sind hier einerseits größere und schlankere Blattstrukturen erforderlich, andererseits ist der Einfluss besonderer Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Im Fokus dieser Studie lagen die Ermittlung von Wöhlerlinien für neue, am Markt verfügbare Materialien, die Berücksichtigung von Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen sowie die Entwicklung und Validierung eines Konzepts zur Bauteilberechnung.

## Tests und Modellierungen

Zur Ermittlung der elastischen Konstanten und Festigkeiten für die Modellierung wurden einachsige Zug- und Druckversuche parallel und senkrecht zur Faserrichtung sowie – für Schubbeanspruchung – im 45°-Winkel zur Faserrichtung durchgeführt. Die Versuche erfolgten in Anlehnung an jeweils gültige Normen (DIN EN ISO 527, DIN EN ISO 14126, DIN EN ISO 14129).

Dauerschwingversuche wurden im Zugschwellbereich bei einem Lastverhältnis von  $R=0,1$  und im Wechselbereich bei  $R=-1$  durchgeführt. Dabei wurden unidirektional verstärkte Proben parallel zur Faserrichtung und bidirektional verstärkte Proben in 45°-Richtung geprüft.

Die numerischen Untersuchungen wurden mit ABAQUS durchgeführt. Werkstoffausnutzungsgrad und Reservefaktor nach Puck wurden in der User-Subroutine UVARM implementiert. Damit war eine Anzeige der berechneten Werte dieser Variablen im Postprozessor als Konturdiagramm möglich, wodurch sich die Bewertung stark vereinfachte.

## Materialeigenschaften

### Harz- und Verstärkungsmaterialien

Zur Bewertung des Ermüdungsverhaltens bei Verwendung neuer Gelegetypen wurden Wöhlerlinien an Laminaten mit jeweils gleichen Matrices und gleichem Lagenaufbau aufgenommen und miteinander verglichen. Um eine gleichmäßige Durchtränkung mit Harz zu erreichen, wurden die Laminaten im Vakuuminfusionsverfahren hergestellt. Der Faservolumenanteil lag bei ca. 45 Prozent. Abb. 1 zeigt experimentelle Daten eines

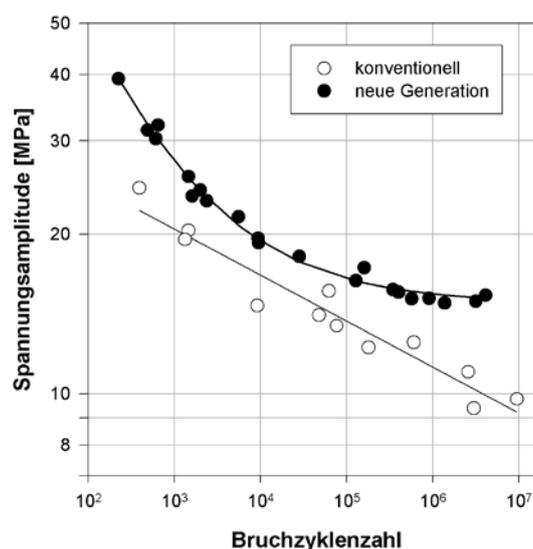


Abb. 1: Unterschiede in der Lebensdauer von  $\pm 45^\circ$ -GFK-Laminaten (konventionell und neue Generation). Dargestellt ist die Schubspannungsamplitude aus 45°-Zugversuchen. Das Spannungsverhältnis beträgt  $R=-1$ .

Materials der neuen Generation im Vergleich zu einem konventionellen Material. Es können deutlich zwei wesentliche Eigenschaften der neuen Gelegetypen unterschieden werden. Zum einen ist die Lebensdauer des Laminats bei Verwendung neuer Gelegetypen wesentlich höher als bei Verwendung des konventionellen Typs. Hierdurch kann der Materialbedarf für eine Konstruktion bei gleicher Lebensdauer reduziert und somit das Gewicht deutlich verringert werden. Zum anderen folgen die Daten des neuen Materials einer gekrümmten Linie, die für hohe Zyklenzahlen einem konstanten Wert zustrebt. Dies deutet auf die Existenz einer Dauerfestigkeit hin. Da Schwingungen mit Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit – sofern diese existiert – nicht zur Schädigung beitragen, ergeben sich erhebliche Vereinfachungen bei der Bauteilberechnung. Die Unterschiede der neuen Gelegetypen gegenüber den konventionellen Systemen liegen in der Art der Bindung, die zu einer insgesamt gleichmäßigeren Faserverteilung und weniger Spannungskonzentrationen führt, die als Orte der Schadenseinleitung angesehen werden.

Die neuen Harzsysteme unterscheiden sich in den grundsätzlichen Reaktionsmechanismen nur wenig von den konventionellen Systemen. Große Unterschiede gibt es in den verarbeitungsrelevanten Größen wie Viskosität und Härtungstemperaturen. Mit diesen Änderungen wurde dem Trend entsprochen, in der Fertigung von Rotorblättern vom reinen Handlegeverfahren auf Infusionsverfahren überzugehen und die Taktzeiten zu verkürzen. Hier wurden verschiedene Epoxidharzsysteme (EP), ein ungesättigter Polyester (UP) und ein Vinyl ester (VE) getestet. Lagenaufbau und Fasergehalt wurden jeweils konstant gehalten. Abb. 2 zeigt, dass VE-Systeme gegenüber EP-Systemen bezüglich der Lebensdauer Vorteile bieten können.

Oberflächenanalytische Untersuchungen der Bruchflächen deuten darauf hin, dass bei den konventionellen glasfaserverstärkten Kunststoffmaterialien (GFK) die Faserschicht bei zyklischer Beanspruchung einen Schwachpunkt darstellt. Bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) verläuft die Bruchfläche ausnahmslos innerhalb der Polymermatrix. Ferner scheint der oxidative Abbau der Polymermatrix bei zyklischer Beanspruchung eine Rolle zu spielen.

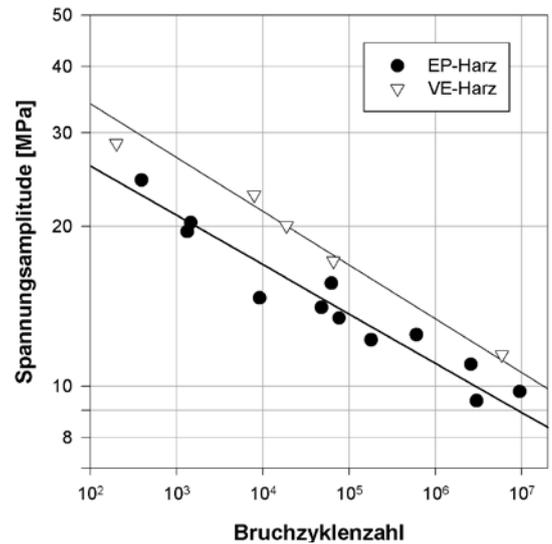


Abb. 2: Einfluss des Matrixharzes auf die Lebensdauer von  $\pm 45^\circ$ -GFK-Laminaten. Dargestellt ist die Schubspannungsamplitude aus  $45^\circ$ -Zugversuchen. Das Spannungsverhältnis beträgt  $R=-1$ .

## Einflüsse der Umgebung

Zur Bewertung des Einflusses von Temperatur und Feuchtigkeit wurden Dauerschwingversuche in einer Klimakammer durchgeführt. Dabei wurden bewusst extreme Bedingungen gewählt, damit Tendenzen deutlich erkannt und eindeutige Aussagen getroffen werden konnten. Abb. 3 zeigt, dass die Wöhlerlinie bei 70 °C und trockener Umgebung nach unten verschoben ist. Der Mittelwert wird auf etwa drei Viertel des ursprünglichen Wertes verringert. Tritt bei 70 °C noch Feuchtigkeit hinzu, ergibt sich eine weitere Absenkung des Mittelwertes auf etwa die Hälfte des ursprünglichen Wertes. Erhöhte Temperaturen wie auch die Einwirkung von Feuchtigkeit haben eine Zunahme der Streuung zur Folge. Bei kombinierter Einwirkung von Temperatur und Feuchtigkeit ist die Zunahme der Streuung vergleichbar mit der Abnahme des Mittelwertes (Abb. 3). Dies macht deutlich, dass die Verwendung mittelwertbezogener Abminderungsfaktoren bei der Dimensionierung Risiken birgt, da die wahre Abminderung unterschätzt wird. Abminderungsfaktoren sollten bezüglich der Streugrenzen definiert und verwendet werden.

