



Fraunhofer Institut
Fertigungstechnik
Materialforschung

Jahresbericht 2004



Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung (IFAM)

Jahresbericht 2004



Inhalt

Vorwort »Einblicke – Ausblicke« 5
 Interview Professor Dr. Hennemann. . 6
 Interview Professor Dr.-Ing. Busse . . . 8

Das Institut im Profil

Das Institut im Profil 11
 Kurzporträt und Organigramm . . . 13
 Das Institut in Zahlen 14
 Das Kuratorium des Instituts 16
 Aktuelle und künftige
 Herausforderungen 17
 Keine Forschung ohne
 Weiterbildung: Fachsymposium
 am 18. Mai 2004 18
 Die Fraunhofer-Gesellschaft. 23
 Der Fraunhofer-Verbund
 Werkstoffe, Bauteile 24
 Fraunhofer-Themenverbund
 Polymere Oberflächen (POLO) 25
 Fraunhofer-Themenverbund
 Nanotechnologie 26
 Fraunhofer-Themenverbund
 Numerische Simulation 26

Bereich Klebtechnik und Oberflächen

Bereich Klebtechnik und Oberflächen	27
Kompetenzen und Know-how . . .	29
Arbeitsgebiete und Ansprechpartner	31
Ausstattung	32
Technologiebroker: Eine engere Verzahnung mit Unternehmen und Instituten zahlt sich aus.	34
Anwendung von Nanokompositen in der Klebtechnik.	38
Simulation: Die rechnerische Auslegung und Bewertung von Klebverbindungen	43
Chromatfreie Korrosions- schutzsysteme: Prüfung und Entwicklung.	46
Permanente Trennschichten für Formgebungswerkzeuge durch Plasmopolymerisation	50
Der Ink-Jet als flexibles Fertigungsinstrument in der Mikrosystemtechnik	54
Charakterisierung des Wärmeübergangs durch dünne Klebschichten.	58
Zehn Jahre Personalqualifizierung: Festakt am 22. Juni 2004	62

Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe

Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe	67
Institutsteil Formgebung und Funktionswerkstoffe	69
Arbeitsgebiete und Ansprechpartner	73
Ausstattung	74
Funktionalisierung durch Mikro- und Nanotechnologien . . .	76
Werkstoffe für das Lasersintern . . .	84
Vakuum SLS – Lasersintern im Mikrobereich.	86
APM-Aluminiumschaum: Reproduzierbar, flexibel und einfach anwendbar	89
Anwendungen von Schaummetallen bei mobilen Arbeitsmaschinen	92
Mg-Chassis-Projekt	94
Zellulare metallische Werkstoffe – Stand und Perspektiven.	96
Untersuchungen zum Mikrowellensintern von PM-Werkstoffen	100
Metallische Kurzfasern als Katalysatoren für die oxidative Dehydrierung in der Gasphase . .	103
Impressum	106

Einblicke – Ausblicke

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

mit dem Jahresbericht 2004 geben wir Ihnen
Einblicke in unsere Arbeit des vergangenen Jahres,
zum anderen Ausblicke, wie wir uns für die
kommenden Jahre inhaltlich positionieren wollen.

Auch diesmal haben wir ein Symbolbild ausge-
wählt, das das Motto unseres Jahresberichts
transportieren soll. So wie auf unserem Bild
Einblicke in das IFAM-Gebäude und der Ausblick
aus dem Gebäude miteinander verschmelzen, so
sind die Übergänge vom Forschen zum Entwickeln
und Anwenden ebenfalls fließend.

Die Arbeiten des IFAM von heute waren die
Ausblicke von gestern. Unsere Ausblicke von heute
werden morgen unsere konkreten Projekte sein.
Wichtig für uns ist dabei, dass sich das IFAM
ständig weiterentwickelt.

Die Kompetenzfelder im Bereich »Formgebung
und Funktionswerkstoffe«, die 2003 neu definiert
wurden, haben sich 2004 offensiv dem Markt
präsentiert. Im Bereich »Klebtechnik und Oberflä-
chen« konnten die Arbeitsgruppen »Biomoleku-
lares Oberflächen- und Materialdesign« und
»Molecular Modelling« durch personellen Auf-
wuchs die Arbeiten intensivieren, um zukünftigen
Fragestellungen kompetent begegnen zu können.

Erfolgreich intensiviert wurde in beiden Institutsbe-
reichen der Aufbau von Netzwerken. Auch hier ist
wichtig, dass drinnen und draußen miteinander
verbunden wird, dass das IFAM über Netzwerke
kooperiert und in Verbänden mit Industrie und
Forschungseinrichtungen zusammenarbeitet.



Blicken wir zurück auf das vergangene Jahr,
stellen wir fest, dass die Weiterentwicklung
und die daraus resultierenden Erfolge des
IFAM nur durch den Einsatz unserer Mitar-
beiterinnen und Mitarbeiter, das Vertrauen
der Auftraggeber und Kooperationspartner
möglich wurden. Dafür möchten wir uns
bedanken.

O.-D. Hennemann

M. Busse

»Wir wollen technologische Entwicklungen aktiv mitgestalten«



Professor Dr. Otto-Diedrich Hennemann hat 2004 mit dem weiter gewachsenen Bereich Klebtechnik und Oberflächen trotz der stagnierenden Konjunktur die wirtschaftlichen Ziele erreicht. Er ist sicher: Damit auch künftig eine hohe Nachfrage nach den IFAM-Leistungen besteht, muss schon jetzt an den Antworten für die Fragen von morgen gearbeitet werden.

Professor Dr. Hennemann

Herr Professor Hennemann, das Klagen über ein schlechtes wirtschaftliches Umfeld war 2004 in Wirtschaft und Industrie allgegenwärtig. Das IFAM betreibt Auftragsforschung – wie war also unter diesen Vorzeichen Ihre Auftragslage, wie der wirtschaftliche Erfolg im Jahr 2004?

Wir sind leider keine Insel innerhalb eines industriellen Umfeldes: Rund 50 Prozent unseres Budgets werden durch Aufträge aus diesem Bereich gedeckt. Deshalb ist die Konjunktur immer ein wichtiger Aspekt für uns. 2004 hat sich der schon im Jahr zuvor bestehende Zustand der Stagnation nicht verändert. Im Gegenteil: Technologisch gesehen agieren wir nach vorne, vom Budget her aber nachlaufend. Die Frage war also 2004: Wie lange halten wir einen stagnierenden wirtschaftlichen Nachlauf-Trend durch, wie schlägt dieser auf unser Budget durch? Die Antwort ist positiv: Trotz des mäßigen Umfeldes haben wir unsere wirtschaftlichen Ziele im Rahmen der Fraunhofer-Gesellschaft erreicht. Wir haben sogar zusätzliches Personal eingestellt, um neue Aufgaben und Nachfragen abzudecken. Ich bin damit zufrieden – das sind Signale, dass unsere Strategie richtig ist.

Ihre Personalstruktur in den bestehenden Arbeitsgruppen wandelt sich. IFAM-Experten arbeiten beispielsweise zunehmend beim Kunden vor Ort. Wie kommt das?

Wenn wir unsere Dienstleistungen für unseren größten Wirtschaftspartner – die Industrie – optimieren wollen, müssen wir sehr genau und sehr schnell erkennen, wo wir jetzt und in Zukunft unsere Beiträge leisten können. Vor Ort heißen die beiden wichtigen Herausforderungen: Was kann ich unmittelbar für den Auftraggeber tun? Und wo zeichnen

sich Problemfelder ab, für die das Institut eines fernen Tages Lösungen anbieten muss? Wir sind immer wieder zu diesen Fragen gezwungen: Sind wir personell optimal aufgestellt? Passen die individuellen Profile der Mitarbeiter auch für künftige Aufgaben? Wohin muss sich unser Profil entwickeln, damit wir auch in Zukunft Partner der Industrie sind? Wir müssen für kommende Herausforderungen schon jetzt Hilfs- oder Unterstützungsmaßnahmen vorbereiten, die dann sofort genutzt werden können. Wenn wir diesen »präventiven Ansatz« nicht verfolgen, haben wir eines Tages keine Chance mehr, unseren Umsatz zu generieren. Wir beobachten die Wirtschaft und ihre Bedürfnisse also sehr sorgfältig, um uns diesen Anforderungen dann anzupassen und damit im Geschäft zu bleiben.

Die Zusammenarbeit mit der Industrie und die Einbindung in Netzwerke ist so etwas wie der Pulsschlag oder die Lebensader des IFAM. Wie haben sich diese Verbindungen 2004 entwickelt?

Wir orientieren uns einerseits an den Leistungsträgern der Wirtschaftsregion Bremen: Airbus, DaimlerChrysler und das Arcelor-Stahlwerk haben alle mit Werkstoffen zu tun. Sie sind seit Jahren unsere Partner. Im bisher vom Schiffbau geprägten Wirtschaftsraum Bremerhaven wird zurzeit der Schwerpunkt Offshore-Windenergie aufgebaut. Die Herausforderungen im Offshore-Bereich sind von der Logistik und den Materialien her noch höher als im Schiffbau – eine schwierige Aufgabe, an der wir ebenfalls mit unserem Know-how beteiligt sind. Über all diese Partner entstehen wieder neue Kontakte – beispielsweise zur Technologieregion Stade, wo ein Airbus-Fertigungswerk für Composite-Teile entstanden ist. Wir sind dort einer der Gründer des CFK-Valley Stade e.V. Das ist ein Zusammenschluss von IFAM, Airbus, DLR, der Airbus-Tochter Composite Technology Center und weiteren Partnern. Aufgabe ist dort unter anderem die Prozessketten-Entwicklung für Faserverbund-Großstrukturen, wie sie beim Bau von Flugzeugen, Kraft-, Nutz- und Schienenfahrzeugen oder Schiffen benötigt werden. Aus diesem CFK-Valley heraus ergeben sich nun wiederum neue Verbindungen. Denn eine der Aufgaben ist die Ansiedlung und Einbeziehung vieler klein- und mittelständischer Unternehmen – das so entstehende Netzwerk umfasst mittlerweile bereits 20 Unternehmen, mit denen wir wieder gemeinsame Entwicklungsprojekte starten können. Dieses Beispiel zeigt, wie die Vernetzung voranschreitet und immer neue Möglichkeiten ergibt.

Mit der 2003 gegründeten Induflex Coating Systems GmbH – kurz: ICS – haben sie ein erfolgreiches Spin-Off am Markt etabliert. Was versteckt sich dahinter?

Die ICS ist eine Aktivität aus dem Bereich der Niederdruck-Plasmatechnik. Unser Angebot der Funktionalisierung von Oberflächen bis hin zum Fertigungsanlauf war so erfolgreich, dass das Institut an eine Grenze kam. Wir haben immer mehr Anfragen bekommen, so dass wir diese Dienstleistung schließlich in ein eigenes Unternehmen – nämlich die Ausgründung ICS – übertragen haben. Solche Spin-Offs aus der Forschung sind auch Ziel des BMBF und der Bundesregierung. Die FhG hat diesen Schritt mitgetragen und nach genau festgelegten Regularien abgewickelt. Aufträge dieser Art geben wir jetzt an die ICS weiter, aber ICS gibt auch passende Forschungs- und Entwicklungsaufträge an uns zurück – das ist also keine Einbahnstraße. Wir wollen das ICS auch als Keimzelle für weitere Netzwerke nutzen.

Das IFAM ist auch innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft immer stärker in Netzwerke eingebunden ...

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile ist sehr aktiv – die Zusammenarbeit funktioniert ganz prima. Zu Fraunhofer-Themenverbänden wie dem oberflächentechnischen Verbund Polymere Oberflächen (POLO) ist 2004 der Themenverbund Nanotechnologie gekommen. Neu hat sich jetzt der Fraunhofer-Themenverbund Numerische Simulation von Produkten, Prozessen aufgestellt. Da spielt das IFAM – auch in Verbindung mit dem Bereich »Formgebung und Funktionswerkstoffe« von Professor Busse – eine leitende Rolle. Also: Diese Themenverbände wachsen, und damit wachsen die Netzwerke. Für die Wirtschaft werden so hervorragende Systemlösungs-Angebote geschaffen.

Sie betonen oft, dass am IFAM neben der anwendungsbezogenen Auftragsforschung auch grundlegende »Zukunftsforschung« geleistet wird. Was genau passiert da?

Es gibt einerseits den bereits skizzierten mittelfristigen Ansatz, sich auf kommende Bedarfe der Wirtschaft vorzubereiten. Es gibt bei uns aber auch einen langfristigen Ansatz. Gerade in Deutschland gibt es große Themen, die künftig abgedeckt werden müssen – Energie, Gesundheit, Alterung der Gesellschaft, Ökologie usw. Wir haben jetzt den Bereich »Lernen von der Natur« im Blickfeld. Wir versuchen, die Adhäsionsmechanismen der Natur zu analysieren und zu verstehen. Wenn dies gelingt, wollen wir wichtige Mechanismen in technische Systeme übertragen. Es gibt in Deutschland schon Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu diesem Thema. Wir versuchen, dort unsere Kompetenz adhä-siver Prozesse einzubringen. Um aber bei Drittmittelgebern

überhaupt Projekte beantragen zu können, muss man bereits eine gewisse Kenntnis sowie personelle und maschinelle Infrastruktur vorweisen können. Diese Investitionen haben wir getätigt, indem wir die Arbeitsgruppe »Biomolekulares Oberflächen- und Materialdesign« gegründet haben. Ich denke, dass wir in den nächsten Jahren auf diesem Gebiet Erfolge verbuchen werden.

2004 ist das IFAM sehr offensiv nach außen aufgetreten. Der Ergänzungsbau wurde eingeweiht – in diesem Zusammenhang gab es eine Reihe informativer Workshops und ein Symposium. Außerdem ist die Klebtechnische Personalqualifizierung zehn Jahre alt geworden, die Bremer Klebtage fanden zum dritten Mal statt. Wenn Sie jetzt zurückblicken: Was ist Ihr Fazit nach dieser Öffnung?

2004 war unsere Außendarstellung spezifischer und konzentrierter. Die Kombination unserer Broschüren mit direkter Ansprache hat ein sehr gutes Feedback bekommen. Der Aufwand ist wesentlich höher, aber wir erreichen unsere Kunden noch besser. Das wollen wir weiterführen. Auch 2005 wird es Workshops geben. Die Unternehmen können dadurch unser Angebot kennen lernen und gleichzeitig die Themen aktiv mitdiskutieren, die für sie am wichtigsten sind. Das ist ein Dialog und keine Einbahnstraße: Die Firmen erfahren, was sie von uns bekommen können – und wir erfahren durch die Fragen an uns, ob das Institut auch für die Zukunft richtig aufgestellt ist.

Die Herausforderungen werden 2005 sicherlich nicht geringer. Was möchten Sie anpacken, was würden Sie bis Ende des Jahres gerne erreichen?

Ich hatte eingangs von der Konjunktur gesprochen. Irgendwann muss und wird Deutschland aus dieser Konjunkturdelle herauskommen. In diesem Zusammenhang sehe ich bereits seit einiger Zeit, dass in den stärksten Industrien Deutschlands schon bald große Veränderungsprozesse zu erwarten sind. Zum Beispiel wird die Automobilindustrie ihre Fertigungstechnik umstellen und neu organisieren. Gleiches gilt für die Luftfahrtindustrie und die Offshore-Windenergie. Es gilt nun, das Institut darauf vorzubereiten, dass es bei diesen Umwälzungen einen konstruktiven Anteil zur Mitgestaltung leisten kann. 2005 wird sich zeigen, ob wir uns in den vergangenen Jahren richtig aufgestellt und entwickelt haben – oder ob wir unser Angebot an bestimmten Stellen noch optimieren müssen. Mein Ziel ist, dass wir einen offensiven Beitrag leisten. Wir wollen nicht mitgezogen werden, sondern technologische Entwicklungen selbst aktiv mitgestalten! Und ich bin sicher, dass wir das auch schaffen.

»Smarter – Smaller – Safer« – der neue strategische Weg des Bereiches Formgebung und Funktionswerkstoffe



Professor Dr.-Ing. Busse

Professor Dr.-Ing. Matthias Busse hat mit seinen Mitarbeitern 2004 eine Trendwende bei den wirtschaftlichen Kennzahlen herbeigeführt. Mit einer klar umrissenen Strategie und deutlich wahrnehmbaren Kompetenzen soll die Neuausrichtung des Institutsteils erfolgreich weiter fortgesetzt werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei unter anderem die verstärkte Zusammenarbeit mit geeigneten Partnern.

Herr Professor Busse, Sie sind jetzt im zweiten Jahr Leiter des Bereichs Formgebung und Funktionswerkstoffe am IFAM. Ihre Anfangszeit war stark durch die von Ihnen eingeleitete strategische Neuausrichtung des Institutsteils geprägt. Ob eine Entscheidung richtig ist, lässt sich erst mit etwas Abstand beurteilen – der ist jetzt da. War die Entscheidung richtig?

Ja. Dieser Schritt war richtig und wichtig. Wir haben neuen Schwung in unseren Institutsbereich hineinbekommen. Erste Analysen zeigen, dass wir auf einem guten Weg sind – dieser sehr dynamische Prozess ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Es wird sicher noch einige Zeit dauern, bis die eingeleiteten Maßnahmen voll greifen und die Veränderungen etabliert sind. Bei der Neuorientierung haben wir verschiedene Ebenen adressiert: In erster Linie geht es natürlich um die fachlich-inhaltliche Richtung, zum zweiten um eine Vertiefung und Intensivierung der Markt- und Kundenorientierung und drittens arbeiten wir an einem Paradigmenwechsel, der auf verstärkte Kooperationen mit Partnern aus anderen Fachdisziplinen hinauslaufen soll. Dabei wollen wir neue thematische Ansätze an den Berührungspunkten unserer eigenen Kompetenzen mit denen unserer Kooperationspartner erarbeiten. Mit geschärften Kernkompetenzen, dynamisch definierten Geschäftsfeldern und einem neuen Leitbild werden wir den begonnenen Weg konsequent fortsetzen. Unser IFAM-Standort in Dresden ist dabei integraler Bestandteil in der Gesamtbetrachtung und trägt mit seiner positiven Entwicklung maßgeblich zum thematischen Gesamtbild des Institutsteils Formgebung und Funktionswerkstoffe bei.

Ihr Ziel war es, ein klar abgrenzbares und deutlich wahrnehmbares Angebot von Kompetenzen zu schaffen . . .

. . . und dieses klar umrissene Kompetenzportfolio haben wir inzwischen erarbeitet. Zu Beginn der Neuausrichtung haben wir uns bewusst mit mehreren Feldern beschäftigt und im Spannungsfeld von »market pull« und »technology push« analysiert, welche Kompetenzen uns zukunftsfruchtbar erscheinen. Aus den Ergebnissen haben wir jetzt eine Fokussierung abgeleitet. Drei Kernkompetenzen beschreiben nun den Institutsteil Formgebung und Funktionswerkstoffe. Zunächst sei hier die über viele Jahre gewachsene Erfahrung bei den Mitarbeitern in Bremen und Dresden im Bereich der Pulvertechnologie und Sinterwerkstoffe in Verbindung mit einer exzellenten Anlagentechnik genannt. Diese Kernkompetenz werden wir stärken und in Spezialgebiete der Funktionsintegration ausweiten. Die zweite Kernkompetenz umfasst die Gießerei- und Leichtmetalltechnologie – eine Kompetenz, die wir seit ungefähr acht Jahren hier im Hause haben und die wir mit neuen Technologien weiter ausbauen wollen. Und schließlich haben wir als dritte und für die Zukunft des Instituts sehr bedeutende Kernkompetenz die Mikro- und Nanostrukturierung. Hier ist bereits in kurzer Zeit eine Reihe neuer Themen entstanden, die sich aus den bisher etablierten Kompetenzen im Hause ableiten. Neue Ansätze und Projekte entwickeln sich in diesem Bereich schon sehr dynamisch.

Was ist das Neue am Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe, das die Industrie als potenziellen Auftraggeber auf Sie aufmerksam macht?

Wir verbinden künftig unser klassisches Know-how aus den Bereichen Werkstoff und Formgebung zur Auslegung und Herstellung metallischer Präzisionsbauteile mit der Welt der funktionalen Strukturen. »Smart Products« – intelligente Bauteile – werden zukünftig viele Funktionen in sich vereinen: Zusätzlich zu den »strukturellen« Bauteileigenschaften wie Maßhaltigkeit, Festigkeit etc. werden »funktionale« Fähigkeiten wie z. B. Sensorik und telemetrische Kommunikation in Bauteile zu integrieren sein. Unser Ziel dabei ist es, materialwissenschaftliche und produktionstechnische Ansätze und Lösungen zu entwickeln, die die nachträgliche Montage von Einzelsensorik durch die Integration von sensorischen Funktionen ins Bauteil ersetzen. Die Funktionalität wird also integraler Bestandteil des zukünftigen Bauteils sein und ergibt sich aus der produktionstechnischen Integration von Funktions- und Strukturwerkstoffen. Damit

liegen unsere zukünftigen Themen im Zentrum anwendungsorientierter Technologie-Roadmaps, die aus Sicht der Industrie für die Zukunft einerseits den Bedarf zur Funktionsverdichtung über Werkstoff und Bauweisen und andererseits die Zunahme von Elektronik und Sensorik in technischen Systemen beschreiben.

Wie hat sich 2004 die Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt?

Wir haben unseren Ertragsanteil mit der Industrie spürbar gesteigert, was ich bei den schwierigen Randbedingungen als beachtlichen Erfolg ansehe – zumal wir mit unserer Neuausrichtung erst seit kurzer Zeit präsent sind. Wenn man neue Dinge in wirtschaftlich schwierigen Zeiten mit der Industrie umsetzen will, braucht das ganz besonders viel Anstrengung. Dabei haben wir auch neue Kunden gewinnen können und sind weiterhin aktiv, neue Marktsegmente zu bewerten und zu erschließen. Aber auch im Bereich der öffentlichen Projekte haben wir unsere Aktivitäten verstärkt, um den verschlechterten Förderchancen Rechnung zu tragen. Ich möchte dabei betonen, dass all dies ohne das sehr hohe Engagement aller Beteiligten nicht möglich gewesen wäre. Deshalb möchte ich der gesamten Mannschaft an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich meine Anerkennung und meinen Dank aussprechen.

Sie haben auch in Richtung Marketing und Außendarstellung einige Weichen gestellt.

Wie wir von außen wahrgenommen werden, wird maßgeblichen Anteil am Erfolg des IFAM haben. Für mich ist es sehr wichtig, dass wir uns das Thema Marketing systematisch erschließen, damit unsere Ergebnisse und Leistungen im Außenfeld als Nutzen erkannt werden. Unser Bekanntheitsgrad muss gerade in unseren neueren Themen noch wachsen, so dass sich alle unsere Kernkompetenzen als feste Größe etablieren und eindeutig mit dem Namen IFAM verbinden.

Eines Ihrer Ziele war die stärkere Verzahnung mit der Universität Bremen. Dort leiten Sie den Lehrstuhl für Endformnahe Fertigungstechnologien. Wie hat sich die Verbindung zwischen Institut und Hochschule entwickelt?

Im vergangenen Jahr habe ich eine kleine Gruppe von Mitarbeitern an der Universität aufbauen können. Weitere sollen demnächst dazu kommen. Die Verbindung zu den Mitarbeitern am Fraunhofer-Institut ist dabei sehr eng. Die Kooperation mit den Hochschullehrern im Fachbereich Produktionstechnik entwickelt sich positiv bis hin zu gemeinsamen Industrieprojekten, Patenten und Akquisition von

öffentlichen Mitteln. Freudig überrascht bin ich über die hohen Studierendenzahlen in meinen Vorlesungen. Den intensiven Kontakt möchte ich vor allem auch zur Gewinnung von Studien- und Diplomarbeitern nutzen, um damit den potenziellen wissenschaftlichen Nachwuchs für das IFAM zu sichern.

Ein Blick nach vorne: Was wollen Sie bis Ende 2005 erreichen?

Nach den intensiven Prozessen der Neuausrichtung möchte ich für das kommende Jahr zunehmende Stabilisierung und Kontinuität erreichen. Das konsequente Umsetzen und Etablieren der eingeleiteten Veränderungen sowie die Verankerung der neuen Kernkompetenzen soll die Grundlage für eine weitere Verbesserung der wirtschaftlichen Kennzahlen bilden. In der Kooperation mit der Universität möchte ich ein größeres Kooperationsprojekt zu intelligenten Bauteilen maßgeblich gestalten und mit an den Start bringen – schließlich wollen wir ja unseren Beitrag zur »City of Science« unterstreichen. Und last but not least möchte ich die gesamte Mannschaft motivieren, mit Spaß an der Arbeit die nächsten Erfolge in Angriff zu nehmen!



Das Institut im Profil

Das Institut im Profil

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

Klebtechnik und Oberflächen Formgebung und Funktionswerkstoffe.

Der Institutsbereich Klebtechnik und Oberflächen des IFAM 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 deren Zulieferanten, 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 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 das Arbeitsgebiet Adhäsions- und Grenzflächenforschung mit den Arbeitsgruppen Angewandte Oberflächen- und Schichtanalytik, Elektrochemie und Molecular Modelling.

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

- Funktionsstrukturen
- Gießereitechnik
- Leichtbauwerkstoffe und Analytik
- Mikrofertigung
- Pulver-technologie
- Sinter- und Verbundwerkstoffe
- Zelluläre Werkstoffe

wider.

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 F+E-Arbeiten 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 μ -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, in dem Struktur- und Funktionswerkstoffe fertigungstechnisch zu »intelligenten Bauteilen« (smart products) integriert werden.

Kurzporträt und Organigramm

1968 als Arbeitsgruppe für angewandte Materialforschung gegründet, hat das Institut über die Erforschung und Weiterentwicklung der Fügeverfahren (Schweißen, Löten, Kleben, Thermisches Spritzen) seine Arbeitsgebiete im Bereich Fertigungs- und Verarbeitungsverfahren systematisch erweitert.

Das Institut hat Standorte in Bremen und Dresden.

Es wurde von 1976 bis 2002 von Professor Dr.-Ing. Hans-Dieter Kunze geleitet. 1994 erweiterte sich die Institutsleitung um Professor Dr. Otto-Diedrich Hennemann. Seit April 2003 ist Professor Dr.-Ing. Matthias Busse Mitglied der Institutsleitung.

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

Es gehört zum Verbund der 58 selbstständigen Forschungseinrichtungen 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 einer Milliarde Euro. Davon entfallen mehr als 900 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.

2004 betrug der Gesamthaushalt des IFAM rund 20,9 Millionen Euro, beschäftigt waren 271 Mitarbeiter, davon mehr als die Hälfte Wissenschaftler, Doktoranden und studentische Hilfskräfte.

Professor Dr. Otto-Diedrich Hennemann
(geschäftsführend)
Leitung »Klebtechnik und Oberflächen«
Dr.-Ing. Helmut Schäfer
(Stellvertreter)

Professor Dr.-Ing. Matthias Busse
Leitung »Formgebung und Funktionswerkstoffe«
Dr.-Ing. Frank Petzoldt
(Stellvertreter)
Professor Dr.-Ing. Bernd Kieback
Standort Dresden

Andreas Heller
Verwaltungsleitung

Das Institut in Zahlen

Haushalt

Der Gesamthaushalt des IFAM (Aufwendungen und Investitionen) im Jahre 2004 setzte sich zusammen aus den Haushalten der beiden Institutsteile Klebtechnik und Oberflächen sowie Formgebung und Funktionswerkstoffe.

Das vorläufige Haushaltsergebnis betrug insgesamt 20,9 Mio Euro. Die einzelnen Institutsteile erreichten nachstehende Ergebnisse:

Klebtechnik und Oberflächen Bremen

Betriebshaushalt (BHH)	10,5 Mio Euro
eigene Erträge	8,0 Mio Euro
davon	
Wirtschaftserträge	5,7 Mio Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	2,3 Mio Euro
Investitionshaushalt (IHH)	1,0 Mio Euro

Formgebung und Funktionswerkstoffe Bremen

Betriebshaushalt (BHH)	5,2 Mio Euro
eigene Erträge	2,3 Mio Euro
davon	
Wirtschaftserträge	1,4 Mio Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	0,9 Mio Euro
Investitionshaushalt (IHH)	1,4 Mio Euro

Formgebung und Funktionswerkstoffe Dresden

Betriebshaushalt (BHH)	2,7 Mio Euro
eigene Erträge	2,0 Mio Euro
davon	
Wirtschaftserträge	1,4 Mio Euro
Bund/Land/EU/Sonstige	0,6 Mio Euro
Investitionshaushalt (IHH)	0,1 Mio Euro

Die Entwicklung der Haushalte und Erträge 2000 – 2004 ist in den Abb. 1 und 2 dargestellt.

Investitionen

Im IFAM wurden 2004 Investitionen in Höhe von 2,5 Mio Euro getätigt. Sie verteilen sich wie angegeben auf die verschiedenen Institutsteile. Die wichtigsten Anschaffungen sind aufgeführt.

Klebtechnik und Oberflächen Bremen (1,0 Mio Euro)

- IR-VCD-Spektroskopie (Infrared Vibrational Circular Dichroism Spectroscopy)
- LIBS (Laserinduced Breakdown Spectroscopy)
- 3-D-Tomographie für TEM/STEM

Formgebung und Funktionswerkstoffe Bremen (1,4 Mio Euro)

- SIGMASOFT (Spritzguss-Simulation)
- MAGMASOFT (Guss-Simulation)
- IMAGE-Access 5.0 (Bildanalyse)
- Thermo-Calc Software
- Sputteranlage
- Mikrowellenbehandlungsanlage
- Sputteranlage
- Partikelanalytik
- Monomode Mikrowellenanlage
- Spritzgusswerkzeuge
- CAD/CAM-Messarm

Formgebung und Funktionswerkstoffe Dresden (0,1 Mio Euro)

Personalentwicklung

Am 31. Dezember 2004 waren im IFAM insgesamt 271 Personen (davon 90 Prozent im wissenschaftlich-technischen Bereich) tätig.

Im Vergleich zum Vorjahr konnte das Institut bei der Zahl der fest angestellten Mitarbeiter einen Zuwachs von 7 Prozent verzeichnen.

Personalstruktur 2004

Wissenschaftler	105
Technische Mitarbeiter	79
Verwaltung/Interne Dienste und Azubis	28
Doktoranden, Praktikanten und Hilfskräfte	59

Die Personalentwicklung für die Jahre 2000 – 2004 ist in Abb. 3 dargestellt.

Entwicklung BHH und IHH

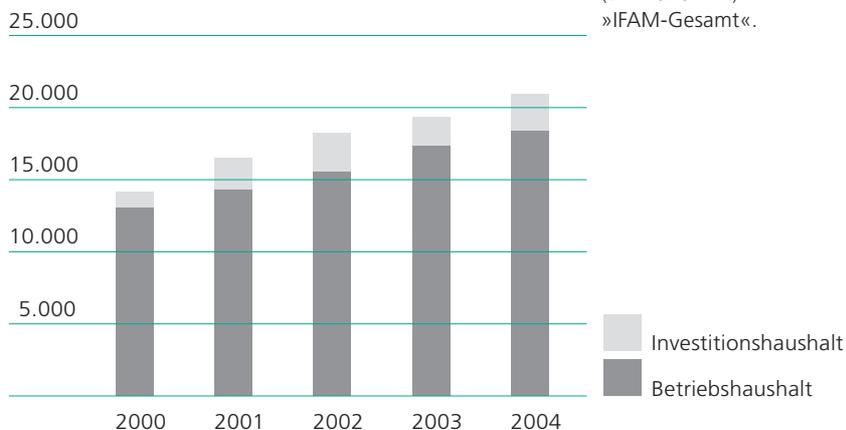


Abb. 1: Aufwendungen (BHH und IHH) »IFAM-Gesamt«.

Ertragsentwicklung Betriebshaushalt

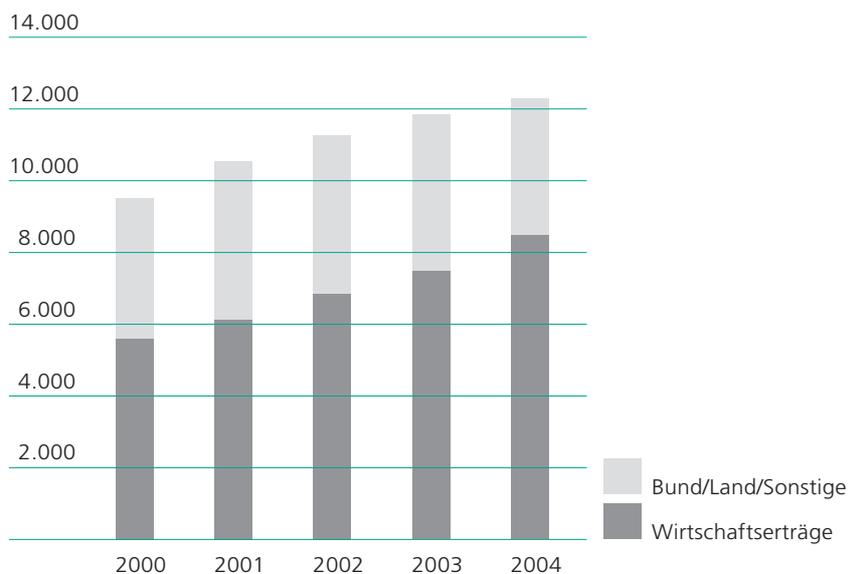


Abb. 2: Erträge (BHH) »IFAM-Gesamt«.

Personalentwicklung

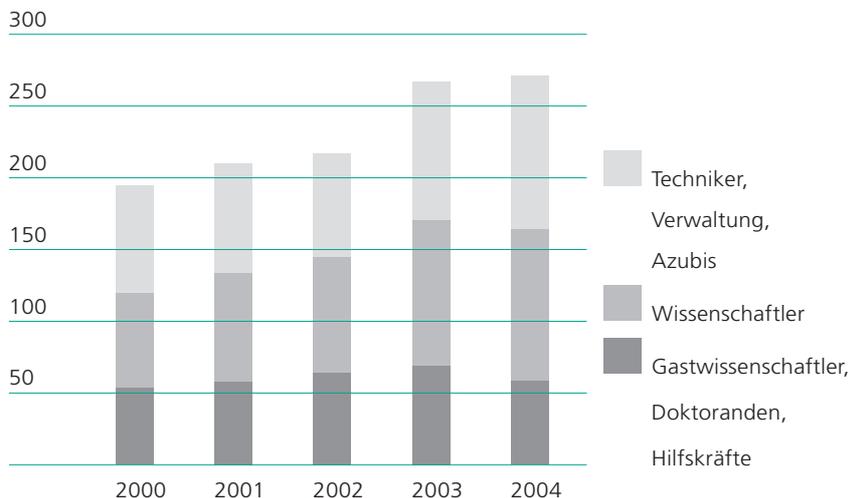


Abb. 3: Personalentwicklung »IFAM-Gesamt«.

Das Kuratorium des Instituts

- **A. Picker**
Vorsitzender
Henkel KGaA
Düsseldorf
- **O. R. Dr.-Ing. F. Fischer**
Deutsche Forschungsgemeinschaft
Bonn
- **Prof. Dr. R. X. Fischer**
Universität Bremen
- **Dr.-Ing. F.-J. Floßdorf**
Forschungsvereinigung
Stahlanwendung e.V. (FOSTA)
Düsseldorf
- **M. Grau**
Mankiewicz Gebr. & Co.
Hamburg
- **H.-H. Jeschke**
HDO Druckguss- u. Oberflächen-
technik GmbH
Paderborn
- **Prof. Dr.-Ing. J. Klenner**
AIRBUS Société par Actions Simplifiée
Toulouse, Frankreich
- **Staatsrat R. Köttgen**
Der Senator für Bildung und Wissenschaft
Bremen
- **V. Kühne**
Modelltechnik Rapid
Prototyping GmbH
Waltershausen
- **Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. mult. emer.
E. Macherauch**
Karlsruhe
- **R. Nowak**
Glatt GmbH
Binzen
- **Dr. rer. nat. A. De Paoli**
Robert Bosch GmbH
Stuttgart
- **Dr. W. Schreiber**
Volkswagen AG
Wolfsburg
- **M. Sc. J. Tengzelius**
Höganäs AB
Höganäs, Schweden
- **Dr. sc. K. Urban**
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Berlin
- **C. Weiss**
BEGO Bremer Goldschlägerei
Bremen
- **Dr.-Ing. G. Wolf**
VDG Verein Deutscher Gießereifachleute
Düsseldorf
- **Min.-Rat Dr. rer. nat. R. Zimmermann**
Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft
und Kunst
Dresden
- Ständiger Gast:
Prof. Dr. G. Müller
Fraunhofer-Institut für Silicatforschung
Würzburg

Aktuelle und künftige Herausforderungen

Politik, Industrie und Wissenschaft sind aufgefordert, den Produktionsstandort Deutschland zu erhalten und zu stärken, weil sonst längerfristig mit der Produktion auch die Entwicklung neuer Erzeugnisse an Niedriglohnstandorte abwandert. Das IFAM stellt sich dieser Aufgabe und hat 2004 sein Leistungsprofil weiter geschärft. Die Weiterentwicklungen in den Institutsbereichen »Klebtechnik und Oberflächen« sowie »Formgebung und Funktionswerkstoffe« sind eine wichtige Basis, um innovative Produkte zu entwickeln und kostengünstig zu fertigen und so die zunehmenden Kundenwünsche nach individuellen Produkten mit hoher Funktionalität und Qualität zu attraktiven Preisen erfüllen zu können.

Mit endformnahen Fertigungstechnologien, wie z. B. Gießen oder Pulverspritzguss, können Prozessketten verkürzt und viele Funktionen in komplex geformte Bauteile integriert werden. Dadurch gelingt es, Produkte hoher Qualität kostengünstig herzustellen, da z. B. Zerspanungs- und Montageaufwand reduziert wird. Zusätzliche Freiheitsgrade bietet die Pulvermetallurgie, um eingesetzte Werkstoffe in Zusammensetzung und Eigenschaftsprofil anforderungsgerecht zu gestalten, ohne die langwierige Beschaffung großer Mengen an Vormaterial oder Halbzeug. In Zusammenarbeit mit der Industrie werden die Vorteile dieser Techniken für neue Erzeugnisse nutzbar gemacht und in der Fertigung umgesetzt. Aufgabe und Herausforderung für das IFAM ist, die Technologien beherrschbar zu machen, um Qualitätsprobleme zu vermeiden und weitere Potenziale zur Funktionsintegration in Werkstoffe oder Bauteile zu erschließen, z. B. durch Einsatz von Funktionswerkstoffen oder Sinterteilen in Mehrkomponentenspritzgusstechnik.

Der Bereich Klebtechnik und Oberflächen hat auch 2004 konsequent sein Leistungsangebot erweitert und sich neue Aufgabenfelder erschlossen. So wurde die Arbeitsgruppe »Biomolekulares Oberflächen- und Materialdesign« eingerichtet und der Bereich Lacktechnik personell aufgestockt. Ziel beider Maßnahmen ist, neue Produkte und Dienstleistungen anzubieten und neue Kundengruppen zu erreichen.

Die Klebtechnik zeigt bereits heute ein sehr breites Anwendungsspektrum und lässt noch steigende Leistungsfähigkeit für die Zukunft erwarten – gerade für die industrielle Fertigung.

Hier ist es eine wichtige Aufgabe des IFAM, alle Themenfelder rund um die Klebtechnik zu gestalten und insbesondere zur Bewertung und Absicherung von Qualität und Zuverlässigkeit entsprechende Methoden und Werkzeuge weiterzuentwickeln.

Der Aufbau von Netzwerken in Industrie und Forschung wurde im IFAM als sehr wichtig erkannt und weiter zügig vorangetrieben. Das Kuratorium sieht darin eine für die Zukunft des Instituts wichtige Maßnahme, die es zu unterstützen gilt. Neue Ergebnisse aus der Forschung und Entwicklung im IFAM lassen sich so schneller in die Wirtschaft transferieren, Aufgabenstellungen der Industrie werden dadurch zeitnaher erkannt und anwendergerechte Lösungsansätze erarbeitet.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die an der Bewältigung der Aufgaben des Jahres 2004 mitgearbeitet haben, möchte ich an dieser Stelle danken und Sie auffordern, sich mit Begeisterung den neuen Herausforderungen zu stellen und damit zum Wohle der Gesellschaft und zum Nutzen der IFAM-Kunden beizutragen.



Dr. rer. nat. A. De Paoli

Keine Forschung ohne Weiterbildung: Fachsymposium am 18. Mai 2004

»Der Mensch strebt von Natur aus nach Wissen« – das hatte schon Aristoteles erfasst. Dieses Streben ist mittlerweile zur wachsenden Herausforderung geworden, denn die rasante technologische Entwicklung und die rasche Potenzierung des Wissens erzwingen vor allem eines: Weiterbildung. Das gilt besonders für Forschung und Technik, Industrie und Wirtschaft. Wer in Zeiten globalen Wettbewerbes nicht rechtzeitig reagiert und moderne Weiterbildungskonzepte parat hat, wird im Wettbewerb schnell abgehängt – ob als Firma oder Institution. Das Fraunhofer IFAM hat den Zusammenhang zwischen permanenter Weiterbildung und der erfolgreichen Einführung und Umsetzung von neuen Technologien schon sehr früh gesehen. Doch das ist längst nicht überall der Fall. Um diese bislang unzureichend bekannten Zusammenhänge offensichtlicher zu machen, leistete das Institut am 18. Mai 2004 einen wichtigen Beitrag: Beim hochrangig besetzten IFAM-Symposium »Forschung und Weiterbildung« wurde der Stellenwert von Weiterbildung deutlich gemacht – und die Aufgaben aus Sicht des



Arnd Picker
(Henkel KGaA-Vorsitzender des IFAM-Kuratoriums)

Staates, der Wirtschaft sowie der Universitäten und Hochschulen skizziert. Das Symposium wurde im Zusammenhang mit der Kuratoriumssitzung und der Eröffnung des Erweiterungsbaus – in dem sich auch das neue IFAM-Weiterbildungszentrum befindet – veranstaltet.

