



**Fraunhofer** Institut  
Fertigungstechnik  
Materialforschung



**06/07**

**Jahresbericht  
2006/2007**

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung (IFAM)

**Jahresbericht 2006/2007**



## Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe

Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe .....	29
Kompetenzen und Know-how .....	30
Arbeitsgebiete und Ansprechpartner .....	32
Ausstattung .....	33
Gedruckte Sensorik .....	34
Perspektiven in Schaum – Lost Foam .....	37
Advanced Protection Systems (APROSYS) für mehr Sicherheit auf Europas Straßen .....	40
Gasphasensynthese katalytisch aktiver intermetallischer Legierungen .....	43
Werkstoffe zur Elektronikkühlung .....	45
Metallischer Siebdruck als Fertigungsverfahren für dreidimensionale mikrostrukturierte Bauteile .....	48
PM-Aluminium für Leichtbauteile ...	51
Preise/Ehrungen .....	55

## Bereich Klebtechnik und Oberflächen

Bereich Klebtechnik und Oberflächen .....	59
Kompetenzen und Know-how .....	60
Arbeitsgebiete und Ansprechpartner .....	62
Ausstattung .....	63
Beim biomolekularen Oberflächen- und Materialdesign dienen Lösungen der Natur als Vorbild ....	64
»Colour-Matching« in der Automobilindustrie: Neuentwicklung ermöglicht Zeit- und Kostenersparnis .....	68
Der Traum vom Kleben und »Entkleben« auf Knopfdruck rückt ein Stück näher .....	72
Langsame Korrosionsvorgänge schnell erkannt: Elektrochemische Methoden zur Kurzzeitprüfung von Schutzbeschichtungen .....	76
Entformen von Faserverbundwerkstoffen ohne flüssige Trennmittel durch funktionelle Plasmapolymerschichtungen .....	81
Einflüsse von Prozessparametern und Härtingsbedingungen auf die Eigenschaften von UV-gehärteten Acrylaten und Epoxiden .....	86
Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik CWMT.....	93
Energie der Zukunft wird vor den Küsten erzeugt.....	94
Kleben verbindet .....	99



## »Vision ist die Kunst, Unsichtbares zu sehen.«

Jonathan Swift – angloirischer Schriftsteller, 1667–1745

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

»Schätze der Forschung«

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts hat sich die Geschwindigkeit des Fortschritts rasant beschleunigt. Während zwischen der Erfindung des Schreibens und des Buchdruckes, der Kerze und der Glühlampe noch Jahrhunderte lagen, wird heutzutage der zeitliche Abstand zwischen der Entstehung von Wissen und der Anwendung von Wissen immer kürzer.

Unserem Wissen und auch unserer Vision obliegt es, immer wieder zu beurteilen, welchen Schatz wir bei der Forschung in den Händen halten. Als in den frühen fünfziger Jahren die ersten Rechenungetüme für kommerzielle Nutzung auftauchen, die mit ihren Tausenden von Röhren ganze Zimmerfluchten füllten und unerträgliche Hitze entwickelten, schätzte Watson den Bedarf der US-Wirtschaft auf höchstens fünf Stück. Heute wissen wir alle, wie sehr der Computer unser Leben verändert hat.

Die schnelle Entwicklung auf dem Technologie-sektor erfordert produktionsnahe Forschungs- und Entwicklungsleistungen, die zeitnah zusammen mit der Industrie umgesetzt werden. Das IFAM hat auch im Jahr 2006 Vision und Wissen verbunden und Schätze der Forschung erkannt und sichtbar gemacht. Das Interesse unserer Kunden an den neuen Entwicklungen und die konsequente Umsetzung zeigen uns den Bedarf an innovativen Zielsetzungen und Anwendungen. Denn erst der Erfolg am Markt macht eine Erfindung zur Innovation.

Sehr vielversprechend und mit hohem Anwendungspotenzial haben sich im vergangenen Jahr

am IFAM neue interdisziplinäre Ansätze zur technologischen Umsetzung der Funktionsintegration entwickelt. Das »Functional Printing«, das direkte Eingießen von RFID-Tags in Aluminiumbauteile, oder die Applikation funktionaler Schichten auf Strukturbauteile sind nur einige Beispiele dafür, dass Synergien aus verschiedenen Kompetenzfeldern zu sehr aussichtsreichen Ergebnissen führen.

Arbeiten zur Langzeitstabilität umgebungsbeanspruchter Materialverbunde und Oberflächen werden und wurden im Bereich Klebtechnik und Oberflächen in den Mittelpunkt der Betrachtungen gestellt. Interdisziplinarität ist hierbei der Schlüssel zum Erfolg. Dies gilt ebenfalls für das zukunftsweisende Arbeitsgebiet »Biomolekulares Oberflächen- und Materialdesign«. Für viele technische Fragestellungen hält die Natur bereits Konzepte bereit. Die Verknüpfung von Materialwissenschaft und Biologie ermöglicht es, diese Konzepte in technische Lösungen umzusetzen und industriell nutzbar zu machen. Diesen Weg wollen wir weiter gehen.

Der Fortschritt unseres Instituts basiert auf vielen Säulen. Insbesondere den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern möchten wir für ihre ideenreiche, hoch motivierte und bedeutende Arbeit danken. Nur mit Wissensdrang, Engagement und Mut zum Querdenken entdecken wir Neues. Wir freuen uns, dass wir auch in diesem Jahr mit guten Ergebnissen und erfolgreichen Projekten unsere Auftraggeber und Kooperationspartner überzeugen konnten, und danken für das entgegengebrachte Vertrauen.

Ein herzliches Dankeschön allen, die an diesem Erfolg beteiligt waren.



M. Busse



O.-D. Hennemann

## »Wir wollen unsere führende Position weiter ausbauen und gleichzeitig Raum für neue Ideen schaffen«



Die Erfolgsstory des IFAM-Institutsteils Formgebung und Funktionswerkstoffe geht weiter. Im Rückblick freut sich Professor Dr.-Ing. Matthias Busse darüber, im engen Kontakt mit den Mitarbeitern die richtigen Entscheidungen getroffen zu haben. Der Wachstumskurs soll fortgesetzt werden – aber mit Augenmaß. Das Erreichte nachhaltig zu sichern, ohne den Blick für die längerfristige Entwicklung zu verlieren: Das ist nicht nur das Ziel für den Institutsteil, sondern auch für das gesamte IFAM, dessen Geschäfte Matthias Busse jetzt führt.

Professor Dr.-Ing. Busse

Herr Busse, Ihre ersten drei Jahre im IFAM waren stark geprägt von einer Neuausrichtung und Neupositionierung des Institutsteils Formgebung und Funktionswerkstoffe. Vergangenes Jahr konnten Sie dann zufrieden sagen: Turn-around geglückt, den Visionen ein Stück näher gekommen. Nun sind weitere zwölf Monate vergangen. Haben Sie eine Konsolidierungsphase eingelegt und Früchte geerntet, oder wurde weiter kräftig ausgesät?

Die Auftragslage ist besser denn je. Es hat sich also 2006 keine Konsolidierung ergeben – die positive Entwicklung hat sich vielmehr mit voller Dynamik und ohne Knick fortgesetzt. Wir haben wieder einen Wachstumskurs eingeschlagen – und zwar nicht nur bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern, sondern auch bei den Technikern. Und selbst in der Universität an meinem Lehrstuhl für endformnahe Fertigungstechnik ist die Mitarbeiterzahl angewachsen. Wir haben also in ganzer Breite – nicht nur numerisch, sondern auch thematisch – überall hinzugewonnen. Wir schaffen zurzeit aktiv Arbeitsplätze in einer Hochtechnologie. Damit bekommen auch Studenten und Diplomanden zusätzliche Berufsperspektiven, die am Lehrstuhl studiert haben.

Ihr Aufgabenfeld hat sich seit dem Frühjahr 2006 ja erweitert: Sie führen seit diesem Zeitpunkt die Geschäfte des Gesamtinstituts IFAM. Was bedeutet das konkret für Sie?

Die Geschäftsführung des Gesamtinstituts ist nun nach drei Jahren Zugehörigkeit an mich übergegangen. In solch einer Verantwortung schärft sich natürlich schnell der Blick für das Wohl des ganzen Instituts. Man braucht einige Zeit, um das gesamte IFAM kennenzulernen, aber diese Zeit habe ich mir genommen – und genutzt. Mittel- und langfristig liegt mir am Herzen, die internen Chancen am IFAM besser zu nutzen. Wir wollen einerseits die thematische Eigenständigkeit der beiden Institutsteile erhalten. Andererseits wollen wir aber die Synergien, die durch nahe beieinander liegende Themenfelder der Institutsteile möglich sind, für die Zukunft stärker nutzen.

Im Rückblick kann man viele Schritte besser einordnen und bewerten, deren Konsequenzen man in dem Moment, in dem man sie wagt, noch gar nicht absieht. Auf den Punkt gebracht: Was hat dazu geführt, dass der Institutsteil Formgebung und Funktionswerkstoffe heute so erfolgreich ist?

Tatsächlich geht man bei einer strategischen Neuausrichtung ein wenig auch ins Ungewisse. Heute wissen wir, was zum Erfolg geführt hat. Zum einen hat sich bewährt, dass wir die vom Markt vorgegebenen Themenstellungen in unserer Forschung und Entwicklung aufgegriffen und umgesetzt haben. Im Rückblick zeigt sich dabei, dass wir mit der Fokussierung unserer Kernkompetenzen und der Definition unserer Geschäftsfelder das richtige Händchen gehabt haben. Wir haben uns offenbar auf die richtigen Themen konzentriert. Wir haben zudem die richtigen Partner in der Industrie gefunden, die eben diese Themen mit uns weitertreiben. Für mindestens genauso wichtig halte ich aber den überfachlichen Aspekt – und der betrifft die Menschen, die hier arbeiten und diese Themen bewegen. Aus diesem ganzen Umfeld heraus erwuchs für die Beschäftigten die Motivation, mit einer geschlossenen Mannschaftsleistung deutlich mehr als das übliche Pensum zu bewältigen. Diese hohe Motivation ist im Moment wirklich da – und das ist der zweite wichtige Aspekt, wenn man nach Erfolgsgründen fragt.

Nun ist so ein Institutsteil ja – trotz »mannschaftlicher Geschlossenheit« – ein Gebilde mit vielen unterschiedlichen Menschen. Sie haben zahlreiche Mitarbeiter, die meist schon viel länger hier sind als Sie. Wie bekommt man die dazu, einen neuen Weg einzuschlagen, daran zu glauben und an einem Strang zu ziehen?

Ganz wichtig ist das sehr intensive Gespräch mit allen Beteiligten in solch einer Phase. Es sind viele Runden erforderlich, in denen man gemeinsam analysiert und diskutiert – auch kontrovers, um wirklich auf die Schwierigkeiten mancher Aspekte zu stoßen. Am Ende muss man diesen Findungsprozess in gemeinsamer Diskussion dann aber in einen Konsens überführen. Wir arbeiten kontinuierlich daran, aus der Sache heraus einen gemeinsamen Weg – geleitet von einer Vision, die von allen verstanden wird – zu entwickeln. Wenn das gemeinsame Fernziel in Form unserer Vision »Smarter – Smaller – Safer« von allen akzeptiert ist und sich alle dahinter aufstellen, bleibt nur noch die Frage: Wie beschreiten wir jetzt diesen Weg? In diesen Prozess hat sich hier jeder sehr kreativ eingebracht – mit dem Erfolg, dass wirklich alle an einem Strang in die gleiche Richtung ziehen. Das Ganze haben wir mit intensiver Arbeit unterfüttert, in enger Absprache mit Firmen, Partnern und Förderern.

Wie ist der Institutsteil in Bremen und der Region verankert, wie ist sein »Standing« in Deutschland oder sogar über die Grenzen hinweg? Und wohin möchten Sie sich entwickeln?

Ein Beispiel: Industriefirmen oder bestimmte Automarken haben einen Ruf. Solch ein Ruf muss sich entwickeln, muss wachsen. Für uns gilt das entsprechend. Ich habe den Eindruck, dass wir in der Außenwirkung in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte gemacht haben. Wir werden zunehmend wahrgenommen. Das hängt auf Bremer Ebene sicherlich damit zusammen, dass wir im Rahmen der Exzellenzinitiative mit der Universität, aber auch mit anderen Instituten und Firmen in der Region sehr fruchtbar zusammengearbeitet haben. Diese Entwicklung gilt auch für unsere nationalen Aktivitäten. Unser Kontaktfeld ist deutlich größer geworden. Die Anzahl und die Qualität unserer Industriekontakte in Deutschland sind sehr stark gewachsen. Und auch auf internationaler Ebene läuft es gut. In Asien bahnen sich einige Projekte an, über die wir vor ein, zwei Jahren noch gar nicht nachgedacht haben. Gerade in den »Emerging Markets« verzeichnen wir eine Expansion: Wir haben konkrete Projekte in Russland und China sowie Anbahnungen in Südkorea. Im Bereich der Gießereitechnik gibt es enge Kontakte in die USA, wir haben dazu Verträge mit amerikanischen Partnern unterschrieben. In diesem Zusammenhang planen wir hier ein Entwicklungszentrum für die Lost Foam-Technologie. Dieses wird so aufgestellt, dass es weltweit führend sein wird – technologisch und von der Ausstattung her. Es war ja mit meinem Amtsantritt als mittelfristiges Ziel postuliert worden, die Lost Foam-Technologie auf- und auszubauen. Mitte 2007 werden wir das Entwicklungszentrum soweit umgesetzt haben. Damit haben wir ein weiteres wichtiges Alleinstellungsmerkmal in einer solchen Technologie für uns erarbeitet. Auch diese Investition gibt uns die Möglichkeit, weltweit zu akquirieren und Kunden nach Bremen zu holen.

**Wenn Ihre Leistungen zunehmend nachgefragt werden und Sie sich weiter entwickeln wollen, brauchen Sie aber auch neue Leute ...**

Richtig. 2006 haben wir bereits rund zehn Prozent mehr Mitarbeiter gewonnen, das wird sich 2007 in etwa gleicher Größenordnung fortsetzen. Man muss aber darauf achten, nicht zu schnell zu wachsen – denn neue Mitarbeiter müssen auch vernünftig eingearbeitet werden. Wir wollen den Bogen nicht überspannen; es geht um die richtige Balance. Geeignete Mitarbeiter zu finden, ist für uns ein spannendes Thema: Wir suchen permanent. Das ist ein kontinuierlicher Prozess auf allen Kanälen, die uns zur Verfügung stehen. Eine wichtige Rolle spielt dabei der eigene Nachwuchs, also Leute, die an der Bremer Uni studiert haben und hier am IFAM über Studien-, Diplom- und Projektarbeiten bereits bekannt sind. Und zwar nicht nur aus dem Fachbereich Produktionstechnik – wir stellen auch Leute aus den naturwissenschaftlichen Fachbereichen oder der Elektrotechnik ein. Neben diesem »Bremer Kanal« schreiben wir auf breiter Front aus. Wir versuchen, von anderen Standorten und Universitäten, aber auch aus der Industrie Mitarbeiter zu gewinnen. Es ist uns schon mehrfach gelungen, erfahrene Leute aus der Industrie für das IFAM zu begeistern. Das ist für uns ein Erfolg, der uns stolz macht. Jemanden aus der Industrie für das IFAM zu gewinnen, lässt den Rückschluss zu: Wir weisen hier Arbeitsbedingungen und ein Umfeld auf, das die Leute zu genau diesem Schritt bewegt. Es scheint sich immer weiter herumsprechen, dass das IFAM eine sehr gute

Adresse und ein attraktiver Arbeitgeber ist. Sicherlich ist auch das eine Folge der kontinuierlich gestiegenen Reputation des gesamten Instituts.

**Sie haben eine aktive Außendarstellung immer als einen sehr wichtigen Faktor Ihrer Strategie gesehen ...**

... und dadurch hat sich die Aufmerksamkeit, die uns entgegengebracht wird, deutlich verstärkt. Eine der strategischen Weichenstellungen, nämlich der Aufbau des Marketings, hat sehr schöne Früchte getragen. Wir treiben das sehr aktiv und umsichtig voran. Davon profitiert das Institut auf breiter Ebene. Das Spektrum reicht dabei von der richtigen Platzierung unserer Veröffentlichungen über interessante Berichte und Broschüren bis hin zur guten Auswahl und professionellen Vorbereitung von Messeauftritten und Firmenpräsentationen. Wir sind insgesamt sowohl in Anzahl als auch Qualität besser geworden. Wir publizieren bewusst nicht nur in Fachzeitschriften – was natürlich dennoch den Kern der Veröffentlichungsarbeit bildet –, sondern auch in populärwissenschaftlichen Publikationen. Denn es ist heute wichtiger denn je, sich nicht nur einem Fachpublikum, sondern auch einer breiteren Öffentlichkeit zu präsentieren. Die Wirksamkeit solcher Aktivitäten ist verblüffend – und trägt in der Summe dazu bei, dass wir besser und viel intensiver als noch vor ein paar Jahren wahrgenommen werden.

**Wo sehen Sie Ihr Institut in zwölf Monaten, wo in zehn Jahren?**

Kurz- und mittelfristig geht es darum, weiteres Wachstum zu generieren und damit Arbeitsplätze zu schaffen. Aber mit Augenmaß: Wir wollen uns nicht überheben und ins Stolpern kommen. Es ist eine Herausforderung für die nächsten zwölf Monate, das derzeitige Wachstum umzusetzen, die richtigen Leute zu finden und sie zu integrieren. Wir müssen einerseits viele Aufträge und Projekte bewältigen, dürfen aber auch nicht aus dem Blick verlieren, dass wir mittelfristig weitere Projekte akquirieren müssen – auch wenn beispielsweise die Akquise für 2007 schon Mitte 2006 erfreulich weit fortgeschritten war, was sehr ungewöhnlich ist. Wir dürfen also beim Einwerben neuer Vorhaben nicht nachlassen, müssen vielmehr eine Balance finden: zwischen der seriösen Projektarbeit mit neuer Mannschaft auf der einen Seite, aber auch beim Schaffen kreativer Freiräume insbesondere für die erfahrenen Mitarbeiter auf der anderen Seite. Denn alle sollen natürlich neben ihrer Tagesarbeit schon jetzt das nächste Projekt vorausdenken, das sie vielleicht erst in zwei oder drei Jahren beginnen. So bekommen wir eine Kontinuität in unser Geschäft. Es darf nicht in eine Wellenbewegung ausarten: Jetzt haben wir gerade ein Hoch, und in drei Jahren sitzen wir womöglich wieder in einem Tief, weil wir jetzt mangels Zeit nicht über neue Sachen nachdenken. Aufgabe der nächsten zwölf Monate wird also sein, die Balance zwischen Projektbegleitung und Projektaquisition zu finden. Und wenn ich das jetzt noch weiter nach vorne projiziere, dann ist es für mich schon der Anspruch, dass wir mit dem gesamten IFAM weiter wachsen, uns weiter entwickeln, dass wir noch stabiler werden, um dann auch auf europäischer Ebene zur Nummer eins in unseren Fachgebieten zu werden. Die Perspektiven nach vorne sind offen und ehrgeizig: Wir wollen unsere führende Position weiter ausbauen.



## »Wir bleiben immer bei unserer Kernkompetenz – der Adhäsion«



Genau zu wissen, was man tut und in welche Richtung man sich bewegt – das war für Prof. Dr. Otto-Diedrich Hennemann die Basis für den bisherigen Erfolg des IFAM-Instituts-teils Klebtechnik und Oberflächen. In Zukunft warten Herausforderungen in neuen Geschäftsfeldern, die durch die rasante Technologieentwicklung getrieben werden – Herausforderungen, für die sich der Instituts-teil bereits in Position gebracht hat. Auch im Ausland wird man verstärkt aktiv.

Professor Dr. Hennemann

Herr Hennemann, die Weiterentwicklung von Technologien und ihre Umsetzung in konkrete Anwendungen geht immer schneller voran. Die Klebtechnik hat dabei in den vergangenen beiden Jahrzehnten ganz besonders große Fortschritte gemacht. Welche »Zutaten« waren erforderlich, um diese Technologie so dynamisch zu entwickeln?

Entscheidend war, die Klebtechnik analytisch anzugehen. Lange wurde das Kleben aus Sicht des Ingenieurs überwiegend als ein Fertigungsverfahren betrachtet – durchaus erfolgreich, aber der Forschungs- und Entwicklungsansatz kam zu kurz. Um 1980 herum hat der heutige Bereich Klebtechnik und Oberflächen des IFAM angefangen, das Kleben zu hinterfragen: Warum funktioniert Kleben überhaupt? Der Einfluss von Physik und Chemie auf dieses Fachgebiet ist seither ständig gestiegen. Hinzu kam, dass sich ein Marktbedarf für fundierte klebtechnische Lösungen samt weitergehender Entwicklungen abzeichnete. Luftfahrt, Mikroelektronik und Automobilindustrie erkannten die großen Potenziale und den Wert dieser Füge-technik für zukunftsorientierte Produkte. Im IFAM haben wir deshalb mit verbesserten Analysesystemen und Labortechniken grundlegende Erkenntnisse erarbeitet; die industrielle Seite hat dies akzeptiert und übernommen. Dabei entstand ein Gleichgewicht, das in den vergangenen 20 Jahren immer wieder abgestimmt wurde. In der Folge führte dies zu erheblichen personellen und investiven Erweiterungen: Weil die Industrie ebenso wie wir ein großes Interesse an der Aufklärung der Mechanismen innerhalb einer Klebverbindung hatte, haben wir das ganze »System Kleben« ausgeleuchtet. Das führte zum Beispiel zu einer Weiterentwicklung von Oberflächen – sowohl bei der Oberflächentechnik als auch bei der Oberflächenanalytik. Heute bewegen wir uns bei unseren Betrachtungen der Oberflächen in Größenordnungen von kleiner fünf Ängström, also unterhalb des Nanometerbereichs. Wir arbeiten an biomolekularen Anwendungen und nutzen die rechnerische Simulation. Eine rasante Entwicklung, die vor 20 Jahren gar nicht abzusehen war.

Der erfolgreiche Weg des IFAM geht einher mit der Entwicklung der Klebtechnik. Diese parallele Entfaltung ist aber sicher kein Selbstläufer, keine Zwangsläufigkeit gewesen. Es bedurfte vieler wichtiger Schritte und Entscheidungen auf Seiten des Instituts, um sich so positiv zu entfalten. Welche Meilensteine sehen Sie im Rückblick?

Das Wichtigste war, dass wir uns ein Konzept erarbeitet haben und damit eine Basis, von der aus wir in der Folge operiert haben. Dabei mussten wir zwei grundlegende Feststellungen treffen:

1. Wir beschäftigen uns bei einem Klebsystem mit den großen Gebieten der Adhäsion und der Klebstoffe.
2. Wir arbeiten nicht an einer Universität oder einem Max-Planck-Institut, sondern in der Fraunhofer-Gesellschaft. Das heißt: Wir betreiben anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung. Schon das Finanzierungskonzept begründet deshalb einen ganz bestimmten vorgegebenen Aktionsweg. Wir mussten uns also von Anfang an sehr genau überlegen, welche grundlegenden Forschungen wir machen wollen – und welche nicht. Wir mussten uns auf der Grundlagenseite auf das Wichtigste konzentrieren, um die dann erarbeiteten Erkenntnisse in die konkrete Anwendung weitertransportieren zu können. Und das wiederum in so einem Umfang, dass die Industrie das auch nutzen kann. Das heißt: Man musste eine klebtechnische »Systemlösung« anstreben und anbieten. Dazu war eine gewisse Größe notwendig – mit zehn Mitarbeitern kann man keine derartigen Entwicklungen für die industrielle Nutzung realisieren. Weil wir das wussten, haben wir unsere grundlegende Strategie festgelegt, auf lange Sicht angelegt und dann immer wieder angepasst. Dabei haben wir konsequent darauf geachtet, bei unserer Kernkompetenz zu bleiben. Mit Erfolg, denn mittlerweile ist der Bereich Klebtechnik und Oberflächen des IFAM zweifelsfrei das europäische Leitinstitut für die Klebtechnik. Wir sind die größte unabhängige Forschungseinrichtung auf diesem Gebiet.

**Heute bedeutet Klebtechnik doch längst nicht mehr nur die Beschäftigung mit den Klebstoffen ...**

Richtig. Im Klebsystem ist der Klebstoff nur eine Komponente. Die rasanten Fortentwicklungen der Chemie, der Physik, der Computertechnologie haben uns auch große Erkenntnisschritte in den Bereichen der Oberflächentechnik sowie der Oberflächen- und Grenzflächenanalytik ermöglicht. Grenzflächen bestimmen ganz wesentlich die Eigenschaften einer Klebverbindung. Wir müssen die Oberfläche sehr genau kennen, um sie bezüglich unserer Nutzung zu beschreiben. Und wir müssen die Oberfläche nicht nur analysieren, sondern auch so gestalten, dass sie bezüglich des adhäsiven Anforderungsprofils ein Optimum bildet. Bei dieser Systematik geht es darum, die Anforderungen nicht nur einer Seite – also dem Klebstoff oder der Oberfläche – zuzuschreiben, sondern das von beiden Seiten her optimal zu entwickeln.

### **Hat das dazu geführt, dass Sie heute auch auf Gebieten wie dem Lackieren oder den Plasmatechniken aktiv sind?**

Durchaus. Wobei die Lacktechnik beispielsweise mit unserer Kernkompetenz, der Adhäsion, korrespondiert. Lack ist ein Material wie ein Klebstoff – nur hat Lack eben andere Aufgaben. Auch die Lackhaftung ist ein adhäsiver Prozess, von daher ist es ein verwandtes Gebiet. Bei der Plasmatechnik untersuchen wir die Wechselwirkung des Plasmas mit einer vorgegebenen Werkstoffoberfläche – einmal aus erkenntnistheoretischer Sicht bezüglich des adhäsiven Ablaufs, aber auch aus der Intention heraus, mit der Plasmabeschichtung dem Werkstoff weitere Funktionen hinzuzufügen. Diese beiden Beispiele zeigen, wie sich auf der Basis der Adhäsion eine Geschäftsfelderweiterung ergeben hat. Es kann durchaus sein, dass in Zukunft weitere Geschäftsfelder hinzukommen – unter einer Bedingung: Wir brauchen immer den adhäsiven Ansatz dabei. Sonst würden wir uns zu sehr diversifizieren, womit wir international bei unserer Größe nicht mehr wettbewerbsfähig sein würden.

### **Wo liegen aktuell die Bedarfe der Industrie an Ihren Leistungen?**

Nach wie vor müssen wir ausreichend Erkenntnisse erarbeiten und für den industriellen Gebrauch umsetzen, um »klassische Innovationen« zu ermöglichen. Derzeit ist immer noch das Zusammenspiel zwischen Oberfläche und Klebstoff samt prüftechnischer Absicherung wichtig. Damit zusammenhängend gewinnt in vielen Branchen das kombinierte Fügen an Bedeutung, weil z. B. im Leichtbau die Werkstoffvielfalt in Form des so genannten Multi-Material-Designs zunehmend eine Rolle spielt. Bei diesem Multi-Material-Design ist die Klebtechnik sehr wichtig. Sie wird in den nächsten Jahren zunehmend auch in den konstruktiven Verbindungsbereich – etwa der Automobil- und Luftfahrtindustrie – einen breiten Zugang finden. Diese Entwicklungen stellen eine beträchtliche Herausforderung für uns dar. Dazu kommt ein weiteres aktuelles Gebiet: die Absicherung der Langzeitbeständigkeit von adhäsiven Verbindungen. Dies ist heute und in Zukunft eine Schwerpunktaufgabe für uns.

### **Sie betonen immer wieder den Stellenwert von Weiterbildung als Basis der erfolgreichen Anwendung des Klebens. Warum?**

Weil sich die Klebtechnik nach wie vor dynamisch entwickelt. Das heißt, der Anwender muss dafür qualifiziert werden, diese sich immer wieder erneuernde Technologie auch richtig umzusetzen. In Zeiten, in denen Techniken immer komplexer und nicht einfacher werden, muss der Anwender – also der Markt – befähigt werden, neue Technologien mitzugestalten. Viele Techniken haben im Zuge ihrer Entwicklung Ausbildungskonzepte realisiert – beispielsweise die Schweißtechnik. Die Klebtechnik hatte dies leider nicht, deshalb hatten wir da einen Nachholbedarf. Weil die Klebtechnik interdisziplinär aufgestellt ist, ist der Lernprozess nicht einfach. Um aber das

hohe Potenzial der Klebtechnik zu nutzen, muss eine Aus- und Weiterbildung betrieben werden – sonst entwickeln wir eine Technik, die niemand nutzt, weil sie niemand versteht und niemand umsetzen kann.

### **Wo will der Bereich Klebtechnik und Oberflächen noch hin? Was sind – nach vielen Erfolgsjahren – die Herausforderungen, die das Feuer bei Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lodern halten sollen?**

In den bereits genannten Bereichen Simulation, Langzeitbeständigkeit oder Weiterbildung stecken ja hoch dynamische Prozesse, in denen auf der Erkenntnis- wie auf der Transferseite die Arbeit nicht endet. Ich bin überzeugt: Die Klebtechnik hat noch lange nicht das Potenzial ausgeschöpft, das dieser Technik innewohnt. Ich sehe aber noch eine andere Herausforderung: Wenn man sich heutzutage in der Wissenschaftslandschaft umsieht, findet man viele noch junge Gruppen und Netzwerke, die sich mit adhäsiven Prozessen beschäftigen. Ich bin froh darüber, dass das so vielfältige Thema Adhäsion nun weitere Kreise zieht. Denn mit der Unterstützung und Erweiterung der Netzwerke in diesem Themenkreis werden auch wir neue Erkenntnisse gewinnen, die uns auf der Anwendungsseite stützen können. Das eröffnet uns – über die Adhäsion – möglicherweise auch neue Geschäftsfelder, wie es beispielsweise mit dem biomolekularen Oberflächen- und Materialdesign geschieht, das langsam, aber sicher wächst. Ein anderes junges Thema ist das Kleben und Entkleben auf Knopfdruck. Wir haben dazu bereits Lösungsansätze, die man jetzt bedarfsgerecht weiterentwickeln muss, damit sie in die Anwendung kommen. Dieser Bedarf muss vom Markt dargestellt – und finanziert – werden. Diese Beispiele für neuere Entwicklungen ließen sich fortsetzen – und sie sorgen dafür, dass das »Feuer« bei uns immer weiter brennt.

### **Ist der primäre Markt immer noch Deutschland? Oder strecken Sie Ihre Fühler mittlerweile auch über die Grenzen, ja sogar auf andere Kontinente aus?**

Wir expandieren in Europa, Asien und in den USA. Es ist eine Herausforderung, der wir uns stellen. Im außereuropäischen Ausland sehen wir zurzeit die größten Bedarfe. Das ist der Grund dafür, warum wir nach China und Korea enge Kontakte pflegen und Geschäftsbeziehungen aufbauen.

Besonders erfreulich gestaltet sich für uns der chinesische Markt. Ab 2007 werden wir in Shanghai unsere klebtechnische Weiterbildung in chinesischer Sprache anbieten. Dies ist ein Meilenstein für uns.

## Jahrestagung: Fest der Forschung in Bremen



Prof. Dr. Hans-Jörg Bullinger.

### Impulse für Innovationen

Die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt die Hightech-Strategie der Bundesregierung mit einem Bündel von Aktivitäten. Das betonte ihr Präsident Prof. Dr. Hans-Jörg Bullinger auf der Fraunhofer-Jahrestagung am 18. Oktober 2006 in Bremen.

»Deutschland ist ein Land der Ideen. Wir machen aber zu wenig daraus und überlassen oft anderen die Umsetzung in erfolgreiche Produkte. Deutschland muss auch zum Land der Taten werden und seine Erfindungen anwenden, verkaufen und wieder zu Geld machen«, beschreibt Prof. Hans-Jörg Bullinger, der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, die wichtigste Herausforderung am Standort Deutschland. Innovative Produkte und Dienstleistungen steigern die Wertschöpfung in Deutschland und sichern Beschäftigung. Die Bundesregierung hat das erkannt und die »Hightech-Strategie für Deutschland« ins Leben gerufen. Darin definiert sie 17 Technologiethemen, von denen besondere Impulse für die Wirtschaft zu erwarten sind. Die Forschungsunion, das von Bundesforschungsministerin Dr. Annette Schavan einberufene Gremium führender Vertreter aus Wirtschaft und Wissenschaft, hilft dabei, diese Hightech-Strategie umzusetzen und weiterzuentwickeln.

»Mit der Hightech-Strategie für Deutschland hat die Bundesregierung erstmals über alle Ressorts



Dr. Annette Schavan.

hinweg eine nationale Innovationsstrategie entwickelt, um Deutschland an die Spitze wichtiger Zukunftsmärkte zu führen. Die Bundesregierung verfolgt damit eine klare Strategie für mehr Innovationen aus Partnerschaften zwischen Wirtschaft und Wissenschaft zur langfristigen Sicherung des Standorts Deutschland«, sagt Bullinger, der gemeinsam mit Dr. Arend Oetker, Präsident des Stifterverbands für die Deutsche Wissenschaft, die Forschungsunion leitet.

Deutschland kann nicht auf allen Gebieten Spitzenleistungen erbringen, sondern muss sich auf Kernkompetenzen konzentrieren. Die Hightech-Strategie setzt mit 17 Themen klare Schwerpunkte für die Innovationsförderung in den nächsten Jahren. Zunächst ist es nötig, Kompetenzen auf- und auszubauen. Deswegen will die Bundesregierung



Dr. Arend Oetker.

ihre Investitionen in die Wissenschaft kräftig ausweiten: Von 2006 bis 2009 werden sechs Milliarden Euro zusätzlich für Forschung, Entwicklung und Innovation zur Verfügung gestellt.

Mit dem Geld sollen neue Ideen erzeugt werden. Die daraus entstehenden Innovationen sollen dann die Wirtschaft beleben und Wohlstand schaffen. Nur wenn aus Wissen neue Werte geschaffen werden, hat sich die Investition gelohnt. Die zusätzlichen Mittel geben den Akteuren in Wissenschaft und Wirtschaft Planungssicherheit und Gestaltungsspielraum. Dabei werden vor allem Bereiche unterstützt, in denen Deutschland schon heute über gute Potenziale verfügt. »Das Prinzip ›Stärken stärken‹ ist der richtige Weg zur Herausbildung von international wettbewerbsfähigen Forschungs- und Anwendungsfeldern«, sagt Prof. Bullinger.

### **Innovationscluster – gemeinsam stärker**

Wer schneller zu Innovationen kommen will, muss sich über Firmen- und Organisationsgrenzen hinweg mit denjenigen zusammentun, die etwas dazu beitragen können. Die Fraunhofer-Institute stehen für diesen Wissensaustausch in Netzwerken zur Umsetzung der Hightech-Strategie bereit. Ziel ist es, durch die Entwicklung von konkreten Innovationen im Bereich multifunktionaler Materialien und Prozesse die Technologieführerschaft für die Region Bremen zu erringen. Das bedeutet aber auch: Unternehmen und Forschungseinrichtungen öffnen sich neuen Formen der Bündelung von Ressourcen und der Vernetzung von Kompetenzen. Das Fraunhofer IFAM hat die Einrichtung des FhG-Innovationsclusters »Multifunktionelle Materialien und Technologien« vorgeschlagen.

Ziel des Innovationsclusters ist es, ein Netzwerk zwischen großen, mittleren und kleinen Unternehmen sowie materialwissenschaftlichen Einrichtungen aufzubauen, in dem branchenübergreifend in Bremen spezifische Forschungsfelder im Bereich neuer Materialien und der damit verbundenen Fertigungsprozesse auf höchstem Niveau bearbeitet werden sollen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Innovationsclusters adressieren in erster Linie die Branchen Luft- und Raumfahrt, Automobil-, Windenergie-, Schiffbau- und Meerestechnik.




Prof. Dr. Matthias Busse.

