



DRESDEN

JAHRESBERICHT
2010

JAHRESBERICHT 2010







VORWORT

*Die Technik von heute ist das Brot von morgen -
die Wissenschaft von heute ist die Technik von morgen.*

Richard von Weizsäcker

Das Jahr 2010 war zu Beginn noch durch die Wirtschaftskrise geprägt. In der zweiten Hälfte des Jahres begann der wirtschaftliche Aufschwung, der letztlich dazu führte, dass das Fraunhofer IWS am Jahresende den bisher höchsten Industrieertrag erzielen konnte. Mit knapp 8,5 Mio. € wurde ein Wachstum von ca. 10 % erreicht. Gleichzeitig konnten verstärkt öffentliche Projekte eingeworben werden, so dass das Fraunhofer IWS auf ein äußerst erfolgreiches Jahr 2010 zurückblicken kann.

Herausragend ist ein über den Projektträger Produktionstechnik gefördertes Projekt zur Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien, in welches mehrere Abteilungen des IWS einbezogen sind. Eine weitere Herausforderung im Bereich der Energie stellt ein Projekt zur Aufspaltung von Erdgas in Wasserstoff als Energieträger und Kohlenstoff durch Sonnenlicht dar. Dieses Projekt wird von Katar und dem Land Sachsen unterstützt. Zur Vertragsunterzeichnung kam Ihre königliche Hoheit Sheikha Mozah Bint Nasser Al Missned persönlich nach Deutschland.

Seit dem Jahr 2009 laufen weitere Großprojekte im Bereich der Energie, in welchen nennenswerte Erfolge vorzuweisen sind. Hierzu gehören das Projekt zur Energieeffizienz mit der TU Dresden und das von BMW koordinierte Projekt zur Reibungsminderung.

Unabhängig von der verstärkten Orientierung des Fraunhofer IWS in Richtung Energietechnik konnten wir auch im Jahr 2010 eine Reihe von neuen am IWS entwickelten Verfahren und Prozessen in die Serienfertigung überführen. Eine solche Industrieüberführung kann als Highlight des IWS und der Fraunhofer-Gesellschaft bezeichnet werden. Über einige darf im Folgenden berichtet werden.

Im Jahr 2010 wurde die Zusammenarbeit im wissenschaftlichen Bereich mit der TU Dresden und den in Dresden ansässigen Leibniz-Instituten sowie dem Helmholtz-Institut im Rahmen des DRESDEN-concept weiter verstärkt.

Die Wirtschaftskrise scheint vollständig überwunden. Die Industrie fragt verstärkt nach Unterstützung im FuE-Bereich, und auch die öffentliche Hand fördert wieder stärker als noch vor einigen Jahren. Das Fraunhofer IWS ist mit seiner Ausrichtung und seinen Arbeitsgebieten gut aufgestellt, so dass wir sehr positiv in das Jahr 2011 gehen und ein weiteres kräftiges Wachstum erwarten.

Eckhard Beyer

INHALT

AUS DEM FRAUNHOFER IWS

VORWORT	3
INHALT	4
HIGHLIGHTS IM JAHR 2010	6
AUS DEM KURATORIUM	10
DAS INSTITUT IM PROFIL	12
KERNKOMPETENZEN	12
DAS INSTITUT IN ZAHLEN	14
ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER	16

AUS DEN GESCHÄFTSFELDERN

ABTRAGEN UND -TRENNEN	18
DER LASER ALS WERKZEUG ZUM TRENNEN UND MIKROBEARBEITEN	
FÜGEN	34
NEUE FÜGETECHNOLOGIEN FÜR METALLISCHE UND NICHTMETALLISCHE WERKSTOFFE	
RANDSCHICHTTECHNIK	46
GANZHEITLICHER WERKSTOFF-, VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNISCHER ANSATZ	