Die Institutsleiter Professor Dr. Otto-Diedrich Hennemann und Professor Dr.-Ing. Matthias Busse begrüßten im neuen Hörsaal rund 100 Teilnehmer aus ganz Deutschland. Darunter waren viele Interessierte, die sich in Forschung und Entwicklung oder in der Weiterbildung in leitenden Funktionen mit der Problematik des lebenslangen Lernens befassen. Die Moderation der Veranstaltung hatte der IFAM-Kuratoriumsvorsitzende Arnd Picker (Henkel KGaA) übernommen. Er meisterte diese Aufgabe mit gewohnter Souveränität und erhielt schon zu Beginn großen Beifall vom Auditorium.

Anwendungsnahes Wissen muss direkt in die Betriebe

Institutsleiter Hennemann wies darauf hin, dass das IFAM in Deutschland eine Sonderstellung einnimmt: »Wir generieren mit unserer Arbeit anwendungsnahes Wissen, das wir als Weiterbilder in aufbereiteter Form direkt in die Betriebe transferieren.« Dies sei eher unüblich. Normalerweise würde ein Wissensgenerierer dieses Wissen zunächst an einen Wissensverwalter weitergeben, der dann für die Aus- und Weiterbildung sorgt. »Damit ist der Verwalter vom Input des Generierers abhängig, und er hat keinerlei Erfahrungswissen!«, machte Hennemann den Unterschied zum IFAM-Modell klar. Der »herkömmliche« Ansatz bedeute Zeit- und Informationsverlust – doch den kann man sich heute nicht mehr leisten. Hennemann forderte daher einen Paradigmenwechsel: Statt Didaktiker technologisch fit zu machen, müssten Wissensgenerierer didaktisch fit gemacht werden, um ihr Wissen direkt zu vermitteln. Hennemann weiß aus IFAM-Erfahrung: »Dieser Weg ist der erfolgreichere. Denn nur wer das Wissen und Können als Erster am Markt in Innovationen umsetzt, kann letztlich Wohlstand und Beschäftigung sichern!«

Eine Einstellung, die Professor Dr.-Ing. Hans-Jörg Bullinger, Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, teilt. Bullinger machte in seinem Beitrag auf deutlich veränderte Grundvoraussetzungen in der Arbeitswelt aufmerksam. »Wissen und Qualifikation sind ein entscheidender Produktionsfaktor geworden, der erhebliche Wachs-



Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bullinger
(Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft)

tumspotenziale in sich trägt«, stellte Bullinger fest. »In vielen Bereichen stellen die Ressourcen Information und Wissen die wichtigsten Inputfaktoren für die Leistungserbringung dar.« Bullinger erinnerte an den demographischen Wandel, der Weiterbildung auch für ältere Jahrgänge unabdingbar mache. Junge Fachkräfte oder Hochschulabgänger alleine könnten neues Wissen nicht mehr ausreichend in die Betriebe bringen. »Deshalb ist die richtige und zukunftsweisende Qualifizierung der Mitarbeiter eine äußerst wichtige Größe für den Unternehmenserfolg«, so der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft.

Weiterbildung zum Erhalt der Arbeitsmarktchancen

Und weil dies so ist, kommt der beruflichen Bildung mehr denn je ein hoher Stellenwert zu. Als »notwendige Bedingung« zum Erhalt der individuellen Arbeitsmarktchancen sah Hans-Jörg Bullinger die Weiterbildung an. Außerdem müssten sich Mitarbeiter heute zusätzliche Kompetenzen für das erfolgreiche Agieren in einer vernetzten Welt aneignen. Bullinger sieht berufliche Bildung und Qualifizierung auch als eine Chance zur Gestaltung der eigenen Karriere: »Viele Arbeitnehmer planen sehr rational und effektiv ihre täglichen Arbeitstätigkeiten, nicht aber ihre Erwerbsbiographie.« Dies sei jedoch wünschenswert, aber dafür bedürfe es auch einer qualifizierten Beratung.

Bezogen auf das IFAM lobte der Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft den Ansatz der direkten

Wissensvermittlung durch das Institut, der beispielhaft sei: »Neue Modelle der Aus- und Weiterbildung mit einer engeren Verknüpfung von Wissenschaft und Wirtschaft stehen auch im Aufgabenplan der Innovationsoffensive der Bundesregierung, an der wir mitarbeiten.«

Auch Dr. Uwe Bake, Ministerialdirektor im Bundesministerium für Bildung und Forschung, unterstrich diesen Aspekt auf dem Symposium: »Innovationen entscheiden über die Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft. Grundlage dafür sind vor allem gut ausgebildete Menschen und eine exzellente Forschungsbasis. Forschungsnahe



Dr. Uwe Bake
(Bundesministerium für Bildung und Forschung)

Qualifizierung gewinnt zunehmend an Bedeutung.« Deshalb habe sich das BMBF an der Errichtung des Erweiterungsbaus des IFAM mit etwa 3,6 Millionen Euro beteiligt. Ziel der Bundesregierung sei es, bis zum Jahre 2010 die Gesamtausgaben für Forschung und Entwicklung gemeinsam mit der Wirtschaft auf insgesamt drei Prozent des Bruttoinlandsprodukts anzuheben. »Wir brauchen jedoch nicht nur mehr Geld für die Forschung, sondern auch mehr Forschung für's Geld.« Deshalb werde das BMBF mit den Forschungs- und Wissenschaftsorganisations Zielvereinbarungen – einen »Pakt für Forschung und Innovation« – verabreden. Dabei gehe es vor allem um mehr Wettbewerb, mehr Vernetzung, mehr unkonventionelle Forschungs-

ansätze und mehr Chancen für den wissenschaftlichen Nachwuchs.« Wo immer möglich und Erfolg versprechend, sollten Hochschulen und Forschungseinrichtungen Qualifizierungsverbände bilden – auch als Beitrag zur Verbesserung der Durchlässigkeit im Bildungswesen. »Der Staat sollte sich hier eher zurückhalten, um nicht durch eine Finanzierung eine Wettbewerbsverzerrung im Weiterbildungsmarkt zu begünstigen, in dem viele private Anbieter existieren«, so Bake.

»Trained by Fraunhofer« als anerkanntes Markenzeichen?

Diesen Qualifizierungsverbund zwischen Forschung und Anwendern lebt das IFAM seit Jahren durch das Weiterbildungsangebot zum Klebpraktiker, zur Klebfachkraft und zum Klebfachingenieur. Das Institut macht dadurch deutlich, dass Fraunhofer-Institute für eine solche Aufgabe geradezu prädestiniert sind. Sie erzeugen durch die direkte Zusammenarbeit mit Unternehmen ständig neues, innovationsrelevantes Wissen. Durch Weiterbildung kann die Verbreitung des Know-how in die Wirtschaft noch intensiver erfolgen. »Trained by Fraunhofer« könnte eines Tages zum anerkannten Markenzeichen und zum Modell für einen direkten, zeitnahen und kompetenten Wissens- und Könnenstransfer werden.

Wie wichtig die intelligente Kooperation von Unternehmen mit externen Forschungsinstituten ist, erläuterte Professor Dr. Ulrich Lehner, Vorsitzender der Geschäftsführung der Henkel KGaA. Henkel Technologies – die Industriesparte von Henkel – ist ein erfolgreicher Partner des Fraunhofer-IFAM. Der direkte Wissenstransfer, so Lehner, lohne sich für Henkel Technologies. Der Konzern pflegt seit Jahren gemeinsame Entwicklungsprojekte sowie Weiterbildungskooperationen mit dem IFAM. »Gerade in schwierigen Zeiten darf man alles drosseln, nicht aber die Blutzufuhr zum Hirn«, unterstrich Ulrich Lehner die Bedeutung permanenter Weiterbildung. Henkel begrüßt die Stärkung von Bildung und Forschung durch den Ausbau des Fraunhofer-Instituts, das damit im globalen Wettbewerb um Wissen in die Zukunftsfähigkeit der Branche investiert. Ulrich Lehner lobte Entwicklungsinitiativen seines Unternehmens mit



Prof. Dr. Ulrich Lehner
(Vorsitzender der Geschäftsführung der Henkel KGaA)

Partnern aus Wissenschaft und Industrie. Ein Beispiel – gemeinsam mit der zentralen Henkel-Forschung – zeigt sich in der Entwicklungsarbeit an leichten Verbundwerkstoffen. Henkel setzt voll auf Weiterbildungsmaßnahmen, weil gut qualifizierte Mitarbeiter die Position am Markt deutlich verbessern. 2003 nahmen 10.000 Henkel-Mitarbeiter an Weiterbildungen teil – auch im Fraunhofer IFAM.

Zügige Technologieeinführung durch Weiterbildung

Professor Dr.-Ing. Jürgen Klenner, Leiter CoC-Structure bei Airbus Engineering in Toulouse und IFAM-Kuratoriumsmitglied, argumentierte in seinem Beitrag in die gleiche Richtung. »Der große Erfolg von Airbus in den vergangenen 30 Jahren ist nicht zuletzt der schnellen und konsequenten Einführung neuer Technologien zu verdanken«, erinnerte Klenner. Dabei sei das Zusammenwirken mit Einrichtungen aus Forschung und Entwicklung eine unabdingbare Voraussetzung. Obwohl Airbus in dieser Hinsicht sehr gut agiert, muss und kann seiner Meinung nach die Technologieentwicklung weiter verbessert werden. »Neben der Erhöhung der finanziellen Anstrengungen sind dazu zwei weitere Schritte wichtig: Eine noch engere Verzahnung von Industrie und F&E-Umfeld in allen Phasen sowie die Unterstützung der zügigen Technologieeinführung durch



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Klenner
(CoC Structure Airbus Engineering, Toulouse)

gezielte Weiterbildungsmaßnahmen!« Anwendungsnahe Forschungsinstitute könnten dabei einen erheblichen Beitrag leisten, wie das Beispiel IFAM seit Jahren zeige.

Für die Universität Bremen skizzierte anschließend Rektor Wilfried Müller, welche große Herausforderung die wissenschaftliche Weiterbildung von berufserfahrenen Menschen für seine Institution ist. »Für die Hochschulen ist die Verbindung von Forschung und Weiterbildung – früher noch zwei ungleiche Geschwister – mittlerweile eine Beziehung mit Zukunft«, war sich Müller sicher. Der Grund liege nicht zuletzt



Prof. Dr. Wilfried Müller
(Rektor Universität Bremen)

darin, dass das Wissen immer schneller veralte – dies gelte heute mehr denn je auch für Hochschulabsolventen. »Der alte Mechanismus, am Arbeitsplatz weiterzubilden, reicht heute nicht mehr aus«, so Müller. »Die Universitäten müssen auch über das Ende des Studiums etwas für ihre Absolventen tun – deshalb ist seit ungefähr zehn Jahren ein Umdenkprozess in den Hochschulen im Gange.«

Schon bei der Auswahl der Lehrenden werde heute darauf geachtet, dass diese nicht nur gute Forscher, sondern auch gute Vermittler ihres Wissens seien. Einen nachhaltigen Schub in Richtung wissenschaftlicher Weiterbildung erwartet der Uni-Rektor durch die massive Etablierung von Bachelor- und Masterstudiengängen. »Durch den modularen Aufbau dieser Ausbildung sollte es uns gelingen, die Grundideen kompletter Wissens-Pakete für die praxisrelevante Weiterbildung aufzubereiten. Mit einer erwachsenengerechten Didaktik und der zeitlichen Orientierung an der Zielgruppe – dabei denke ich an Wissensvermittlung in den Abendstunden und am Wochenende – müssen wir neueste Forschungserkenntnisse sofort dorthin bringen, wo sie gebraucht werden.« Die Universität werde mit der Einrichtung weiterer Bachelor- und Master-Angebote in den nächsten Jahren »das gesamte Haus umstülpen«. Dadurch würde die Voraussetzung für eine wissenschaftliche Weiterbildung aus der Universität heraus immer besser. Zunehmend kooperiere man in dieser Frage mit Kammern, Berufsverbänden und professionellen Weiterbildern.

Dr. Jutta Sywottek vom Senator für Bildung und Wissenschaft des Landes Bremen erinnerte in ihrem Beitrag an Aussagen des Wissenschaftsrates von 1998: »Damals wurde bereits deutlich herausgestellt, dass das Erststudium für ein ganzes Leben keine sichere Ausbildung mehr ist. Vielmehr ist eine ständige berufsbezogene wissenschaftliche Weiterbildung heute unabdingbar.« Das Land Bremen habe in seinem Wissenschaftsplan 2010 der Weiterbildung große Bedeutung eingeräumt und sei bestrebt, in seinen Kontrakten mit den Hochschulen und Forschungseinrichtungen einen Ausbau des Weiterbildungsangebots zu vereinbaren. »Der Nutzen für Weiterbildung besteht auch für die, die weiterbilden«, so Dr. Sywottek, »denn die Probleme aus der Praxis werden so nahe an



Dr. Jutta Sywottek
(Mitarbeiterin Senator für Bildung und Wissenschaft, Bremen)

Forschung und Entwicklung herangebracht.«
Noch sei der Stellenwert von Weiterbildung gerade bei Wissenschaftlern nicht so hoch, wie man es sich wünsche. Die Verwaltungsvertreterin gab die Anregung, dass das IFAM zusammen mit der Universität Bremen weiterbildende Studiengänge entwickeln könne.

Dass das Fraunhofer-IFAM gezielt in die Weiterbildung investiert, machte eine Führung durch das Institut deutlich. Dabei wurde das neue IFAM-Weiterbildungszentrum im Erweiterungsbau besonders gelobt. Aber auch die ausgezeichnete personelle und apparative Ausstattung des IFAM, die eine wichtige Rolle bei gemeinsamen F&E-Projekten mit der Industrie ermöglicht, fand Anerkennung.



Der Tag im Zeichen von Forschung und Weiterbildung klang mit einer Abendveranstaltung im Bremer Ratskeller harmonisch aus, bei der Institutsleiter Professor Dr.-Ing. Matthias Busse vom Institutsteil »Formgebung und Funktionswerkstoffe« die Begrüßungsansprache hielt. Dabei kam es auch zu einer bedeutenden Ehrung: Dem langjährigen IFAM-Kuratoriumsvorsitzenden Professor Dr. Eckard Macherauch wurde die Fraunhofer-Medaille verliehen.



Führung durch das Institut.

Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt anwendungsorientierte Forschung zum direkten Nutzen für Unternehmen und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand. Im Auftrag und mit Förderung durch Ministerien und Behörden des Bundes und der Länder werden zukunftsrelevante Forschungsprojekte durchgeführt, die zu Innovationen im öffentlichen Nachfragebereich und in der Wirtschaft beitragen.

Mit technologie- und systemorientierten Innovationen für ihre Kunden tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Dabei zielen sie auf eine wirtschaftlich erfolgreiche, sozial gerechte und umweltverträgliche Entwicklung der Gesellschaft.

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.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit rund 80 Forschungseinrichtungen, davon 58 Institute, an über 40 Standorten in ganz Deutschland. Rund 12 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter,

überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von über 1 Milliarde Euro. Davon fallen mehr als 900 Millionen Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Ein Drittel wird von Bund und Ländern beigesteuert, auch um damit den Instituten die Möglichkeit zu geben, Problemlösungen vorzubereiten, die 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.

Mitglieder der 1949 gegründeten und als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft sind namhafte Unternehmen und private Förderer. Von ihnen wird die bedarfsorientierte Entwicklung der Fraunhofer-Gesellschaft mitgestaltet.

Namensgeber der Gesellschaft ist der als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreiche Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826).

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile

Vom Werkstoff zum Produkt

Materialforschung in der Fraunhofer-Gesellschaft umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von der Entwicklung neuer und Verbesserung bestehender Materialien über die Herstellertechnologie im industrienahen Maßstab, die Charakterisierung der Eigenschaften bis hin zur Bewertung des Einsatzverhaltens in Bauteilen und Systemen.

Der Verbund

Im Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile haben sich elf Fraunhofer-Institute mit vorwiegend materialwissenschaftlicher Ausrichtung zusammengeschlossen. Das Spektrum der aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten reicht von Maschinenbau, Produktions-, Verkehrs- und Bautechnik, Energie- und Umwelttechnik über Mikroelektronik und Optik bis hin zur Medizintechnik. Innerhalb des Verbundes steht Fraunhofer-Know-how für die gesamte

technologische Kette zur Verfügung – angefangen bei der Werkstoffentwicklung auf molekularer Ebene bis hin zum Prototyp eines Bauteils. Moderne numerische Simulationstechniken unterstützen und beschleunigen die experimentellen Entwicklungen, innovative Methoden zur zerstörungsfreien Werkstoff-Prüfung und zur Prüfung der Betriebsfestigkeit erhöhen die Zuverlässigkeit von Werkstoffen, Bauteilen und Systemen.

Ein wichtiges Ziel ist auch, die Zusammenarbeit in der Fraunhofer-Gesellschaft über die Verbundgrenzen hinaus zu fördern. So konnte in diesem Jahr ein gemeinsames Positionspapier der gesamten Fraunhofer-Gesellschaft zur Materialforschung für das Bundesministerium für Bildung und Forschung erarbeitet werden. Speziell mit dem Fraunhofer-Verbund Informations- und Kommunikationstechnik bestehen gute Kontakte, so ist beispielsweise das Fraunhofer ITWM ständiges Gastmitglied im Verbund Werkstoffe, Bauteile.

Die Institute

Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP
Leitung: Dr. Ulrich Buller
Geiselbergstraße 69
14476 Potsdam
Telefon: +49 (0) 331 / 5 68-10
Fax: +49 (0) 331 / 5 68-30 00
E-Mail info@iap.fraunhofer.de
Internet www.iap.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF
Leitung: Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka
Bartningstraße 47
64289 Darmstadt
Telefon: +49 (0) 6151 / 7 05-1
Fax: +49 (0) 6151 / 7 05-2 14
E-Mail info@lbf.fraunhofer.de
Internet www.lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
Leitung: Prof. Dr.-Ing. Peter Eyerer, Dr.-Ing. Peter Elsner
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7
76327 Pfinztal
Telefon: +49 (0) 721 / 46 40-0
Fax: +49 (0) 721 / 46 40-1 11
E-Mail info@ict.fraunhofer.de
Internet www.ict.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM
Wiener Straße 12
28359 Bremen
Bereich Klebtechnik und Oberflächen
Leitung: Prof. Dr. Otto-Diedrich Hennemann
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-0
Fax: +49 (0) 421 / 22 46-4 30
E-Mail ktinfo@ifam.fraunhofer.de
Internet www.ifam.fraunhofer.de

Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe
Leitung: Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-0
Fax: +49 (0) 421 / 22 46-3 00
E-Mail info@ifam.fraunhofer.de
Internet www.ifam.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI
Leitung: Prof. Dr. Rainer Marutzky
Bienroder Weg 54 E
38108 Braunschweig
Telefon: +49 (0) 531 / 21 55-0
Fax: +49 (0) 531 / 35 15 87
E-Mail info@wki.fraunhofer.de
Internet www.wki.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe IKTS
Leitung: Prof. Dr. Alexander Michaelis
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Telefon: +49 (0) 351 / 25 53-5 19
Fax: +49 (0) 351 / 25 53-6 00
E-Mail info@ikts.fraunhofer.de
Internet www.ikts.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut EMI
Leitung: Dr. Klaus Thoma
Eckerstraße 4
79104 Freiburg
Telefon: +49 (0) 761 / 27 14-0
Fax: +49 (0) 761 / 27 14-3 16
E-Mail info@emi.fraunhofer.de
Internet www.emi.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC
Leitung: Prof. Dr. Gerd Müller
Neunerplatz 2
97082 Würzburg
Telefon: +49 (0) 931 / 41 00-0
Fax: +49 (0) 931 / 41 00-1 99
E-Mail info@isc.fraunhofer.de
Internet www.isc.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Solare Energiesysteme ISE
Leitung: Prof. Dr. Joachim Luther
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
Telefon: +49 (0) 761 / 45 88-0
Fax: +49 (0) 761 / 45 88-90 00
E-Mail info@ise.fraunhofer.de
Internet www.ise.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Werkstoffmechanik IWM
Leitung: Prof. Dr. Peter Gumbsch
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg
Telefon: +49 (0) 761 / 51 42-0
Fax: +49 (0) 761 / 51 42-1 10
E-Mail info@iwm.fraunhofer.de
Internet www.iwm.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für
Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
Leitung: Prof. Dr. Michael Kröning
Universität, Gebäude 37
66123 Saarbrücken
Telefon: +49 (0) 681 / 93 02-0
Fax: +49 (0) 681 / 93 02-59 01
E-Mail info@izfp.fraunhofer.de
Internet www.izfp.fraunhofer.de

Sprecher des Verbundes

Prof. Dr. Gerd Müller
Fraunhofer ISC
Stellvertretender Sprecher:
Dr. Ulrich Buller
Fraunhofer IAP

Ansprechpartnerin für Anfragen

Marie-Luise Righi
Fraunhofer ISC
Neunerplatz 2
97082 Würzburg
Telefon: +49 (0) 931 / 41 00-1 28
Fax: +49 (0) 931 / 41 00-3 99
E-Mail righi@isc.fraunhofer.de

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
Telefon: +49 (0) 931 / 41 00-6 20
Telefax: +49 (0) 931 / 41 00-6 98
E-Mail sabine.ambergschwab@isc.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC,
Neunerplatz 2
Würzburg

Mitglieder

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

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) Größenordnungen beruhen. Nanotechnologie ist fester Bestandteil unseres Alltags: So sorgen Nanopartikel in Sonnencremes für den Schutz der Haut vor UV-Strahlung. Sie verstärken Autoreifen und ermöglichen pflegeleichte und kratzgeschützte Oberflächen. Die Technologie wird bereits quer durch Branchen und Industriezweige für unterschiedlichste Anwendungen genutzt.

In der Fraunhofer-Gesellschaft sind mehr als 20 Institute auf diesem Gebiet tätig. Die vielfältigen Kompetenzen und eine große Zahl von Entwicklungsideen wurden vor der Gründung des Themenverbunds Nanotechnologie zusammengetragen, evaluiert und konkretisiert. Für den

Themenverbund fokussieren sich die Aktivitäten auf zwei wesentliche Leitthemen: Multifunktionelle Schichten für den Automobilbereich und das Design spezieller Nanopartikel als Träger-substanzen für Biotechnik und Medizin.

Ansprechpartner

Sprecher des Verbundes:
Dr. Karl-Heinz Haas
Telefon: +49 (0) 931 / 41 00-5 00
Telefax: +49 (0) 931 / 41 00-5 59
E-Mail haas@isc.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC,
Würzburg

Mitglieder

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

Fraunhofer-Themenverbund Numerische Simulation

Im Themenverbund Numerische Simulation von Produkten, Prozessen bündeln sechzehn 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:
Andreas Burbliès
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 83
Telefax: +49 (0) 421 / 22 46 77-1 83
E-Mail bur@ifam.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik
und Angewandte Materialforschung IFAM,
Bremen

Mitglieder

Fraunhofer-Institute EMI, FIRST, IFAM, ILT, IPA, IPK, IPT, ISC, IST, ITWM, IWM, IWS, IWU, IZFP, LBF, SCAI

Bereich Klebtechnik und Oberflächen

Ergebnisse Anwendungen Perspektiven



Kompetenzen und Know-how

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung – Klebtechnik und Oberflächen ist die europaweit größte unabhängige Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der industriellen Klebtechnik. Mehr als 120 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind aktiv mit der Forschung und Entwicklung für diese Fügetechnik beschäftigt. Ihr Ziel sind anwendungsorientierte klebtechnische Systemlösungen für die Wirtschaft. Multifunktionale Produkte, Leichtbau und Miniaturisierung – erreicht durch die intelligente Kombination von Werkstoffen – bieten neue Möglichkeiten, auf deren Realisierung sich das IFAM versteht. Die Arbeiten des Instituts reichen von der Grundlagenforschung über die Fertigung bis hin zur Markteinführung neuer Produkte. Die industriellen Einsatzfelder liegen im Anlagen- und Fahrzeugbau, in der Mikrofertigung sowie in der Verpackungs-, Textil- und Elektroindustrie.

Der Arbeitsbereich Klebtechnik befasst sich vorrangig mit der Entwicklung und Charakterisierung von Klebstoffen, mit der konstruktiven Gestaltung von Klebverbindungen sowie ihrer Realisierung und Qualifizierung. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf zertifizierenden Weiterbildungen in der Klebtechnik, denn eine zeitnahe, direkte und kompetente Personalqualifizierung wird beim Technologietransfer immer bedeutender. Der Arbeitsbereich Oberflächen ist in die Gebiete Plasmatechnik und Lacktechnik gegliedert. Hier geht es um die Vorbehandlung von Oberflächen der verwendeten Materialien. Dadurch werden den Werkstoffen zusätzliche Eigenschaften verliehen, die sie für weitere Anwendungsbereiche qualifizieren. Ein von beiden Bereichen bearbeitetes Feld ist die Adhäsions- und Grenzflächenforschung. Das dort erlangte Basiswissen gewährleistet die Zuverlässigkeit von Klebverbindungen und Beschichtungen.

Der Institutsteil Klebtechnik und Oberflächen ist nach DIN EN ISO 9001 zertifiziert, das Werkstoffprüflabor ist nach DIN EN ISO/IEC 17025

akkreditiert, das Klebtechnische Zentrum ist nach DIN EN 45013 als Zertifizierungsstelle für die klebtechnische Weiterbildung 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 des IFAM maßgebend und richtungsweisend. Gemeinsam mit den Auftraggebern werden innovative Produkte entwickelt, die anschließend von den Unternehmen erfolgreich in 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 Ressourcen schonenden 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 IFAM-Arbeiten der Anspruch:

Der Prozess Kleben bzw. das geklebte Produkt soll noch sicherer werden!

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

Dazu gehören:

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

Klebtechnik und Oberflächen

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. Andreas Hartwig
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-4 70
Fax: + 49 (0) 421 / 22 46-4 30
E-Mail har@ifam.fraunhofer.de

Anwendungstechnik

Kleb-, Dicht- und Beschichtungswerkstoffe; Laminier- und Gießharze; Auswahl und Qualifizierung; Charakterisierung; Recherchen; Anmeldung von Schutzrechten; Schadensanalyse.
Dr. Erwin Born
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-4 67
E-Mail bo@ifam.fraunhofer.de

Fertigungstechnik

Fertigungsplanung; Dosier- und Auftrags-technik; Automatisierung; Hybridfügen; Fertigung von Prototypen; ökonomische Aspekte der Klebtechnik.
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; Studien; Arbeits- und Umweltschutz.
Prof. Dr. Andreas Groß
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-4 37
E-Mail gss@ifam.fraunhofer.de

Oberflächen

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

Arbeitsgruppen

Niederdruck-Plasmatechnik

Oberflächenmodifizierung und Funktionsschichten; Anlagenkonzepte und Pilotanlagenbau.
Dipl.-Phys. Klaus Vissing
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-4 28
E-Mail vi@ifam.fraunhofer.de

Atmosphärendruck-Plasmatechnik

Oberflächenmodifizierung und Funktionsschichten für Inline-Anwendungen.
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

Adhäsions- und Grenzflächenforschung

Dr. Stefan Dieckhoff
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-4 67
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. Stefan Dieckhoff
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-4 67
E-Mail df@ifam.fraunhofer.de

Elektrochemie

Korrosion an metallischen Werkstoffen, unter Beschichtungen und in Klebverbindungen; Untersuchung von Anodisierschichten, elektrolytische Metallabscheidung.
Dr. Michael Schneider
Telefon: + 49 (0) 4 21 / 22 46-4 35
E-Mail msch@ifam.fraunhofer.de

Molecular Modelling

Quantenmechanische Simulation reaktiver Wechselwirkungen; Modellierung von Adhäsions- und Korrosionsmechanismen; Berechnung spektroskopischer Daten (IR, XPS).
Dr. Bernd Schneider
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-4 22
E-Mail sb@ifam.fraunhofer.de

Dienstleistungszentren und Ansprechpartner

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 m³ (HF, MW)
- Atmosphärendruck-Plasmaanlagen für 3-D-Teile und Bahnware
- Gas-Fluorierungsanlage
- 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, kleinen Fabrikationsserien und als Testpresse im Labor
- 300-kV- und 200-kV-Transmissions-Elektronenmikroskope mit EDX und EELS
- Rasterkraftmikroskop (AFM)
- Oberflächenanalytiksysteme und Polymeranalytik mit ESCA, UPS, TOF-SIMS und AES
- 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
- Technikum für organische Synthese
- IR- und Ramanspektrometer
- Rheologie (Rheolyst AR 1000 N, ARES – Advanced Rheometric Expansion System)
- Wärmeleitfähigkeitsmesseinrichtung; Dielektrometer
- Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)
- Elektrochemische Rauschanalyse (ENA)
- Doppelschnecken-Extruder (25/48D) und Knetter zum Einarbeiten von Füllstoffen in Polymere
- Einschnecken-Messextruder (19/25D) zur Charakterisierung der Verarbeitungseigenschaften von Polymerkompositen
- 12-achsiger Roboter zur Fertigung von Mikroklebverbindungen
- sgi Origin 3400
- Linux PC-Cluster mit 64 CPUs
- Spektroskopisches Ellipsometer
- Wave Scan DOI
- Farbmessgerät MA 68 II
- Labordissolver
- Haze Gloss
- Applikationsgeräte für Dichtmassenauftrag
- Lackapplikationsautomat
- Lacktrockner mit entfeuchteter Luft
- Vollklimatisierte Lackierkabine
- Raster-Kelvin-Sonde
- 6-Achsen-Industrieroboter, 125 kg Traglast, auf zusätzlicher Linearachse, 3 000 mm
- 1K-Kolbendosiersystem SCA SYS 3000/Sys 300 Air
- 1K/2K-Zahnrad-dosiersystem t-s-i, umrüstbar auf Exzentrerschneckenpumpen
- Materialzuführungen von 320-ml-Eurokartusche bis 200-l-Fass, beliebig mit dem t-s-i Dosiersystem kombinierbar
- 2K-Minidosierer zur automatischen Verarbeitung aus 50-ml-Doppelkartuschen (Eigenentwicklung)
- PUR-Hotmeltdosierer für wahlweise Raupen- oder Swirlapplikation aus 320-ml-Eurokartusche (Eigenentwicklung)



Wärmeleitfähigkeitsmesseinrichtung.



Industrieroboter mit 1K-Kolbendosiersystem.



Lackapplikationsautomat.

Technologiebroker: Eine engere Verzahnung mit Unternehmen und Instituten zahlt sich aus.

Alle Welt redet vom Technologietransfer – aber wie gestaltet man diesen effizient? Auch in Bremen wurde diese Frage vor einigen Jahren gestellt. Es gibt hier erhebliches technisches Entwicklungspotenzial in Instituten wie dem IFAM. Gleichzeitig gibt es in der Hansestadt große Unternehmen des Flugzeug-, Automobil- und Schiffbaus sowie der Windenergie – und diese Firmen wollen für sie relevante Forschungs- und Entwicklungsergebnisse möglichst umgehend in ihre Produktion einfließen lassen, um im globalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben. Beide Seiten sind in den vergangenen Jahren dank der Einrichtung des Technologiebrokers näher zusammengerückt. Dabei spielt der Bereich Klebtechnik und Oberflächen des IFAM eine wichtige Rolle. Nachdem ein Technologiebroker-»Prototyp« – der TBB Technologiebroker Bremen – insbesondere in der Zusammenarbeit mit dem Flugzeugbauer Airbus sehr gute Ergebnisse erzielt hat, fasst die Idee eines »Vermittlungs-Teams« vor Ort bei den Fachleuten in Industrie und Wirtschaft nun auch auf anderen Ebenen Fuß.

Den TBB Technologiebroker Bremen gibt es seit 1999. Dabei handelt es sich um eine Kooperation des IFAM mit dem Bremer Institut für angewandte Strahltechnik (BIAS) und der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT). Das vorrangige Ziel des TBB war die Bildung eines Netzwerkes für die Airbus-Entwicklung als eine der strategischen Komponenten der Bremer Fördermaßnahme Airbus Material- und Systemtechnologie, kurz: AMST. Bei AMST ging es besonders darum, im Rahmen einer Neuorganisation des europäischen Flugzeugbauers das in Bremen vorhandene wissenschaftliche Know-how öffentlicher Einrichtungen in Sachen Materialien, Werkstoffe und Prozesse stärker an das Airbus-Werk heranzufügen und zielgerichtet für die Flugzeugbaubedarfe weiterzuentwickeln. Nur mit der durch AMST unterbauten fachlichen Fokussierung war es dem Bremer Airbus-Standort seinerzeit möglich, die zentrale Unternehmens-Gesamtverantwortung für diese Entwicklungsbereiche in die Hansestadt zu holen und sich damit bis heute im permanenten Wettbewerb innerhalb der Airbus-Organisation zu behaupten.

Das TBB-Team vor Ort bei Airbus holte die richtigen Leute aus Industrie und Wissenschaft an einen runden Tisch – schließlich kann auch ein Unternehmen wie der namhafte Flugzeugbauer seine Innovationen nicht alle allein entwickeln. Firmen, Fördereinrichtungen und die Forschungs- und Entwicklungsinstitute stimmten dann in einem moderierten Prozess ab, wer an welcher Stelle hilft und wie das Know-how aus den verschiedenen Bereichen zu einer optimalen Lösung zusammengeführt werden kann. Zum Dienstleistungspaket gehörte auch ein durchdachter, begleitender und diskreter Projektablauf.

36 neue Arbeitsplätze im Institut – dank AMST

Die durch diesen Ansatz initiierte Vermittlung des externen Spezialwissens hat sich in den vergangenen Jahren für Airbus und weitere namhafte Bremer Firmen ebenso ausgezahlt wie für das Institut. Profitiert haben alle Beteiligten und damit auch der Standort Bremen – etwa in Form von



Abb. 1: Der Technologiebroker organisiert einen runden Tisch zwischen Betrieben, F&E-Einrichtungen, Förderinstitutionen und Dienstleistern, um Entwicklungen unter gegebenen monetären, zeitlichen, wirtschaftlichen und wissenschaftlich-technischen Rahmenbedingungen optimal für den Kunden umzusetzen.

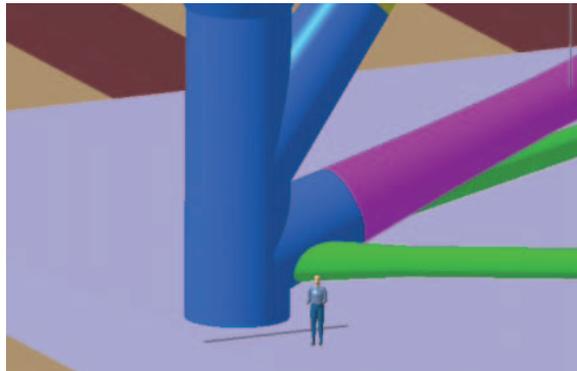
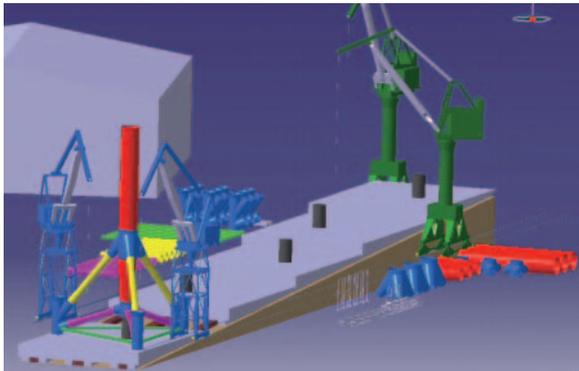


Abb. 2: Virtuelle Planung der Knoten- und Rohr-Sektionsmontage von schweren Stahlgründungen für Offshore-Windenergieanlagen. Die Abbildung links zeigt so genannte TRIPOD-Strukturen von bis zu 40 m Höhe, die mit Hilfe von Kränen zusammengebaut werden. Zum Größenvergleich zeigt die Abbildung rechts einen so genannten Pile Sleeve einer Gründung und eine erwachsene Person. Für die Bestimmung der Sektions-Istgeometrien, von deren besten Passungen und von gegebenenfalls notwendigen Nacharbeiten im Vorfeld der eigentlichen Montage wird ein für den Flugzeugbau vorgesehenes System mit virtueller Passungsanalyse weiterentwickelt.

Arbeitsplätzen, die oftmals von hochqualifizierten Spezialisten besetzt werden. Nachdem das AMST-Programm jetzt ausgelaufen ist, verfügt der Flugzeugbauer Airbus über 669 Arbeitsplätze mehr als 1997. Im Zusammenhang mit den TBB-Aktivitäten hat auch der Bereich Klebtechnik und Oberflächen kräftig zugelegt: Dort sind als direkte und indirekte Folge von AMST 36 neue Arbeitsplätze entstanden. Weil von vornherein beabsichtigt war, mit dem TBB die gemeinsam erarbeiteten Kompetenzfelder auch für die Zukunft – also über die Laufzeit vom AMST hinaus – zu sichern und die Resultate in weitere Bereiche zu transferieren, werden die positiven Effekte von AMST noch einige Jahre nachwirken.

Aus diesem Ansatz sind bilaterale »Tandems« zwischen dem Institut und dem Flugzeugbauer entstanden, in denen die Partner nach dem Ende von AMST jetzt in einem fortwährenden Netzwerk auf lange Sicht weiter kooperieren wollen. Die Themen dieser Tandems kommen aus der

Oberflächentechnik sowie der Polymertechnik einschließlich der Klebtechnik und mechanischer Fügeverfahren.

Virtuelle Methoden für automatisiertes Kleben

Ein Sektor, in dem Airbus und das Institut sehr eng zusammenarbeiten, ist die Fertigungstechnik und -planung besonders für das strukturelle Kleben. Dazu wurden im IFAM innerhalb von AMST umfassende Kompetenzen zur Automatisierung der klebtechnischen Landeklappenmontage aufgebaut. Sie umfasst die optische Erfassung der Bauteilgeometrien – mit dem BIAS –, die Entwicklung eines umfassenden Datenmanagements – mit dem BIBA – und die virtuelle Bauteilfügung. Ergänzt um das Zentrum für automatisiertes Kleben im IFAM, stoßen diese AMST-Entwicklungen mittlerweile auch auf großes Interesse bei Airbus-Systemzulieferern. Erweiterbar ist dieser Anwendungsbereich auf Seitenleitwerke, wie sie bei Airbus in Stade produziert werden, oder auf Flügelkästen, die in Großbritannien entstehen. Der Technologiebroker kümmert sich auch um den Transfer dieser Kompetenz in andere Industriebranchen, wie zurzeit in Zusammenarbeit mit einer Bremerhavener Firma für die Gestaltung eines Bauplatzes zur Fertigungsplanung von Tripod-Gründungsstrukturen – den »Füßen« von Offshore-Windenergieanlagen. Ebenfalls in diese Industriebranche fällt die simulationsgestützte Entwicklung eines Bauplatzes zur Herstellung von Fünf-Megawatt-Gondeln, den »Köpfen« der Offshore-Anlagen, in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFF.



Abb. 3: Passungsanalyse von Flugzeuglandeklappen.

Permanente trockene Trennschichten durch Plasma-Coating

Der IFAM-Bereich Plasmatechnik und Oberflächen hat in den vergangenen Jahren im Rahmen des AMST-Projekts »Funktionale Oberflächen« drei Themenfelder vorangetrieben. Die schmutzabweisende Oberfläche »Easy-to-Clean« wurde patentiert. Als PermaClean^{PLAS} bzw. PermaClean^{PLAS}-Beschichtung wird sie für Komponenten und Lackierkabinen bzw. -straßen von DaimlerChrysler verwendet; eine Vermarktung dieser Anwendung durch ein klein- oder mittelständisches Unternehmen ist geplant. Als Best Skin^{PLAS} bzw. Best Skin^{PLAS}-Beschichtung für Komponenten in Backbetrieben wird sie bereits durch lizenzierte Kooperationspartner verwertet. Ein weiteres Patent wurde für eine permanente trockene Trennschicht durch Plasma-Coating erarbeitet. Diese wird in einer Vakuumkammer auf Metallformen aufgebracht, in denen CFK-Bauteile in Form hergestellt werden. Mit Hilfe der Airbus-Tochter Composite Technology Center (CTC) in Stade wurde dieses Verfahren bereits erfolgreich getestet und wird jetzt für den dauerhaften Einsatz qualifiziert. In einem Folgeprojekt werden derzeit Atmosphärendruck-Verfahren entwickelt, um demnächst ebenso sehr große Formen für CFK-Bauteile derart beschichten zu können. Die Trennschichten lassen sich nun auch in andere Industriebereiche transferieren: Sie sind beispielsweise bei der Rotorblattfertigung für Windenergieanlagen einsetzbar und als Trennschicht für Metall-Formgebungsteile im Bereich der Automobil-Zulieferindustrie. Im AMST-Rahmen wurde weiterhin eine strömungsgünstige Oberfläche für Flugzeuge in ihren Grundlagen entwickelt und patentiert, die nun zur Anwendungsreife gebracht werden soll. Auch hier ist ein Transfer für den Einsatz auf Rotorblättern in Zusammenarbeit mit der Bremer Industrie in Vorbereitung.

Umweltfreundliche Lacksysteme und Polymere für Flugzeuge

Eine andere erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen IFAM-KT und Airbus im Bereich der Oberflächen hat im Projekt »Ökologische Lacktechnologie« ausgezeichnete Ergebnisse bei der Entwicklung umweltfreundlicher Lacksysteme für Flugzeuge erzielt. Die Resultate werden direkt in die Einführung des chromatfreien Oberflächenschutzes der ersten Generation eingebracht und

zukünftig unter anderem beim Großraumflugzeug Airbus A380 eingesetzt werden. Die Weiterentwicklung hinsichtlich Grundlagenverständnis, Gewichts- und Kostenreduzierung erfolgt in einem EU-Verbundprojekt »LiSA«, das gemeinsam vom Technologiebroker, Fraunhofer-IFAM und Airbus eingeworben wurde.