Dieses Innovationscluster soll auf fünf Jahre gemeinschaftlich durch die Fraunhofer-Gesellschaft, das Land Bremen und die Industrie gefördert werden und sich anschließend selbst tragen. Willi Lemke, Senator für Bildung und Wissenschaft in Bremen, unterstützt diese Ziele mit großem Engagement.



Senator Willi Lemke.



Funktionsstrukturen

Pulvertechnologie

Mikrofertigung

**Klebtechnik**

Gießereitechnik  
Materialdesign

Technologietransfer

Windenergie  
Grenzflächenforschung

Leichtbauwerkstoffe  
Oberflächentechnik

Sinter- und Verbundwerkstoffe

Fertigungstechnik

# Das Institut im Profil



Joseph von Fraunhofer · Büste, Bronzeguss · Florian Rödl, 1987

## 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 so genannte »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 durchgeführt.

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 1994 ist Prof. Dr. Otto-Diedrich Hennemann Mitglied der Institutsleitung und leitet den Bereich Klebtechnik und Oberflächen.

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.

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 12 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von über 1,2 Milliarden Euro. Davon entfallen mehr als eine Millionen Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Für rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft Erträge aus Aufträgen der Industrie und öffentlich finanzierten Forschungsprojekten.

2006 betrug der Gesamthaushalt des IFAM rund 24 Millionen Euro, beschäftigt waren 316 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon 88 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

● Professor Dr. Otto-Diedrich Hennemann  
Leitung Klebtechnik und Oberflächen

Dr.-Ing. Helmut Schäfer  
(Stellvertreter)

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 2006 setzte sich zusammen aus den Haushalten der beiden Institutsteile Formgebung und Funktionswerkstoffe sowie Klebtechnik und Oberflächen.

**Das vorläufige Haushaltsergebnis betrug insgesamt 24 Millionen Euro. Die einzelnen Institutsteile erreichten nachstehende Ergebnisse:**

#### Formgebung und Funktionswerkstoffe Bremen

Betriebshaushalt (BHH)	5,8 Mio. Euro
eigene Erträge	3,8 Mio. Euro
davon	
Wirtschaftserträge	2,4 Mio. Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	1,4 Mio. Euro
Investitionshaushalt (IHH)	1,6 Mio. Euro

#### Formgebung und Funktionswerkstoffe Dresden

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

#### Klebtechnik und Oberflächen Bremen

Betriebshaushalt (BHH)	11,8 Mio. Euro
eigene Erträge	8,3 Mio. Euro
davon	
Wirtschaftserträge	7,3 Mio. Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	1,0 Mio. Euro
Investitionshaushalt (IHH)	1,0 Mio. Euro

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

##### Bremerhaven

Betriebshaushalt (BHH)	0,8 Mio. Euro
eigene Erträge	0,8 Mio. Euro
davon	
Wirtschaftserträge	0,1 Mio. Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	0,7 Mio. Euro
Investitionshaushalt (IHH)	0,05 Mio. Euro

### Investitionen

Im IFAM wurden 2006 Investitionen in Höhe von 2,9 Millionen Euro getätigt. Sie verteilen sich wie angegeben auf die verschiedenen Institutsteile. Die wichtigsten Anschaffungen sind aufgeführt.

#### Formgebung und Funktionswerkstoffe Bremen (1,6 Mio. Euro)

- Extrudersystem BRABENDER Plastograph
- Ink-Jet-Teststand
- MCP-KSA100 Spritzgussgerät
- Rotationsrheometer mit Peltiertemperiereinheit
- Axio Imager M1 Fluoreszenzmikroskop
- Gießanlage »Schwarze Seite Lost Foam«
- ND-Gießanlage mit Handlingseinheit
- Detektor für Röntgenanlage

#### Formgebung und Funktionswerkstoffe Dresden (0,2 Mio. Euro)

- Drahterodierungsanlage
- Startlochbohrmaschine

#### Klebtechnik und Oberflächen Bremen (1,1 Mio. Euro)

- Lichtmikroskop
- IR- u. Mikrosport-Aufrüstung Ellipsometer VASE
- Servohydraulisches Prüfsystem für statische und dynamische Versuche mit Prüfkräften bis  $\pm 15$  kN
- UV-Excimer-Lampen
- AD-Linear-Plasmaquelle
- Speedmixer
- Thermomechanischer Analysator

## Personalentwicklung

Am 31. Dezember 2006 waren am IFAM insgesamt 316 Personen (davon 88 Prozent im wissenschaftlich-technischen Bereich) tätig. Im Vergleich zum Vorjahr konnte das Institut bei der Zahl der fest angestellten Mitarbeiter einen Zuwachs von 10 Prozent verzeichnen.

## Personalstruktur 2006

Wissenschaftler	125
Technische Mitarbeiter	78
Verwaltung/Interne Dienste und Azubis	27
Doktoranden, Praktikanten und Hilfskräfte	86

### Entwicklung BHH und IHH

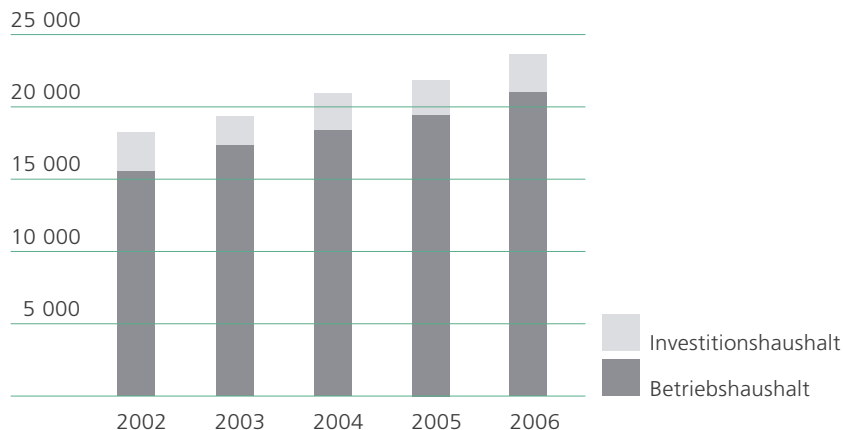


Abb. 1: Aufwendungen (BHH und IHH)

### Ertragsentwicklung Betriebshaushalt

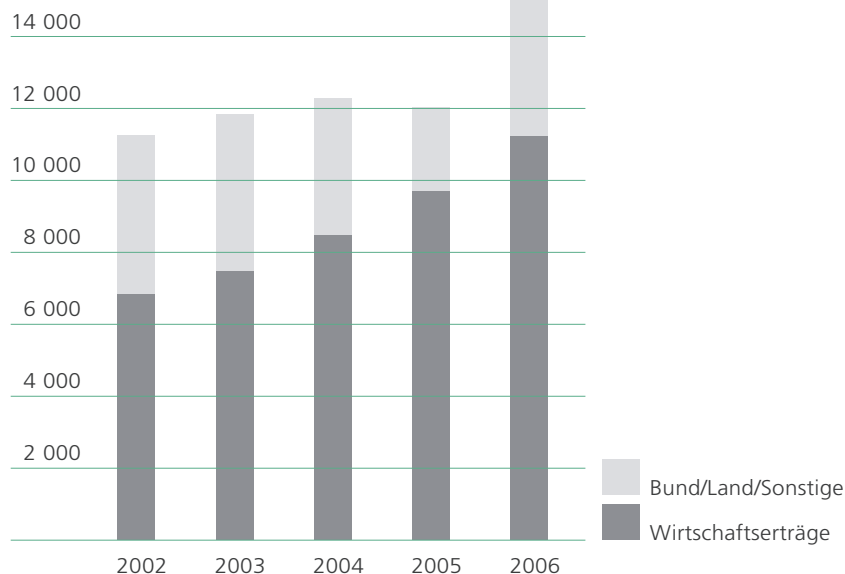


Abb. 2: Erträge (BHH) »IFAM-Gesamt«

### Personalentwicklung

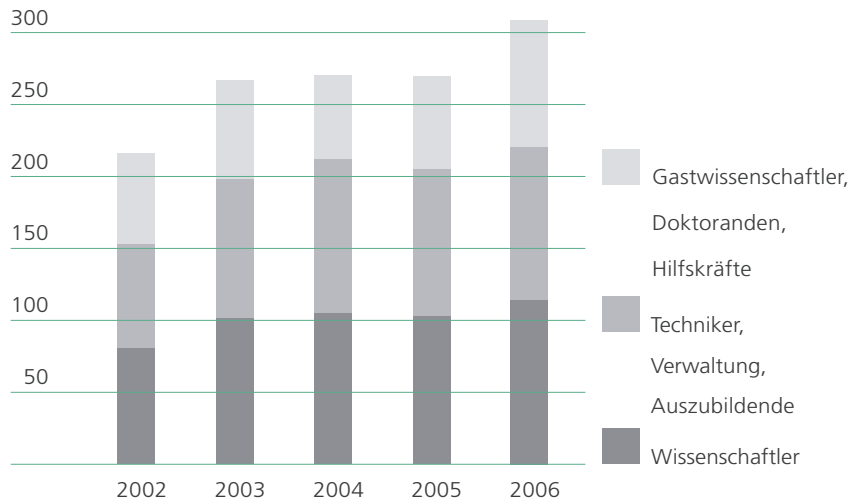


Abb. 3: Personalentwicklung »IFAM-Gesamt«

## Das Kuratorium des Instituts

### Mitglieder

**A. Picker**  
Vorsitzender  
Henkel KGaA  
Düsseldorf

**Prof. Dr. M. Dröscher**  
Degussa 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

**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

### Gäste

**Staatsrat Dr. G. Wewer**  
Der Senator für Bildung  
und Wissenschaft der  
Freien Hansestadt Bremen  
Bremen

## Forschung für unser tägliches Leben

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM) hätte kaum ein passenderes Motto für seinen diesjährigen Jahresbericht finden können: »Vision ist die Kunst, Unsichtbares zu sehen« – Jonathan Swift.

Visionen über Grundlagenforschung sichtbar und begreifbar und mit angewandter Forschung zum Wohle der Allgemeinheit verfügbar zu machen, das zeichnet das IFAM aus. Am IFAM werden hoch innovative Ideen, die den Visionen der Forscher entspringen, in die Tat umgesetzt.

Vordenken gehört zu den Stärken der Wissenschaftler des IFAM. Ein gutes Beispiel sind die Aktivitäten der bremischen Materialwissenschaftler – mit entscheidender Mitwirkung des IFAM –, einen Exzellenzcluster zum Themenbereich intelligenter Materialien und Bauteile im Exzellenzwettbewerb des Bundes und der Länder für Bremen einzuwerben. Dahinter steht die visionäre Erwartung der beteiligten Wissenschaftler, dass dieser Forschungsschwerpunkt ein Katalysator für eine völlig neue Disziplin in Forschung und Lehre an der Universität Bremen wird. Der Bereich der intelligenten Werkstoffe und Bauteile macht die Visionen, die hinter der Forschung stehen, deutlich. Der Weg zu »führenden« oder »denkenden« multifunktionalen Produkten hat das Potenzial, die Materialwissenschaften deutlich weiterzuentwickeln.

Besonders positiv ist, dass die bremischen Materialwissenschaften ihre gemeinsamen Stärken identifiziert haben und gemeinsam ein innovatives Forschungsprogramm entwickelt haben.

Die Kooperation zwischen dem IFAM und den anderen bremischen Materialwissenschaftlern ist wissenschaftspolitisch ausdrücklich gewünscht und verdient besondere Anerkennung. Es bleibt nur zu hoffen, dass dieser Antrag erfolgreich wird, so dass diese Kooperation weiter gestärkt wird.

Auch für das zweite Motto des Jahresberichts – »Schätze der Forschung« – finden sich an vielen Stellen am IFAM passende Beispiele. Insbesondere ist es Herrn Prof. Hennemann zu verdanken, dass die viele Jahre lang in der Materialwissenschaft nur am Rande beachtete Klebtechnik zu einem Highlight ausgebaut werden konnte. Weltweite Anerkennung genießt der Institutsteil für die hervorragende Forschung und Entwicklung am IFAM als Europas größte unabhängige Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der industriellen Klebtechnik. Mehr als 120 Mitarbeiter sind auf diesem Sektor im IFAM tätig. Große Industrieunternehmen wie Airbus und DaimlerChrysler sind seit Jahren über zahlreiche Kooperationen mit dem IFAM verbunden. Unsere Hoffnung ist, dass im kommenden Jahr ein genauso angesehener und tatkräftiger Wissenschaftler und Visionär wie Prof. Hennemann als Nachfolger gefunden werden kann.

Der vorgelegte Bericht macht deutlich, wie wichtig die Forschung für unser tägliches Leben ist und welche Schätze sich aus der Forschung entwickeln können. Wünschen wir dem IFAM auch für die Zukunft so engagierte Mitarbeiter wie heute und auch weiterhin die Fähigkeit, Visionen real werden zu lassen.



Dr. Göttrik Wewer  
Staatsrat beim  
Senator für Bildung  
und Wissenschaft.

## 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. 12 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,2 Milliarden €. Davon fallen mehr als 1 Milliarde € 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 (0) 61 51 / 7 05-2 22  
Fax: +49 (0) 61 51 / 7 05-3 05

#### Stellvertretender Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Peter Elsner  
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT  
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7  
76327 Pfinztal  
Telefon: +49 (0) 721 / 46 40-4 01  
Fax: +49 (0) 721 / 46 40-1 11

#### Geschäftsstelle:

Dr. phil. nat. Ursula Eul  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit  
und Systemzuverlässigkeit LBF  
Bartningstraße 47  
64289 Darmstadt  
Telefon: +49 (0) 61 51 / 7 05-2 62  
Fax: +49 (0) 61 51 / 7 05-2 14

[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 aktive 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 (0) 61 51 / 7 05-2 36  
 Fax: +49 (0) 61 51 / 7 05-2 14  
 E-Mail [info@adaptronik.fraunhofer.de](mailto:info@adaptronik.fraunhofer.de)

### Mitglieder

Fraunhofer-Institute EMI, IAIS, IIS, IKTS, IFAM, 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 sind 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 (0) 931 / 41 00-5 00  
Fax: +49 (0) 931 / 41 00-5 59  
E-Mail 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 (0) 931 / 41 00-6 20  
Fax: +49 (0) 931 / 41 00-6 98  
E-Mail sabine.amberg@isc.fraunhofer.de

### Mitglieder

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



## Fraunhofer-Themenverbund Numerische Simulation

Im Fraunhofer-Themenverbund Numerische Simulation von Produkten und Prozessen bündeln zwanzig 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 (0) 421 / 22 46-1 83  
 Fax: +49 (0) 421 / 22 46-7 71 83  
 E-Mail 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 Oberflächen-  
 technik IST  
 Bienroder Weg 54 E  
 38108 Braunschweig  
 Telefon: +49 (0) 531 / 21 55-6 40  
 Fax: +49 (0) 531 / 21 55-9 00  
 E-Mail vergoehl@ist.fraunhofer.de

#### Marketing und Kommunikation:

Dr. Simone Kondruweit  
 Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächen-  
 technik IST  
 Bienroder Weg 54 E  
 38108 Braunschweig  
 Telefon: +49 (0) 531 / 21 55-5 35  
 Fax: +49 (0) 531 / 21 55-9 00  
 E-Mail 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 Prozess-

optimierung 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 (0) 391 / 40 90-5 10  
Fax: +49 (0) 391 / 40 90-5 12  
E-Mail 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 (0) 30 / 3 90 06-1 59  
Fax: +49 (0) 30 / 3 91 10 37  
E-Mail 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 (0) 89 / 12 05-11 16  
E-Mail: 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 (0) 721 / 68 09-1 57  
 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

Metalle

Elektronik

Prozessentwicklung

Know-how-Transfer

Pilotserienfertigung

Marktanalysen  
Chemische Industrie

Sonderanlagenbau

Luft- und Raumfahrttechnik

Medizintechnik

Maschinenbau

Machbarkeitsstudien

Automobilindustrie

Mikrofertigung

Systemlösungen

# Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe

Ergebnisse   Anwendungen   Perspektiven

## 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-Institutes für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung – Formgebung und Funktionswerkstoffe – einen hohen Stellenwert. Die Basis für eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit unseren Kunden stellen folgende Kernkompetenzen dar:

- Pulver- und Sintertechnologie
- Gießerei- und Leichtmetalltechnologie
- Mikro- und Nanotechnologie

Zunehmend spielen Netzwerke von Partnern aus der Wirtschaft und Forschungseinrichtungen, die interdisziplinär zusammenarbeiten, eine wichtige Rolle bei der Erarbeitung von komplexen Systemlösungen. Hier sind insbesondere an den Schnittstellen der unterschiedlichen Fachrichtungen Methodenkompetenz und exzellentes Fachwissen gefordert. Die Kompetenz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am 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.

In den komplexen Anforderungen an ein intelligentes Bauteil spielen Kombinationen verschiedener Werkstoffe in einer Komponente eine zunehmende Rolle. Diese Materialkombinationen zu gestalten und in Fertigungsprozessen zu beherrschen, ist eine wesentliche Aufgabe beim Ausbau der Kompetenz.

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. Beispielhaft sei hier die Kombination von magnetischem und unmagnetischem Stahl genannt.

Dies lässt sich auch in der Mikrobauteilfertigung realisieren, wo durch solche integrierten fertigungstechnischen Lösungen die Einsparung der Mikromontage erreicht werden kann. Neben der Entwicklung zur Qualitätssicherung von Fertigungsprozessen für metallische Miniaturbauteile wurden neue interdisziplinäre Lösungsansätze im Bereich der Mikroreaktionstechnik und der Bioreaktoren erarbeitet.

Die Technologieplattform »Functional printing« wurde um neue Möglichkeiten des maskenlosen Druckens mit dem so genannten M<sup>3</sup>D<sup>®</sup>-Verfahren ergänzt. Formulierungen von funktionellen Tinten und Pasten sowie Kenntnisse zu deren Applikation auf Komponenten wurden neu erarbeitet. Damit ist es möglich, Bauteile mit Sensorik auszustatten und so z. B. Betriebs- oder Umgebungsbedingungen zu erfassen.

Mit modernster Gießereieinrichtung 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 für komplexe Bauteile wird der Kompetenzausbau insbesondere im Bereich der Integration von Piezoaktoren und RFIDs in Gussbauteile mit hoher Dynamik vorangetrieben.

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 ständig 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 nach-

haltigen Entwicklung für die Bereiche Transport, Energie, Medizin und Umwelt.

Auch weiterhin sind Werkstoffe und deren Verarbeitung in allen Produktinnovationen ein wesentlicher Erfolgsfaktor. 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, den Carbon Nanotubes und den Nanokompositen eröffnet Chancen für Produktentwicklungen sowohl mit bestehenden Kunden als auch 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.

Ein vom BMBF geförderter regionaler Wachstumskern und das Demonstrationszentrum »Zelluläre Werkstoffe« in Dresden sind wichtige Bausteine, um das volle Anwendungspotenzial poröser Strukturen auch kleinen und mittelständischen Unternehmen zugänglich zu machen. Die mit industriellen Partnern vorangetriebene innovative Entwicklung im Bereich der Dieselrußfilter ist ein Beispiel für die Verknüpfung von erarbeitetem Basis-Know-how und dessen Umsetzung in Werkstoffideen und Fertigungstechnologien für marktgängige Produkte bis zur Produktionsreife.

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 Aufgabenstellungen betreffen z. B. antimikrobielle Oberflächen, biokompatible metallische Werkstoffe und Fertigungsprozesse zur Miniaturisierung.

Das große Potenzial der direkten Integration von Funktionen in metallische Bauteile wird auf der Basis eines sich ständig erweiternden Know-how am IFAM in der Prozesskette vom Werkstoff zum intelligenten Bauteil erschlossen. Hierzu sollen zunehmend produktspezifische Lösungen für unterschiedliche Branchen erarbeitet werden.



# Arbeitsgebiete und Ansprechpartner

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

### Standort Bremen

#### Pulvertechnologie

Pulvermetallurgische Formgebung;  
Warmkompaktieren zur Herstellung  
hochdichter Sinterenteile; Metallpulverspritzguss;  
2-Komponenten-Spritzguss; Prozess- und  
Materialentwicklung; Rapid Manufacturing;  
Lasersintern; Siebdruck; Simulation.  
Dr.-Ing. Frank Petzoldt  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 11 / -1 34  
E-Mail petzoldt@ifam.fraunhofer.de

#### Funktionsstrukturen

Nanopulver; Nanosuspensionen; nanoporöse  
Schichten; Funktionsintegration; Ink-Jet-Printing;  
Aerosol-Printing (M<sup>3</sup>D<sup>®</sup>); Gradientenstrukturen;  
Sonderanlagen.  
Dr. rer. nat. Volker Zöllmer  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 14  
E-Mail zoellmer@ifam.fraunhofer.de

#### Mikrofertigung

Mikrospritzguss für Metalle und Kunststoffe;  
Mikrostrukturierung; Serienfertigung von  
Miniaturbauteilen; 2-Komponenten-Spritzguss für  
Mikroteile; Mikroreaktionstechnik; Mikrofluidik.  
Dr.-Ing. Astrid Rota  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 96  
E-Mail rota@ifam.fraunhofer.de

#### Leichtbauwerkstoffe und Analytik

Zellulare Leichtbaukomponenten; funktionale,  
offenporöse Metallschaumstrukturen;  
Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen;  
Produktionsverfahren für Metallschaumbauteile.  
Dr.-Ing. Gerald Rausch  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 42  
E-Mail 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 (0) 421 / 22 46-2 25  
E-Mail woestmann@ifam.fraunhofer.de

### Dienstleistungszentren und Ansprechpartner

#### Anwenderzentrum Metallpulverspritzguss

Dipl.-Ing. Lutz Kramer  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 17  
E-Mail forming@ifam.fraunhofer.de

#### Anwenderzentrum Functional Printing

Dr.-Ing. Dirk Godlinski  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 30  
E-Mail printing@ifam.fraunhofer.de

#### Anwenderzentrum Rapid Prototyping

Dipl.-Ing. Claus Aumund-Kopp  
Telefon: +49 (0) 4 21 / 22 46-2 26  
E-Mail rapid@ifam.fraunhofer.de

#### Anwenderzentrum funktionsintegrierte Gussteile

Dr.-Ing. Jörg Weise  
Telefon: +49 (0) 4 21 / 22 46-1 25  
E-Mail casting@ifam.fraunhofer.de

#### Dienstleistungszentrum Materialographie und Analytik

Jürgen Rickel  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 46  
E-Mail rickel@ifam.fraunhofer.de

#### Demonstrationszentrum SIMTOP

Andreas Burbliès  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 83  
E-Mail info@simtop.de

### Standort Dresden

#### Pulvermetallurgie und Verbundwerkstoffe

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kieback  
Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 00  
Fax: +49 (0) 351 / 25 37-3 99  
Internet: www.ifam-dd.fraunhofer.de  
Adresse: Winterbergstraße 28  
01277 Dresden

#### Zellulare metallische Werkstoffe

Fasermetallurgie; hochporöse Strukturen;  
metallische Hohlkugelstrukturen; offenzellige  
PM-Schäume; Siebdruckstrukturen;  
Anwendungen für z. B. Leichtbaustrukturen;  
Crashabsorber; Wärmetauscher;  
Katalysatorträger.  
Dr.-Ing. Günter Stephani  
Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 01  
E-Mail guenter.stephani@  
ifam-dd.fraunhofer.de

#### Sinter- und Verbundwerkstoffe

Hochtemperaturwerkstoffe; Aluminide  
(NiAl-Schaum); nanokristalline  
Werkstoffe; Werkstoffe für tribologische  
Beanspruchungen; Sputtertargets;  
Pulvermodifizierung.  
Dr.-Ing. Thomas Weißgärber  
Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 05  
E-Mail thomas.weissgaerber@  
ifam-dd.fraunhofer.de

### Dienstleistungszentrum und Ansprechpartner

#### Demonstrationszentrum Zellulare Werkstoffe

Dr.-Ing. Günter Stephani  
Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 01  
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, Stereolithographie, 3-D-Printing
- Kaltkammer-Druckgussmaschine (echtzeitgeregelt, Schließkraft 660 t); Warmkammer-Druckgussmaschine (echtzeitgeregelt, Schließkraft 315 t)
- Pilotanlagen zur Herstellung von Metallschaumbauteilen
- Zweikomponenten-Spritzgussmaschine
- Mikrowellenanlage
- Siebdruckmaschine
- Modellfertigung Lost Foam-Verfahren

## Mikro- und Nanostrukturierung

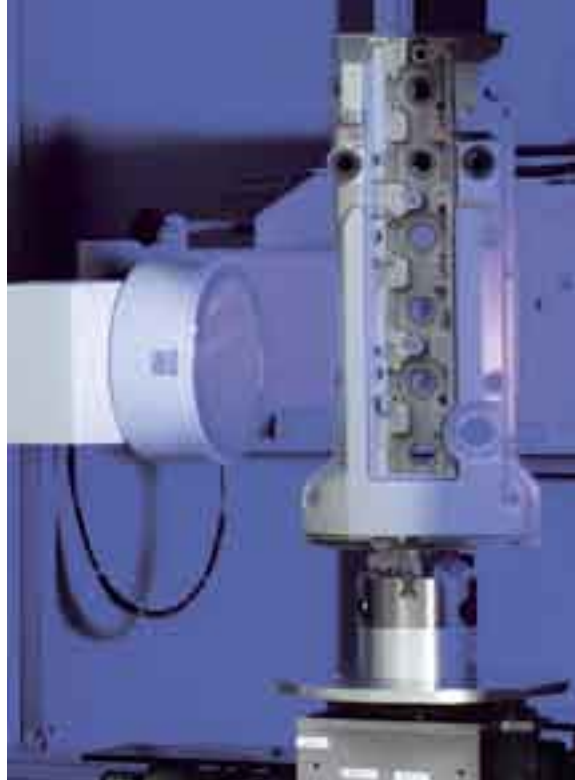
- Ink-Jet-Printing-Technologien
- Aerosol-Printing-Technologie (Maskless Mesoscale Material Deposition M<sup>3</sup>D®)
- Mikrofertigungszelle
- Vierpunkt-Spitzenmessplatz
- Partikelgrößenanalyse
- Tintenteststand – Drop on demand

## Thermische/chemische Behandlung von Formteilen

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

## Werkstoffsynthese und -verarbeitung

- Induktionsofen zum Metallschäumen
- 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)



Röntgen-Tomograph.

- 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)

## Rechner

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

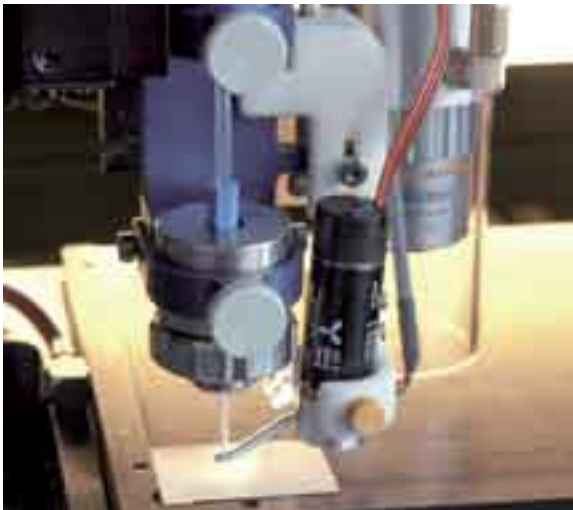
## Gedruckte Sensorik

### Situation

Sensoren dienen der Erfassung verschiedener physikalischer Größen (z. B. Temperatur, Druck etc.). Die physikalische Größe wird vom Sensor erfasst und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Anwendungsbereiche für Sensoren sind vielfältig und wachsen ständig. Neben den klassischen Bereichen, wie z. B. der Automobilbranche, sind vor allem Zukunftstechnologien, wie z. B. Life Science und Structural Health Monitoring, interessante Anwendungsfelder. Stand der Technik sind Sensoren, die mithilfe der Siliziumtechnologie im Reinraum hergestellt werden. Nach der Herstellung erfolgen die Kontaktierung des Sensors mithilfe der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie die Applikation am Bauteil durch z. B. Klebeverbindungen. Diese nachträglichen Arbeitsschritte sind im Vergleich zur Sensorherstellung sehr kostenintensiv. Außerdem lassen sich die Sensoren nicht auf beliebige Oberflächen (z. B. gekrümmte Flächen) applizieren.

### Herausforderung

Für die verschiedenen Anwendungsbereiche der Sensoren ist es ein primäres Ziel, eine möglichst detaillierte Beschreibung der Umwelt zu bekommen. Dieses wird durch eine große Anzahl von verschiedenen Sensoren pro Fläche ermöglicht z. B. durch die Miniaturisierung der einzelnen Sensoren. Des Weiteren darf die erhöhte Anzahl



Druckkopf der M<sup>3</sup>D®-Anlage.



Fraunhofer-IFAM-Mitarbeiterin bei der Herstellung einer Nanosuspension.

der Sensoren nicht zu einer Kostensteigerung des Bauteils führen. Dieses Ziel lässt sich vor allem durch eine direkte Kontaktierung sowie Applikation der Sensoren auf das Bauteil erreichen. Diese Möglichkeit bieten 3-D-Printing-Verfahren, bei denen die Sensorstrukturen (Sensoren und Leiterbahnen) direkt auf das entsprechende Bauteil gedruckt werden können. Am Fraunhofer IFAM steht dafür neben Siebdruck- und Ink-Jet-Technologien auch eine Aerosoldrucktechnologie (Maskless Mesoscale Materials Deposition, M<sup>3</sup>D®) zur Verfügung. Letztere ermöglicht das Verdrucken von nanoskaligen Materialien mittels eines Aerosolstrahls.

Dabei bietet das M<sup>3</sup>D®-Verfahren eine Reihe von Vorteilen bei der Herstellung bzw. Applikation von Sensorstrukturen gegenüber den konventionellen Verfahren. Beim M<sup>3</sup>D®-Verfahren lassen sich die Sensorstrukturen direkt auf das Bauteil drucken, so dass kein zusätzlicher Kontaktierungs- bzw. Befestigungsschritt notwendig ist. Des Weiteren können die Sensorstrukturen auf sämtliche Bauteile (wärmeempfindlich, planar, komplex geometrisch) appliziert werden, so dass eine hohe Ge-

staltungsflexibilität entsteht. Hinzu kommt, dass es sich bei diesem Verfahren um eine maskenlose Technologie handelt, die einfache Strukturänderungen (Rapid Prototyping) erlaubt. Der hohe Grad an Miniaturisierung wird durch Linienbreiten mit einer Auflösung von bis zu 10 Mikrometern erreicht.

### Motivation und Ziele

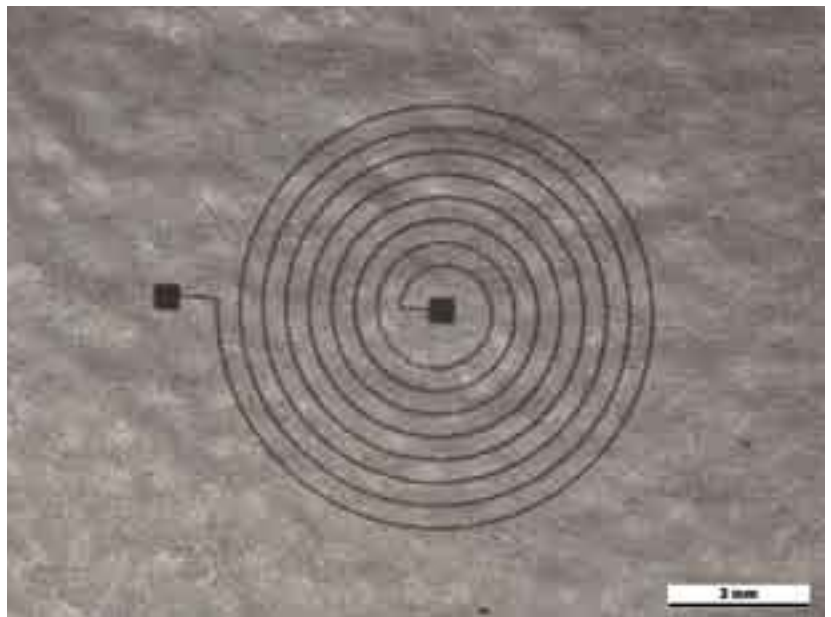
Basierend auf den verschiedenen Druckverfahren sollen Sensorstrukturen auf beliebige Oberflächen appliziert werden. Dabei werden zwei Ziele verfolgt: erstens die kostengünstige Applikation von Sensorstrukturen auf klassische Bauteile bzw. Oberflächen, z. B. Dehnungsmessstreifen auf Metall bzw. Kunststoff; zweitens aber auch die Entwicklung von Sensorstrukturen auf neuen Materialien bzw. Oberflächen, um damit neue Anwendungsgebiete zu erschließen. Hierzu zählt z. B. die Applikation von Sensorstrukturen auf Textilien oder auf komplex-geometrische Oberflächen und Bauteile.

Zur Herstellung der Sensorstrukturen mittels Ink-Jet- und M<sup>3</sup>D®-Verfahren ist zunächst die Formulierung einer so genannten funktionellen Tinte nötig, die aus dem nanoskaligen Funktionsmaterial (z. B. Metall), einer Flüssigkeit (z. B. Ethanol) und gegebenenfalls einem Stabilisator besteht. Hierbei spielt insbesondere die Stabilität der Tinten in Bezug auf Sedimentation und Agglomeration eine entscheidende Rolle.

Danach wird beim M<sup>3</sup>D®-Verfahren die Tinte mittels Zerstäubung in ein Aerosol überführt und dann mithilfe eines Fokussiergases zum Substrat geleitet. Die Eingabe der Struktur erfolgt über eine CAD-Datei. Dadurch ist eine maximale Flexibilität in der Strukturauslegung gewährleistet. Nach dem Drucken kann mithilfe eines Laserstrahls die Struktur zur Erzielung der Funktionalität (z. B. Leitfähigkeit) versintert werden. Beim Versintern ist es wichtig, dass der Energieeintrag des Lasers optimal auf das verdruckte Material und vor allem auch auf die Substratoberfläche abgestimmt wird. Der Energieeintrag des Lasers wird beim M<sup>3</sup>D®-Verfahren durch die Laserenergie und die Geschwindigkeit, mit der sich der Laser bewegt, beeinflusst.

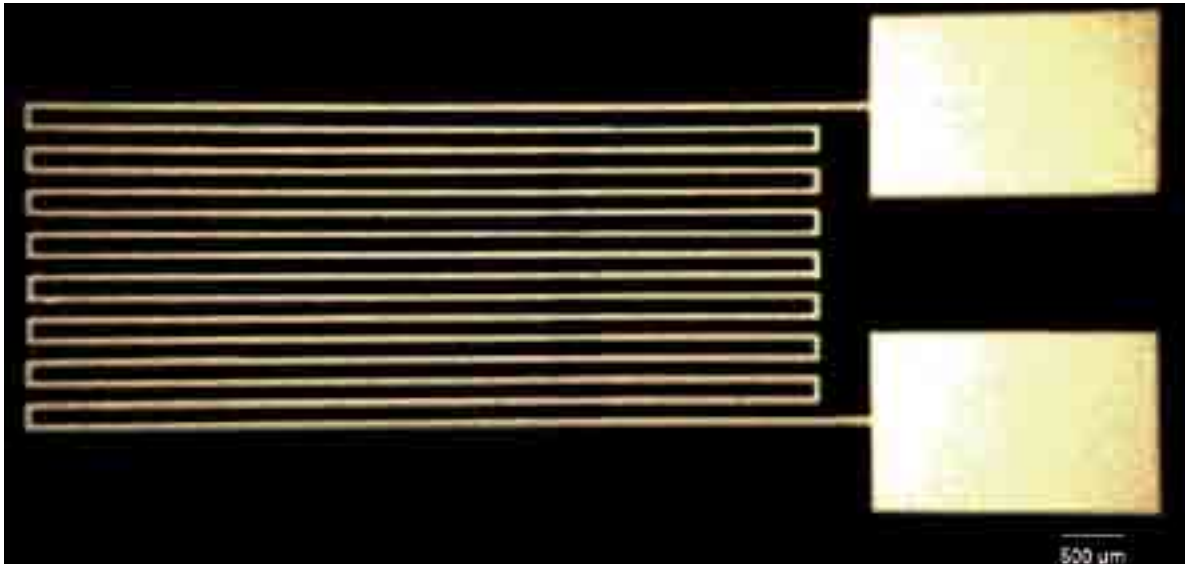
### Aktuelle Arbeiten

Für die Ink-Jet- und M<sup>3</sup>D®-Technologien konnten bereits die ersten funktionellen Tinten erfolgreich hergestellt und verdruckt werden. Dabei wurden zunächst leitfähige Materialien (u. a. Silber und Kupfer) verwendet, da diese für die Herstellung von Sensorstrukturen entscheidend sind. Das Material konnte erfolgreich auf plane Oberflächen sowie auch auf komplex geometrische Oberflächen appliziert werden. Der spezifische elektrische Widerstand wurde mithilfe von Vierpunktmessungen untersucht. Die ersten Messungen zeigen, dass sich mit der M<sup>3</sup>D®-Technologie leitfähige Strukturen herstellen lassen. Des Weiteren konnten die ersten Sensorstrukturen mittels M<sup>3</sup>D® auf verschiedene Substrate gedruckt werden.