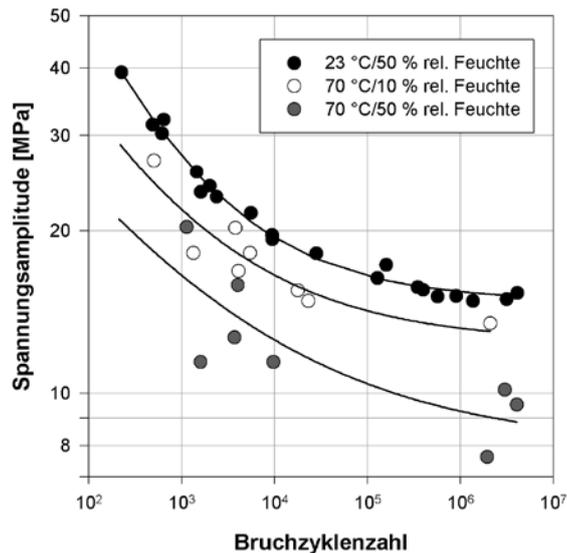


Abb. 3: Einfluss des Matrixharzes auf die Lebensdauer von  $\pm 45^\circ$ -GFK-Laminaten. Dargestellt ist die Schubspannung amplitude aus  $45^\circ$ -Zugversuchen. Das Spannungsverhältnis beträgt  $R=-1$ .

## Beanspruchungsanalyse und Lebensdauer-schätzung

### Bruchfunktion und Werkstoffausnutzungsgrad

Die Berechnung der Werkstoffbeanspruchung im Bauteil erfolgte mit ABAQUS. Dabei wurde jede unidirektional verstärkte Einzelschicht (UD-Einzelschicht) separat analysiert. Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Festigkeit jeder UD-Einzelschicht und dem physikalisch begründeten Versagen durch Faser- und Zwischenfaserbruch wurde die Bruchfunktion nach Puck benutzt (Abb. 4). Sie beschreibt Zwischenfaserbrüche, die entstehen können bei Beanspruchung senkrecht zur Faserrichtung, Schubbeanspruchung entlang der Faserrichtung oder Überlagerung aus diesen beiden Beanspruchungen. Dabei wird berücksichtigt, dass die Neigung zum Zwischenfaserbruch abnimmt, wenn zusätzlich noch eine Beanspruchung parallel zur Faserrichtung überlagert ist. Daher nimmt die Bruchfunktion die Form eines lang gestreckten Ellipsoids an. Die Spitzen dieses

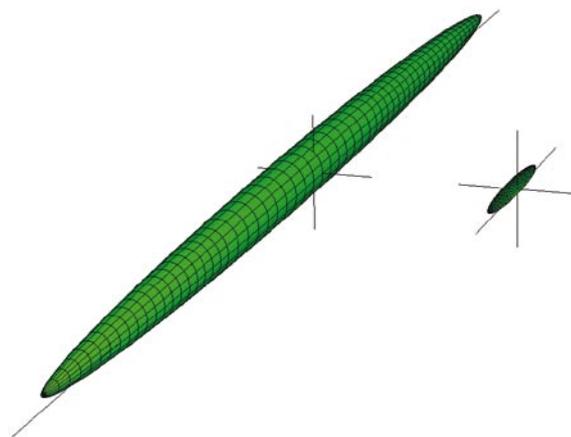
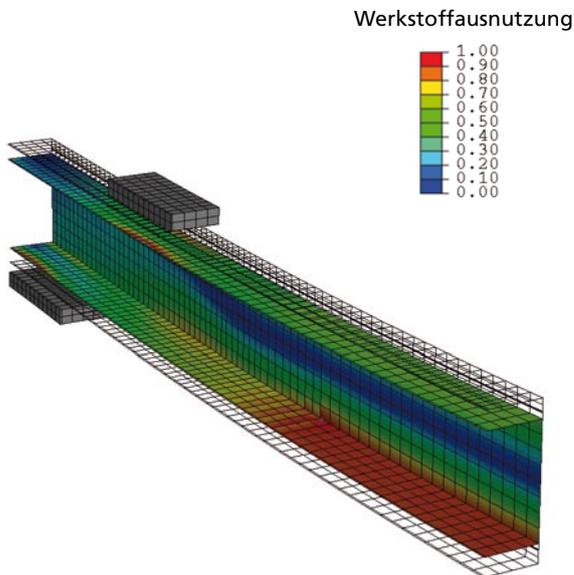


Abb. 4: Bruchfunktion für 2-D-orthotropes Materialverhalten und zugrunde liegende Versagensmoden nach Puck.



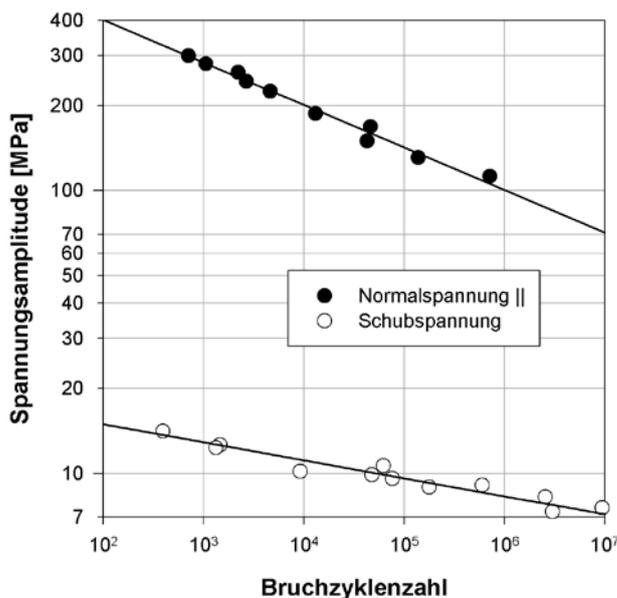
**Abb. 5:** FE-Modell des Versuchsholms (Vierpunkt-Biegetest). Dargestellt ist der auf Grundlage der Puck'schen Bruchfunktion für 1 000 000 Zyklen berechnete Werkstoffausnutzungsgrad im Schubsteg bei einer Lastamplitude von 22,8 Kilonewton.

Ellipsoide werden durch Ebenen weggeschnitten, die den Faserbruch bei Zug- bzw. Druckbeanspruchung parallel zur Faserrichtung beschreiben.

Auf Basis der Bruchfunktion wurde der Werkstoffausnutzungsgrad berechnet, der sehr schnell und einfach eine Aussage darüber zulässt, wie weit der Werkstoff bei der jeweils vorherrschenden Belastung noch vom Bruch entfernt ist. Der Werkstoffausnutzungsgrad wurde so definiert, dass er Werte zwischen null (keine Beanspruchung) und eins (Bruch) annimmt. Abbildung 5 zeigt den Werkstoffausnutzungsgrad im Schubsteg des Versuchsbauteils bei Biegebeanspruchung. Man erkennt, dass die Werkstoffausnutzung in der Zugzone auf der Unterseite des Holms bei der auf das Modell aufgegebenen Belastung gerade den Wert eins erreicht. In diesem Bereich besteht eine hohe Versagenswahrscheinlichkeit.

### Versagen unter zyklischer Belastung

Bei zyklischer Beanspruchung nimmt die vom Bauteil ertragbare Spannung ab. Dieser Sachverhalt wird durch die Wöhlerlinie beschrieben, die den Zusammenhang zwischen der Bruchzyklenzahl und der vom Werkstoff ertragbaren Spannung herstellt. Bei einer vorgegebenen, vom Bauteil zu ertragenden Zyklenzahl müssen deshalb in die Bruchfunktion entsprechend der Wöhlerlinie abgeminderte Festigkeiten eingesetzt werden. Diese Aufgabe wird dadurch erschwert, dass die Steigung der Wöhlerlinie von der Art der Beanspruchung abhängt. So verläuft die Wöhlerlinie bei Zugbeanspruchung parallel zur Faser steiler als bei Schubbeanspruchung (Abb. 6). Um den experimentellen Aufwand etwas einzuschränken, wurde die Annahme getroffen, dass je ein Steigungsparameter für faserdominiertes Verhalten und ein Steigungsparameter für matrixdominiertes Verhalten den Werkstoff ausreichend beschreiben. So wurden nur je eine Wöhlerlinie für Uni-direktional-0°-Material und eine Wöhlerlinie für Biaxial-±45°-Material benötigt. Die in Abb. 4 gezeigte Bruchfunktion schließt bei zyklischer Belastung ein kleineres Volumen ein.