Im AMST-Vorhaben »Werkstoffentwicklung – Flammfestausrüstung von Duromeren und Thermoplasten« wurde in den vergangenen Jahren ein umfassendes Know-how zur Herstellung brandhemmender Polymere aufgebaut. Schwerpunkt der Aktivitäten war die Brandschutzausrüstung durch Nanopartikel und deren Kombination mit herkömmlichen Brandschutzmitteln. Bei den Untersuchungen wurden neben deutlich brandhemmenden Nanofüllstoffen auch brandbeschleunigende Partikel gefunden. Zudem ergab sich, dass Nanofüllstoffe als thermische Stabilisatoren, aber auch als Härtingsinitiator oder -beschleuniger wirken können. Im Zuge der Forschungen wurde die chemische Nanotechnologie im IFAM umfassend ausgebaut, so dass die IFAM-Experten nun zu den führenden Arbeitsgruppen in Deutschland zählen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in großer Breite sowohl im Flugzeugbau als auch in vielen anderen Wirtschaftsbereichen einsetzbar.

IFAM baut strategische Kooperationen weiter aus

Aufbauend auf positive Erfahrungen mit dem Technologiebroker-»Prototypen« TBB und der darin entwickelten Zusammenarbeit mit Airbus, BIAS und IWT erweitert das IFAM nun seine strategischen Kooperationen. Dieses betrifft zum einen die Ausweitung auf andere Industriebranchen und zum anderen die Einbindung weiterer Forschungseinrichtungen innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. Durch diese Diversifizierung – gerade auch mit klein- und mittelständischen Unternehmen – ergeben sich ständig neue Kontakte, neue Anwendungsgebiete und neue Fragestellungen. Der daraus entstehende Multiplikator-Effekt hinsichtlich der Entwicklungsmöglichkeiten und Synergieeffekte ergibt neue Ertragsmöglichkeiten für alle Beteiligten.

Auf der Seite der öffentlichen Einrichtungen bindet das IFAM systematisch Partner ein, die die Entwicklungsbedarfe der strategischen Industriekoopera-

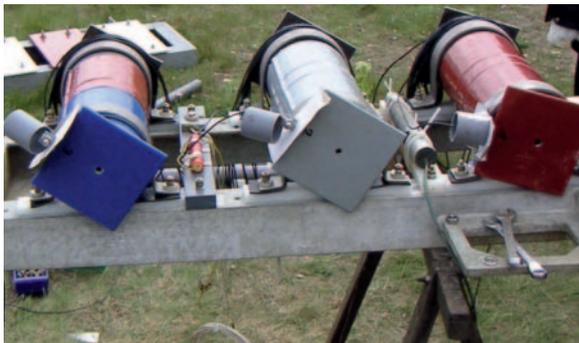


Abb. 4: Praxisnahe Bewertung von neuen Korrosionsschutzsystemen für Offshore-Stahlstrukturen. Das linke Bild zeigt Prüfkörper mit unterschiedlichen Beschichtungssystemen und Strukturelementen vor einer Auslagerung im Wechsellagerungsbereich in der Nordsee bei Helgoland. Das rechte Bild zeigt die gleichen Prüfkörper nach 30-monatiger Auslagerung. Die Prüfkörper zeigen deutliche Korrosionserscheinungen.

tionen des Instituts vervollständigen. Durch das BIAS werden vorwiegend lasergestützte und optische Technologien eingebracht, durch das IWT metallische Werkstofftechnologien. Das Fraunhofer IFF aus Magdeburg ergänzt die IFAM-Fertigungstechnik in Richtung Fertigungs- und Fabrikplanung, das Fraunhofer IZFP aus Saarbrücken die Prüftechnik in Richtung zerstörungsfreie Prüf- und Testverfahren für Materialien und Verbindungen. Das Fraunhofer LBF aus Darmstadt schließlich steuert die technische Zuverlässigkeitsanalyse in Richtung großer komplexer Bauteile und Anlagen bei.

Das IFAM ist zudem Mitglied im Zusammenschluss CFK-Valley Stade e.V. Dort werden zusammen mit Partnern Prozessketten für Faserverbund-Großstrukturen entwickelt, die im Verkehrsmittelbau zum Einsatz kommen sollen. Die Partner des CFK-Valley sind neben dem IFAM das Airbus-Werk Stade, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, die Airbus-Tochter CTC GmbH, das Fraunhofer-LBF, die Zulieferer Saertex und Hexel sowie weitere öffentliche und private Beteiligte. Zudem wird die Ansiedlung von klein- und mittelständischen Zulieferungs- und Entwicklungspartnern vorangetrieben.

Ähnliche strategische Ansätze verfolgt das Institut im Windenergiesektor. So vertritt das IFAM bei der Forschungs- und Koordinierungsstelle Windenergie (fk:wind) an der Hochschule Bremerhaven die Materialien und Oberflächen. Industrieseitig arbeitet es eng mit der Technologiekontor Bremerhaven GmbH zusammen, um vor Ort gemeinsam mit den beiden Fraunhofer-Instituten IFF und LBF sowie weiteren Unternehmen Entwicklungen für Offshore-Windenergieanlagen voranzubetrieben. Wichtigste Ziele der Verbundprojekte sind, die

Anlagen zuverlässiger zu machen und wettbewerbsfähige Fertigungsstrukturen aufzubauen. Die technischen Inhalte sind schwere Offshore-Gründungsstrukturen von bis zu 800 Tonnen Gewicht – bearbeitet vorwiegend mit der Weser-Wind GmbH –, Leichtgewichts-Maschinenhäuser (mit der Multibrid GmbH) sowie Rotorblätter.

Mit den geschilderten Aktivitäten in Bremen, Stade und Bremerhaven verfügt das IFAM über ein äußerst effektives lokales Netzwerk aus großen, mittleren und kleinen Unternehmen sowie öffentlichen FuE-Einrichtungen. In den nächsten Jahren wird es besonders darum gehen, die derzeitigen Kooperationen zu intensivieren und die Aktivitäten in Bremen, Stade und Bremerhaven stärker miteinander zu verknüpfen. So wird der TBB beispielsweise in Fragen der Materialien und Oberflächen mit der fk:wind zusammenarbeiten. Die Kooperation IFAM/LBF zur technischen Zuverlässigkeit wird wiederum Synergien im Bereich der CFK-Strukturen nutzbar machen – in Stade für Flugzeugbauteile, in Bremerhaven für Rotorblätter.

Ansprechpartner

Gerd Busmann
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 83
E-Mail bu@ifam.fraunhofer.de
Manfred Peschka
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-5 24
E-Mail pe@ifam.fraunhofer.de

Institut

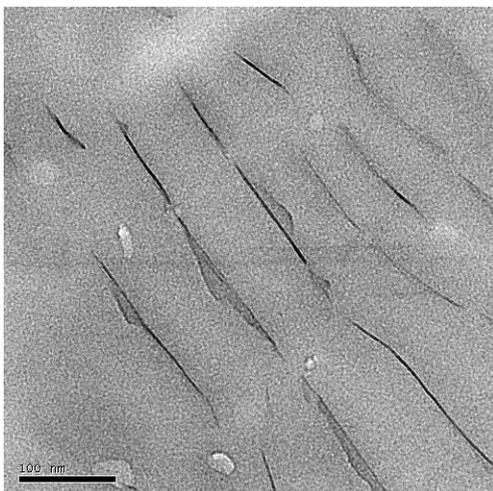
Fraunhofer-Institut für
Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung IFAM,
Bereich Klebtechnik und Oberflächen,
Bremen

Anwendung von Nanokompositen in der Klebtechnik

Kleben und Nanokomposite – eine Symbiose

Der Erfolg des Klebens, Lackierens oder aller Vorgänge der Oberflächentechnik hängt entscheidend von der Beherrschung der Adhäsion ab. Im Detail geht es dabei um die Wechselwirkung des Adhäsivs mit dem Substrat – Vorgänge, die in einer Schichtdicke von nur wenigen Nanometern stattfinden. Nach heutigem Verständnis handelt es sich auch bei diesen traditionellen Arbeitsschwerpunkten des IFAM um Nanotechnologie. Es lag daher schon 1997 nahe, in die Entwicklung von Nanokompositen einzusteigen – lange Zeit also, bevor die Nanotechnologie zum Modethema wurde.

Beim Kleben ist eine gute Wechselwirkung zwischen Substrat und Klebstoff eine notwendige Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige Klebverbindung. Das gilt entsprechend auch bei der Herstellung von Nanokompositen: Eine optimale Wechselwirkung zwischen Partikeloberfläche und Polymer ist eine unabdingbare Grundlage für die Bildung des Nanokomposites und die Nutzung der so hervorgerufenen speziellen Effekte. Die traditionelle Adhäsionsforschung und die Präparation und Anwendung von Nanokompositen befruchten sich also gegenseitig. Bei der Nutzung von Nanokompositen als Klebstoff, Vergussharz oder Lack lassen sich außerdem viele neue Anwendungsfelder erschließen.



Bei der Präparation von Nanokompositen besteht stets die Gefahr, dass die Einzelpartikel agglomerieren oder aggregieren. Das heißt, dass die Wechselwirkung der Partikel untereinander stärker ist als die mit dem Bindemittel. Im Komposit liegen dann Mikropartikel vor, die zwar nanostrukturiert sind – die spezifischen Anwendungsvorteile von Nanopartikeln lassen sich mit ihnen aber nicht erzielen. Die Affinität zwischen den Partikeln und dem Bindemittel wird nur durch eine gezielte Einstellung der Grenzflächen zwischen beiden Materialien erreicht. Meist wird dazu die Oberfläche der Partikel chemisch behandelt. Um eine genügend schnelle nanoskopische Verteilung zu erzielen, ist zusätzlich ein Energieeintrag notwendig – meist in Form einer anwendungsspezifisch optimierten Mischtechnik. Neben einem Verständnis der Wechselwirkungen an der Grenzfläche ist die Basis zur Herstellung guter Nanokomposite daher die Auswahl und das Beherrschen der richtigen Verfahrenstechnik.

Durch die Modifikation von Harzsystemen mit Nanopartikeln lässt sich eine Reihe von Eigenschaften verbessern. Teilweise können sogar Materialkenngrößen optimiert werden, die sich bei konventioneller Formulierung gegensätzlich verhalten. Ein Beispiel ist die gleichzeitige Verbesserung von Festigkeit und Zähigkeit. Andere durch Nanopartikel erzielbare Eigenschaften sind z. B. die Kratz- und Abriebbeständigkeit oder eine Verringerung der Permeabilität – etwa um die Feucht-Warm- und Lösemittelbeständigkeit zu verbessern. Auch die Verringerung der Brennbarkeit oder – durch anregbare Nanopartikel – schnell härtbare und wieder lösbare Klebverbindungen sind möglich. Weitere Einsatzfelder sind eine Verringerung des Härtungsschrumpfes und des Wärmeausdehnungskoeffizienten, Medizinklebstoffe mit hohem Röntgenkontrast, transparente elektrisch leitfähige Lacke, das Einstellen des Brechungs-

Abb. 1: Homogen verteiltes Organobentonit in einem Epoxidharz als Beispiel für ein Nanokomposit mit schichtförmigem Füllstoff.

index oder Materialien mit hygienischen Oberflächen durch den Einsatz von silberhaltigen Nanopartikeln. Diese enorme Einsatzbreite soll anhand einiger Beispiele näher erläutert werden.

Nanokomposite mit globulären Partikeln

Pyrogene Kieselsäure besteht aus Aggregaten und Agglomeraten von Nanopartikeln unterschiedlicher Primärpartikelgröße. Zur Thixotropierung wird pyrogene Kieselsäure seit langem in Klebstoffen eingesetzt. Mit Gehalten von wenigen Prozent wird eine deutliche Verdickung erreicht. Durch eine geschickte Kombination aus Prozesstechnik und Oberflächenmodifikation ist es gelungen, die Wechselwirkung der Partikel untereinander aufzubrechen. So lassen sich Füllstoffgehalte von bis zu etwa 50 Gew.% in organischen Bindemitteln erreichen. Die derart hergestellten Nanokomposite sind eine gute Alternative zu den häufig vorgeschlagenen Sol-Gel-Materialien: Sie können einfacher an unterschiedliche Bindemittel angepasst werden, sind kostengünstiger herstellbar und einfacher zu verarbeiten. Mit Hilfe dieser Komposite wurden ebenso Lacke mit deutlich reduziertem Abrieb präpariert wie Dentalmaterialien mit verbesserten mechanischen Eigenschaften oder Chip-Underfiller mit reduziertem Härtingschumpf. Darüber hinaus wurde die Lösemittelaufnahme und -beständigkeit deutlich verbessert. Die Festigkeit von Klebverbindungen lässt sich bereits bei sehr kleinen Gehalten je nach Oberflächenmodifizierung der Partikel deutlich steigern oder reduzieren. Derartigen Materialien – auch mit anderen Arten von Füllstoffen – wird ein großes Anwendungspotenzial vorausgesagt, das von der Automobilindustrie über die Elektronik bis hin zu Konsumartikeln geht.



Abb. 2: Brandprüfung von Nanokompositen.

Schnellhärtung und Lösen von Klebverbindungen

Die Härtungsgeschwindigkeit einer Klebverbindung ist oftmals der geschwindigkeitsbegrenzende Faktor in einer Produktion. Zusätzlich besteht oft der Wunsch, eine Klebverbindung wieder lösen zu können. Dies gilt insbesondere bei einer Reparatur, für das Recycling oder bei Verbindungen, die während der Fertigung nur eine Bauteilfixierung darstellen. Gemeinsam mit der Degussa wird daher an Klebstoffen mit superparamagnetischen Partikeln gearbeitet. Es handelt sich um nanoskalige Eisenoxidpartikel, die in Nanopartikeln aus Siliciumdioxid eingebettet sind. Diese Partikel – und damit auch die Polymere, die diese Partikel enthalten – lassen sich mit Hilfe eines hochfrequenten Wechselfeldes erwärmen. Obwohl es sich um eine völlig neue Anwendung handelt, ist das notwendige Equipment in der industriellen Fertigung bereits beim Randschichthärten von Metallen weit verbreitet.

Beim Kleben mit Nanokompositen auf der Basis dieser Partikel als Klebstoff ist man nun in der Lage, nur den Klebstoff zu erwärmen und die Füge­teile weitgehend unbeeinflusst zu lassen. Da sich Metalle in dem Wechselfeld aber ebenso erwärmen, ist man bei dieser Technik auf nicht-metallische Füge­teile angewiesen. Es ist beispielsweise gelungen, einen einkomponentigen Klebstoff – also ein reaktives Material, das bei Raumtemperatur mindestens einige Monate stabil ist – mit den anregbaren Partikeln zu entwickeln. Dieser Klebstoff haftet auf zahlreichen Substraten und lässt sich im Zeitraum zwischen wenigen Sekunden bis zu einigen Minuten aushärten. Damit ließen sich selbst wärmeempfindliche Thermoplaste ohne thermische Schädigung kleben, bei denen der Einsatz einkomponentiger Klebstoffe aufgrund der thermischen Empfindlichkeit normalerweise ausgeschlossen ist. Die präparierten Klebverbindungen lassen sich anschließend bei entsprechend längerer Einwirkzeit des Hochfrequenzfeldes oder höherer Leistung wieder lösen. Auf diese Weise ließen sich sowohl Polycarbonat als auch Griffe aus Polystyrol an die Glaskörper von Kaffeekannen kleben.

Bentonite als Här­tung­ini­tiator und Brandschutzmittel

Organisch modifizierte Schichtsilikate – meistens Bentonite – werden häufig zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften herangezogen. So gelingt es, Nanokomposite mit gesteigerter

Festigkeit herzustellen, ohne dass die Zähigkeit sinkt. Sogar eine gesteigerte Bruchdehnung ist möglich. Häufig steigt auch die Glasübergangstemperatur und damit in vielen Fällen die maximale Anwendungstemperatur für das Material. Darüber hinaus sind Bentonite bei richtiger Auswahl und Verarbeitung geeignet, die Permeabilität zu senken. Sie bieten sich daher als Additiv für Verpackungsklebstoffe zur Verbesserung der Feucht-Warm- oder Lösemittelbeständigkeit von Klebverbindungen an. Gezeigt wurde auch, dass die organisch modifizierten Bentonite einen hohen Einfluss auf die Härtung von Epoxidharzen haben. Bei der klassischen Additions­härtung lassen sie sich als Beschleuniger einsetzen. Sie sind aber auch geeignet, selbst als Här­tung­ini­tiator zu wirken.

Schon seit einigen Jahren ist bekannt, dass die Anwesenheit von Organobentoniten bei genügend hoher Temperatur zur Selbstpolymerisation von Epoxiden führt. Dabei bildeten sich aber »popcorn-artige« Polymerisate, für die es bisher keine Anwendungsmöglichkeit gibt. Durch Veränderung der Verfahrenstechnik bei Oberflächenmodifikation und Verarbeitung gelang es jedoch, die Epoxidharze zu homogenen und festen Polymerisaten zu härten. Damit sind diese auch zum Kleben und Vergießen geeignet. Auch beim Einsatz von Bentoniten als Brandschutzmittel spielen – neben der Barrierebildung beim Brand – häufig katalytische Effekte eine Rolle. Im Falle von epoxidbasierten Elastomeren wurde der mit TGA gemessene Zersetzungsbeginn durch den Zusatz der Nanofüllstoffe von etwa 150 °C

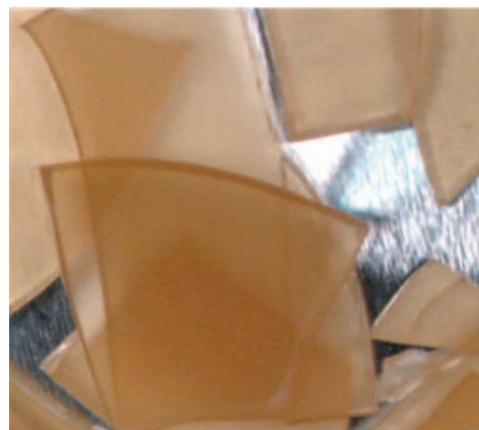


Abb. 3: Modifizierte Schichtsilikate als Här­tung­ini­tiator für Epoxidharze. Links konventionelle Verfahrenstechnik der Modifikation; rechts auf das System angepasste Verfahrenstechnik, wobei ein homogen durchgehärtetes Polymer entsteht.

auf 320 °C gesteigert. Gleichzeitig verringerte sich die Brandgeschwindigkeit (Anlehnung an UL 94 horizontal) und die Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit (Cone Kalorimetrie). Als alleiniges Brandschutzmittel sind die Bentonite meist nicht geeignet. In mehreren Fällen wurden aber synergetische Effekte mit konventionellen Brandschutzmitteln nachgewiesen. Das heißt: Um gleiche oder bessere Brandeigenschaften zu erzielen, war der erforderliche Gehalt aus Brandschutzmittel plus Organobentonit geringer als bei alleiniger Verwendung des klassischen Brandschutzmittels.

Analytik von Nanokompositen

Gerade bei der systematischen Entwicklung von Nanokompositen ist neben der anwendungstechnischen Charakterisierung eine eingehende instrumentelle Analyse der Komposite notwendig. Dabei geht es sowohl um die Messung der Partikelgrößenverteilung – dafür wurde eigens eine neue Lichtstreuungsmethode entwickelt – als auch um die Bestimmung der Partikelverteilung und Strukturierung mit hochauflösenden elektronenmikroskopischen Techniken. Bei letzteren spielt insbesondere die Transmissionselektronenmikroskopie eine besondere Rolle, weil nicht nur die gebildeten Strukturen und Partikelverteilungen abgebildet werden. Zusätzlich kann eine lateral aufgelöste Elementanalyse mit einer Auflösung bis in den Nanometerbereich erfolgen. Hinzu kommen die verschiedensten Methoden der Oberflächenanalytik und die IR-Spektroskopie, mit welchen beispielsweise die Art der Partikelanbindung an die Polymermatrix untersucht wird. Mit Hilfe der VCD-Spektroskopie – einer speziellen Weiterentwicklung der IR-Spektroskopie – ist man sogar in der Lage, durch die Wechselwirkung mit Partikeloberflächen bedingte Konformationsänderungen der Moleküle nachzuweisen. Diese Methode ist besonders in der Nanobiotechnologie hilfreich – etwa zur Entwicklung von Klebstoffen nach dem Vorbild der Natur oder von Proteinchips.

Ein weiteres Werkzeug ist das Molecular Modelling. Die Wechselwirkung an Oberflächen wird damit ebenso näher untersucht wie die Reaktionsmechanismen. Außerdem wird das Molecular Modelling zur Berechnung von Spektren eingesetzt. Auf diese Weise steht eine Interpre-



Abb. 4: Zur Messung der Partikelgrößenverteilung entwickeltes Lichtstreugerät.

tationshilfe zur Verfügung, die einen Abgleich zwischen real gemessenem Spektrum und den Vorstellungen zu den molekularen Zusammenhängen zulässt. Dies ist besonders dann hilfreich, wenn die analysierten Substanzen nicht als solche isoliert werden können – etwa bei der adhäsiven Wechselwirkung an einer Grenzschicht. Die gesamte Analytik ist aber immer nur so gut, wie die Ergebnisse mit den anwendungstechnischen Eigenschaften der präparierten Materialien und Materialverbunde in Zusammenhang gebracht werden können. Dann ist eine Grundlage für die weitere Optimierung geschaffen.

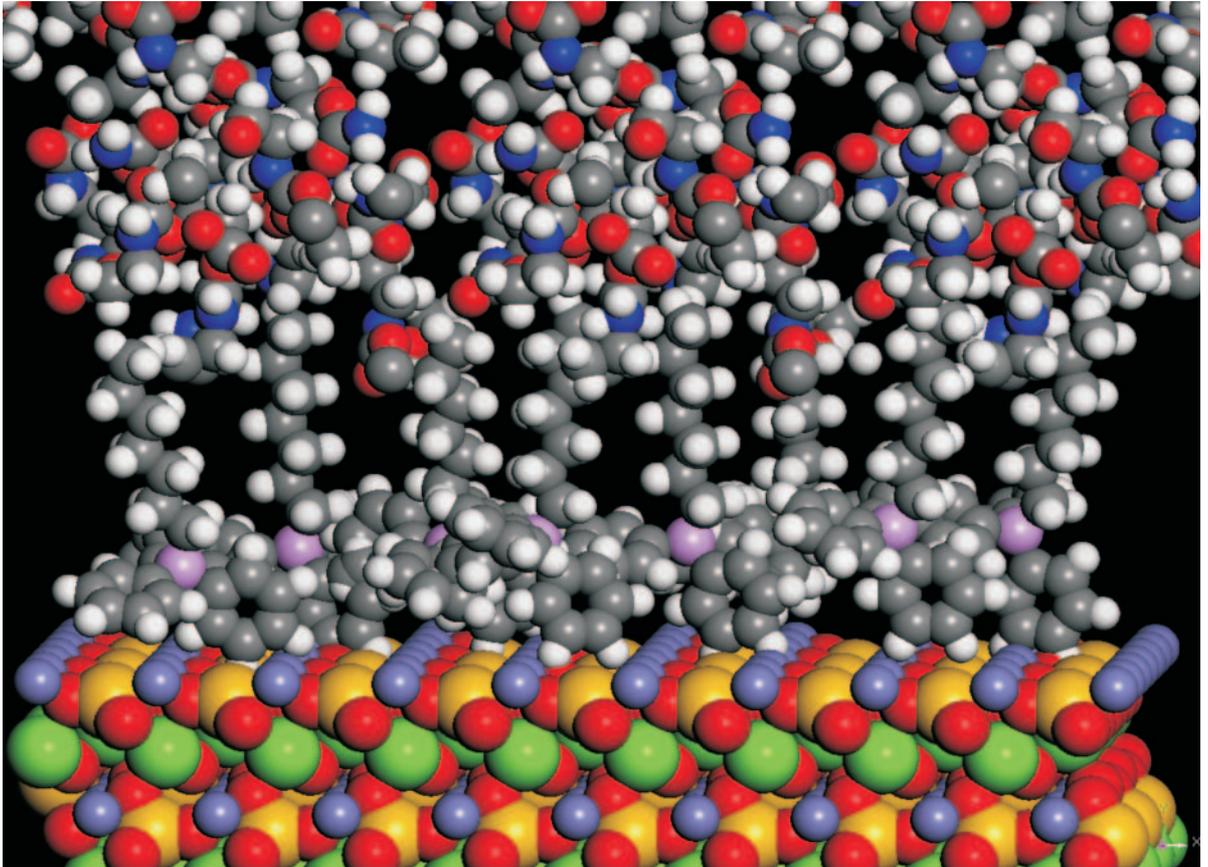


Abb. 5: Molekulares Modell der Interphase zwischen Harzmatrix und Bentonitpartikel.

Resümee

Die Zusammenstellung zeigt, dass sich mit Hilfe von Nanofüllstoffen viele interessante Eigenschaften erzielen lassen. Voraussetzung für den Erfolg bei der Herstellung der Nanokomposite ist die richtige Kombination aus Chemie und Prozesstechnik. Nanofüllstoffe sind keineswegs »Zauberpulver«, mit denen – wie oftmals behauptet – alle Probleme gelöst werden können. Vielmehr muss beim definierten Eigenschaftsprofil eines neuen Materials sorgfältig geprüft werden, ob das Ziel mit Nanofüllstoffen erreichbar ist – und wenn ja, mit welchen. Bei der anschließenden experimentellen und später industriellen Umsetzung sind dann umfangreiche Erfahrungen zur Chemie und Prozesstechnik zusammen mit einem Verständnis der ablaufenden Vorgänge notwendig, um tatsächlich die nanoskopischen Eigenschaften in dem neuen Produkt zu nutzen – und nicht nur irgendwie irgendein Pulver hineinzurühren.

Ansprechpartner

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

Simulation:

Die rechnerische Auslegung und Bewertung von Klebverbindungen

Die Fügetechnik Kleben ist in den vergangenen Jahren in vielen Industriebereichen zur Schlüsseltechnologie und zum Wegbereiter für neue Bauweisen geworden. Das Kleben erlaubt in der Verkehrs- und Anlagentechnik Mischbauweisen und integriert erheblichen Zusatznutzen in die Produkte – etwa durch Klebstoff als Korrosionshemmer, Dämmmaterial, Dichtstoff, elektrischen Leiter und vieles mehr. Die Klebtechnik erlaubt heute die modulare Produktherstellung, bei der die einzelnen Bauteile praktisch in aller Welt gefertigt werden können. Für eine optimierte und kostengünstige Herstellung spielt jedoch auch der Faktor Zeit eine Rolle. Eine kürzere Produktentwicklungsphase verringert den Zeitraum bis zur Markteinführung – das spart Geld und erhöht die Wettbewerbsfähigkeit. Ein immer größerer Stellenwert kommt deshalb der numerischen Simulation zu. Im Arbeitsbereich Werkstoffe und Bauweisen des Fraunhofer-IFAM haben neue Methoden und erweiterte Rechnerkapazitäten dazu geführt, dass sich die rechnerische Auslegung und Bewertung von Klebverbindungen zu einem unabdingbarem Bestandteil im Kanon des Institutsangebotes entwickelt hat.

In kaum einer anderen Technologie kommt es so sehr auf fachübergreifende Zusammenarbeit an wie bei der Klebtechnik. Das Fraunhofer-IFAM ist

hier hervorragend aufgestellt: Mit seinem Wissen in der Klebstoffchemie, der Oberflächenphysik, der Anwendungs- und Fertigungstechnik sowie bei den Werkstoffen und Bauweisen versammelt der Institutsteil Klebtechnik und Oberflächen ein Know-how, das eine notwendige Grundlage für langzeitbeständige Klebverbindungen ist. Die Möglichkeiten der rechnerischen Auslegung von Klebverbindungen haben dabei im IFAM-Portfolio erheblich an Bedeutung gewonnen: Sie erlauben die Bewertung von verschiedenen Bau- und Klebvarianten hinsichtlich Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit, ohne dass diese real existieren müssen. Allerdings bedarf es dazu einer ganzen Reihe von Vorarbeiten und Experimenten, um die jeweils maßgebenden Parameter zu ermitteln.

Die numerische Berechnung und Auslegung geklebter Strukturen muss mit den klebtypischen Besonderheiten umgehen. In einer Struktur ist die Klebnaht in der Regel recht dünn, aber sehr lang. Die Dicke der Klebschicht liegt zwischen 0,1 und einigen Millimetern. Ihre Länge orientiert sich hingegen an den Abmessungen der zu klebenden Strukturen. Außerdem hat der Klebstoff aus werkstoffphysikalischer Sicht entweder ein hyperelastisches, gummiartiges Verhalten, oder er ist als duro- oder thermoplastischer Kunststoff elastisch-plastisch mit ausgeprägt zeitabhängigem bzw. viskosem Verhalten.

Im Arbeitsbereich Werkstoffe und Bauweisen geht es bei Simulationen vor allem um das Nachvollziehen des zu erwartenden mechanischen Verhaltens. Für die Berechnung müssen Größen wie Temperaturen, Feuchtigkeiten, Reinigungsmittel oder Umwelteinflüsse ebenso einfließen wie die Materialparameter, die Lastenverteilung im konkreten Einsatz, die Umgebungsbedingungen und vieles mehr. Die im Anforderungsprofil des Auftraggebers festgehaltenen Faktoren skizzieren den gesamten Lebenszyklus des Produktes und werden für die Simulation benötigt.

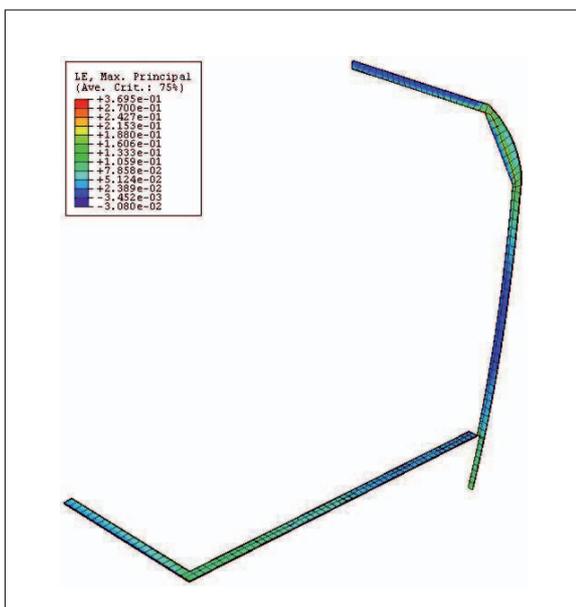


Abb. 1: Beispiel einer langen, dünnen Klebschicht im Schienenfahrzeugbau.



Abb. 2: Modell des auf den Triebwagen geklebten Kopfmoduls.

Ein Beispiel: Im Schienenfahrzeugbau soll das Kopfmodul eines Triebwagens geklebt werden. Für die Simulation des Klebverhaltens unter verschiedenartigen Bedingungen müssen sämtliche Daten des Anforderungsprofils erfasst werden – Vorschriften des Eisenbahnbundesamtes ebenso wie Geometrien, CAD-Daten und vieles mehr. Für das Verhalten der zu verwendenden Klebstoffe und Materialien werden Daten auch durch Vorab-Experimente – entweder beim Auftraggeber oder im IFAM – ermittelt. Dies können Zugscherproben, Impact-Peel-Proben, Winkelschälproben oder KSII-Proben sein. Alle verfügbaren Daten bilden schließlich die Grundlage eines Werkstoffmodells, das die mathematische Beschreibung des Werkstoffverhaltens unter Beanspruchung ist.

Die in vielen Fällen unglaubliche große Zahl von unterschiedlichen Parametern – zumal bei komplexen Geometrien – bringt auch heute noch Rechner an den Rand ihrer Kapazitätsgrenze. Deshalb wird bei der Berechnung von Klebverbindungen zunächst immer eine Grobauslegung mit analytischen, linear elastischen Näherungen vorgenommen. Dies dient einer ersten Abschätzung der Klebfläche und der klebgerechten Gestalt. In der Regel können analytische Ansätze mit hinreichender Genauigkeit nur für reine Schubbeanspruchungen der Klebverbindung geführt werden. Bei linear-elastischen Ansätzen muss darüber hinaus ein Sicherheitsfaktor

berücksichtigt werden, der die Unzulänglichkeiten der analytischen Lösungen berücksichtigt.

Bei komplexen Klebnähten und Bauteilen sind Finite-Elemente-Analysen notwendig, wenn man eine Klebverbindung auslegen will, die der Beanspruchung gerecht wird. Dabei wird die Struktur »vernetzt«, also in zahlreiche Elemente aufgeteilt, die dann ihrerseits berechnet werden. Bei dieser Methode muss bei der Vernetzung der Klebverbindung das erlaubte Seitenverhältnis der Finiten Elemente beachtet werden. Gleichzeitig muss – um die Klebschicht in der Simulation hinreichend genau abzubilden – diese in mehrere Lagen elementiert werden. Bei den im Vergleich zur Struktur dünnen Klebschichten bedeutet dies: Entweder muss die gesamte Struktur sehr fein vernetzt werden, was in der Regel die Rechnerkapazitäten übersteigt. Oder es muss ein hoher personeller Aufwand getrieben werden, um die Netzfeinheit in der Umgebung der Klebverbindung im Geometriemodell zu erhöhen.

Es gibt jedoch eine Alternative, für die am IFAM ein effizientes Pre- und Postprocessing-Konzept für die Berechnung von Klebverbindungen erarbeitet wurde. Das Problem wird dabei durch eine Modellierung gelöst, bei der eine Struktur grob vernetzt global analysiert wird, um dann durch immer höher aufgelöste Ausschnitte eine lokale Analyse durchzuführen. Bei dieser Vorgehensweise werden die kritischen Bereiche der Klebverbindung entdeckt und bewertet. Eine weitere Alternative besteht darin, die Verbindung durch eigens entwickelte Klebelemente abzubilden, die nur die wesentlichen Parameter für die Berechnung enthalten und nur die entscheidenden Aspekte des Verbindungsverhaltens widerspiegeln. Schwierigkeit ist hier, die richtigen Parameter und deren Größen zu bestimmen. Das Fraunhofer-IFAM hat hier in Zusammenarbeit mit der Industrie verschiedene Konzepte ausgearbeitet und umgesetzt.

Eine Auslegung erfordert die Bewertung der numerischen oder analytischen Berechnung hinsichtlich erlaubter Spannungen und Dehnungen. Diese Größen werden – entsprechend den im Anforderungsprofil erarbeiteten Beanspruchungen – experimentell festgestellt. Auch dafür stehen im Institut alle erforderlichen Geräte und Erfahrungen im Umgang mit geklebten Strukturen bereit. Die Spannungen

und Dehnungen werden mit einer Überlebens- bzw. Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt und in die Bewertung der Berechnungen einbezogen. In der Regel müssen schwingende, dynamische (Crash), quasi-statische und relaxierende Beanspruchungen bei anwendungsnahen Temperaturen und Feuchten berücksichtigt werden. Die Besonderheiten beim Kleben auf lackierten Untergründen und die Beanspruchung durch Reinigungs- und Betriebsmittel führen dazu, dass die Auslegung der Klebverbindung häufig Einfluss auf das Design hat.

Die Auslegung von Klebverbindungen ist auf eine geeignete Kombination von experimentellen Methoden und Berechnungsmethoden angewiesen, so dass eine fundierte Beanspruchungs- und Beanspruchbarkeitsanalyse durchgeführt werden kann. Eine Aufgabe, die noch erhebliche Erfahrung im Umgang mit Klebverbindungen erfordert, ist die Bewertung der Langzeitbeständigkeit. Neue numerische Ansätze und Methoden auf quantenmechanischen und molekulardynamischen Grundlagen zielen darauf, im Rahmen einer Multiskalenbetrachtung den Anteil der Simulationsmöglichkeiten – insbesondere im Hinblick auf die Vorhersage zu erwartender Alterungs- und Degradationsmechanismen – zu erhöhen.

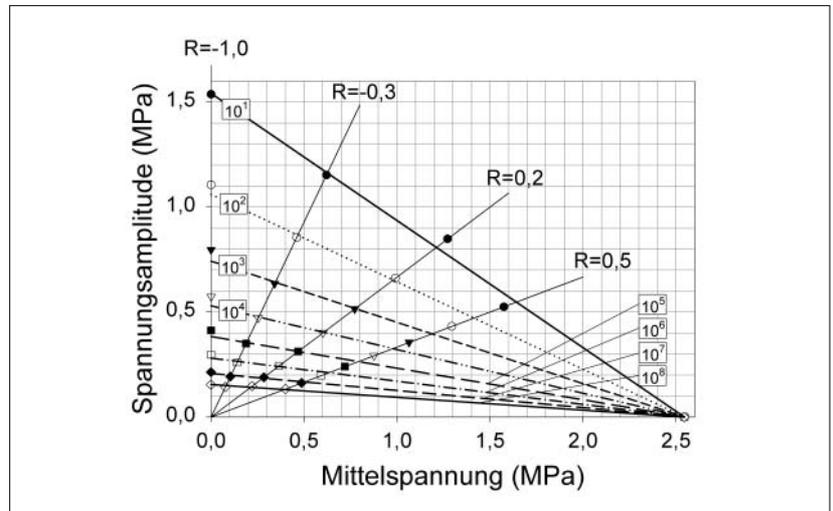


Abb. 4: Ergebnis eines Ermüdungsversuchs (Testfrequenz: 5 Hz) an Klebverbindungen mit einem flexiblen MS-Klebstoffsystem und Stahl-Fügeteilen. Die Abbildung zeigt die Abhängigkeit der ertragbaren Spannungsamplitude beim Spannungsverhältnis R von der Mittelspannung. Zahlen in Kästchen stellen die zugehörigen Bruchschwingspielzahlen dar. Der Zusammenhang zwischen Spannungsamplitude und Mittelspannung kann im Bereich R zwischen $-1,0$ und $0,5$ durch lineare Funktionen beschrieben werden

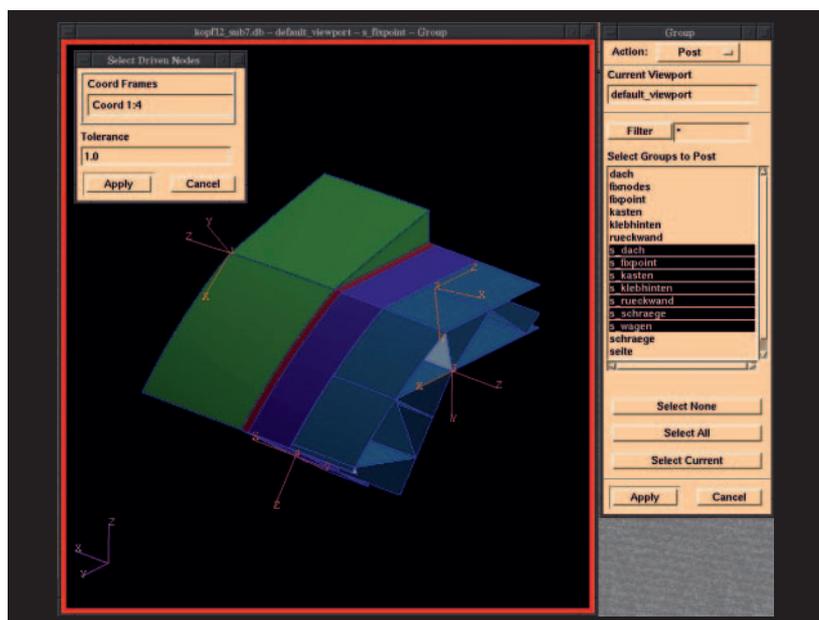


Abb. 3: Preprocessing-tool zur Simulation von Klebverbindungen.

Ansprechpartner

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

Institut

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

Chromatfreie Korrosionsschutzsysteme: Prüfung und Entwicklung

Allein in Deutschland entstehen durch Korrosion jährlich Schäden in Milliardenhöhe. Um eine gute Langzeitbeständigkeit von Bauteilen und Produkten zu garantieren, wird in der Oberflächentechnik an der Optimierung von Korrosionsschutzsystemen gearbeitet – etwa durch metallische Überzüge, organische Beschichtungen (Primer, Lacke) oder anderweitige Modifizierungen von Oberflächen und Grenzflächen (Anodisieren, Emallieren, Plasmabehandlung etc.).

Die entsprechenden Branchen der Oberflächentechnik – wie die Galvanotechnik oder die Lacktechnik – stellen in Deutschland einen erheblichen Wirtschaftsfaktor dar. Sie bieten Schlüsseltechnologien für viele andere Industriebereiche wie z. B. für die Elektro- und Fahrzeugindustrie an. Eine der wichtigsten Aufgaben in der Oberflächentechnik ist aufgrund neuer Anforderungen beim Umwelt- und Gesundheitsschutz derzeit die Suche nach chromatfreien Korrosionsschutzsystemen.

Aufgrund der Gefährdung von Arbeitssicherheit, Gesundheit und Umwelt dürfen Beschichtungen und Prozesse auf Basis chromathaltiger Verbindungen in absehbarer Zeit nicht mehr eingesetzt werden. Beispielsweise wird die Umstellung auf Cr(VI)-freie Oberflächen im Rahmen der EU-Altauto-Richtlinie 2002/86/EG von der Europäischen Kommission zum 1. Januar 2007 vorgeschrieben.