Gedruckte Antenne aus Silber.

Gedruckter  
Dehnungsmessstreifen  
aus Kupfer.



### Ausblick

Die Zukunft im Bereich Printing von Funktionsmaterialien bietet ein hohes Potenzial an technologischen Einsatzmöglichkeiten. Zum einen werden die Tinten weiterentwickelt und verbessert sowie die Palette der verdruckbaren Materialien erweitert. Zum anderen sollen neben miniaturisierten und kostengünstigen Sensorstrukturen auch sensorische Gesamtsysteme mittels Ink-Jet und M<sup>3</sup>D<sup>®</sup> gedruckt werden. Das bedeutet, dass

neben dem eigentlichen Sensor und der Kontaktierung auch die passiven Bauelemente und die Stromversorgung mit auf das Bauteil appliziert werden. Dadurch werden mehrere Prozessschritte (Sensorherstellung, Kontaktierung, Applikation passiver Bauelemente etc.) gleichzeitig bzw. mit einer Technologie ausgeführt, so dass sich weitere Kosten einsparen lassen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist das Verdrucken von biologischen Materialien z. B. für den Bereich Tissue Engineering.

#### Ansprechpartner

Marcus Maiwald  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 24  
E-Mail: maiwald@ifam.fraunhofer.de

Volker Zöllmer  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 14  
E-Mail: zoellmer@ifam.fraunhofer.de

#### Institut

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

## Perspektiven in Schaum – Lost Foam

### Situation

Bereits mit seinem Amtsantritt als Institutsleiter des IFAM, Institutsteil Formgebung und Funktionswerkstoffe, gehörte zur Strategie von Prof. Busse die Einführung weiterer innovativer Verfahren in den verschiedenen Kompetenzbereichen. Im Bereich der Gießereitechnik hatte er hier bereits die Vision, das Lost Foam-Verfahren, eines der jüngsten und modernsten Gießverfahren, einzuführen. Bei diesem Verfahren wird zunächst das zu gießende Bauteil aus expandierbarem Polystyrol (EPS), expandierbarem Polymethylmethacrylat (EPMMA) bzw. einem Kopolymer hergestellt. Dieses Modell wird mit einem Gießlauf, ebenfalls aus Schaumstoff, versehen und mit einer keramischen Schlichte überzogen. Anschließend wird die so entstandene Gießtraube in einen Gießbehälter eingesetzt und mit Sand umhüllt. Der umhüllende Sand, häufig Quarzsand, beinhaltet im Gegensatz zu konventionellen Gießverfahren keinerlei Binder und ist rieselfähig. Durch Vibrieren des Gießbehälters während der Sandbefüllung

wird der Sand fluidisiert, läuft in sämtliche Hohlräume und Hinterschnitte der einzelnen Modelle und wird kompaktiert. Dabei entsteht quasi eine Form um das Modell. Im nächsten Schritt folgt der eigentliche Gießvorgang. Hierbei wird die Metallschmelze auf den Anguss gegeben, zersetzt den Schaumstoff, füllt den entstehenden Hohlraum direkt aus und bildet das Modell exakt nach. Nach dem Erstarren wird der Behälter entleert, und der Sand läuft ohne zusätzliche mechanische Unterstützung aus den Gussteilhohlräumen heraus. Vorteile dieser Vorgehensweise sind zum einen, aus einfachen Modellsegmenten hochkomplexe Modelle zusammensetzen zu können und keinen Verschleiß an den Schäumwerkzeugen zu haben, im Sinne des Leichtbaus auf Entformungsschrägen und damit auf Masse verzichten zu können. Zum anderen im Sinne der Produktivität eine Mehrfachbelegung zu haben und ein Entfallen der Entkernarbeit. Eingesetzt wird das Verfahren bereits heute in Serienprozessen zur Herstellung komplexer Bauteile aus Aluminium, Gusseisen und Stahl.



Abb. 1: Metallschmelze (Bildquelle: Dr. Hermann Pleteit).



Abb. 2: Fraunhofer-IFAM-Mitarbeiter am Vorschäumer.

Im Jahr 2006 wurde der erste Teil der Verfahrenstechnik in Form der Schäumtechnologie – sie wird auch »weiße Seite« genannt – am IFAM installiert. Hierbei wurde Wert darauf gelegt, dass die Anlage auf dem aktuellen Stand der Technik ist und Forschungsarbeiten unter industrienahen Bedingungen ermöglicht. Hierzu wurden ein Vorschäumer der Firma Vulcan (Abb. 2) sowie in Kooperation mit der Firma Kurtz ein Fertigschäumer vom Typ K710 LF (Abb. 3) am IFAM installiert.

Die Anlage verfügt über ausreichende Werkzeugfläche, um sogar Zylinderköpfe und Motorblöcke schäumen zu können. Zur Bereitstellung des notwendigen Sattdampfes wurde ein Schnelldampferzeuger der Firma Loos mit einer Dampfleistung von 400 kg/h installiert. Zur Gewährleistung von trockenem Dampf während der zyklischen Prozessabläufe wurde dabei ein Drei-Kubikmeter-Dampfspeicher zwischen Dampferzeuger und Fertigschäumer geschaltet. Um bei diesen Erweiterungsmaßnahmen auch dem Umweltschutz Rechnung zu tragen, wurde hierbei auf eine optimale Auslegung und einen hohen Wirkungsgrad geachtet. Dementsprechend werden die Abgase des gasbetriebenen Dampferzeugers durch einen Wärmetauscher geleitet und zur Vorwärmung des Speisewassers genutzt.



Abb. 3: Fertigschäumer Kurtz K710 LF.

Mit der beschriebenen Technik ist die »weiße Seite« am IFAM auf aktuellem Industriestandard, was den Stand der Technik wie auch die Größe der Anlagen angeht. Im Jahr 2007 wird die »weiße Seite« durch den gießtechnischen Teil, der auch »schwarze Seite« genannt wird, ergänzt und komplettiert. Hier wird in Kooperation mit der Firma Vulcan Engineering Co. ein Vector-Flo®-Verdichtertisch (Abb. 4) mit vier Gießbehältern installiert.

Die Gießbehälter haben die Maße 800 x 800 x 1000 Zentimeter. Zur Untersuchung von Sandverdichtungsprozessen und zur Visualisierung der Formfüllungsvorgänge wird ein Gießbehälter mit einer Glasscheibe versehen. Weiterhin wird die »schwarze Seite« so flexibel gestaltet sein, dass verschiedene Formstoffe eingesetzt werden können.

### Perspektiven

Für das IFAM ist der Aufbau dieses innovativen Gießverfahrens aus mehrfacher Sicht sinnvoll:

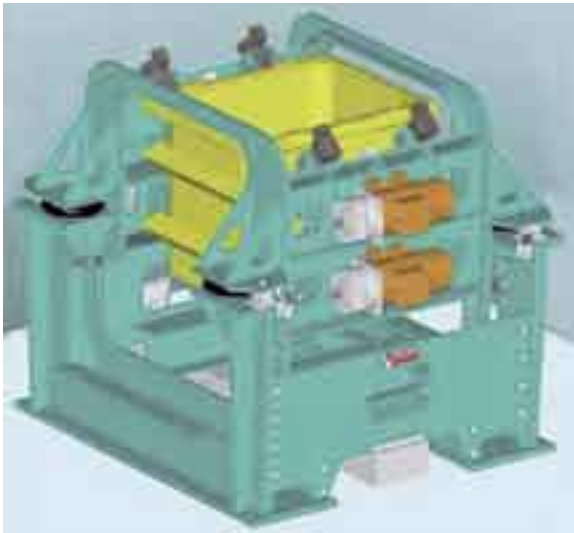


Abb. 4: Vector-Flo®-Tisch.

- Das Verfahren ist in Europa bislang noch nicht weit verbreitet, wird allerdings erfolgreich bei Aluminium, Eisen und Stahl eingesetzt, wie z. B. der Sechs-Zylinder-Kopf von BMW ein-drucksvoll unter Beweis stellt. Somit birgt das Verfahren für das IFAM noch sehr viel Potenzial.
- Durch die beschriebene Anlagentechnik wird für das IFAM in Europa ein absolutes Alleinstellungsmerkmal erreicht.
- Das Verfahren fügt sich hervorragend in die Institutsstrategie für den Gießereibereich ein, innovative, komplexe sowie funktionsintegrierte Bauteile untersuchen zu können.
- Betrachtet man die beiden Hauptpunkte des Verfahrens – die »weiße« und die »schwarze Seite« – ergänzt sich hier das bereits vorhandene Know-how am IFAM im Sinne der Polymer-technik bei der »weißen Seite« und im Sinne der Gießereitechnik bei der »schwarzen Seite«. Das IFAM verfügt bereits heute für die »weiße und schwarze Seite« über eine fast einmalige Analysetechnik und das neue Verfahren trägt zu einer weiteren Ausnutzung des vorhandenen Equipments und Know-hows sowie einer stärkeren Verknüpfung der einzelnen Kompetenzfelder bei.

Bereits heute, noch bevor die Anlagentechnik vollständig installiert ist, läuft ein Projekt zum Thema Lost Foam im Auftrag des Lost Foam Council e. V. Hier wird zur Qualitätssicherung der Modellherstellung an einer zerstörungsfreien Methode zur Dichtebestimmung der Schaumstoffmodelle gearbeitet. Diese Aktivitäten erlauben direkt nach Inbetriebnahme der »weißen Seite« eine zweckbestimmte Nutzung der Anlagentechnik.

### Zukünftige Forschungsziele

Für zukünftige Forschungsarbeiten beim Lost Foam-Verfahren zeichnen sich bereits heute verschiedene Anforderungen aus der Industrie ab:

- Steigerung der mechanischen Festigkeiten bei Aluminiumgussbauteilen
- Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit bei Stahlgussteilen
- Einsatz alternativer Materialien für die Modellherstellung
- Verbesserung der Qualitätssicherung der Modellherstellung

Ziel ist es, mit der Weiterentwicklung des Verfahrens am Standort Deutschland einen Know-how-Vorsprung zusammen mit Industriepartnern realisieren zu können und das Kompetenzfeld Gießereitechnik als Entwicklungsplattform für komplexe, funktionsintegrierte Gussteile weiter auszubauen.

#### Ansprechpartner

Franz-Josef Wöstmann  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 25  
E-Mail: casting@ifam.fraunhofer.de

#### Institut

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



# Advanced Protection Systems (APROSYS) für mehr Sicherheit auf Europas Straßen

## Projektbeschreibung

Jährlich rund 40 000 Menschen lassen laut EU ihr Leben auf Europas Straßen, 1,7 Millionen werden verletzt – es verwundert nicht, dass diese Zahlen und die mit ihnen verbundenen Kosten für die Gesellschaft besondere Aufmerksamkeit der EU-Forschungsförderung genießen. Entsprechende Projekte haben im 6. Forschungsrahmenprogramm hinsichtlich des Volumens neue Dimensionen erreicht: APROSYS als »Integriertes Projekt« (IP) verfügt über ein Budget von ca. 30 Millionen Euro (Fördersumme: 18 Millionen Euro, Laufzeit: April 2004 bis März 2009), verteilt auf mehr als 50 Partner unter Leitung von TNO (NL). Es ist eingebettet in ein übergeordnetes, u. a. von EUCAR als der Vereinigung der europäischen Automobilhersteller unterstütztes »Integrated Safety Programme«, das Projekte gleicher Größenordnung zu verwandten Themen wie aktiver Sicherheit etc. vereinigt. APROSYS stellt in diesem Umfeld derzeit die zentrale Forschungsanstrengung der Europäischen Union zur Verbesserung der passiven Sicherheit im Straßenverkehr dar. Die Wurzeln dieser Initiative liegen in den European Vehicle Passive Safety Networks, denen das Fraunhofer IFAM von Beginn an als verantwortlicher Partner für Werkstofffragen angehört.

APROSYS selbst gliedert sich in 9 Teilprojekte (Abb. 1), deren erste vier sich an spezifischen Unfallszenarien orientieren, während weitere vier Querschnittsthemen abdecken. Letztere haben eine eigenständige Daseinsberechtigung und entsprechende Forschungsinhalte, stehen aber zusätzlich den Erstgenannten für Unterstützungsleistungen zur Verfügung. Das Fraunhofer IFAM ist beteiligt an Teilprojekt 2 mit dem Ziel der Minderung von Unfallfolgen für Pkw-Insassen in Kollisionen mit Lkws und an Teilprojekt 7, das Basiswissen und -technologien für virtuelle Testverfahren erarbeitet. Das Gesamtbudget des Fraunhofer IFAM in diesem Projekt beträgt ca. 340 000 Euro, die sich etwa im Verhältnis 2 zu 3 auf die Teilprojekte 2 und 7 verteilen.

## Aufgabe und Ergebnisse

Die bisherigen Aktivitäten konzentrieren sich auf Teilprojekt 7, innerhalb dessen die Verbesserung von Simulationen des Verformungsverhaltens von Werkstoffen und Strukturen im Crashfall einen zentralen Baustein darstellt. Als Beispiel für innovative Werkstoffe mit hohem Potenzial zur Erhöhung der Crashesicherheit wurden aufgrund ihres Energieabsorptionsvermögens Aluminiumschäume



Abb. 1: Die Projektstruktur von APROSYS – Teilprojekte und Teilprojektleiter ([www.aprosys.com](http://www.aprosys.com)).

zum Gegenstand genauerer Untersuchungen gemacht. Für diese Werkstoffklasse, und innerhalb derselben für nach dem Fraunhofer-Verfahren hergestellte AlSi7-Schäume, wurde in Kooperation zwischen Fraunhofer IFAM und Politecnico di Torino (Prof. G. Belingardi, Prof. M. Avalle, Dr. L. Peroni) ein Testprogramm aufgestellt, anhand dessen Abarbeitung und Auswertung eine Neubestimmung der Parameter für verschiedene gängige Materialmodelle für die FEM-Simulation sowie eine Bewertung dieser Materialmodelle erfolgen sollten. Ergänzende Messungen dienten der Ermittlung typischer Dichteschwankungen innerhalb der Schäume und der Bewertung ihres Einflusses auf die Streuung globaler Materialeigenschaften.

Die Testmatrix umfasst in erster Linie axiale und hydrostatische Druckversuche, die benötigt werden, um die Parameter des Deshpande/Fleck-Modells sowie des ABAQUS-»Crushable Foam«-Modells zu bestimmen. Darüber hinaus wurden Zug- und Torsionsversuche, aber auch axiale Druckversuche mit überlagerter hydrostatischer Spannung durchgeführt. Versuche der letzteren drei Typen dienten der Beurteilung der Frage, ob die durch die Materialmodelle vorgegebenen Typen von Versagensflächen bei Parameterisierung auf alleiniger Basis der axialen und hydrostatischen Versuche tatsächlich geeignet sind, das Materialverhalten korrekt wiederzugeben. Frühere Untersuchungen beziehen sich häufig auf andere Arten metallischer Schäume und verzichten auf eine Abdeckung des gesamten technisch interessanten Dichtespektrums (für diese Materialvariante ca. 0,3 bis 0,8 g/cm<sup>3</sup>).

Als ein weiterer Teilaspekt wurde die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Dehnrates anhand von Druckversuchen analysiert. Zu diesem Zweck wurden neben quasistatischen Versuchen klassische dynamische Versuche mittels Fallgewicht sowie hochdynamische Versuche mittels eines Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) in herkömmlicher und in Taylor-Konfiguration durchgeführt. Dadurch konnten insgesamt Testgeschwindigkeiten zwischen 10<sup>-4</sup> und >10<sup>3</sup> m/s realisiert werden. Als Ergebnis ist festzustellen, dass unabhängig von der Dichte keine Dehnratesabhängigkeit berücksichtigt werden muss.

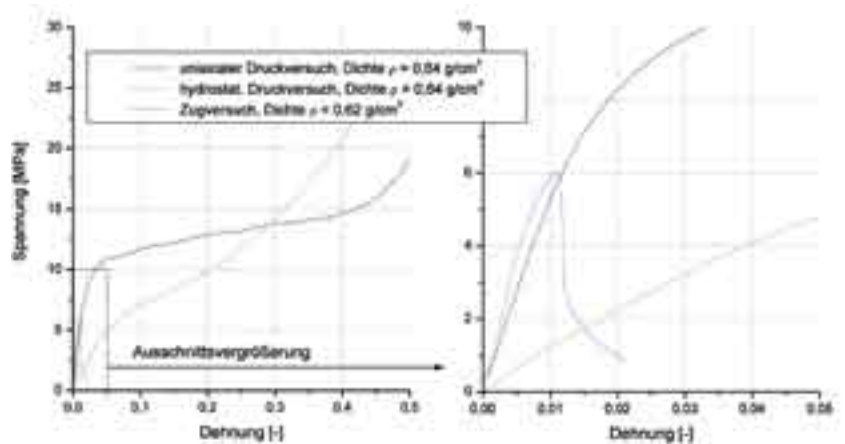


Abb. 2: Beispiele für Spannungs-/Dehnungskurven von AlSi7-Schaum im uniaxialen Druckversuch, im hydrostatischen Druckversuch und im Zugversuch.

Abbildung 2 zeigt Spannungs-/Dehnungskurven für die drei zentralen Lastfälle. Aus Kurven dieser Typen wurden Festigkeiten bzw. Dehngrenzen in Abhängigkeit von der Dichte bestimmt, wobei sich die Beschreibung dieser Beziehungen am Ansatz nach Gibson und Ashby orientiert ( $R_p = C \cdot \rho^n$ ). Die in Abbildung 3 und 4 gezeigten Grenzen der Versagensflächen für variierte Dichten stützen sich auf die derart ermittelten Näherungen. Abbildung 3 zeigt anhand zweier Dichten für beide betrachteten Modelle die allgemeine Ausprägung mit vorgegebenen Verhältnissen  $k_f$  zwischen hydrostatischer Zug- und Druckfestigkeit (0,1 für das ABAQUS-»Crushable Foam«-Modell, definitionsgemäß 1 für das Deshpande/Fleck-

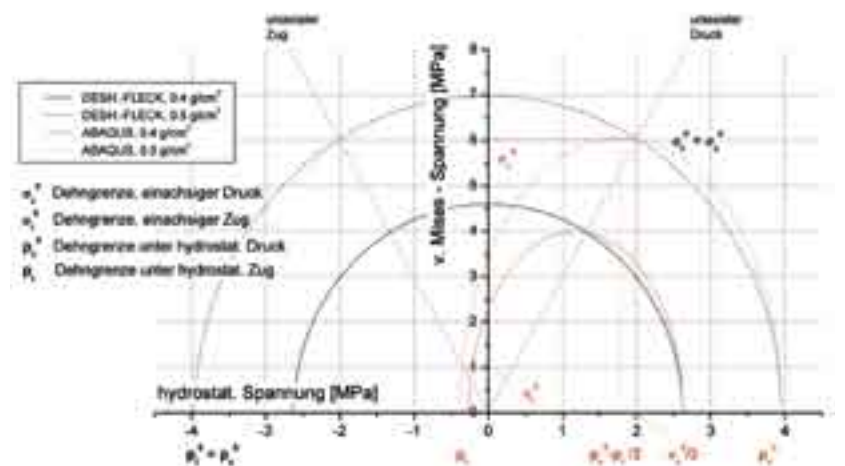


Abb. 3: Fließflächen nach Deshpande/Fleck- und ABAQUS-»Crushable Foam«-Modell aus uniaxialen und hydrostatischen Druckversuchen.

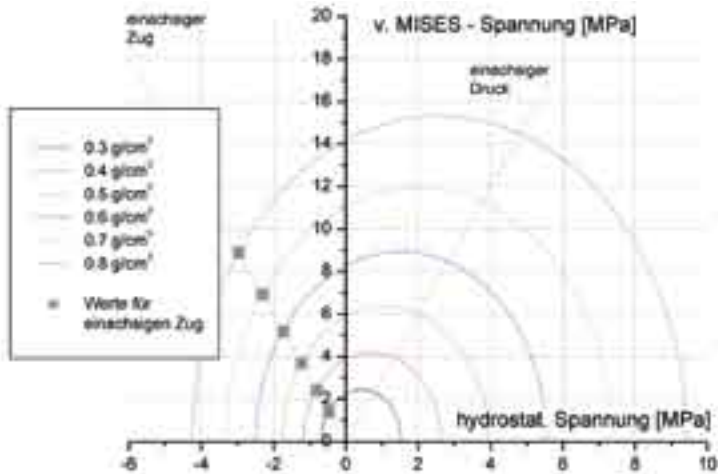


Abb. 4: Fließflächen nach ABAQUS-»Crushable Foam«-Modell unter zusätzlicher Einbeziehung der Zugversuche.

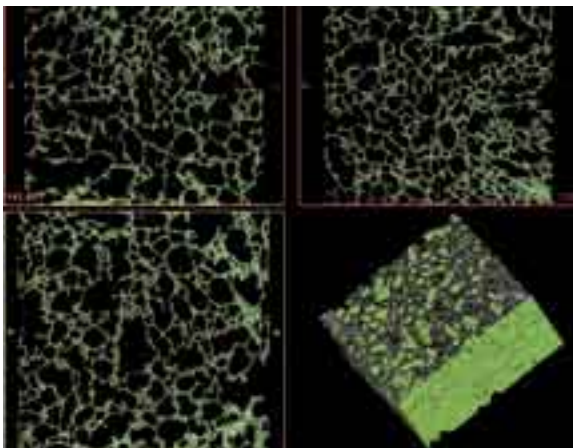


Abb. 5: Innere Struktur einer Schaumprobe, bestimmt mittels Computertomographie – Schnitte und 3-D-Rekonstruktion.

#### Ansprechpartner

Dirk Lehmhus  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 15  
E-Mail lehmhus@ifam.fraunhofer.de

Hermann Pleiteit  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 99  
E-Mail pleiteit@ifam.fraunhofer.de

#### Institut

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

Modell), während in Abbildung 4 der Wert von  $k_f$  mit dem Ziel einer korrekten Abbildung der axialen Zugversuche angepasst wurde ( $k_f = 0,45$ ). Vergleiche zwischen Simulation und Experiment zeigen gute Übereinstimmung für druckdominierte Lastfälle, die Auswertung dauert noch an.

Die Beurteilung des Einflusses der statistischen Verteilung der Dichte auf die Materialeigenschaften ist derzeit noch nicht abgeschlossen. Als erster Schritt wurde für mehrere Proben mittels Computertomographie die innere Struktur bestimmt (Abb. 5). Anschließend wurden Näherungsformeln für systematische (Randschichten, Drainage) und statistische lokale Dichteabweichungen abgeleitet. Parallel wurde ein Programm entwickelt, mit dessen Hilfe FEM-Modellen einfacher Proben Dichteschwankungen zugeordnet werden können, die den gefundenen statistischen Verteilungen gehorchen. Mithilfe dieser Werkzeuge wird als weiterer Teilschritt ein stochastisches Simulationsprogramm abgearbeitet werden, das eine Aussage über die Streuung der Festigkeit als Folge unterschiedlicher Ausprägungen der Dichteverteilung im Material ergibt. Diese Streuung kann anschließend mit der experimentell gefundenen Streuung abgeglichen werden. Die Untersuchungen sollen zur Festlegung fundierter Sicherheitsfaktoren für die Dimensionierung von Aluminiumschaum-Bauteilen beitragen.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Es ist geplant, die Ergebnisse der in Teilprojekt 7 durchgeführten Untersuchungen direkt in die in Teilprojekt 2 geplante Entwicklung seitlicher Unterfahrschutz-Systeme für Lkws einzubringen. Des Weiteren werden die Resultate und die gezogenen Schlussfolgerungen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen verbreitet werden. Für das Fraunhofer IFAM selbst bedeuten die geschilderten Arbeiten einen wesentlichen Schritt voran im Hinblick auf die Fähigkeit zur Simulation von Aluminiumschäumen. Die bilaterale Zusammenarbeit mit der Politecnico di Torino zu diesem Thema wird auch unabhängig von APROSYS fortgeführt, unter anderem mit dem Ziel einer Simulation des Verhaltens von APM-Strukturen, einer neuen Generation von Aluminiumschäumen.

# Gasphasensynthese katalytisch aktiver intermetallischer Legierungen

## Ausgangssituation

Raney-Nickel ist ein unverzichtbarer kommerzieller Werkstoff zur heterogenen Katalyse verschiedener Kohlenwasserstoffe und ein aussichtsreiches Material für Wasserstoff oxidierende Schichten in Alkali-Brennstoffzellen. Das nanoporöse Raney-Nickel wird im industriellen Maßstab durch Auslaugen von Aluminium aus einer pulverförmigen intermetallischen Nickel-Aluminium-Basislegierung hergestellt. Die spezifische Oberfläche beträgt typisch 50–70 m<sup>2</sup>/g. Ein gewisser Anteil Restaluminium, das bei diesem Prozess legiert bleibt, sowie weitere Übergangsmetallzusätze beeinflussen die Aktivität und Selektivität dieses Katalysatorwerkstoffs.

Im Rahmen eines integrierten EU-Projektes wird eine deutliche Verbesserung der katalytischen Eigenschaften von Raney-Nickel angestrebt, um kostengünstige Alternativen für Wasserstoff oxidierende Katalysatoren in Alkali-Brennstoffzellen zu ermöglichen. Aus der Gasphase hergestellte nanoporöse Schichten auf Nickelbasis sollen dabei als »benchmark« dienen, da nur so eine ähnlich feine (nanostrukturierte) Morphologie der Nickelbasislegierungen wie beim Raney-Nickel möglich ist – jedoch ohne Restaluminium.

## Aufgabe

Im Teilprojekt »benchmark experimentation« besteht die Aufgabe des IFAM darin, nanoskalige Nickelbasispulver in definierter Zusammensetzung in einer Edelgasatmosphäre darzustellen und die Auswirkung einer kurzzeitigen thermischen (strahlungsinduzierten) Behandlung auf deren Morphologie zu untersuchen. Eine derartige Bestrahlung soll z. B. über die induzierten Sintereffekte den Zusammenhalt der Nanopartikel im Agglomeratverbund fördern, ohne aber deren spezifische Oberfläche wesentlich zu reduzieren.

Zur Optimierung der Synthesebedingungen sollen die verschiedenen durch die European Space Agency (ESA) koordinierten Mikrogravitationsplattformen (z. B. Parabelflug) genutzt werden, auf denen bei Schwerelosigkeit die Konvektions- und Sedimentationseffekte wirkungsvoll unterdrückt werden können, die anderenfalls unter Laborbedingungen bei der eingesetzten hohen

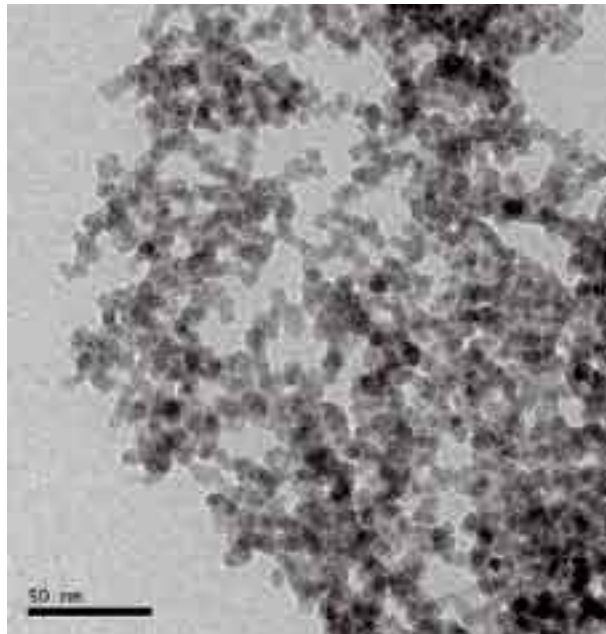


Abb. 1: Hochporöses Nickel-Chrom-Pulver – hergestellt durch Sputtern in Argon.

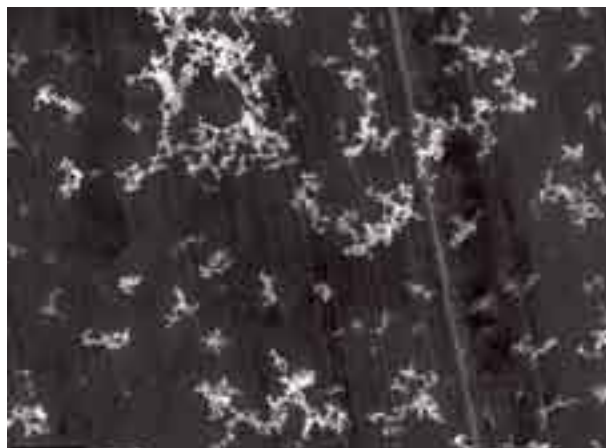


Abb. 2: Typische Agglomerat-Struktur metallischer Nanopartikel, die sich bei Verdampfung in einer Edelgasatmosphäre bilden (hier: Silber in Helium).

Verdampfungstemperatur unvermeidbar sind. Hierfür war eine parabelflugtaugliche experimentelle Vorrichtung zu schaffen, um Metallschmelzen in Helium zu verdampfen und die dabei entstehenden nanoporösen Agglomerate in situ mit einer Strahlungsquelle zu heizen. Unmittelbar anschließend soll das Pulver aufgefangen werden, und zwar derart, dass später einzelne strahlungsmodifizierte Agglomerate analysiert werden können.

## Projektbeschreibung und Ergebnis

Im Rahmen der 43. ESA-Parabelflug-Kampagne wurde im März 2006 die grundsätzliche Eignung einer speziell aufgebauten Versuchsanlage erfolgreich getestet. Unter Schwerelosigkeit konnten für den Modellwerkstoff Silber Verdampfungsversuche in Helium bei reduziertem Druck durchgeführt werden. Die Bewegung der Metallagglomerate ist konvektionsfrei und gleichmäßig. Schwierigkeiten bereitet jedoch weiterhin die hohe Verdampfungstemperatur von etwa 1800 °C, die benötigt wird, um (Nickel-)Legierungen mit hinreichend hoher Rate verdampfen zu können. Hier ist eine Weiterentwicklung des Verdampfers – vermutlich durch induktive Heizung – zwingend erforderlich. Eine weitere Kampagne ist für Ende 2007 geplant, bei der auch eine Strahlungsquelle zur In-situ-Heizung der Metallagglomerate integriert werden wird.



**Abb. 3:** Eine von Novespace in Bordeaux betriebene A300 ermöglicht in 30 aufeinanderfolgenden Parabeln jeweils 20 Sekunden dauernde Versuche unter »Fast-Schwerelosigkeit« (typisch  $\pm 0,02$  g) für etwa 15 verschiedene Experimente. Oben: Die furchtlosen Forscher; Mitte: A300 im Steigflug (»injection phase«); unten: IFAM-Versuchsapparatur (Bildquelle: ESA).

### Auftraggeber

Gefördert im 6. EU-Rahmenprogramm als »Integrated Project« mit über 40 weiteren Partnern  
 Titel des Projektes: »IMPRESS« – Intermetallic Materials Processing in Relation to Earth and Space Solidification  
 Laufzeit: November 2004 bis September 2009  
 Koordinator: ESA, Noordwijk (Niederlande)

### Ansprechpartner

Falko Griehl  
 Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 18  
 E-Mail griehl@ifam.fraunhofer.de

Bernd Günther  
 Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 72  
 E-Mail guenther@ifam.fraunhofer.de

### Institut

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

# Werkstoffe zur Elektronikkühlung

## Situation

Die zunehmende Integrationsdichte und Leistungsaufnahme von elektronischen Halbleiterbauteilen in Leistungs-, Mikro- und Optoelektronik erfordern leistungsfähige Werkstoffe und Konzepte, um die im Bauteil anfallende Verlustwärme effektiv abzuführen. Ein optimales »Thermal Management« ermöglicht ein hohes Maß an Zuverlässigkeit sowie eine lange Lebensdauer der elektronischen Komponenten. Neben einem optimierten Packagedesign muss eine verbesserte zusätzliche Kühlung durch leistungsfähige passive Wärmeleiter oder durch verbesserte aktive Bauelemente realisiert werden.

Zur passiven Kühlung sind Werkstoffe mit einer möglichst hohen Wärmeleitfähigkeit und einer geringen thermischen Ausdehnung erforderlich, die im elektronischen Package eingesetzt werden können. Metallische Verbundwerkstoffe bieten zur Problemlösung aussichtsreiche Ansätze. Mit Siliziumkarbid verstärktes Aluminium gilt als ein Referenzmaterial, das die genannten Forderungen mit einer Wärmeleitfähigkeit von 200 W/(mK) und einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen 6 und 8 ppm/K bisher ausreichend erfüllt. Es ist jedoch absehbar, dass in Zukunft noch höhere Wärmeleitfähigkeiten benötigt werden.

Nachteilig bei allen aktiven Einheiten (Kühlungen durch Ventilatoren oder Kühlaggregate) sind die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit sowie die Lärmbelastigung und der benötigte Platz. Die alternative Lösung durch »Heat Pipes« wird derzeit im Massenmarkt durch die hohen Kosten limitiert. Eine weitere Möglichkeit zur aktiven Kühlung bieten thermoelektrische Bauelemente. Aufgrund ihrer einfachen Funktionsweise, der Robustheit und kompakten Bauweise, der hohen Lebenserwartung sowie der Unempfindlichkeit gegenüber Vibrationen sind thermoelektrische Bauteile sehr interessant. Die aktive Kühlung von »Hot Spots« bei elektronischen bzw. optoelektronischen Bauteilen wie z. B. Laserdioden und Prozessoren ist eine Hauptanwendung von Peltierelementen. Dazu werden miniaturisierte Peltierelemente mit einer sehr hohen Kühlleistungsdichte (ca. 300 W/cm<sup>2</sup>) benötigt, was aber nur über Bauteile mit neuen High-ZT-Werkstoffen zu erreichen ist.

## Chance

Die gewünschte Steigerung der Leitfähigkeit von Verbundwerkstoffen sollte durch ein Ersetzen des Aluminiums durch eine leitfähigere Matrix, d. h. Kupfer oder Silber, oder durch das Einbringen leitfähigerer bzw. sich geringer ausdehnender Zweitphasen (z. B. Diamant, C-Nanofasern, pyrolytischer Kohlenstoff) möglich sein. Wärmeleitfähigkeiten von deutlich über 400 W/(mK) könnten dann in Kombination mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten realisierbar sein.