THERMISCHES BESCHICHTEN 58

**SYMBIOSE ZWISCHEN BESCHICHTUNGSTECHNIK
UND WERKSTOFF-KNOW-HOW**

CVD-ATMOSPÄRENDRUCK-SCHICHTTECHNIK 68

**NEUE TECHNOLOGIEN VERBESSERN
FUNKTIONALITÄT VON OBERFLÄCHEN**

PVD-VAKUUM-SCHICHTTECHNIK 82

**NEUARTIGE SCHICHTSYSTEME ERWEITERN
ANWENDUNGSSPEKTRUM**

NETZWERKE, NAMEN, DATEN

AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN 2010 98

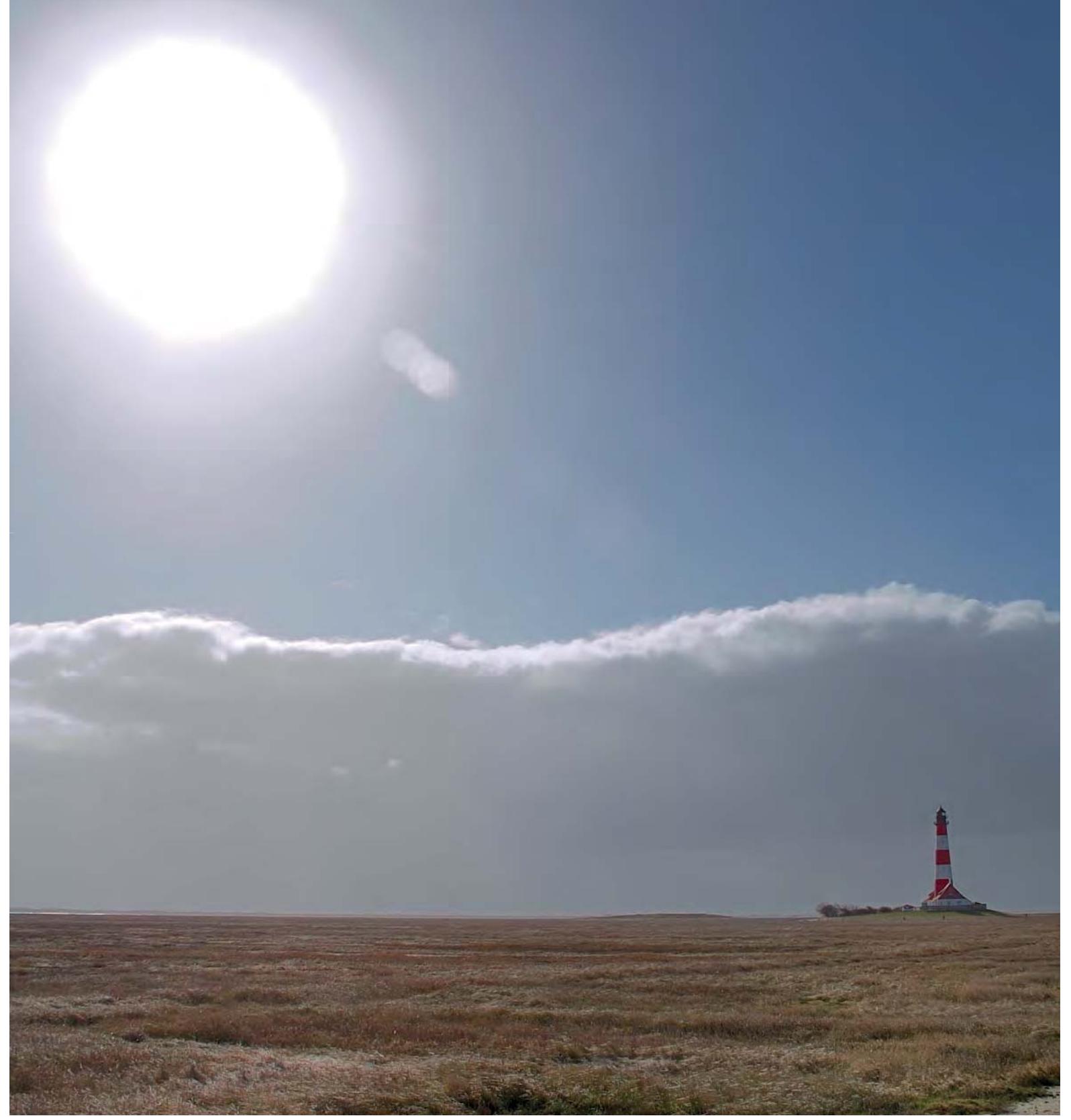
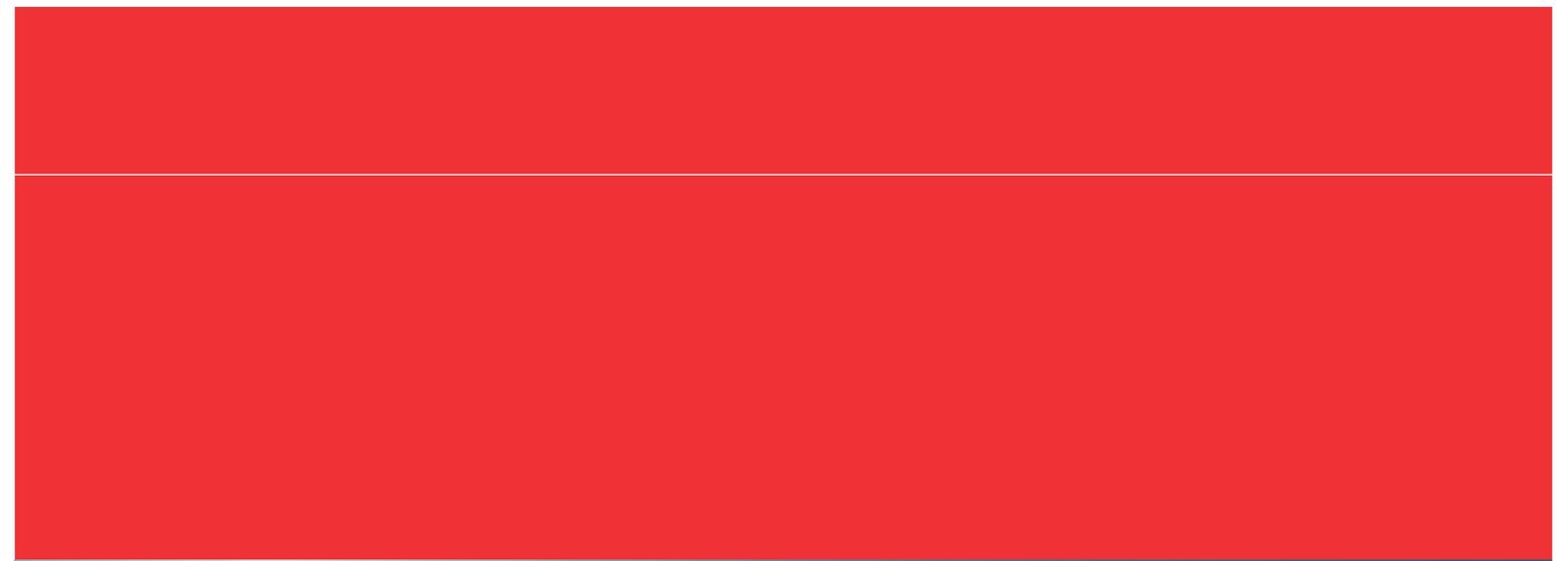
NETZWERKE 100

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT	101
ANBINDUNG AN DIE TU / DRESDEN-CONCEPT	102
DIZE^{EFF}	104
DOC / PCW	106
CCL	108
NANO / LIFT	110
FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES	112