**Abb. 6:** Wöhlerlinien für Zugbeanspruchung parallel zur Faser und Schubbeanspruchung.

## Dimensionierung

Auf Basis der reduzierten Festigkeiten für die vorgegebene, zu ertragende Zyklenzahl wurden in der Dimensionierung die Materialquerschnitte festgelegt, die nötig sind, um die vorgegebenen Kräfte zu ertragen. Das Versuchsbauteil wurde so dimensioniert, dass es bei einer Lastamplitude von 22,8 Kilonewton und einer Mittellast von 27,9 Kilonewton (entsprechend einem Lastverhältnis von  $R=0,1$ ) im Mittel 1 000 000 Zyklen bis zum Zwischenfaserbruch ertragen kann. Dabei wurde bewusst kein Sicherheitsfaktor vorgesehen, sodass der Werkstoffausnutzungsgrad gerade bei eins lag. Hierdurch bestand die Möglichkeit, die Berechnungsgrundlage zu verifizieren. Die Optimierung des Lagenaufbaus wurde mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) schrittweise durch Beurteilung des Spannungsverlaufs und der Hauptspannungsrichtungen, gefolgt von einer entsprechenden Modifikation des Lagenaufbaus (Hinzufügen, Weglassen oder Tauschen von Einzelschichten bestimmter Orientierungen) vorgenommen. Bei der Wahl von Lagenanzahl und Orientierung wurden praktische Gegebenheiten wie Gelegetyp, Faservolumenanteil, Gurt-Steg-Verhältnis und Krafteinleitung berücksichtigt.

Bei der Dimensionierung von Bauteilen gilt der Grundsatz, dass die Beanspruchung kleiner sei als die Beanspruchbarkeit. Im Fall der zyklischen Belastung bedeutet dies, dass die Anzahl der zu ertragenden Zyklen  $n$  kleiner sein muss als die Anzahl der Bruchzyklenzahl  $N$ . Bei der Bauteilprüfung wurde anstelle einer einstufigen Belastung eine gaußförmige Lastverteilung benutzt. Die Höhe der Belastung wurde so gewählt, dass das Versuchsbauteil den Test mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit ohne Zwischenfaserbruch übersteht. Abb. 7 zeigt das Kollektiv der Schubspannungsamplituden zusammen mit der Linie für 95 Prozent Überlebenswahrscheinlichkeit. Die Normalspannungsamplituden parallel zur Faser liefern nur einen geringen Schädigungsbeitrag. Die Wahrscheinlichkeit für Faserbruch ist gering.

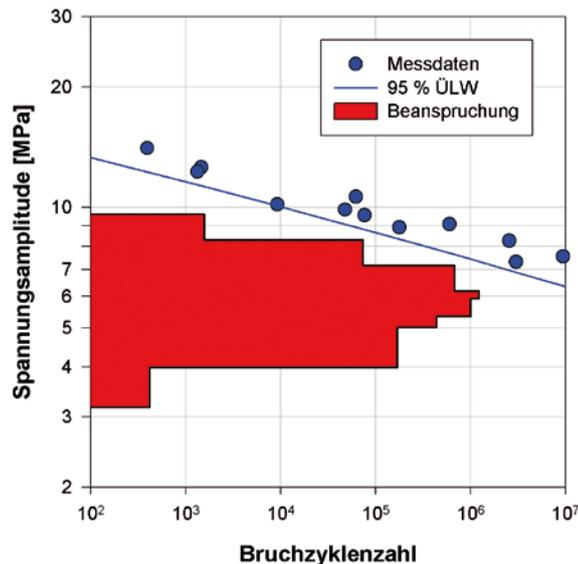
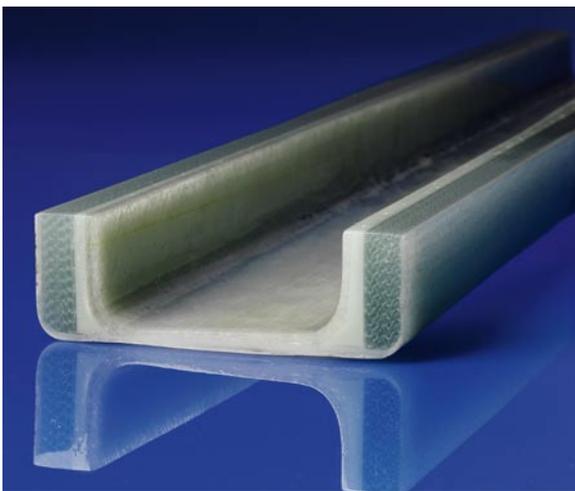
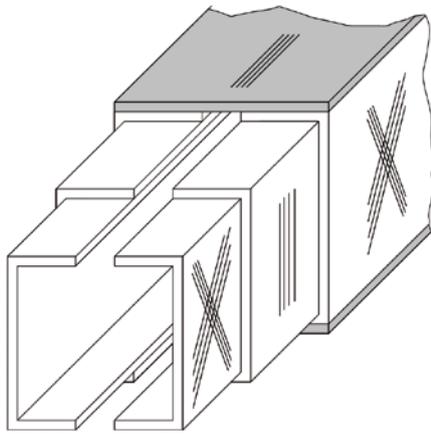


Abb. 7: Kollektiv der Schubspannungsamplituden im Test am Versuchsholm und Linie für 95 Prozent Überlebenswahrscheinlichkeit (ÜLW).



**Abb. 8:** Versuchsbauteil – Kastenträger mit geteiltem Steg aus C-Profilen.

### Fertigung des Versuchsbauteils

Die vorherrschende Art der Beanspruchung im Rotorblatt während des Betriebs einer Windenergieanlage ist Biegung. Dementsprechend stellt der Hauptbestandteil der tragenden Struktur eines Rotorblattes einen Verbund aus einem Schubsteg und einem Gurt dar, der sich im Wesentlichen wie ein Biegebalken verhält. Als Demonstrationsobjekt wurde deshalb ein Biegebalken ausgewählt, dessen Gestaltung an die Bauweise eines Blattes angelehnt wurde (Abb. 8). Schubsteg und Gurt wurden einzeln in Anlehnung an das bekannte Vakuuminfusionsverfahren gefertigt. Anschließend wurden die Einzelteile durch Kleben gefügt, wobei Klebstoffe und Härtingsverfahren eingesetzt wurden, die den Fertigungsbedingungen im Rotorblattbau entsprechen. Abschließend wurden Krafteinleitungselemente angebracht, um sicherzustellen, dass das Bauteil nicht im Bereich der Krafteinleitung versagt.

### Bauteilprüfung

Das Versuchsbauteil wurde in einer servohydraulischen Prüfmaschine unter zyklischer 4-Punkt-Biegung geprüft. Die Zyklenzahlen auf den entsprechenden Lastniveaus wurden ohne Versagen durchlaufen. Da der Versuch gemäß der Forderung »Beanspruchung = Beanspruchbarkeit« mit 95-prozentiger Überlebenswahrscheinlichkeit für Zwischenfaserbruch durchgeführt wurde, besteht keine Notwendigkeit, die Anwendbarkeit der Berechnungsmethode zur Dimensionierung infrage zu stellen. Eine Einschränkung besteht jedoch bezüglich der Durchmischung des Lastkollektivs. Der Bauteilversuch wurde mit den niedrigsten Amplituden beginnend hin zu den höchsten Amplituden durchgeführt, wobei die Zyklen auf jeder Stufe komplett durchlaufen wurden. Bei einer Änderung der Reihenfolge bzw. stochastischer Belastung kann das Versagen früher eintreten. Dieser Reihenfolgeeffekt ist ein spezieller Aspekt der Betriebsfestigkeit, der eine Erweiterung der in diesem Projekt untersuchten Schwingfestigkeit darstellt.

## Zusammenfassung

Vergleichende Untersuchungen der Schwingfestigkeit von faserverstärkten Kunststofflaminaten (FVK) haben gezeigt, dass die Verwendung moderner Gelege mit optimierter Bindung und verbesserter Faser-Matrix-Haftung zu einer Erhöhung der Lebensdauer unter zyklischer Belastung führen kann. Auch durch die Auswahl geeigneter Harzsysteme, die in ihren Eigenschaften so gestaltet sind, dass eine optimale Durchtränkung und Blasenfreiheit erreicht wird, lässt sich die Lebensdauer deutlich erhöhen.

Die Lebensdauer wird durch Einwirkung von Temperatur und Feuchtigkeit signifikant verringert. Dabei kann die Zunahme der Streubandbreite vergleichbar sein mit der Abnahme des Mittelwertes. Daher sollten die bei der Dimensionierung verwendeten Abminderungsfaktoren zur Beschreibung der Umgebungseinflüsse nicht auf den Mittelwert, sondern auf die untere Streugrenze bei vorgegebener Überlebenswahrscheinlichkeit bezogen werden.