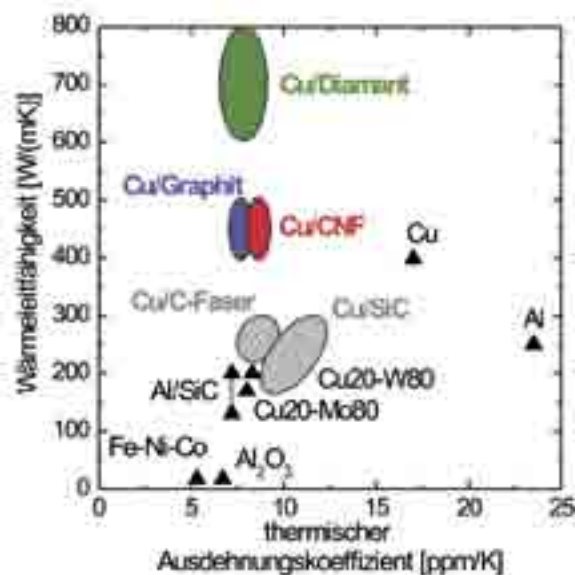


Abb. 1: Ausgewählte Entwicklungsziele von neuen Verbundwerkstoffen für Wärmesenken im Vergleich zu herkömmlichen Werkstoffen.

Bei allen Werkstoffkombinationen kommt der Grenzfläche zwischen Metallmatrix und Verstärkungsphase eine besondere Bedeutung zu. Einerseits werden bei einem sehr geringen Grenzflächenwiderstand die Variationsmöglichkeiten in Art und Größe der Zweitphase kaum eingeschränkt, andererseits erfordert die Übertragung der Spannungen zur Reduzierung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten eine gute Bindung zwischen Matrix und Zweitphase. Entscheidend für thermoelektrische Kühlanwendungen ist die Qualität entsprechender Werkstoffe, gekennzeichnet durch den thermoelektrischen Gütewert ZT. Werkstoffe mit  $ZT > 1$  werden

üblicherweise High-ZT-Werkstoffe genannt. Neue Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Werkstoffentwicklung haben gezeigt, dass sich mit einer Nanostrukturierung neue Möglichkeiten der Effizienzsteigerung von thermoelektrischen Werkstoffen ergeben. Gelingt es, diese hoch effizienten Werkstoffe mithilfe des Spark-Plasma-Sinterns in größeren Mengen als Massivmaterial herzustellen, stehen zukünftig auch Peltierkühler mit verbesserten Eigenschaften bei gleichzeitig reduzierten Fertigungskosten zur Verfügung.

### Forschungspotenzial und aktuelle Arbeiten

Die aktuellen Aktivitäten am IFAM Dresden konzentrieren sich auf den Einsatz hochleitfähiger Verstärkungsphasen wie Diamant und hochgraphitisierte Kohlenstoffsysteme (C-Nanofaser/VG-CNF, C-Microfaser/VGCMF und Naturgraphit) in Kupfer-Verbundwerkstoffen. Aufgrund des Bindungsverhaltens der Kohlenstoffatome weisen Diamant und Graphit Wärmeleitfähigkeiten von 1500–2000 W/(mK) auf, wobei der thermische Ausdehnungskoeffizient im Bereich von 0–1 ppm/K liegt. Teilchenverbundwerkstoffe sind in ihren Eigenschaften mehr oder weniger isotrop. Im Gegensatz hierzu sollte es bei den Graphitwerkstoffen möglich sein, durch gerichtete Konsolidierungsmethoden anisotrope Eigenschaften hinsichtlich der Wärmeleitung und der thermischen Ausdehnung zu realisieren. Derartige Verbundwerkstoffe mit gerichteten Kühleigenschaften werden in zukünftigen elektronischen Anwendungen mit dreidimensionalem Package-Aufbau ebenfalls eine verstärkte Rolle spielen.

Bisherige Untersuchungen am System Kupfer/Diamant mit mehr als 40 Vol.-% Diamantanteil zeigen, dass Wärmeleitfähigkeiten von über 600 W/(mK) bei einem reduzierten thermischen Ausdehnungskoeffizienten von weniger als 10 ppm/K erreichbar sind. Das optimale Grenzflächendesign erfolgt hierbei über eine Chrom- bzw. Bor-Karbid-Bildung, wobei verfahrens- und legierungstechnische Parameterfenster einzuhalten sind.

Für die Kupfer/C-Nanofaser-Verbundwerkstoffe wurde ein geeigneter Prozess zur Herstellung homogener Kupferpulver/Faser-Mischungen erarbeitet. Gemeinsam mit den Werkstoffsystemen Kup-

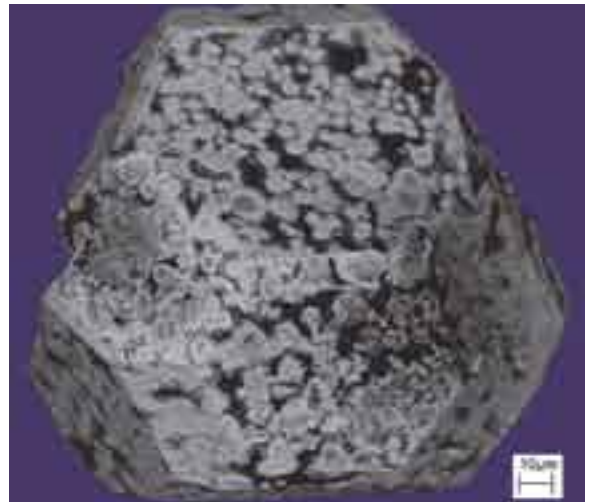


Abb. 2: Karbidbildung zum Interfacedesign in Kupfer-Diamant-Verbundwerkstoffen (REM-Aufnahme [BSE-Signal] eines Diamanten nach Herauslösen aus dem CuCr-Diamant-Verbundwerkstoff).

fer/Graphit und Kupfer/C-Microfaser werden das Heißpressen, das heißisostatische Pressen sowie das Strangpressen verwendet, um die anisotropen Eigenschaften der hochgraphitisierten Materialien optimal für die Werkstoffverbunde zu nutzen. Diese graphitischen Kupfer-Verbundwerkstoffe weisen innerhalb der ersten Untersuchungsergebnisse neben einer sehr guten mechanischen Bearbeitbarkeit Wärmeleitfähigkeiten von mehr als 400 W/(mK) bei einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 7–8 ppm/K in zweidimensionaler Orientierung der Verstärkungs Komponente auf. Die Beseitigung der genannten Hindernisse für die wirtschaftliche Anwendung von thermoelektrischen Werkstoffen auch zur Elektronik Kühlung ist Gegenstand der laufenden WISA »Nano-TEC« im Verbund mit dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM in Freiburg und dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS in Erlangen. Mit dem SPS-Sinterverfahren sind aus modifizierten  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -Pulvern (n- und p-dotiert) thermoelektrische Massivwerkstoffe herstellbar, deren Gütewerte die der heute verfügbaren Stoffe bereits übertreffen und gleichzeitig mechanisch stabiler sind.

Die Optimierung dieser Werkstoffe und des Verfahrens zur Herstellung von gesinterten, polykristallinen Thermoelektrika steht zurzeit noch aus, da alle aktuell verfügbaren Werkstoffe als Einkristalle eingesetzt werden.

## Umsetzung und Ausblick

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu faser- und partikelverstärkten Kupfer-Verbundwerkstoffen werden am IFAM Dresden innerhalb von Verbundprojekten (CuCNF/BMBF, ExtreMat/EU) durchgeführt. Die entwickelten Werkstoffe erfüllen bereits jetzt die gestellten thermophysikalischen Anforderungen der beteiligten Endanwender, so dass wie geplant in naher Zukunft mit diesen Verbundwerkstoffen erste Demonstratoren für elektronische Anwendungen aufgebaut und umfassend getestet werden können.

Zentraler Punkt von wissenschaftlichem und technologischem Interesse innerhalb aller metallischen Verbundwerkstoffe ist die Grenzflächengestaltung zwischen der Matrix und der Verstärkungskomponente und deren Wirkung auf die thermophysikalischen bzw. -mechanischen Eigenschaften, einschließlich deren Beständigkeit während einer zyklischen Temperaturbelastung. Systematische und grundlagenorientierte Untersuchungen zu dieser Problematik werden derzeit in Kooperation mit der Technischen Universität Dresden und dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden vorbereitet.

Nicht zuletzt besteht auch ein erheblicher Innovations- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich leitfähiger Grenzflächenmaterialien, die der thermischen Verbindung zwischen dem elektronischen Bauteil und dem Kühlkörper dienen. Diese zunehmend als Schwachstelle im Modulaufbau realisierten Übergänge werden in zukünftige FuE-Arbeiten zum Thermal Management am IFAM Dresden integriert.

Durch die in der WISA »NanoTEC« erzielten Ergebnisse zur verfahrenstechnischen Umsetzung des nanoskaligen thermoelektrischen Konzeptes können sich zukünftig weitere Akquisitionsmöglichkeiten in allen Marktsegmenten eröffnen, in denen gezieltes Nano-Engineering ein Erfolg versprechender Lösungsansatz ist (z. B. hochwarmfeste Leichtmetalle, Magnetwerkstoffe).



Abb. 3: Spark-Plasma-Sintertechnologie.

### Ansprechpartner

Thomas Schubert  
 Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 46  
 E-Mail: [thomas.schubert@ifam-dd.fraunhofer.de](mailto:thomas.schubert@ifam-dd.fraunhofer.de)

### Institut

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



## Metallischer Siebdruck als Fertigungsverfahren für dreidimensionale mikrostrukturierte Bauteile

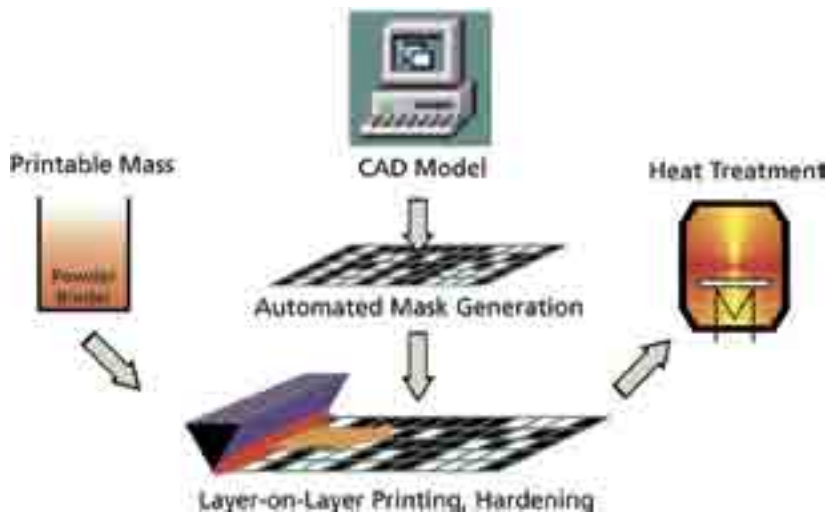


Abb. 1: Verfahrensskizze zur Herstellung metallischer Strukturen mittels Siebdruck.

### Ausgangslage

Während Miniaturisierung und Funktionalität in der Mikrosystemtechnik in den letzten Jahren große Fortschritte verzeichnen konnten, besteht in vielen Bereichen noch ein Bedarf an einer Fertigungstechnik, die eine wirtschaftliche Umsetzung der hoch spezifischen Bauteile in die Endanwendung ermöglicht. Speziell können in den bisherigen Verfahren Dreidimensionalität, Bauteilgüte und hohe Stückzahlen oft nicht miteinander kombiniert werden. In vielen Bereichen fehlt es daher an einem günstigen und zugleich großserientauglichen Verfahren, das z. B. der Herstellung von kompakten Brennstoffzellenstacks auf der Kostenseite zu einem Durchbruch verhelfen könnte. Außerdem besteht in vielen Anwendungsgebieten, wie in der Medizintechnik, Spezialmaschinenbau und Design, Bedarf an einem Verfahren mit einer hohen Freiformgestaltungsmöglichkeit, um neue Anwendungsfelder bedienen zu können.

Das Fraunhofer IFAM hat daher in Zusammenarbeit mit der Firma Bauer Technologies ein innovatives und massentaugliches Serienverfahren entwickelt, das die Herstellung kleiner metallischer Präzisionsbauteile in hoher Stückzahl ermöglicht. Ausgegangen wird dabei von einem patentierten Siebdruckverfahren für keramische Strukturen, bei dem inzwischen Bauteilhöhen von bis zu 15 Zentimetern erreicht werden.

### Verfahren

In der vom IFAM verwendeten Variante wird eine Suspension aus Metallpulver und organischem Binder mittels Siebdruck auf eine Unterlage gedruckt. Nach einem Härteschritt können weitere Schichten aufgebracht werden, so dass Schritt für Schritt die Strukturen eine dreidimensionale Form annehmen (Abb. 1). Durch Siebwechsel oder laterale Verschiebung des Siebes ist die Herstellung von geschlossenen Kanälen und geneigten Wänden ohne Weiteres möglich. In einer anschließenden Wärmebehandlung wird der Binder entfernt und das verbleibende Metallpulver miteinander versintert. Dabei entstehen mechanisch stabile mikrostrukturierte Teile mit Zellwandstärken und Kanaldurchmessern von minimal 100 Mikrometern. Die maximale Bauteilhöhe kann dabei je

nach verwendetem Material bei einigen Zentimetern liegen. Abbildung 2 zeigt gesinterte Demonstratorbauteile, die die Möglichkeiten der Siebdrucktechnologie aufzeigen. Verwendet wurde hierbei feines Stahlpulver (Edelstahl 316L, 1,4404) mit einem  $d_{90}$  von kleiner 10 Mikrometer. Nach der Sinterung zeigen die Bauteile eine isotrope und weitgehend verzugsfreie Schrumpfung von etwa 12 %. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass eingebrachte waagerechte Strukturen von  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  erhalten bleiben. Eine Neigung zu Rissen konnte bei keinem Bauteil beobachtet werden. Die resultierende Mikroporosität liegt je nach Wärmebehandlungsparameter zwischen 3 und 10 %. Die Zellwände können durch die Sinterung geschlossen werden, so dass eine ungewollte Verbindung zwischen zwei Kanälen unterbunden werden kann. Darüber hinaus ist auch das erreichbare Aspektverhältnis sehr hoch. In den bisherigen Demonstratorbauteilen aus dem Chrom-Nickel-Stahl 316L wurde ein Aspektverhältnis von 25 erzielt, wobei die maximal druckbare Bauteilhöhe bislang weit unterschritten wurde. Mit keramischen Systemen werden schon heute Aspektverhältnisse von 300 und mehr erreicht. Durch eine chemische Analyse (Tabelle 1) der gesinterten Strukturen kann gezeigt werden, dass der verwendete Binder in der Wärmebehandlung vollständig entfernt werden konnte und somit kompatibel zum verwendeten Stahl ist.

## Perspektiven

Die Vorteile des Verfahrens für eine Massenfertigung sind vielfältig: Zum einem lassen sich bei einer entsprechenden Druckfläche sehr viele Teile gleichzeitig drucken, und durch einen Umlaufprozess ist eine quasikontinuierliche Herstellung im Wechsel von Härtung und Druckvorgang mit mehreren Druckflächen einfach realisierbar. Des Weiteren liegt mit der Siebdrucktechnik ein erprobtes und robustes Verfahren vor, in dem eine Präzision bis zur Größenordnung des verwendeten Pulvers problemlos erreicht werden kann. Die verwendete Pulverroute hat außerdem Vorteile in der Werkstoffvielfalt, da sich prinzipiell alle Metalle und Legierungen verarbeiten lassen, die als Pulver verfügbar sind. Da kein geschlossenes Pulverbett notwendig ist, sind nur geringe Überschussmengen an Material notwendig. Aus den

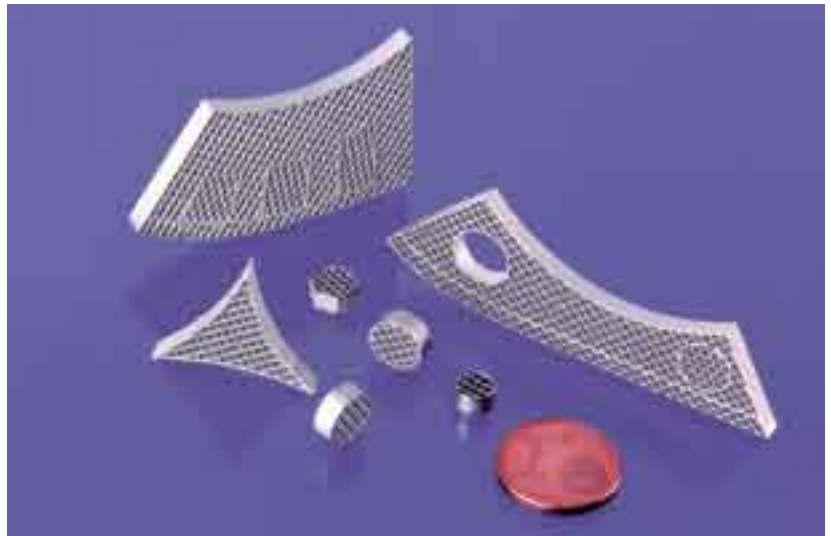


Abb. 2: Beispiele von metallischen Siebdruckstrukturen aus Chrom-Nickel-Stahl 316L.

	Gesinterte Strukturen	Spezifikation 316L
C (m.-%)	0,017	< 0,03
O (m.-%)	0,040	–
N (m.-%)	0,001	< 0,11

Tab. 1: Chemische Analyse gesinterteter Siebdruckstrukturen.

Erfahrungen im keramischen Siebdruck lässt sich dabei die maximale Grenze in der Formgebung nur schwer abschätzen. Möglich erscheint echter 3-D-Druck in Gestalt von waagerechten Blenden und überdruckten Kanälen von mehreren Millimetern Weite, so dass die Herstellung eines Mikrofluidstacks in nur einem Bauteil ohne Montage denkbar ist.

Damit wird eine weitere Funktionalitätssteigerung erzielbar, die mit anderen Verfahren nicht ohne Weiteres möglich ist. So werden Anwendungsbeispiele aufgespannt, die weit über die reine Mikroverfahrens- und Energietechnik hinausgehen und bis zum Katalysatorträger oder in die Biotechnologie, z. B. als Implantatmaterial, reichen (Abb. 3).

Das IFAM Dresden wird daher zu Beginn 2007 eine speziell ausgerüstete quasikontinuierliche Siebdruckmaschine anschaffen, mit der neben Grundlagenarbeiten auch industrielle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bis zur prototypischen Serie durchgeführt werden können. Als Primärziele zur Weiterentwicklung des Verfahrens stehen hier besonders die Entwicklung echter metallischer 3-D-Strukturen sowie die Erweiterung der Materialvielfalt auf andere, kommerziell relevante Metalle und Legierungen in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern.



Abb. 3: Auswahl potenzieller Anwendungen für metallischen Siebdruck.

#### Ansprechpartner

Thomas Studnitzky  
 Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 39  
 E-Mail: thomas.studnitzky@ifam-dd.fraunhofer.de

#### Institut

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

## PM-Aluminium für Leichtbauteile

### Ausgangssituation

Durch konsequente Werkstoffforschung und Produktentwicklung in enger Verbindung mit der Optimierung industrieller Fertigungsprozesse bieten sich für pulvermetallurgisch hergestellte Leichtbauteile aus Aluminium ausgezeichnete Einsatzchancen und neue Einsatzfelder. Durch die zunehmende Nachfrage nach Leichtbauteilen zur Gewichts- und Massenreduktion insbesondere im Automobilbau werden pulvermetallurgisch hergestellte Aluminiumbauteile zunehmend interessant. Serienreife Entwicklungen von Aluminium-Sinterbauteilen sind bereits bekannt (z. B. Nockenwellenversteller, Nockenwellen-Lagerdeckel), wodurch die Chance zur industriellen Umsetzung und Markteinführung neuer PM-Aluminiumbauteile weiter steigen wird. Zu in der Entwicklung befindlichen Anwendungsbeispielen gehören Ölpumpenrotoren (Abb. 1), Zahnriemen- und Kettenräder sowie Motorpleuel (Abb. 2). Auch außerhalb der Fahrzeugtechnik haben gesinterte Aluminium-Legierungen Anwendung als Kleinteile gefunden, wo neben dem Festigkeitsverhalten auch Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit oder auch unmagnetisches Verhalten gefordert werden, so z. B. für Pleuel in Büro- und Nähmaschinen oder Rasenmähern, für Gehäuse elektrischer Kleinstmotoren oder medizinischer Geräte. Die bauteilspezifischen Werkstoffanforderungen zu erfüllen und die Abstimmung der pulvermetallurgischen Bauteilfertigung sind eine hohe werkstoffwissenschaftliche und pulvertechnologische Herausforderung.

### Aufgabe

Das Ziel des öffentlich geförderten BMBF-Projektes bestand in der Gewichtsreduzierung von Motor- und Getriebekomponenten im Automobilbau durch konsequente Nutzung von Stoff- und Formenleichtbau.

In der gegenwärtigen Praxis von Pkw-Getrieben werden Ölpumpenrotoren aus gesintertem Stahl in Grauguss- oder Aluminiumgussgehäuse eingepasst. Im letzteren Fall vergrößert sich während des Betriebs der Spalt zwischen Gehäuse und Rotoren aufgrund der unterschiedlichen



Abb. 1: Beispiele von Ölpumpenrotoren (GKN Sinter Metals Engineering GmbH).



Abb. 2: Beispiele für sintergeschmiedete Motorpleuel (GKN Sinter Metals Engineering GmbH).

thermischen Ausdehnung beider Komponenten. Dies verursacht erhebliche Ölverluste und folglich eine Abnahme der Förderleistung. Zur Fertigung derartiger Präzisionsteile bietet das pulvermetallurgische Pressen und Sintern geeigneter Aluminium-Pulvermischungen eine aussichtsreiche Fertigungstechnologie. Im Vordergrund der werkstoffwissenschaftlichen Untersuchungen stand die Entwicklung von Aluminium-Sinterwerkstoffen mit hoher Verschleißbeständigkeit, angepasster Wärmedehnung, einer Mindestbauteilfestigkeit bis ca. 180 °C bei gleichzeitiger Gewährleistung der Langzeitstabilität von Form und Maß. Bei der Realisierung von Aluminium-Pumpenrotoren kann auch das Pumpengehäuse in Aluminium ausgeführt werden, womit sich eine Gewichtsreduktion im Vergleich zur Stahlpumpe von etwa einem Kilogramm ergibt.

Motorpleuel sind dynamisch hoch beanspruchte Bauteile, die zusammen mit Kurbelwelle, Kolben und Kolbenbolzen den sog. Kurbeltrieb im Motor bilden. Derzeit eingesetzte Pleuel werden für die Massenmotorisierung aus Stahl gefertigt. Das für diese Anwendung typische Anforderungsprofil zeigt Tabelle 1. Bei Betrachtung des Leichtbauwerkstoffes Aluminium wird deutlich, dass viele Eigenschaften der konventionellen Legierungen zur Erreichung des genannten Ziels modifiziert bzw. verbessert werden müssen. Als geeignetes Fertigungsverfahren sollte das Sinter- bzw. Pulverschmieden entwickelt werden.

Temperaturbereich	-50 °C bis +180 °C
Zugfestigkeit	450 MPa
0,2 %-Dehngrenze	> 300 MPa
E-Modul	> 80 GPa
Härte	> 150 HB
Dehnung (alle Temperaturen)	> 1,5
Kerbempfindlichkeit	bruchtrennbar
Wärmeausdehnungskoeffizient	< $16,5 \cdot 10^{-6}/K$
Dauerfestigkeit	> 180 MPa

Tab. 1: Anforderungsprofil für ein Motorpleuel.

## Ergebnisse

Siliziumhaltige Legierungen mit übereutektischen Zusammensetzungen stellen aussichtsreiche Werkstoffvarianten dar, um die geforderten Eigenschaftsprofile zu erfüllen. Wie bei den Aluminium-Silizium-Gusslegierungen steigert der Zusatz von Silizium die Härte und Festigkeit, und primär erstarrte Silizium-Kristalle erhöhen die Verschleißbeständigkeit und vermindern die Wärmeausdehnung. Diese günstigen Eigenschaften werden auch bei den Aluminium-Silizium-Sinterwerkstoffen erzielt. In dieser Werkstoffgruppe führen Pulvermischungen aus Rein-Aluminium und einem Hauptlegierungspulver über das Supersolidus-Flüssigphasensintern (SLPS) zu Sinterbauteilen mit hohen Sinterdichten (>99 % theoretischer Dichte) und guten mechanischen Kennwerten. Bei optimaler Abstimmung von Gehalt, Größe und Verteilung der Silizium-Partikel kann das Eigenschaftsbild der Werkstoffe beanspruchungsgerecht modifiziert werden.

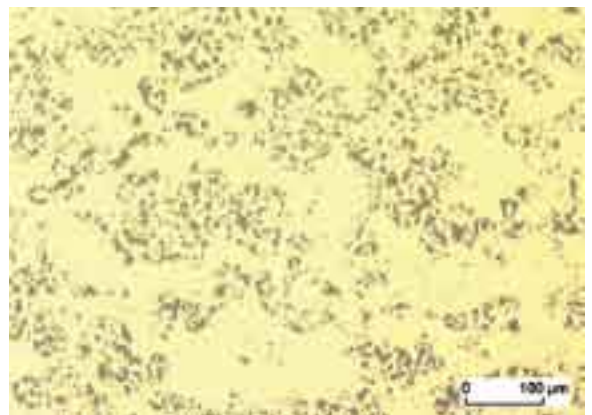


Abb. 3: Duplex-Sintergefüge von AlSi14CuMg (ECKA Alumix 231); 60 Minuten lang bei 555 °C in Distickstoff (N<sub>2</sub>) gesintert.

Für die Ölpumpenräder wurden im Projektzeitraum geeignete Press- und Sinter Techniken auch unter produktionsrelevanten Bedingungen realisiert. Erste werkzeugfallende Rotorsätze für Ölpumpen wurden gefertigt und relevanten Getriebetests unterzogen (Abb. 4).

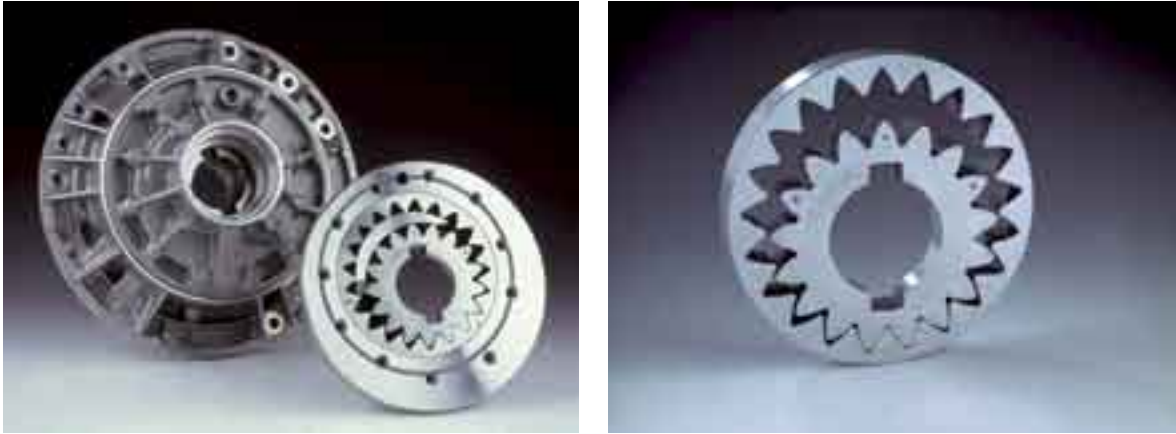


Abb. 4: Aluminium-Ölpumpe für Automatikschaltgetriebe mit einem gesinterten Rotorsatz aus AlSi14CuMg (ZF Getriebe GmbH).

Anhand dieser Ergebnisse wurde eine weiter gehende Erprobung von Aluminium-Ölpumpen mit gesinterten Aluminium-Rotoren empfohlen. Der Adhäsionsneigung der eingesetzten Reibpartner ist dabei besondere Beachtung zu schenken. Weitere Optimierungen des Gefüges (Silizium-Teilchengröße, siliziumfreie Bereiche) sind in diesem Zusammenhang vorgesehen.

Für die Anwendung Motorpleuel konnten die höchsten mechanischen Kennwerte mit der sintergeschmiedeten Legierungsvariante AlSi20CuMgZr (Legierung 5) erzielt werden. Zur Realisierung einer sehr feinen Gefügeausbildung wurde zu einem reinen »Pulverschmiedeten« übergegangen (Abb. 5).

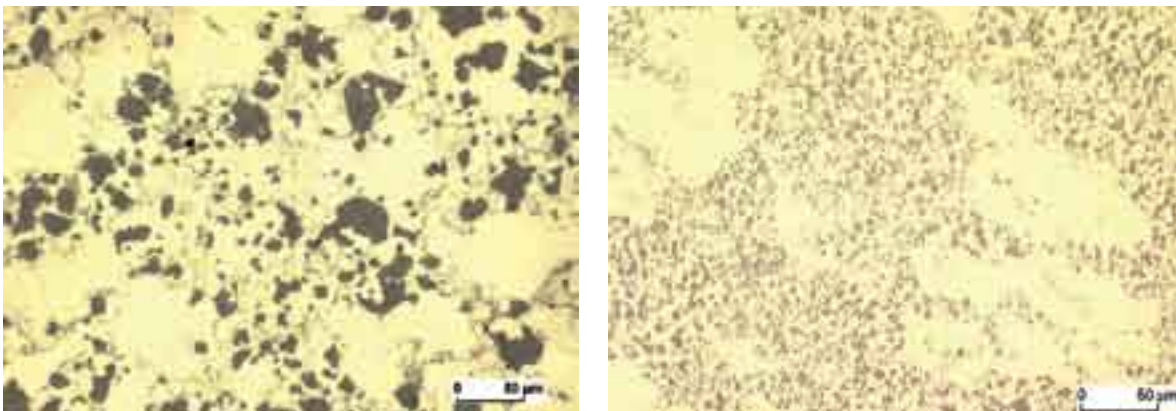


Abb. 5: Lichtoptische Gefügaufnahmen einer sintergeschmiedeten AlSi20CuMgZr-Legierung; links: nach dem ursprünglichen Sinterschmiede-Regime (grobes Si, grobe  $Al_7Cu_2Fe$ - und  $Al_2Cu_5Mg_8Si_6$ -Ausscheidungen), rechts: verändertes Sinterschmiede-Regime (feines Si-Korn).

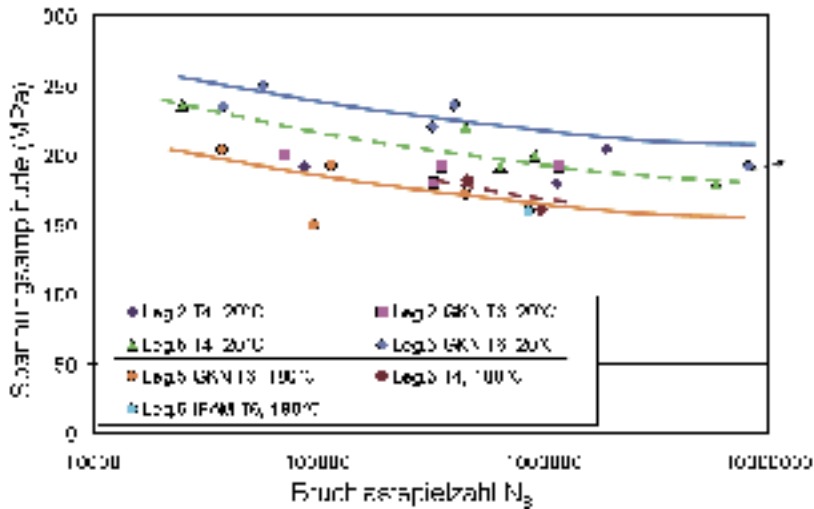


Abb. 6: Ermittelte Schwingfestigkeiten der pulvergeschmiedeten Legierungen bei RT und 180 °C nach DIN 50100.

Die Schwingfestigkeit dieser Werkstoffe erreicht die Anforderungen des Lastenheftes, wobei die höchste Ermüdungsfestigkeit im Zustand T6 mit 192 MPa bei Raumtemperatur und  $R = -1, >8 \cdot 10^6$  Lastspiele ermittelt wurde (Abb. 6). Die erreichten Bruchdehnungen sind jedoch zu niedrig, so dass weitere Entwicklungsarbeit erforderlich ist. Es wurden diesbezüglich legierungstechnische Veränderungen und zusätzliche Oberflächenbehandlungen vorgeschlagen.

Die im Vorhaben entwickelten Werkstoffe werden zukünftig auch mit den Anforderungen anderer Bauteile verglichen, um ein erweitertes Anwendungsfeld zu erschließen. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten sind nach wie vor gegeben, da insbesondere von der Automobilindustrie eine große Nachfrage nach Werkstoffen für den Leichtbau besteht.

#### Auftraggeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

#### Projektpartner

GKN Sinter Metals Engineering GmbH  
ECKA Granulate Velden GmbH  
Ford AG  
ZF Getriebe GmbH  
Erhard & Söhne GmbH  
FEM, Schwäbisch Gmünd

#### Ansprechpartner

Thomas Schubert  
Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 46  
E-Mail: thomas.schubert@ifam-dd.fraunhofer.de

#### Institut

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

## Preise/Ehrungen

### Ausgezeichnetes Material

Für einen Verbundwerkstoff aus Metall gemischt mit mikroskopisch kleinen Glashohlkugeln wurde die Arbeitsgruppe Gießereitechnik des Fraunhofer IFAM vom International Forum Design mit dem IF Material Award in Gold ausgezeichnet.

Die Größe der Glashohlkugeln beträgt dabei maximal 60 Mikrometer. Das Material lässt sich sehr gut spanend bearbeiten und hat ein metallisches Aussehen sowie eine metallartige Haptik bei gleichzeitig deutlich reduzierter Dichte. So wird die Dichte von Aluminium von  $2,7 \text{ g/cm}^3$  auf  $1,2 \text{ g/cm}^3$  reduziert, die von Zink von  $7 \text{ g/cm}^3$  auf  $2,6 \text{ g/cm}^3$ . Die geschlossene mikroskopisch kleine Porosität des Materials erlaubt die Anwendung von Beschichtungsverfahren – vom Tauchlackieren bis hin zu galvanischen Verfahren –, die bei den meisten porösen Werkstoffen so nicht realisierbar sind. Ein Beispiel hierfür ist die Herstellung von gewichtsreduzierten verchromten Zinkbauteilen.

Der Preis wurde dem Erfinder Herrn Dr. Jörg Weise auf der Hannover-Messe am 24. April 2006 überreicht.



Preisträger Dr. Jörg Weise im Gespräch mit Franz Miller (Abteilungsleiter Presse und Öffentlichkeitsarbeit der Fraunhofer-Gesellschaft).



Gewichtsreduziertes verchromtes Zinkbauteil.



### Best Exhibitor Award 2006

Auf dem Powder Metallurgy World Congress PM 2006 in Südkorea wurde der Messestand des Fraunhofer IFAM besonders gewürdigt. Gemeinsam präsentierten das IFAM Bremen und Dresden herausragende Entwicklungsarbeiten aus den Gebieten Pulvertechnologie, Mikrofertigung, Verbundwerkstoffe und Zellulare Metallische Werkstoffe. Ausgezeichnet wurden die Qualität der Ausstellung und der technische Beitrag. Bestätigt wurde dies durch die große Resonanz seitens der Besucher und die lebhaften Diskussionen, die sich am Stand ergaben.



Best Exhibitor Award 2006, Powder Metallurgy World Congress PM 2006, 24.–28. September, Busan, Südkorea.

### Bernd-Artin-Wessels-Preis

Das Fraunhofer-Institut IFAM ist mit dem Bernd-Artin-Wessels-Preis für exzellente Forschungs-kooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft ausgezeichnet worden.