BESONDERE EREIGNISSE 114

VERÖFFENTLICHUNGEN 116

KONTAKTADRESSEN UND ANFAHRT 121



HIGHLIGHTS IM JAHR 2010

ENERGIEFORSCHUNG IM FRAUNHOFER IWS

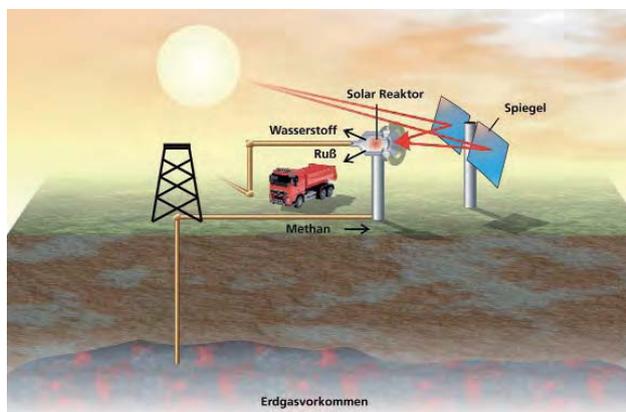
Innovationen im Energiebereich sind wichtiger denn je für die Zukunftsfähigkeit von Wirtschaft und Gesellschaft. Die Entwicklung sowie Umsetzung moderner Technologien im Energiesektor ist für das Fraunhofer IWS von wesentlicher Bedeutung. 5 Mio. Euro akquirierte das IWS 2010 bei der Industrie und Zuwendungsgebern für Forschungsprojekte im Bereich der Energiewandlung, -speicherung und -effizienz. Eigenmittel in Höhe von etwa 1 Mio. Euro flossen 2010 in Grundlagen- und Vorlauftforschung in diesem Bereich. Zwei in 2010 gestartete Projekte mit besonderer Ausstrahlungskraft werden im Folgenden vorgestellt. Das im Rahmen des DRESDEN-concept initiierte Projekt DIZE^{eff} folgt auf den Seiten 104 / 105 des Jahresberichtes.

PRODUKTIONSTECHNISCHES DEMONSTRATIONSZENTRUM FÜR LITHIUM-IONEN-ZELLEN - DELIZ

In dem 2010 gestarteten Verbundforschungsprojekt **DeLIZ** (Förderkennzeichen 02P02640) widmen sich Forscher des Fraunhofer IWS Dresden, der TU Dresden und der TU München produktionstechnischen Fragestellungen entlang der Prozesskette zur Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen. Sie wollen neue Lösungsansätze für eine kostengünstige Großserienfertigung aufzeigen, prozessübergreifende Qualitätssicherungssysteme aufbauen und innovative produktionstechnische Lösungen entlang der gesamten Prozesskette schnell in einen serientauglichen Status überführen. Schwerpunkte des Forschungsprojektes liegen auf der energieeffizienten Elektrodenbeschichtung im Rolle-zu-Rolle-Verfahren, dem kostengünstigen Konfektionieren, der voll- und teilautomatisierten Handhabung und Zellbildung, dem Fixieren der Einzelfolien und dem Fügen der Folienpakete mit minimalem Übergangswiderstand sowie der Herstellung stoffschlüssiger Kontakte aus Al-Cu für das Packaging der Einzelzellen. In allen Teilbereichen sind Konzepte, Technologien und Systemtechnik zu entwickeln. Erste Ergebnisse des Projektes werden auf den Seiten 78 / 79 dargestellt.

FORSCHUNGSKOOPERATION MIT KATAR ZUR SOLAR-THERMISCHEN HERSTELLUNG VON WASSERSTOFF

Das erste gemeinsame Forschungsprojekt der Fraunhofer-Gesellschaft und des Qatar Science & Technology Park startete am 30. September 2010. Ziel des Projektes ist die klimaneutrale Gewinnung von Wasserstoff und Ruß mittels Solarenergie. Qatar Science & Technology Park (QSTP) und das Fraunhofer IWS entwickeln in dem Projekt gemeinsam einen Solarreaktor, der konzentrierte Sonnenenergie zur direkten Aufspaltung von Methangas in Wasserstoff und Kohlenstoffpartikel nutzt. Dieses Verfahren trägt erheblich zur Reduzierung der CO₂-Emission bei.



DRESDNER KONFERENZ »ZUKUNFT ENERGIE«

Ergebnisse der genannten und weiterer Forschungsprojekte präsentiert das Fraunhofer IWS gemeinsam mit der TU Dresden und den anderen Dresdner Forschungseinrichtungen auf der Dresdner Konferenz »Zukunft Energie« vom 11. bis 13. Mai 2011. Vertreter aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft sind eingeladen, ihre Ergebnisse, Produkte und Erfahrungen zu den Schwerpunkten Energieumwandlung, Energiespeicherung und effizienter Energieeinsatz vorzustellen. Weitere Informationen finden Sie unter:

<http://www.zukunftenergie-dresden.de>

HIGHLIGHTS IM JAHR 2010



FÜNFTE LASERBASIERTE AIRBAG-SCHNEIDANLAGE IN DIE INDUSTRIE ÜBERFÜHRT

Die vom Fraunhofer IWS zusammen mit der Firma Held Systems Deutschland GmbH entwickelte kompakte Anlagentechnik zum flexiblen Laserstrahlschneiden von Airbagmaterial konnte 2010 an einen weiteren Industriekunden übergeben werden. Nutzer der hochproduktiven Anlage ist diesmal die Firma Autoliv Poland Restraint Systems, der weltweit größte Hersteller von Sicherheitskomponenten für Autos. Vorteile der Laserschneidanlage sind die gleichmäßig hohe Qualität des Einlagenschnittes an der bewegten, bis zu 3 m breiten Materialbahn und die höhere Ausbringungsleistung im Vergleich zum bisherigen Mehrlagenschnitt.

ROBOTERBASIERTE LASERANLAGE ZUM HÄRTEN UND AUFTRAGSCHWEISSEN VON WERKZEUGEN ÜBERGEBEN

Eine roboterbasierte Laseranlage zum Bearbeiten von Schneid- und Umformwerkzeugen wurde 2010 bei der Audi AG in Ingolstadt in Betrieb genommen (Abb. 1). Im Zusammenwirken mit der KUKA Roboter GmbH und dem Fraunhofer IWS Dresden entstand eine Anlage zum Laserstrahlhärten und -auftragschweißen. Sie ist insbesondere auf die Neufertigung und Reparatur von Karosseriewerkzeugen zugeschnitten. Spezielle Systemkomponenten für die Strahlformung, Prozessregelung und Pulverzufuhr sowie Module für die Montage an der Roboterhand lieferte das Fraunhofer IWS. Darüber hinaus ermittelte das IWS Prozessparameter für unterschiedliche Applikationen und koordinierte die Inbetriebnahme der Systeme für die Prozesssteuerung.