Neue Wege in der Korrosionsprüfung

Langjährig bewährte Korrosionsprüfungen wie beispielsweise der Salzsprühnebeltest erscheinen trotz eingeschränkter Aussagefähigkeit derzeit nicht ersetzbar. Verbesserte Aussagen über die Prüfergebnisse derartiger Testverfahren und zudem eine Zeitersparnis – ohne die Inkaufnahme einer unzulässigen Verschärfung der Prüfbedingungen – ist durch begleitende elektrochemische, oberflächen- und strukturanalytische Analysen möglich. Die entsprechenden Daten ermöglichen auch innerhalb kurzer Testzeiten eine umfassende Bewertung der eingesetzten Korrosionsschutzsysteme. Mit Hilfe von oberflächenanalytischen Verfahren lassen sich beispielsweise Veränderungen an der Oberfläche von Bauteilen bereits nachweisen und charakterisieren, lange bevor Schäden mit dem bloßen Auge sichtbar werden. Damit kann sowohl wertvolle Entwicklungszeit eingespart als auch zusätzliche Informationen über die zugrunde liegenden Schädigungsmechanismen gewonnen werden. Ähnliches gilt für elektrochemische Messverfahren. Derzeit wird dazu im IFAM an der Entwicklung einer Echtzeitkorrosionsprüfung auf Basis von elektrochemischen Rauschmessungen gearbeitet.

Die genannten Untersuchungen geben Hinweise auf erste Degradationserscheinungen und einsetzende Korrosionsmechanismen an der Materialoberfläche. Sie liefern zudem Informationen

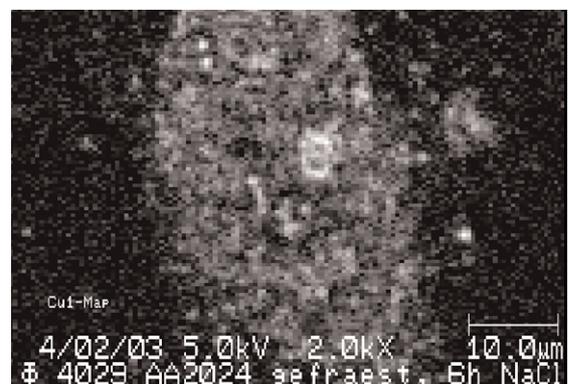
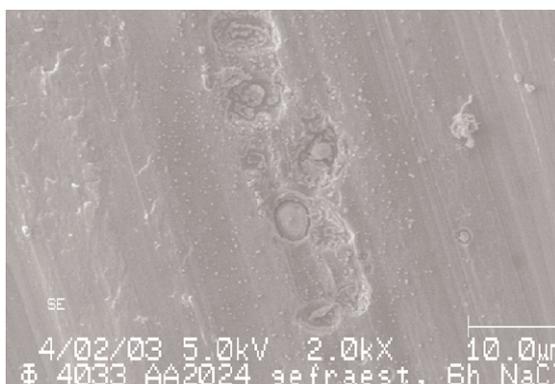


Abb. 1: Untersuchungen von Frühstadien der Korrosion einer hochfesten Aluminiumlegierung (AA2024) mittels Scanning Auger Microscopy (SAM). Lokale Korrosionsangriffe nach sechsständiger Belastung mit wässriger NaCl-Lösung (3 Gew.% NaCl, entspricht annähernd Seewasserbedingungen). Links: Sekundärelektronenbild der Oberfläche der Aluminiumlegierung. Rechts: Darstellung der Cu-Verteilung dieses Bereiches, Ausbreitung von kupferreichen Partikeln auf der Oberfläche als Folge der Auflösung von intermetallischen Phasen im Anfangsstadium der korrosiven Belastung.

über die Wirkmechanismen von Inhibitoren, die z. B. für den aktiven Korrosionsschutz in Primer- bzw. Lacksystemen eingesetzt werden (Abb. 1). Mit diesen Informationen kann die Entwicklung von chromatfreien Inhibitoren zielgerichtet unterstützt werden.

Zur Unterstützung der Suche nach geeigneten Inhibitoren für die Entwicklung chromatfreier Primer- und Lacksysteme ist am IFAM ein neues Testverfahren entwickelt worden. Es erlaubt die Überprüfung der Korrosionsschutzwirkung von Lacksystemen und Inhibitorsubstanzen unter einsetzungsgerechten Bedingungen. Der Test kann mit lichtmikroskopischen und oberflächenanalytischen Untersuchungen (Röntgenfotoelektronenspektroskopie, kurz: XPS) sowie elektrochemischen Analysen kombiniert werden. Er erlaubt sowohl eine quantitative als auch eine qualitative Bewertung der Korrosionsschutzwirkung von Inhibitoren bzw. Lacksystemen. Mit diesem Vorgehen, das auch bereits von Firmen für die Suche nach chromatfreien Inhibitoren eingesetzt wird, ist eine Beurteilung der Systeme deutlich schneller als mit den herkömmlichen empirischen Testverfahren möglich.

Entwicklung chromatfreier Inhibitoren für Primer-Lacksysteme

Im industriellen Fertigungsprozess und während des Einsatzes lassen sich Verletzungen von Korrosionsschutzschichten auf Bauteilen – etwa durch Kratzer, Poren sowie im Bereich von Schnittkanten, Bohrlöchern etc. – nie ganz vermeiden. Für hohe Korrosionsschutzanforderungen wie etwa im Flugzeugbau muss im Fall derartiger Verletzungen des eigentlichen Korrosionsschutzsystems ein so genannter aktiver Korrosionsschutz gewährleistet sein. Dieser sorgt für eine Passivierung der verletzten Stelle und unterdrückt Korrosionserscheinungen wirksam. Diese Aufgabe sollen Inhibitoren erfüllen, die z. B. Lackprimern zugesetzt werden. Dabei werden die Inhibitorsubstanzen durch hinzutretendes Wasser bzw. Elektrolytflüssigkeiten aus den Primern am Ort einer mechanischen Verletzung ausgewaschen. Sie gelangen so auf die zu schützende Metalloberfläche (Abb. 2).

Mit Chromatpigmenten versehene Korrosionsschutzprimer verhindern beispielsweise die

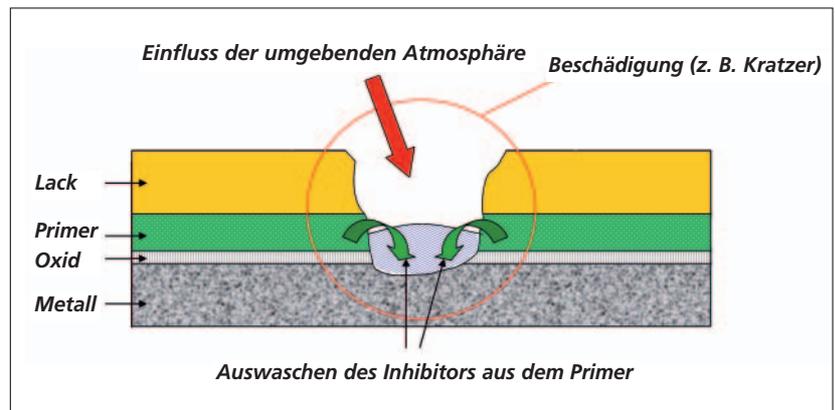


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Oberflächenschutzsystems für Metalle: Aktiver Korrosionsschutz erfolgt durch das Auswaschen (Leachen) von Inhibitorpigmenten aus Primern durch hinzutretendes Wasser (Kondensation) bzw. Elektrolytflüssigkeiten am Ort einer mechanischen Verletzung (z. B. Kratzer, Poren, Schnittkanten etc).

Korrosion von beschichteten und definiert geritzten Aluminiumblechen für mehrere 100 Stunden im Salzsprühetest.

Für den Einsatz als Inhibitor Komponente in organischen Beschichtungen stellen chromatfreie Inhibitoren – etwa auf Basis von Phosphaten, Titanaten oder organischen Verbindungen – ebenfalls viel versprechende Alternativen dar. Ihre Wirkung für sich genommen, also ohne sie in eine Lackmatrix einzubinden, wurde mit den oben genannten Korrosionsprüfungen und Analyseverfahren nachgewiesen. Die Herausforderung ist nun, die bekannten Wirkstoffe so zu modifizieren, dass sie eine Verträglichkeit mit den entsprechenden Komponenten des Lacksystems (Bindemittel, Additive etc.) aufweisen und die übrigen Lackeigenschaften (Verarbeitung, Haftung, Beständigkeit gegenüber bestimmten Medien) möglichst nicht beeinflussen.

Zur Untersuchung dieser Fragestellungen wurden am IFAM verschiedene Modellprimersysteme entwickelt, um die grundsätzlichen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten der Primersysteme und den Inhibitorsubstanzen zu prüfen und zu analysieren. In diesem Zusammenhang werden auch theoretische Simulationen der molekularen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Substanzen mit Hilfe von Molecular Modelling-Verfahren eingesetzt.

Beim aktiven Korrosionsschutz sollen die Wirkstoffe schnell und dosiert auf die verletzte Metalloberfläche gelangen, um dort eine Schutz-

schicht ausbilden zu können. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass hierbei die Stabilisierung der natürlichen Oxidschicht, die sich bei einer Verletzung auf jeder Metalloberfläche unmittelbar neu bildet, eine wichtige Rolle spielt. Diese passivierende Oxidschicht muss insbesondere gegen eine Umwandlung in eine Hydroxidschicht geschützt werden. Letztere stellt aufgrund ihrer chemischen und strukturellen Eigenschaften keinen wirksamen Schutz gegenüber aggressiven Elektrolyten dar und führt daher unweigerlich zur Korrosion (Abb. 3).

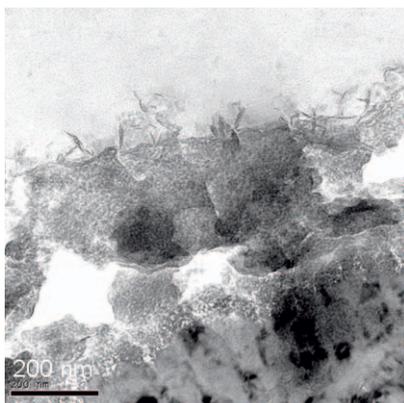
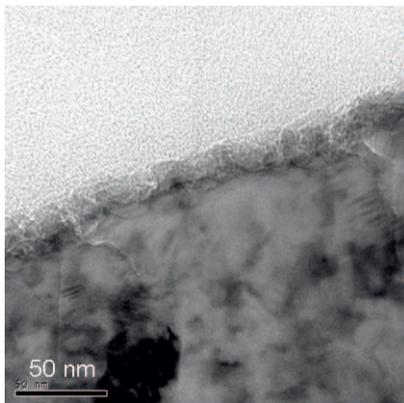


Abb. 3: Hydroxidbildung infolge korrosiver Belastung, untersucht mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM). Oben: Ausgangszustand mit natürlicher Oxidschicht; unten: Hydroxidbildung nach Belastung mit wässriger NaCl-Lösung (3 Gew.% NaCl). Aufgrund ihrer chemischen und strukturellen Eigenschaften stellen die entstandenen Hydroxide keine wirksame Barriere gegenüber korrosiven Angriffen dar.

Charakterisierung und Entwicklung chromatfreier Anodierschichten

Anodisierverfahren werden zur Herstellung von oxidischen Schutzschichten auf Metallen – vor allem Leichtmetallen – eingesetzt. Die dabei erzeugten Oxidschichten entstehen durch Umwandlung der obersten Metallschichten und erreichen bis zu 40 µm Dicke. Sie sind zunächst mikroporös. Für viele Anwendungen werden die porösen Oxide einer Nachverdichtung mit Heißwasser-, Dampf- oder Metallsalz-Verfahren unterzogen. Beim Korrosionsschutz von Aluminiumlegierungen hat sich das Anodisieren in Chromsäurebädern bewährt. Aus den eingangs genannten Gründen wird derzeit sowohl für den Bedarf in der Automobilindustrie als auch in der Luftfahrtbranche an der Entwicklung alternativer chromatfreier Anodisierverfahren gearbeitet.

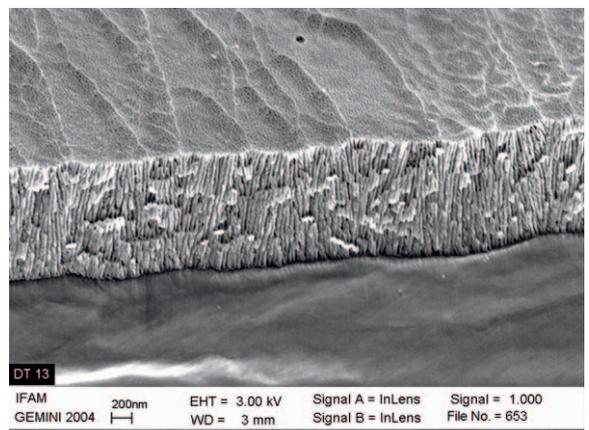
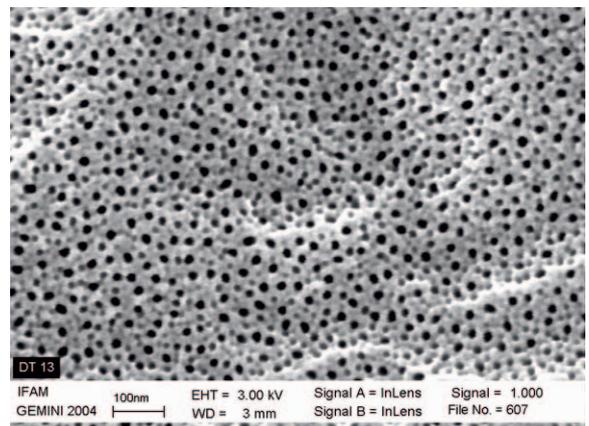


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Oberfläche (oben) und Bruchkante (unten) einer Anodierschicht (PSA-Anodisierung) auf einer plattierten Aluminiumlegierung (AA7475).

Neben dem Korrosionsschutz müssen die erzeugten oxidischen Deckschichten auch eine gute, langzeitbeständige Haftung von organischen Beschichtungen in Form von Lacken oder Klebstoffen ermöglichen. Hierbei spielt neben ihren chemischen Eigenschaften die Struktur der Oxidschichten, also ihre Porosität, eine wichtige Rolle. Sie soll ein Eindringen des Klebstoffes oder Lackes in die Porenstruktur (Abb. 4) ermöglichen und damit sowohl eine bessere Verzahnung von Oxid und Polymer ermöglichen als auch die aktive Fläche für die Anbindung organischer Moleküle vergrößern.

Ist das anodisierte Bauteil während des Gebrauchs mechanischen Belastungen ausgesetzt, spielt auch der Einfluss der Anodisierschichten auf das Ermüdungsverhalten des beschichteten Materials eine entscheidende Rolle. Aufgrund der Sprödigkeit der Oxide stellt ein sich bildender Riss in der Oxidschicht eine Gefahr dar: Durch die Möglichkeit einer nachfolgenden lokalen Risseinleitung in den Grundwerkstoff ist dies eine potentielle Sollbruchstelle für das Bauteil. Ein Ziel bei der Entwicklung von Anodisierschichten besteht daher darin, das sich unvermeidbar verschlechternde Ermüdungsverhalten des Bauteils so gering wie möglich zu halten.

Aktuelle Entwicklungsarbeiten am IFAM haben gezeigt, dass man mit Hilfe eines neuartigen laserakustischen Messverfahrens die elastischen Eigenschaften von Anodisierschichten zerstörungsfrei charakterisieren kann. Dieses Verfahren könnte zukünftig sowohl bei der Entwicklung von Anodisierschichten als auch zur Qualitätskontrolle der Schichten im Produktionsprozess eingesetzt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

In Einsatzbereichen mit anspruchsvollen Korrosionsschutz-Anforderungen ist die Umstellung auf alternative Verfahren und Werkstoffe als Ersatz für chromathaltige Oberflächenbeschichtungen derzeit eine der wichtigsten Herausforderungen. Eine Untersuchungsstrategie, die auf der Kombination ausgewählter sowie neu entwickelter Testverfahren mit elektrochemischen sowie oberflächen- und strukturanalytischen Untersuchungen beruht, erlaubt eine materialgerechte und zeitsparende Korrosionsprüfung. Insbesondere bei der Suche nach neuen Inhibitorsubstanzen und der Entwicklung und Bewertung entsprechender chromatfreier organischer Beschichtungen hat sich diese Vorgehensweise bewährt. Zur detaillierten Analyse molekularer Reaktionen und Wechselwirkungen von Inhibitoren kommen zunehmend – im Zuge der Weiterentwicklung der entsprechenden Softwaretools im Bereich der Materialentwicklung – auch begleitende theoretische Simulationen (Molecular Modelling) zum Einsatz.

Ansprechpartner

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

Institut

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

Permanente Trennschichten für Formgebungswerkzeuge durch Plasmapolymersation

Ausgangssituation

Bei der industriellen Fertigung von Kunststoffteilen, insbesondere von Reaktionskunststoffen (z. B. Polyurethan oder Epoxid), ist der Einsatz von Trennmitteln, die die Adhäsion zwischen dem zu entformenden Teil und der Formenoberfläche herabsetzen, notwendig, um gebrauchsfertige Formteile von höchster Qualität zu erhalten. Das Formteil muss nicht nur unbeschädigt, sondern auch leicht entnehmbar sein und zwar in der Regel, bevor das zu entformende Bauteil vollständig ausgehärtet ist.

Konventionelle Trennmittelsysteme (Lösungen oder Dispersionen), die normalerweise auf die Formteiloberfläche versprüht werden, bestehen aus trennaktiven Wirkstoffen und einem Trägermedium (in der Regel organische Lösemittel oder Wasser). Solche Systeme trennen immer in einer Mischung aus Kohäsions- und Adhäsionsbruch, wobei Trennmittel auf dem zu trennenden Teil verbleibt. Dies bereitet vielfach Schwierigkeiten bei der Weiterverarbeitung (Lackierung, Verklebung, Kaschierung) der Formteile. Es muss daher ein Reinigungsschritt zwischengeschaltet werden, was für den Nutzer zusätzliche Kosten verursacht. Zudem muss vor jeder Ausformung (oder zumindest regelmäßig) Trennmittel auf die Oberfläche der Formgebungswerkzeuge aufgetragen werden, was ebenfalls kostspielig ist und zu ungleichmäßigen Entformungsergebnissen führen kann. Schließlich emittieren diese Trennmittelsysteme erhebliche Mengen von Lösemitteln in die Umwelt.

Aufgabe

Ziel war die Entwicklung einer permanenten Trennschicht. Mit Hilfe dieser permanenten Trennschicht soll es möglich sein, selbst noch nicht vollständig ausgehärtete Bauteile sauber und ohne Kraftaufwand entformen zu können. Ferner darf die Oberflächenstruktur des Bauteils dabei nicht gestört, die Schicht verbraucht oder auf das Bauteil übertragen werden. Aus dieser Anforderung ergibt sich, dass sich die Trennwirkung direkt an der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Bauteil ergeben muss.

Als Beschichtungsverfahren sollte die Plasmapolymersation bei Niederdruck (ND) und bei Atmosphärendruck (AD) zum Einsatz kommen. Die Plasmapolymersation erlaubt nämlich, auf beliebigen Substraten und Geometrien konturerhaltende, nanoskalige (einige zehn bis wenige hundert nm) Funktionsschichten abzuscheiden.

Plasmapolymersation

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 Molekülzustände, die unter Abgabe von elektromagnetischer Strahlung zum Grundzustand zurückkehren, was zum charakteristischen Leuchten des Plasmas führt.

Die weitaus häufigste Art der technischen Erzeugung von Plasmen ist die gezielte Einstrahlung von elektrischen Feldern in ein Gasvolumen. Je nach verwendeter Frequenz unterscheidet man dabei z. B. zwischen Radiofrequenz- und Mikrowellenplasmen. Plasmen werden zunehmend in der Oberflächentechnik, z. B. zur Feinreinigung, zur Aktivierung und zur Abscheidung von funktionellen Schichten durch Plasmapolymersation eingesetzt.

Die Plasmapolymersation ist ein Verfahren, bei dem sich aus gasförmigen Monomeren, angeregt durch ein Plasma, auf frei wählbaren Substraten mehr oder weniger vernetzte Schichten niederschlagen. Voraussetzung für diesen Prozess ist das Vorhandensein von kettenbildenden Atomen wie Kohlenstoff, Silizium oder Schwefel im Arbeitsgas. Da die Monomermoleküle im Plasma zum großen Teil zu reaktiven Teilchen »zerschlagen« werden, bleibt die chemische Struktur des Ausgangsgases im Produkt höchstens partiell erhalten, was Vernetzung und ungeordnete Struktur zur Folge hat. Strukturerehalt und Vernetzungsgrad lassen sich über Prozessparameter wie Druck, Arbeitsgasfluss und eingespeiste elektrische Leistung steuern, so dass man auch sog. Gradienten-Schichten aufbauen

kann, die z. B. einen über die Dicke zunehmenden Vernetzungsgrad aufweisen.

Aus diesem Entstehungsmechanismus von Plasmapolymere 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.

Schichtentwicklung mit der Niederdruck-Plasmapolymerisation

Eine Schicht, die die eingangs genannten Anforderungen erfüllt, besitzt ein stabiles, dreidimensionales Si-O-Si-Gerüst und eine hohe Dichte an chemisch abweisenden Methylgruppen. Ein Plasmapolymerefilm, der als Einfach-Schicht ausgeführt wird, kann die gewünschte chemische Struktur nicht aufweisen, da Methylgruppen immer Endgruppen sind, über die keine Vernetzung erfolgen kann. Die vom IFAM entwickelten permanenten Trennschichten sind daher Gradientenschichten (Abb. 1), deren Vernetzungsgrad zur Oberfläche hin sinkt, wobei die Dichte an Methylgruppen ansteigt.

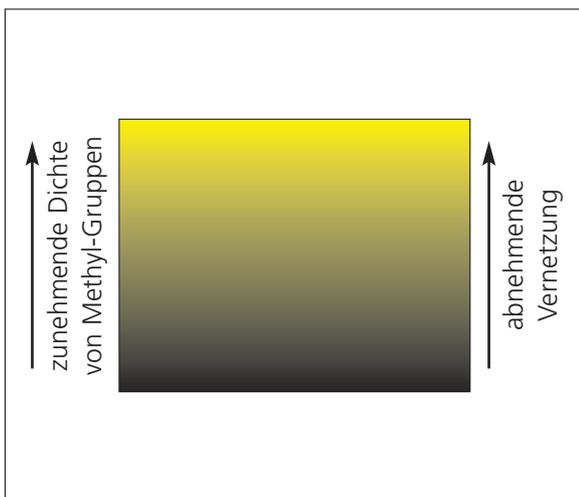


Abb. 1: Gradientenaufbau einer permanenten Trennschicht.

Durch diesen Aufbau besitzt die Trennschicht eine gute Haftung zum Substrat und aufgrund der hohen Vernetzung eine ausreichende mechanische Stabilität. Die Güte der Trennwirkung, die im nachfolgenden beschrieben wird, richtet sich nach der Anzahl der ohne Reparatur durchführbaren Entformungen und dem Kraftaufwand, mit dem ein Bauteil entformt werden kann.

Die Dauerhaftigkeit der Trenneigenschaft

Die Permanenz der plasmapolymere Trennschicht ist zunächst mit Hilfe von ESCA nachgewiesen worden und zwar dadurch, dass der für die Trennschicht charakteristische Si – Gehalt an der Formteiloberfläche über 10 Entformungen beobachtet worden ist (Abb. 2). Dabei hat sich gezeigt, dass nur ein sehr geringer Übertrag der Trennschicht auf das zu entformende Bauteil stattfindet. Hierbei handelt es sich um eine zu vernachlässigende Übertragungsmenge.

Die Dauerhaftigkeit der Trenneigenschaften wurde anschließend im praktischen Einsatz getestet.

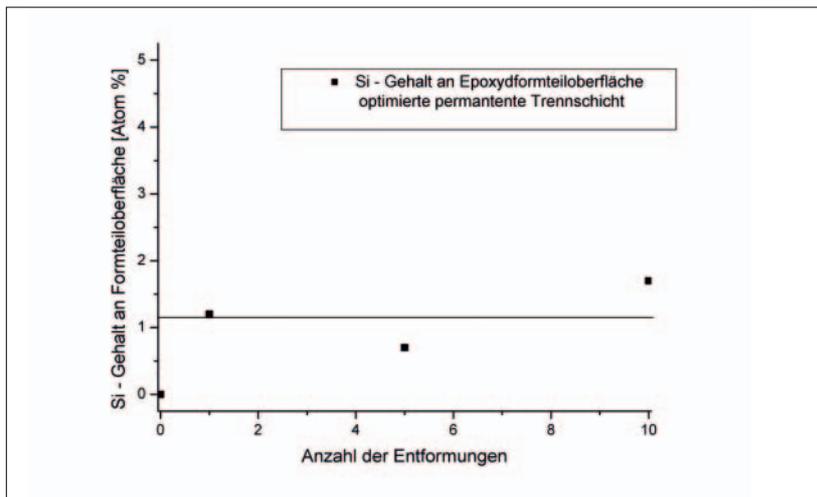


Abb. 2: Permanenzuntersuchung plasmapolymere Trennschichten.

¹⁾ ESCA = Electron Spectroscopy for Chemical Analysis

Permanente Trennschichten auf Formen der Kunststoffverarbeitung

Das folgende Bild (Abb. 3) zeigt ein kleineres Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Automobilindustrie. In solchen Formen werden Polyurethan-Schaumstoffe verarbeitet, die eine besonders hohe Anforderung an die Trennwirkung stellen. Ziel ist es, 1000 bis 10.000 Entformungen (je nach Anwendung) mit einer Beschichtung durchführen zu können. Dies konnte bisher in Einzelfällen nachgewiesen werden (1.200 Entformungen ohne Verschlechterung der Trennwirkung). Damit wird deutlich, welches Potenzial in dieser Entwicklung steckt, zumal auch größere Anlagen (5 m³) für die

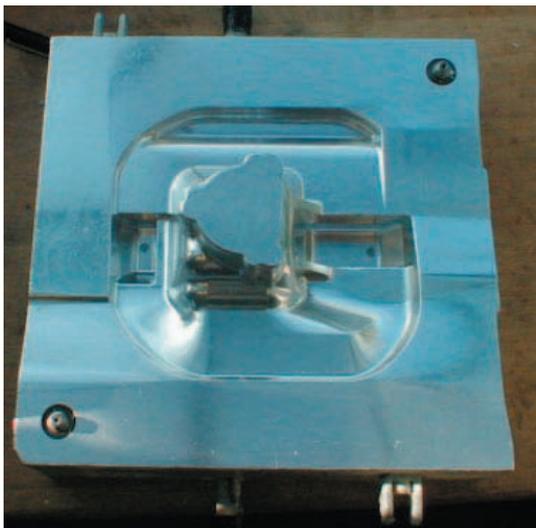


Abb. 3: Form für die Hinterschäumung von PKW – Außenspiegeln.

Beschichtung größerer Formen zur Verfügung stehen. Hierin können z. B. Formen zur Herstellung von Armaturenblechern beschichtet werden.

Für andere Anwendungen, wie z. B. die Entformung bei Kleinserien (einige 20 bis wenige hundert Teile pro Jahr) im Flugzeugbau (CFK-Bauteile auf Epoxidbasis), wird bereits die Qualifikation für die Produktionseinführung durchgeführt. Im Rahmen dieser Qualifikation konnten bereits 30 erfolgreiche Entformungen bei größeren Flugzeugbauteilen durchgeführt werden.

Die Methode der ND-Plasmapolymerisation eignet sich hervorragend für die Darstellung von Gradientenschichten. Die Plasmaparameter (Leistung, Precursorfluss etc.) können während der Abscheidung variiert werden, so dass sich die chemische Zusammensetzung der Schichten fast stufenlos einstellen lässt. Gradientenschichten können daher problemlos in einem »Guss« präpariert werden.

Schichtentwicklung mit der Atmosphärendruck-Plasmapolymerisation

Die Verwendung von Atmosphärendruck Plasmatechnologie, die im IFAM als Düsen-Technik vorhanden ist und eine OpenAir-Plasmatechnik darstellt, hat im Vergleich zur Niederdruck-Plasmatechnik den Vorteil, dass auch Formen beschichtet werden können, die in keinen Vakuum-Reaktor passen. Die Beschichtung von kompliziert geformten 3-D-Formen bleibt jedoch der ND-Technik vorbehalten.

Aufbauend auf den guten Trennergebnissen der permanenten ND-Trennschichten wurden entsprechend die AD-Trennschichten entwickelt. Hierzu wurde zunächst eine spezielle Precursor-einspeisung für die Düsen entwickelt und gebaut. Anschließend konnten durch aufwändige Versuchsreihen Schichten dargestellt werden, deren atomare und funktionelle Zusammensetzung (Abb. 4) mit denen der ND-Trennschicht nahezu identisch ist.

Für die Entformungsversuche wurde eine Multilayerschicht präpariert, wobei der Top-Layer die höchste Dichte an chemisch abweisenden Methylgruppen aufweist und der Bottom-Layer den höchsten Vernetzungsgrad. Eine Prinzipskizze der gesamten Trennschicht zeigt Abb. 5.

Permanente Trennschichten auf Formen der Luftfahrtindustrie

In enger Zusammenarbeit mit der Luftfahrtindustrie wurde eine Modell-Metallform zur Herstellung eines CFK-Bauteils mit dieser AD-Trennschicht versehen. Das verwendete Epoxidharz wurde mit einem Druck von 6 bar in die Form gepresst und bei einer Temperatur von 180 °C ausgehärtet. Trotz dieser hohen thermischen und

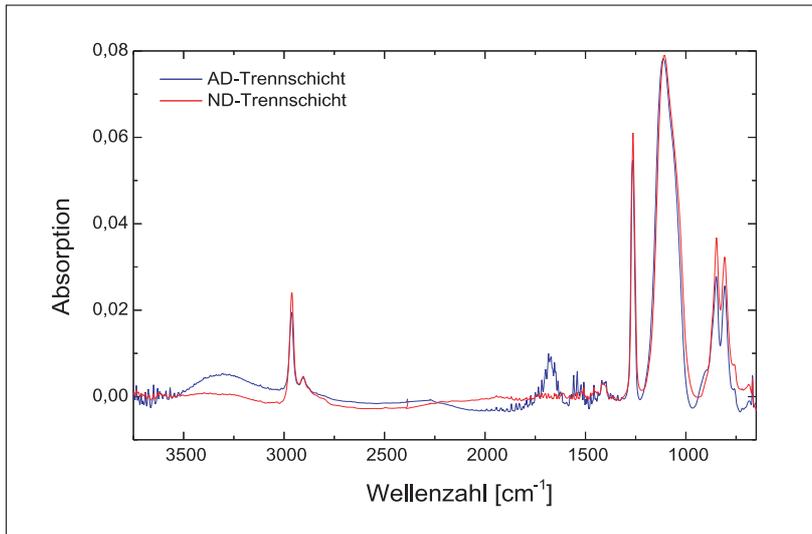


Abb. 4: Infrarotspektrum einer Niederdruck (ND)- und einer Atmosphärendruck (AD)-Trennschicht.

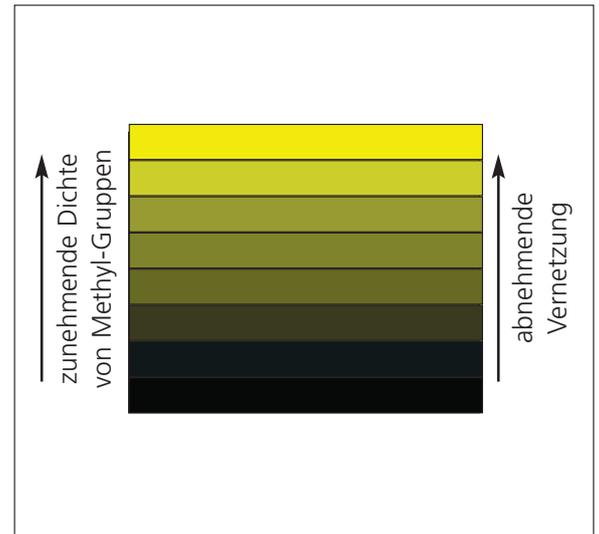


Abb. 5: Multilayeraufbau einer permanenten Atmosphärendruck-Trennschicht.

mechanischen Belastung konnten bisher drei erfolgreiche Entformungen durchgeführt werden, ohne dass die Schicht zerstört wurde. Ein Schichtübertrag auf die entformten Bauteile war nicht zu erkennen.

Ausblick

Die permanenten ND-Trennschichten sind für die Abformung von CFK-Bauteilen, die aus Epoxid-Harz aufgebaut sind, soweit ausgereift, dass sie von einem Flugzeughersteller für ihre Produktion qualifiziert werden. Für Polyurethanschäume, die in der Automobilindustrie große Bedeutung haben, konnte das Anwendungspotenzial gezeigt werden. Jedoch muss die Trenneigenschaft für die verschiedensten Schäume noch gezeigt bzw. gesteigert werden.

Im Bereich der AD-Plasmatechnik muss das vorhandene Schichtsystem auf größere Formen transferiert werden, um die AD-Trennschichten sinnvoll einsetzen zu können. In einem Forschungsprojekt, das zusammen mit der Flugzeugindustrie durchgeführt wird, sollen die AD-Trennschichten auch auf nichtmetallischen Formen erzeugt werden.

Ansprechpartner

Klaus-D. Vissing
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 28
E-Mail vi@ifam.fraunhofer.de

Dirk Salz
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 26
E-Mail sa@ifam.fraunhofer.de

Institut

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

Der Ink-Jet als flexibles Fertigungsinstrument in der Mikrosystemtechnik

Ausgangssituation

Der Trend zur weiteren Miniaturisierung stellt auch die Klebtechnik hinsichtlich der für eine Verbindung zu verarbeitenden Klebstoffmengen vor immer neue Herausforderungen. Dies gilt auch für elektrisch leitfähige Klebverbindungen. Zum Auftragen kleinster Klebstoffmengen im Bereich von 50 bis 500 pl hat sich der Ink-Jet bereits grundsätzlich bewährt. Die am Markt heute verfügbaren metallpulvergefüllten, elektrisch leitfähigen Klebstoffe lassen sich mit dieser Technik allerdings nicht verarbeiten.

Soll ein Leitklebstoff verarbeitet werden, so beträgt der derzeit reproduzierbar realisierbare minimale Tropfendurchmesser ca. 150 µm – erreicht mit der klassischen Dispensertechnik. Zum Vergleich: die mit dem Ink-Jet aufgetragenen Klebstoffpunkte erreichen Durchmesser bis zu ≤ 30 µm. Am Markt verfügbar sind bereits elektrisch leitfähige edelmetallgefüllte Tinten, die mit dem Ink-Jet appliziert werden können. Bei dieser Technologie werden kleinste Gold- oder Silberpartikel – die angegebenen Teilchengrößen betragen i. a. ≤ 20 nm – in Lösemittel mit einem Anteil von 30–50 Gew.% dispergiert. Das Lösemittel wird nach dem Auftrag der Tinten entfernt. Dadurch wird der für die elektrische Leitfähigkeit erforderliche Füllstoffgehalt erreicht. Zur Herstellung belastbarer Klebverbindungen sind diese Tinten ungeeignet. Was steht also der Anwendung des Ink-Jets für die Applikation kleinster Mengen elektrisch leitfähigen Klebstoffs im Wege?

Aufgabe

Die im Ink-Jet üblicherweise verwendeten Düsen haben einen Innendurchmesser ≤ 100 µm. Dieser schränkt die Größe der dosierbaren Füllstoffe erheblich ein. Theoretische Betrachtungen gehen von einer oberen Teilchengröße von ca. 4 µm für rundliche Partikel aus. Kommerziell erhältliche Leitklebstoffe enthalten i. a. Silberpartikel mit deutlich größeren Abmaßen und/oder anderen Geometrien. Diese würden nach kurzer Zeit zu einer Blockade des Dosierventils führen. Eine weitere für diese Applikation kritische Größe ist die Viskosität des

gefüllten Klebsystems. Sie sollte ≤ 100 mPas betragen. Bei solchen Viskositäten müssen Vorkehrungen getroffen werden, um die Agglomeration der Füllstoffe und deren Sedimentation auf Grund des großen Dichteunterschiedes zwischen Harz und Silber zu vermeiden. Teilchenagglomeration führt zu Partikeln mit effektiv größeren Durchmessern, Sedimentation erhöht partiell den Füllstoffgehalt. Beides beeinflusst das Dosierergebnis negativ bis hin zum Verstopfen der Düse.

Die Möglichkeit der Formulierung eines für den Ink-Jet geeigneten Leitklebstoffes wurde exemplarisch an einem silbergefüllten Klebsystem mit zweistufiger Härtung aufgezeigt. Nach einer ersten Härtungsstufe sollte der Klebstoff eine trockene Oberfläche aufweisen, aber noch aufschmelzbar sein. Innerhalb einer zweiten Härtungsstufe sollten dann die eigentliche Klebung (Benetzung des zweiten Fügeteils) und die endgültige Aushärtung erfolgen.

2-stufiger Härtungsmechanismus – eine Kombination aus UV- und thermischer Härtung

Die erste Härtungsstufe wurde als radikalische UV-Härtung konzipiert. Nach dem Auftrag auf das Substrat wird der Klebstoff mit UV-Strahlen teilgehärtet (Prepreg) und kann in dieser Form bis zur weiteren Verarbeitung im Kühlschrank gelagert werden. Auf Grund des radikalischen Charakters der UV-Reaktion ist es erforderlich, die Härtung in einer Inertgasatmosphäre, z. B. unter Stickstoff, durchzuführen. Nach diesem Härtungsschritt ist die Klebstoffoberfläche trocken. Der Klebstoff liegt in diesem Zustand quasi als ein Thermoplast mit reaktiven Epoxidseitengruppen vor. Der Klebstoff wird im zweiten Härtungsschritt durch Wärmezufuhr aufgeschmolzen, so dass der zweite Fügepartner vom Klebstoff benetzt werden kann. Da thermoplastische Materialien zähe Schmelzen liefern, muss der Fügevorgang unter Druck erfolgen. Mit dem Aufschmelzen startet als zweiter Härtungsschritt die Vernetzung der Epoxidgruppen. Nach der Benetzung des zweiten Fügepartners kann die thermische Härtung auch im konventionellen Ofen beendet werden (Abb. 1).

Es entsteht ein dreidimensionales Netzwerk. Die Netzwerkdicke und damit die mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Klebstoffs können durch den Gehalt an Epoxidharzseitengruppen modifiziert werden (Abb. 1).

Zur Realisierung der zweistufigen Härtung wurde eine Acrylat-Epoxidharzmatrix formuliert. Diese Harzformulierung besitzt eine sehr niedrige Viskosität von ca. 3 mPas und newtonsches Fließverhalten. Durch geeignete Wahl der Ausgangsstoffe ist es möglich, nach der UV-Härtung einen aufschmelzbaren Film zu erzeugen.

Um im ausgehärteten Zustand eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit zu erzielen, werden Leitklebstoffe als hochgefüllte Systeme formuliert. Da ein Teil des Harzes bei der Strahlungshärtung praktisch »im Schatten« der Silberpartikel liegt, werden an die UV-Härtung eines solchen Materials hohe Anforderungen gestellt. Auf dem Markt gibt es derzeit keinen elektrisch leitfähigen Klebstoff, bei dem eine radikalische UV-Härtung realisiert wird. Der hier formulierte Klebstoff wurde mit 70 Gew. % (= ca. 20 Vol. %) runderlicher Silber-

partikel der Firma Metalor gefüllt ($D_{90} = 4,1 \mu\text{m}$). Durch eine Kombination verschiedener UV-Initiatoren ist eine Härtung dieses Materials in Schichten von bis zu ca. 30 μm Dicke möglich.

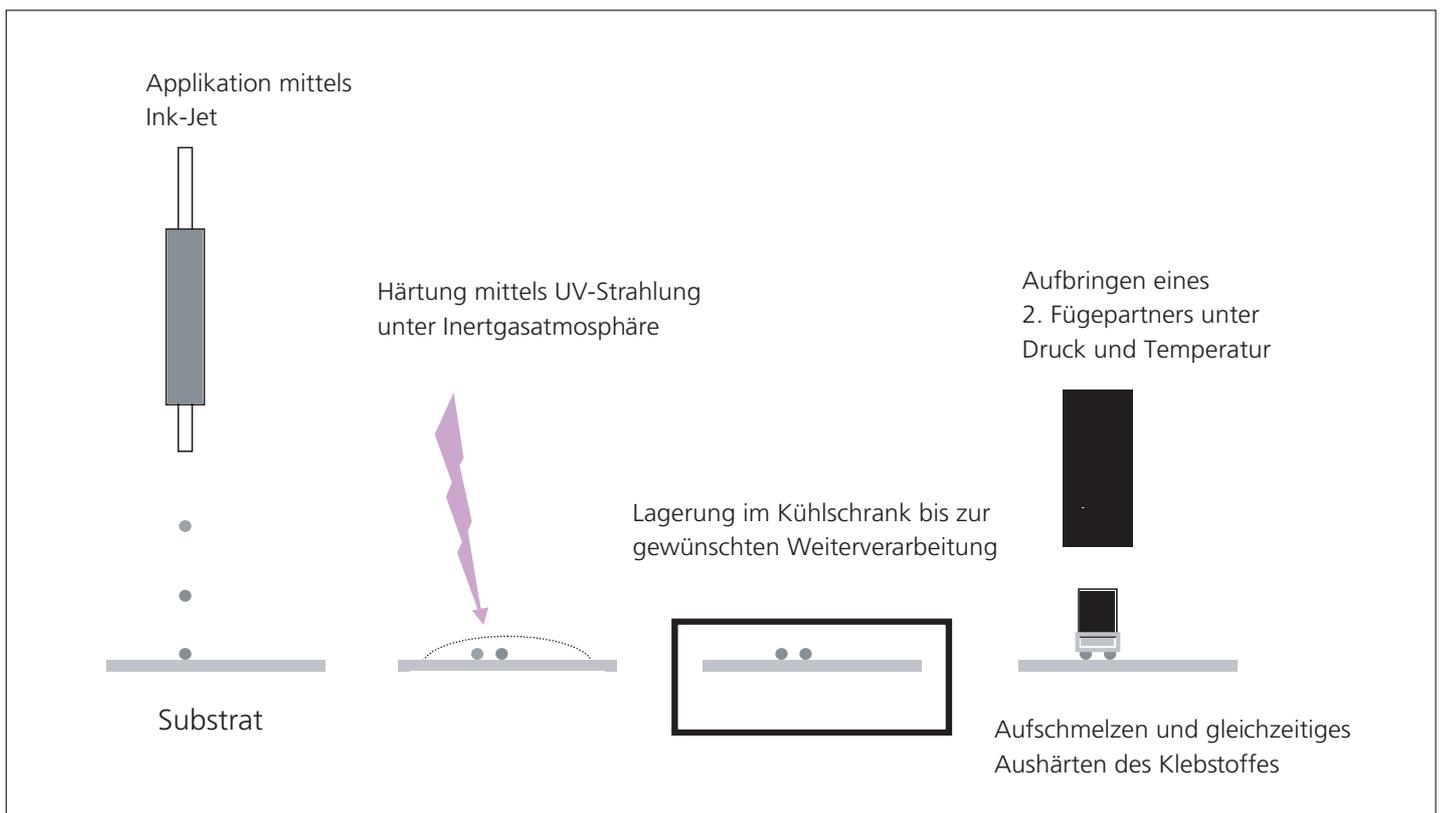
Der zweite Härtungsschritt erfolgt thermisch. Die Reaktion der Epoxidgruppen wird mit Hilfe von Imidazolen beschleunigt. Nach der thermischen Härtung werden ein spezifischer Widerstand von ca. 10^{-4} cm und Klebfestigkeiten von 10–15 N für SMD-Widerstände (Bauteil 1206 auf Kupfer) erreicht.