Am Beispiel eines Biegebalkens wurde gezeigt, dass die Auslegung von FVK-Bauteilen mit neuen Harz- und Gelegesystemen auf Grundlage eines lokalen Spannungskonzeptes erfolgen kann. Dabei wird das Laminat schichtweise analysiert und zwischen Faser- und Zwischenfaserbrüchen unterschieden. Die Berechnungsgrundlage wurde am Bauteil unter mehrstufiger zyklischer Belastung überprüft. Das Ergebnis zeigt, dass die Berechnung unter Annahme linearer Schadensakkumulation konservativ ist. Weitere Untersuchungen sollten darauf abzielen, den Einfluss der Durchmischung von Lastkollektiven auf die Schadenssumme zu erfassen.

### Projektpartner

Abeking & Rasmussen Rotec GmbH & Co. KG,  
Lemwerder

### Ansprechpartner

Christof Nagel  
Telefon: +49 421 2246-477  
E-Mail [christof.nagel@ifam.fraunhofer.de](mailto:christof.nagel@ifam.fraunhofer.de)

### Institut

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM,  
Bereich Klebtechnik und Oberflächen,  
Bremen



# Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik CWMT

Das Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik (CWMT) in Bremerhaven betreibt industriennahe Forschung und Entwicklung zur Nutzung der Windkraft. Untersucht werden Materialien, Oberflächen, Verbindungen, Fertigungstechniken sowie die Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit von Anlagen. Das Center ist eine gemeinsame Einrichtung der beiden Fraunhofer-Institute für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen sowie für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) in Darmstadt. Damit stehen dem CWMT insgesamt 360 Mitarbeiter sowie eine Infrastruktur mit Prüffeldern, Laboren und Analytik auf mehr als 20000 Quadratmetern Fläche zur Verfügung.

Die zentrale Aufgabe des Fraunhofer-Centers ist die Fokussierung der Kompetenzen des IFAM und des LBF auf die Windenergienutzung und die Meerestechnik sowie deren branchenspezifische Weiterentwicklung in enger Kooperation mit der Wind- und Offshore-Industrie. Das Angebot reicht von der Grundlagenforschung bis zur Markteinführung von Produkten. Das Spektrum der Arbeiten umfasst den Einsatz neuer Materialien, Oberflächenschutzsysteme, Verbindungstechnologien, integrierter Sensoren und Aktuatoren sowie der dazugehörigen Verfahrens- und Fertigungstechnologien. Zum Beispiel wird das Design von Offshore-Bauwerken bezüglich Gewicht, Fertigungskosten und technischer Verfügbarkeit optimiert.

Das Fraunhofer-Center gliedert sich in zwei Bereiche. Im Bereich Technische Zuverlässigkeit werden numerische Werkzeuge und analytische Methoden entwickelt und spezifischen Aufgabenstellungen angepasst. Damit sollen die Qualität von Lebensdauervorhersagen erhöht und gleichzeitig der notwendige experimentelle Prüfumfang reduziert werden. Im Bereich Rotorblattprüfungen werden mittels hochmoderner Prüfstände Rotorblätter und deren Komponenten der aktuellen und nächsten Anlagengeneration statisch und dynamisch untersucht. In enger Verknüpfung von experimentellen und numerischen Verfahren werden neue Prüfverfahren entwickelt, neue Konstruktionen getestet und Lebensdauernachweise geführt.

Das Fraunhofer CWMT wird aus Landes- und Bundesmitteln gefördert.

## Land Bremen

Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa  
Senator für Wirtschaft und Häfen  
Senatorin für Bildung und Wissenschaft  
BIS Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung mbH

## Bund

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Mit einer Kofinanzierung aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit



Das Fraunhofer CWMT wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und aus Forschungsmitteln des BMU kofinanziert.

## Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik CWMT

Am Seedeich 45  
27572 Bremerhaven

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

### Leitung

Priv.-Doz. Dr. habil. Hans-Gerd Busmann  
Telefon: +49 471 902629-10  
E-Mail [hans-gerd.busmann@cwmt.fraunhofer.de](mailto:hans-gerd.busmann@cwmt.fraunhofer.de)

### Technische Zuverlässigkeit

Dr. Holger Huhn  
Telefon: +49 471 902629-21  
E-Mail [holger.huhn@cwmt.fraunhofer.de](mailto:holger.huhn@cwmt.fraunhofer.de)

### Rotorblattprüfung

Dr. Arno van Wingerde  
Telefon: +49 471 902629-23  
E-Mail [arno.van.wingerde@cwmt.fraunhofer.de](mailto:arno.van.wingerde@cwmt.fraunhofer.de)

# Aeroelastisch-hydrodynamische Simulation optimiert Offshore-Windenergieanlagen

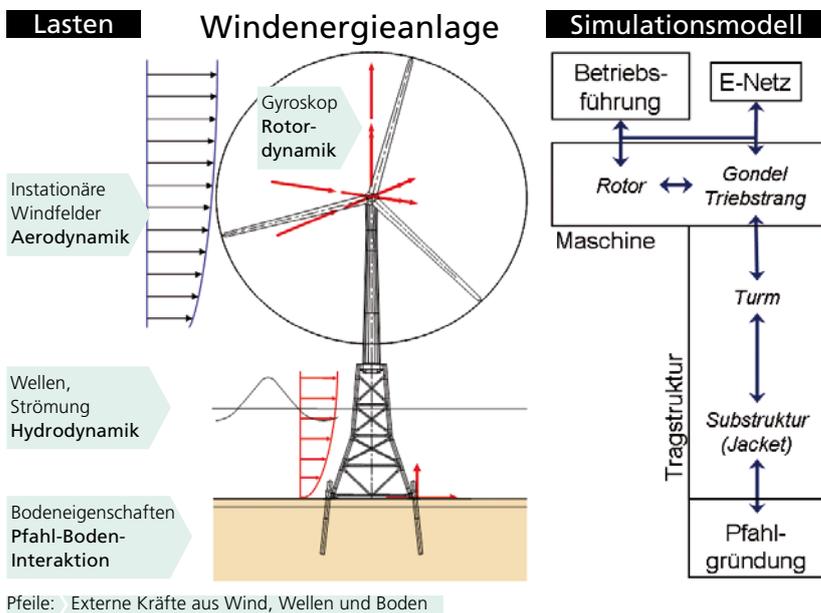
Das Fraunhofer CWMT setzt dynamische Simulationsprogramme ein, welche die Lasten von Wind und Wellen sowie die Eigenschaften des Meeresbodens miteinbeziehen. Dabei werden Windenergieanlagen als Gesamtsystem betrachtet und somit aeroelastische und hydrodynamische Eigenschaften sowie die Betriebsführung der Anlagen berücksichtigt. Dies dient beispielsweise der Verbesserung von Tragstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen in größeren Wassertiefen.

Wer gelegentlich mit dem Auto über Land fährt, kann leicht die Beobachtung machen, wie über die Jahre hinweg Windenergieanlagen von Generation zu Generation größer werden. Bei Offshore-Windenergieanlagen ist diese Entwicklung ebenfalls zu bemerken: Die Erfahrungen, die mit Anlagen einer bestimmten Größe gewonnen werden, ermöglichen es, die jeweils nächste Ge-

neration größer – und leistungstärker – zu konstruieren. Bei Offshore-Anlagen kommt außerdem eine größere Wassertiefe aufgrund der größeren Entfernung zur Küste hinzu – zum einen, weil dies mehr potenzielle Standorte erlaubt, zum anderen, weil küstennahe Standorte aus ökologischen und ästhetischen Gesichtspunkten oftmals nicht infrage kommen.

Mit steigenden Wassertiefen und zunehmenden Anlagengrößen werden die etablierten schwerkraft- und monopile-gegründeten Tragstrukturkonzepte für Offshore-Windenergieanlagen jedoch zunehmend ungeeignet. Deshalb werden derzeit neuartige, hauptsächlich verzweigte, bodengebundene Tragstrukturen entwickelt. Diese beinhalten beispielsweise Dreibein-Substrukturen, sogenannte Tripods, oder noch stärker aufgelöste Jacket-Substrukturen.