FLEXIBLE REPARATUR VON TRIEBWERKSKOMPONENTEN DURCH LASER-PULVER-AUFTRAGSCHWEISSEN MIT IWS-KOMPONENTEN

In Zusammenarbeit mit der Maschinenfabrik Arnold ist ein neues automatisiertes Bearbeitungssystem zur Reparatur von Triebwerkskomponenten durch Präzisions-Auftragschweißen mit Faserlaser bei der MTU Aero Engines in München eingeführt worden (Abb. 2). Mittels eines optischen Geometrieerfassungssystems werden Lage und Ist-Zustand eines beschädigten Bauteils ermittelt. Eine eigens entwickelte Software berechnet anschließend die optimale Auftragschweißstrategie. Darauf folgt unmittelbar der zehntelmillimetergenaue Auftrag des Metallpulvers mit Pulverdüsen aus der IWS-COAXn-Serie. Ein ebenfalls vom IWS entwickeltes Prozessregelsystem bildet einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung. Die Anlage läuft seit September im Serienbetrieb. Ein Anwendungsbeispiel ist die Reparatur von Schaufelspitzen, die nunmehr mit einer um 30 Prozent reduzierten Prozesszeit ausgeführt wird.

ZWEITE ANLAGE ZUR GROSSFLÄCHEN-PRÄZISIONS-BESCHICHTUNG FÜR RÖNTGENOPTISCHE ANWENDUNGEN IM INDUSTRIELLEN EINSATZ

Zur Brechung oder Reflexion von EUV- oder Röntgenstrahlung sind speziell beschichtete Oberflächen erforderlich. In enger Zusammenarbeit mit der sächsischen Firma Roth & Rau Micro-Systems GmbH gelang es dem Fraunhofer IWS Dresden, ein geeignetes Anlagenkonzept auf die speziellen Anforderungen eines industriellen Anwenders zuzuschneiden und umzusetzen (Abb. 3). Die Anlage ist mit 6 Beschichtungsquellen ausgerüstet, wodurch eine besonders effektive Abscheidung der Schichten möglich ist. Substrate mit einem Durchmesser von bis zu 680 mm können in der Anlage gehandhabt werden. Die mit der Anlage erzeugten optischen Elemente für Röntgen- oder EUV-Strahlung kommen unter anderem in Analysegeräten der Medizintechnik oder in naher Zukunft auch in Lithographiesystemen in der Mikroelektronik zum Einsatz.



LASER-ARC-MODUL FÜR BESCHICHTUNGSVERSUCHE BEI VTD VAKUUMTECHNIK DRESDEN GMBH IN ERPROBUNG

Zusammen mit der VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH hat das Fraunhofer IWS die PVD-Hartstoff-Beschichtungsanlage DREVA 600-LAM entwickelt und in Betrieb genommen (Abb. 4). Herzstück der Anlage ist ein neuartiger Laser-Arc-Modul (LAM 500) zur Abscheidung von superharten, amorphen Kohlenstoffschichten (Diamor®) auf Werkzeugen und Bauteilen, die sich als Verschleißschutzschichten unter extremen Belastungen bewähren. Mit Einführung der vom IWS entwickelten neuartigen Laser-Arc-Technologie steht diese auch VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH sowohl zur Bemusterung als auch Serienbeschichtung von Werkzeugen und Bauteilen für Interessenten zur Verfügung. VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH bietet in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWS auch Anlagentechnik DREVA 600-LAM bzw. LAM 500 zur Nachrüstung anderer Anlagentypen von interessierten Nutzern an.

SCHNELLTESTER FÜR PORÖSE MATERIALIEN VERFÜGBAR

Weltweit wird intensiv auf dem Gebiet neuartiger poröser Materialien geforscht. Die Charakterisierung dieser Materialien erfolgt meist durch die zeit- und kostenaufwändige Bestimmung der inneren Oberfläche mittels BET-Messungen. Die zunehmende Anwendung kombinatorischer Hochdurchsatzsynthesen und das damit verbundene hohe Probenaufkommen erfordern jedoch eine schnelle Charakterisierungsmöglichkeit für eine Vielzahl von Proben.

Das in Zusammenarbeit mit der Firma Rubotherm entwickelte Messsystem *infraSORB* nutzt die bei der Adsorption freigesetzte Wärme zur Abschätzung der inneren Oberflächen bzw. der Aufnahmekapazität eines porösen Materials. Bis zu 12 Proben können simultan und innerhalb weniger Minuten hinsichtlich Porosität getestet und diejenige mit dem größten Anwendungspotenzial identifiziert werden. Die Firma Rubotherm hat Lizenzrechte zur Vermarktung der IWS-Entwicklung erworben. Die Serienproduktion des Laborgerätes ist in Vorbereitung.



SICHERE BESTIMMUNG DER PERMEATIONS-RATEN VON BARRIEREMATERIALIEN

Der Einsatz eines Laserstrahles ist der Schlüssel, um die Permeationseigenschaften von Barrierematerialien mit minimaler Durchlässigkeit sicher und schnell zu bestimmen. Die in enger Kooperation mit der Dresdner Firma Sempa Systems GmbH entwickelte Methode der Laserdiodenspektroskopie erlaubt es, geringste Mengen an permeierten Wasserdampf nachzuweisen und daraus die Wasserdampfpermeationsrate zu berechnen. Das Messprinzip wurde im Rahmen eines europäischen Kooperationsprojektes erfolgreich in ein industrietaugliches Gerät mit Namen *HiBarSens* überführt. Weniger als 100 µg Wasserdampf pro Tag und pro Quadratmeter Folienfläche können mit dem System bereits sicher detektiert werden. Selbst die nächste Größenordnung von 10⁻⁶ g Wasserdampf pro Tag und Quadratmeter könnte in naher Zukunft messbar werden.

Am Fraunhofer IWS steht ein Gerät für Messdienstleistungen zur Verfügung (Abb. 5). Es bietet sich insbesondere für die Charakterisierung oder Qualitätskontrolle von Folienbeschichtungen mit Ultrabariereigenschaften an, welche in Technologiebereichen wie der Photovoltaik, der Vakuumisulations-



paneelen (VIP) oder der organischen Leuchtdioden (OLED) stetig an Bedeutung gewinnen. Gemeinsam mit der Firma Sempa Systems GmbH wird derzeit die Serienproduktion des Messgerätes für Endanwender vorbereitet.