Klebstoffauftrag mit dem Ink-Jet

Für die Dosierversuche wurde ein neu entwickeltes Gerät der Firma Microdrop eingesetzt.

Der Klebstoff wird über eine Glaskapillare dosiert, die sich an der Spitze zu einer Düse von 30 bis 100 μm Innendurchmesser verjüngt. Die Glaskapillare ist von einem Piezo-Aktor umschlossen, der bei Anlegen einer elektrischen Spannung kontrahiert und in dem in der Glas-

Abb. 1: Schematische Darstellung der Fertigung.



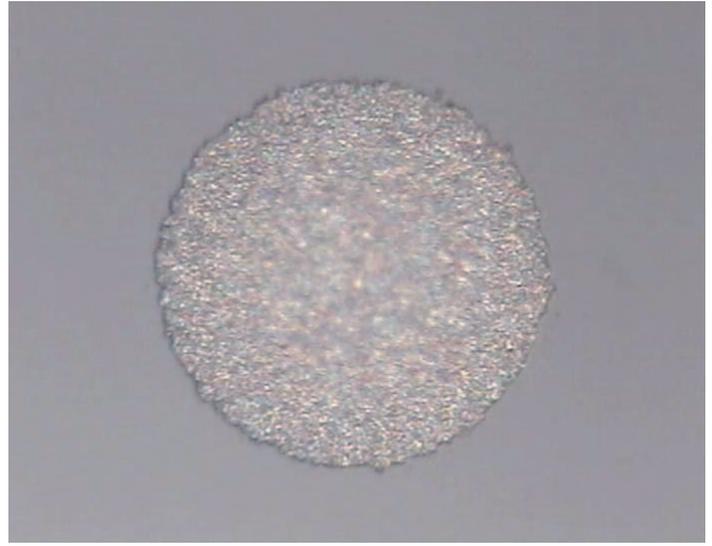
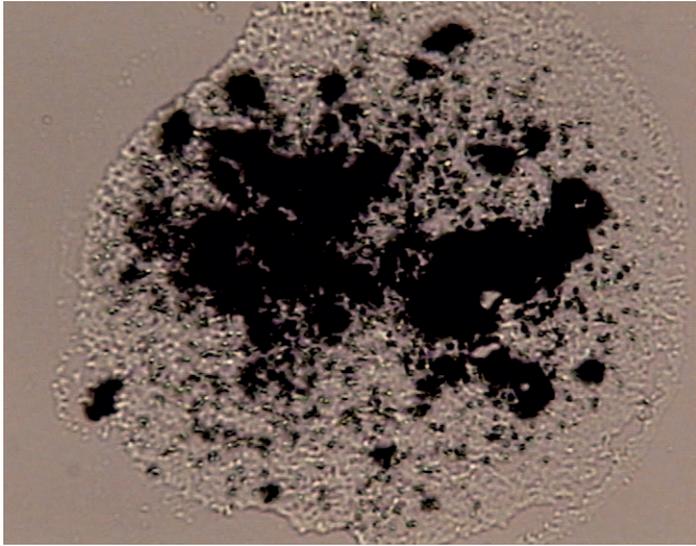


Abb. 2: Vorher (links) inhomogene Verteilung von Silberpartikeln nach der Applikation, nachher (rechts) homogene Verteilung.

kapillare befindlichen Klebstoff einen Druckanstieg bewirkt. Dadurch kommt es am Ausgang der Düse zu einem Flüssigkeitsaustritt. Ein Mikrotropfen bildet sich. Die Tropfengröße ist außer von den Materialparametern des Klebstoffs vom Düsendurchmesser abhängig und beträgt ca. 30–100 µm im Durchmesser.

Eine inhomogene Verteilung der Füllstoffe aufgrund von Sedimentation und Agglomeration (Abb. 2, links), führt zu unbefriedigenden Ergebnissen: Es wird keine stabile Tropfenbildung erreicht, und die Düse kann verstopfen.

Wie bereits erwähnt, können mit dem Ink-Jet Klebstoffe mit Viskositäten bis ca. 100 mPas verarbeitet werden. Die hier entwickelten silbergefüllten Klebstoffe zeigen ein strukturviskoses Fließverhalten, das heißt, bei geringem Schergefälle sind die Klebstoffe höher viskos (ca. 1 Pas), bei hohem Schergefälle niedriger viskos. Das während der Applikation in der Düse auftretende Schergefälle wird vom Hersteller auf etwa 10^5 s^{-1} abgeschätzt. Bei einem Schergefälle von 2500 s^{-1} sinkt die Viskosität auf 20 bis 40 mPas.

Neben der Sedimentation muss die Agglomeration bzw. Aggregation der Füllstoffpartikel verhindert werden. Silber ist ein sehr weiches und duktiles Material mit einer verhältnismäßig reaktiven Oberfläche. Das führt dazu, dass die Silberpartikel dazu neigen, bei äußerem Energieeintrag,

beispielsweise im Ultraschallbad, zusammenzusintern. Diese Tendenz kann durch eine geeignete Oberflächenchemie minimiert werden. Die Oberflächen der Silberpartikel dürfen aber nicht so stark voneinander abgeschirmt werden, dass nach der Härtung die elektrische Leitfähigkeit des Klebstoffs beeinträchtigt wird.

Abbildung 2 (rechts) zeigt einen mit dem Ink-Jet applizierten silbergefüllten Klebstofftropfen mit einer homogenen Verteilung des Füllstoffes. Die Sedimentation der Füllstoffpartikel während der Lagerung kann durch eine vorsichtige Homogenisierung im Ultraschallbad vor der Applikation rückgängig gemacht werden.

Fazit

Durch die Entwicklung neuer Harzsysteme und Füllstoffe sowie eines neuen Ink-Jet-Konzeptes steht nunmehr eine Technologie zur Nutzung des Ink-Jets für die Fertigung elektrisch leitfähiger Klebverbindungen in der Mikrosystemtechnik grundsätzlich zur Verfügung.

Auftraggeber

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden von der Europäischen Kommission im GROWTH-Programm unter G1RD-CT-2002-00656 gefördert.

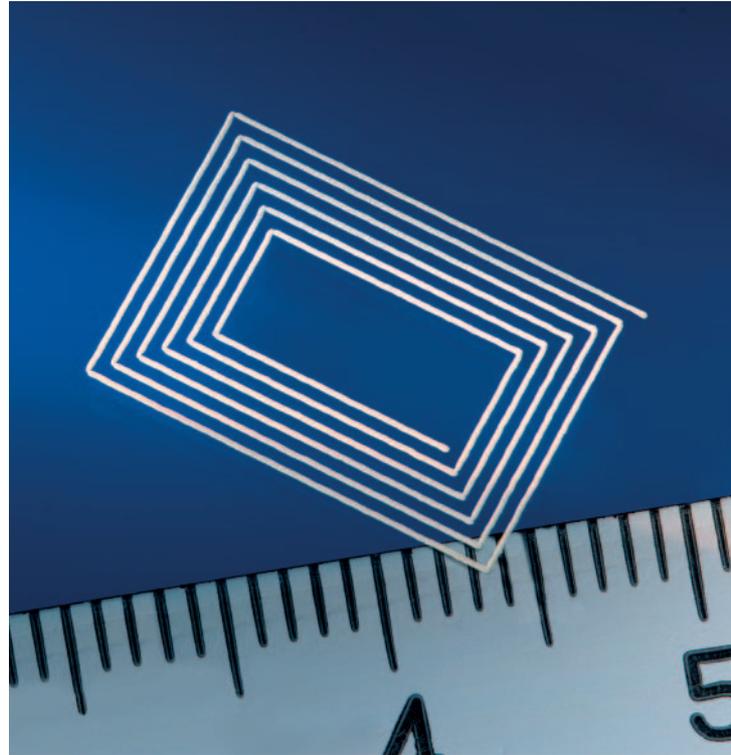
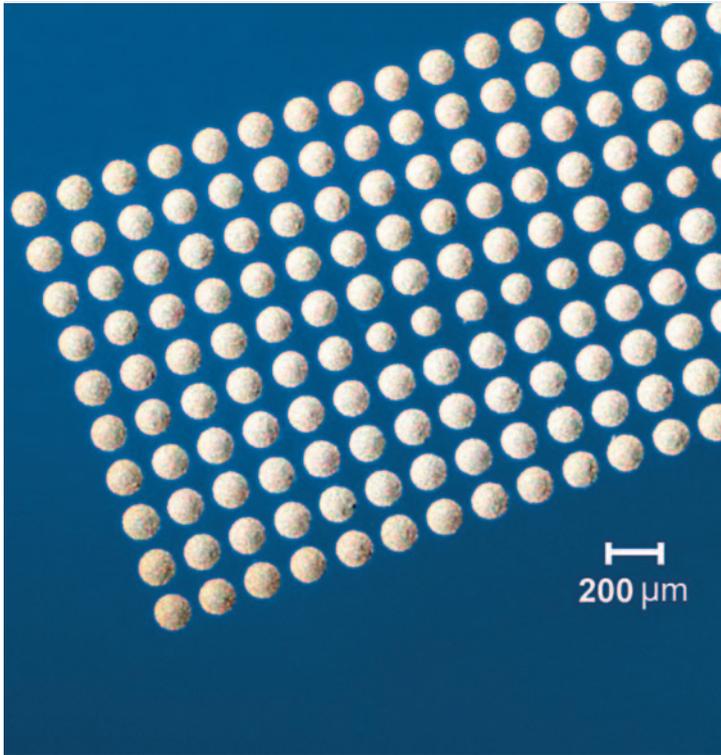


Abb. 3: Applikationsbeispiele.

Ansprechpartner

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

Institut

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

Charakterisierung des Wärmeübergangs durch dünne Klebschichten

In modernen mikroelektronischen Bauteilen entsteht die elektrische Verlustleistung auf immer kleinerem Raum und muss über immer kleinere Querschnitte abgeführt werden. Es kann somit leichter zu einer Überhitzung und damit Beeinträchtigung der Lebensdauer und Funktionssicherheit der Komponenten kommen. In zunehmendem Maße wird zur Kontaktierung die Klebtechnik eingesetzt. Neben einer zuverlässigen Fixierung der Bauteile und dem Abbau von mechanischen Spannungen muss der Klebstoff auch den sicheren Abtransport der entstehenden Verlustwärme gewährleisten. In der Technik werden elektrisch bzw. thermisch leitfähige Klebverbindungen meist in Schichtdicken von 20–50 µm ausgeführt. Gerade in diesem Bereich liegen aber bisher nur wenige verlässliche Wärmeleitfähigkeitsdaten vor, da herkömmliche Instrumente zur Messung der Wärmeleitfähigkeit Proben erfordern, deren Stärken im Bereich einiger Millimeter liegen.

Aufgabe

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde vom IFAM auf Basis eines kommerziell verfügbaren Instruments ein Verfahren entwickelt, das die Wärmeleitfähigkeitsmessung auch an dünnen Klebschichten erlaubt. An zwei für mikroelektronische Anwendungen typischen

Klebsystemen wurden Messungen im Schichtdickenbereich von ca. 50–500 µm durchgeführt. Auf dieser Grundlage konnte schließlich ein einfaches Modell zur Anpassung, Extrapolation und Vorhersage der Wärmeleitfähigkeit von dünnen Klebfugen entwickelt werden.

Wärmeleitung in dünnen Klebschichten

Im allgemeinen wird davon ausgegangen, dass es sich bei der Wärmeleitfähigkeit um eine materialspezifische Größe handelt, die nicht von den äußeren Dimensionen der Probe abhängt. Vergleicht man jedoch die Wärmeleitfähigkeit eines Klebstoffs, die an einer massiven Probe gemessen wurde, mit dem an einer Klebfuge ermittelten Wert, stellt man oftmals deutliche Abweichungen fest. Meist liegt der Wert für die Klebfuge unter dem Bulk-Wert, und die Abweichung nimmt mit dünner werdender Klebschicht immer mehr zu. Dieser Befund kann damit erklärt werden, dass die Klebschicht nicht vollständig homogen aufgebaut ist, sondern in der Nähe der Klebstoff-Substrat-Grenze andere Eigenschaften annimmt als im Bulk. So kann der Wärmedurchtritt vom Substrat in den Klebstoff durch Oberflächenschichten auf dem Substrat oder durch Benetzungsfehler behindert sein. Da die meisten Wärmeleitklebstoffe hochgefüllte Systeme darstellen, spielen auch die Konzen-

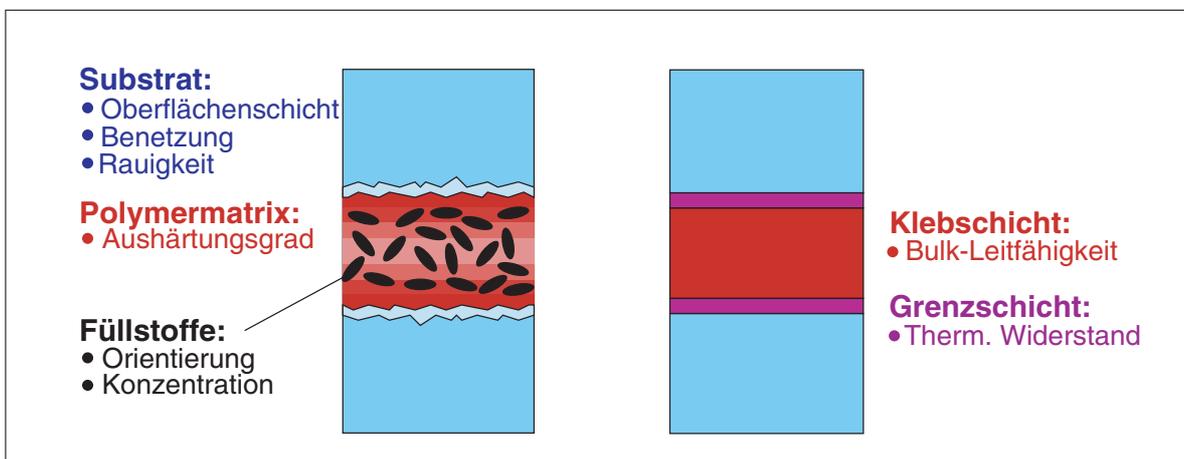


Abb. 1: Klebfuge schematisch und im Modell.

tration und die Orientierung der Füllstoffpartikel in der Nähe der Grenze zum Substrat eine Rolle.

Um ein handhabbares Modell für die Wärmeleitung in der Klebfuge zu erhalten, ist es sinnvoll, die oben angeführten Zusammenhänge mit ihren zahlreichen Einflussgrößen stark zu vereinfachen. Dazu wird, wie in Abb. 1 skizziert, angenommen, dass sich alle »nicht-idealen« Einflüsse durch Oberflächen- und Orientierungseffekte in zwei dünnen Grenzschichten konzentrieren. Zwischen den beiden Grenzschichten nimmt der Klebstoff hingegen seine Bulk-Eigenschaften an und besitzt die Wärmeleitfähigkeit, die man auch an einer dicken Schicht messen würde. Thermischer Widerstand der Grenzschicht und Bulk-Wärmeleitfähigkeit des Klebstoffs reichen nach diesem Modell aus, um die Wärmeleitfähigkeit der Klebfuge für verschiedene Schichtdicken vollständig zu charakterisieren.

Eingesetztes Messverfahren

Der thermische Widerstand, den eine dünne Klebfuge dem Wärmefluss entgegensetzt, ist sehr gering. Dies ist einerseits natürlich für die technische Anwendung erwünscht, erschwert aber andererseits die genaue experimentelle Bestimmung ihrer thermischen Eigenschaften. Aus diesem Grund wurde für die Untersuchungen ein Fotoflash-Verfahren ausgewählt, das speziell zur Messung dünner, gut wärmeleitender Proben geeignet ist. Bei Fotoflash-Verfahren, die durch ASTM E 1461 standardisiert sind, erfolgt die

thermische Anregung auf optischem Wege durch einen kurzen intensiven Lichtpuls, der die Vorderseite einer plättchenförmigen Probe erwärmt. Aus der Zeitverzögerung, mit der die Wärmefront die Probenrückseite erreicht, lässt sich dann die Wärmeleitfähigkeit des Materials berechnen. Dadurch, dass die Messung der Rückseitentemperatur ebenfalls berührungslos erfolgt, wird eine wichtige Fehlerquelle, nämlich das Auftreten von thermischen Widerständen an den Kontaktstellen zwischen Messinstrument und Probe, ausgeschlossen.

Als weitere Vorteile der Fotoflash-Methode sind die kurzen Messzeiten und der geringe Materialverbrauch, bedingt durch die kleinen Probenabmessungen, zu nennen. Wie Abb. 2 zeigt, lassen sich bis zu vier Proben gleichzeitig in das Messinstrument einsetzen und bei Temperaturen bis zu 300 °C vermessen.

Für die Genauigkeit der gesamten Messung ist es entscheidend, dass die Dicke der Klebschicht mit hoher Präzision eingestellt wird (Abb. 3).

So muss z. B. eine Klebschicht mit einer Dicke von 50 µm auf 2,5 µm genau gefertigt werden, um den Messfehler für die Wärmeleitfähigkeit nicht über 10% anwachsen zu lassen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen sollen am Beispiel zweier typischer Klebstoffe dargestellt werden: einem keramisch

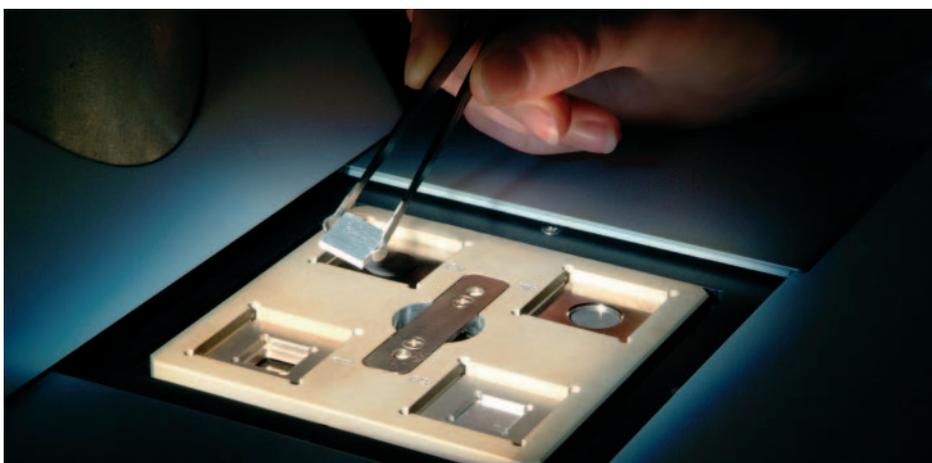


Abb. 2: Vorbereitung der Wärmeleitfähigkeitsmessung im Fotoflash-Gerät.



Abb. 3: Werkzeug zur Herstellung von Klebproben mit gut definierter Klebschichtdicke.

gefüllten, thermisch leitenden Klebstoff auf Silikonharzbasis (TCA) und einem silbergefüllten elektrisch leitenden Epoxid-Klebstoff (ICA). Bei Messungen an freitragenden Klebstofffolien, Halbsandwiches und Sandwiches stellte sich heraus, dass die Wärmeleitfähigkeit auch von der Probengeometrie abhängt. Es kann vermutet werden, dass der Herstellungsprozess Einfluss auf die Struktur der Klebschicht und damit auf ihre Wärmeleitfähigkeit nimmt. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse konzentrieren sich auf die in der Praxis relevanten Sandwich-Geometrien.

Als Substrate für die Sandwichproben wurden verschiedene Aluminiumlegierungen (Al99.5 und AlMgSi1) und Silicium in unterschiedlicher Dicke verwendet. Eine Abhängigkeit der gemessenen Wärmeleitfähigkeit der Klebschicht vom verwendeten Substrat konnte dabei nicht beobachtet werden.

Abb. 4 zeigt, wie sich die Wärmeleitfähigkeit der beiden untersuchten Klebstoffe mit abnehmender Klebschichtdicke verringert. Für beide Klebstoffe gelingt es, die Vulk-Wärmeleitfähigkeit und den thermischen Grenzschichtwiderstand genau zu ermitteln, weil eine große Anzahl von Messpunkten vorliegt, die einen weiten Schichtdickenbereich abdecken. Das silbergefüllte Epoxidharz besitzt eine recht hohe Bulk-Wärmeleitfähigkeit, die mehr als doppelt so hoch liegt wie beim keramisch gefüllten Silikon. Aus

diesem Grund macht sich der thermische Grenzschichtwiderstand beim ICA viel deutlicher durch eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit bei sinkender Klebschichtdicke bemerkbar als beim TCA, obwohl die Grenzschichtwiderstände für beide Klebstoffe fast gleich groß sind.

Durch die Untersuchungen konnte außerdem nachgewiesen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit einer Klebschicht außer von der Zusammensetzung des Klebstoffs und der Schichtdicke noch von einer Reihe weiterer Faktoren abhängt. Zu nennen sind hier unter anderem das Porenvolumen des Klebstoffs, die möglicherweise fertigungstechnisch induzierte Orientierung der Füllstoffe sowie der Aushärtungsgrad der Polymermatrix, der durch die Härtungstemperatur maßgeblich beeinflusst wird. Für den ICA wird das Wärmeleitungsvermögen der Klebschicht durch eine Orientierung der plättchenförmigen Silberpartikel maßgeblich mitbestimmt. Das Ausmaß der Orientierung wiederum hängt von den bei der Herstellung der Klebung auftretenden Scherkräften ab.

Abb. 5 zeigt, wie die Härtungstemperatur den Aushärtungsgrad der Polymermatrix beeinflusst: Eine bei 130 °C ausgehärtete Probe des ICA kann durch Erwärmung auf 150 °C nachgehärtet werden, was nach dem Durchlaufen von drei Temperaturzyklen eine deutliche Steigerung der Wärmeleitfähigkeit zur Folge hat.

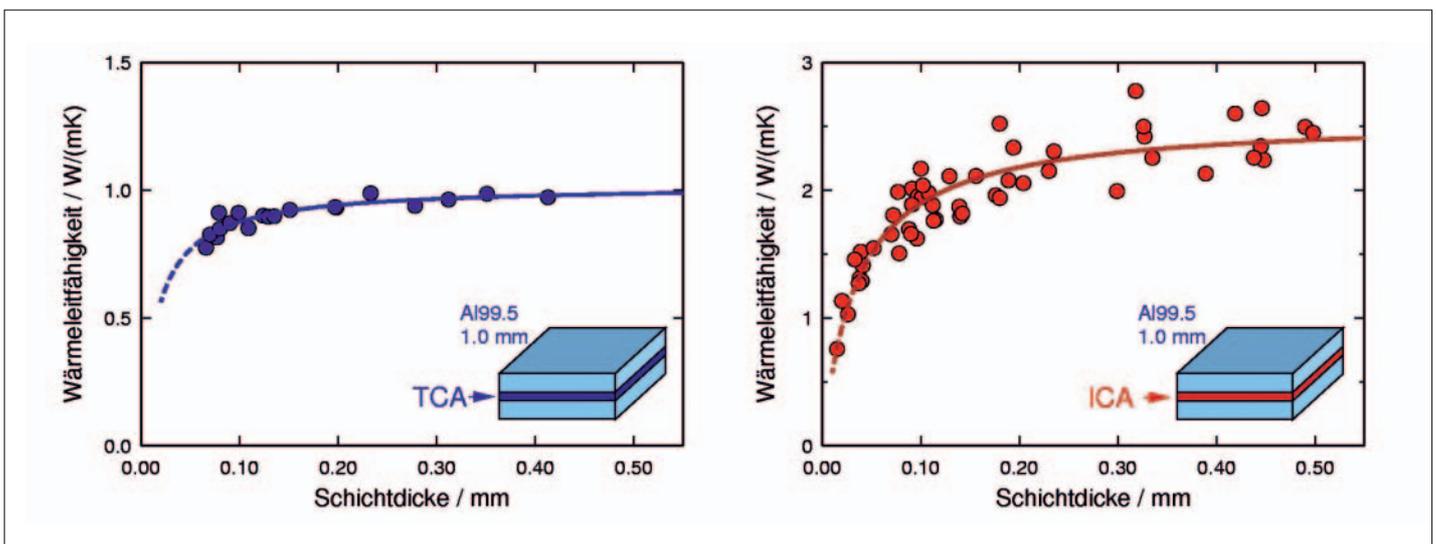


Abb. 4: Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit von der Schichtdicke für das keramisch gefüllte Silikon (TCA, links) und den Silberleitklebstoff (ICA, rechts).

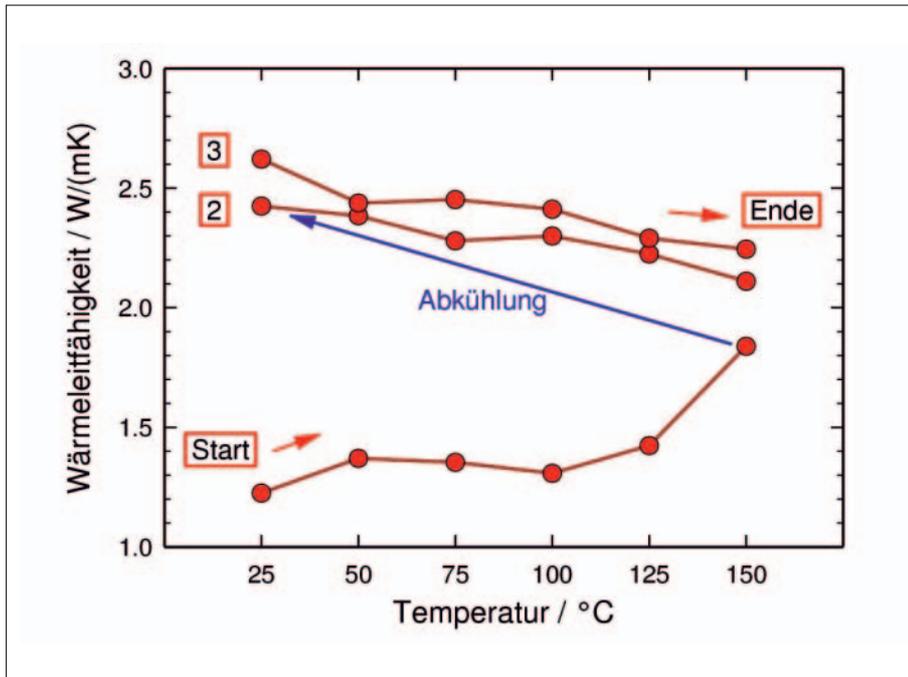


Abb. 5: Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Silberleitklebstoffs (ICA) im Laufe der Nachhärtung.

Zusammenfassung

Das Zusammenspiel von Grenzschichtwiderstand und Wärmeleitfähigkeit des Bulk-Materials bestimmt die Wärmeleitfähigkeit dünner Klebschichten. Bei Materialien mit guter Wärmeleitfähigkeit reichen bereits sehr kleine Grenzschichtwiderstände aus, um die Wärmeleitfähigkeit einer dünnen Klebfuge deutlich herabzusetzen. Bei schlechter Wärme leitenden Klebstoffen machen sich hingegen auch größere Grenzschichtwiderstände weit weniger stark bemerkbar.

Mit Hilfe der Fotoflash-Methode konnten Wärmeleitfähigkeiten sehr dünner Klebfugen ermittelt werden. Die Messungen zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit bei Schichtdicken im technisch wichtigen Bereich um 30 µm auf etwa die Hälfte des Bulk-Wertes absinken kann.

Insgesamt beschreibt das Grenzschichtmodell die experimentellen Daten hinreichend genau. Durch eine Kurvenanpassung können für die verschiedenen Klebstoffsysteme die charakteristischen Parameter, d. h. die Bulk-Wärmeleitfähigkeit und der thermische Grenzschichtwiderstand, ermittelt werden. Diese FEM-nutzbaren Materialkennwerte erlauben eine Vorhersage darüber, wie sich der Klebstoff z. B. bei sehr geringen Schicht-

dicken verhält und können als Grundlage für eine zuverlässige rechnerische Simulation von Mikroklebverbindungen bei der Entwicklung von elektronischen Schaltungen mit Leistungsbau-elementen dienen.

Die Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit über die AiF finanziell unterstützt (AiF-Nr. 13.133N).

Ansprechpartner

Malte Kleemeier
 Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-4 83
 E-Mail: klm@ifam.fraunhofer.de

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

Institut

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

Zehn Jahre Personalqualifizierung: Festakt am 22. Juni 2004

Eine »runde« Jahreszahl ist erreicht, ein Jubiläum steht an – Gelegenheit für einen Rückblick auf das Geleistete und einen Ausblick auf künftige Ziele. Das war am 22. Juni 2004 auch beim Fraunhofer IFAM nicht anders: Zehn Jahre erfolgreiche Personalqualifizierung für die Klebtechnik waren der Anlass für einen mehr als dreistündigen Festakt. Im Atlantic Hotel Universum wurde den rund 200 Anwesenden dabei die Zeit nicht lang: Zuviel Spannendes, Wissenswertes und Freudiges hatten die Festredner zu erzählen. Unterhaltsam moderiert wurde die Veranstaltung von Arnd Picker (Henkel KGaA), Vorsitzender des IFAM-Kuratoriums.

Als es am 31. Januar 1994 am Fraunhofer IFAM mit dem weltweit ersten Lehrgang zur DVS®-Klebfachkraft losging, ahnte noch niemand, dass die überbetriebliche Personalqualifizierung in Bremen eine derartige Erfolgsgeschichte werden würde. Institutsleiter Professor Otto-Diedrich Hennemann erinnerte in seiner Begrüßung daran, dass der Bedarf für eine solche Weiterbildung zu diesem Zeitpunkt bereits dringlich war: »Wir hatten in der Entwicklung der Schlüsseltechnologie Kleben bei den Anwendern bis dahin sowohl Phasen der Euphorie als auch der Depression gesehen. Die Klebtechnik bot ungeahnte Möglichkeiten – aber die Umsetzung verlief nicht immer optimal. Uns war deshalb



Arnd Picker
(Henkel KGaA, Vorsitzender des IFAM-Kuratoriums)

klar: Die Personalqualifizierung ist ein zentraler qualitativer Baustein, wenn die Klebtechnik ihr ganzes Potenzial entfalten soll.« Nur so sei eine qualifizierte Marktentwicklung dieser hochmodernen Füge-technik möglich. Und deshalb wurde die Weiterbildung der Anwender im IFAM auch sofort in den Stand eines »Schlüsselprojektes« gehoben.

Ein langer Weg bis zum Erfolg

Der Weg bis zum zählbaren Erfolg war lang und beschwerlich. Ideenreichtum, Beharrlichkeit und Flexibilität führten im IFAM schließlich zum Ziel – der Weiterbildung von mehr als 1.800 Teilnehmern zum Klebfachingenieur, zur Klebfachkraft oder zum Klebpraktiker. Als Hauptverantwortlicher für diese Leistung wurde immer wieder Professor Andreas Groß gelobt. Der Leiter des Klebtechnischen Zentrums im Fraunhofer IFAM ist zusammen mit Prof. Hennemann »Vater« der Personalqualifizierung. Er gab das mehrfach geäußerte Lob an sein engagiertes Team weiter und präsentierte selbst einen spannenden Beitrag: »Wie alles begann und – vor allem – wie es weitergeht« – das wollten auch die Festgäste wissen. Groß erinnerte sich an den allerersten Kurs und zeigte Fotos, die nach der Abschlussprüfung gemacht wurden. »Wer



Prof. Dr. Otto-Diedrich Hennemann
(Institutsleitung Fraunhofer IFAM)



Prof. Dr. Andreas Groß (Leiter des Klebtechnischen Zentrums im Fraunhofer IFAM)

hinterher erleichterter war – die Teilnehmer oder die Durchführenden des Kurses – werde ich Ihnen auch heute nicht verraten«, gab er verschmitzt einen Einblick, wie schwer aller Anfang war.

Andreas Groß vergaß nicht, den schwierigen Werdegang bis zum Start 1994 zu beleuchten: Davor lagen viele Jahre der Vorbereitung, intensiver Gespräche, der Ausformulierung von Lehrplänen und Richtlinien. Groß verwies auf die große Unterstützung durch den Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS), dessen seit Jahrzehnten erfolgreiches schweißtechnisches Qualifizierungssystem als Vorbild diene. Auch der Industrieverband Klebstoffe, das Land Bremen, die Europäische Union und die Fraunhofer-Gesellschaft haben Pate gestanden. Das Konzept war eindeutig: »Unserer Meinung nach braucht der Wissenstransfer drei Dinge, um zu fruchten: Die neuesten Erkenntnisse müssen direkt in die Weiterbildung integriert werden, die Vermittlung muss arbeitsprozessgerecht sein – und die Weiterbildung muss von vornherein Hierarchie übergreifend angelegt sein.« Denn, so Groß: »Was nützt es, wenn der Ingenieur eine tolle Entwicklung macht – und der, der es dann umsetzen soll, nicht weiß, dass er das Silikonöl weglassen soll?« Auch das »Wie« der Wissensvermittlung habe eine große Rolle gespielt. Von vornherein habe man mit modernen didaktischen Konzepten und interdisziplinär gearbeitet.

Personalqualifizierungs-Modell wird ausgeweitet

Dass die Herausforderungen in Zukunft nicht nachlassen, zeigte der Ausblick von Andreas Groß. Die Zusammenarbeit mit Schulen werde im Projekt »TheoPrax« stetig verbessert. Das Kleben im Handwerk sei ein »Riesenmarkt und eine große Chance, die Technologie weiter zu entwickeln – mit neuen Arten der Wissensvermittlung, etwa durch Online-Lernen« Ein weiterer Schwerpunkt werde in den kommenden Jahren die Internationalisierung sein – die ersten englischsprachigen Klebfachkraft-Lehrgänge in

den USA stehen bald an. Und schließlich habe man mit der klebtechnischen Personalqualifizierung so viel Erfolg gehabt, dass man dieses Modell im IFAM nun auch auf die Bereiche Lacktechnik, Oberflächentechnik und Qualitätsstandardisierung ausweiten wolle – unter dem Dach eines »Zentrums für Technologietransfer und Training«. Dieser Ansatz könne auch ein Vorbild für die gesamte Fraunhofer-Gesellschaft sein: »Trained by Fraunhofer® als Markenzeichen einer Fraunhofer Technology Academy – das ist ein attraktiver Gedanke«, war sich Groß sicher.

Die unverzichtbaren Förderer und Unterstützer der Personalqualifizierung waren beim Festakt nicht nur anwesend – sie kamen ebenfalls zu Wort. Alle beleuchteten aus ihren unterschiedlichen Positionen heraus, warum sie einstmals eingestiegen waren, als das Boot der überbetrieblichen Weiterbildung für das Kleben zu Wasser gelassen wurde. So wies Ansgar van Halteren, der Hauptgeschäftsführer des Industrieverbandes Klebstoffe e.V. (IVK), auf die große volkswirtschaftliche Tragweite der deutschen Klebstoffindustrie hin. »Unser Ziel lautet ganz klar: Markterweiterung. Die Anwendungen für Klebstoffe wachsen weiter, neue Gebiete werden erschlossen. Innovative Verbundwerkstoffe erfordern neue Systeme, und staatliche Forderungen sind mit neuen Klebstoffen erfüllbar«, skizzierte



Ansgar van Halteren (Hauptgeschäftsführer des Industrieverbandes Klebstoffe e. V. – IVK)

er die großen Möglichkeiten. Um sie zu realisieren, gehöre die Weiterbildung der Anwender zu einer von vier Säulen in der Strategie des IVK: »Sie ist einer der Schlüssel für eine qualifizierte Markterweiterung.« Deshalb sei die deutsche Klebstoffindustrie auch Partner des Fraunhofer-Projektes »Internationalisierung der klebtechnischen Personalqualifizierung«. Wie ernst es der Industrieverband meint, machte van Halteren mit Zahlen klar: »Wir sind mit einer sechsstelligen Summe dabei!«

DVS will Kooperation mit dem »Leitinstitut IFAM« intensivieren

Der Geschäftsführer des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Professor Detlef von Hofe, freute sich, dass die klebtechnische Personalqualifizierung in seine Institution integriert ist. »Der DVS vertritt die gesamte Fügetechnik, und das Kleben gehört dazu. Mal stehen die Fügetechniken im Wettbewerb, mal ergänzen sie sich harmonisch. Davon profitieren letztlich alle Verfahren, denn Wettbewerb bringt Innovationen hervor« Ein Ergebnis dieses Wettbewerbes sei die erfolgreiche Kombination der Fügetechniken, beispielsweise von Punktschweißen und Kleben. Dass die konsequente Weiterbildung eine der Grundlagen für den Erfolg einer Technologie sei, bewiesen Schweißen und Kleben gleichermaßen. »Es ist wirtschaftlich immer erfolgreicher, Qualität zu



Prof. Dr.-Ing. Detlef von Hofe
(Geschäftsführer des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. – DVS)

erzeugen statt zu erprüfem«, meinte von Hofe. Der DVS verfolge seit Jahren eine aktive Kooperationsstrategie mit der Klebtechnik. »Wir können uns das noch intensiver vorstellen – auch mit dem IFAM, das für uns die Funktion eines Leitinstituts innerhalb der Klebtechnik hat!« Mit Blick auf die Zukunft der Personalqualifizierung wünschte sich der DVS-Geschäftsführer eine weitere Spezialisierung und Modularisierung, »denn das sind die Anforderungen aus Industrie und Handwerk!«



Dr. Dirk-Meints Polter
(Vorstandsmitglied Fraunhofer-Gesellschaft)

Dr. Dirk-Meints Polter, Vorstandsmitglied der Fraunhofer-Gesellschaft, wies darauf hin, dass das Kleben innerhalb der FHG als eine Schlüsseltechnologie angesehen werde. Man stehe sehr positiv zu den Aktivitäten des IFAM. Polter zeigte sich fasziniert vom Kleben und hatte zahlreiche Beispiele parat, wo es eingesetzt wird. Dass inzwischen Firmen ganze Lehrgänge buchen und bald internationale Angebote existieren, beeindruckte ihn.

Politik froh über die Entscheidung, die Personalqualifizierung zu fördern

Erstmals zu Gast im IFAM war Dr. Arnold Knigge, Senatsrat bei Senator für Arbeit, Frauen, Gesundheit, Jugend und Soziales des Landes Bremen. Dabei war er es, der vor zehn Jahren die notwendige Anschubfinanzierung des Landes für die Qualifizierungsförderung durch das IFAM mit auf den Weg gebracht hatte. »Wir sind sehr froh, dass sich diese Entscheidung als zukunfts-



Dr. Arnold Knigge
(Senatsrat Senator für Arbeit, Frauen, Gesundheit, Jugend
und Soziales, Bremen)

weisend herausgestellt hat«, sagte Knigge. »Heute ist das Klebtechnische Zentrum ein hervorragendes Beispiel für die erfolgreiche Technologieförderung des Landes – ein Beispiel, das sich auch im europaweiten Vergleich sehen lassen kann!« Mit dem neuen Projekt »Kleben lernen im Handwerk Online«, das das Land wiederum unterstütze, setze das Fraunhofer IFAM den erfolgreichen Weg fort.

Auch einen Festvortrag gab es am Jubiläumstag. »Zeitgemäße Erwachsenenbildung« war das Thema vom Professor Rolf Arnold (Universität Kaiserslautern), einem ausgewiesenen Spezial-

listen auf diesem Gebiet. Der Vortrag des Fachmannes war derart gespickt mit interessanten Details und neuesten Erkenntnissen der Methodik und Didaktik von Erwachsenenbildung, dass dem Hochschullehrer die Zeit vorne und hinten nicht reichte. So konnte er nur einen Einblick in neueste Untersuchungen geben – aber schon dabei wurde klar, dass auch das Klebtechnische Zentrum mit seinem Lehransatz auf dem richtigen Weg ist. Weil am Ende des Festaktes der Beginn der 3. Bremer Klebtage anstand, musste Arnold seinen Vortrag verkürzen – aber er und das IFAM bleiben in Kontakt.



Prof. Dr. Rolf Arnold
(Universität Kaiserslautern)



Bereich

Formgebung und Funktionswerkstoffe

Ergebnisse Anwendungen Perspektiven



Institutsteil Formgebung und Funktionswerkstoffe

Kompetenzen und Know-how

Das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung – Formgebung und Funktionswerkstoffe – verfolgt mit dem beschriebenen Weg zur strategischen Neuausrichtung des Institutsteils konsequent das Ziel, eine der ersten Adressen in Europa für komplexe und intelligente metallische Bauteile – vom Werkstoff bis zur Anwendung – zu sein. Intelligente Bauteile weisen integrierte Eigenschaften auf, mit denen Betriebs- oder Umgebungsbedingungen erfasst, verarbeitet und kommuniziert werden können. Das Spektrum der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten reicht dabei von anwendungsorientierter Grundlagenforschung bis hin zur Umsetzung in Produkten und der Unterstützung bei der Fertigungseinführung.