Moderne Windenergieanlagen werden derzeit mithilfe von aeroelastischen Modellen simuliert. Dabei werden folgende Komponenten, Eigenschaften und Lasten berücksichtigt: Betriebsführung der Anlagen, turbulente Windfelder, aerodynamische und mechanische Lasten auf dem Rotor, nichtlineare Wirkungen des Rotors als Rotations- und Beschleunigungssystem (Gyroskop), Maschinenhaus und Tragstruktur, elastische Bauteileigenschaften, mechanische Dämpfungen sowie die Kopplung des mechanischen Systems mit Generator und elektrischem Netz (Abb. 1). Das CWMT erweitert die Modellierungsansätze um möglichst realistische Offshore-Einflüsse, wobei unter anderem räumlich aufgelöste elastische Tragstrukturen, reguläre Wellen und unregelmäßige Seegangszustände sowie Kräfte zwischen dem Boden und der Gründungsstruktur im Detail berücksichtigt werden. Für diese Arbeiten setzt das CWMT auf eine Kooperation mit der Firma ADC (Aero Dynamik Consult Ingenieurgesellschaft mbH). ADC betreibt ein aeroelastisches Simulationsprogramm zur Berechnung der Gesamtdynamik von Windenergieanlagen (ADCoS, Aero-elastic and Dynamic Computation of Systems). Es basiert auf einem nichtlinearen Finite-Elemente-Ansatz und wird seit über 10 Jahren kontinuierlich weiterentwickelt.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung einer Offshore-Windenergieanlage (Mitte des Bildes), der auf die Anlage einwirkenden Lasten (linke Seite) und der Hauptkomponenten der Anlage (rechte Seite), wie sie in der aeroelastisch-hydrodynamischen Simulation berücksichtigt werden.

## Modellierung der Tragstruktur

Für die Arbeiten wird ein Balkenmodell der Tragstruktur in der Finite-Elemente-Software ANSYS® generiert. Hydrodynamischen Lasten durch Meereswellen und die Bodeneigenschaften werden in der speziellen Offshore-Simulationssoftware ANSYS® ASAS™ bestimmt. Mit diesen Ergebnissen und dem Balkenmodell erfolgt daraufhin eine ganzheitliche aeroelastische Simulation in ADCoS.

Den folgenden Berechnungen des Fraunhofer CWMT mit ADCoS liegt eine Offshore-Modellanlage zugrunde. Diese besteht aus einem Jacket im Tauchbereich, der einige Meter oberhalb der Wasserlinie als Rohrturm bis zur Gondel fortgesetzt wird. Die wichtigsten Parameter der Modellanlage sind:

- Tragstruktur: Wassertiefe 30 m, Gewicht 800 t, Höhe des Jacket 50 m, Turmhöhe 60 m, resultierende Nabenhöhe über dem Ruhewasserspiegel 80 m, Turmdurchmesser 5,5 m
- Boden und Gründung: Rammpfähle im Boden 8 Stück, Durchmesser 1,5 m, Länge 35 m, Standort: Ort der FINO-Testplattform vor Borkum
- Gondel: Leistung 5 MW, Nenndrehzahl Rotor 12,3 upm, Luvläufer, variable Drehzahl, Pitch-Regelung, Rotordurchmesser 126 m, Masse Rotor, Maschine oberhalb Tragstruktur 350 t, Nennwindgeschwindigkeit 13 m/s.

Abbildung 2 zeigt die Tragstruktur als Balkenmodell in ANSYS® und das daraus abgeleitete Balkenmodell in ADCoS. Die Positionen der Knoten um die geschweißten Verbindungsstellen sind in dem gezeigten Modell parametrisiert (Abb. 3). Diese Parametrisierung beinhaltet geometrische Eigenschaften (Durchmesser und Wandstärke der Rohre) und Werkstoffeigenschaften (Dichte, Elastizitätsmodul, Poisson'sche Zahl). Dieses Vorgehen ermöglicht es, das Modell schnell an die Ergebnisse der detaillierten Simulation der Schweißverbindungen anzupassen. Besonders wichtig ist hier die Nachgiebigkeit der Verbindungen. Diese kann sowohl für Ermüdungseigenschaften der Verbindungen als auch hinsichtlich der Eigenfrequenzen der Gesamtkonstruktion relevant werden.

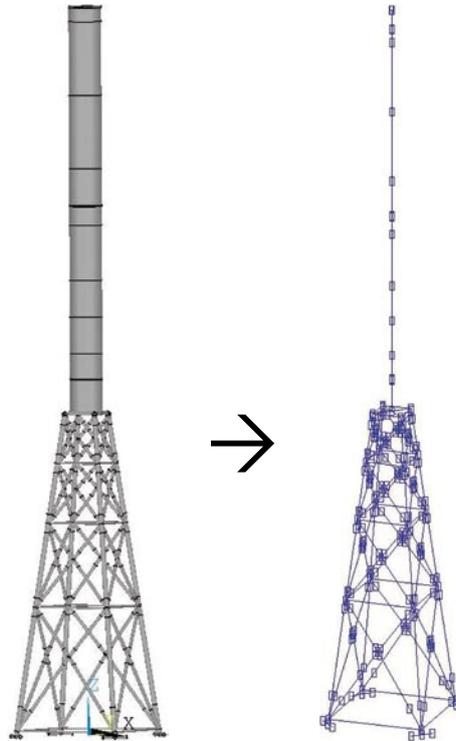


Abb. 2: Darstellung der Tragstruktur als Balkenmodell in ANSYS® (links) und ADCoS (rechts).

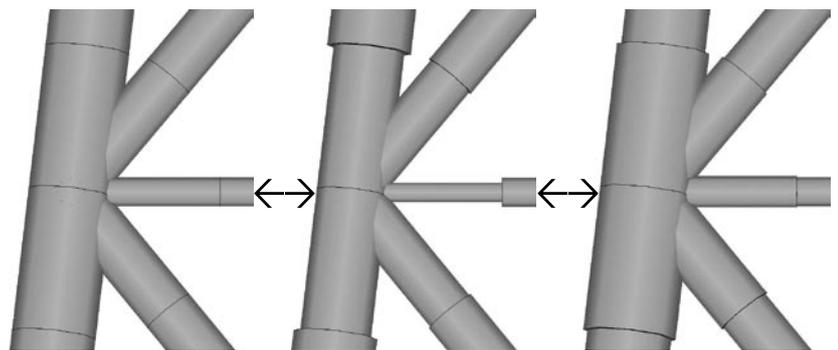


Abb. 3: K-Verbindung mit unterschiedlichen Durchmessern der Gurte (dicke, nahezu vertikale Rohre) und Streben (dünne Rohre).

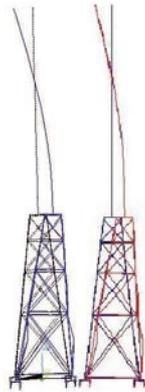


Abb. 4: Zweite Eigenmode der Tragstruktur in ANSYS® (links) und ADCoS (rechts).

Die geometrischen Eigenschaften und die Werkstoffeigenschaften der restlichen Stabelemente der Gittermaststruktur werden ebenfalls parametrisiert. Dies erlaubt eine effiziente Optimierung der Tragstruktur als Ganzes. ASAS™ berechnet die Wellenbeanspruchung quasistatisch. Das Balkenmodell für die ADCoS-Rechnungen wird validiert, indem Eigengewicht, Eigenfrequenzen und -moden der Tragstruktur in ADCoS und ANSYS® miteinander verglichen werden. Dabei zeigt sich, dass die Massen von ca. 800 Tonnen um weniger als ein Kilogramm voneinander abweichen und sich die Eigenfrequenzen um weniger als ein Prozent unterscheiden. Abbildung 4 zeigt schematisch die zweite globale Eigenmode in ANSYS® und in ADCoS. Die sehr gute Übereinstimmung ist sofort ersichtlich. Sowohl die globale Biegung über die gesamte Höhe als auch der lokale Verformungsanteil im unteren Bereich werden in ANSYS® und ADCoS sehr ähnlich wiedergegeben.

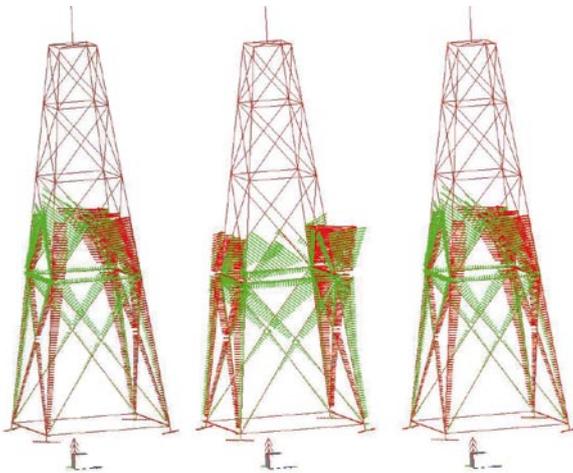


Abb. 5: Belastung der Tragstruktur (Linienlasten in N/m) durch eine lineare Airy-Welle mit einer Wellenperiodendauer von  $T=5,5$  s. Links bei  $t=0$ , Mitte bei  $t=T/2$  und rechts bei  $t=T$ .