AUS DEM KURATORIUM

Das Kuratorium berät und unterstützt die Institutsleitung sowie die Organe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 20. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 5. März 2010 im Fraunhofer IWS Dresden statt. Mitglieder des Kuratoriums waren im Berichtszeitraum:

F. JUNKER, DR.

Vorsitzender des Kuratoriums
Selbständiger Berater
Radebeul

R. BARTL, DR.

Unternehmensberatung Karlsruhe-Düsseldorf
(bis Juni 2010)

T. FEHN, DR.

Geschäftsführer JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH
Jena

D. FISCHER

Geschäftsführer EMAG Leipzig Maschinenfabrik GmbH
Leipzig

W. HUFENBACH, PROF.

Direktor des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik
der Technischen Universität Dresden

U. JARONI, DR.

Mitglied des Vorstandes der ThyssenKrupp Steel Europe AG,
Division Auto
Duisburg

H. KOKENGE, PROF.

Rektor der Technischen Universität Dresden
(bis Juni 2010)

U. KRAUSE, DR.

Karlsruher Institut für Technologie, Projektträger Karlsruhe,
Produktion und Fertigungstechnologien, Außenstelle Dresden

T. G. KRUG, DR.

Managing Director Hauzer Techno Coating BV
Niederlande

P. G. NOTHNAGEL

Geschäftsführer Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH,
Dresden

H. RIEHL, MINR

Bundesministerium für Bildung und Forschung, Leiter des
Referates Produktionssysteme und -technologien
Bonn

F.-J. WETZEL, DR.

BMW Motorrad, Geschäftsbereichsplanung, Kooperationen,
München

P. WIRTH, DR.

Rofin-Sinar Laser GmbH
Hamburg

R. ZIMMERMANN, MINR DR.

Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
Dresden



Wir alle haben ein spannendes Jahr 2010 mit vielen Hoffnungen und Erwartungen hinter uns. Die Wirtschaft erlebte am Anfang des Jahres 2010 noch die Nachwirkungen der Finanz- und Wirtschaftskrise. Doch im Laufe des Jahres kam es zu einer Belebung, die keiner prognostiziert hätte. Viele Bereiche und vor allem der Maschinenbau bekamen wieder Boden unter den Füßen. Die Investitionsfreudigkeit und der Export stiegen erheblich. Die Produktionszahlen wuchsen, es gab mehr Arbeitsplätze, mehr Arbeitslose fanden Stellen, und wir erleben zurzeit sogar einen Mangel an hochqualifizierten Arbeitskräften. Auch die Mittel für Forschung und Entwicklung in der Industrie werden wieder freigegeben und den Erfordernissen angepasst. Wir können zudem feststellen, dass sich die Studienanfängerzahlen auch im Maschinenbau sehr positiv entwickelt haben. Das ist gut für die Zukunft. Wir brauchen den Wissensmarkt in Deutschland und die Wissenschaftler und Ingenieure. Derzeit klafft eine erhebliche Lücke an Ingenieuren und hochqualifiziertem Fachpersonal.

Die Fraunhofer-Gesellschaft hat sich auch in der Zeit der Finanz- und Wirtschaftskrise gut entwickelt. Dies kann man gut an der Entwicklung des Finanzvolumens, der Erträge und der Personalzahlen verfolgen. Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS folgt diesem positiven Trend.

Mit der jetzigen Ausrichtung Oberflächen- und Schichttechnik sowie der Lasermaterialbearbeitung hat sich das IWS national als auch international einem bedeutsamen wissenschaftlichen Gebiet zugewandt. Der Herausforderung, neue innovative Ideen und Lösungen zu entwickeln und diese kurzfristig in Verfahren oder / und Produkte umzusetzen, folgt das IWS vorbildlich. Die vielen Ergebnisse auf den Gebieten

- Lasermaterialbearbeitung,
- Plasma,
- Nanotechnik,
- Systemtechnik und
- Prozesssimulation

folgen auch den Anforderungen, die sich aus der zunehmenden Ressourcenverknappung bei gleichzeitig steigendem

Energiebedarf, der steigenden Mobilität und dem Klimawandel ergeben. Das IWS stellt sich damit den Herausforderungen der Gesellschaft und somit der Forschung. Die Zusammenarbeit oder auch Vernetzung der Forschung des IWS mit den Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft, Leibniz-Gemeinschaft und Max-Planck-Gesellschaft in der Region ist für die Entwicklung der Wissenschaft im Land Sachsen zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden.

Die sehr gute Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Dresden fördert maßgeblich die Entwicklung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Es liegt auf der Hand, dass das IWS für die Zukunft auch durch seine Internationalität mit seinen Außenstellen in den USA und in Polen gut aufgestellt ist. Wir als Kuratoren können das IWS vor allem in der Wissenschafts- und Entwicklungsarbeit mit den Partnern aus der Politik, Wissenschaft und Industrie maßgeblich unterstützen. Verantwortung kann man nicht nur verbal übernehmen. Dazu gehört auch der persönlich physische Einsatz.

Das Kuratorium dankt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, der Institutsleitung und allen Partnern für die Arbeit und ihren Einsatz im vergangenen Jahr.

Dr. Frank Junker



DAS INSTITUT IM PROFIL

KERNKOMPETENZEN

Die Geschäftsfelder des Fraunhofer-Institutes für Werkstoff- und Strahltechnik IWS liegen in den Bereichen Fügen, Trennen und Oberflächentechnik. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit basiert auf einem ausgeprägten Werkstoff- und Nanotechnik-Know-how verbunden mit einer umfassenden Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung. Auf folgenden Gebieten haben wir uns Kernkompetenzen erarbeitet und ständig weiter ausgebaut:

LASERMATERIALBEARBEITUNG

- Hochgeschwindigkeits- und Dickblechschneiden von Metallen
- Schneiden und Schweißen von Kunststoffen sowie anderen Nichtmetallen
- Entwicklung von Schweißverfahren für schwer schweißbare Werkstoffe
- Laserhybridtechnologien, wie z. B.
 - Laserinduktionsschweißen
 - Laserinduktionsumschmelzen
 - Plasma-, WIG- oder MIG-unterstütztes Laserschweißen
- Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen
- Laserrandschichthärten, -legieren und -umschmelzen sowie Kurzzeitwärmebehandeln
- Abtragen und Reinigen
- Prozessüberwachung und -regelung