Die Basis bei der Erarbeitung von Lösungen für die Wirtschaft stellen die Kernkompetenzen

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

dar. Die hohe Kompetenz und das Know-how der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit interdisziplinären Ansätzen sind der Garant für die Erarbeitung innovativer Lösungen für die Wirtschaft. Die Pflege und der Ausbau dieser Kernkompetenzen ist ein kontinuierlicher Prozess, der einerseits durch die Umsetzung kreativen Potenzials geprägt ist und sich andererseits maßgeblich an den Bedürfnissen des Marktes orientiert.

Mit den langjährigen erfolgreichen Entwicklungen als Partner der Industrie im Bereich der Pulvermetallurgie und Pulvertechnologie ist das IFAM als Center of Excellence in Europa bekannt.

Abb. linke Seite: Mittels 3-D-Printing hergestellte Designkugel aus Edelstahl.



Abb. 1: Zahnräder, hergestellt durch Warmpressen und Sintern.

Neue Sinter- und Verbundwerkstoffe, zellulare Werkstoffe und Formgebungsverfahren wie Metallpulverspritzguss, Warmpressen und Lasersintern seien hier nur als einige Stichworte genannt.

Aufbauend auf der Pulverkompetenz hat sich die Mikrofertigung im IFAM als Arbeitsgebiet etabliert. Neben der Entwicklung von Massenfertigungsprozessen für Miniaturbauteile oder mikrostrukturierte Komponenten wurden neue interdisziplinäre Lösungsansätze im Bereich der Mikroreaktionstechnik und zur Korrelation von Zellwachstumsmanagement und Oberflächenstrukturierung erarbeitet.

Zur technologischen Umsetzung einer Funktionsintegration wird die Weiterentwicklung der Ink-Jet-Printing Technologie unter Verwendung funktioneller Tinten sowie die Formulierung und Verarbeitung von Pasten verfolgt. Die Basis dafür sind Kenntnisse in der Verarbeitung von Nanopulvern und der Formulierung und Wechselwirkung von Pulvern mit organischen Stoffen.

Die Entwicklung moderner Leichtbauwerkstoffe für verschiedene Einsatzzwecke umfasst gleichermaßen die Herstellung dieser Werkstoffe und die Entwicklung der entsprechenden serientauglichen Fertigungstechnologien, sowie die komplette Entwicklung von Bauteilen.

Mit modernster Gießereierrichtung und Analytik sowie einem umfassenden Know-how zur Verarbeitung von Aluminium- und Magnesiumlegierungen mittels Druckguss hat sich das IFAM gut im Markt positioniert. Neben der Optimierung der Gießprozesse für komplexe Bauteile seien hier das Eingießen von Sensoren und Aktuatoren oder die Entwicklung von porösen, leichten Permanentkernen sowie die Simulation des Füllverhaltens von komplexen Gussbauteilen beispielhaft erwähnt.

Perspektiven

Eine wichtige Aufgabe ist es, das eigene Themenportfolio kontinuierlich mit den Bedürfnissen des Marktes abzugleichen. Hierbei spielen Fragen der Produktinnovation unter strikten wirtschaftlichen Randbedingungen eine genauso wichtige Rolle, wie der Beitrag der Lösungen zur Verbesserung der Lebensqualität und einer nachhaltigen Entwicklung für die Bereiche Transport, Energie, Medizin und Umwelt.

Metallische Präzisionsbauteile werden in nahezu allen Branchen in Systeme integriert. Die Vielfalt der Produkte eröffnet ein großes Potenzial für Weiterentwicklungen im Hinblick auf Leistungssteigerung und Kostenreduktion. Eine aus unterschiedlichen Branchen oft nachgefragte Entwicklungsleistung sind metallische Präzisionsbauteile, die durch pulvermetallurgische oder gießtechnische Formgebungsverfahren hergestellt werden können. Die wichtigsten Entwicklungsaufgaben betreffen Formgebungsprozesse für hochkomplexe Bauteile, die unter wirtschaftlichen Randbedingungen optimiert werden sollen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Modellbildung und Simulation der Formgebungsprozesse.



Abb. 2: Zahnrad mit Metallschaumring zur Geräuschkämpfung.

Die Entwicklung innovativer Lösungen mit neuen Werkstoffen bei der Miniaturisierung von Komponenten und neue Lösungen für die Mikroreaktionstechnik sind ein wichtiges Zukunftsfeld. Die Vorteile von Metall-Mikroreaktoren im Vergleich zu Glas oder Silizium, direkt katalytisch zu wirken, sollen in verbesserten Prozessführungen z. B. für Biotechnologie, chemische Industrie aber auch Medizintechnik münden.

Materialien sind eine Schlüsseltechnologie und sind daher in allen Produktinnovationen ein wesentlicher Erfolgsfaktor. 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. Gezielte Materialkombinationen zur Einstellung lokaler Bauteileigenschaften mit sensorischen Funktionen sollen weiterentwickelt werden. Das Einsparungspotenzial hinsichtlich der Herstellungskosten einerseits und die Kombination verschiedener sensorischer oder aktuatorischer Fähigkeiten andererseits eröffnen diesen intelligenten Bauteilen völlig neue Anwendungsgebiete.

Technologieplattformen wie zum Beispiel das »Functional Printing« dienen dazu, mit Schlüsselkunden aus unterschiedlichen Bereichen Produktentwicklungen durchzuführen und neue Anwendungen zu erschließen. So können z. B. Miniaturisierungsanwendungen erschlossen werden, die für konventionelle Bauteile oder Werkzeuge heute nicht möglich sind. Durch telematische Einbindung und permanente Überwachung von Betriebszuständen mit Hilfe intelligenter Bauteile kann die Auslegung und Dimensionierung von Baugruppen optimiert werden, so dass sowohl Gewichtsreduzierungen im Sinne des Leichtbaus als auch verbesserte Betriebssicherheit von Funktionsgruppen ermöglicht werden.

Leichtbauwerkstoffe und –bauteile sowie deren Fertigungsprozesse stehen im Mittelpunkt vieler Fragestellungen aus der Automobil- und Transportindustrie. Das IFAM arbeitet in diesem



Abb. 3: Offenporöser Aluminiumschaum.

Bereich mit wichtigen Unternehmen zusammen, um maßgeschneiderte Problemlösungen für den Leichtbau zu finden.

Diese können auf der Basis von Leichtmetallen wie Aluminiumlegierungen, zellularen Werkstoffen oder strukturoptimierten Bauteilen liegen, die dann z. B. durch moderne Gießtechnologien in Bauteil- und Systemlösungen überführt werden. Zur Ergänzung der Gießverfahren mit Dauerformen wird am IFAM die gesamte Prozesskette des Lost Foam Verfahrens integriert.

Ein vom BMBF geförderter regionaler Wachstumskern und das Demonstrationszentrum »Zellulare 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 Dieselfilter ist ein Beispiel für die Verknüpfung von erarbeitetem Basis Know-how und deren Umsetzung in Werkstoffideen und Fertigungstechnologien für marktgängige Produkte bis zur Produktionsreife.

In Zukunft soll der Bereich Medizintechnik und Biomaterialien weiter erschlossen werden. Die dazu verfolgten Ansätze betreffen Fertigungsverfahren und Werkstoffe für Komponenten der Medizintechnik und spezielle Materialentwicklungen im Bereich von nano- und mikrostrukturierten Systemen. Eine enge Kooperation im Netzwerk mit institutionellen Partnern ergänzender Kompetenz sowie Unternehmen und klinischen Partnern wird hier angestrebt. Wichtige Aufgaben betreffen antimikrobielle Oberflächen und biokompatible Werkstoffe, aber auch die gezielte Mikrostrukturierung von Oberflächen für das Zellwachstumsmanagement.

Zur schnellen Umsetzung dieser strategischen Ausrichtung wurden gezielte Investitionen in Simulationssoftware, Erweiterung des Maschinenparks zur Formgebung und die Analytik getätigt.

Arbeitsschwerpunkte

- Pulvermetallurgische Formgebung mit Pulverpressen/Sintern
- Warmkompaktieren und Metallpulverspritzguss
- Leichtbau-Strukturen aus Metallschäumen, insbesondere Aluminium, Aluminiumlegierungen, Stählen und Titan
- CAD-gestütztes Rapid Prototyping für den Formenbau
- Konditionieren von Metallpulvern für das Lasersintern und 3-D-Printing (Rapid Prototyping)
- Herstellung und Verarbeitung ultrafeiner und nanoskaliger Metallpulver unter inerten Bedingungen
- Verfahrensentwicklung für Werkstoffe und Komponenten aus Metallfasern und metallischen Hohlkugeln, insbesondere für Filter und Leichtbau-Komponenten
- Verfahrensentwicklung zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen
- Formgebung von Leichtmetall-Legierungen durch Gießtechnik (Druckguss, Thixo- und Squeeze-Casting)
- Entwicklung computergestützter Fertigungsabläufe zur Erhöhung der Prozesssicherheit (CAE)
- Mikrobau-Fertigung aus Metallpulvern und Suspensionen
- Rapid Tooling für Spritzguss und Druckguss.

Formgebung und Funktionswerkstoffe

Arbeitsgebiete und Ansprechpartner

Institutsleitung Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse

Standort Bremen

Pulvertechnologie

Pulvermetallische Formgebung, Warmkompaktieren zur Herstellung hochdichter Sinterteile, 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 fp@ifam.fraunhofer.de

Funktionsstrukturen

Nanopulver; Gradientenstrukturen; Nanoporöse Schichten; Funktionsintegration; Inkjet Printing; Sonderanlagen.

Dr. rer. nat. Volker Zöllmer

Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 14

E-Mail zoe@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 ar@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 ra@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 woe@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

Dr. rer. nat. Ingo Wirth

Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 32

E-Mail rapid@ifam.fraunhofer.de

Anwenderzentrum funktionsintegrierte Gussteile

Dr.-Ing. Jörg Weise

Telefon: +49 (0) 421 / 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 rl@ifam.fraunhofer.de

Demonstrationszentrum

SIMTOP

Andreas Burblies

Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 83

E-Mail info@simtop.de

Standort Dresden

Institutsteil Pulvermetallurgie und Verbundwerkstoffe

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kieback

Telefon: +49 (0) 3 51 / 25 37-3 00

Fax: +49 (0) 3 51 / 25 37-3 99

Internet: www.epw.ifam.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@epw.ifam.fraunhofer.de

Sinter- und Verbundwerkstoffe

Hochtemperaturwerkstoffe; Aluminide (NiAl-Schaum); Nanokristalline Werkstoffe; Werkstoffe für tribologische Beanspruchungen; Sputtertargets; Pulvermodifizierung.

Dr.-Ing. Thomas Weißgerber

Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 05

E-Mail thomas.weissgerber@epw.ifam.fraunhofer.de

Dienstleistungszentrum und Ansprechpartner

Demonstrationszentrum

Zellulare Werkstoffe

Dr.-Ing. Günter Stephani

Telefon: +49 (0) 351 / 25 37-3 01

E-Mail guenter.stephani@epw.ifam.fraunhofer.de

Ausstattung

Bereich Formgebung und Funktionswerkstoffe

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, Fused Deposition Modelling und Multiphase Jet Solidification, 3-D-Printing
- Kaltkammer-Druckgussmaschine (echtzeitgeregelt, Schließkraft 660 t); Warmkammer-Druckgussmaschine (echtzeitgeregelt, Schließkraft 315 t)
- Pilotanlagen zur Herstellung von Metallschaumbauteilen

Thermische / chemische Behandlung von Formteilen

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

Werkstoffsynthese und -verarbeitung

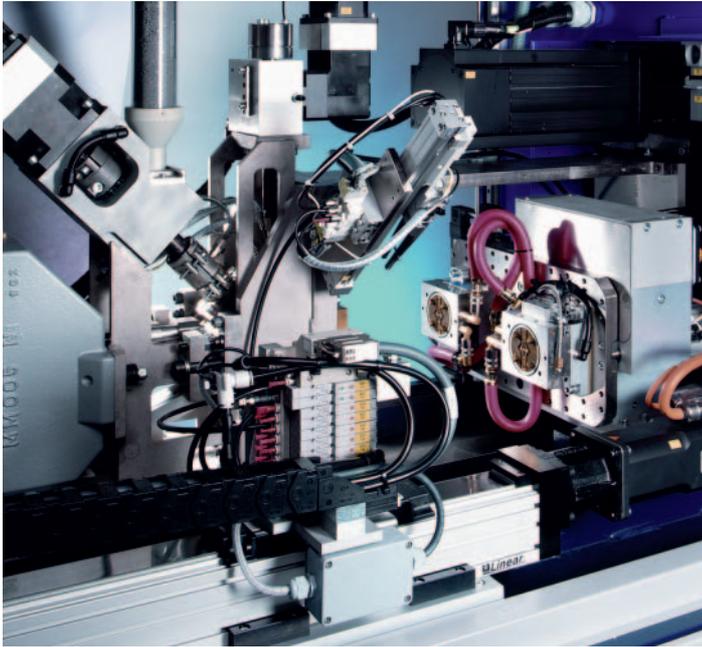
- Induktionsofen zum Metallschäumen
- Anlagen zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen (Sedimentation, Nasspulverspritzen)
- Anlagen zur Herstellung metallischer Nanopulver und Nanosuspensionen
- Teststand zur Charakterisierung funktioneller Tinten für Ink-Jet-Printing-Verfahren
- 3D-Ink-Jet-Drucker RX-1 (PROMETAL)
- Schmelzextraktionsanlage (Metallfasern)
- Zentrifugalmühle zum Hochenergiemahlen von metallischen und keramischen Pulvern (5–10 kg Mahlgutmenge, auch Schutzgas, Vakuum)
- Windsichter zur Klassierung von Pulvern

Instrumentelle Analytik

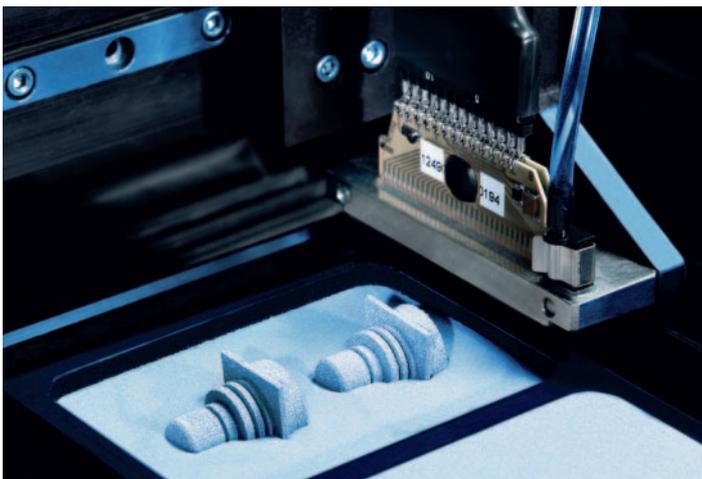
- FEM-Rasterelektronenmikroskopie mit EDX
- Röntgenfeinstrukturanalyse
- Isolationswiderstand
- Thermoanalytik mit DSC, DTA, TGA
- Sinter-/ Alpha-Dilatometrie (akkreditiertes Labor)
- Pulvermesstechnik mit BET-Oberfläche und Lasergranulometrie
- Rheometrie
- Spurenelementanalyse (C, N, O, S)
- Materialographie
- Emissionsspektrometer zur Elementanalyse in Al, Mg, Zn – Legierungen

Rechner

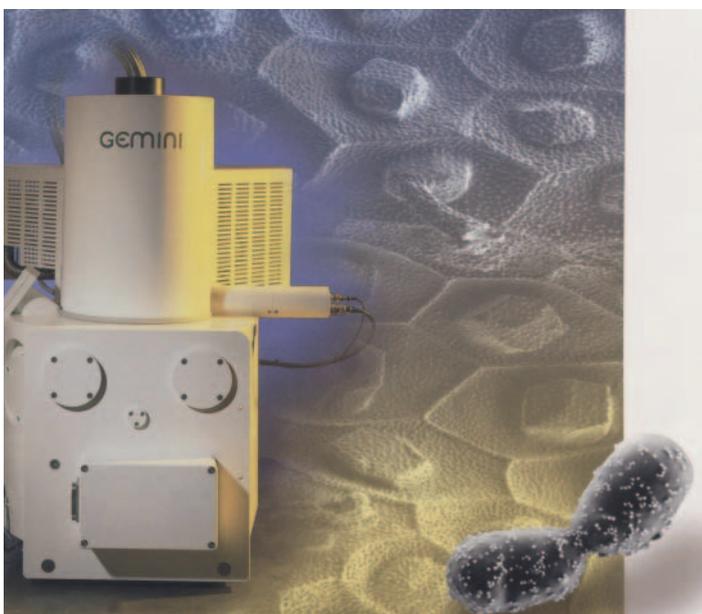
- Hochleistungs-Workstations mit Software zur nichtlinearen FE-Analyse, zur Formfüll- und Erstarrungssimulation sowie zur Bauteiloptimierung



Battenfeld Microsystem 50, Serienfertigungsanlage für Mikroteile und mikrostrukturierte Bauteile.



3-D-Ink-Jet-Drucker RX-1 (PROMETAL).



Hochauflösendes FEM-Rasterelektronenmikroskop.

Funktionalisierung durch Mikro- und Nanotechnologien

In den letzten Jahren hat die Miniaturisierung von Bauteilen und Systemen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Während in den 90er Jahren die Mikrostrukturierung insbesondere für den Markt der Mikroelektronik ein enormes Wachstumspotenzial erfahren hat, gehen die Entwicklungen mittlerweile bis in den Nanokosmos, also den Bereich eines milliardstel Meters. Dabei eröffnen neue Kombinationsmöglichkeiten unterschiedlichster Materialien ein breites Anwendungsgebiet.

Die einzelnen Komponenten werden immer kleiner, müssen aber zugleich mehr Funktionen erfüllen. Funktionsintegration ist vielfach durch die Möglichkeiten einer Mikro- bzw. Nanostrukturierung geprägt. Das Fraunhofer IFAM stärkt diese Kernkompetenz des Institutsteils Formgebung und Funktionswerkstoffe durch seine beiden Kompetenzfelder Mikrofertigung und Funktionsstrukturen. Die Mikrofertigung am Fraunhofer IFAM beschäftigt sich mit der Herstellung vorwiegend metallischer Mikro-Funktionsbauteile sowie der Entwicklung von funktionalisierten mikrostrukturierten Oberflächen. Im Mittelpunkt stehen dabei Abformverfahren (Prägen, Mikro-Spritzgießen), durch die die kostengünstige Serienfertigung von komplexen oberflächenstrukturierten Bauteilen in einer Vielzahl von Materialien möglich wird. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf dem Werkstoff Metall, aber auch Polymere werden verarbeitet. Die Mikrofertigung kann dabei auf die langjährige Erfahrung des IFAM im Standardspritzguss sowie der Verarbeitung von Metallpulvern und Polymeren zurückgreifen und setzt diese Kenntnisse nun für Entwicklungen im Bereich der Mikrosystemtechnik um. Das Kompetenzfeld Funktionsstrukturen greift auf frühzeitige Entwicklungen des IFAM zur Herstellung nanoskaliger metallischer Pulver und Suspensionen in für die industrielle Umsetzung geeigneten Verfahren zurück. Es entwickelt neue funktionelle Materialien wie z. B. Nanopulver, Nanosuspensionen, funktionelle Tinten für Ink-Jet-Verfahren. Für die fertigungstechnologische Umsetzung der Funktionsintegration stehen neben verschiedenen Technologien wie dem Rapid-Prototyping, dem Ink-Jet-Printing oder verschiedenen Sputtertech-

niken auch Anlagen zum Compoundieren von nanoskaligen Materialien zu Nanokompositen zur Verfügung. Durch eine begleitende Entwicklung von Sonderanlagen ermöglicht das Kompetenzfeld Funktionsstrukturen den Technologietransfer und liefert dadurch einen direkten Beitrag zur Wertsteigerung vieler Produkte.

Die Kernkompetenz Mikro- und Nanostrukturierung ist in den letzten Jahren stetig gewachsen, denn durch Mikro- und Nanotechnologien lassen sich Produkte der Medizin, der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie bis hin zur chemischen Industrie veredeln. Neue Bauteile für die Mikroelektronik stehen dabei ebenso im Fokus wie Materialien zur antibakteriellen Ausstattung medizinischer Geräte oder das über eine Mikrostrukturierung gezielt beeinflussbare Zellwachstum. Die Kernkompetenzen Mikro- und Nanostrukturierung ergänzen sich dabei in idealer Weise. Diese Wechselwirkungen führen zur Entstehung zukunftsweisender Fertigungskonzepte.

Mikro-Metallpulverspritzguss (Mikro MIM)

Das IFAM betreibt seit mehr als zehn Jahren Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Metallpulverspritzgießens (MIM). Dieses Verfahren verbindet die vom Kunststoffspritzguss bekannte Freiheit der Formgebung mit der Materialvielfalt der Pulvermetallurgie und erlaubt so die Serienproduktion komplex geformter Teile aus einer breiten Palette metallischer Werkstoffe. Die Fertigung von metallischen Kleinstbauteilen und Bauteilen mit mikrostrukturierten Oberflächen erfordert werkstoff- und verfahrenstechnische Anpassungen des Standard-MIM-Prozesses. So wurden die Grundlagen des Mikro MIM Verfahrens entwickelt, das sehr feine Pulver mit mittleren Partikelgrößen von etwa 2 µm und kleiner einsetzt, um komplizierte, feine Strukturen abzuformen. Diese Pulver werden mit einem speziell entwickelten, hochfesten Bindersystem gemischt und anschließend in ein Werkzeug oder einen Formeinsatz eingespritzt. Formeinsätze, die man viele Male verwenden kann, werden durch den Einsatz verschiedener Mikro-

fertigungstechnologien wie Siliziumätzen, Mikro-Zerspanung, Mikro-Erodieren, Laserstrukturierung oder LIGA-Technik hergestellt. Das Spritzgießen selbst erfolgt auf einer speziell für Mikroteile ausgelegten Fertigungszelle, in der zusätzlich zum Spritzgießen auch Handling, optische Überwachung und Ablage der Bauteile automatisiert erfolgen. Kleinste Bauteile mit einer Kantenlänge von 300 µm sowie minimale Strukturgrößen von 10 µm mit einem Aspektverhältnis (Höhe zu Breite) von 16 können realisiert werden. Neue werkstoffgerechte Entbinderungs- und Sinterzyklen, die sich aus den sehr geringen Bauteilabmessungen sowie der Verwendung der speziellen Pulver und Binder ergeben, wurden für eine breite Palette an Werkstoffen entwickelt. Es können dichte Metallteile in verschiedene Edelstähle, Eisen (-legierungen), Hartmetall, Kupfer und Wolfram-Kupfer gefertigt werden. Das Mikro-Pulverspritzgießen kann grundsätzlich auf alle Werkstoffe übertragen werden, die in geeigneter Pulverform zur Verfügung stehen. Das Verfahren kann die Materialpalette für mikro- und feinwerktechnische Anwendungen wesentlich erweitern.

Multifunktionale Mikroteile durch Zweikomponenten-Pulverspritzgießen (2K-Mikro-PIM)

Das Zweikomponenten-Pulverspritzgießen (2K-PIM) ist ein pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus zwei Werkstoffen mit unterschiedlichen mechanischen oder physikalischen Eigenschaften in einem Fertigungsschritt. Das Verfahren wurde in dem dreijährigen und nun kurz vor dem Abschluss stehenden BMBF-Projekt »Multifunktionale Werkstoffe für Mikroteile durch Mehrkomponenten-Pulverspritzgießen« gemeinsam mit dem Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt. Ziel der Arbeiten war es, in diesem Verfahren Mikrobau- teile und -komponenten herzustellen, in denen lokal unterschiedliche Funktionen erfüllt werden. Dabei wurden am IFAM die Arbeiten zur Kombination eines magnetischen (17-4PH) mit einem unmagnetischen Edelstahl (316L) durchgeführt, während sich das Forschungszentrum Karlsruhe mit der Entwicklung einer Kombination aus unterschiedlich leitfähigen Keramiken befasste.

Beim 2K-Mikro-PIM werden die entsprechenden Metall- und Keramikpulver entweder zeitgleich

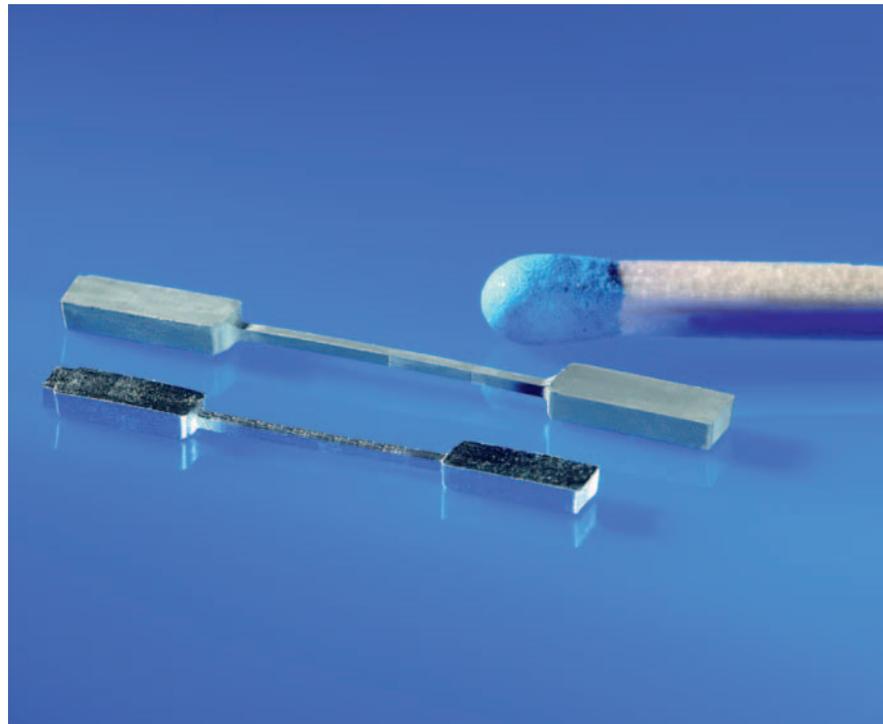


Abb. 1: 2K-Mikrozugprobe (Grün- und Sinterteil).

oder nacheinander in eine Form eingespritzt, so dass sich ein hafter Verbund zwischen den Werkstoffen ausbildet. Damit wird gleichzeitig ein Formgeben und ein Fügen erreicht, ohne dass der sonst notwendige zusätzliche Montageschritt erfolgen muss. Der für das Spritzgießen und zur Entformung der Mikroteile notwendige Binder wird dem Bauteil anschließend in einem geeigneten thermischen Verfahren wieder entzogen. Die aus verschiedenen Werkstoffen bestehende Komponente wird anschließend zu einem vollständig dichten, metallischen Bauteil gesintert. Durch eine genaue Abstimmung der Formmassen, Pulverpartikelgrößen und des Sintervorgangs können rissfreie, haftere Grenzflächen erzielt werden. Die hier auf relativ einfachem Wege erreichbare Funktionsintegration in Mikroteilen wäre sonst nur durch einen zusätzlichen hohen Aufwand an Aufbau- und Verbindungstechnik zu erzielen.

Abb. 1 zeigt die Geometrie einer Zweikomponenten-Mikrozugprobe beispielhaft für die Kombination 316L / 17-4PH, jeweils im Grün- und Sinterzustand, wie sie zur mechanischen Prüfung der Verbundqualität genutzt wird. In

Abb. 2 ist ein am IFAM hergestellter Zweikomponenten-Positionsgeber dargestellt, bestehend aus einem unmagnetischen Bügel (Edelstahl 316L) mit zwei angespritzten weichmagnetischen Enden (Edelstahl 17-4PH). Mit Hilfe eines geeigneten Hallsensors kann bei einer Verschiebung des Mikroteils eine Spannungsänderung erfasst und in die entsprechende Positionsänderung übersetzt werden. Das Schliffbild belegt die rissfreie und haftfeste Ausbildung der Werkstoffgrenzfläche nach dem Sintern. Durch gezielte Prozessführung können die magnetischen Eigenschaften des 17-4PH optimiert werden.

Mit dem 2K-Mikro-Metallpulverspritzguss steht somit ein Verfahren zur Verfügung, das eine Vielzahl denkbarer Eigenschaftskombinationen und Funktionsintegrationen mit metallischen oder keramischen Werkstoffen erlaubt. Als Beispiele seien die Kombinationen fein- / grobkörnig, dicht / porös, oder wärmeleitfähig / isolierend genannt.

Mikrostrukturierte Oberflächen für die Mikrofluidik

Funktionelle mikrofluidische Oberflächen finden interessante Anwendungen in der chemischen Industrie, der Biotechnologie und der Medizintechnik. Durch interdisziplinäre Zusammenarbeit von Biologen, Chemikern und Ingenieuren können viel versprechende und zukunftsweisende Anwendungsbereiche erschlossen werden. So kommen Mikroreaktoren zunehmend für die Synthese von Feinchemikalien sowie für die

Analytik und Diagnostik (lab on a chip) in Frage. Einen wichtigen Aspekt bildet dabei die Möglichkeit, mit Abformverfahren sehr viele unterschiedliche Reaktormaterialien zu verarbeiten, die an die Anforderung der jeweiligen chemischen oder biochemischen Reaktion angepasst sind.

Für das von mehreren Fraunhofer Instituten entwickelte modulare Mikroreaktionssystem FAMOS wurde als integrierbare Komponente ein T-Mischer mit mäanderförmiger Auslaufstrecke entworfen und in rostfreiem Edelstahl gefertigt (Abb. 3). Das Reaktionssystem FAMOS ist nach dem Baukastenprinzip aufgebaut und lässt sich an die Erfordernisse der verschiedensten chemisch/pharmazeutischen Synthesen anpassen.

In weiteren Aktivitäten wurden am IFAM mikrofluidische Reaktoren für die Wasseraufbereitung entworfen und über Mikro-Spritzgießen gefertigt. Die hergestellten Reaktoren wurden anschließend fotokatalytisch (TiO_2) beschichtet und mit einer Glasabdeckung versehen (Abb. 4). Durch Nutzung des fotokatalytischen Effektes dient dieses System zur Entkeimung von Wasser mit Hilfe von UV-Strahlung. Die 200 μm breiten Kanäle unterstützen die Vergrößerung der Wasseroberfläche und damit die Angriffsfläche des Lichts. Durch Parallelschalten einer großen Anzahl von Reaktoren können große Mengen an Wasser gereinigt werden. Der Wirkungsgrad bei der Entkeimung von Brauch- oder Trinkwasser wird durch die Verweilzeit bestimmt. In ersten Versuchen zusammen mit dem Institut für Umweltverfahrenstechnik (IUV) der Universität Bremen wurde die Aktivität der fotokatalytischen Beschichtung am Beispiel der Entfärbung eines mit Metylenblau versetzten Wassers getestet. Es konnten Ergebnisse von bis zu 80% Entfärbung erreicht werden.

Ein weiterer Bereich ist der Einsatz von mikrofluidischen Komponenten in neuartigen Analysesystemen für den Nachweis und teilweise auch für die Quantifizierung von z. B. pathogenen Keimen wie Bakterien, Viren oder Pilzen. Hierzu wird die Oberfläche der Reaktoren in geeigneter Weise gestaltet, so dass biologische Liganden daran koppeln können. In diesem Bereich werden mehrere Massenmärkte adressiert, die durch ein kostengünstiges und leicht handhabbares Analysesystem bedient werden könnten.

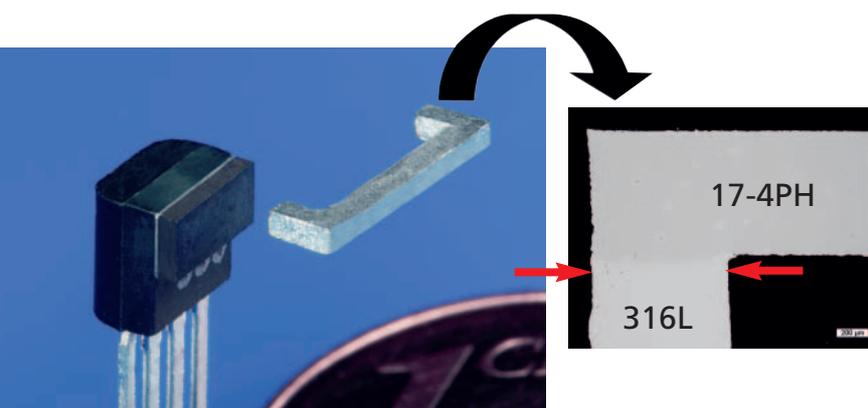


Abb. 2: 2K-Positionsgeber, Schliff der Grenzfläche.

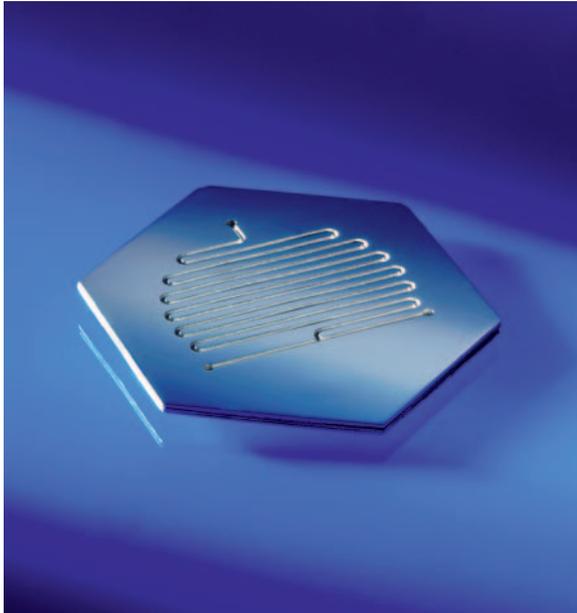


Abb. 3: T-Mischer mit meanderförmiger Auslaufstrecke.

Bioaktive Oberflächenstrukturierung

Eine gezielte Mikrostrukturierung (Rauigkeiten und/oder konkrete Strukturen) der Oberfläche kann dazu genutzt werden, die Biointegration von Implantaten zu verbessern, oder, wenn gewünscht, ein Aufwachsen von Zellschichten zu verhindern. Im Rahmen eines interdisziplinären Projektes wurden am Fraunhofer IFAM unterschiedliche mikrostrukturierte Oberflächen gefertigt und diese von Partnern hinsichtlich der Adhäsion von Zellen untersucht. Bei Werten der Oberflächenrauigkeit um $1\ \mu\text{m}$ ergab sich ein guter Bewuchs von humanen Fibroblasten auf der untersuchten mikrostrukturierten Silikonfläche. Die Zellen zeigten ihre typische Wachstumsstruktur. Flächen mit höheren Rauigkeiten (R_a etwa $4\ \mu\text{m}$) führten zu einem eingeschränkten Wachstum der Fibroblasten, wobei ihre typische Wachstumsmorphologie unterdrückt wurde.

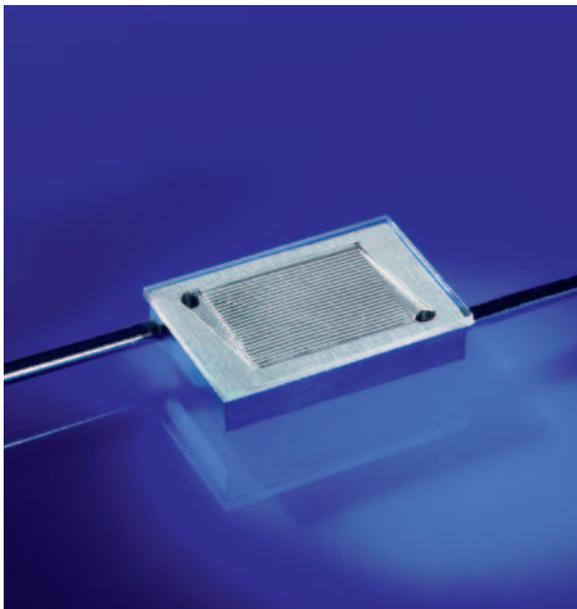


Abb. 4: Fluidische Photoreaktoren zur Entkeimung von Wasser.

Konkrete Strukturierung, wie Arrays mit Säulen (Abb. 5) eignen sich besonders für Implantate, die gut einwachsen sollen. Die jeweilige Zellart kann sich in einer Art »Klammerungsprozess« daran orientieren. Ein Einwachsen kann so beschleunigt und verbessert werden. Dies trägt wesentlich zu einem schnelleren Genesungsprozess des Patienten bei.

Die bisher erzielten Ergebnisse zeigen ein sehr hohes Potenzial für das Zellwachstumsmanagement mittels Oberflächen-Mikrostrukturierung auf. Sie sind neben der Optimierung von medizinischen Implantaten auch für die Entwicklung spezialisierter Zellkulturschalen sowie für das Screening von Zellen und Bakterien von Interesse. Abformungen zu anderen Materialien wie Edelstahl, Titan oder Cobalt-Basislegierung sind ebenfalls möglich.

Mögliche Einsatzgebiete dieser Systeme sind die Früherkennung von Resistenzen im Krankenhausbereich, die Analyse von Lebensmitteln auf pathogene Keime und/oder deren Stoffwechselprodukte sowie die Kontrolle der Trinkwasserqualität.

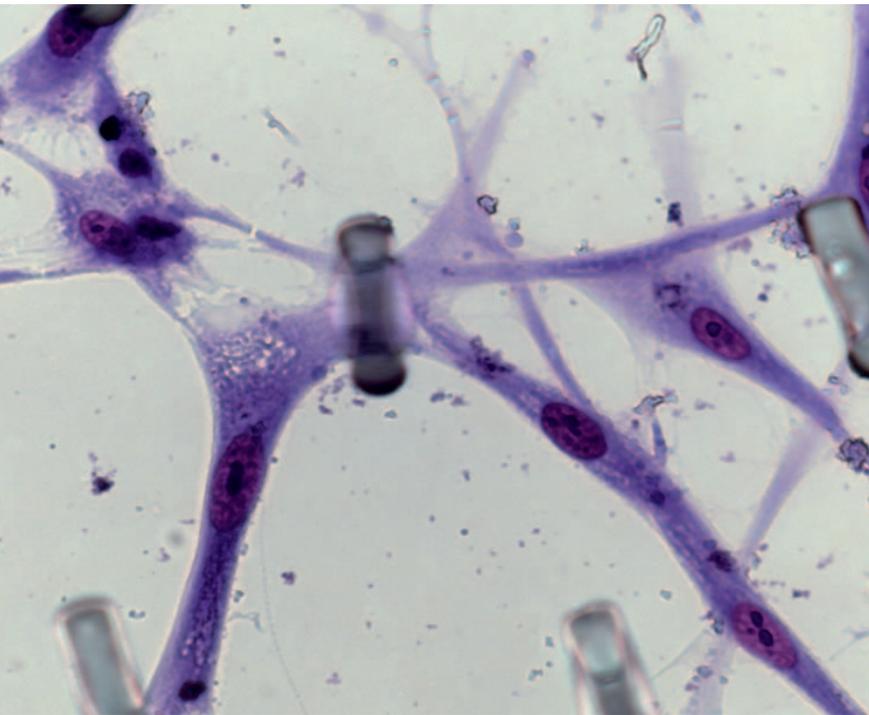


Abb. 5: Humane Fibroblasten integrieren Silikonsäulen in ihr Wachstum.

Nanoskalige Funktionswerkstoffe

Neue Materialkonzepte zur Herstellung intelligenter Oberflächen und Bauteile bedienen sich heute immer mehr nanotechnologischer Ansätze. Nanoteilchen mit Durchmessern unter 100 nm besitzen häufig andere Eigenschaften als Partikel des gleichen Materials mit größeren Durchmessern und sind daher seit einigen Jahren Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben.

Nanopartikel eröffnen dabei insbesondere die Möglichkeit, neuartige Eigenschaften sehr gezielt in (klassische) Bauteile einzubinden und eine Wertsteigerung zu erreichen. Dabei spielen Nanopartikel heute bereits in vielen technologischen Produkten eine entscheidende Rolle. Bei so genannten »Selbstreinigenden Oberflächen«, aber auch in medizinischen Werkzeugen und Medikamenten sind Nanopartikel nicht mehr wegzudenken. Die Effektivität von Katalysatoren lässt sich durch Nanostrukturierung deutlich verbessern. Neben der Erarbeitung grundlegender Kenntnisse ist insbesondere die Entwicklung neuer Technologien zur Herstellung und Verarbeitung nanoskaliger Materialien Gegenstand der Arbeiten am Fraunhofer IFAM.

Nanopartikel können am Fraunhofer IFAM mit der so genannten IGV (Inert-Gas-Verdampfung) - Technologie als hochporöse Pulver in einer Inertgasatmosphäre hergestellt und anschließend direkt weiterverarbeitet werden. Die Dispergierung dieser Nanopartikel in z. B. Polymere und deren anschließender Compoundierung (Abb. 6) eröffnet die Möglichkeit, die Nanopartikel in Nanokomposite zu überführen. Diese funktionalisierten Materialien können dann beispielsweise zu elektrisch und thermisch leitfähigen Klebstoffen verarbeitet werden.



Abb. 6: Polymer-Nano-Komposit-Ganulat.

Die VERL (Vacuum Evaporation on Running Liquids)-Technologie bietet darüber hinaus eine Möglichkeit, mittels Sputterprozessen nanoskalige Partikel in eine Flüssigkeit einzubringen.

Solche Suspensionen (Abb. 7) können entweder direkt in konventionelle Prozesse integriert werden, oder als feine Strukturen auf Substrate bzw. in Bauteile appliziert werden. Hierzu bietet das bekannte Ink-Jet-Printing-Verfahren eine ideale Technologieplattform. Nanoskalige Suspensionen, sog. »funktionelle Tinten«, können mittels einer solchen Technologie sehr exakt, schnell und einfach auf Strukturen aufgebracht werden und ermöglichen daher eine attraktive Fertigungstechnologie für eine Nanostrukturierung.