Gewürdigt wurde eine Kooperation zwischen der Bio-Gate AG und dem Fraunhofer IFAM. Im Rahmen eines Projektes war eine Online-Prozesskontrolle zur Bestimmung kritischer Teilchengrößen bei der Herstellung von Nanosuspensionen entwickelt worden. Diese vom IFAM entwickelte Technologie soll in der Serienproduktion eingesetzt werden. Der Preis wurde vom Bremer Stifter Bernd-Artin Wessels am 15. November 2006 an Prof. Dr. Bernd Günther, Falko Griehl und Gerd Wöbken überreicht.



Bernd-Artin-Wessels-Preis.





# Bereich Klebtechnik und Oberflächen

Ergebnisse Anwendungen Perspektiven



Fluoreszenzmikroskop.

## 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 120 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 zertifiziert, das Werkstoffprüflabor zusätzlich nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert. Das Klebtechnische Zentrum ist über DVS-PersZert® nach DIN EN ISO/IEC 17024 als akkreditierte Personalqualifizierungsstelle für die klebtechnische Weiterbildung international anerkannt.

### 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 Applikations-einrichtungen
- 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

# Arbeitsgebiete und Ansprechpartner

## Institutsleitung Prof. Dr. Otto-Diedrich Hennemann

### Klebtechnik

Dr.-Ing. Helmut Schäfer  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 41  
E-Mail sch@ifam.fraunhofer.de

#### Arbeitsgruppen

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

Dr. Andreas Hartwig  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 70  
E-Mail har@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 (0) 421 / 22 46-4 82  
E-Mail ris@ifam.fraunhofer.de

#### Fertigungstechnik

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

Dipl.-Ing. Manfred Peschka  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-5 24  
E-Mail pe@ifam.fraunhofer.de

#### Kleben in der Mikrofertigung

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

Dr.-Ing. Helmut Schäfer  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 41  
E-Mail sch@ifam.fraunhofer.de

#### Werkstoffe und Bauweisen

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

Dr. Markus Brede  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 76  
E-Mail mb@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 (0) 421 / 22 46-4 37  
E-Mail gss@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 (0) 421 / 22 46-4 39  
E-Mail dn@ifam.fraunhofer.de

### Oberflächentechnik

Dr. Guido Ellinghorst  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 99  
E-Mail eh@ifam.fraunhofer.de

#### Arbeitsgruppen

**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.

Dipl.-Phys. Klaus Vissing  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 28  
E-Mail vi@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 (0) 421 / 22 46-4 56  
E-Mail lom@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 (0) 421 / 22 46-4 07  
E-Mail vs@ifam.fraunhofer.de

### Adhäsion- und Grenzflächenforschung

Dr. Stefan Dieckhoff  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 69  
E-Mail df@ifam.fraunhofer.de

#### Arbeitsgruppen

#### 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 (0) 421 / 22 46-4 48  
E-Mail rw@ifam.fraunhofer.de

#### Elektrochemie

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

Dr.-Ing. Peter Plagemann  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-5 30  
E-Mail pla@ifam.fraunhofer.de

#### Applied Computational Chemistry in Interface Science

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

Dr. Peter Schiffels  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-5 67  
E-Mail ps@ifam.fraunhofer.de

### Dienstleistungszentren

#### Klebtechnisches Zentrum

Prof. Dr. Andreas Groß  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 37  
E-Mail gss@ifam.fraunhofer.de  
Internet www.kleben-in-bremen.de

#### Technologiebroker

Dr. habil. Hans-Gerd Busmann  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 18  
E-Mail bu@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
- Labor-Vakuumpresse mit PC-Steuerung zur Herstellung von Multilayer-Prototypen
- 300-kV- und 200-kV-Transmissions-Elektronenmikroskope 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
- Dielektrometer
- Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und Rauschanalyse (ENA)
- Doppelschnecken-Extruder (25/48D) und Knetzer zum Einarbeiten von Füllstoffen in Polymere
- Einschnecken-Messextruder (19/25D) zur 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



Peptidsyntheseautomat.

- Labordissolver
- Haze Gloss
- Lackapplikationsautomat
- Lacktrockner mit entfeuchteter Luft
- 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-Zahnrad-dosiersystem 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



Gaschromatograph mit Massenspektrometer (GC-MS).



## Beim biomolekularen Oberflächen- und Materialdesign dienen Lösungen der Natur als Vorbild

Kaum zu glauben: In den Polarregionen gibt es zahlreiche Fische, die bei niedrigsten Temperaturen überleben. In Sibirien existieren Insekten, denen auch minus 60 C° nichts anhaben können. Der Grund für dieses Phänomen ist eine besondere Ausstattung: Diese Lebewesen weisen Proteine auf, die das Wachstum von Eiskristallen verhindern. Ein derartiger »Anti-Freeze-Mechanismus« wäre auch bei vielen Materialien eine große Hilfe. Wer erinnert sich nicht noch an die zahlreichen umgestürzten Strommasten im Münsterland im November 2005? Besonders nasser Schnee hatte seinerzeit in Kombination mit starken Böen dazu geführt, dass sich in kurzer Zeit zentimeterdicke Eisschichten an den Kabeln bildeten. Da sich tausende Kabelkilometer nicht mit Frostschutzmitteln herkömmlicher Art behandeln lassen, wäre eine biologisch hochwirksame, die Vereisung verhindernde Beschichtung in diesem Fall das Nonplusultra gewesen.

Muscheln wiederum weisen in der Natur eine besonders leistungsfähige Form der Adhäsion auf. Sie sind in der Lage, trotz widrigster Bedingungen – Salzwasser, Strömung, Brandung – an Steinen, Felsen, Schiffsrümpfen oder Hafenanlagen zu verbleiben und Verbindungen höchster Festigkeit einzugehen. Die klebenden Substanzen basieren auch hier auf Proteinen, die Härtung und Haftung garantieren. Wie wäre es, solcherlei Eigenschaften auf in der Medizintechnik einsetzbare Klebstoffe zu übertragen? Hochfeste Klebstoffe auf biologischer Basis, die in feuchten oder nassen Körperregionen ohne abstoßende Reaktionen eingesetzt werden können, hätten gewiss einen großen Markt.

Die Beispiele zeigen, dass die Natur für viele Probleme des menschlichen Alltags bereits Lösungen gefunden hat. Eine sehr große Herausforderung ist jedoch die Adaptierung dieser Lösungen auf technische oder medizinische Anwendungen. Hier geht es meist um das optimale Zusammenspiel von organischen und anorganischen Komponenten. Im Fraunhofer IFAM beschäftigt sich die Arbeitsgruppe Biomolekulares Oberflächen- und Materialdesign (BIOM) mit dieser Thematik. Ihr besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Bereich der Grenzfläche zwischen anorganischen Materialien – z. B. Metall, Kunststoff, Glas, Ke-



Kleben im Wasser – Seepocken und Muscheln.

ramik oder Oxidschichten – und der organischen Biomaterie, etwa Proteine oder Nukleinsäuren. Denn um Biomoleküle in technischen Anwendungen einsetzen zu können, müssen sie im jeweiligen Anwendungsfall optimal auf einem anorganischen Träger haften. Oder auch nicht: Weil beispielsweise nur bestimmte Bereiche eines Biosensors reagieren sollen, muss die Anbindung von Proteinen auch verhindert werden können. Die Oberfläche muss also an definierten Stellen mit proteinabweisenden Schichten »reaktionsunfähig« gemacht werden. Deshalb geht es bei der Arbeit der Gruppe darum, sowohl die Grundlagen des Haftens als auch des Nicht-Haftens in diesem Bereich zu verstehen.

Die Wechselwirkungen von Molekülen und Oberflächen werden in verschiedenen Projekten erforscht. Hintergrund ist jeweils das Bestreben, durch die Anbindung von Biomolekülen entweder leistungsfähige Verbindungen herzustellen oder

Materialien zu funktionalisieren. Ein Beispiel für die Funktionalisierung ist die Anbringung von Antikörpern, die auf Krankheitserreger, Körpersubstanzen oder andersartige Zellen reagieren und diese festhalten. Auf dieser Basis entwickelte Biosensoren wären in der Lage, bestimmte Zustände zu detektieren oder ihnen sogar aktiv entgegenzuwirken. In der Medizin ließen sich beispielsweise Blutwerte oder Krankheiten feststellen.

Doch wie gelangen Biomoleküle auf die anorganische Oberfläche, und was fixiert sie dort? Diese Frage muss nicht nur einmal, sondern vielfach beantwortet werden – denn die Vielzahl unterschiedlichster Oberflächen und Biomaterialien lässt eine ganze Reihe sinnvoller Kombinationen zu. Eine klassische Variante der Biomolekül-Fixierung ist die auf goldbasierten Silizium-Wafern; doch ist Gold im Alltagseinsatz keine Standardfläche. Die Arbeitsgruppe BIOM setzt sich daher mit der Frage auseinander, wie verschiedenartige Materialien angesteuert werden müssen, um darauf Biomoleküle anzubinden und die Oberflächen damit zu funktionalisieren.

### Erfolg im Bionik-Ideenwettbewerb

In einem Ideenwettbewerb des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Namen »Bionik – Innovationen aus der Natur« wurden Anfang 2006 aus 150 Projektskizzen 20 besonders überzeugende Vorhaben ausgewählt – darunter auch eines der Arbeitsgruppe BIOM. Mit den Mitteln des BMBF sollen Forscher nun überprüfen, wie praxistauglich ihre Ideen sind. Im IFAM werden in diesem Projekt im Bereich der molekularen Bionik die eingangs beschriebenen biomimetischen Frostschutzoberflächen untersucht. In einer Machbarkeitsstudie wies die Arbeitsgruppe BIOM dabei nach, dass solche Frostschutzoberflächen auf der Basis peptidfunktionalisierter Anti-Freeze-Protein-Lacke (kurz: AFP-Lacke) realisierbar sind.

Die Eisbildung an Oberflächen ist nicht nur ein Problem bei Stromkabeln. Auch das Enteisen von Flugzeugtragflächen vor einer Vielzahl von Starts ist eine wohlbekannte, langwierige und kostenintensive Behandlung. Gleiches gilt für die

Raumfahrttechnologie: Auch Satelliten können vereisen. Bei Windkraftanlagen oder Rollläden beeinträchtigt Eisbildung ebenso die Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit. Lösungsansatz der Arbeitsgruppe ist es, die in Pflanzen, Fischen und Insekten vorkommenden Frostschutzproteine zu detektieren und sie in Teilsequenzen oder auch komplett synthetisch herzustellen. Dabei werden die Peptide bei der Synthese so modifiziert, dass diese über Verbindungsmoleküle, einen Linker, an die Lackoberfläche gebunden werden. Zum Einsatz kommen dabei technische Lacksysteme, die für den jeweiligen Anwendungsbereich optimiert werden können.

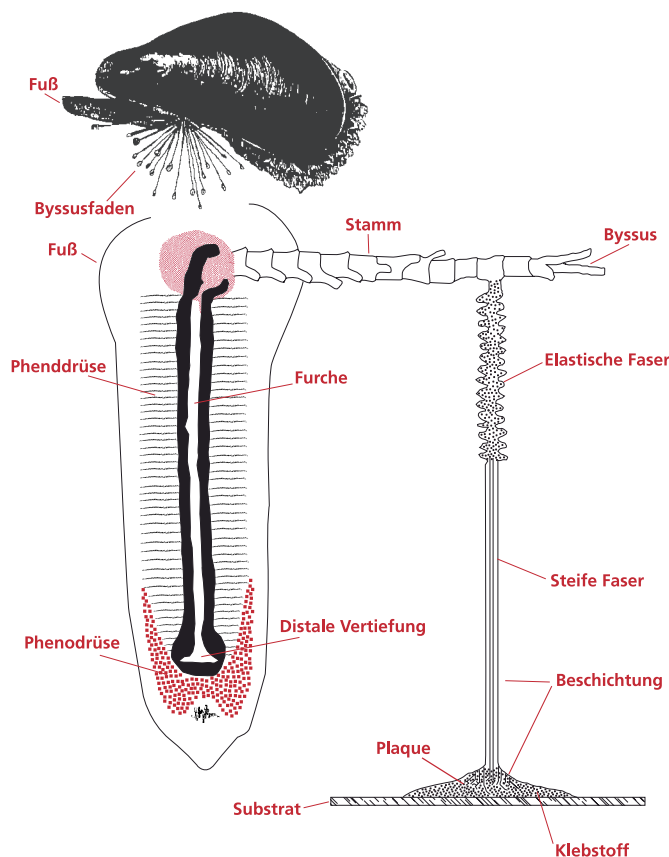
Als äußerst vorteilhaft sowohl als Basis der erfolgreichen Antragstellung beim BMBF-Ideenwettbewerb als auch bei der späteren Durchführung des Vorhabens hat sich die enge Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe BIOM mit dem Arbeitsgebiet Lacktechnik im IFAM dargestellt. Eine Arbeitsgruppe im Bereich Lacktechnik ist derzeit in einem von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Projekt damit befasst, hochabriebfeste Beschichtungen mit verminderter Eishaftung zu entwickeln – Fragestellungen, die in die gleiche Richtung wie die Forschungen der Arbeitsgruppe BIOM gehen. Die interdisziplinäre Arbeitsweise im IFAM ermöglichte es im Falle der AFP-Lacke, das technisch-physikalische Wissen der Lacktechniker schnell mit den biologischen Kenntnissen der Kollegen aus der Arbeitsgruppe Biomolekulares Oberflächen- und Materialdesign zu verbinden. Das Zusammenwirken von Chemikern, Biologen und Lacktechnikern ergibt Synergien und erlaubt rasche wissenschaftliche Fortschritte, die beispielsweise an Hochschulen – durch die dortige Trennung der Fachgebiete – so kaum realisierbar sind. Auch die Produktfindung wird durch die fachübergreifende Arbeit beschleunigt und intensiviert. In Zukunft soll auf dem Gebiet der AFP-Lacke die Zusammenarbeit mit der Industrie verstärkt werden, um konkrete Anwendungen zu verwirklichen. Kontakte gibt es bereits zu Firmen der Weltraumtechnologie, zu Lackherstellern und zu einem Unternehmen, das Rollläden und Rolltore herstellt.

Ein weiterer großer Anwendungsbereich, in dem die Arbeitsgruppe BIOM intensiv tätig ist, ist die

Anwendung biomimetischer Klebstoffe in der Medizin und Biotechnologie. In einem Fraunhofer-internen MEF-Projekt (MEF = Mittelstandsorientierte Eigenforschung) werden Peptide synthetisch hergestellt und mit Polymermaterialien und Partikeln kombiniert. Dazu arbeitet die Arbeitsgruppe BIOM mit dem Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) in Würzburg und dem Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik (IBMT) in St. Ingbert zusammen.



Miesmuschel mit anhaftenden Byssusfäden.



### Die Miesmuschel dient als Vorbild

»Vorbild« für die zu synthetisierenden Peptide sind Schlüsselkomponenten des von der Miesmuschel (*Mytilus edulis*) abgesonderten Klebstoffes. Die proteinbasierten Adhäsivmaterialien sind bereits identifiziert und ihre Wirkungsweise bekannt. Ihre Härtungsmechanismen sind jedoch noch nicht ganz entschlüsselt, lassen sich aber durch einfache Oxidantien, Übergangsmetallionen oder Enzyme auslösen. Ein Hindernis sind bislang die Kosten bei der natürlichen Gewinnung des Materials: Um ein Gramm Material zu erhalten, werden 10 000 Muscheln benötigt, wobei dieses Gramm etwa 130 000 Euro kostet.

Potenzielle Anwendungsbereiche in der Medizin und Biotechnologie weisen auf einen hohen Bedarf für biofunktionale Klebstoffe hin. Klebstoffe für Gewebe können postoperativ das Nähen ersetzen oder Fixierhilfen für Knochen und Bänder sein. Auch bioverträgliche Knochenklebstoffe für lasttragende Bereiche haben ein hohes Potenzial. Weitere Einsatzfelder sind der Dentalbereich (Klebstoffe), die Ophthalmologie (Netzhautreparaturen) oder in der Biotechnologie z. B. zur Zellfixierung. Gespräche mit klein- und mittelständischen Unternehmen haben ergeben, dass an biofunktionalen Klebstoffen ein hohes Interesse besteht und entsprechende Einsatzfelder vorhanden sind.

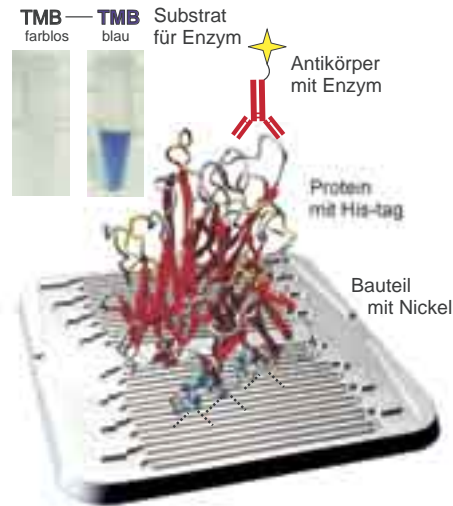
Ebenfalls im medizinischen Bereich bewegt sich ein weiteres anspruchsvolles MEF-Projekt, in dem die Arbeitsgruppe BIOM eng mit einer Arbeitsgruppe der Abteilung Mikrofertigung des IFAM-Institutsteils Formgebung und Funktionswerkstoffe zusammenarbeitet. Auch hier ermöglichen die Synergien innerhalb der Einrichtung rasche Fortschritte und zukunftssträchtige Produktentwicklungen. Das Vorhaben mit dem Titel »Entwicklung von Materialien zur gezielten Ankopplung von Biomolekülen« – kurz: IFAM-BioMat – will in fachübergreifender Arbeit von Materialwissenschaftlern und Biologen biofunktionalisierbare Materialien entwickeln. Vor allem kostengünstige und für die Serienproduktion gut geeignete Kunststoffe sollen als Grundlage für Biochips oder Sensoren bald in der Lage sein, Biomoleküle wie Nukleinsäuren oder Proteine anzukoppeln. Dazu wird am IFAM

ein Kompositmaterial entwickelt, das die kontrollierte Bindung der Biomoleküle ermöglicht. Weil bei diesem Ansatz aufwändige chemische Vorbehandlungen entfallen, lassen sich die Herstellungskosten erheblich reduzieren.

### Produktideen für konkrete medizinische Anwendungen

Die im Institut vorhandenen Kompetenzen bei der Herstellung von Bauteilen im Spritzgussverfahren, der Entwicklung und Verarbeitung von Kompositmaterialien, der Plasmaaktivierung von Materialoberflächen und dem biomolekularen Oberflächen- und Materialdesign lassen sich im Projekt BioMat so fruchtbar zusammenführen, dass bereits Produkte für konkrete medizinische Anwendungen ins Blickfeld rücken. In ersten Kontakten zu Industriefirmen, klein- und mittelständischen Unternehmen und einer Uni-Klinik ist die Idee eines integrierten Mikrosystems mit mikrofluidischen, mikrooptischen und mikromechanischen Komponenten entstanden, das in der molekularmedizinischen Diagnose von Krankheiten eingesetzt werden könnte.

Bei allen vorgestellten Forschungs- und Entwicklungsansätzen kann die Arbeitsgruppe BIOM nicht nur leicht und unkompliziert auf das vorhandene Wissen innerhalb des IFAM zurückgreifen. Sie profitiert auch von einer hervorragenden apparativen Ausstattung. So können Peptide synthetisch hergestellt, aufgereinigt und mit verschiedenen Methoden analysiert werden. Dazu stehen unter anderem ein Festphasen-Peptid-Synthesizer, eine Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie-Anlage (HPLC) und ein MALDI-Time-of-Flight-Massenspektrometer zur Verfügung. Zur Untersuchung von Proben im Durchlicht oder Oberflächen im Auflicht ist zusätzlich ein Normallicht- bzw. Fluoreszenzmikroskop vorhanden. Die Struktur von Proteinen ( $\alpha$ -Helix,  $\beta$ -Faltblatt oder Coil) bzw. deren Änderung bei Kontakt mit Grenzflächen kann mithilfe der FT-Infrarotspektroskopie analysiert werden. Stetig größer wird zudem der Anteil der rechnerischen Simulation in diesem Forschungsgebiet.



Schema eines mit einem Detektor-Protein funktionalisierten mikrofluiden Biochips.



Fluoreszenzmikroskop.

#### Ansprechpartner

Ingo Grunwald  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-6 30  
E-Mail: [gru@ifam.fraunhofer.de](mailto:gru@ifam.fraunhofer.de)

Klaus Rischka  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 82  
E-Mail: [ris@ifam.fraunhofer.de](mailto:ris@ifam.fraunhofer.de)

#### Institut

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

## »Colour-Matching« in der Automobilindustrie: Neuentwicklung ermöglicht Zeit- und Kostenersparnis

Die Automobilproduktion befindet sich derzeit wieder in einem Umbruch: Aktuelle Studien besagen, dass die Hersteller bis 2015 bedeutende Teile von Entwicklung und Produktion an Zulieferfirmen abgeben. Durch das Outsourcing von Leistungen wird dem Zuliefersektor ein Wachstum von 70 Prozent prophezeit. Neben vielen Vorteilen und Chancen für beide Seiten ergibt sich aus dieser Form der Zusammenarbeit in der Produktion aber auch eine Vielzahl von Herausforderungen. Eine davon – und zwar eine sehr große – ist das Colour-Matching: Verschiedene Fahrzeugteile werden an unterschiedlichen Standorten und zu unterschiedlichen Zeiten lackiert, müssen aber nach der Montage aller Teile zum Gesamtfahrzeug trotzdem eine absolut einheitliche Farbe aufweisen. Bislang finden die Freigabe und Korrektur von Farbtönen zwischen Autoherstellern und Teilelieferanten durch den Abgleich von Mustertafeln und Musterteilen durch alle Beteiligten statt – ein aufwändiger und damit kostenträchtiger Prozess. In einem von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Projekt wurde von der Arbeitsgruppe Lacktechnik am Fraunhofer IFAM ein Verfahren entwickelt, das die Freigabe und Korrektur von Farbtönen innerhalb der Lieferantenkette der Automobilindustrie erheblich beschleunigt. Neben dem IFAM waren ein namhaftes deutsches Automobilunternehmen, der Messgerätehersteller ColorAIXperts und das Softwarehaus i2s Industrielle Informationssysteme beteiligt.

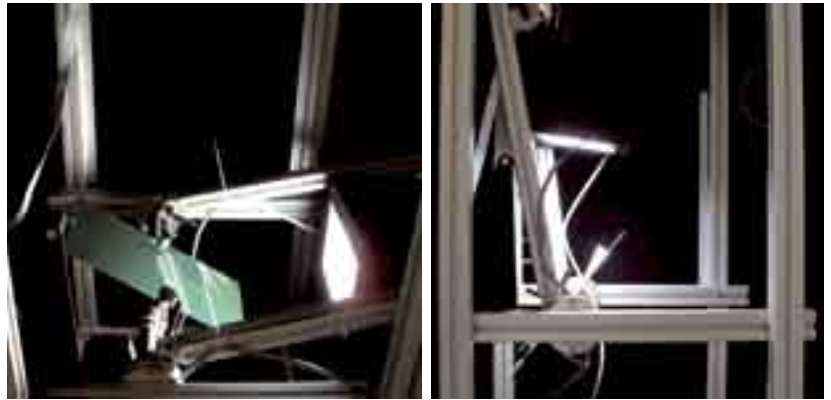


Mustertafeln.

Täglich sind in Deutschland dutzende Pakete zwischen Automobilherstellern, Teilelieferanten, Lackfirmen und weiteren Beteiligten unterwegs. Ihr Inhalt: Farbmustertafeln oder zur Probe lackierte Referenzteile. Mehrere hundert Mal täglich wird durch optische Begutachtung und durch die Messung mit speziellen Farbmessgeräten entschieden, ob eine Lackcharge oder die Qualität einer Lackierung etwas taugt oder nicht – alles vor dem Hintergrund der Erfordernis absolut identischer Farben für alle lackierten Teile eines Automobils. Denn ein Fahrzeug, das zu helle Außenspiegel, eine zu dunkle Frontpartie oder andere Farbdifferenzen aufweist, ist auf dem hart umkämpften Markt nicht zu verkaufen.

Das Zusammenspiel der vielen Lackhersteller, Teilelackierer sowie der Lackierer im Automobilwerk beruht auf dem Austausch der Muster. Hat ein

Lackhersteller eine gewünschte Farbe nach vielen Vorgesprächen angesetzt, verursacht schon die Wartezeit bis zur endgültigen Entscheidung über die Lieferfreigabe größerer Lackmengen Kosten: Solange das endgültige »Go!« nicht da ist, steht die Maschine des Lackherstellers still. Muss der Farbton nachgebessert werden, bedeutet dies ebenfalls zeitlichen und damit finanziellen Aufwand. Um allen Beteiligten die Arbeit zu erleichtern, sind seit Jahren Farbmessgeräte im Einsatz. Sie erzeugen numerische Farbwerte, die sich per Telefon oder E-Mail austauschen lassen, was den Prozess beschleunigt.



Prototyp der Messeinrichtung (Bildquelle: ColorAIXperts GmbH).

### Herkömmliche Farbmessgeräte stoßen an ihre Grenzen

Jedoch hat das Thema Farbe im Automobilssektor heute nicht mehr die gleiche Bedeutung wie vor 20 Jahren. Denn auf dem Gebiet der Lackentwicklung hat es in den vergangenen Jahren große Fortschritte gegeben. Neue Effektfarbtöne sollen – neben anderen Zusatzfunktionen, die Lack heute haben kann – für zusätzliche Kaufanreize bei den Kunden sorgen: Ein glitzernder Wagen mit außergewöhnlichem Lack erregt nun einmal Aufsehen. Bei diesen Lacken stoßen die herkömmlichen Farbmessgeräte schnell an ihre Grenzen. Denn der Sonderfarbton lebt von seinen Effekten – bei großen Glitzerpartikeln wirkt die Lackierung beispielsweise grob, bei kleinen eher fein. Je nach Lichteinfall entsteht eine andere Farbnuance. Noch weiter gehen ganz neue Pigmententwicklungen, die einen in der Fachsprache »Farbflop« genannten Effekt ermöglichen. Dabei ergeben sich je nach Lichteinfall dramatische Farbveränderungen, beispielsweise von Kupferrot bis Türkisblau.

Jedes einzelne Partikel trägt zu einem solchen Effekt bei – doch heutige Farbmessgeräte werten nur Messflecke mit mehreren tausend Partikeln auf einmal aus, jeweils unter verschiedenen Lichteinfallswinkeln. Die gemessenen Farbwerte sind hier unvollkommen, weil sie über Strukturen und Effekte keine Aussage machen. Auch rechnerische Angleichungen beinhalten immer noch Fehlermöglichkeiten oder Toleranzen, die zu groß sind. Der Sinneseindruck der Augen indes stellt Abweichungen sofort fest, die die Werte von Farbmessgeräten nicht offenbaren können. Fachleute können sich daher bei anspruchsvollen Effektlacken



Bild oben: Darstellung aller Winkel. Bild unten: Einzelne Winkel. Jeweils Standard links im Bild und Probe rechts im Bild (Bildquelle: i2s Industrielle Informationssysteme GmbH).

nicht auf diese Farbmessgeräte verlassen, womit wiederum der Datenabgleich per Internet oder Telefon ausscheidet. Die Experten eint der Wunsch nach besseren Geräten, die auch bei Lacken mit Effektpartikeln zweifelsfreie, eindeutige Farbwerte zulassen, die sich dann minutenschnell elektronisch austauschen lassen.

An diesem Punkt setzte das AiF-Projekt »Entwicklung eines Farbton-Kommunikationssystems für Effektlacke auf Basis der Multispektraltechnik« an, bei dem die Arbeitsgruppe Lacktechnik des IFAM eine federführende Rolle spielte. Ziel war die Entwicklung einer speziellen Messgeometrie, mit deren Hilfe sich auch Lacke mit einem extremen »Farbflop« zweifelsfrei charakterisieren lassen. Dazu wurde in der Abmusterungskabine eines großen deutschen Automobilherstellers eine etwa einen Quadratmeter große, mit Effektlack beschichtete Tafel installiert. Mit einer Spezialkamera und einem Winkelmesser wurden die Betrachtungspositionen herausgearbeitet, von denen aus der Farbumschlag besonders gut zu sehen – und damit zu dokumentieren – war.

### IFAM erarbeitet Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel

Diese Erkenntnisse wurden vom Messgerätehersteller ColorAIXperts im Prototypen eines Messgerätes umgesetzt, das statt eines größeren Messflecks das komplette Spektrum für jedes einzelne Farbpixel detektieren kann. Das Unternehmen hatte die Grundlagen dieser Multispektraltechnologie zuvor bereits für Anwendungen in der Textilindustrie erarbeitet und patentieren lassen. Die Anwendungserweiterung dieser Technologie auf die beschriebenen Herausforderungen in der Automobilindustrie wurde jedoch erst durch das Know-how des Fraunhofer IFAM möglich. Das Projektteam detektierte in zahlreichen Versuchsdurchgängen die exakten Parameter von Beleuchtungs- und Beobachtungswinkeln bei verschiedenen Lichtquellen und stimmte die Lösung von ColorAIXperts auf die Erfordernisse der Lackuntersuchung ab – denn nur ein funktionierendes System, das sowohl im Automobilwerk als auch bei Teilelackierern und Lackherstellern sicher und unkompliziert einzusetzen ist, kann auf dem Markt Zukunft haben. Die IFAM-Wissenschaftler

erweiterten dabei die Standard-Messwinkel um zwei weitere Winkel, die signifikante Veränderungen der Farberscheinungen sichtbar machten. Der Multispektralscanner wurde dabei so modifiziert, dass sich Beleuchtungs- und Objektträger-einheiten stufenlos drehen ließen.

Bei ihrer Arbeit verwendete das Projektteam Farbtöne, die den gesamten Farbraum abdeckten. Neben Blechen mit dem Farbton in Standardlackierung wurden jeweils vier Muster mit leichten Farbabweichungen untersucht. Die Versuchsreihen wurden sowohl mit herkömmlicher als auch mit neuer Messtechnik durchgeführt, die Ergebnisse miteinander verglichen. Wichtiger noch war indes der Vergleich der durch Kameraaufnahme entstandenen Bilder mit der individuellen Sicht der Coloristen. Genauer: Nachdem 47 Farbtöne auf Tafeln von Lack- und Automobilherstellern visuell beurteilt und eingeordnet worden waren (in Ordnung – bedingt in Ordnung – nicht in Ordnung), erfolgte ein erneuter Abgleich dieser Farbtöne am Bildschirm. Dort wurden die Farbtöne auf Basis der neuen Messtechnik dargestellt, wobei die ColorAIXperts-Technologie für eine absolut identische Darstellung der Farbtonunterschiede auf jedem Bildschirm bürgte. Dabei ergab sich ein überraschend hoher Übereinstimmungswert von 82 Prozent. Das heißt: In mehr als drei von vier Fällen stimmte die Beurteilung des neuen Systems mit der persönlichen Beurteilung der Farbmuster durch den Coloristen überein. Dieser hohe Wert ist schon deshalb erstaunlich, weil die persönliche visuelle Beurteilung durch den Coloristen durch einen natürlich variierenden Betrachtungswinkel – kein Mensch kann wirklich still stehen – Fehlerquellen birgt.

Mit der Entwicklung des Messgeräteprototypen durch das IFAM und seine Partner sowie die erfolgreiche Verifizierung ist die Machbarkeit dieser Technologie nachgewiesen worden. Sie ist für alle Firmen interessant, die sich mit Effektlacken beschäftigen – insbesondere naturgemäß für die Automobilindustrie. Doch nicht nur bei Effektlacken, auch bei der Beurteilung anspruchsvoller »herkömmlicher« Lacke – wie beispielsweise Silbertöne – ist die neue Messvariante eine deutliche Verbesserung. Vom Potenzial her ist eine Ausweitung bis hin zur Online-Überwachung von Karosserielackierungen denkbar. Die Suche nach

Industriepartnern, die den Messgeräteprototypen in Zusammenarbeit mit dem IFAM nun zu einem Serienprodukt weiterentwickeln, hat begonnen.

Das Projekt wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigung »Otto von Guericke« e.V. (AIF) gefördert (Förderkennzeichen: KF 0045805KDA2). Wir danken den Firmen DaimlerChrysler AG, Werk Bremen, DuPont Performance Coatings GmbH & Co. KG, Wuppertal, und Karl Wörwag Lack- und Farbenfabrik GmbH & Co. KG, Stuttgart, für die Unterstützung und Hilfe in diesem Projekt.

#### **Ansprechpartner**

Volkmar Stenzel  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 07  
E-Mail vs@ifam.fraunhofer.de

#### **Projektpartner**

i2s Industrielle Informationssysteme GmbH, Berlin  
ColorAIXperts GmbH, Aachen

#### **Institut**

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



## Der Traum vom Kleben und »Entkleben« auf Knopfdruck rückt ein Stück näher

Aus fast allen anspruchsvollen Technologiebereichen ist die Klebtechnik nicht mehr wegzudenken: Hochfeste Verbindungen sind mit ihr möglich, ideale Materialkombinationen realisierbar – und es ist eine sehr flexibel verwendbare Fügetechnik. »Nicht flexibel genug«, mag sich mancher Ingenieur gedacht haben, der die Klebtechnik wohl gerne eingesetzt hätte, es aber aufgrund eines großen Mankos nicht konnte: Klebverbindungen ließen sich bislang nur schwierig wieder lösen. Und wenn, dann war die vorherige Festigkeit der Verbindung in der Regel eher gering – oder es blieben lästige Klebstoffreste an den wieder getrennten Fügepartnern zurück. Im Fraunhofer IFAM wurden gleich zwei vielversprechende Ansätze entwickelt, die ein unkompliziertes Lösen hochfester Klebverbindungen ermöglichen.

Die Anforderungen an einen modernen Klebstoff sind einfach: Er soll zwei definierte Fügepartner verbinden, ohne deren spezifische Eigenschaften zu beeinträchtigen; dabei soll er schnell und zuverlässig aushärten. Noch besser wäre es, wenn sich die Fügepartner – falls notwendig – einfach wieder voneinander lösen ließen. Die Reparaturfähigkeit beispielsweise macht das Lösen von Klebverbindungen wünschenswert. Ein anderer Anwendungsfall ist eine nur kurzzeitige Verbindung: Soll etwa ein Werkstück zur spanenden Bearbeitung fixiert werden, wird es meistens mechanisch eingespannt. Ideal wäre eine klebende Fixierung, die sich »auf Knopfdruck« wieder lösen lässt.

Hierzu hat das Fraunhofer IFAM eine Lösung entwickelt, die auf einer elektrochemischen Trennung basiert. Sie weist jedoch die Einschränkung auf, dass sie sich nur zum Lösen geklebter metallischer Fügepartner eignet. Mit dieser Einschränkung kann der gewünschte Effekt jedoch, jeweils modifiziert für den speziellen Anwendungsfall, viele problematische Aufgabenstellungen elegant lösen.

Zur Fixierung eines Werkstücks zur spanenden Bearbeitung wurde ein schnell abbindender Polyamid-Schmelzklebstoff entwickelt, der feste Verbindungen ermöglicht. Die gewünschte Lösbarkeit wird dem Klebstoff durch Additive verliehen, die in einem aufwändigen Prozess entwickelt und mit dem Klebstoff verträglich abgestimmt werden mussten. Dabei wurden verschiedene Ausgangsmaterialien getestet.



Das Werkstück wird für die spanende Beanspruchung direkt auf den Spanntisch geklebt.



Nach dem Lösen der Klebverbindung kann der Klebstoff leicht per Hand vom Werkstück abgezogen werden.