PLASMA-BESCHICHTUNGSVERFAHREN

- Plasma-, Flamm- und HVOF-Spritzen
- Atmosphärendruck-Plasma-CVD (Mikrowellen- und ArcJet-Plasmen)
- Plasma-Ätztechnik
- Weiterentwicklung und Anpassung von Plasmaquellen
- Vakuumbogenverfahren
- Präzisions-Beschichtungsverfahren (Magnetron-Sputtern, Ionenstrahl-Sputtern)
- Laser-Arc-Verfahren als Hybridtechnologie

WERKSTOFFTECHNIK / NANOTECHNIK

- Eigenschaftsbewertung von Werkstoffen und Bauteilen
- Versagens- und Schadensanalyse
- optisch-spektroskopische Charakterisierung von Oberflächen und Schichten bis in den Nanometerbereich
- mechanisch-tribologische Charakterisierung
- Thermoschockcharakterisierung von Hochtemperaturwerkstoffen
- Schichtdicken- und E-Modul-Messungen von nm- bis μm -Schichten

CHEMISCHE OBERFLÄCHENTECHNIK

- Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)
- CVD-Anlagenbau
- Chemische Ätzprozesse
- Chemische Oberflächenfunktionalisierung
- Gasphasenpyrolyse



SYSTEMTECHNIK

- Umsetzung des Verfahrens-Know-hows in Entwicklung, Fertigung und Design von in Fertigungsabläufe integrierbaren Komponenten, Anlagen und Systemen einschließlich Software
- Systemlösungen für das Schneiden, Schweißen, Auftragen sowie das Oberflächenveredeln mittels Laser
- Entwicklung von Prozessüberwachungs- und -regelsystemen
- verfahrensorientierte Prototypenentwicklung von Beschichtungsanlagen bzw. deren Kernmodulen
- Komponenten für PVD- und CVD-Anlagen
- Atmosphärendruck-Plasma-CVD-Quellen
- Messsysteme zur Schichtcharakterisierung bzw. zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung mittels laserakustischer und spektroskopischer Methoden
- Systeme zur spektroskopischen Überwachung von Gasgemischen
- Software- und Steuerungstechnik
- Remote-Technik

PROZESSSIMULATION

Das IWS entwickelt komplette Module zur Simulation von Prozessen und Werkstoffeigenschaften. Beispiele hierfür sind:

- Härten, Laserhärten und Laser-Auftragschweißen,
- Laserschweißen,
- Laserschneiden,
- Vakuumbogenbeschichtung,
- Gas- und Plasmaströmungen in CVD-Reaktoren
- sowie die Simulation optischer Eigenschaften von Nanoschichtsystemen.

Die Ergebnisse fließen unmittelbar in die Prozessoptimierung. Weitere kommerziell erhältliche Simulationsmodule sind im Einsatz.

Geschäftsfelder	Kernkompetenzen				
	Lasermaterialbearbeitung	Plasma-Beschichtungsverf.	Werkstoff- / Nanotechnik	Systemtechnik	Prozesssimulation
Abtragen / Trennen	■		□	■	□
Fügen	■		■	□	□
Oberflächentechnik					
Randschichttechnik	□	□	□	■	□
Therm. Beschichtungstechnik	□	■	□	□	□
PVD-Vakuum-Schichttechnik		■	■	□	□
CVD-Atmosphärendruck-Schichttechnik		■	□	□	□



DAS INSTITUT IN ZAHLEN

MITARBEITER IM FRAUNHOFER IWS 2010

	Anzahl
STAMMPERSONAL	147
- Wissenschaftler und Ingenieure	110
- Technische Angestellte	21
- Verwaltungsangestellte	16
WEITERES PERSONAL	121
Lehrlinge	9
Wissenschaftliche Hilfskräfte	98
Mitarbeiter CCL USA	14
MITARBEITER AM FRAUNHOFER IWS, GESAMT	268

MITARBEITER 2010

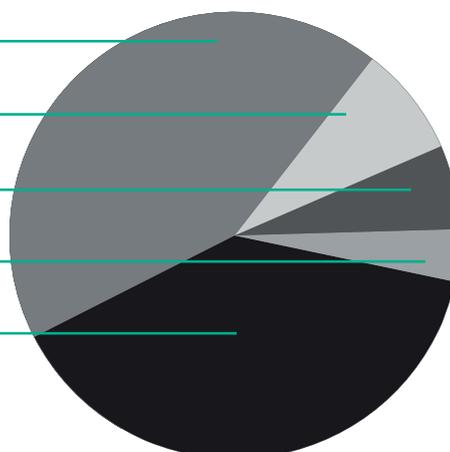
43 % Wissenschaftler und Ingenieure

8 % Technische Angestellte

6 % Verwaltungsangestellte

4 % Lehrlinge

39 % Wissenschaftliche Hilfskräfte



*Wer aufhört, besser zu werden,
hat aufgehört, gut zu sein.*

Philip Rosenthal

AUFWENDUNGEN UND ERTRÄGE 2010 (*STAND JANUAR 2011)