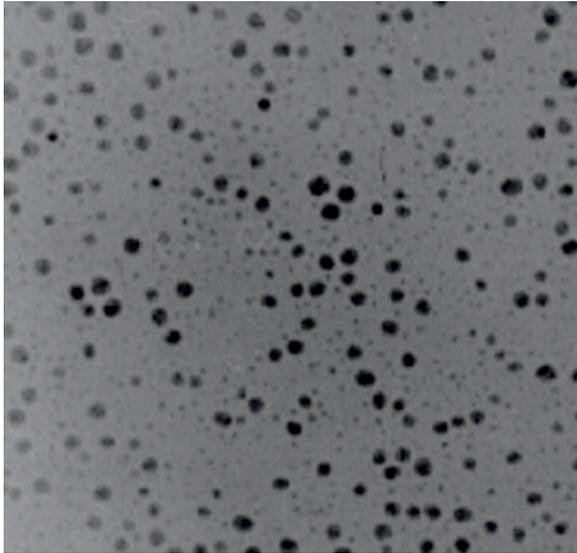


Abb. 7: TEM-Aufnahme einer Ag-Nanosuspension.

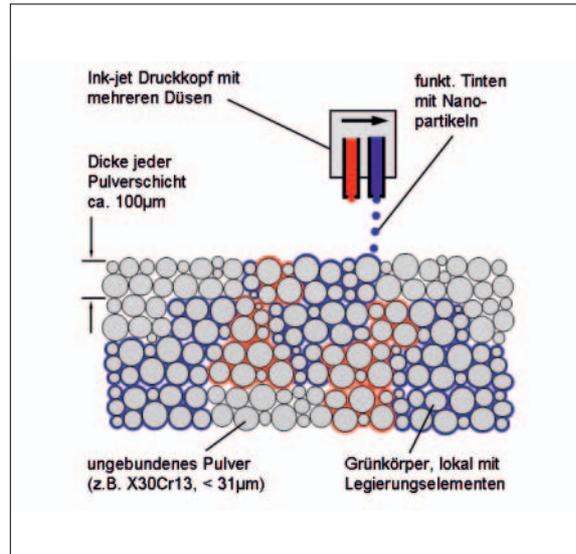


Abb. 8: Funktionsprinzip der Herstellung gradierter Strukturen mittels 3D-Printing.

Functional Printing

Am Fraunhofer IFAM stehen verschiedene Ink-Jet-Printing-Technologien zur gezielten Funktionsintegration zur Verfügung. Das dreidimensionale Printing (3DP) ermöglicht z. B. die Herstellung geometrisch komplexer Gradientenwerkstoffe (Abb. 8). Hierbei können nach dem Prinzip eines Farbtintenstrahldruckers mittels voneinander unabhängiger Düsen nanoskalige Suspensionen Schicht für Schicht in ein Pulverbett eingedruckt werden. Die eingedruckten Nanopartikel können durch einen nachfolgenden thermischen Verarbeitungsschritt lokal Legierungen mit dem Matrixpulver bilden oder als partikuläre Phasen im Bauteil verbleiben. Die lokalen Materialinformationen werden über CAD-Datensätze eingegeben und können so gezielt in das herzustellende Bauteil integriert werden.

Die zu verdruckenden Tinten werden mittels eines Teststandes durch eine Visualisierung der Tropfenbildung auf ihre Verdruckbarkeit hin charakterisiert und optimiert.

Des Weiteren können aber auch Sputtertechnologien zur Herstellung nanostrukturierter, funktioneller Schichten herangezogen werden (Abb. 9). So werden beispielsweise katalytische Schichten mittels Sputterprozessen auf Filter oder in Kanäle von Mikroreaktoren appliziert. Hierbei kommt der Morphologie der nanoporösen Schicht eine Schlüsselrolle zu.

Die genannten Technologien werden im Institutsteil Formgebung und Funktionswerkstoffe unter dem Begriff »Functional Printing« zusammengefasst. Ergänzt wird dieser Bereich durch sog. funktionelle Pasten, welche mittels Sintertechnologien auf metallische Bauteile appliziert werden können. Das »Functional Printing« stellt somit eine breite Technologiebasis zur Verfügung, mittels derer eine Mikro- und Nanostrukturierung betrieben werden kann.



Abb. 9: Strukturiert beschichtete Siliziumwafer.

Diese Technologieplattform bietet die Möglichkeit, technologische Lösungen zur gezielten Funktionsintegration aufzuzeigen und ermöglicht eine kostengünstige Nutzung nanotechnologischer Potenzials. Die Technologien gestatten es insbesondere, eine sehr breite Materialvielfalt mittels Printing-Technologien zu applizieren. So können neben metallischen Tinten für Leiterbahnen auch keramische Partikel verdruckt werden. Auch das Printen biologischer Moleküle ist mit derartigen Printing-Technologien möglich (sog. »Tissue Engineering«). Das »Functional Printing« wird in Zukunft verstärkt genutzt werden können, um Bauteile und Strukturen kleiner, multifunktionaler, kostengünstiger und sicherer herstellen zu können. »Functional Printing« schließt damit die heute z. T. noch vorhandene Lücke zwischen nanotechnologischem Know-how und der kostengünstigen Übertragung in serientaugliche Fertigungsprozesse (»from smart materials to smart parts«). Der Technologietransfer wird durch eine begleitende Entwicklung von Sonderanlagen zur Herstellung und Integration nanoskaliger Werkstoffe in Bauteile und auf Oberflächen abgeschlossen.

Wertsteigerung durch Nanotechnologie

Bereits heute finden sich nanotechnologische Ansätze in vielen Produkten wieder. So sind schmutzabweisende Oberflächen mittels nanoskaligen TiO_2 -Partikeln ebenso im Einsatz wie mit Silber beschichtete medizinische Werkzeuge zur Abwehr von Bakterien.

Neben den technologischen Vorteilen ist jedoch insbesondere auch die zunehmende Diskussion zu möglichen Risiken der Nanotechnologie im Fokus des Fraunhofer IFAM. Insbesondere um die mögliche Einatmung von (Nano-)Partikeln zu vermeiden, wird die Herstellung von nanoskaligen Suspensionen vorangetrieben. Diese Flüssigkeiten stellen eine Verarbeitung ohne gesundheitliche Beeinträchtigung sicher und ermöglichen zudem auch technologische Vorteile. Durch das VERL-Verfahren können die Partikel sehr gezielt mit hoher wirksamer Oberfläche in Nanokompositmaterialien eingebracht werden.



Abb. 10: Gedruckte Strukturen aus resorbierbarem Knochenmaterial für Implantatanwendungen.

In naher Zukunft wird das Drucken von Nano- und Mikrostrukturen zunehmend Einsatz in der Herstellung elektronischer Label finden. Sie werden die bereits heute im Einsatz befindlichen RFID-Tags zu deutlich höheren Leistungen bezüglich Programmierbarkeit und Auslesbarkeit bringen. Die Nanotechnologie wird in Zukunft insbesondere Wertsteigerungen in Bereichen der Medizintechnik, des Automobilbaus und der Luft- und Raumfahrttechnik ermöglichen. Aber auch die chemische Industrie und der Maschinenbau im Allgemeinen profitieren bereits heute von neuen nanotechnologischen Lösungskonzepten, zu denen das Fraunhofer IFAM maßgeblich beiträgt.

Ausblick

Potenzial der Mikro- und Nanostrukturierung

Am Fraunhofer IFAM werden mit Hilfe von metallischen Pulvern (einschließlich Nanopulvern) und konkreter Strukturierung gezielt Oberflächen und (Kleinst-)Bauteile funktionalisiert. Die erhaltenen Systeme erfahren dadurch eine Wertsteigerung z. B. hinsichtlich reduzierten Verschleißes, antimikrobieller Ausstattung oder elektrischer Kontaktierbarkeit. Die dafür einsetzbaren Techniken werden immer im Blick auf industrielle Umsetzbarkeit entwickelt und meist in bestehende Prozesse integriert. Das Fraunhofer IFAM liefert damit einen wichtigen Beitrag zum Technologietransfer des mikro- und nanotechnologischen Know-how in industrielle Fertigungsprozesse.

Die zukünftigen Entwicklungen im Fraunhofer IFAM werden im Bereich Mikro- und Nanostrukturierung verstärkt von bionischen Fragestellungen geprägt sein. Neben den bereits vorhandenen Kompetenzen zur Beeinflussung von Zellwachstum und antibakteriellen Oberflächen werden zunehmend Fragestellungen zur generellen Selbstorganisation von Mikro- und Nanostrukturen bearbeitet werden.

Ansprechpartner

Astrid Rota
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 96
E-Mail ar@ifam.fraunhofer.de

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

Institut

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

Werkstoffe für das Lasersintern

Situation

In der Reihe der laserbasierten generativen und endformnahen Fertigungsverfahren ist das Direkte Metall Lasersintern (DMLS) eines der Rapid Prototyping Verfahren, dem das größte Potenzial zur direkten Herstellung von pulvermetallurgischen Bauteilen oder Werkzeug-einsätzen, so genannten Rapid Tools, für den Kunststoffspritzguss und Metall-Druckguss eingeräumt wird. Nachteilig wirkt sich bei diesem Verfahren die eingeschränkte Materialpalette aus. Kommerziell werden bisher lediglich drei Pulverwerkstoffe für das DMLS-Verfahren angeboten. Es handelt sich hierbei um mehrkomponentige Pulvermischungen auf Bronze- sowie Stahlbasis mit unterschiedlichen Pulverkorngrößen zwischen 20 und 50 Mikrometern.

Problem

Gegen die Verwendung dieser Pulver insbesondere im Werkzeugbau sprechen hohe Materialkosten in Verbindung mit der Rissanfälligkeit stahlbasierter Lasersinterwerkstoffe. Ein Mehraufwand bei der Datenaufbereitung kann zwar die Risswahrscheinlichkeit reduzieren, jedoch auf Kosten der mechanischen und thermischen Eigenschaften solcher lasergesinterter Bauteile. Aufgrund der Legierungszusammensetzung besteht bisher keine Möglichkeit, die lasergesinteren Stahlbauteile einer Wärmebehandlung zu unterziehen. Ziel dieser Wärmebehandlung kann das Härten und Anlassen von solchen Bauteilen zur gezielten mechanischen Eigenschaftverbesserung sein.

Chance

Auf der Basis neuartiger Pulverwerkstoffkonzepte bieten sich Möglichkeiten, die Produktentwicklungszeiten für P/M-Bauteile deutlich zu reduzieren und dadurch preiswerter zu produzieren. Kosten- und Zeitersparnis setzt voraus, dass sowohl Prototypen und Funktionsmuster als

auch Serienbauteile aus Werkstoffen mit identischen Eigenschaften bestehen. Ziel ist es daher, flexible Werkstoffkonzepte für unterschiedliche Fertigungsverfahren bereitzustellen. Beispielsweise können erste Funktionsmuster aus einem feinen Pulver (typische Pulverpartikelgröße 20 µm) mit Lasersinter-Verfahren hergestellt werden, wodurch sich sehr gute Oberflächengüten erzielen lassen. Für die P/M-Produktion von hohen Stückzahlen kommen insbesondere Press- und Sinterverfahren zum Einsatz. Hier können Pulver verwendet werden, die sich lediglich durch eine gröbere Partikelgröße auszeichnen, in ihren Grundeigenschaften jedoch identisch sind.

Forschungspotenzial/Umsetzung

Aus der Literatur ist bekannt, dass bereits eine Vielzahl an unterschiedlichen Eisen- und Nicht-eisenpulverwerkstoffen mit dem Lasersinter-Verfahren verarbeitet wurde. Dennoch war es bisher nicht gelungen, konventionelle, also z. B. unlegierte oder niedriglegierte, Stahllegierungen erfolgreich einzusetzen. Hier bot es sich an, durch eine auf das Fertigungsverfahren und die späteren Einsatzgebiete abgestimmte Werkstoffentwicklung das Materialangebot für die schnelle Fertigung von P/M-Bauteilen zu vergrößern und gleichzeitig wichtige Erkenntnisse zum Lasersinter-Prozess und neuen möglichen Werkstoffen zu gewinnen.

Bei der Entwicklung des neuartigen Werkstoffkonzepts für das Direkte Metall Lasersintern wurde konsequent auf eine polymere oder niedrigschmelzende Binderkomponente, die in bisher kommerziell angebotenen Pulversystemen enthalten ist, verzichtet. Dadurch soll erreicht werden, dass die hohen mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes Stahl nicht durch niedrigere Festigkeitseigenschaften der Binderkomponente (wie z. B. Bronze) verringert werden. Die Rolle der Legierungselemente Kohlenstoff, Phosphor, Kupfer, Chrom, Mangan und Nickel auf die zu erzielenden Dichten sowie die Gefügeausbildung nach dem Lasersinter-Prozess wurden ebenso untersucht.

In weiteren Untersuchungen wurde bestätigt, dass durch eine nachfolgende Sinterung die Porosität lasergesinterter Strukturen vollständig eliminiert werden kann und/oder eine Wärmebehandlung die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften verbessert. Die mechanischen Eigenschaften wurden durch Zug- und Biegeversuche und Härtemessungen charakterisiert. So stellte sich heraus, dass ein zunächst inhomogenes lasergesinterter Gefüge aus Ferrit, Martensit und Zwischenstufengefüge besteht. Die lasergesinterter Dichten liegen im Bereich von 95–97 % der theoretischen Dichte. Durch eine Sinternachbehandlung wird das Gefüge homogenisiert und der Restporenanteil vollständig eliminiert. Die hohe Dichte der Bauteile in Verbindung mit einem geringen Anteil an Legierungselementen im Stahl garantiert die im Werkzeugbau wichtige hohe thermische Leitfähigkeit.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchung ist die Verbesserung der erzielbaren Oberflächenrauigkeit. Bisherige Ansätze basierten auf der Optimierung der Lasersinterparameter oder der Infiltration poröser Strukturen mit einer teilweisen Einebnung der Oberflächenrauigkeit. Durch den Einsatz sehr feiner Ausgangspulver können nun deutlich bessere Oberflächengüten erreicht werden. Weiterhin wird durch eine gezielte Legierungseinstellung ein Sintern im Semi-Solid Zustand unterstützt. Durch geringste Mengen an flüssiger Phase werden so Materialumlagerungsprozesse während der Sinterung begünstigt.

Die Werkstoffentwicklung ist zwar in einem engen Zusammenhang mit dem Verfahren des Direkten Metall Lasersinterns zur Fertigung von Werkzeugen zu sehen. Die Verwendung von üblichen pulvermetallurgisch eingesetzten Pulvern für das Werkstoffsystem gestattet jedoch ebenso eine schnelle, unkomplizierte und preisgünstige Herstellung von konventionellen P/M-Bauteilen in der Serienproduktion. Die lasergesinterter Strukturen eignen sich insbesondere zur Verwendung als Formeinsätze im Kunststoff-spritz- und Metall-Druckguss sowie für die direkte Einzelteilefertigung.



Abb. 1: Lasergesinterter Bauteil für Druckguss-Formeinsätze.

Ansprechpartner

Frank Petzoldt
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 34
E-Mail fp@ifam.fraunhofer.de

Institut

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

Vakuum SLS – Lasersintern im Mikrobereich

Ausgangssituation

Das Selektive Lasersintern (SLS) ist bereits ein etabliertes Verfahren zur flexiblen Herstellung von Bauteilen. Dennoch ist der Einsatz dieses Verfahrens begrenzt: eingeschränkte Werkstoffauswahl, eingeschränkte Genauigkeiten, lange Bauzeiten, Nachbehandlung der Bauteile, innere Spannungen der Bauteile, kein durchgängig homogenes Gefüge, hohe Rauigkeiten und geringe Strukturauflösungen.

In den verschiedensten Bereichen der Industrie steigt jedoch der Bedarf an mikrostrukturierten Bauteilen. Ein für den Mikrobereich modifiziertes SLS Verfahren würde die Möglichkeit eröffnen, kompliziert konturierte Bauteile für die Mikrofertigung herzustellen, wobei die Kosten im wesentlichen vom Volumen und von der geforderten Auflösung (Anzahl der Schichten) abhängen, nicht aber von der Komplexität der herzustellenden Bauteile.

Im Rahmen des Projektes sollte das Selektive Lasersintern im Vakuum (Vakuum SLS) untersucht werden. Durch die Verlagerung des SLS Prozesses in ein Vakuum wird es möglich, auch mikro- und submikrofeine Pulver zu verarbeiten. Zum Selektiven Lasersintern von submikrofeinen Pulvern gab es bislang keine technisch umsetzbaren Konzepte. Die Verwendung wesentlich feinerer Pulver als bisher erlaubt die Erweiterung der Anwendung des SLS Verfahrens zur Herstellung von Einzelstrukturen bis in den Mikrobereich. Dabei sollten außerdem erstmals Rauigkeiten von Oberflächen und von Kanten im Bereich eines Mikrometers realisierbar sein.

Die angestrebte Lösung zu einem SLS Verfahren mit Strukturen im Mikro- und Miniaturbereich soll einen effizienten Weg bieten, um Teile zu generieren, die aufgrund ihrer Abmessungen und Toleranzen mit klassischen Verfahren nur mit großem Aufwand oder gar nicht herstellbar sind.

Aufgabenstellung

Um der Forderung nach immer kürzer werdenden Produktentstehungszeiten entsprechen zu können, müssen neben den abtragenden auch generative Verfahren kosten- und qualitätsmäßig weiterentwickelt werden. Dies sollte im Rahmen des Projektes durch die Entwicklung des neuartigen SLS Verfahrens speziell für den Mikrobereich vorangetrieben werden. Die Konzentration auf zunächst kleine Teile erlaubt die Untersuchung des Vakuumsinterprozesses bei eingeschränkten Kosten. Eine spätere Hochskalierung des Verfahrens auch auf große Bauteile ist möglich. Konzepte für großvolumige Bauräume im Vakuum existieren.

Das Forschungsprojekt setzte sich zum Ziel, durch die kombinierte Anlagen-, Werkstoff-, Software- und Verfahrensentwicklung eine neuartige Fertigungstechnologie zur generativen Herstellung von mikrostrukturierten Bauteilen oder Werkzeugen aus metallischen und keramischen Werkstoffen mit bisher nicht zu erreichender Formenvielfalt, Eigenschaftspalette und Flexibilität zu entwickeln.

Projektbeschreibung / Umsetzung

Im Rahmen der kombinierten Anlagen-, Werkstoff-, Software- und Verfahrensentwicklung im Verbundprojekt wurde am Fraunhofer IFAM ein neuartiges Konzept zur Aufbringung dünnster Lagen von sehr feinen Pulvern (Pulverkorngroße kleiner als 10 µm bis hin zu nanoskaligen Pulvern) entwickelt. Mit diesem Verfahren können Schichtdicken sowohl im Mikrometer- als auch im Nanometerbereich erzielt werden. Der Pulverauftrag erfolgt nicht durch Rakeln, sondern durch einen Sputterprozess. Es wurden diverse Sputtertargets gewählt. Dabei zeigten sich in Abhängigkeit von den Sputterparametern deutliche Unterschiede in der morphologischen Struktur. Die verschiedenen Strukturen (dicht bzw. porös) für gesputterte Goldschichten sind in Abb. 1 dargestellt.

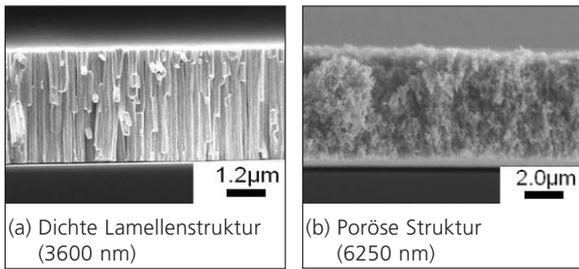


Abb. 1: REM-Bilder von gesputterten Goldschichten auf Silizium unter verschiedenen Argon-Prozessgasdrücken.

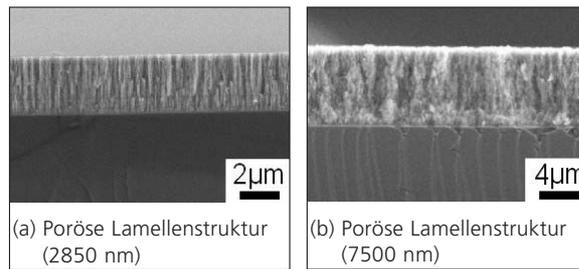


Abb. 2: REM-Bilder von gesputterten Wolfram-/Kupferschichten auf Silizium unter verschiedenen Argon-Prozessgasdrücken.

Lasersintertests beim Projektpartner Hochschule Mittweida/Laserinstitut zeigten, dass die poröse pulverartige Schicht beim Sintern stark zusammenschrumpft. Da beim Sputterverfahren diese Vertiefung im Gegensatz zum Rakelverfahren jedoch nicht wieder aufgefüllt wird, wird es nicht ohne zusätzlichem Aufwand möglich sein, Bauteile herzustellen, die aus mehreren Schichten bestehen. Deshalb wurden vorwiegend dichte Schichten aufgesputtert. Bei den dichteren Schichten zeigte sich, dass diese beim Lasersinterprozess weniger stark schrumpfen; allerdings ließ sich das nicht lasergesinterte Material deutlich schwieriger entfernen.

Weitere Experimente wurden mit Wolfram/Kupfer (W 80 %, Cu 20 %) als Sputtertarget durchgeführt (Abb. 2). Die Versuche zeigten, dass sich Schichten von 100 nm in wenigen Sekunden aufspalten lassen. Die gesputterten W/Cu-Schichten sind homogen, die Struktur nimmt eine Zwischenstellung zwischen einer lockeren porösen Pulverschicht und einer festen Schicht ein. Deshalb schrumpft sie beim Lasersintern deutlich weniger als die poröse Goldschicht, und das nicht lasergesinterte Material lässt sich entsprechend leichter entfernen als die dichte Goldschicht. Da die Oberfläche der gesputterten W/Cu-Schicht nur eine Rauigkeit von wenigen Nanometern aufweist, eignet sich das Sputterverfahren mit W/Cu als Target gut zum Auftrag von feinen Pulverschichten.

Das Sputterverfahren ist damit eine Alternative zum Rakeln von ultrafeinen Pulvern. Weiterhin können mit dem Sputterverfahren deutlich dünnere Schichtdicken erzielt werden, als es mit dem Rakelprozess möglich ist. Geringe Schichtdicken lassen sich durch Sputtern schnell auftragen. Ein weiterer großer Vorteil des Sputterverfahrens ist, dass sich eine Vielzahl von metallischen Pulvern im Prozess herstellen lassen und damit ein Einkauf teurer ultrafeiner Spezialpulver entfällt. Eine Integration des Sputtermechanismus in das bestehende Maschinenkonzept ist jedoch im Rahmen des Projekts nicht möglich gewesen.

Als Ergebnis des Verbundprojekts steht ein SLS Prozess zur Verfügung, mit dem ultrafeine metallische und keramische Pulver gesintert werden können, so dass dadurch Mikroteile in bisher nicht möglicher Auflösung und Qualität generiert werden können.

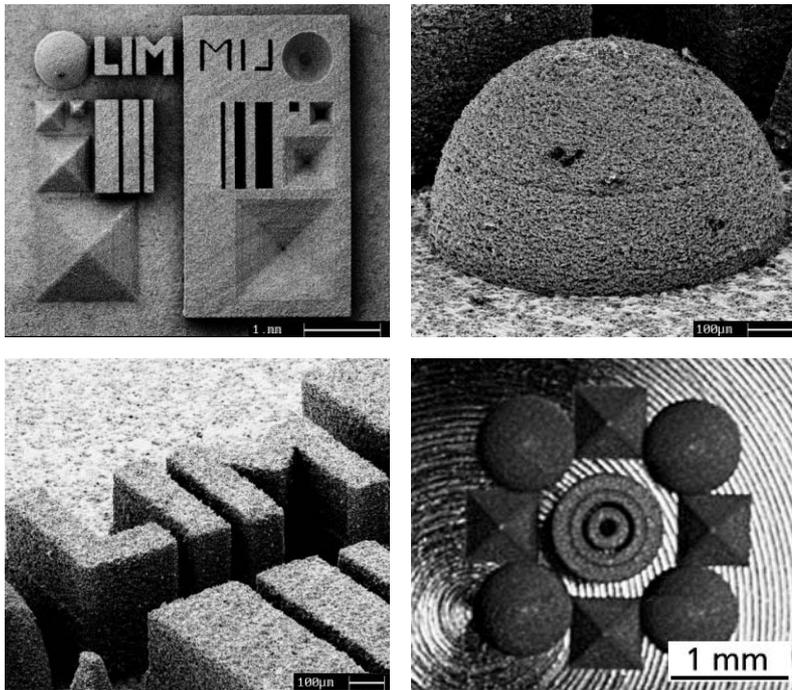


Abb. 3: Probenstrukturen.

Ansprechpartner

Ingo Wirth
 Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 32
 E-Mail iw@ifam.fraunhofer.de

Auftraggeber

BMBF-Rahmenprogramm
 »Forschung für die Produktion von morgen«
 Verbundprojekt Vakuum-SLS

Projektpartner

Hochschule Mittweida / Laserinstitut
 Mittelsachsen
 Fraunhofer IKTS, Dresden
 Fraunhofer IWU, Chemnitz
 3D-Micromac AG, Chemnitz
 IVS Solutions AG, Chemnitz
 EGT GmbH, Mittweida
 Portec GmbH, Zella-Mehlis
 MiLaSys GmbH, Stuttgart

Das Vakuum-SLS Verfahren wurde auf der EuroMold-Messe in Frankfurt am Main mit dem EuroMold-AWARD 2004 in Silber ausgezeichnet.

Institut

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

APM-Aluminiumschaum: Reproduzierbar, flexibel und einfach anwendbar

Geschäumte Metalle sind im Leichtbau ein Trend mit wachsender Bedeutung. Mit der Entwicklung der zweiten Metallschaumgeneration ist eine neue Prozessvariante entstanden, die eine flexible und kostengünstige Bauteilfertigung erlaubt. Es wurden ideale Bedingungen für den einfachen und schnellen Technologietransfer in die Industrie und speziell in kleine sowie mittlere Unternehmen geschaffen.

Situation

Der pulvermetallurgische Prozess zum Aufschäumen von Metallen wurde vor ca. 15 Jahren am Fraunhofer IFAM in Bremen wieder entdeckt und zur Anwendungsreife weiterentwickelt. Das unter dem Namen FOAMINAL® patentierte Verfahren zur Herstellung von komplex dreidimensional geformten Metallschaumbauteilen ist für die Großserienfertigung sehr gut geeignet. Durch die für den Prozess charakteristische, endformnahe Bauteilherstellung werden Nacharbeitsschritte vermieden bzw. auf ein Minimum reduziert. Der Prozess ist von der Industrie aufgenommen worden, so dass heute verschiedene Anbieter dem interessierten Metallschaumanwender ein breites Leistungsspektrum von der Bauteilentwicklung bis zur Großserienproduktion anbieten können. Aktuell befinden sich erste Serienprodukte in Produktion und Einsatz.



Analyse und Aufgabe

Um diese insgesamt positive Entwicklung der Metallschaumtechnologie weiter zu fördern und zu unterstützen, betreibt das Fraunhofer IFAM in Bremen eine kontinuierliche Prozessanalyse und auf Basis der Ergebnisse die fokussierte Weiterentwicklung des Gesamtprozesses sowie seiner einzelnen Schritte.

Ein Analyseergebnis ist, dass ein großer Markt für Aluminiumschaum als leichtgewichtiger Kern in Hohlstrukturen (z. B. Aluminiumschaumfüllung in Karosseriestrukturbauteilen) besteht. Dieser Markt wird mit Aluminiumschaumbauteilen, hergestellt nach dem FOAMINAL®-Verfahren, teilweise bedient. Aus Kundengesprächen konnte klar herausgearbeitet werden, dass Optimierungsbedarf in den Bereichen Prozessrobustheit, -flexibilität und -kosten besteht, um weitere Marktbereiche erschließen zu können.

Lösung

Durch Trennung der beiden Hauptprozessschritte des endformnahen Fertigungsverfahrens zur Herstellung von Aluminiumschaumbauteilen kann das Fraunhofer IFAM eine Lösung der beschriebenen Problematik anbieten.

Bei der »Advanced Pore Morphologie« (APM) genannten Vorgehensweise werden die Prozessschritte

- Schaumexpansion und
 - Bauteilformgebung
- getrennt voneinander und zeitlich unabhängig durchgeführt. Ein APM-Aluminiumschaumbauteil besteht aus einer Vielzahl kleinvolumiger Schaumelemente, die durch eine einfache Fügeoperation (z. B. Kleben) miteinander verbunden werden.

Abb. 1: Querschnitt eines APM-Aluminiumschaumelementes, Ø 10 mm.



Abb. 2: APM-Aluminiumschaumelemente (links) mit Klebstoffbeschichtung (Mitte) und ein gefülltes Hohlprofil (rechts).



Abb. 3: Fertiges Bauteil.

Das einzelne Schaumelement wird aus einem Vormaterialgranulatpartikel in einem Ofen expandiert. Das Schaumelement kann in einem nachfolgenden Prozess z. B. mit einem thermoplastischen Klebstoff beschichtet werden. Wird eine Vielzahl derartig beschichteter Elemente in eine Form bzw. Hohlstruktur geschüttet und erwärmt, so schmilzt die Klebstoffbeschichtung auf. An den Kontaktflächen zweier benachbarter Elemente verbindet sich die Klebstoffbeschichtung, so dass nach dem Erkalten insgesamt eine »verklebte« Schaumelementschüttung und damit das APM-Bauteil bzw. die APM-gefüllte Verbundstruktur entsteht.

Durch die beschriebene Vorgehensweise werden ideale Bedingungen für den einfachen und schnellen Technologietransfer in die Industrie und speziell in kleine sowie mittlere Unternehmen geschaffen.

- Beide Hauptprozessschritte wurden auf einfach kontrollierbare Prozesse reduziert, die unter optimalen Bedingungen durchgeführt werden.
- Aufgrund der guten Prozesskontrolle weisen die APM-Metallschaumbauteile eine exzellente Reproduzierbarkeit der Eigenschaften auf.
- APM-Aluminiumschaum hat vergleichbare Eigenschaften wie FOAMINAL® bei identischer Dichte.
- Eine Fertigungslinie für APM-Bauteile kann größtenteils aus kommerziell erhältlichen Standardkomponenten aufgebaut werden. (Handhabungsanlagen, Bandofen etc.)
- Ein Typ Schaumelement (Matrixmaterial, Volumen, Form, Dichte) kann für eine Vielzahl von verschiedenen Anwendungen bzw. APM-Bauteilen eingesetzt werden.
- Der Endanwender muss nicht notwendigerweise Kenntnisse zur Metallschaumexpansion erwerben, da er Metallschaumbauteile durch eine vergleichsweise einfache Fügeoperation (z. B. Kleben) herstellen kann.
- Die universelle Verwendbarkeit der standardisierten Schaumelemente erlaubt maximale Flexibilität bei kurzfristigen Änderungen von Bauteilgeometrien.
- Es wird eine signifikante Steigerung der Gesamteffizienz und, daraus resultierend, eine deutliche Preissenkung erreicht.



Abb. 4: Designfreiheit mit APM-Aluminiumschaumelementen.

Ansprechpartner

Joachim Baumeister
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 81
E-Mail bt@ifam.fraunhofer.de

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

Gerald Rausch
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-2 42
E-Mail ra@ifam.fraunhofer.de

Karsten Stöbener
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-1 17
E-Mail sk@ifam.fraunhofer.de

Institut

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

Anwendungen von Schaummetallen bei mobilen Arbeitsmaschinen

Ausgangssituation

Die Entwicklung von neuen Leichtbauwerkstoffen ist weltweit das Thema zahlreicher Forschungsanstrengungen. Im Idealfall sollen diese Werkstoffe vielfältige charakteristische Eigenschaften wie ein herausragendes Energieabsorptionsvermögen, eine hohe gewichtsspezifische Steifigkeit sowie gutes mechanisches und akustisches Dämpfungsverhalten aufweisen. Dieses Eigenschaftsprofil wird von geschäumten Metallen in hohem Maße erfüllt, weshalb insbesondere Aluminiumschaum für Anwendungen im Bereich der Verkehrstechnik intensiv untersucht wird.

Im BMBF-Projekt ULMA (Ultraleichtbau bei mobilen Arbeitsmaschinen) soll die Funktionalität dieser Maschinen entscheidend erweitert werden, und zwar durch Vergrößerung der Arbeitsbereiche, d. h. durch Erhöhung der Reichhöhe, Verstellgeschwindigkeit, durch Steigerung der Positionierungsgenauigkeit sowie durch die Erhöhung der Traglasten bei gleichzeitiger Verbesserung der dynamischen Standsicherheit und der Fahrdynamik. Ein ressourcenschonender Materialeinsatz und -verbrauch bei einer angestrebten Gewichtsreduzierung von > 20% soll zur Vermeidung von Achslastüberschreitungen bei gleichzeitiger Nutzung der erweiterten Arbeitsfunktionen mobiler Arbeitsmaschinen führen.



Abb. 1: Betonpumpe mit ausgefaltetem Verteilermast.

Aufgabenstellung

Eines der Ziele des IFAM-Teilprojekts »Anwendungen von Schaummetallen bei mobilen Arbeitsmaschinen« (Förderkennzeichen 02PP2494) bestand in der Bereitstellung von prototypischen Bauteilen für realitätsnahe Tests und für praktische Erprobungen durch die übrigen Projektpartner. Als Demonstrator wurde unter anderem der Verteilermast einer Betonpumpe (Abb. 1) gewählt. Ein solcher Verteilermast besteht aus hohlen Stahlkonstruktionen, die so ausgelegt werden müssen, dass sie auch bei Maximalbeanspruchungen nicht ausbeulen oder einknicken. Hier sollten Aluminiumschaumbauteile als Verstärkungselemente erprobt werden.

Die weiteren Aufgaben umfassten die Durchführung der notwendigen bauteilbezogenen Machbarkeitsuntersuchungen, sowie die Weiterentwicklung von anwendungsgerechten Fertigungstechnologien zur Herstellung von Metallschäumen und Metallschaumverbindungen. Daneben sollten sowohl das aufschäumbare, als auch das geschäumte Material charakterisiert und Beiträge zur Ermittlung von Werkstoffkenngrößen geliefert werden.



Abb. 2: Demonstrator »Betonpumpenverteilermast« auf der Messe BAUMA 2004 (oben: Übersicht, unten: Detail).

Ergebnis

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von schaumgefüllten Stahlbauteilen wurden zwei Verfahrensvarianten eingesetzt, zum einen das direkte Ausschäumen des betreffenden Bauteils, zum anderen die Herstellung eines Schaumkörpers in einer geeigneten Schäumform mit anschließendem Einkleben des Schaumkerns als Verstärkungselement in das jeweilige Stahlbauteil. Die Prüfung der Bauteile erfolgte durch die Projektpartner. Auf der Basis der positiven Ergebnisse der mechanischen Prüfungen wurde der Demonstrator erstellt und auf der Messe BAUMA 2004 ausgestellt (Abb. 2).

Bei der mechanischen Prüfung von schaumgefüllten Hohlprofilen ist ein Synergieeffekt zu beobachten. Die schaumgefüllte Struktur weist in allen Fällen ein höheres Kraftniveau auf, als es der Summe der Einzelkomponenten (Schaum und Profil) entspräche, und bildet stets eine Faltung mehr aus. Ein Vergleich von eingeklebten und eingesteckten Schaumkernen in jeweils gleichen Aluminiumprofilen zeigte, dass die geklebten Schaumkerne den nur eingesteckten Kernen stets überlegen sind (Abb. 3).

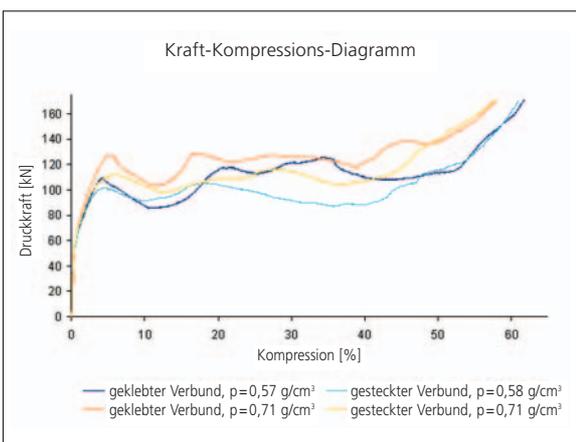


Abb. 3: Ergebnisse der Stauchversuche an schaumgefüllten Profilen mit eingeklebtem und eingestecktem Schaumkern.

Ansprechpartner

Joachim Baumeister
Telefon: +49 (0) 421 / 22 46-1 81
E-Mail: bt@ifam.fraunhofer.de

Karsten Stöbener
Telefon: + 49 (0) 421 / 22 46-1 17
E-Mail: sk@ifam.fraunhofer.de

Institut

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

Mg-Chassis-Projekt

Das Hauptziel des Mg-Chassis-Projektes ist es, Legierungen und ein geeignetes Herstellungsverfahren zu entwickeln, mit welchem die Großserienfertigung von Chassis-Leichtbaukomponenten aus Magnesium möglich ist.

Situation

Automobilhersteller setzen auf Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium, Magnesium und neuartige Verbundwerkstoffe. Einen entscheidenden Beitrag zur Gewichtsreduktion kann dabei vor allem Magnesium leisten. Der Werkstoff hat in Abhängigkeit der eingesetzten Legierung ein spezifisches Gewicht von nur $1,74 \text{ g/cm}^3$ und ist damit der leichteste metallische Konstruktionswerkstoff. Auch in anderen Branchen besteht der Wunsch nach immer leichteren Bauteilen, wie z. B. bei Laptops, Handys oder Freizeit- und Sportgeräten.

Als Folge davon hat Magnesium, bedingt durch seine geringe Dichte, sein großes Festigkeits-Gewichts-Verhältnis und seine Fähigkeit der elektrisch-magnetischen Abschirmung, in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung zugenommen. Der Werkstoff ist unbegrenzt verfügbar und leicht recycelbar.

Um den Ansprüchen einer Serienfertigung zu genügen, besteht hinsichtlich der Verarbeitungsverfahren und der Entwicklung und Erprobung neuer Magnesiumlegierungen ein großer Forschungsbedarf.

Die zurzeit erhältlichen, handelsüblichen Magnesiumlegierungen sind aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften für dickwandige Bauteile nicht geeignet. Für dickwandige, hoch beanspruchte Bauteile, die vorzugsweise im Kaltkammverfahren gegossen werden, muss zusätzlich die momentan gängige Fertigungstechnik hinsichtlich Formtemperierung, Schmelze- und Schutzgasbehandlung verbessert werden, um Magnesium-Bauteile qualitätsgerecht fertigen und einsetzen zu können.

Projektziel

Der Bereich »Leichtmetallgießen« des Fraunhofer IFAM hat neben gießtechnischen Arbeitspaketen auch die Koordination für das EU-Projekt »Mg-Chassis« übernommen, dessen Ziel ein verstärkter industrieller Einsatz von gegossenen, dickwandigen Magnesiumbauteilen im Fahrwerksbereich ist.

In dem europäischen Projekt »Mg-Chassis« arbeiten neun verschiedene Partner aus Industrie und Forschung aus vier Ländern an unterschiedlichen Fragestellungen hinsichtlich der Weiterverarbeitung von Magnesiumlegierungen.

Das Ziel des Projektes ist es, mit neu entwickelten Legierungen ein kostengünstiges Gießverfahren für Fahrwerksteile der Automobilindustrie zu entwickeln. Die Materialeigenschaften sollen hierbei mit denen der handelsüblichen Legierung AZ91 vergleichbar oder besser sein. Das Projekt beinhaltet Forschungsaktivitäten in den Bereichen Erstellung von Konstruktionsrichtlinien, Legierungsentwicklung, Prozessentwicklung und -auswahl, Korrosionsuntersuchungen und mechanische sowie Komponententests. Der Einfluss der innovativen Nachbehandlungstechnologien Liquid Chipping und Flow Forming auf mechanische und physikalische Eigenschaften von Magnesiumlegierungen wird in diesem Projekt ebenfalls untersucht.

Anhand von drei Demonstratorbauteilen, welche keiner erhöhten thermischen Belastung ausgesetzt sind (VW-Getriebestütze, Opel-Motorhalter, Fiat-Motorstütze), sollen unterschiedliche Herstellungsverfahren im Gießprozess bestätigt werden.



Abb. 1: Getriebebestütze

Ergebnis

Im Rahmen des Projektes wurden die Legierungen AZ91 und AM50 sowie vier neu entwickelte Legierungen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften und einer verbesserten Korrosionsresistenz im Squeeze-guss und Druckguss vergossen. Ein Partner arbeitet im Bereich Sandguss mit einer verbesserten, handelsüblichen Legierung für den Kokillenguss.

Die Demonstratoren wurden hinsichtlich Vergießbarkeit, mechanischer Eigenschaften der Proben und der gegossenen Bauteile, Korrosion und Kosten bewertet. Da die Umsetzung verbesserter Verbindungstechniken von Magnesium, Komponenten mit weiteren Metallen, insbesondere Aluminium und Stahl, ebenfalls ein notwendiges Ziel darstellt, wurden die Demonstratorbauteile hinsichtlich Kontaktkorrosion in Verbindung mit diesen Metallen untersucht.

Die Ergebnisse aller Gießversuche und Testverfahren werden für die Erstellung einer Datenbank verwendet, welche in einem weiteren Arbeitspaket entwickelt wird. Das Projekt wird Ende 2005 mit einem entsprechenden Bericht abschließen.