#### Berechnung der Wellenlasten und der Pfahl-Boden-Interaktion

Abbildung 5 zeigt die in ASAS™ berechneten verteilten Wellenlasten auf die getauchten Streben der Gittermaststruktur für einen einfachen Lastzustand. Hierzu wird die beschriebene Struktur mit einer linearen Airy-Welle mit einer Höhe  $H=2,5$  m und einer Wellenperiodendauer von  $T=5,5$  s belastet. Die Abbildung zeigt die Belastungen bei  $t=0$  s (links), bei  $t=T/2$  (Mitte) und bei  $t=T$  (rechts). Die Periodizität der Welle und die Abnahme der Lasten mit der Wassertiefe werden sehr gut wiedergegeben.

ASAS™ erlaubt außerdem die nichtlineare Berechnung einzelner Pfähle und von Pfahlgruppen, einschließlich der Wechselwirkungen zwischen den Pfählen über Druckausbreitung im Boden. Der Boden am Referenzstandort besteht aus einer Schichtfolge aus unterschiedlich stark verdichteten Sanden und wird über Lastverschiebungskurven in Abhängigkeit von der Tiefe charakterisiert. Entsprechende Kennlinien können sowohl vom Benutzer als auch automatisch für vorgegebene Bodeneigenschaften definiert werden. Es ergeben sich nichtlineare Kennlinien für Pfahlverschiebung und Bodendruck. Die Einbindung in ADCoS erfolgt über eine Steifigkeitsmatrix für jeden Übergangsknoten Tragstruktur/Pfahlkopf.

## Beispiele der aeroelastisch-hydrodynamischen Simulation

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der aeroelastisch-hydrodynamischen Simulationen dargestellt. Sie verdeutlichen die Komplexität des Gesamtsystems. Abschließend wird an einem Beispiel der Anteil der hydrodynamischen Beanspruchung an der Gesamtbeanspruchung berechnet. Für die Berechnungen wurden folgende Lastzustands- und Modellierungsannahmen gewählt: mittlere Windgeschwindigkeit 12,5 Meter pro Sekunde, Standard-Windturbulenzmodell nach Kaimal, signifikante Wellenhöhe 2,5 Meter, Standard-Wellenspektrum nach JONSWAP, simulierte Zeit 600 Sekunden, Richtung von Wind und Wellen gemäß Abbildung 6.

Abbildung 7a stellt die resultierende Windgeschwindigkeit an Blatt 1 der Anlage, die Rotorgeschwindigkeit, den Blattwinkel und die Leistungsabgabe während der Zeitreihe über 600 Sekunden dar. Die vier Zeitreihen entsprechen den erwarteten Eigenschaften einer Windenergieanlage mit drehzahlvariablem Generator und kollektiver Pitch-Regelung, das heißt einer elektronisch geregelten Blattwinkelverstellung. Zwischen 0 und 400 Sekunden schwankt die Windgeschwindigkeit (grüne Kurve) um die Nennwindgeschwindigkeit von 13 Metern pro Sekunde. Die Pitch-Regelung für die Rotorblätter (rote Kurve) reagiert empfindlich, wodurch die Rotorgeschwindigkeit (blaue Kurve) und damit auch die Leistungsabgabe (schwarze Kurve) im Wesentlichen konstant bleiben.

Das Ergebnis einer schnellen Fourier-Transformation (FFT, Fast Fourier Transformation) der Windgeschwindigkeit aus Abbildung 7a ist in Abbildung 7b dargestellt. Da es sich hier um die lokale Windgeschwindigkeit an einem Rotorblatt handelt, findet sich der periodische Rückgang infolge des Turmschattens als scharfer Peak im Spektrum wieder. Bei einer mittleren Rotordrehzahl von 12 Umdrehungen pro Minute beträgt dieser Wert 0,2 Hertz, seine Oberwellenwerte betragen dementsprechend 0,4 bzw. 0,6 Hertz.

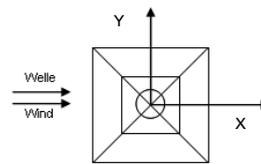


Abb. 6: Richtungen der Wind- und Wellenbeanspruchung auf die Windenergieanlage für die vorgestellten Berechnungen.

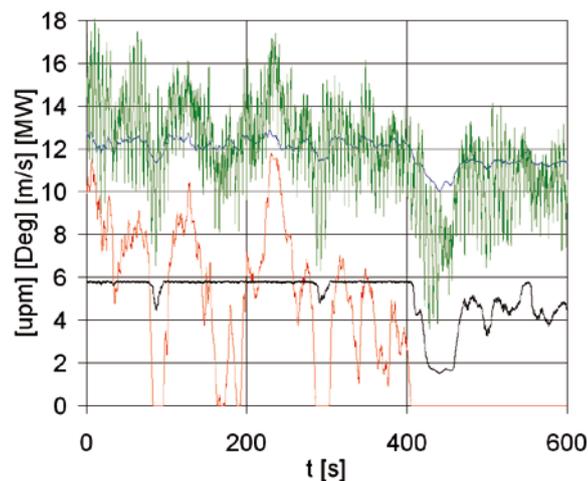


Abb. 7a: Windgeschwindigkeit am Blatt 1 (grün), Rotordrehzahl (blau), Blattwinkel (rot) und Leistung (schwarz) über die Zeit.

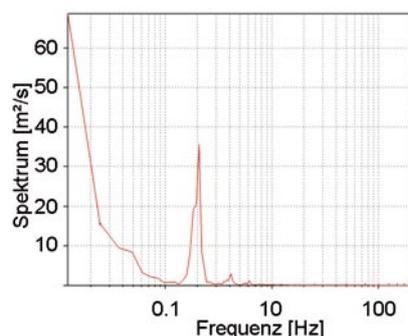


Abb. 7b: Spektrum der Windgeschwindigkeit an Blatt 1 mit dem auf den Turmschatten zurückzuführenden Peak.

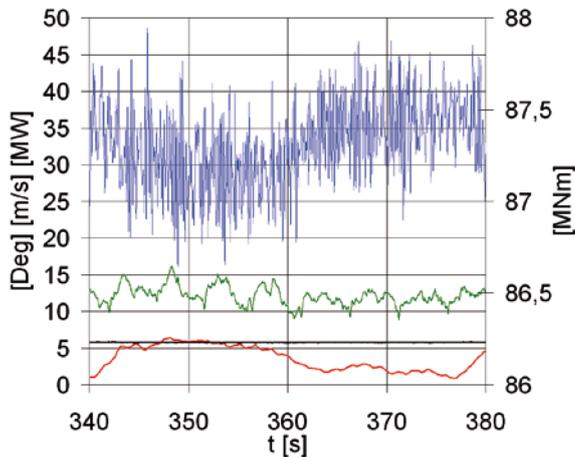


Abb. 7c: Windgeschwindigkeit an Blatt 1 (grün), Blattwinkel (rot), Leistung (dicke schwarze Linie) und Turmfußbiegemoment (blau) über die Zeit.

Weitere Informationen lassen sich aus einer Betrachtung auf einer kürzeren Zeitskala ziehen. Abbildung 7c zeigt das Turmfußbiegemoment im Bereich von 340 bis 380 Sekunden (blaue Kurve), ebenso die zugehörigen Zeitreihen für Windgeschwindigkeit (grüne Kurve), Blattwinkel (rote Kurve) und Anlagenleistung (schwarze Kurve). Mit einem Wert von rund 87 Meganewtonmetern befindet sich das Turmfußbiegemoment in der erwarteten Größenordnung. Bei konstanter Leistungsabgabe gehen höhere Windgeschwindigkeiten (340 bis 360 Sekunden) und größere Blattwinkel mit geringerem Rotorschub und damit auch geringerem Turmfußbiegemoment einher; das gilt auch umgekehrt (360 bis 380 Sekunden).

Die Rotorlasten werden über Gondel und Tragstruktur auf die Gründung übertragen, wobei die einzelnen Streben vorwiegend auf Zug und Druck belastet werden. Um den Anteil der Tragstrukturbeanspruchung durch die Wellen im Vergleich zur Gesamtbeanspruchung durch Wind und Wellen abzuschätzen, wurde ein Übergangsknoten Tragstruktur/Pfahlkopf an der dem Wind und der Welle zugewandten Seite analysiert.