### Entscheidende Kombination: elektrische Spannung und Wärme

Das Lösen der Verbindung wird erzielt, wenn eine elektrische Spannung von 48 Volt angelegt und gleichzeitig die Klebstelle auf 65 °C erwärmt wird. Dabei ist die Kombination beider Faktoren ausschlaggebend: Die genannte elektrische Spannung oder Erwärmung alleine bewirkt kein Löslösen. Dadurch wird verhindert, dass die Lösbarkeit durch ein versehentlich gegebenes Signal entsteht. Im noch warmen Zustand lässt sich der Klebstoff dann als geschlossener Film abziehen, ohne dass Klebstoffreste an den zuvor zusammengefügt Materialien verbleiben. Der Vorteil: Diese lassen sich sofort und ohne Reinigungsprozedur wiederverwenden. Auch für diese Lösung sind zahlreiche Anwendungsfälle denkbar, etwa die eingangs erwähnte Kurzzeit-Fixierung von zu bearbeitenden Werkstoffen. Die benötigte Temperatur könnte beispielsweise durch einen erwärmbaren Spanntisch erzielt werden, das Anlegen eines 48-Volt-Gleichstroms ist bei den metallischen Fügepartnern einfach. Die Erwärmung des Spanntischs ist auch wünschenswert, um den Schmelzklebstoff nicht sofort auf den kalten Fügepartnern erstarren zu lassen.

Das neue Verfahren lässt sich auf weitere Klebstoffklassen übertragen, etwa Epoxidharze oder Polyurethane. Die Leistungsfähigkeit des Polyamid-Schmelzklebstoffes wurde bereits umfassend getestet: Geklebte Proben wurden im Klimaschrank bei 40 °C und 80 Prozent Luftfeuchtigkeit bis zu 1000 Stunden gelagert – und wiesen danach dennoch eine Zugscherfestigkeit von annähernd 70 Prozent des Ausgangswertes auf. Dies weist auf eine hohe Belastbarkeit und eine zufriedenstellende Klimabeständigkeit hin. Ein Klebstoffhersteller produziert das Material bereits auf einer Technikumsanlage in Größen bis 10 Kilogramm. Der Weg bis zur breiten Vermarktung dieser Lösung scheint ebenfalls nicht mehr lang.

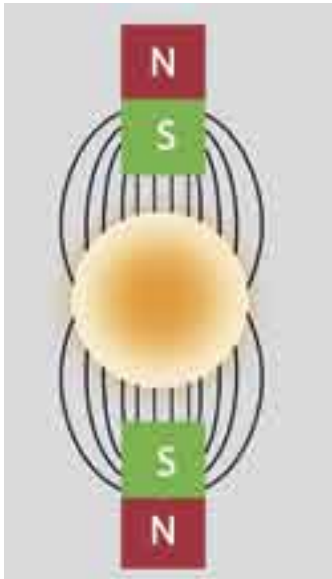
### Dreh- und Angelpunkt: das hochfrequente elektromagnetische Feld

Zur Thematik der schnellen Härtung sind von der Arbeitsgruppe Klebstoffe und Polymerchemie im IFAM große Fortschritte erzielt worden. In Zusammenarbeit mit Forschern der Degussa AG wurden Klebstoffe entwickelt, die sich mithilfe eines hochfrequenten elektromagnetischen Feldes sowohl aushärten als auch wieder lösen lassen. Dies gelingt durch die Beimischung von superparamagnetischen Nanopartikeln in den Klebstoff. Sie bestehen aus Eisenoxid-Teilchen, die in Siliziumdioxid eingebettet sind. Das nanoskalige Pulver wurde bei Degussa entwickelt und trägt den Markennamen MagSilica®.

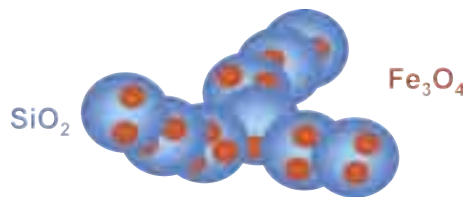
Dreh- und Angelpunkt beim Einsatz dieses innovativen Klebstoffes ist die Anregung durch das besagte Wechselfeld, das die Partikel in Schwingungen versetzt. Besonders bei der Aushärtung weist dieses Prinzip enorme Vorteile auf. Wird das hochfrequente elektromagnetische Feld angelegt, härtet es den Klebstoff – ohne Hitzeeinwirkung von außen. Die für das Härten notwendige Wärme wird im Inneren erzeugt. Das schont das Material und spart die Zeit, die ansonsten für das Aufheizen der Materialien im Ofen benötigt würde.

Bei herkömmlichen Klebprozessen werden zum Aushärten der Klebverbindung Klebstoff und Füge-teile insgesamt erhitzt. Das hat den Nachteil,

Das Funktionsschema  
(Quelle Degussa)



Die Flüssigkeit enthält fein verteilt nanoskalige magnetische Partikel (Durchmesser ca. 22 nm). Wirkt ein Magnetfeld auf ein solches »Ferrofluid«, werden die superparamagnetischen Teilchen im Feld ausgerichtet.



Da die Nanopartikel sehr klein sind, werden sie nicht aus der Trägerflüssigkeit herausgezogen. Vielmehr wird die Flüssigkeit beim Einschalten des Elektromagneten angezogen, als sei sie selbst magnetisch. Beim Ausschalten des Magneten verliert die Flüssigkeit ihren Magnetismus.



Dabei bildet sich eine charakteristische Igelstruktur aus, die unter anderem von der Stärke des Magnetfeldes, der Magnetisierbarkeit und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit abhängt.

dass hitzeempfindliche Fügepartner – etwa viele Kunststoffe, wie sie in der Automobilindustrie verwendet werden – nicht mit einkomponentigen Klebstoffen, die mittels Wärmezuführung aushärten, geklebt werden können. Als Alternative wurde daher der Einsatz von Zwei-Komponenten-Klebstoffen gewählt und optimiert. Deren Einsatz hat sich zwar bewährt, erfordert aber das Mischen kurz vor dem Klebprozess. Außerdem ist der Zeitaufwand durch lange Härtingszeiten hoch oder durch eine aufwändige Erwärmung aller Bauteile in Öfen energieintensiv. All diese Effekte, die in einer Produktion hinderlich sind und Kosten verursachen, lassen sich durch die Aushärtung geeigneter Klebstoffe mithilfe des hochfrequenten Magnetwechselfeldes vermeiden.

Unter bestimmten Bedingungen lässt sich das Prinzip der intrinsischen Erwärmung des Klebstoffs auch zum Lösen der Klebverbindung nutzen. Hierbei wird dann mit höheren Feldstärken gearbeitet, um so höhere Temperaturen in der Klebfuge zu erzeugen. Im Idealfall würde man den zu lösenden Klebstoff zusätzlich mit thermisch labilen Gruppen oder Zusatzstoffen ausrüsten, so dass ein gezielter thermischer Materialabbau erfolgen könnte.

Vor dem Transfer in die industrielle Anwendung an verschiedenen Materialkombinationen und unterschiedlichen Musterformulierungen wurde das zugrunde liegende Prinzip bereits erfolgreich angewendet. Nun steht der Bereich Klebstoffe und Polymerchemie vor dem Schritt, das Härten im Wechselfeld auf die Anwendung in der Industrie zu übertragen. Auf der Basis von MagSilica® sollen handelsübliche Klebstoffe weiterentwickelt werden. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig und in allen Industriebereichen gefragt. Die Ausstattung für die Erzeugung eines hochfrequenten elektromagnetischen Feldes ist zumindest in der Metall verarbeitenden Industrie vielfach schon vorhanden: Es wird dort seit vielen Jahren zum Randschichthärten eingesetzt.



Über eine Magnetspule wird der Klebstoff einem hochfrequenten Magnetwechselfeld ausgesetzt.

#### Ansprechpartner

Jana Kolbe  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 46  
E-Mail: jk@ifam.fraunhofer.de

Andreas Hartwig  
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 70  
E-Mail: har@ifam.fraunhofer.de

#### Institut

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

## Langsame Korrosionsvorgänge schnell erkannt: Elektrochemische Methoden zur Kurzzeitprüfung von Schutzbeschichtungen

Neben der Schaffung neuer technologischer Werte gehört auch deren Erhalt zu den Aufgaben eines Ingenieurs. Man schätzt, dass in den Industrienationen jedes Jahr ein Wert von etwa vier Prozent des Bruttoinlandproduktes durch Korrosion verloren geht. Für das Jahr 2006 bedeutet dies einen gesellschaftlichen Verlust in der Bundesrepublik Deutschland von zirka 90 Milliarden Euro.

Wie anspruchsvoll es ist, technische Werte langfristig zu erhalten, zeigt sich gerade bei Großstrukturen. Während im privaten Bereich die meisten technischen Produkte nach nur wenigen Jahren wieder durch Neuerungen ersetzt werden, müssen große technische Systeme wie Passagierflugzeuge, Schiffe, Ölbohrplattformen, Offshore-Windenergieanlagen, Brücken, Bauwerke usw. häufig über mehrere Jahrzehnte genutzt werden, um rentabel zu sein. Es gilt also, geeignete Korrosionsschutzmaßnahmen zu entwickeln und anzuwenden, um einen ausreichenden Schutz für lange Betriebszeiten zu gewährleisten. Es stellt sich daher die Frage: Wie verschaffen sich Ingenieure diesen Blick in die Zukunft und stellen sicher, dass diese Schutzfunktion über die gesamte Betriebszeit gegeben sein wird?

Die mit Abstand am häufigsten angewendete Methode zum Korrosionsschutz bei Flugzeugen, Schiffen oder Kraftfahrzeugen ist die Anwendung von Beschichtungen, also Schutzlacken. Deren Schutzwirkung beruht auf mehreren Aspekten. So fungiert die Beschichtung als Barriere zwischen dem zu schützenden Grundmaterial und der korrosiven Umgebung (feuchte Luft, Regenwasser, Meerwasser usw.). Bei einem Defekt muss die Beschichtung ihre Schutzfunktion aufrechterhalten. Dies gelingt dadurch, dass z. B. dem Lacksystem Korrosionsschutzpigmente zugesetzt werden, die im Falle eines Kratzers langsam so genannte Inhibitoren abgeben, die sich auf die freigelegte Metallfläche legen und dort die Korrosionsreaktion unterbinden.

Die einfachste Methode zur Bestimmung der Korrosionsschutzwirkung von Beschichtungen besteht darin, beschichtete Probenkörper einer vergleichbaren korrosiven Umgebung auszusetzen und zu beobachten. Da Korrosionsvorgänge jedoch oft sehr langsam sind, erfordert dies viel

Zeit. Da heutzutage Entwicklungszeiten immer weiter verkürzt werden müssen, stellt dies ein Problem dar. Ein Lösungsansatz ist es, die korrosiven Bedingungen, denen Probenkörper ausgesetzt werden, zu verschärfen. Hier besteht jedoch die Gefahr, dass die Korrosionsvorgänge nicht nur beschleunigt, sondern auch verändert werden. Dies bedeutet im Endeffekt, dass die Ergebnisse aus diesen beschleunigten Korrosionstests auf den wirklichen Anwendungsfall dann nicht uneingeschränkt übertragbar sind.

Ein weiterer Lösungsansatz ist die Entwicklung und die Anwendung geeigneter Messverfahren, mittels derer Korrosionsvorgänge schon in der Entstehungsphase nachweisbar sind und nicht erst, wenn sie sichtbar sind. Hierdurch lässt sich der Zeitaufwand von Korrosionsprüfungen drastisch verkürzen. Grundsätzlich eignet sich jedes Messprinzip, mit dem der Korrosionsprozess frühzeitig detektiert werden kann, besonders eignen sich jedoch elektrochemische Verfahren. Diese beruhen darauf, dass Korrosionsvorgänge in unserer Umgebung meist elektrochemischer Natur sind. In der Laborpraxis sind elektrochemische Messverfahren besonders günstig, denn sie erfordern keinen großen instrumentellen Aufwand. Oft müssen Prüfkörper nur elektrisch kontaktiert werden und können dann in ihrer korrosiven Umgebung belassen werden.

Die Anwendung und Entwicklung von schnellen Korrosions-/Degradationstestverfahren ist ein Schwerpunktthema der Arbeitsgruppe Elektrochemie/Korrosion. Im Folgenden werden anhand dreier Beispiele die Messprinzipien, Vorgehensweisen und Vorteile verdeutlicht.

### Methode 1: Elektrochemische Impedanzspektroskopie

Bei der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) wird dem Beschichtungssystem ein bei unterschiedlichen Frequenzen moduliertes elektrochemisches Potenzial aufgeprägt und die Stromantwort gemessen (Abb. 1). Aus beiden Größen kann so über einen weiten Frequenzbereich (z. B. 0,01 Hertz bis 100 Kilohertz) das Spektrum der Impedanz bestimmt werden. Üblicherweise

wird eine hinreichend kleine Amplitude für das aufgeprägte Potenzial gewählt, so dass durch die Messung die Degradations- und Korrosionsvorgänge des Beschichtungssystems nicht beeinflusst werden.

Aus den Impedanzspektren lassen sich über Modellanpassungen sehr viele Informationen über Degradationsvorgänge in der Beschichtung und zu Korrosionsvorgängen des Substrates gewinnen, wie etwa der Transport von Wasser und chemischer Spezies durch die Beschichtung, Veränderungen des Beschichtungsmaterials hinsichtlich der dielektrischen Eigenschaften und Änderungen der Phasengrenzreaktionen Beschichtung/Substrat (Abb. 2a und 2b).

Diese Informationen erlauben eine umfassende Bewertung der Schutzfunktion von Beschichtungssystemen, lange bevor Korrosionserscheinungen wie z. B. Rostpusteln sichtbar werden.



Abb. 1: Messzelle für Elektrochemische Impedanzspektroskopie.

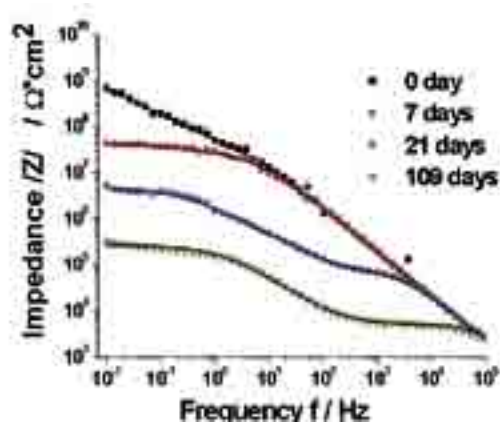
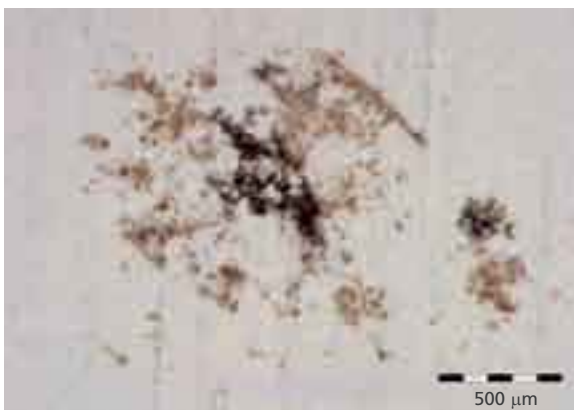


Abb. 2a und 2b: Das Wachstum einer Korrosionsstelle in einer Beschichtung (links), die nach 109 Tagen ca. 1,5 Millimeter groß ist, konnte mittels Elektrochemischer Impedanzspektroskopie seit dem Anfangsstadium beobachtet werden.

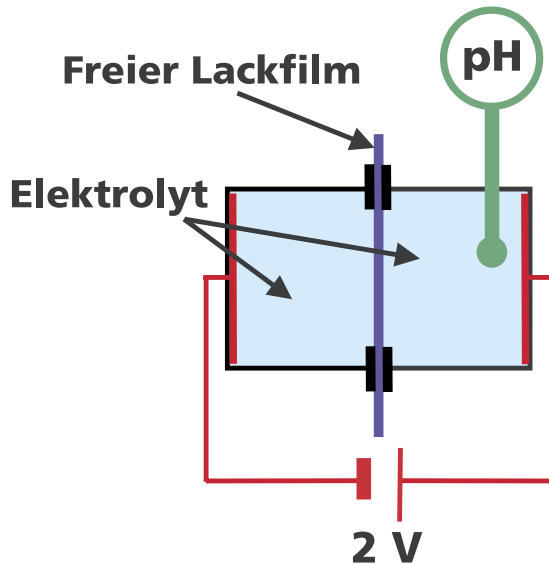


Abb. 3: Der sehr einfache Aufbau zur Messung der Ionenpermeabilität.

## Methode 2: Bestimmung der Ionenpermeabilität von Beschichtungssystemen

Ein Maß der Schutzwirkung von Beschichtungen ist die Ionenpermeabilität. Je weniger Ionen durch Beschichtungen diffundieren bzw. migrieren, umso besser ist die Barrierewirkung.

Ein relativ einfaches Verfahren zur Bestimmung dieser Ionenpermeabilität ist das so genannte Ph-Verfahren, das in Zusammenarbeit mit dem patenthaltenden Kunden in der Arbeitsgruppe Elektrochemie/Korrosion des IFAM weiterentwickelt wird. Hierzu wird ein freier Lackfilm zwischen zwei mit Elektrolyt gefüllten Halbzellen gespannt, und über zwei Elektroden wird eine Gleichspannung von 2 Volt aufgeprägt (Abb. 3). Durch diese Spannung entsteht ein durch den freien Lackfilm gehender Ionenstrom. Würde man diesen Ionenstrom amperometrisch bestimmen, wären sehr empfindliche und damit teure Strommessgeräte notwendig. Der innovative Ansatz der Ph-Methode beruht auf einer Bestimmung des Ionenstroms mittels pH-Messung.

Durch die Sauerstoffreduktion an der Kathode  $O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \rightarrow 4 OH^-$  verändert sich im Kathodenraum der pH-Wert. Diese pH-Wert-Änderung steht aufgrund der Elektroneutralität im Kathodenraum im direkten Zusammenhang mit dem Ionenstromtransport. Die pH-Wertmessung ist sehr empfindlich, für diese Anwendung eignen sich handelsübliche pH-Wert-Messgeräte, mit denen auch sehr geringe Ionenströme hinreichend genau und auch kostengünstig nachgewiesen werden können.

Empirische Vergleiche zeigen eine quantitative Korrelation zwischen der Ionenpermeabilität und dem Blasengrad von Beschichtungssystemen (Abb. 4), die im Salzsprühtest ausgelagert wurden.

Die Ergebnisse aus dem Salzsprühtest wurden nach 168 Stunden ermittelt, die Bestimmung der Ionenpermeabilität benötigte je nach Beschichtungssystem jedoch nur ein bis acht Stunden.

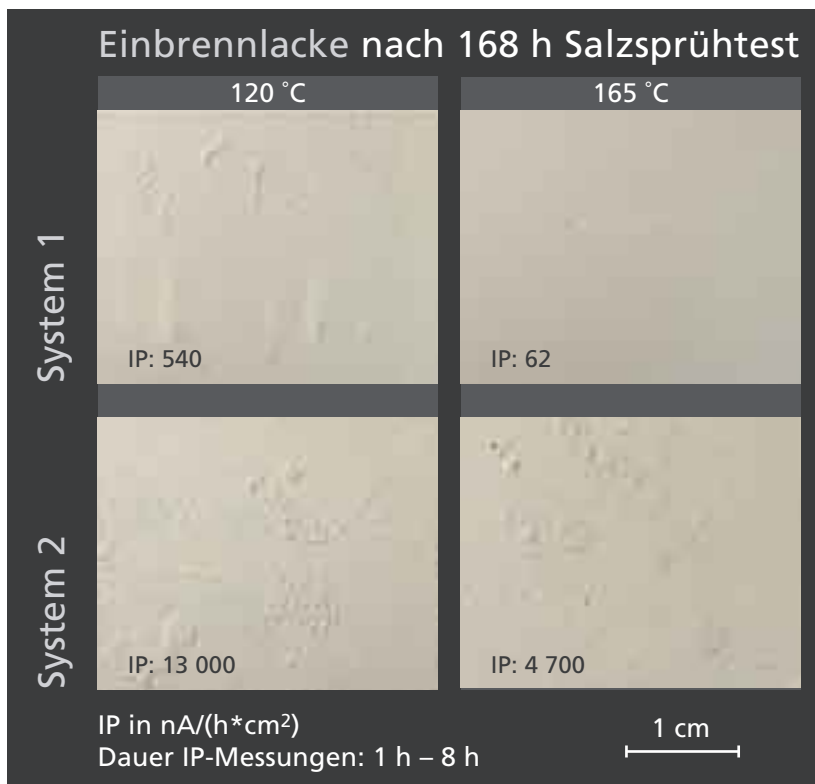


Abb. 4: Der Blasengrad unterschiedlicher Beschichtungssysteme korreliert mit der Ionenpermeation.

### Methode 3: Bestimmung des »Leaching«-Verhaltens von Beschichtungen mittels Elektrochemischem Rauschen

Unter »Leaching« versteht man die Eigenschaft von Beschichtungen, im Falle einer Verletzung (z. B. Kratzer) korrosionsvermindernde Wirkstoffe, so genannte Inhibitoren, abzugeben, welche dann an der freigelegten Metalloberfläche adsorbieren und dort die Metallauflösung eindämmen. Diese Inhibitoren werden den flüssigen Lacksystemen in Form von Pigmenten zugegeben.

Die Wirkung dieser Inhibitoren ist substratspezifisch, hängt aber auch vom verwendeten Lacksystem ab. Auch sehr effektive Inhibitoren zeigen keine Wirkung, wenn sie nicht vom Lacksystem hinreichend abgegeben werden.

Im Rahmen eines laufenden Forschungsprojektes, gefördert durch die AiF – Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsgesellschaften »Otto von Guericke«, wird eine Methode entwickelt, mit der der Leaching-Effekt durch Elektrochemisches Rauschen in Echtzeit nachgewiesen werden kann.

Hierbei werden zwei identische Probenkörper, die beschichtet wurden und mit einer definierten Verletzung versehen wurden, in ein korrosives Medium eingetaucht (Abb. 5). Zwischen zwei unterschiedlichen Metallen, die in einen Elektrolyten eingetaucht werden, stellt sich ein messbarer galvanischer Strom ein. Da in diesem Falle die beiden beschichteten Probenkörper identisch sind, würde man davon ausgehen, dass der galvanische Strom hier gleich null wäre. Da jedoch insbesondere unter Lochkorrosionsbedingungen die beginnenden Korrosionsereignisse wie z. B. Lochkeimbildung und -wachstum nicht gleichzeitig auf beiden Proben auftreten, kann man bei hinreichend empfindlicher Messung Fluktuationen im Stromsignal feststellen, das so genannte Elektrochemische Rauschen.



Abb. 5: Probenkörper für elektrochemische Rauschmessungen.



Dieses Rauschen ist also ein Maß für die Korrosionsaktivität der Proben. Wenn nun Inhibitoren effektiv aus dem Lacksystem »leachen« und die Metalloberfläche schützen, so macht sich das in einer Reduzierung der Rauschaktivität bemerkbar (Abb. 6).

Die Rauschfluktuationen besitzen eine Größenordnung von Nanoampere bis Mikroampere, es sind also spezielle Strommessverstärker zur Erfassung notwendig. Im IFAM wurde ein so genannter Mehrkanalnullwiderstandsstrommessverstärker konzipiert (Abb. 7), der es erlaubt, viele Messungen gleichzeitig durchzuführen und somit den Probenumsatz zu beschleunigen. Die Software zur Steuerung des Messverstärkers und zur Auswertung der Rauschsignale wurde im IFAM selbst erstellt.

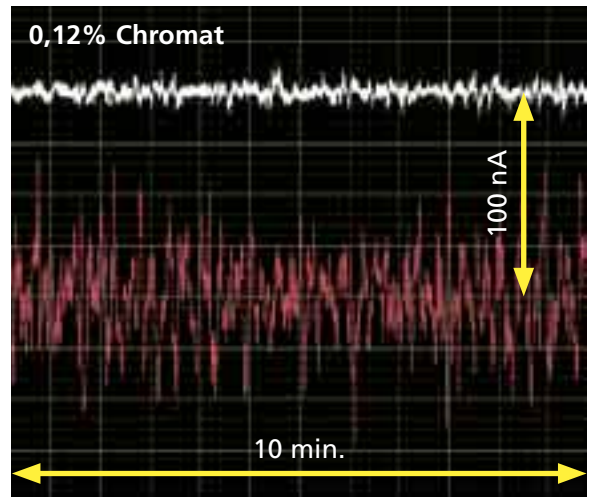


Abb. 6: Rauschmuster bei effektivem Inhibitorleaching.



Abb. 7: Anlage zum Elektrochemischen Rauschen im Hochdurchsatz.

#### Ansprechpartner

Peter Plagemann  
 Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-5 30  
 E-Mail: pla@ifam.fraunhofer.de

#### Institut

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

# Entformen von Faserverbundwerkstoffen ohne flüssige Trennmittel durch funktionelle Plasmapolymerschichtungen

## Einleitung

Bei der industriellen Fertigung von Kunststoffteilen, insbesondere von Reaktionskunststoffen (z. B. Polyurethan oder Epoxid), ist der Einsatz von Formtrennmitteln notwendig, um gebrauchsfertige Formteile von höchster Qualität zu erhalten. Formtrennmittel (FT) verhindern oder verringern die Haftung zwischen zwei in engem Kontakt stehenden Oberflächen. Sie reduzieren dadurch die Kraft, die zum Entformen des fertigen Bauteils aus dem Formwerkzeug nötig ist. Zu dem umfangreichen Anforderungsprofil eines Formtrennmittels zählt neben den oben genannten Eigenschaften auch, dass das Formteil unbeschädigt zu entnehmen sein muss, und zwar in der Regel bevor es vollständig ausgehärtet ist.

## Historie der Formtrennmittel

Die Entwicklung von Formtrennmitteln vollzog sich während den vergangenen 50 Jahre zeitlich überwiegend parallel zu den Fortschritten der Fertigungsverfahren in der Faserverbundwerkstoff-Industrie. Grundsätzlich wird zwischen externen und internen Formtrennmitteln unterschieden: Interne Formtrennmittel werden grundsätzlich als Additive dem eigentlichen Harzsystem in einem Bereich von 0,5 bis 1,0 Prozent des Harzgewichtes zugemischt. Externe Formtrennmittel hingegen sind eine Zusatzkomponente, die direkt auf das Formwerkzeug (das Gegenstück zum faserverstärkten Bauteil) aufgebracht wird. Während der ersten Jahre bei der industriellen Fertigung von Faserverbundwerkstoffen war die Wahl des Formtrennmittels auf Wachse beschränkt. Diese konventionellen Trennmittel – dazu gehören neben den Wachsen auch Öle und Silikone – werden auch »Opferschichten« genannt und bilden einen dünnen Film auf der Formwerkzeugoberfläche. Diese Schicht stellt eine physikalische Barriere dar, die den Kontakt des Harzes mit der Formoberfläche verhindert. Dadurch wird eine direkte chemische Anbindung verhindert. Die Entformung des Bauteils aus der Form erfolgt durch Trennung der Schicht in sich (Kohäsionsbruch), wobei Rückstände des Trennmittels in der Form und auf dem Bauteil verbleiben. Die Folge: eine Nachbearbeitung des Bauteils vor dem Lackieren oder Ver-

kleben, aber auch der Aufbau von eingebranntem Trennmittel im Formwerkzeug.

Die nächste Generation der Formtrennmittel, die so genannten semi-permanenten Formtrennmittel (SPFT), erstmals entwickelt in den 1960er Jahren, sollte diese Nachteile beheben. SPFT werden vorwiegend mit Bürsten-, Wisch- oder Sprühtechniken auf das Formwerkzeug aufgebracht und bilden durch das Verdampfen der enthaltenen Lösemittel eine dünne Schicht auf dem Formwerkzeug, die den Entformungsvorgang erleichtert. Ein SPFT, welches traditionell Lösungsmittelbasiert ist, vereinigt diverse Vorteile gegenüber konventionellen »Opferschichten«, z. B. wenig kontaminierender Übertrag auf das Bauteil, minimaler Aufbau von Trennmittelresten in der Form und das theoretische Potenzial für mehrfache Entformungen. Gesetzliche Vorgaben führten zur Umstellung von Lösungsmittel- auf wasserbasierte Systeme durch die Trennmittelindustrie. Diese neuen Systeme haben sicherheits- und umweltbezogene Vorteile, gleichwohl müssen sie den Vergleich mit ihren Vorgängern in Bezug auf gute Trenneigenschaften, verbunden mit minimalem Übertrag unter Produktionsbedingungen, erst noch antreten.

Alle herkömmlichen Formtrennmittel haben den Nachteil, dass sich für jedes Bauteil bzw. jede Entformung der Eintrenn- und Reinigungsvorgang wiederholt. Sie sind daher immer noch sehr arbeits- und damit kostenintensiv.

## Plasmapolymere als Trennschichten

Um die Nachteile der herkömmlichen Trennmittelsysteme zu überwinden, wird am IFAM seit mehreren Jahren die Entwicklung von (quasi-)permanenten Trennschichten durch Plasmapolymersation vorangetrieben. Die Plasmapolymersation erlaubt es, auf beliebigen Substraten und Geometrien konturerhaltende, nanoskalige – einige zehn bis wenige hundert Nanometer – Funktionsschichten abzuscheiden. Unter einem Plasma versteht man ein (teil-)ionisiertes Gas, in dem neben neutralen Gasmolekülen und -fragmenten auch freie Elektronen und Ionen vorkommen. Hinzu kommt eine große Anzahl angeregter Moleküle, die u. a. durch Abgabe von elektromagnetischer

Strahlung relaxieren, was zum charakteristischen Leuchten des Plasmas führt. Die weitaus häufigste Art der technischen Erzeugung von Plasmen ist die Anregung eines Gases durch Anlegen eines elektrischen Feldes. Je nach verwendeter Frequenz unterscheidet man dabei zwischen Audiofrequenz (kHz)-, Radiofrequenz (MHz)- oder Mikrowellenplasmen (GHz). In der Oberflächentechnik werden Plasmen z. B. zur Feinreinigung, Aktivierung und Abscheidung von funktionellen Schichten durch Plasmapolymerisation eingesetzt.

Die Plasmapolymerisation ist ein Verfahren, bei dem sich aus gasförmigen Monomeren, angeregt durch ein Plasma, auf frei wählbaren Substraten unterschiedlich stark vernetzte Schichten niederschlagen. Voraussetzung für diesen Prozess ist das Vorhandensein von kettenbildenden Atomen wie Kohlenstoff, Silizium oder Schwefel im Monomer. Da die Monomermoleküle im Plasma zum großen Teil zu reaktiven Fragmenten »zerschlagen« werden, bleibt die chemische Struktur des Monomers im Produkt meist nur partiell erhalten, was Vernetzung und gering geordnete Struktur zur Folge hat. Aus diesem Entstehungsmechanismus von Plasmapolymeren ergeben sich besondere

Schichteigenschaften, die sie für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet machen:

- hervorragende Schichthaftung auf fast allen Substraten
- chemische, mechanische und thermische Stabilität
- hohe Barrierewirkung

Plasmapolymere Schichten können in Plasmen bei Atmosphärendruck (AD) oder bei Niederdruck (ND) abgeschieden werden. Die Verwendung von AD-Plasmatechnologie, die im IFAM als Düsen-Technik vorhanden ist (Abb. 1), hat im Vergleich zur ND-Plasmatechnik den Vorteil, dass auch sehr große Formwerkzeuge beschichtet werden können, die in keinen Vakuum-Reaktor passen. Aufbauend auf den guten Trennergebnissen der permanenten ND-Trennschichten (Abb. 2) wurden entsprechend die AD-Trennschichten entwickelt. Hierzu wurde zunächst eine spezielle Precursor-Einspeisung für die Düsen entwickelt und gebaut. Anschließend konnten durch aufwendige Untersuchungen Schichten dargestellt werden, deren Zusammensetzung mit denen der ND-Trennschicht nahezu identisch ist.

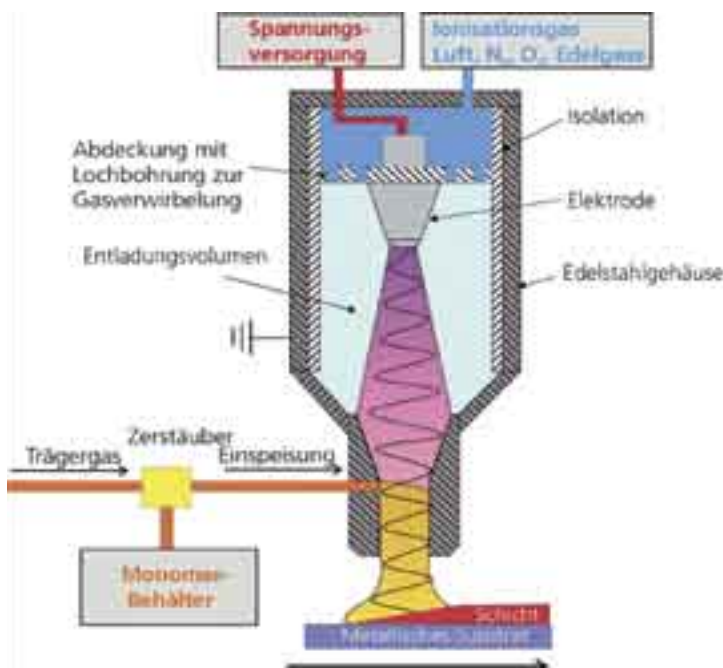


Abb. 1: Atmosphärendruck-Plasmatechnologie (Anlagenhersteller: Plasmatrete); links: Prinzipskizze, rechts: Plasmadüse für Plasmapolymerisation.

### Eignung von plasmapolymere Trennschichten für die CFK-Bauteilfertigung

Die in der Luftfahrtindustrie dominierenden CFK-Fertigungsprozesse sind die Harzinfusion z. B. Resin Transfer Moulding (RTM) und die Prepreg-Technologie (Prepreg = pre-impregnated sheet). Es stellte sich heraus, dass diese Prozesse unterschiedliche Anforderungen an das eingesetzte Trennmittelsystem stellen: Beim RTM-Prozess wird zunächst das »trockene« Fasergelege in die Form gelegt, diese geschlossen und anschließend langsam auf Prozess Temperatur aufgeheizt. Dabei findet eine Kompaktierung des Fasergeleges statt. Nach Erreichen der Injektionstemperatur wird das aufgewärmte flüssige Reaktionsharz (z. B. Epoxid) mit einem Druck von 6 bar in das Formwerkzeug gepresst und bei einer Temperatur von 180 °C ausgehärtet. Nach dem Abkühlen der Form wird das Bauteil entformt. Diese Fertigungstechnik stellt eine besondere Anforderung an das verwendete Formtrennmittel, da die Fasern innerhalb der ersten Prozessschritte unter Druck im direkten (mechanischen) Kontakt mit dem Trennmedium stehen. Beim Einsatz herkömmlicher Trennmittel muss deshalb die gesamte Innenfläche des RTM-Werkzeugs nach jeder Entformung gereinigt und neu eingetrennt, d. h. mit flüssigem Trennmittel versehen und abgelüftet werden. Im Zuge der zukünftigen Automatisierung der RTM-Prozessstechnik ist daher die Trennmittelapplikation ein kritischer, zeitintensiver Faktor, der durch den Einsatz einer permanenten plasmapolymere Trennschicht deutlich entschärft werden kann. In aktuellen Untersuchungen wurden plasmapolymere Trennschichten auf RTM-Formwerkzeugen der Luftfahrtindustrie getestet (Abb. 3). Im Gegensatz zu der RTM-Technik stellt die CFK-Bauteilfertigung nach dem Prepreg-Verfahren trotz ähnlicher Aushärtungsdrücke und -temperaturen weniger harte Anforderungen an das Trennmedium. Der Grund liegt in der Beschaffenheit des in der Luftfahrtindustrie eingesetzten Prepreg-Materials: Die Fasern sind mit dem Reaktionsharz vorimprägniert, kommen also im Fertigungsprozess kaum in direkten Kontakt mit dem Trennmedium. Die Folge ist eine erhöhte Beständigkeit der plasmapolymere Trennschichten, bezogen auf die Anzahl der möglichen Entformungszyklen (erhöhte Permanenz) für die Prepreg-Technologie.