Projektpartner:

Fraunhofer IFAM, Deutschland
Fraunhofer LBF, Deutschland
Centro Ricerche Fiat, Italien
Magnesium Research Institute, Israel
Swedish Corrosion Institute, Schweden
Adam Opel AG, Deutschland
Volkswagen AG, Deutschland
Daimler Chrysler, Deutschland
University of Technology, Schweden

Ansprechpartner IFAM

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

Institut

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

Zellulare metallische Werkstoffe – Stand und Perspektiven

Einleitung

Zellulare metallische Werkstoffe (ZMW) umfassen eine neue Werkstoffklasse und stehen seit mehreren Jahren im Fokus zahlreicher werkstoffwissenschaftlicher Untersuchungen. Das zunehmende Interesse an den ZMW beruht vor allem darauf, dass durch den definierten Einbau von Poren die Dichte der Werkstoffe signifikant erniedrigt wird. Mit diesen hochporösen Werkstoffen sind Eigenschaftskombinationen einstellbar, die mit anderen Materialien nicht möglich wären. Durch die Zellstruktur können neben einer drastischen Gewichts- und Materialeinsparung weitere anwendungsspezifische Eigenschaften, wie Schall- und Energieabsorption, Wärmeisolation, mechanische Dämpfung, Filtration oder auch katalytische Reaktionen miteinander kombiniert werden. Zellulare metallische Werkstoffe stellen somit multifunktionelle Leichtbauwerkstoffe dar.

Aus Gründen der zunehmenden Bedeutung zur Gewichtseinsparung, insbesondere im Fahrzeugbau, der Luft- und Raumfahrt aber auch im Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau, wurden in den letzten 20 Jahren zahlreiche F/E-Programme (DFG, EU, USA, Japan) zur Entwicklung von ZMW realisiert, die auch zu neuen Methoden für die Herstellung von ZMW führten.

Prinzipiell können ZMW aus der flüssigen, festen oder gasförmigen Phase hergestellt werden. Den

höchsten Entwicklungsstand haben zurzeit die schmelzmetallurgischen Verfahren erreicht (siehe auch Trendbericht Aluminiumschaumtechnologie, IFAM-Jahresbericht 2003, Seiten 60–62).

Entwicklungsstand

Zurzeit werden im IFAM, Institutsteil Dresden, vier unterschiedliche Technologien zur Herstellung von ZMW verfolgt (Abb. 1):

- Hohlkugelstrukturen
- Faserstrukturen
- Offenzellige Schaumstrukturen
- Siebdruckstrukturen.

Mit diesen Verfahren wird ein weiter Bereich bezüglich der Zellgrößen (5 μm –10 mm), der Porositäten (50–97 %) und der herstellbaren Werkstoffe überdeckt, so dass ein sehr weit reichendes Eigenschaftsspektrum und somit der potenziellen Anwendungsgebiete abgedeckt werden können.

Hohlkugelstrukturen

Metallische Hohlkugeln und Hohlkugelstrukturen werden seit 5 Jahren entwickelt. Die dreistufige Herstellung läuft über das Beschichten von Styroporkugeln mit Metallpulver, einen Formgebungsschritt und einen Entbinderungs- und Sinterungsvorgang. Das Verfahren zeichnet sich



Abb. 1: Zellulare metallische Werkstoffe des IFAM Institutsteil Dresden.

durch eine hohe Flexibilität in der Werkstoffauswahl, sowie einem großen Zellgrößenspektrum (0,5–10 mm) aus. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Hohlkugelstrukturen ein exzellentes Energieabsorptionsvermögen, eine sehr gute Schallabsorption sowie ein gutes Wärmeisolationsvermögen besitzen.

Aus Gründen der sehr guten Schallabsorption von Hohlkugelstrukturen wurden beim Kooperationspartner Arvin Meritor Zeuna Stärker GmbH, Augsburg erste Versuchswagen (BMW, Skoda Octavia) mit Hohlkugelschalldämpfern ausgerüstet. Die bisherigen Ergebnisse weisen ein vergleichbares oder besseres Schallabsorptionsvermögen auf, als die Referenzschalldämpfer (Glasfaserabsorber), wobei gleichzeitig eine Gewichtseinsparung bis zu 30 % erreicht wurde!

Untersuchungen zum Wärmeleitvermögen am Beispiel von Molybdän-Hohlkugeln (Partner Plansee AG) zeigten ca. 1% des Wärmeleitvermögens vom kompakten Molybdän, wie in Abb. 2 dargestellt. Hierdurch eröffnen sich effizientere Möglichkeiten, z. B. durch die »selbst tragenden Eigenschaften« der Hohlkugelstrukturen in der Hochtemperaturisolation.

Bedingt durch den hohen Entwicklungsgrad und das große Anwendungspotenzial von metallischen Hohlkugelstrukturen ist eine industrielle Umsetzung in den nächsten 2 Jahren durch die Industriepartner Glatt GmbH und Plansee AG (Firma »hollomet®«) vorgesehen.

Faserstrukturen

Im IFAM Dresden werden seit über 10 Jahren hochporöse Faserstrukturen entwickelt. Basis ist die Herstellung unikalier Fasern nach dem Schmelzextraktionsprinzip. Hierbei werden mittels einer so genannten Schmelzextraktionswalze Fasern in einem Verfahrensschritt aus der Schmelzbadoberfläche extrahiert. Durch die verfahrensbedingte schnelle Abkühlung (bis 10^5 K/s) der Fasern (Faserdicke 30–200 μm) können unkonventionelle Faserwerkstoffe (z. B. Nickelaluminide) mit mikrokristallinem/amorphem Gefüge erzeugt werden. Die gewonnenen Fasern lassen sich durch eine entsprechende Aufbereitungstechnik zu einem Faservlies verarbeiten, welches durch Sintern seine End Eigenschaften erhält.

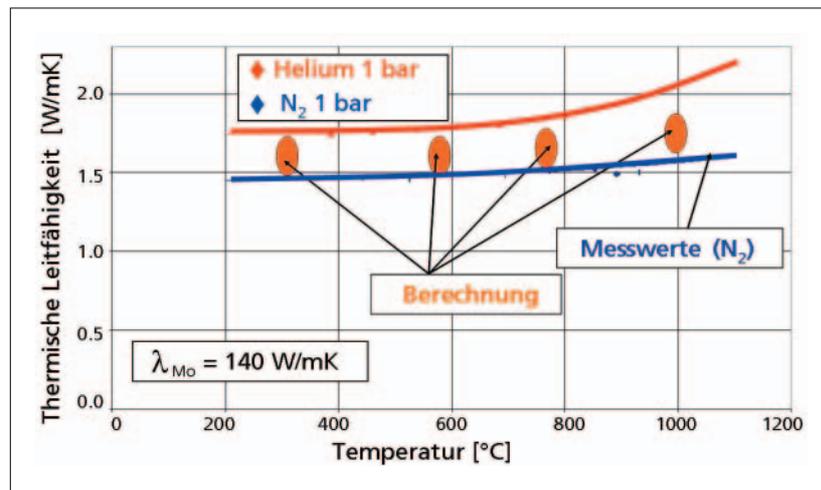


Abb. 2: Wärmeleitfähigkeit einer Mo-Hohlkugelstruktur (Kugeldurchmesser 4 mm) mit einer Strukturdichte von 0,3 g/cm³ in Abhängigkeit von der Temperatur.

In den letzten Jahren wurden Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten zu folgenden Anwendungsfeldern durchgeführt:

- Hochtemperaturfiltration
- Katalysatorträger, Dieselpartikelfilter
- Wärmetauscher
- Porenbrenner
- Katalysatoren
- Hitzeschutz, Flammensperre
- Explosionsschutz.

Hierbei könnten sich insbesondere die entwickelten faserbasierten Wärmetauscher, Porenbrenner, Katalysatoren und Explosionsschutzstrukturen (Abb. 3) als industriell umsetzbare Produkte erweisen. Es ist deshalb vorgesehen, eine IFAM-Ausgründung zum Entwicklungsgebiet der Faserstrukturen innerhalb der nächsten beiden Jahre vorzunehmen (Firma HIGHPOR®).

Offenzellige Schaumstrukturen

Das Gebiet der offenzelligen pulvermetallurgischen Schaumstrukturen wird seit ca. 2 Jahren gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe (IKTS) bearbeitet. In diesem Institut liegen seit einigen Jahren umfangreiche Erfahrungen bei der Herstellung von offenzelligen Keramikschaumen vor. Im Unterschied zu den ebenfalls offenzelligen Faserstrukturen (Porengrößen 5–300 μm) können mit den PM-Schaumen Porengrößen



Abb. 3: Explosionsschutz-Element aus gesinterten Faserstrukturen (Kooperation mit KEK GmbH).

von ca. 0,2–5 mm realisiert werden. Da das Verfahren zur Herstellung von PM-Schäumen auf der Pulverbeschichtung von Polyurethan-Schäumen besteht, kann ebenfalls eine hohe Werkstoffvielfalt gewährleistet werden. Weiterhin ist durch eine vorherige Konfektionierung der PU-Schäume die Entwicklung von Net-Shape-Bauteilen möglich. Offenzellige PM-Schäume zeichnen sich durch eine hohe Permeabilität (Abb. 4), eine große spezifische Oberfläche, gutes Wärmetauschvermögen und ein hohes Schallabsorptionsvermögen aus. Bedingt durch

die vorgegebene PU-Schaumstruktur kann ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit und Homogenität erreicht werden.

Siebdruckstrukturen

Die jüngste Entwicklung zu den ZMW stellt die Herstellung von hochporösen metallischen Siebdruckstrukturen dar. Das Grundprinzip (Patentrechte Bauer RAD, Darmstadt) der Herstellung besteht in einem schichtweisen Aufbau der Struktur durch Siebdruck. Die Strukturierung selbst wird durch Maskenvariation vorgenommen.

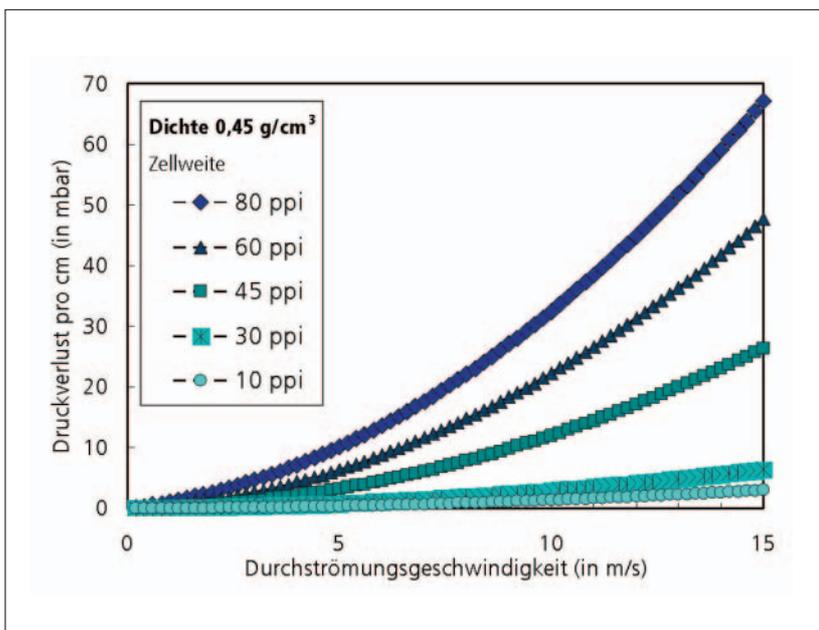
Nach der schichtweisen Generierung der Struktur ist ein anschließender Entbinderungs- und Sinterschritt notwendig. Die Vorteile des Verfahrens bestehen in der großen Formenvielfalt (Abb. 5), der Einstellung präziser und maßhaltiger Strukturen, deren Berechenbarkeit sowie in der Entwicklung von echten 3-D-Strukturen. Anwendungspotenzial für derartig designte zelluläre Strukturen liegen vorwiegend in der Mikrosystemtechnik, der Mikromechanik, Wärmetauscher, Bio-Implantate, hochpräzisen Leichtbau, Katalysatorträger und der Brennstoffzelle.

Derzeit laufen gemeinsame Entwicklungsarbeiten mit der Firma Bauer RAD, die dem IFAM eine Exklusivität für metallische Werkstoffe zur Nutzung des Siebdruckverfahrens eingeräumt hat.

Perspektiven

Zelluläre metallische Werkstoffe stellen eine relativ junge Werkstoffklasse dar. Derzeit gibt es nur wenige Produkte und Anwendungen aus ZMW (Al-Schaum: Alulight Ranshofen und Cymat AG Toronto; Alporas: Shinko Wire Japan; offenzelliger Gießschaum: m.pore Dresden, ERG Orlando). Die wesentlichen Gründe hierfür sind der geringe Bekanntheitsgrad von ZMW sowie die hohen Preise, die bisher Massen Anwendungen z. B. im Fahrzeugbau behindern.

Abb. 4: Permeabilität von offenzelligen Edelstahlschäumen (316L) in Abhängigkeit von der Zellgröße bei einer Struktur-dichte von 0,45g/cm³.



Es ist deshalb ein wesentliches Ziel, diese Werkstoffklasse, deren Eigenschaften und das Einsatzpotenzial, insbesondere bei den Anwendern, bekannter zu machen. Dies soll u. a. mit dem im IFAM-Institutsteil Dresden im Aufbau befindlichen Demonstrationszentrum »Zellulare Metallische Werkstoffe« geschehen.

Die im Dresdner Institutsteil in der Entwicklung befindlichen ZMW zeichnen sich sowohl durch eine hohe Werkstoff- als auch Strukturvielfalt aus. Zukünftige F/E-Arbeiten werden ausgerichtet in

- der Entwicklung gradiert aufgebauter Hohlkugel-, Faser- und offenzelliger Strukturen
 - z. B. für eine optimale Energiedissipation
 - z. B. für Filterelemente, kombiniert mit katalytischen Eigenschaften.
- der Entwicklung von geschlossenzelligen Hohlkugelstrukturen mit optimierten Bauteileigenschaften.
- die Entwicklung von Verbunden aus Hohlkugeln/Fasern/offenzelligen Schäumen
 - Erweiterung des Eigenschaftsspektrums.
- der Entwicklung von beschichteten Hohlkugel-, Faser- und offenzelligen Schäumen durch chemische, galvanische Technologien oder Verfahren aus der Gasphase.
 - Erhöhung der Funktionalität
 - Kostenreduktion durch Einsatz eines preiswerten Trägerwerkstoffes.
- Entwicklungsarbeiten zur Modellierung und Simulation der Eigenschaften
 - Berechenbarkeit von ZMW.
- Entwicklungsarbeiten zur Auslegung von Bauteilen, die aus ZMW gebaut sind.
- Untersuchungen und F/E-Arbeiten zur Einbeziehung neuer Herstellungstechnologien, besonders zum Entbindern und Sintern
 - Spark Plasma Sintern
 - Mikrowellensintern
 sowie zur Herstellung von 3-D-Net Shape Komponenten aus Fasern
 - Nassvlieslegen.

Es wird eingeschätzt, dass zellulare metallische Werkstoffe ein großes Zukunftspotenzial besitzen. Dies gründet sich aus den Forderungen der Industrie nach einer signifikanten Gewichts- einsparung, insbesondere im Fahrzeugbau, welches eine Material- und Energieeinsparung und damit eine nachhaltige Ressourcenschonung

ermöglicht. Weiterhin erlauben ZMW, bedingt durch das multivalente Eigenschaftsbild, die Verbesserung bestehender Produkte oder die Entwicklung und Herstellung völlig neuartiger Produkte, z. B. von hitzebeständigen Schallabsorbieren, Filterelementen mit gleichzeitiger katalytischer Wirkung, bioanaloger Knochenersatzwerkstoffe oder selbst tragender Hochtemperaturisolationen.



Abb. 5: Zellulare Siebdruckstrukturen aus Edelstahl.

Ansprechpartner

Günter Stephani
 Telefon: +49 (0) 351 / 25 37- 3 01
 E-Mail günter.stephani@epw.ifam.fraunhofer.de

Institut

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

Untersuchungen zum Mikrowellensintern von PM-Werkstoffen

Ausgangssituation

Das Mikrowellensintern wurde bereits an verschiedenen pulvermetallurgischen Systemen wie PM-Stahl, Bronze, Kupfer und Metall-Keramik-Werkstoffen untersucht. Allgemein zeigt sich dabei die Tendenz, dass Mikrowellenstrahlung zu niedrigeren Sintertemperaturen führt. Daneben werden oft durch so genannte nichtthermische Beiträge des elektromagnetischen Wechselfeldes zum Materialtransport (Corona-Entladungen, Ionisationsprozesse etc.) verbesserte mechanische Eigenschaften (z. B. Duktilität) erreicht. Die Überhöhung der elektrischen Feldstärke in den Poren eines pulvermetallurgischen Bauteiles ist unabhängig von einer eventuell gleichzeitig stattfindenden Induktionsheizung. Da kompakte Metalle nur eine geringe Eindringtiefe für elektromagnetische Strahlung mit Zentimeterwellen besitzen (im Bereich von μm) wirkt sich dieser Einfluß besonders bei pulvermetallurgischen Grünkörpern aus. Mikrowellen können auch zu einer schonenden und raschen Entbindung von Grünkörpern vor dem Sintern beitragen. Durch die MW-typische Volumenheizung werden die Temperaturgradienten im Werkstück reduziert, so dass das Entfernen des Binders schneller erfolgen kann.

Aufbauend auf diesen vielversprechenden, aber zum Teil widersprüchlichen Bewertungen des Mikrowellensinterns von pulvermetallurgischen Werkstoffen in den letzten Jahren, erfolgte die Auslegung und der Bau eines Mikrowellen-Sinterofens am IFAM. Die Ofenkonzepktion und Berechnung der Mikrowellentechnik wurde in enger Kooperation mit Innovative Verfahrenstechnik InVerTec e.V., Bayreuth und GERO Hochtemperaturöfen, Neuhausen durchgeführt. Die Aufstellung und Inbetriebnahme am IFAM Dresden erfolgten Anfang 2004.

Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war die Installation und Inbetriebnahme des Ofens, das Studium der Wirkung der MW-Strahlung auf ausgewählte PM-Werkstoffe und eine Optimierung von Sinterregimen zur Erzielung hoher Werkstoffqualitäten. Um diese zu gewährleisten, wurden umfangreiche Arbeiten zur Kalibrierung der berührungsfreien pyrometrischen Temperaturmessung durchgeführt.

Werkstoffseitige Schwerpunkte lagen insbesondere bei weitergehenden Untersuchungen zu PM Stahl und Verbundwerkstoffen auf Co-Basis (z. B. Co/Diamant-Schneidwerkstoffen).

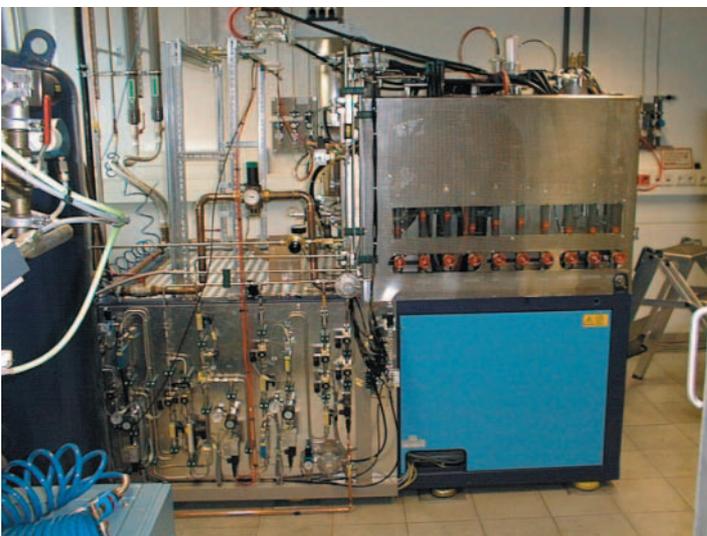


Abb. 1: Außenansicht des Mikrowellen-Hybrid-Kammerofens MIHTK 60/17 Mo.

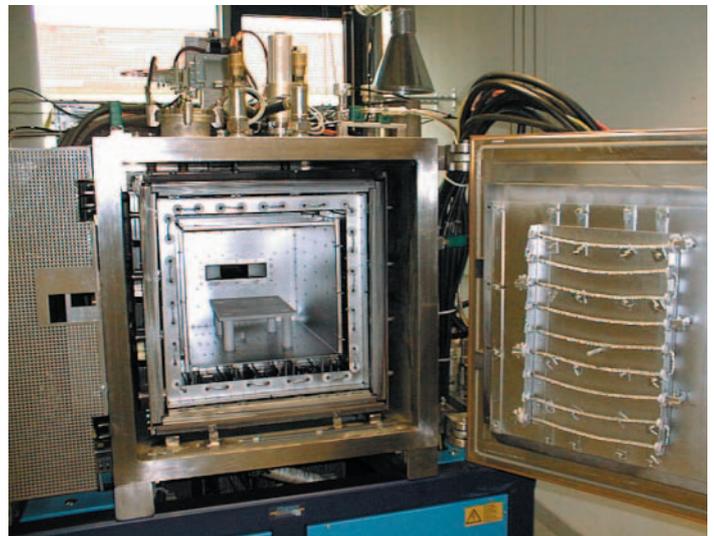


Abb. 2: Blick in den geöffneten Resonator des Mikrowellensinterofens mit einfachem Chargiergestell aus hBN.

Projektbeschreibung

Auf Basis der vorhandenen Daten zum Mikrowellensintern von metallischen Werkstoffen wurde ein Ofenkonzept gewählt, welches das Erwärmen und Sintern eines möglichst breiten Spektrums an metallischen Werkstoffen bzw. Verbundwerkstoffen ermöglicht.

Dazu wurde ein Kaltwand-Kammer-Ofen (Typ MIHTK 60/17 Mo, GERO Hochtemperaturöfen GmbH, Neuhausen) mit einem Heißwand-Multimode-Resonator (ca. 50 l Nutzvolumen) aus Molybdän bestückt (Abb. 1 und 2). Die konventionelle Heizung erfolgt mit Mo-Heizern (150 kW), die Mikrowellen werden von einem 6 kW Magnetron (2.45 GHz) über Hohlleiter eingestrahlt.

Dieser Aufbau, bei dem im Innenraum keine keramischen Isoliermaterialien zum Einsatz kommen sollen, erlaubt die Einstellung von definierten Atmosphären. Durch die explosionsgeschützte Ausführung ist ein Entbindern und Sintern von Bauteilen in Inertgas, Vakuum oder auch Wasserstoff bis zu einer Temperatur von 1700 °C möglich.

Die pyrometrische Temperaturmessung muss, sowohl bei der konventionellen Erwärmung als auch im Mikrowellenfeld, weitestgehend genau erfolgen. Nur so lässt sich eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zwischen diesen Erwärmungsverfahren gewährleisten. Deshalb wurden für jedes Werkstoffsystem umfangreiche Kalibrierungen der Temperaturmessung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Emissionsgrad von Grünlingen während der Wärmebehandlung, aufgrund der zunehmenden Reflektivität, bis zu einem Grenzwert absinkt. Dieser Wert ist von weiteren Faktoren wie z. B. der Gründichte (und damit der Porosität der Oberfläche) und der Farbe abhängig (Abb. 3 und 4).

In Vorversuchen wurden verschiedene Werkstoffsysteme, meist in Zusammenarbeit mit Industriepartnern, evaluiert. Neben PM Stahl und PM Aluminium wurden weich- und hartmagnetische Werkstoffe, Hochtemperaturwerkstoffe sowie Diamant/Co-Verbundwerkstoffe untersucht.

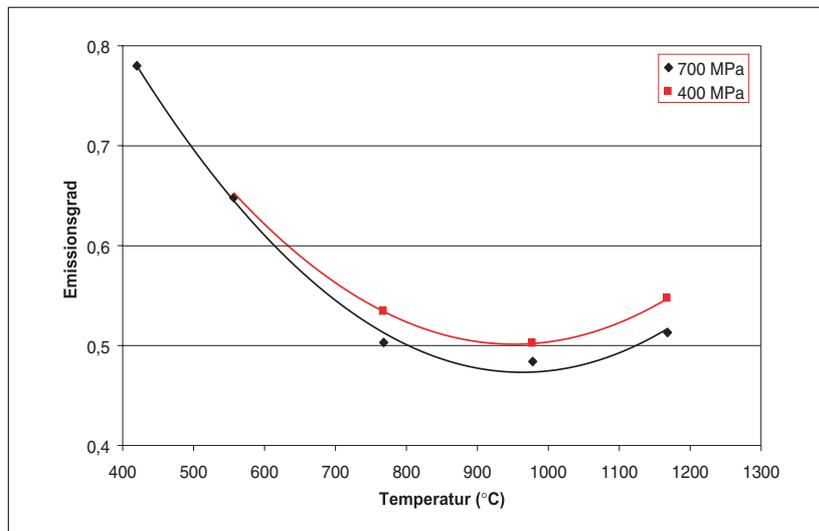


Abb. 3: Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrads von PM Stahl (Distaloy AE + 0.5% C, Höganäs AB) für verschiedene Gründichten.

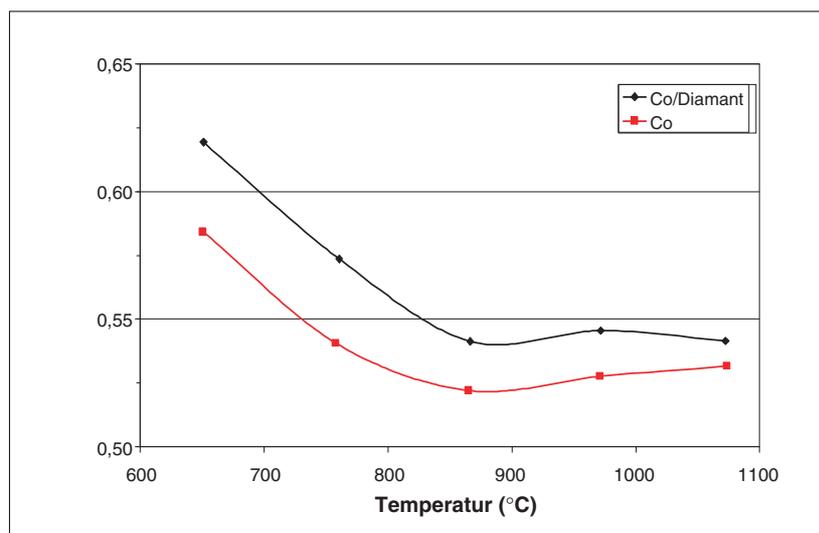


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrads von reinem Co und Co/Diamant-Verbundwerkstoffen für gleiche Gründichten.

Am Beispiel von Diamant/Co-Schneidwerkstoffen ist in Abb. 5 die Sinterdichte von konventionell bzw. von Mikrowellen unterstützt gesinterten Bauteilen gezeigt. Innerhalb des elektromagnetischen Wechselfeldes sintern die Schneideinsätze wesentlich schneller als bei Verwendung anderer Verfahren. Bei diesen Werkstoffen steht die Kurzzeitsinterung bei möglichst niedrigen Temperaturen im Vordergrund, um Schädigungen der Diamant-Schneidphase zu vermeiden.

Zukünftige Arbeiten schließen neben weiteren relevanten Werkstoffsystemen die Untersuchung des Mikrowellensinterns von zellularen Werkstoffen (z. B. Hohlkugelstrukturen) ein. Diese Materialien lassen aufgrund der niedrigen Gründichte und der damit verbundenen großen Eindringtiefe für das Mikrowellenunterstützte Sintern interessante Effekte und Ergebnisse erwarten. Besonders für die Entbinderung von hochporösen Materialien verspricht der Einsatz von Mikrowellen eine erhebliche Prozesszeitverkürzung, da es durch die Volumenheizung möglich sein sollte, eine vollständige Entbinderung ohne lokale Übertemperaturen zu erhalten.

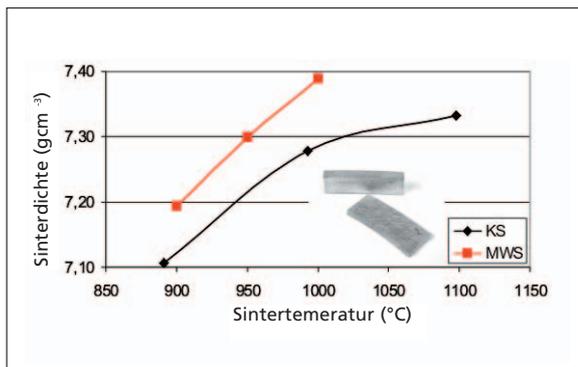


Abb. 5: Sinterdichte von Diamant/Co-Verbundwerkstoffen nach 30 min konventioneller bzw. Mikrowellen unterstützter Sinterung.

Ansprechpartner

Jürgen Schmidt
 Telefon: +49 (0) 351 / 25 37- 3 24
 E-Mail juergen.schmidt@epw.ifam.fraunhofer.de
 Thomas Schubert
 Telefon: +49 (0) 351 / 25 37- 3 46
 E-Mail thomas.schubert@epw.ifam.fraunhofer.de

Projektpartner

GERO Hochtemperaturöfen GmbH, Neuhausen
 InVerTec e.V., Bayreuth
 Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung,
 Universität Bayreuth

Institut

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

Metallische Kurzfasern als Katalysatoren für die oxidative Dehydrierung in der Gasphase

Ausgangssituation

Propen ist ein wichtiger Ausgangsstoff für die chemische und die Kunststoffindustrie. Die benötigten Mengen können nur mit hohem Kostenaufwand produziert werden. Dabei kommen hauptsächlich Steam-Cracking-Prozesse zum Einsatz. Andere Herstellungsverfahren sind die katalytische Dehydrierung und das katalytische Cracken. Die oxidative Dehydrierung (ODH) von Propan würde eine preiswerte Quelle für das benötigte Propen darstellen. Bei den Forschungen nach geeigneten Katalysatoren und Reaktionsbedingungen ist bisher noch kein entscheidender Durchbruch gelungen. Die ODH von Isopropanol zu Aceton kann als Modellreaktion für ODH-Reaktionen höherer Alkohole dienen.

Die oxidative Dehydrierung von niederen Kohlenwasserstoffen und Alkoholen erfordert spezifische Reaktionsbedingungen, um Totaloxidationsreaktionen zu vermeiden. Es erweist sich als vorteilhaft, die Sauerstoffkonzentration im Eduktgasstrom gering zu halten. Außerdem werden kurze Verweilzeiten am Katalysator benötigt. Dies wird durch geringe spezifische Oberflächen der Katalysatoren erreicht. Auch müssen diese einen geringen Druckverlust über ihre Schüttung aufweisen, um eine schnelle und gleichmäßige Durchströmung mit Eduktgasstrom zu ermöglichen. Weiterhin ist eine gute Wärmeabfuhr im Katalysatorbett von Vorteil, um überhitzte Zentren zu vermeiden.

Aufgabenstellung

Im Rahmen eines öffentlich geförderten BMBF-Projektes wurden zehn verschiedene Katalysatoren auf Basis metallischer Kurzfasern im Hinblick auf ihre katalytische Wirksamkeit für ODH-Reaktionen untersucht. Diese Fasern weisen einen geringen Druckverlust über ihre Schüttung und eine geringe, jedoch ausreichend hohe spezifische Oberfläche auf. Vorteilhaft ist die Möglichkeit, die Zusammensetzung der Fasern aus nahezu beliebig wählbaren, katalytisch aktiven Metallen variieren zu können.

Die spezielle Aufgabe des IFAM bestand in der Werkstoffauswahl, der Herstellung der metallischen Kurzfasern über das Tiegel-schmelzextraktionsverfahren und ihrer Charakterisierung vor und nach der katalytischen Testung. Am Institut für Technische Chemie und Umweltchemie der Friedrich Schiller-Universität Jena wurden die katalytischen Eigenschaften der Kurzfasern in geeigneten Versuchsanordnungen getestet (publiziert in: Chemie Ingenieur Technik 2004, 76, No. 6, 693-699). Die Auswahl der Legierungsbestandteile der Fasern erfolgte nach dem Vorbild bekannter Mischoxid-Oxidationskatalysatoren. Die dort als Aktivkomponenten verwendeten Oxide wurden in der vorliegenden Arbeit in metallischer Form als Legierungsbestandteile der Fasern eingebracht. Aus werkstoffwissenschaftlicher Sicht war weiterhin interessant, den Einfluss der Struktur, wie kristallin, amorph oder quasikristallin, auf die katalytische Wirksamkeit zu betrachten.

Ergebnisse

Am Beispiel ausgewählter Werkstoffe (Tab. 1) werden die wichtigsten Ergebnisse beschrieben. Die Katalysatoren aus Cu_3Sn und CuNiMnFe haben einen kristallinen Gefügebau, die AlCuFe -Fasern liegen in quasikristalliner Form vor und die CuTiNiZrSn -Fasern zeichnen sich durch eine amorphe Basisstruktur mit kristallinen Ausscheidungen aus. Zum Einstellen der quasikristallinen Struktur wurden die AlCuFe -Fasern nach der Schmelzextraktion 3 h bei 720°C wärmebehandelt.

Katalysator	Zusammensetzung [Masse-%]	Mittlere Faserabmessungen		Spezifische Oberfläche [m ² /g]	Propan: ODH	Isopro- panol: ODH
		Länge [mm]	Durchmesser [μm]			
Cu ₃ Sn	Cu 61,9 Sn 38,1	5,27	70,0	0,0103 (BET) 0,0061 (opt.)	-	++
CuTiNiZrSn	Cu 39,94 Ti 22,58 Ni 13,83 Zr 14,33 Sn 9,32	9,47	95,0	0,0277 (BET) 0,0052 (opt.)	+	++
AlCuFe	Al 42,40 Cu 40,75 Fe 16,85	10,26	138,0	0,0418 (BET) 0,0104 (opt.)	++	-
CuNiMnFe	Cu 64 Ni 28 Mn 7 Fe 1	10,30	81,6	0,007 (opt.)	+	++

Tab. 1: Zusammenfassung der werkstoffseitigen und katalytischen Eigenschaften der untersuchten Fasern bei der ODH von Propan bzw. Isopropanol.

Die spezifische Oberfläche der Fasern wurde über die Gasadsorption (BET-Verfahren) und mittels bildanalytischer Auswertung von Faserquerschliffen (optisch) ermittelt. Der deutlich höhere BET-Wert der AlCuFe-Fasern ist auf die feinstrukturierte poröse Oberfläche der quasikristallinen Fasern zurückzuführen. REM- und EDX-Untersuchungen weisen auf eine nm-dünne Oxidbelegung der Oberfläche hin (Abb. 1). Abb. 2 zeigt die Faseroberfläche nach dem Katalysatortest, die der charakteristischen feinstrukturierten Oberfläche im Ausgangszustand gleicht.

Bei der ODH von Propan zu Propen zeigten sich die quasikristallinen AlCuFe-Fasern als besonders geeignet. Es wurden hohe Propenselektivitäten bei gleichzeitig hohen Umsätzen gefunden (Abb. 3). Für diese Reaktion erwiesen sich auch die anderen Cu-haltigen Katalysatoren bei jedoch deutlich geringerem Umsatz als geeignet.

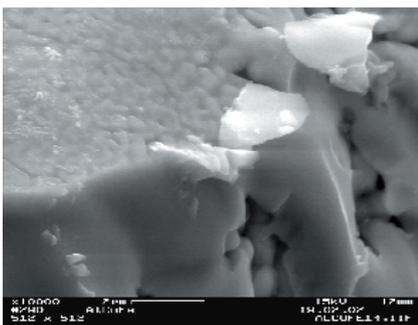


Abb. 1: REM-Abbildung der Oberfläche mit Faserbruchkante einer AlCuFe-Faser vor der katalytischen Belastung.

Die durchgeführten Langzeituntersuchungen und die Charakterisierung der AlCuFe-Fasern nach dem Einsatz zeigten eine hervorragende Stabilität bei gleich bleibend hoher katalytischer Aktivität. Bei der Selektivoxidation von Isopropanol zu Aceton wiesen einige Fasern ein ausgezeichnetes Umsatz- und Selektivitätsverhalten auf (Tab. 1). Mit Hilfe dieser Katalysatoren, beispielhaft dargestellt in Abb. 4 für die CuTiNiZrSn-Fasern, können nahezu vollständige Umsätze bei 380 °C erreicht werden bei gleichzeitig hoher Acetonselktivität.

Es wird eingeschätzt, dass die schmelzextrahierten metallischen Kurzfasern aufgrund ihrer Variabilität in der Legierungszusammensetzung und damit des Gefügeaufbaus sowie ihrer Oberflächenmorphologie und der optimalen spezifischen Oberfläche ein hohes Potenzial als Katalysatormaterial für branchentypische Verfahren der oxidativen Dehydrierung aufweisen.

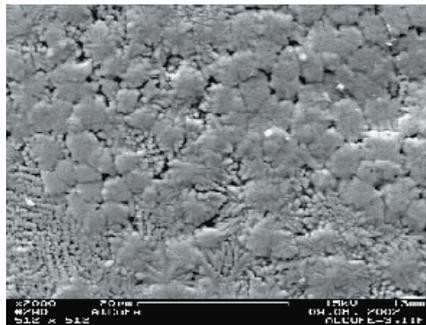


Abb. 2: REM-Abbildung der Faseroberfläche einer AlCuFe-Faser nach 5 Messzyklen der ODH von Propan.

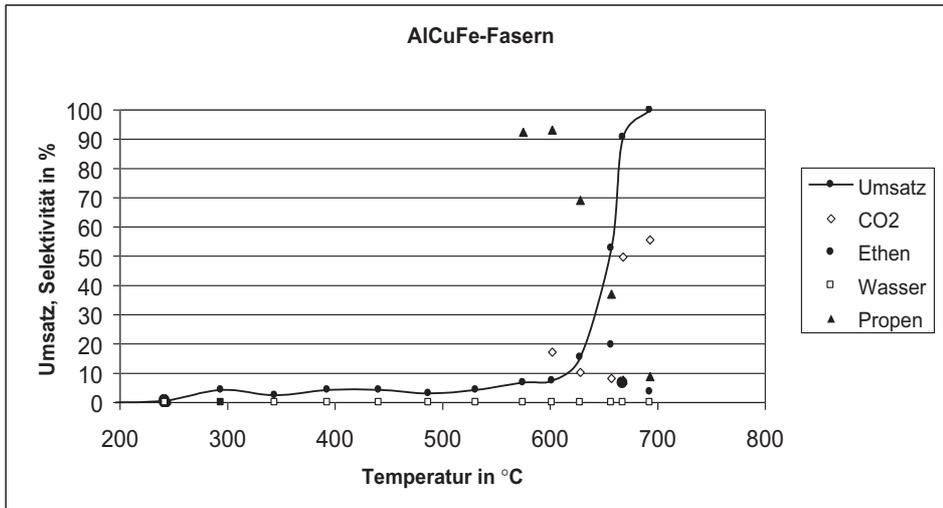


Abb. 3: Temperaturabhängigkeit von Umsatz und Selektivität bei der Gasphasen-ODH von Propan an AlCuFe-Fasern.

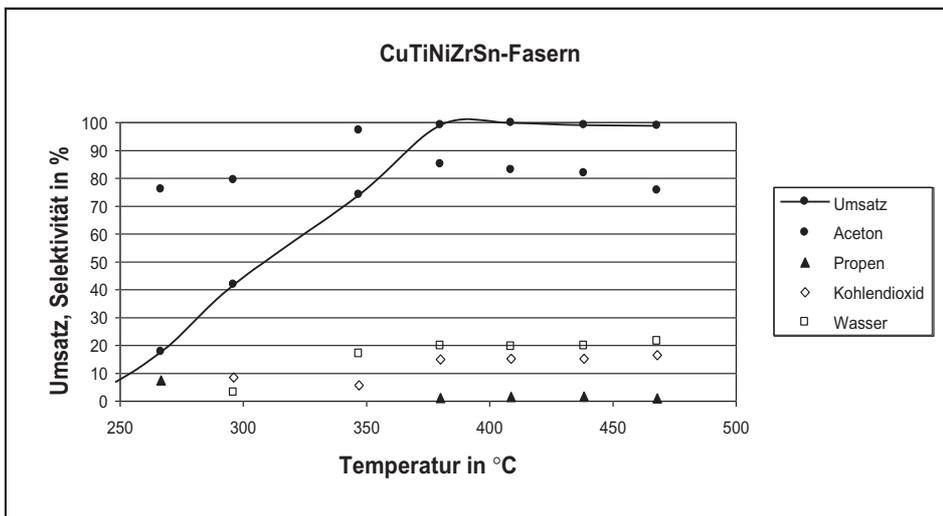


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit von Umsatz und Selektivität bei der Gasphasen-ODH von Isopropanol an CuTiNiZrSn-Fasern.

Ansprechpartner

Ingrid Morgenthal
 Telefon: +49 (0) 351 / 25 37- 3 20
 E-Mail morgenthal@epw.ifam.fraunhofer.de

Projektpartner

Friedrich Schiller-Universität Jena, ITUC
 ReMetall Drochow GmbH
 ULT Umwelt-Lufttechnik, Kittlitz
 Techno-Coat Oberflächentechnik GmbH, Zittau
 HS Zittau-Görlitz; HTW Dresden

Institut

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

Prof. Dr. rer. nat. O.-D. Hennemann
(geschäftsführend)
– 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

Prof. Dr.-Ing. M. Busse
– Formgebung und Funktionswerkstoffe –

Telefon: +49 (0) 421 / 22 100
Telefax: +49 (0) 421 / 22 46-3 00
E-Mail 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

Standort Dresden:

Fraunhofer-Institut
für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung IFAM

Winterbergstraße 28
01277 Dresden

Herausgeber:

Fraunhofer-Institut
für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung

ISSN 1439-6009

Redaktion:

Brigitte Beißel
Martina Ohle
Edda Debrassine

Die Interviews mit den Institutsleitern
führte Kai-Uwe Bohn.



Fraunhofer Institut
Fertigungstechnik
Materialforschung

www.ifam.fraunhofer.de