AUFWENDUNGEN BETRIEB UND INVESTITIONEN (Mio. €) 20,2

Betriebshaushalt 18,2
 - Personalaufwendungen 9,2
 - Sachaufwendungen 9,0

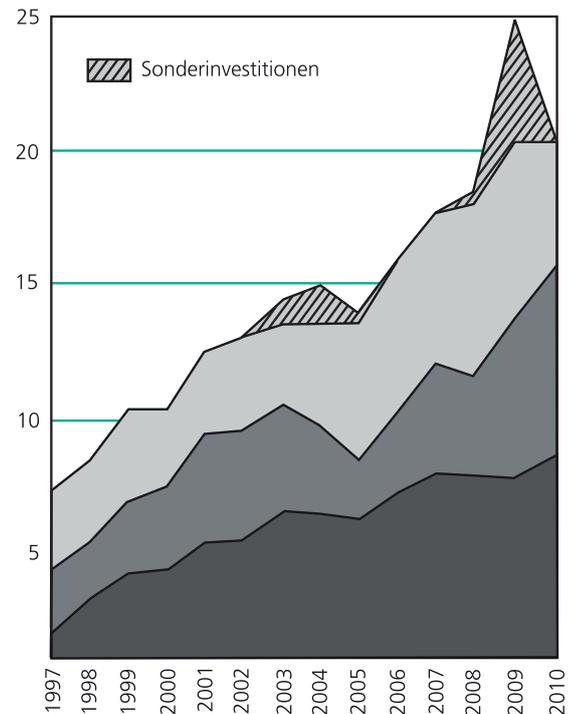
Investitionshaushalt 2,0

ERTRÄGE 2010 (Mio. €) 20,2

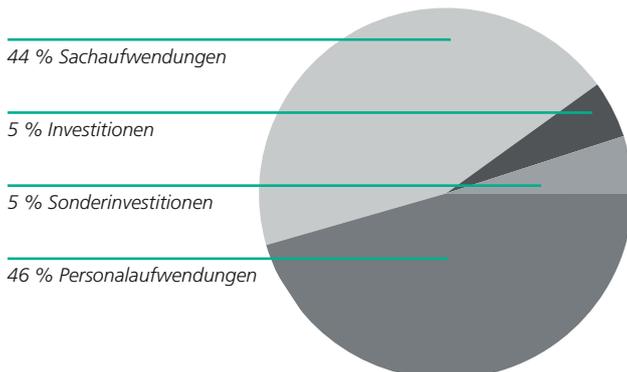
Betrieb 18,2
 - Projekterträge aus der Industrie 8,3
 - Projekterträge durch Bund, Land und EU 5,9
 - Fraunhofer-interne Programme 0,9
 - Grundfinanzierung IWS 3,1

Investitionen 2,0
 - Projekterträge aus der Industrie 0,1
 - Grundfinanzierung IWS 0,6
 - Strategische Investitionen 0,3
 - Sonderinvestitionen FhG / Bund 1,0

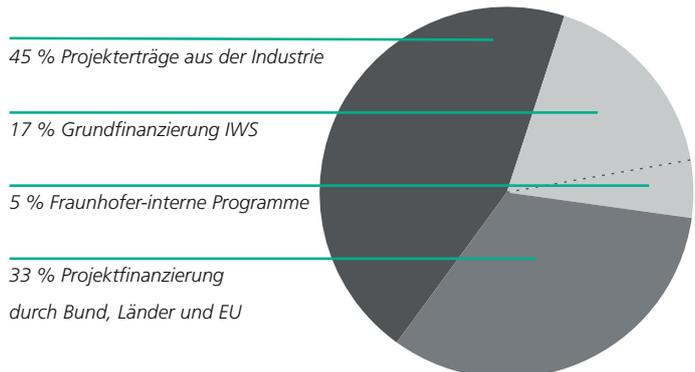
ERTRAGSZAHLEN (GESAMTHAUSHALT)