**Abb. 2:** Demonstration der Anwendung von Trennschichten: Die linke, unbeschichtete Probe zeigt einen Kohäsionsbruch in der Dichtmasse (Polysulfid), die rechte Probe einen Adhäsionsbruch, der durch eine am IFAM entwickelte Trennschicht (hier ND-Technik) verursacht wurde. Substratmaterial ist ZEP-Stahl.

Abbildung 4 zeigt ein Formwerkzeug zur CFK-Bauteilherstellung mit dem Prepreg-Verfahren, welches sich aufgrund der großen Bauteilabmessungen insbesondere für die Beschichtung mittels AD-Technologie eignet.



**Abb. 3:** Entformung eines CFK-Panels aus einer vom IFAM mit Trennschicht beschichteten RTM (Resin Transfer Moulding)-Form, hier noch mit ND-Technik beschichtet.



**Abb. 4:** Potenzielle Anwendung für plasmapolymere Atmosphärendruck-Trennschichten: Formwerkzeug zur CFK-Bauteilherstellung nach dem Prepreg-Verfahren.

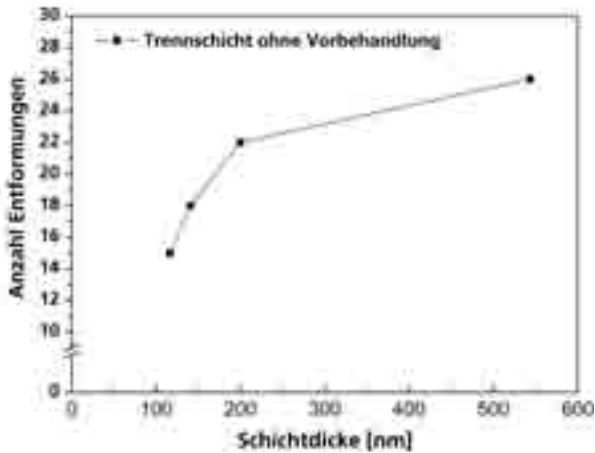


Abb. 5: Einfluss der Schichtdicke plasmapolymere AD-Trennschichten auf die Anzahl möglicher Entformungen. Abformmaterial: C-Faser/Epoxid-Harz-Gewebe.

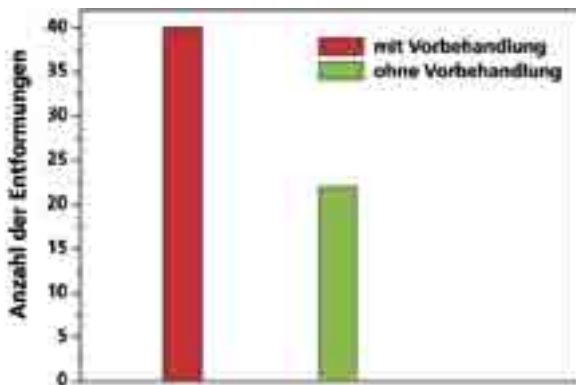
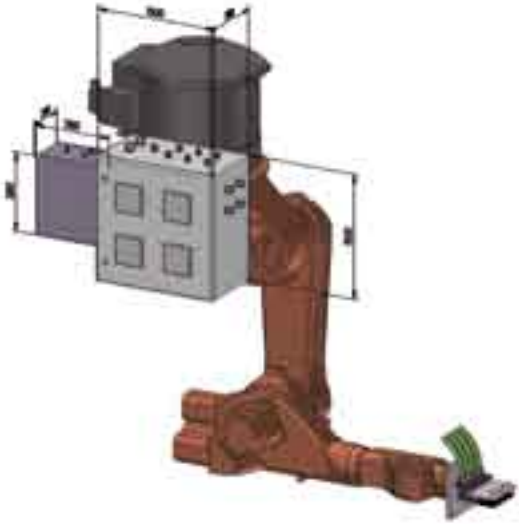


Abb. 6: Einfluss einer Vorbehandlung auf die Anzahl der möglichen Entformungen.

## Prozessoptimierung

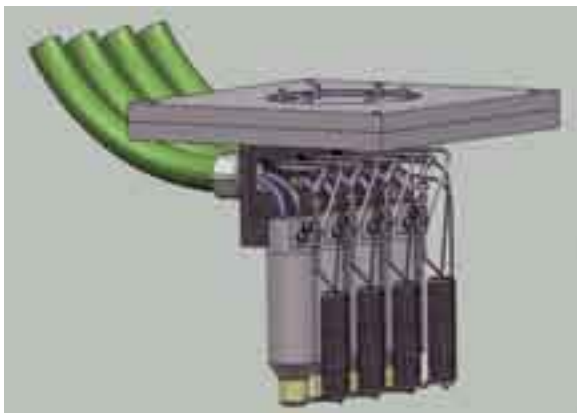
Im Zuge der Prozessoptimierung der Trennschichtabscheidung mithilfe der Atmosphärendruck-Plasmatechnologie wurde die Schichtdicke der Plasmapolymere Filme variiert. Bei der AD-Plasmatechnologie ist dies durch gezielte Einstellung der Plasmaparameter (z. B. Geschwindigkeit der Düse über dem Substrat, eingespeiste Precursor-Menge) möglich. Weiterhin wurde der Einfluss einer Oberflächenvorbehandlung untersucht. Die Funktion sowie die Permanenz der plasmapolymere Trennschicht sind mithilfe von Entformungstests nachgewiesen worden. Dabei wurde großer Wert auf möglichst fertigungsnahe Testbedingungen gelegt. Die mit Trennschicht beschichteten Prüflinge wurden mit Luftfahrt-Prepreg-Material belegt, in einer Heizpresse gemäß Materialbestimmungen unter Druck und Temperatur ausgehärtet und anschließend entformt. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis keine Trennwirkung mehr festgestellt werden konnte. Dabei hat sich gezeigt, dass die Anzahl der möglichen Abformungen mit der Schichtdicke der plasmapolymere Trennschicht korreliert: Sie nimmt mit steigender Schichtdicke zu, wobei dieser Effekt in Schichtdickenregimen unterhalb von 200 Nanometern stärker ausgeprägt ist (Abb. 5). Hieraus folgt ein unökonomisches Verhältnis von Beschichtungsaufwand zu Entformungsbeständigkeit für größere Schichtdicken. Ferner wurde deutlich, dass eine haftvermittelnde Vorbehandlung der Substratoberfläche die Anzahl der möglichen Entformungen deutlich erhöht (Abb. 6). Aus diesen Ergebnissen resultiert für zukünftige Beschichtungsprozesse ein Schichtdickenoptimum im Bereich von 200 Nanometern. Darüber hinaus ist eine haftvermittelnde Vorbehandlung für eine hohe Beständigkeit der Trennschicht entscheidend.



**Abb. 7:** Schematisches Layout der robotergestützten Atmosphärendruck-Plasmaanlage inklusive Mehrfachdüsentool zur Behandlung großer Flächen.

## Ausblick

Für die Abformung von CFK-Bauteilen, die aus Epoxid-Harz aufgebaut sind, konnte das Anwendungspotenzial der permanenten AD-Trennschichten dargestellt werden. Jedoch muss die Langzeitbeständigkeit für die verschiedenen CFK-Fertigungsverfahren noch gezeigt bzw. gesteigert werden. Das vorhandene Schichtsystem muss auf größere Formen transferiert werden, um die AD-Trennschichten sinnvoll einsetzen zu können. Der Einsatz eines Industrieroboters ist geplant (Abb.7 und 8), mit dessen Hilfe in einem (halb-)automatisierten Prozess ebene und leicht gekrümmte Oberflächen von Formwerkzeugen behandelt werden können. Die Entwicklung und Evaluierung geeigneter Verfahrensstrategien für große Flächen ist dabei neben der Optimierung der Düsenteknologie ein Hauptaugenmerk.



**Abb. 8:** Mehrfachdüsentool.

Die Untersuchungen wurden teilweise aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen des nationalen Verbundprojektes »Pro-CFK« gefördert. Für diese Förderung und Unterstützung sei gedankt.

### Ansprechpartner

Gregor Graßl  
 Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 33  
 E-Mail: [gra@ifam.fraunhofer.de](mailto:gra@ifam.fraunhofer.de)

Uwe Lommatzsch  
 Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 56  
 E-Mail: [lom@ifam.fraunhofer.de](mailto:lom@ifam.fraunhofer.de)

### Institut

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

# Einflüsse von Prozessparametern und Härtingsbedingungen auf die Eigenschaften von UV-gehärteten Acrylaten und Epoxiden

## Einleitung

UV-härtbare Klebstoffe und Beschichtungen haben sich einen festen Anteil im Klebstoffmarkt erobert. Es muss hier zwischen den radikalisch härtenden Systemen, meist auf der Basis von Acrylaten, und den kationisch härtenden Systemen, meist auf der Basis von Epoxiden, unterschieden werden. Speziell in der Elektronik- und Mikroelektronikindustrie sowie bei Glas-, Acrylglas- und Polycarbonatklebungen kommen diese Klebstoffsysteme wegen ihrer guten Härtingeigenschaften, sehr schnell erreichbarer Endfestigkeiten und der guten optischen Eigenschaften zum Einsatz.

Die im Folgenden vorgestellten und von der AiF geförderten Arbeiten (AiF-Nr.: 13.647 N/5) sollten klären, welche Einflüsse die Lichtleistung der Bestrahlungsvorrichtung, atmosphärische Bestandteile und weitere Einflussgrößen, insbesondere die Temperatur, auf das Härtingverhalten und die Materialeigenschaften gehärteter Klebstoffe haben.

Untersucht wurden ein mit Polyethylenglykol flexibilisiertes Epoxidmodellsystem auf der Basis eines cycloaliphatischen Epoxids und ein Acrylatmodellsystem auf der Basis eines Polyurethanacrylats. Dem Epoxidssystem wurden jeweils 1 Gew.% Härter, dem Acrylatssystem jeweils 3 Gew.% Härter zugegeben (Abb. 1).



Abb. 2: Versuchsaufbau der Reaktionsverfolgung UV-härtender Systeme bei definierter Temperatur mit IR-Spektroskopie in gerichteter Reflexion.

Neben ungefüllten Formulierungen wurden auch Rezepturen mit funktionalisierten Füllstoffen in das Untersuchungsprogramm einbezogen.

## Einfluss von atmosphärischen Komponenten und der Temperatur auf die Härting des Acrylatmodellsystems

Mittels IR-Rapidscan-Messungen lassen sich IR-Spektren mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100 Spektren pro Sekunde bei definierter Temperatur und Atmosphäre aufnehmen. Abbildung 2 zeigt einen entsprechenden Versuchsaufbau zur Untersuchung sehr schneller Härtingvorgänge während einer UV-Bestrahlung.

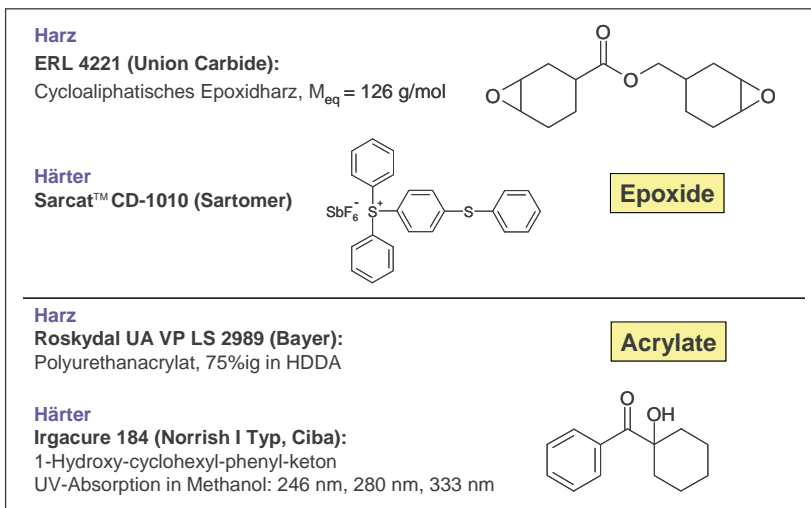


Abb. 1: Untersuchte Epoxid- bzw. Acrylatmodellsysteme.

Bekannt ist für Acrylatsysteme die häufig drastische Abnahme der Härtungsgeschwindigkeit in Gegenwart von Luftsauerstoff. Der inhibierende Einfluss des Sauerstoffs wird hierbei wesentlich durch die Probengeometrie beeinflusst. Vergleicht man z. B. die Härtungsgeschwindigkeit einer Schicht mit der eines Tropfens, zeigt Letzterer eine wesentlich schnellere Härtung, die von der atmosphärischen Zusammensetzung nicht beeinflusst wird. Auch die Oberflächenenergie des Substrates beeinflusst die Härtungsgeschwindigkeit des Acrylatsystems. Je hydrophiler die Oberfläche des Substrates eingestellt ist, desto mehr verlaufen die Klebstofftropfen zu Schichten, was mit einer entsprechenden Verlangsamung der Reaktion und einem vergrößerten Einfluss der atmosphärischen Zusammensetzung einhergeht.

Neben der atmosphärischen Zusammensetzung hat auch die Temperatur einen Einfluss auf das Härtungsverhalten von Acrylaten. So lässt sich die Reaktion des oben beschriebenen Modellsystems durch Steigerung der Härtungstemperatur signifikant beschleunigen, wie die Abbildungen 3 und 4 veranschaulichen. Deutlich wird, dass sich diese Beschleunigung insbesondere in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre, also bei für die Härtung ungünstigen Bedingungen, bemerkbar macht.

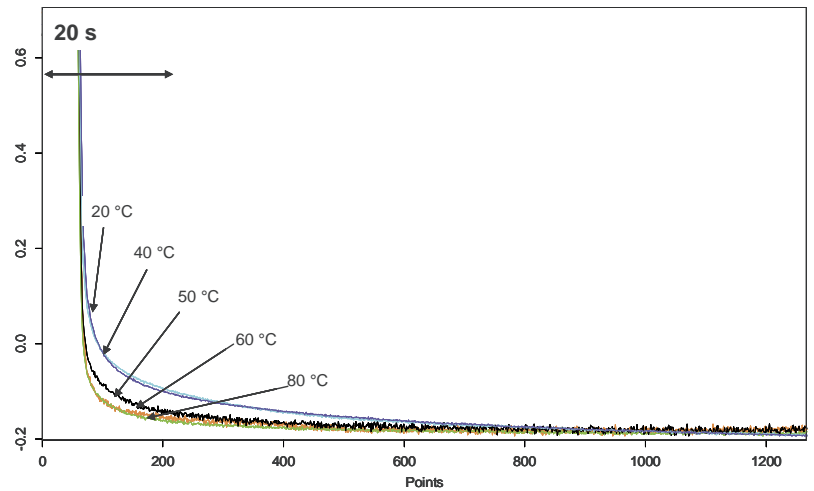


Abb. 3: Härtung in Stickstoff: IR-Auswertung der Abnahme der C=C-Bande des untersuchten Acrylatsystems während der UV-Härtung bei  $1620\text{ cm}^{-1}$ , 100 Punkte = 8 Sekunden: Härtungstemperaturen der Kurven von oben nach unten:  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Einschaltung des UV-Lichts nach 5 Sekunden.

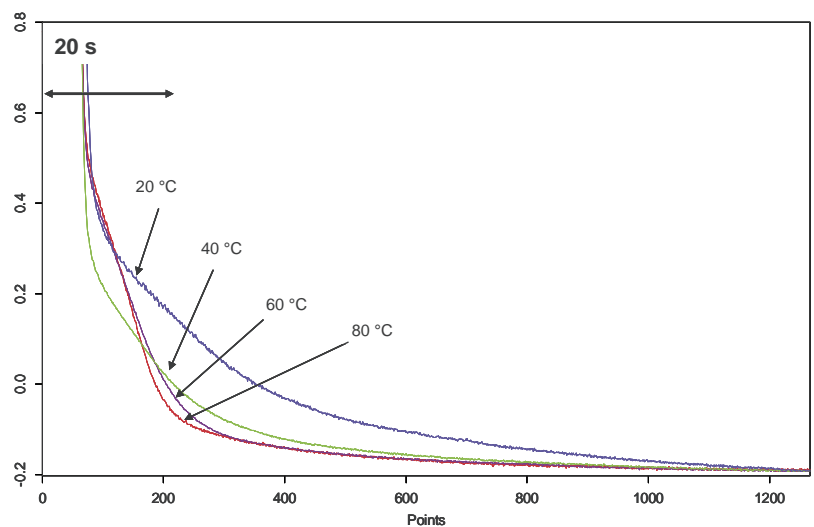


Abb. 4: Härtung in Luft: IR-Auswertung der Abnahme der C=C-Bande des untersuchten Acrylatsystems während der UV-Härtung bei  $1620\text{ cm}^{-1}$ , 100 Punkte = 8 Sekunden: Härtungstemperaturen der Kurven von oben nach unten:  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Einschaltung des UV-Lichts nach 5 Sekunden.



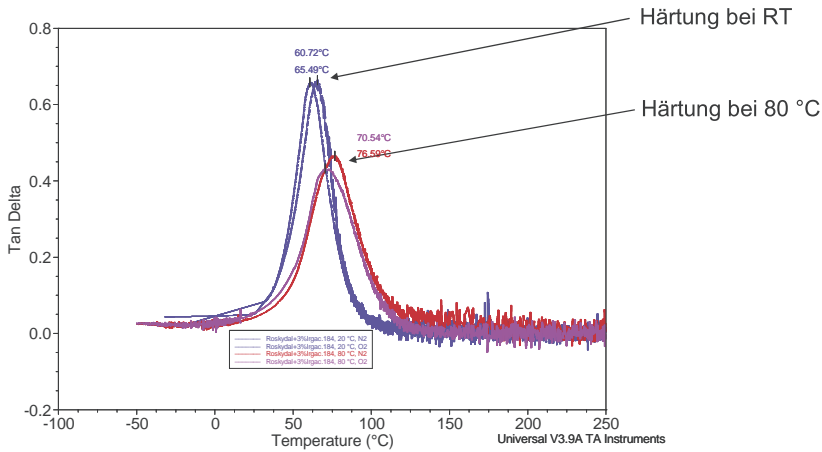


Abb. 5: DMA-Untersuchungen des unter verschiedenen Bedingungen gehärteten Acrylatsystems.

Härtungstemperatur	Atmosphäre	Speichermodul
20 °C	Luft	65 °C
20 °C	Stickstoff	61 °C
80 °C	Luft	71 °C
80 °C	Stickstoff	77 °C

Tab. 1: Glasübergangstemperaturen des bei verschiedenen Temperaturen gehärteten Acrylatsystems.

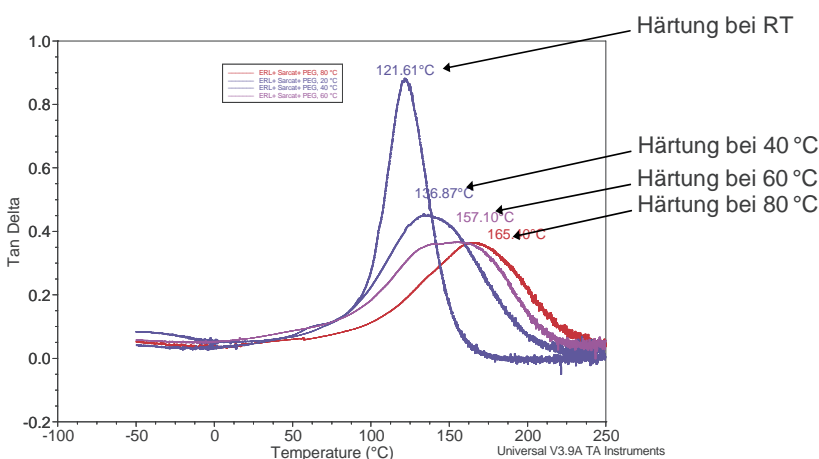


Abb. 6: DMA-Untersuchungen des bei unterschiedlichen Temperaturen gehärteten Epoxidsystems, Härtungstemperatur mit steigender Glasübergangstemperatur: 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C.

Mit bei unterschiedlichen Temperaturen gehärteten Filmen (Filmdicke = 90 µm) des Acrylatmodellsystems wurden dynamisch-mechanische Untersuchungen im Filmzugexperiment durchgeführt. Hierbei zeigt sich sowohl für unter Luft als auch unter Stickstoff gehärtete Filme eine leichte Verschiebung der Glasübergangstemperatur ( $T_g$ , definiert als die Temperatur, bei der Tan Delta sein Maximum erreicht) zu höheren Werten mit steigender Härtungstemperatur (Abb. 5, Tab. 1). Ein systematischer Einfluss der Atmosphäre ist nicht erkennbar bzw. liegt außerhalb der Messgenauigkeit.

### Einfluss von atmosphärischen Komponenten und der Temperatur auf die Härtung des Epoxidmodellsystems

Bei der photochemischen Härtung von kationisch härtenden Epoxiden kann die Luftfeuchtigkeit von entscheidendem Einfluss auf die Härtungsgeschwindigkeit und die mechanischen Eigenschaften der gehärteten Formulierungen sein. So zeigen cycloaliphatische Diepoxide mit endocyclischen Epoxidgruppen eine erhebliche Beschleunigung der Härtung mit zunehmender Luftfeuchtigkeit. Auf Bisphenol A Diglycidylether basierende Epoxide mit exocyclischen Epoxidgruppen zeigen diese Reaktionsbeschleunigung mit steigender Luftfeuchtigkeit nicht. Bei diesen Epoxiden erfolgt stattdessen eine geringe Abnahme der Umsatzgeschwindigkeit.

Wie die untersuchte Acrylatformulierung zeigt auch die Epoxidformulierung auf Basis von cycloaliphatischen Diepoxiden eine Beschleunigung der Härtungsreaktion mit steigender Härtungstemperatur. Dynamisch-mechanische Untersuchungen von gehärteten Filmen des Epoxidmodellsystems (Filmdicke = 90 µm) zeigen darüber hinaus eine deutliche Zunahme der Glasübergangstemperatur mit zunehmender Härtungstemperatur (Abb. 6 und Tab. 2).

Bei der kationischen Epoxidhärtung handelt es sich um eine so genannte »lebende Polymerisation«. Dies bedeutet, dass theoretisch nach dem Initiieren der Härtingsreaktion diese durch das Fehlen von Kettenabbruchreaktionen auch im Dunklen bis zum vollständigen Umsatz der reaktiven Zentren weiterlaufen würde. In Abbildung 7 ist dargestellt, dass im Falle eines geringen Initialumsatzes diese Dunkelreaktion im Verlauf mehrerer Stunden tatsächlich zu einer erheblichen Steigerung des Umsatzes führt (Linie 1–4, Abb. 7). Allerdings kann der Umsetzungsgrad nach Härtung mit einem Hochleistungsstrahler (Strahlungsleistung 200 W/cm<sup>2</sup>) im Verlauf der Dunkelreaktion nicht erreicht werden (Linie 5–7, Abb. 7).

Die Bestrahlungsleistung ist daher auch bei kationisch härtenden Epoxidformulierungen von entscheidender Bedeutung für die End Eigenschaften des gehärteten Systems.

### Einfluss der Härtungstemperatur auf den Härtungsschrumpf

Der Härtungsschrumpf von Klebstoffen in Abhängigkeit von der Härtungstemperatur wurde mit den oben beschriebenen Acrylat- und Epoxidmodellsystemen bestimmt. Hierbei wurde zeitaufgelöst das Volumen eines Tropfens des jeweiligen Systems vor und nach der photochemischen Härtung bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen. Die Methode erlaubt es, den temperaturabhängigen Verdunstungsschrumpf und den eigentlichen Härtungsschrumpf zu differenzieren. Es zeigt sich, dass der reaktionsbedingte Schrumpf nur gering von der Härtungstemperatur beeinflusst wird, wohingegen der Verdunstungsschrumpf insbesondere bei dem untersuchten Acrylatssystem erheblich mit der Temperatur zunimmt (Tab. 3). Das Acrylatssystem zeigt einen deutlich größeren Gesamtschrumpf als das Epoxidsystem (Abb. 8, siehe Seite 90 oben).

Härtungstemperatur	T <sub>g</sub>	Speichermodul	
		bei 150 °C	bei T <sub>g</sub> +20 °C
20 °C	122 °C	10 MPa	10 MPa
40 °C	137 °C	50 MPa	40 MPa
60 °C	157 °C	80 MPa	40 MPa
80 °C	165 °C	160 MPa	40 MPa

Tab. 2: Speichermodul und Glasübergangstemperatur des bei verschiedenen Temperaturen gehärteten Epoxidsystems.

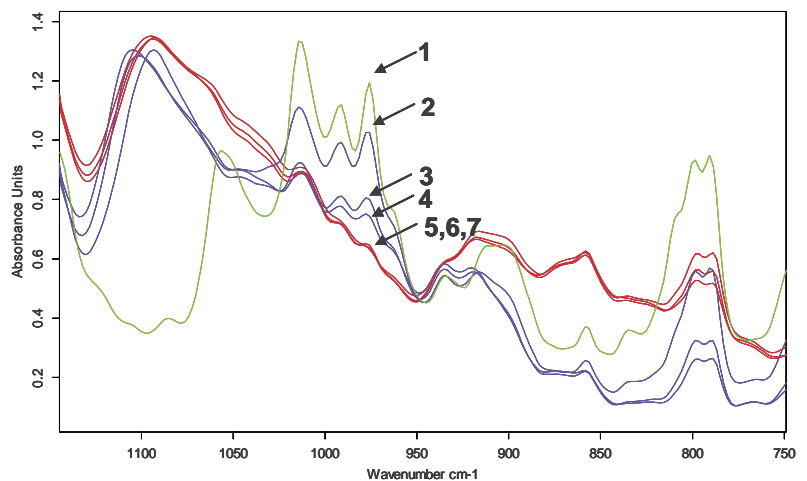


Abb. 7: Abnahme der Epoxidbande bei 975 cm<sup>-1</sup> eines Films aus ERL 4221 mit 1 Gew.% Sarcat™ CD 1010: vor Bestrahlung (1, grüne Linie), unmittelbar nach 10-sekündiger Bestrahlung mit einem Punktstrahler (2, blaue Linie), 30 Minuten nach Beendigung der Bestrahlung (3, blaue Linie) und 2,5 Tage nach der Bestrahlung (4, blaue Linie); unmittelbar nach Härtung mit dem Hochleistungsstrahler (5, rote Linie), 30 Minuten nach Beendigung der Bestrahlung mit dem Hochleistungsstrahler (6, rote Linie) und 1 Tag nach Bestrahlung mit dem Hochleistungsstrahler (7, rote Linie).

Modell-system	Härtungs-temperatur	UV-A [s / mW/cm <sup>2</sup> ]	Verdampfungsschrumpf [%/min]	Härtungsschrumpf [%]
Acrylat	RT	30 / 120	0.2	5.0
Acrylat	50 °C	30 / 120	0.6	5.4
Acrylat	80 °C	30 / 120	4.0	3.9
Epoxid	RT	60 / 170	0.0	2.2
Epoxid	80 °C	60 / 170	1.6	1.2

Tab. 3: Verdunstungs- und Härtungsschrumpf des Acrylat- und Epoxidmodellsystems bei unterschiedlichen Temperaturen.

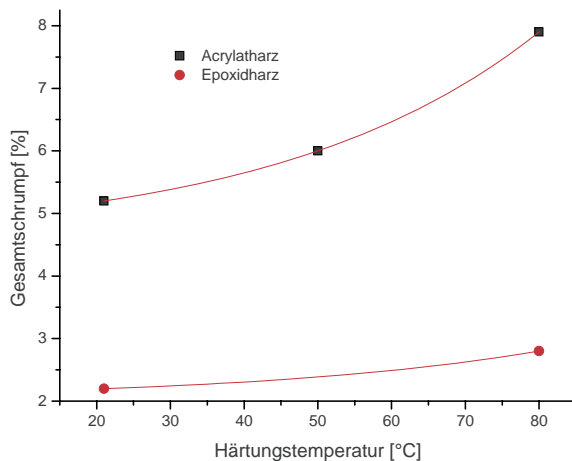


Abb. 8: Gesamtschrumpf des untersuchten Acrylat- und Epoxidsystems während der Härtung bei unterschiedlichen Temperaturen.

## Untersuchungen an UV-härtenden Formulierungen mit funktionalisierten Füllstoffen

Durch Füllstoffe lassen sich die mechanischen Eigenschaften von gehärteten Harzen signifikant verändern. Dies gilt umso mehr, wenn diese Füllstoffe auf der Oberfläche durch Silane funktionalisiert werden und sich so besonders fein als Nanofüllstoff in der Harzmatrix verteilen lassen. Um zu überprüfen, wie die Anwesenheit von funktionalisierten Füllstoffen die Eigenschaften von UV-härtenden Rezepturen beeinflusst, wurde die Basisrezeptur aus ERL 4221, 1 Gew.% Sarcat™ CD 1010 und 10 Gew.% Polyethylenglykol mit je 10 Gew.% verschiedener Füllstoffe versetzt und gehärtet: 1. Aerosil 200 (pyrogene Kieselsäure) 2. Aerosil 200 modifiziert mit einem Silan mit exocyclischen Epoxidgruppen (GLYMO) und 3. Aerosil 200 modifiziert mit einem Silan mit endocyclischen Epoxidgruppen (ECHTMO). Nach der Härtung der Filme wurden die dynamisch-mechanischen Eigenschaften mittels eines Filmzugexperimentes bestimmt. Die Darstellung des Verlustfaktors (Tan Delta) zeigt, dass die Füllstoffe die Glasübergangstemperatur zu deutlich höheren Werten verschieben. Dies gilt insbesondere für den mit einem Silan mit endocyclischen Epoxidgruppen modifizierten Füllstoff. Dieser Effekt legt eine kovalente Anbindung des Füllstoffs in das Polymernetzwerk nahe. Das Abflachen der Kurven des Tan Delta mit zunehmender Glasübergangstemperatur spricht für eine geringere Eigenschaftsänderung in diesem Temperaturbereich verglichen mit dem ungefüllten System (Abb. 9 und Tab. 4).

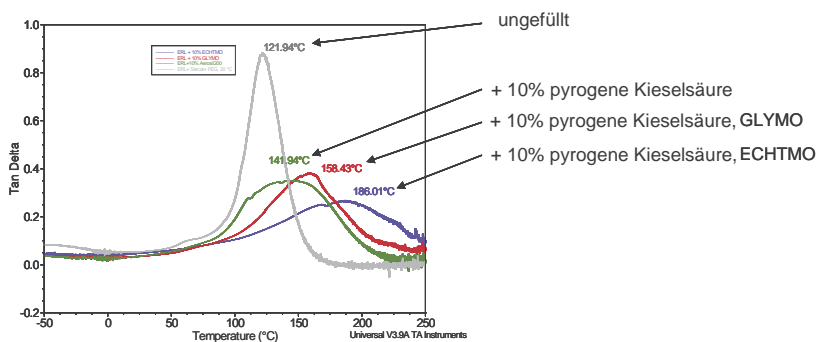


Abb. 9: Tan Delta der Formulierung aus ERL 4221 mit 1 Gew.% Sarcat™ CD 1010 und 10 Gew.% Polyethylenglykol in Abhängigkeit vom Füllstoff, mit zunehmender Maximaltemperatur: ungefüllt, 10 Gew.% Aerosil 200, 10 Gew.% Aerosil 200 modifiziert mit einem Silan mit exocyclischen Epoxidgruppen (GLYMO) und 10 Gew.% Aerosil 200 modifiziert mit einem Silan mit endocyclischen Epoxidgruppen (ECHTMO).

Entsprechende Untersuchungen wurden ebenfalls mit dem Acrylatmodellsystem aus Roskydal UA VP LS 2989 und Irgacure 184 durchgeführt. Als Füllstoff diente Aerosil 200, das mit einem Silan mit Acrylat-Funktionen modifiziert wurde (MEMO) und zu 20 Gew.% eingesetzt wurde. Die Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse von gefüllter und ungefüllter Rezeptur zeigen nur eine sehr geringe Verschiebung der Glasübergangstemperatur zu kleineren Werten im Falle der gefüllten Formulierung.

## Fazit

Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die Reaktionsgeschwindigkeit der untersuchten photochemisch härtenden Acrylat- und Epoxidsysteme wird insbesondere in für die Härtung ungünstigen Atmosphären durch Temperaturerhöhung deutlich beschleunigt. Dies kann z. B. den Verzicht auf eine Schutzgasatmosphäre ermöglichen.
- Eine Temperaturerhöhung der Härtungsreaktion führt bei dem untersuchten Epoxidsystem zu einer deutlichen Erhöhung der Glasübergangstemperatur und des Speichermoduls mit steigender Temperatur.
- Eine Temperaturerhöhung der Härtungsreaktion vergrößert den Verdunstungsschrumpf der untersuchten Systeme, während der eigentliche Härtungsschrumpf nur geringfügig beeinflusst wird. Dies zeigt auch, dass sich der Schrumpf durch den Einsatz von Rohstoffen mit niedrigem Dampfdruck signifikant reduzieren lässt, was auch aus Gründen der Arbeitshygiene angezeigt ist.
- Photochemisch gehärtete Nanokomposite auf Basis von ERL 4221 zeigen eine signifikante Erhöhung der Glasübergangstemperatur und des Speichermoduls bei Temperaturen  $> T_g$ , was z. B. den Einsatz dieser Systeme auch bei erhöhten Temperaturen ermöglicht.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen »Otto von Guericke« e. V. (AiF) (AiF-Nr.: 13.647 N/5) gefördert und von der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. unterstützt. Für diese Förderung und Unterstützung sei gedankt.

Füllstoff	T <sub>g</sub>	Speichermodul	
		bei 150 °C	bei T <sub>g</sub> +20 °C
ungefüllt	122 °C	10 MPa	10 MPa
10% pyrogene Kieselsäure	142 °C	120 MPa	80 MPa
10% pyrogene Kieselsäure, modifiziert mit einem Silan mit Glycidylethern (GLYMO)	158 °C	220 MPa	100 MPa
10% pyrogene Kieselsäure, modifiziert mit einem Silan mit cycloaliphatischen Epoxidgruppen (ECHTMO)	186 °C	590 MPa	210 MPa

Tab. 4: Speichermodul und Glasübergangstemperatur des mit unterschiedlichen Füllstoffen gehärteten Epoxidsystems.

### Ansprechpartner

Andreas Hartwig  
 Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 70  
 E-Mail har@ifam.fraunhofer.de

Matthias Popp  
 3M Deutschland GmbH, Neuss, vorher IFAM

### 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 in Bremen sowie für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit in Darmstadt. Damit stehen dem CWMT insgesamt 360 Mitarbeiter sowie eine Infrastruktur mit Prüffeldern, Laboren und Analytik auf mehr als 20 000 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.

### Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik CWMT

Am Lunedeich 158  
27572 Bremerhaven

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

#### Leitung

Dr. habil. Hans-Gerd Busmann  
Telefon: +49 (0) 471 / 90 26 29-10  
E-Mail [busmann@cwmt.fraunhofer.de](mailto:busmann@cwmt.fraunhofer.de)

#### Technische Zuverlässigkeit

Dr.-Ing. Antje Berg-Pollack  
Telefon: +49 (0) 471 / 90 26 29-30  
E-Mail [pollack@cwmt.fraunhofer.de](mailto:pollack@cwmt.fraunhofer.de)

#### Rotorblattprüfung

Dipl.-Ing. Christoph Kensche  
Telefon: +49 (0) 471 / 90 26 29-20  
E-Mail [kensche@cwmt.fraunhofer.de](mailto:kensche@cwmt.fraunhofer.de)

## Energie der Zukunft wird vor den Küsten erzeugt

### Das neue Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik (CWMT) in Bremerhaven entwickelt Innovationen für verbesserte und langzeitbeständige Windkraftanlagen

Der Wind schickt keine Rechnung: Der Energieerzeugung aus natürlichen oder nachwachsenden Ressourcen kommt nicht nur in Deutschland, sondern weltweit eine immense Bedeutung zu. Energie aus Sonnenstrahlung und Biomasse, vor allem aber durch Windkraft gehört dabei die Zukunft. Denn die Vorräte an fossilen Brennstoffen sind endlich. Die Preise dafür explodierten in den vergangenen Jahren – und brachten nicht nur Deutschland in eine verschärfte Abhängigkeit von den Anbieterstaaten. Dazu kommt eine intensive Klimaschutzdiskussion, die sich aus immer neuen Schreckensmeldungen über größer werdende Ozonlöcher und einen bereits spürbaren Klimawandel speist.