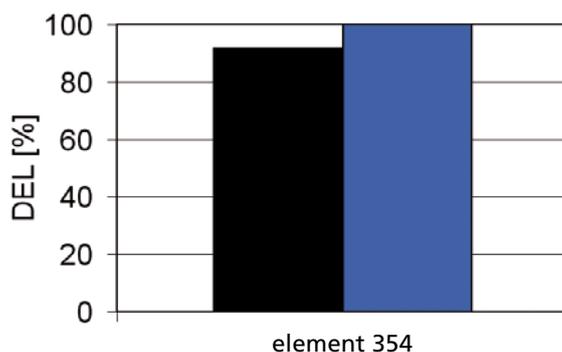


Abb. 8: Schadensäquivalente Axiallasten (DEL) in einem Eckelement der Substruktur (nur Wind: schwarz; Wind und Welle: blau).

ADCoS erlaubt die direkte Klassifizierung von Lasten mithilfe des sogenannten »Rainflow-Verfahrens« sowie die Bestimmung der resultierenden Lastspektrn und schadensäquivalenten Lasten (DEL, damage equivalent loads). Abbildung 8 zeigt die schadensäquivalente Axiallast am beschriebenen Knoten für reine Windlasten (schwarzer Balken) im Verhältnis zur schadensäquivalenten Axiallast aus Wind- und Wellenbelastung. (blauer Balken). Bei Anregung der Anlage durch Wind und Wellen liegt die schadensäquivalente Last lediglich rund 10 Prozent höher als bei reiner Windbelastung. Damit ist für die beschriebene Jacket-Konstruktion der Einfluss der Wellenlasten im kombinierten Lastfall von deutlich geringerer Bedeutung als der Einfluss der Windlasten. Dies ist ein typisches Resultat für Windenergieanlagen mit hochaufgelösten Substrukturen und auf die relativ geringen Durchmesser der getauchten Tragstrukturstreben zurückzuführen.

## Perspektive

Die weitere Entwicklung erstreckt sich auf mehrere Bereiche: Zum einen werden die Eigenschaften der Ramppfähle über nichtlineare Pfahlelemente direkt in ADCoS eingebunden. Mit diesem Schritt wird die Betrachtung der Pfahlsteifigkeit in ADCoS unabhängig vom spezifischen Lastzustand. Dadurch erhöht sich die Genauigkeit der Rechnungen bei gleichzeitig deutlich reduziertem Arbeitsaufwand.

Außerdem werden sogenannte »Superelemente« für die Knoten aufgelöster Tragstrukturen in ADCoS implementiert, die eine präzise Berücksichtigung der Flexibilität komplexer Knoten erlauben. Die Steifigkeitseigenschaften dieser Superelemente werden dabei in detaillierten Simulationen unter Verwendung von Volumenelementen bestimmt.

Darüber hinaus findet im Rahmen einer freiwilligen Kooperation ein Vergleich der Simulationsergebnisse des Fraunhofer CWMT/ADC mit entsprechenden Ergebnissen der in diesem Bereich international führenden Institutionen und Unternehmen statt (unter anderem: Risø aus Dänemark, Garrad Hassan aus Großbritannien, NREL aus den USA). Dabei werden die Resultate von Berechnungen bei komplexeren Lastzuständen und an verschiedenen Tragstrukturen verglichen.

### Projektpartner

Aero Dynamik Consult Ingenieurgesellschaft mbH,  
Renningen

### Ansprechpartner

Fabian Vorpahl  
Telefon: +49 471 902629-32  
E-Mail [fabian.vorpahl@cwmt.fraunhofer.de](mailto:fabian.vorpahl@cwmt.fraunhofer.de)

Holger Huhn  
Telefon: +49 471 902629-21  
E-Mail [holger.huhn@cwmt.fraunhofer.de](mailto:holger.huhn@cwmt.fraunhofer.de)

### Institut

Fraunhofer-Center für  
Windenergie und Meerestechnik,  
Bremerhaven

## Das Kleben hat Zukunft: Ein Festkolloquium mit Blick nach vorn – als Anerkennung für erfolgreiches Wirken in der Vergangenheit

Fröhliches Stelldichein, Wiedersehensfreude, interessante wissenschaftliche Fachvorträge und viel Anerkennung und Dank für das Lebenswerk des ausgeschiedenen IFAM-Institutsleiters Professor Dr. Otto-Diedrich Hennemann – das waren die prägenden Aspekte des Festkolloquiums »Zukunft Kleben« am 26. September 2007. Im Institutsgebäude an der Wiener Straße hatten sich mehr als 100 Vertreter aus Wirtschaft, Industrie und Forschung dazu eingefunden. Ihr Ansinnen: den Blick nach vorne zu richten auf die weitere Entwicklung der Klebtechnik – und zurück auf die Vergangenheit und das Wirken eines Mannes, der das IFAM zur größten unabhängigen Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der Klebtechnik in Europa gemacht hat. Eine ganze Branche wurde durch Otto-Diedrich Hennemann und seine Mitarbeiter – »die Klebtechniker aus Bremen« – über viele Jahre hin auf ihrem Erfolgsweg begleitet.

Bewusst wurde die zeitliche Nähe des Festkolloquiums zur 11. Fachtagung Fertigungstechnologie Kleben 2007 (FTK) am 27. und 28. September gewählt, die ebenfalls in Bremen stattfand. Professor Hennemann hat diese Veranstaltung von Anfang an aktiv mitgestaltet. Zwischen dem Festkolloquium und der FTK-Tagung hatten die Teilnehmer bei einer unterhaltsamen Abendveranstaltung im Atlantic Hotel Galopprennbahn ausreichend Gelegenheit, sowohl Fachliches als auch Privates zu besprechen und sich noch einmal mit dem ehemaligen Institutsleiter auszutauschen. Dieser hatte auf seinem Weg vom Einstieg ins IFAM 1978 – damals waren im Arbeitsgebiet Klebtechnik nur sechs Mitarbeiter beschäftigt – bis zum wohlverdienten Ruhestand 29 Jahre später nicht nur den IFAM-Institutsteil Klebtechnik und Oberflächen maßgeblich mit aufgebaut, sondern auch eine Vielzahl von Kontakten und Netzwerken geknüpft. Heute hat der Institutsteil mehr als 130 festangestellte Mitarbeiter und gestaltet in der Klebtechnikbranche wichtige Zukunftsentwicklungen entscheidend mit.

Und um diese Zukunft ging es in den Vorträgen der geladenen Fachleute, die allerdings angenehm unterbrochen wurden: In einer Pause zwischen den Referaten ergriff Professor Dr. Ulrich Buller, Vorstand Forschungsplanung der Fraunhofer-Gesellschaft, das Wort. Er erinnerte in einer sehr persönlichen Rede an seine ersten Begegnungen



Nach der Verleihung der Fraunhofer-Medaille zeigen Professor Ulrich Buller (rechts) und Professor Otto-Diedrich Hennemann (links) den Gästen des Festkolloquiums Medaille und Urkunde.

mit Professor Hennemann Ende der 1980er-Jahre und an seinen »Neid« auf den bereits damals geprägten Slogan: Kleben in Bremen. Eine von Professor Hennemanns vielen wegweisenden Ideen sei es gewesen, das im Institut erarbeitete Fachwissen im Rahmen einer überbetrieblichen Weiterbildung in die Breite der industriellen Anwendung zu transferieren. Professor Buller würdigte auch das rasante Wachstum, das das IFAM unter der Leitung von Professor Hennemann genommen habe – absehbar alleine schon an dem Neubau in der Wiener Straße: »Man muss in der Fraunhofer-Gesellschaft schon einiges vorweisen, um einen Bau in dieser Größe zu bekommen.« Dann zeichnete Professor Buller im Namen des Vorstandes der Fraunhofer-Gesellschaft Professor Hennemann in Anerkennung seiner besonderen Verdienste mit der Fraunhofer-Medaille aus: »Du hast sie verdient!«

Die Fachvorträge wurden eingeleitet mit einem Referat von Professor Dr. Wulff Possart von der Universität des Saarlandes in Saarbrücken. An Beispielen aus dem Metallkleben wurde die zentrale Bedeutung der Grenzflächen und Interphasen zwischen Klebstoffen und Fügepartikeln herausgestellt. Die Mechanismen der adhäsiven Wechselwirkung in der Grenzfläche und der durch

diese Wechselwirkung mit beeinflussten Strukturen der Interphase sind nach wie vor nicht vollständig verstanden.