Wie viele Industriestaaten befindet sich auch Deutschland deshalb seit Jahren in einer Umstrukturierung der Energieversorgung. Dabei hat hierzulande in der jüngeren Vergangenheit wohl kaum eine Branche ein derartiges Wachstum gezeigt wie die Windenergie. Was mit Windkraftanlagen auf dem Land seinen Anfang nahm, setzt sich mit Anlagen auf See fort: Bis 2030 sollen 15 Prozent des deutschen Strombedarfs durch Windparks vor den Küsten gedeckt werden. 25 Gigawatt Leistung werden bis dahin angestrebt – ausreichend für fast zwei Millionen Haushalte. Das Investitionsvolumen in diese Technologie wird für diesen Zeitraum auf rund 45 Milliarden Euro geschätzt.

Offshore-Windräder sind um rund 50 Prozent leistungsfähiger als ihre »Kollegen« an Land. Für den Bau der Maschinen, Tragwerke und Rotorblätter sowie die maritime, elektrotechnische und Energieindustrie sind sie eine äußerst aussichtsreiche, Arbeitsplätze schaffende Zukunftstechnologie. Aber Anlagen vor den Küsten halten auch besondere Herausforderungen bereit – weil sie schwieriger zu installieren sind, größere Belastungen aushalten müssen und die Wartung auf See aufwändiger ist. Deshalb kommt es bei der Konzeption dieser Anlagen auf eine ganzheitliche Betrachtung an: Design und Konstruktion, Materialien und Prozesse, Fertigung und Installation sowie die technische Zuverlässigkeit und Betriebszustandserfassung müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass eine Windkraftanlage als optimales, langzeitbeständiges »Produkt« dabei herauskommt.

Dieser Aufgabe widmet sich das neue Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik (CWMT) in Bremerhaven. Es wurde 2006 vom Bremer Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) und dem Darmstädter Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) gegründet. Dieser Verbund aus CWMT, IFAM und LBF verfügt über die umfassende Kenntnis und sichere Beherrschung der Technologien und Systeme, die für eine erfolgreiche Konzeptionierung und einen sicheren Betrieb solcher Anlagen erforderlich sind.

#### Exzellenz-Cluster in Bremerhaven

Dass das Know-how von zwei Fraunhofer-Instituten für die große Herausforderung der Offshore-Windenergie vereint wird und mit einem Zentrum in Bremerhaven seinen Ausdruck findet, ist eine logische Konsequenz. In der Hafenstadt an der Nordsee hat sich in jahrelanger Arbeit ein regionales Exzellenz-Cluster herangebildet, das sich wirtschaftlich und wissenschaftlich der Weiterentwicklung der Offshore-Windenergie und der Meerestechnik allgemein widmet. Wirtschaftlich bergen diese Themen für die strukturschwache Küstenregion große Chancen – handelt es sich doch um Zukunftstechnologien, die sich am besten küstennah erforschen, weiterentwickeln und konstruieren lassen. Aus wissenschaftlicher Sicht bedienen sie vielfältige technische Problemstellungen und Entwicklungsbedarfe im Bereich der Materialien, Oberflächen, Fügeverfahren und der technischen Zuverlässigkeit, weshalb IFAM und LBF schon früh eine wichtige Stellung im besagten Exzellenz-Cluster eingenommen haben.

Bis 2009 wird das Fraunhofer-Center für Windenergie und Meerestechnik in der ersten Aufbauphase mit ca. vier Millionen Euro vom Land Bremen und mit ca. acht Millionen Euro vom Bund gefördert, der restliche Anteil stammt von Industriepartnern und der Fraunhofer-Gesellschaft. Der Aufbau beginnt mit einer Prüfhalle und komplexen Prüfständen. In der zweiten Aufbauphase sind unter anderem eine weitere Halle und ein neues Büro- und Laborgebäude für das CWMT in Bremerhaven geplant. Der Mitarbeiterstab des Zentrums wächst kontinuierlich.

Das CWMT hat sich als Forschungs-, Entwicklungs- und Prüfzentrum für Windenergieanlagen strategisch mit zwei Kompetenzzentren aufgestellt: dem Kompetenzzentrum Rotorblatt und dem Kompetenzzentrum Maritime Strukturen und Anlagen. In einer ersten Phase soll das in den Mutterinstituten IFAM und LBF vorhandene Know-how für die Bereiche der Windenergieanlagen und der Meerestechnik gebündelt und weiterentwickelt werden. Dabei werden zwei Wissensbereiche mit reichhaltiger Erfahrung verschmolzen. Im IFAM bearbeiten mehr als 230 Mitarbeiter seit Jahrzehnten industriennahe Forschungs- und Entwicklungsaufgaben mit Themenstellungen, die sich auf Windenergieanlagen übertragen lassen – oder bereits speziell für diese in Angriff genommen wurden. Neben sicheren Klebverbindungen gehören die Materialforschung, die Oberflächenvorbehandlung und optimierte Prozesse dazu. Das LBF beschäftigt sich seit mehr als 65 Jahren mit der Betriebsfestigkeit und – bedingt durch die rasant gestiegene Integration von Sensoren, Aktuatoren, Elektronik und Regelungstechnik – auch der Systemzuverlässigkeit. Nach der Abstimmung und Zusammenführung des IFAM- und LBF-Angebotes durch das CWMT für die Windenergieanlagen-Industrie soll in einer zweiten Phase ein eigenes, verbreitertes Technologie- und Entwicklungsportfolio aufgebaut werden.

Schäden an Verbindungselementen und Oberflächen bereits bestehender Offshore-Anlagen zeigen, dass für die Verbesserung der »Langzeitbeständigkeit« von Windparks auf hoher See noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Die Lebensdauer der gesamten Konstruktion mitsamt allen Komponenten für einen Zeitraum von 20 Jahren zu sichern, ist eines der Ziele des CWMT. Die Systeme müssen äußerst robust und wartungsarm sein, damit die Industrie das Wagnis hoher Investitionen in diesem Sektor eingeht. Die wichtigen Fragen von Design und Konstruktion, Materialien und Prozessen, Fertigung und Installation sowie der technischen Zuverlässigkeit und Betriebszustandserfassung müssen bereits vor dem Bau beantwortet bzw. gelöst werden und zu einem integrierten, ganzheitlichen System zusammengefasst werden. Da für Offshore-Anlagen dieser Größe keine Erfah-



Prüfstand für die statische und zyklische Untersuchung von Rotorblättern bis zu 70 m Länge. Das maximale Drehmoment beträgt 50 Mega-Newtonmeter.

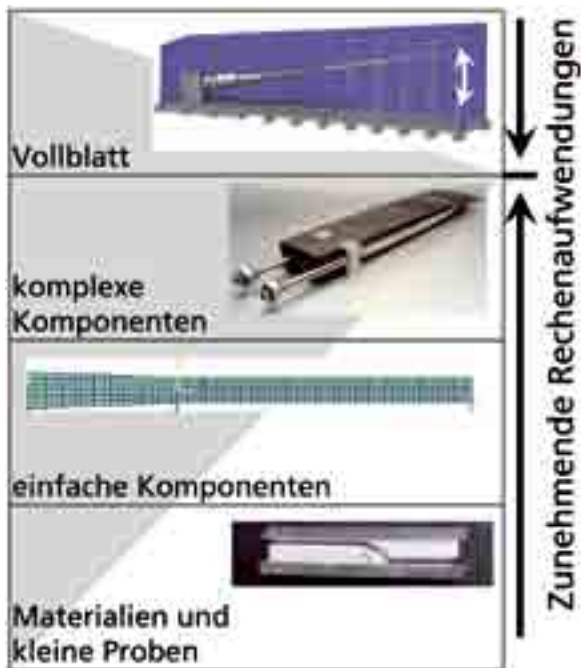
rungswerte vorliegen, kommt es für das CWMT vor allem auf experimentelle Prüfungen und rechnerische Simulationen an.

#### Kompetenzzentrum Rotorblatt: Tests und Vorhersagen

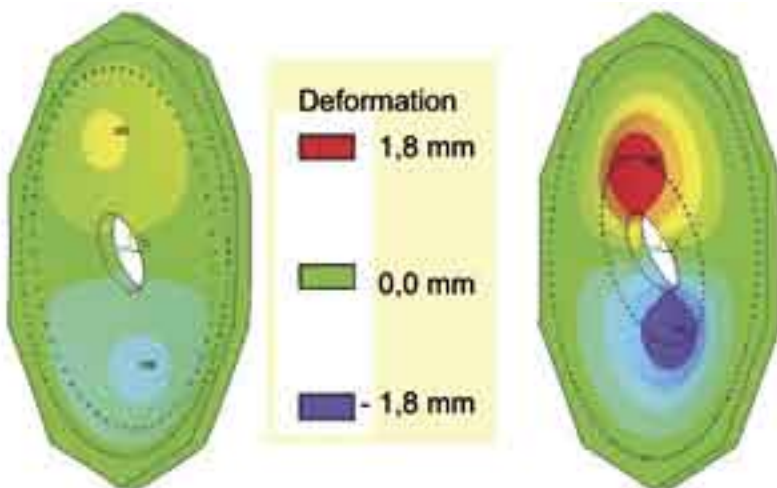
Das Kompetenzzentrum Rotorblatt innerhalb des CWMT hat sich zum Ziel gesetzt, die Lebensdauer-Vorhersage von Windenergieanlagen zuverlässiger zu machen sowie den zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand für Tests im vertretbaren Rahmen zu halten. Mit verschiedenen Einzelansätzen werden grundlegende Probleme gelöst und zu einem integrierten Gesamtverfahren vereint. So soll die Realität der im Test anliegenden Beanspruchungen verbessert werden. Ein Exemplar einer Rotorblattfamilie wird stellvertretend für die gesamte Produktreihe auf Herz und Nieren getestet. Dazu zählen Nachweise an den Materialien, Komponenten und Baugruppen der Rotorblatt-Baureihe. Weil die Blätter mittlerweile riesige Ausmaße annehmen – Durchmesser von bis zu 200 Metern sind bereits angedacht –, soll dies nur an einem verkleinerten Exemplar erfolgen. Dass daher auch neue Berechnungsverfahren und virtuelle Testmethoden verstärkt eingesetzt werden, liegt auf der Hand.

Wie wichtig die möglichst intensive Erforschung der Rotorblätter, ihres Verhaltens und der einwirkenden Lasten ist, zeigt ein Blick auf den Alltagsinsatz. Rotorblätter der kommenden Multimegawatt-Windenergieanlagen werden immensen Beanspruchungen unterliegen. Die angedachten Rotordurchmesser ergeben Blattgewichte von 50 Tonnen und mehr. Dies stellt höchste





Schematische Darstellung der Hierarchie verschiedener Testverfahren in Abhängigkeit der Komplexität der Testbauteile. Diese nimmt von unten nach oben zu, wobei im Allgemeinen die Zahl der durchzuführenden Prüfungen gleichzeitig abnimmt.



Finite-Elemente-Rechnung zur Deformation der Adapterplatte zwischen Rotorblatt und Prüfstand für ein 70-m-Rotorblatt (links) und ein 30-m-Rotorblatt (rechts). Die maximale Deformation ist aufgrund der größeren »Hebelarme« beim kleinen Blatt mit 1,8 mm größer als beim großen Blatt mit 0,8 mm.

Anforderungen, etwa an die Steifigkeit des Blattes und an die Widerstandsfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe gegen die maritimen Umgebungsbedingungen. Der Einsatz neuer Werkstoffe und neuer Bauweisen muss deshalb untersucht werden. Bei Materialien wie Kohlefaser-Verbundwerkstoffen oder nachwachsenden Rohstoffen spielen Verfügbarkeit und Kosten eine wichtige Rolle. Das CWMT bietet deshalb Unterstützung bei der konstruktiven Gestaltung, den Verbindungstechnologien beim Blattanschluss und im Blatt selbst, der Materialauswahl, der Fertigungskonzeption, dem Betriebsfestigkeitsnachweis und der Zustandsüberwachung im Betrieb. Dabei ist eine enge Kombination von analytischen, numerischen und experimentellen Methoden erforderlich.

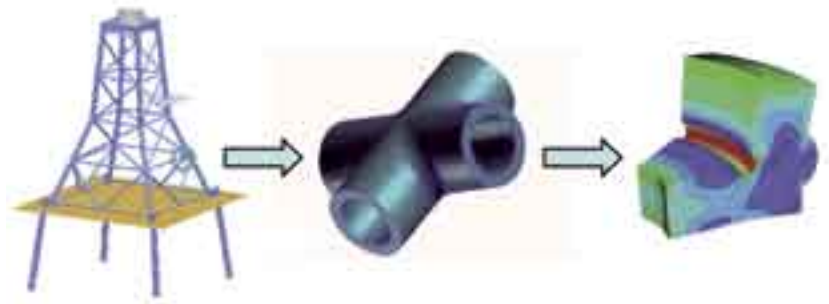
Ergänzt wird das Angebot durch Rotorblattprüfungen. Grundlagenuntersuchungen zum Einsatz neuer Verbundwerkstoffe unter den Aspekten erhöhter Festigkeit, guter Verarbeitbarkeit, verbesserter Recyclingfähigkeit und niedriger Kosten bilden einen Schwerpunkt der Arbeiten. Neben der mechanischen Beanspruchung durch Wind, Wellen, Seegang und Rückkopplungen steht hier besonders die Belastung durch die Umwelt über Feuchte, korrosive Medien, Wärme, Kälte und UV-Strahlung im Fokus. Damit verbunden ist die Entwicklung und Anwendung von passenden Oberflächenschutzsystemen. Weitere Aufgabengebiete bestehen in der Beurteilung dicker Lamine und der Weiterentwicklung von Versagenshypothese für die mehraxiale Beanspruchung von Verbundwerkstoffen. Ein erhebliches Optimierungspotenzial bezüglich Qualität und Kosten besteht in der Klebtechnik, also der Entwicklung und dem Einsatz von verbesserten Klebstoffsystemen und -technologien sowie der realitätsnahen Abbildung der Betriebsbeanspruchungen in der Simulation und im Versuch.

## Kompetenzzentrum Maritime Strukturen und Anlagen

Das CWMT-Kompetenzzentrum Maritime Strukturen und Anlagen befasst sich vorrangig mit der integrierten Entwicklung von Gründungsstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen. Dazu zählt die ganzheitliche Betrachtung der Materialien, des Oberflächenschutzes, der Konstruktion, der Fertigungs- und Verfahrenstechnologien, der Montage und der Logistik. Zudem werden neue Transwerkskonzepte entwickelt und untersucht; die Simulation der Betriebsfestigkeit von bestehenden und künftigen Anlagen-Konzeptionen ist fester Bestandteil. Gründung, Turm und Gondel einer Windenergieanlage in tiefem Seewasser wiegen unter extremen Bedingungen mehr als 1000 Tonnen. Die Verringerung des Gondelgewichtes seitens der Anlagenbauer ist die wohl effizienteste Möglichkeit der Gewichts- und Kostenreduzierung. Weiteres Einsparpotenzial besteht in einer Betrachtung von Konstruktion, Fertigung, Transport, Logistik und Installation sowie deren wechselseitigen Abhängigkeiten. Anders als bei der Gondel und den Rotorblättern fehlen bei der Gründung die jahrelangen Erfahrungen aus dem Onshore-Geschäft.

In Zusammenarbeit mit privaten und öffentlichen Fachleuten bieten die Experten des Kompetenzzentrums Maritime Strukturen und Anlagen eine Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette von der Einzelteilerfertigung bis zur Aufstellung auf See an. Eine besondere Herausforderung sind die großen Gewichte und geometrischen Abmessungen der einzelnen Komponenten und Baugruppen. Deshalb ist es hier besonders wichtig, Konstruktion und Fertigungsplanung eng miteinander zu verknüpfen. Möglich sind zum Beispiel eine Betrachtung von Fertigungsabläufen für verschiedene Bauweisen oder Baugruppengestaltungen zur Optimierung von Fertigungszeiten und -kosten. Basierend auf den Erfahrungen in der Bewertung von hochbeanspruchten Schweißverbindungen und dem Einsatz von Gussknoten im Offshore-Bereich, bietet das Fraunhofer-Center Unterstützung bei der Auswahl der Materialien und der Auslegung der Turmkonstruktion.

## Optimierung von Gründungen



Für die Finite-Elemente-Simulation (rechte Abb.) der rechnerischen Auslegung von kritischen Details der komplexen Gründungstragwerke für Offshore-Windenergieanlagen wird zunächst die Gesamtstruktur betrachtet (links) und anschließend in einem abgestuften Vorgehen die »Betrachtungsgröße« verkleinert, simultan mit einer Verfeinerung der Detaildarstellung.

Grundlage ist immer eine numerische Beanspruchungssimulation auf Basis der Betriebslasten. Diese können dem speziellen Standort der Anlage angepasst werden, indem die Betriebslasten für den Standort ermittelt, auf die geplante Einsatzdauer extrapoliert und anschließend gestrafft werden. Dieses Beispiel der numerischen Simulation und des Engineerings mit neuesten Software-Paketen steht stellvertretend für den durchdachten und intensiven Einsatz von Rechnerkapazitäten in der gesamten Arbeit des CWMT, der sich auf vielen Ebenen anbietet. Die Entwicklung und Anpassung sowie der Einsatz von Methoden und Werkzeugen zur rechnerischen Simulation fußen auf den jahrelangen Erfahrungen des Fraunhofer LBF in diesem Bereich. Grundlage der Arbeiten ist der »Global zu lokal«-Ansatz. Durch die Simulationen werden rechnerisch die kritischen Bereiche des Gesamtsystems herausgefiltert. Die Sicht auf diese Bereiche wird dann durch eine Kombination weiterer Detailsimulationen und experimenteller Überprüfungen an realen Strukturen vertieft.

Auch für eine zeit- und kostensparende zustandsorientierte Wartung arbeitet das CWMT an Lösungen. Eine durchgängige Erfassung des Alterungszustandes ist für den Antriebsstrang und die Rotorblätter, aber auch für Gründung und Turm notwendig. Daher ist eine Erfassung der lokalen Beanspruchungen mittels Sensorik an hochbeanspruchten Bereichen unabdingbar. Durch integrierte Sensoren können die während des Betriebes auftretenden Beanspruchungen er-

mittelt werden. Die Entwicklung und Anwendung angepasster Condition-Monitoring-Konzepte ermöglichen so den Vergleich der realen mit der erforderlichen Beanspruchbarkeit sowie Aussagen über die Restlebensdauer. Über Änderungen im Systemverhalten der Anlage können Schäden frühzeitig detektiert werden, und es kann so eine gezielte Wartung eingeleitet werden. Weitere Entwicklungen – etwa für zukünftige Rotorblätter – betreffen funktionale Strukturen bezüglich der Enteisung und des Strömungsverhaltens der Rotorblattoberflächen sowie die Vorhersage der Wirkungsdauer von Oberflächenschutzsystemen.

Der Einsatz angepasster Sensorik erlaubt jedoch schon im Entwicklungsstadium numerische Beanspruchungssimulationen und Lebensdauerabschätzungen. Diese wiederum können z. B. für eine Optimierung der Auslegungstools für Gründungen und Türme genutzt werden. Ziel ist eine sichere Optimierung von Gewicht, Fertigungszeiten und Kosten.

#### **Ansprechpartner**

Dr. habil. Hans-Gerd Busmann  
Telefon: +49 (0) 471 / 90 26 29-10  
E-Mail busmann@cwmt.fraunhofer.de

#### **Institut**

Fraunhofer-Center für  
Windenergie und Meerestechnik,  
Bremerhaven

## Kleben verbindet

### Kleben ist Kunst, Kunst ist Kleben: Ausstellung vor und in Bremens guter Stube begeisterte IVK-Mitglieder und Bevölkerung

Juni 2006 in der Bremer Innenstadt: Erstaunte, ja ungläubige Gesichter, offene Münder und die immer wiederkehrende Frage: »Was ist denn das?« Mehrere Dutzend weiße Gebilde ziehen die Blicke der Interessierten und der Flanierenden an. Mit Luft gefüllte Plastikschläuche sind zu schneeflockenähnlichen Gebilden zusammengebunden. Zwischen Rathaus, Bürgerschaft, Schütting und Roland stehen diese rund drei Meter hohen Nanos – riesige Abbilder von kleinsten Teilchen im Nanobereich. Der Hintergrund: Beim Kleben laufen die entscheidenden Fügeprozesse im Nanobereich ab, doch dieses Phänomen ist für das Auge nicht sichtbar. Die riesigen Exponate jedoch, die im öffentlichen Raum bei Tag und – wundervoll angestrahlt – auch bei Nacht für Aufsehen sorgen, machen genau diesen Zusammenhang deutlich. Und wer mehr wissen will, ist anschließend herzlich eingeladen zur Kunstausstellung Neue Verbindungen – Phänomen Kleben in der Bürgerschaft und der Unteren Rathauhalle. Angeboten werden auch Führungen in die Welt des Klebens und der Kunst.

Wohl kaum zuvor hat das Kleben und Verbinden unterschiedlicher Materialien für ein solches Aufsehen in der breiten Öffentlichkeit gesorgt, weder in der Hansestadt Bremen noch an anderen deutschen Orten. Und nicht nur an Wissenschaft und Technik interessierte Bürgerinnen und Bürger begeisterten sich vom 8. bis 12. Juli 2006 für die Ergebnisse des Kooperationsprojektes, sondern auch Kunstgenießer und -kenner, Spaziergänger, Stadtbummeler und eilig Vorübergehende. Und natürlich die Damen und Herren vom Fach: Schließlich war die Idee des Zusammenwirkens von Kleben und Kunst in einem Gespräch zwischen dem IFAM-Institutsleiter Professor Dr. Otto-Diedrich Hennemann und Arnd Picker, dem Vorsitzenden des Vorstandes des Industrieverbandes Klebstoffe (IVK), entstanden. Beide hatten darüber sinniert, wie man das 60. Jubiläum des IVK im Juni 2006 in Bremen angemessen begleiten könnte. Und schnell kamen sie auf die gar nicht so fernliegende Verbindung zwischen Kleben und Kunst.



Nanos vor dem Bremer Rathaus und vor dem Bremer Dom.

## Das Phänomen Kleben visualisiert

IFAM und IVK nahmen einen dritten Partner ins Boot: die Hochschule für Künste Bremen (HfK). »Die Verbindung zwischen Wissenschaft und Kunst hat uns von Beginn an gereizt und begeistert. Schon beim ersten Treffen mit dem HfK-Rektor Professor Dr. Peter Rautmann sprudelten die Ideen nur so«, berichtete Arnd Picker, als er die Teilnehmer der 60. IVK-Tagung am warmen Sommerabend des 8. Juli auf den Stufen des Rathauses – Bremens guter Stube – begrüßte. Realisiert wurden die Arbeiten von den Künstlerinnen und Künstlern von morgen im Rahmen eines studentischen Wettbewerbs und eines Schülerwettbewerbs. Gesponsert von den IVK-Mitgliedsfirmen entstanden ideenreiche Kunstwerke. In einer zuvor selten da gewesenen Art und Weise visualisierten die Ergebnisse das Phänomen Kleben. Ohne Worte zu verlieren, machten die Nachwuchskünstler in beeindruckender Weise hochkomplexe chemische und physikalische Vorgänge verständlich. Die Faszination des Klebens als Verbindungstechnik wurde durch die eigene Bildsprache, die die Kunst bereithält, spür- und erlebbar interpretiert.



Von links nach rechts: Prof. Dr. Peter Rautmann (Rektor der HfK, Bremen), Prof. Dr. Otto-Diedrich Hennemann (IFAM-Institutsleiter, Bremen), Arnd Picker (Vorsitzender des Vorstandes des IVK, Düsseldorf).

So sah es auch der IVK-Vorsitzende Arnd Picker: »Ich bin begeistert und erfreut über das, was die Schüler und Studierenden erschaffen haben. Und wenn es mit Projekten wie diesen gelingt, Vertrauen in die Klebtechnologie und ihre Anwendungen zu schaffen – dann hat sich der Aufwand

gelohnt.« Dem stimmte Bremens Innensenator Thomas Röwekamp zu, der die Vertreter der deutschen Klebstoffhersteller in der Hansestadt begrüßte, und konstatierte: »Mit der Kunstaktion haben Sie die Stadt in Aufruhr gebracht – weil sich alle fragen, was das hier auf dem Marktplatz denn eigentlich ist.« HfK-Rektor Professor Dr. Peter Rautmann verwies noch einmal darauf, dass die Kunst über das Kreativpotenzial verfüge, das die Industrie brauche: »Dass sich diese früher getrennten Bereiche in dieser Art und Weise miteinander verbunden haben, ging wohl nur hier in Bremen. Was bei Ihnen funktioniert – das Kleben –, ist unsichtbar und beschränkt Sie daher in Ihrer Vermarktung. Für uns Künstler war das eine große Herausforderung!«



Rechts: Bremens Innensenator Thomas Röwekamp bei der Begrüßung der Tagungsteilnehmer, links: Ansgar van Halteren (Hauptgeschäftsführer IVK und Mitglied des Vorstandes, Düsseldorf).



Weil das Wetter so schön war, fand die Begrüßung der Tagungsteilnehmer durch den Innensenator vor der Kulisse des Bremer Doms statt.

Kurze Zeit später – beim Festempfang zum 60. Jubiläum des Industrieverbandes in der Oberen Rathaushalle – gaben Arnd Picker und Otto-Diedrich Hennemann einen tieferen Einblick in die Entstehung des außergewöhnlichen Events. »Die Kreativität ist mit uns durchgegangen«, gab Picker zu – und verwies auf Hennemann als den eigentlichen Ideengeber. Der Leiter des IFAM erläuterte den Hintergrund der Aktion: »Unser Motto ist: Kleben verbindet. Das heißt aber nicht nur, dass wir in komplexen Verfahren Materialien verbinden – durch die Interdisziplinarität unserer ›Branchen‹ verbinden wir auch Menschen. Etwa Wissenschaftler unterschiedlicher Fachrichtungen und – bei der Umsetzung klebtechnischer Lösungen – den Wissenschaftler mit dem Unternehmens- oder Forschungsleiter bis hin zum Facharbeiter.« Die auf mehreren Ebenen verbindenden Prozesse des nicht sichtbaren Klebens durch Kunst sichtbar zu machen, sei Auslöser für die Zusammenarbeit mit Künstlern gewesen. Hennemann: »Wenn wir den Markt qualifiziert entwickeln wollen, müssen wir uns und unsere Tätigkeit sowie das Phänomen Kleben verständlich und begreifbar machen.«



Festempfang des IVK in der Oberen Rathaushalle.

Dazu musste indes erst einmal ein Verständnis bei den Teilnehmern der beiden Wettbewerbe geschaffen werden. Kleben – was ist das? Wie funktioniert es? Was bedeutet es für uns und unsere Umwelt? In einem Vortrag stellte Otto-Diedrich Hennemann deshalb den Lehrenden und Studierenden der Hochschule für Künste die technischen Zusammenhänge der Klebtechnik vor, beantwortete technologische Fragen und stand später immer wieder als Ansprechpartner zur Ver-

fügung. Für den Wettbewerb selbst wurden keine Einschränkungen vorgenommen. Die Studierenden sollten frei entscheiden, wie sie die Thematik künstlerisch umsetzen.

### Spontaneität als eine der Triebfedern des Projektes

»Als wir begannen, mit der Thematik des Klebens unsere Arbeit zu reflektieren, fanden wir zunächst viele Zusammenhänge zu banal, um sie zu vertiefen«, erinnert sich Projektleiter Professor Oliver Niewiadomski von der HfK. »Mit Selbstverständlichkeit kleben wir ständig etwas zusammen, ohne über die Art des Fügens weiter inhaltlich nachzudenken. Dabei ist das Kleben eine der spontansten, unmittelbarsten Fügetechniken. Kein Loch ist vorzubohren, kein Gewinde zu schneiden, kein Niet zu stauchen und kein Schweißgerät zu installieren. Diese Spontaneität begleitete das ganze Projekt.«

Heraus kam eine beeindruckende Fülle von Kunstwerken, in denen eben nicht nur Materialien, sondern auch Funktionen, Ideen, Ansichten und Gefühle miteinander verbunden wurden. Mit der riesigen Nano-Struktur wiederum wurden Bürgerschaft, Rathaus, Schütting und Marktplatz untereinander in Beziehung gesetzt. Die Ausstellung in der Rathaushalle – eine eindrucksvolle Darstellung von Kunst, die das Kleben visualisierte – fand nicht nur von den Teilnehmern des IVK-Jubiläumskongresses, sondern auch mehrere Tage lang von einer breiten Öffentlichkeit höchstes Lob und viel Beachtung.

Stellvertretend für die Ideen und Umsetzungen stehen die drei prämierten Werke der Nachwuchskünstlerinnen und -künstler. Den 1. Preis erhielt Mendy Arp für ihr Werk »Stinger«, das im Foyer der Bürgerschaft ausgestellt war. Sie hatte Zahnstocher in Styroporkugeln gesteckt. Dadurch entstanden Molekülstrukturen – Seeigeln ähnliche Gebilde –, die sich wiederum zu weiteren, beliebigen Figuren zusammenfügen ließen. »Mendy Arp ist hier an die Grenzen der Möglichkeiten gegangen«, so HfK-Rektor Peter Rautmann bei der Preisvergabe, »das hat die Jury überzeugt.« Auch eine weitere, verwandte Arbeit von Mendy Arp

sorgte für anerkennendes Nicken: In »Das Gros« hatte sie Porzellanvasen auf Porzellankugeln geklebt. Dadurch entstanden Module, die – ineinander geschoben – eine zusammenhängende Form ergeben.



1. Preis – »Stinger« von Mendy Arp.



2. Preis – Ein Produkt des Kunst-Akts von Eyke Erk Schröder. Die Aktionskunst, die in Berlin stattgefunden hatte, wurde während der Ausstellung als Video präsentiert.

Der 2. Preis ging an Eyke Erk Schröder für einen Kunstakt in Berlin-Mitte, der bei der Ausstellung als Video zu betrachten war. In einer nächtlichen Aktion hatte Schröder Werbeplakate von den Wänden der Stadt abgenommen und neu zusammengeklebt. »Hier ist Eyke Erk Schröder eine Kulturbotschaft durch eine Kleb-Aktion gelungen«, so Peter Rautmann. Den 3. Preis erhielten Tim Klausing, Tilman Richter und Li Shu-Shi. Ihr Exponat »Hands-on«: Kleben kam vor allem bei den Vertretern des Industrieverbandes gut an. Grund: Die wichtigsten Prinzipien und Vorgänge des Klebprozesses auf molekularer Ebene wurden ebenso verständlich erklärt wie die grundlegenden Schritte des Klebens. Ihr »Lernmodul« verstand es, in einer Mischung aus visueller Information und persönlicher Erfahrung schwierige physikalische und chemische Zusammenhänge auf einfache Art begreifbar zu machen – so, wie man es beispielsweise aus dem Bremer Science-Center Universum kennt. Die Betrachter aus den IVK-Reihen waren angetan: »Endlich kapieren wir auch mal, wie das funktioniert«, flachste man untereinander.



3. Preis – »Hands-on« von Tim Klausing, Tilman Richter und Li Shu-Shi.



### Schülerwettbewerb: 286 begeisternde Arbeiten

Dass man für eine gelungene künstlerische Umsetzung des Themas Kleben verbindet nicht unbedingt studieren muss, hatten zuvor schon Schülerinnen und Schüler aus Deutschland und der Schweiz eindrucksvoll bewiesen. Für sie gab es ebenfalls einen Wettbewerb: Alles Kleben wurde initiiert, geplant und organisiert von den Professorinnen Dorothea Mink und Andrea Rauschenbusch (HfK) sowie Beate Pohlendt (Landesinstitut für Lehrerbildung und Schulentwicklung, Hamburg). Auch diese Konkurrenz wurde vom IFAM und dem Industrieverband Klebstoffe unterstützt und finanziert. Und auch hier lautete die Aufgabe, das Kleben sichtbar zu machen. Wie, war den Teilnehmern freigestellt – es konnte eine Produktentwicklung, eine Grafik, ein Kleidungsstück oder eine Kombination aus allem sein. Das Interesse an diesem Schülerwettbewerb, bei dem alle Einsendungen im Unterricht und sehr oft auch in der Freizeit gebaut und gebastelt wurden, war sensationell: Insgesamt wurden 286 Arbeiten von 450 Schülerinnen und Schülern eingereicht.

Die 92 Arbeiten, die schließlich ebenfalls anlässlich der IVK-Jubiläumstagung in Rathaus zu sehen waren, verschlugen manchem Betrachter schier den Atem – nicht zuletzt wegen der unglaublichen Kreativität, die den jungen Köpfen entsprang. »Ich bin wirklich begeistert von der Vielfalt, der Unbekümmertheit, der Direktheit und der Vielschichtigkeit der Umsetzungen, wie sie hier zu sehen sind«, sagte Otto-Diedrich Hennemann als einer der Schirmherren des Schülerwettbewerbes. Katharina Schill beispielsweise, die derzeit im 12. Schuljahr an der Kantonsschule Rychenberg (Winterthur, Schweiz) lernt, befestigte an den Enden bunter Drähte Saugnäpfe und machte diese Fun-

sticks Badewannen-tauglich – dort kann man aus den Gebilden immer wieder neue Konstruktionen biegen und mit dem Saugeffekt an den Wannendrand »kleben«. Eine gute Idee, die toll aussieht und den Gedanken der »flexiblen Verbindung« exzellent aufnimmt. Ähnlich gute Einfälle hatten ihre Mitschülerinnen – deshalb gab es für die Kantonsschule auch einen der drei Gruppenpreise. Weitere gingen an die Hamburger Julius-Leber-Schule und die Adolf-Kolping-Schule aus Münster. Außerdem wurden Einzelpreise an Johanna Kirsten und Elisa Farid-Amin (beide aus Hamburg) vergeben; der achtjährige Bremer Mikel Ohndorf-Lopez de Munain bekam als jüngster Teilnehmer einen Sonderpreis.



»Im Unterricht sprudelten die Ideen nur so – der Wettbewerb hat die Kunststunden enorm bereichert«, berichtete ein Hamburger Lehrer. Ein ganzes Kleid, aus Klebfäden gefertigt, die aus einer Heißklebepistole kommen; bunte Tiere, geformt aus Kau- und Klebgummi; das »Klebrige« von Nahrungsmitteln und Süßigkeiten sichtbar gemacht; eine Jacke, nur aus Werbebeilagen einer Zeitung zusammengeklebt; ein eingegipster Stuhl, über und über beklebt mit bunten Knöpfen: Die Fülle der tollen Ideen darzustellen, würde diesen Artikel sprengen. Doch ob Schüler- oder Studentenwettbewerb, ob Ausstellung im Rathaus oder auf dem Marktplatz, ob Präsentation vor IVK-Mitgliedern oder in Führungen für die Bevölkerung: Selten zuvor wurde der Begriff Kleben verbindet so vielschichtig mit Leben gefüllt.



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

Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 00  
Telefax: +49 (0) 421 / 22 46-3 00  
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 (0) 421 / 22 46-0  
[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 Lunedeich 158  
27572 Bremerhaven

**Prof. Dr. rer. nat. O.-D. Hennemann**  
– Klebtechnik und Oberflächen –

Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 01  
Telefax: +49 (0) 421 / 22 46-4 30  
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 Druck:  
SOLLER Werbestudios GmbH

Die Interviews führte Kai-Uwe Bohn.

Bildbeschreibungen finden Sie auf:

Seite 82

Seite 33

Seite 34

Seite 47

Seite 67



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