Von der Theorie in die industrielle Praxis ging es im folgenden Beitrag. Dipl.-Ing Rudolf Henrich, Leiter der Testabteilung bei der Airbus Deutschland GmbH in Bremen, referierte über das Thema »Zerstörungsfreie Prüfung von Klebverbindungen«. Klebverbindungen stellen hier ähnlich hohe Anforderungen an die Prüftechnik wie beispielsweise Faserverbundwerkstoffe. So kann nach wie vor die Haftfestigkeit zwischen Grenzflächen zerstörungsfrei nicht direkt gemessen werden. Daher bedient man sich in der Qualitätssicherung indirekter Verfahren, die häufig in Kombination eingesetzt werden müssen, um Defekte zu lokalisieren und zu bewerten. Für die Zukunft wird auf das »Structural Health Monitoring« gesetzt, bei dem die zerstörungsfreie Prüfung bereits dauerhaft in die Struktur eingebunden ist.

Wer klebt, weiß: Ganz erheblich mitentscheidend für die Qualität einer strukturellen Klebung ist die richtige Oberflächenvorbehandlung der Fügepartner. Mit diesem Thema setzte sich Dr. Alfred Baalman vom Fraunhofer IFAM auseinander, der sich seit mehr als zwei Jahrzehnten im Institut mit dieser Frage befasst. »Kleben »oberflächlich« betrachtet – Verfahren und Konzepte zur Vorbehandlung« betitelte er seine Ausführungen. »Rund die Hälfte aller schadhaften Klebverbindungen lässt sich auf die falsche Vorbehandlung von Oberflächen zurückführen«, machte er die Bedeutsamkeit der Oberflächenvorbehandlung deutlich. »Mit modernen Methoden der Oberflächenanalyse, z. B. dem Inline-Monitoring-Verfahren, in Verbindung mit geeigneten Vorbehandlungsmethoden wie beispielsweise plasmagestützten Verfahren lässt sich die Sicherheit im Produktionsprozess signifikant erhöhen.«

Die Vortragsrunde wurde durch Dr. Olaf Lamerschop von der Henkel KGaA Düsseldorf komplettiert, der sich des Themas »Sicheres Kleben für strukturelle Anwendungen« annahm. Der Polymerchemiker erläuterte die Geschichte und die Trends des strukturellen Klebens und machte deutlich, dass allein schon aufgrund der enorm verbesserten Crashperformance Klebstoffe aus dem strukturellen Fügen nicht mehr wegzudenken



Professor Otto-Diedrich Hennemann (rechts) mit Gästen der beiden Veranstaltungen.

sind. Sicherheit, Umweltverträglichkeit, Komfort und Wirtschaftlichkeit sprechen für Klebstoffe. Für sicheres Kleben spielen im Dreieck Klebstoff, Applikation/Prüfung und Design/Simulation neben Vertrauen auch die Qualifikation des Personals eine große Rolle – eine Aufgabe, der sich ja auch das Fraunhofer IFAM verschrieben hat.

So fachlich und ernst es am Mittag zugeht, so ungezwungen und dennoch informativ verlief die Abendveranstaltung im Atlantic Hotel Galopprennbahn. Die gerne genutzte Möglichkeit zum Beisammensein und Plausch wurde durch zwei weitere Beiträge im wahrsten Sinne des Wortes aufgelockert. Professor Dr.-Ing. Walter Brockmann, seines Zeichens Vorgänger von Professor Hennemann als Leiter der Klebtechnik im Fraunhofer IFAM, erinnerte auf seine unnachahmliche Art an die Anfänge des Instituts. Nach der IFAM-Gründung 1968 hätten sich zunächst nur Ingenieure mit der Klebtechnik beschäftigt, wegen der zunehmenden Komplexität der Materie waren später auch Physiker (wie Professor Hennemann) und Chemiker gefragt. Wichtige Anstöße kamen damals wie heute aus der Luftfahrtindustrie.

In einem richtungsweisenden BMBF-Verbundvorhaben (Fertigungstechnologiekleben – FTK) mit 22 Partnern aus der Forschung sowie Klebstoffherstellern und -anwendern gelang es erstmals, Firmen zusammenzubringen, die am



Katrin Plümpe (links), Professor Otto-Diedrich Hennemann und seine Frau Edeltraud im Gespräch über den Vortrag »Kunst und Kleben«.



Professor Walter Brockmann während seines Vortrags über die Entwicklung der Klebtechnik und den Beitrag, den das Fraunhofer IFAM dazu geleistet hat.

Markt Konkurrenten sind. Ein Teilvorhaben des Verbundprojektes – an dessen Zustandekommen Professor Hennemann ganz wesentlichen Anteil hatte – war das Kleben von verölten Stahlblechen. »Die Bremer haben hier gemeinsam mit anderen Beteiligten Pionierarbeit geleistet. Sie haben in diesem Projekt bewiesen: Es geht – und zwar auch bei strukturellen Klebungen. Dies war besonders wichtig für den Einsatz der Klebtechnik in der Automobilindustrie«, verdeutlichte Professor Brockmann. »Dieses Projekt hat die Klebtechnik sehr gefördert. Ohne die Hartnäckigkeit von Professor Hennemann hätte die Klebtechnik viel länger gebraucht, um sich in bestimmten Branchen durchzusetzen«, lobte Professor Brockmann seinen Nachfolger.

Einen unerwarteten Schlusspunkt unter die vielen Beiträge des Tages zum Thema Kleben setzte die Hamburger Kunst- und Kulturwissenschaftlerin Katrin Plümpe. Sie referierte als Überraschungsgast zum Thema »Kunst und Kleben« – eine Verbindung, die Professor Hennemann stets besonders am Herzen gelegen hat. Im Gegensatz zu vielen Wegbegleitern hatte er die Nähe des Klebens zur Kunst immer klar vor Augen gehabt. Eine Einschätzung, die durch den Vortrag von Katrin Plümpe bestätigt wurde. Sie begann ihren »klebtechnischen« Streifzug durch die Kunstgeschichte zeitlich weit vor der IFAM-Gründung – nämlich bei den Malereien in der berühmten Höhle von Lascaux. Wie damals bedienen sich auch heute die Künstler der jeweils am »Markt« verfügbaren Klebstoffe. Von daher hat die Entwicklung der Klebtechnik auch Kunstrichtungen zu jeder Zeit maßgeblich mitbeeinflusst.

Am Ende stand rauschender Applaus für einen gelungenen Vortrag – so, wie es schon mehrfach am Tag Beifall für das Lebenswerk von Professor Hennemann gegeben hatte, dem dieser Tag gewidmet war.



**Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse**  
(geschäftsführend)  
– Formgebung und Funktionswerkstoffe –

Telefon: +49 421 2246-100  
Telefax: +49 421 2246-300  
E-Mail [info@ifam.fraunhofer.de](mailto:info@ifam.fraunhofer.de)

**Standort Bremen:**

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM

Wiener Straße 12  
28359 Bremen  
Telefon: +49 421 2246-0  
[www.ifam.fraunhofer.de](http://www.ifam.fraunhofer.de)

**Standort Dresden:**

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM

Winterbergstraße 28  
01277 Dresden

**Standort Bremerhaven:**

Fraunhofer-Center für  
Windenergie und Meerestechnik CWMT

Am Seedeich 45  
27572 Bremerhaven

**Dr.-Ing. Helmut Schäfer**  
– Klebtechnik und Oberflächen –

Telefon: +49 421 2246-401  
Telefax: +49 421 2246-430  
E-Mail [ktinfo@ifam.fraunhofer.de](mailto:ktinfo@ifam.fraunhofer.de)

**Herausgeber:**

Fraunhofer-Institut für  
Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung IFAM

ISSN 1439-6009  
Alle Rechte vorbehalten.  
Nachdruck nur mit Genehmigung  
der Redaktion.

**Koordination und Redaktion:**

Martina Ohle  
Brigitte Beißel

Mitarbeit:  
Edda Debrassine  
Dagmar Fischer  
Andrea Wittich

Satz und Layout:  
Gerhard Bergmann  
SOLLER Werbestudios GmbH

Vorwort und Festkolloquium  
Texte:  
Kai-Uwe Bohn.

Bildbeschreibungen finden Sie auf:

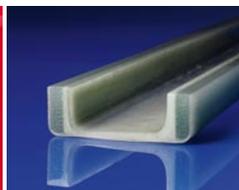
Seite 27



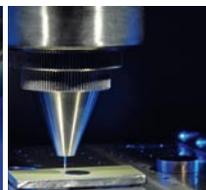
Seite 69



Seite 86



Seite 54



Seite 22 und 39



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