GESAMTAUFWENDUNGEN 2010



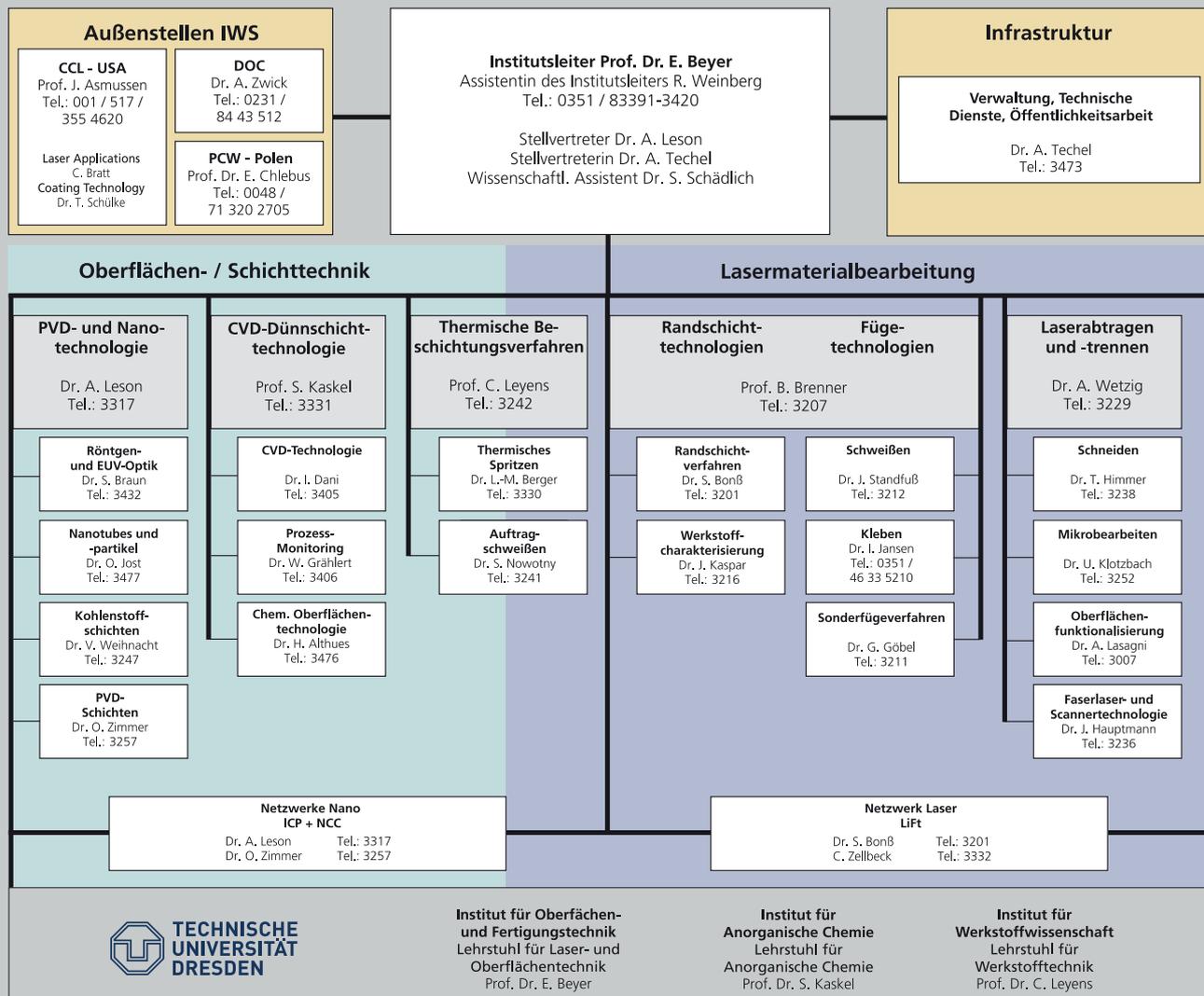
BETRIEBSHAUSHALT 2010

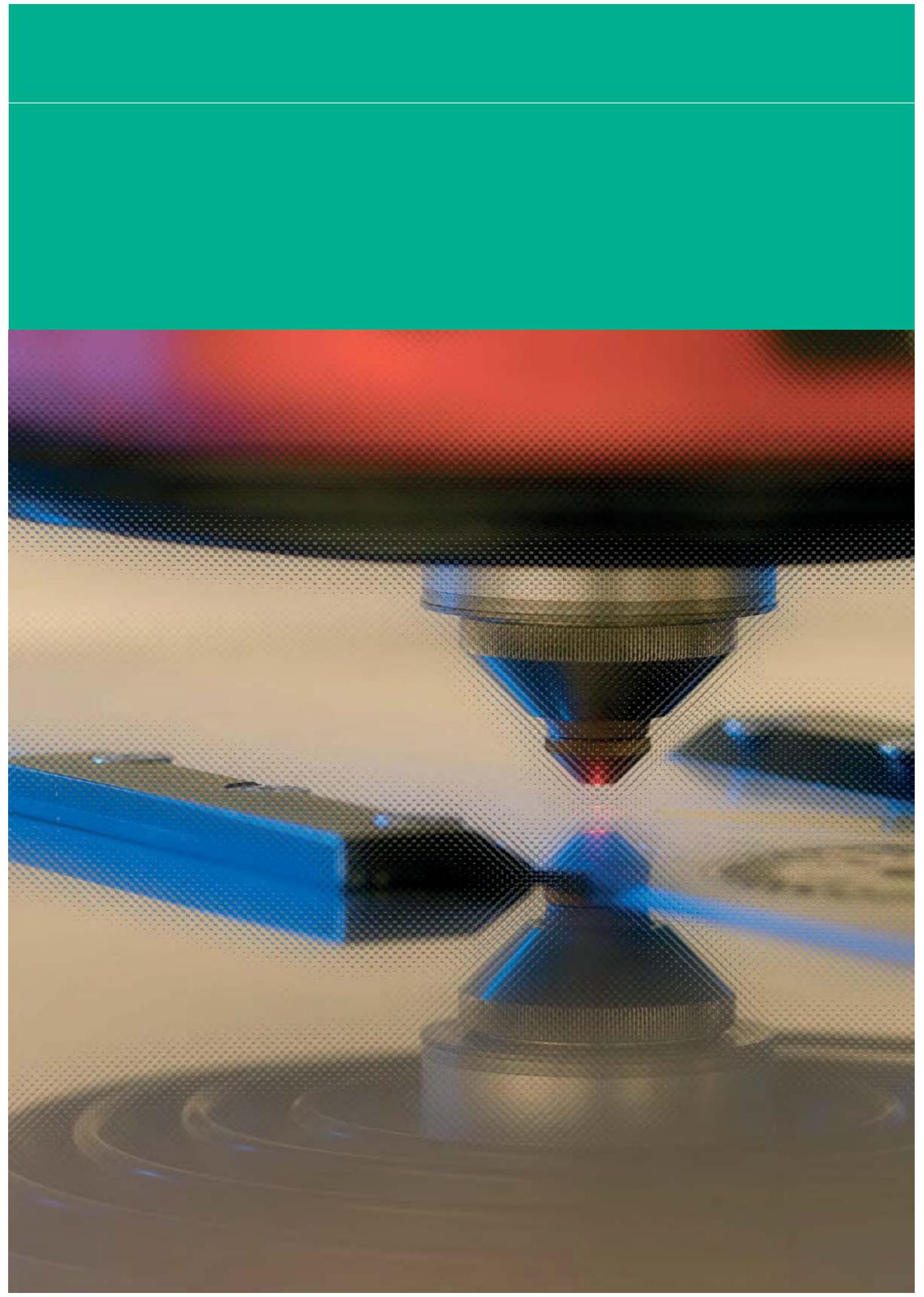


DAS LEITUNGSTEAM



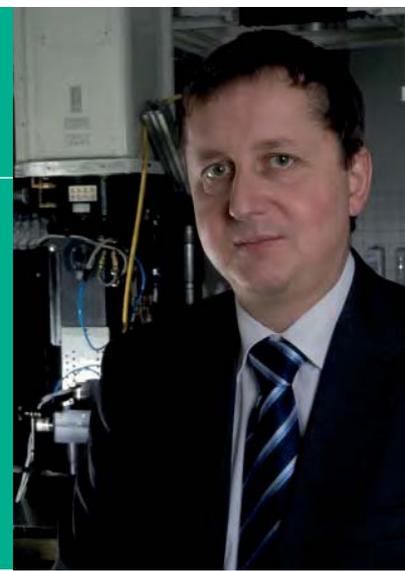
ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER





Die Neigung der Menschen, kleine Dinge für wichtig zu halten, hat sehr viel Großes hervorgebracht.

Georg Christoph Lichtenberg



GESCHÄFTSFELD ABTRAGEN UND TRENNEN

Redaktion: Das Laserstrahlschneiden ist bekanntermaßen die am längsten und am weitesten verbreitete Laserapplikation in der industriellen Praxis. Wie groß ist in einem solchen Umfeld der Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsleistungen von Ihren Partnern, insbesondere von den Systemanbietern und Endanwendern?

Dr. Wetzig: Die Verfügbarkeit von brillanten Strahlquellen wie Faser- oder Scheibenlasern ist nach wie vor die treibende Kraft hinter den meisten der aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Zum einen sind mittlerweile bei dünnen Blechen technologische Schneidgeschwindigkeiten von bis zu 100 m / min erreichbar, die jedoch nicht ohne Weiteres in den Konturschnitt umgesetzt werden können. Zum anderen eröffnen die hochbrillanten Strahlquellen mit dem Remote-Schneiden völlig neue Möglichkeiten der Materialbearbeitung. Darüber hinaus können sich jedoch auch Nachteile beim Einsatz dieser Laser beim Schneiden von dickeren Materialien ergeben, zum Beispiel beim Schneiden von Edelstahl ab Blechdicken von einigen Millimetern.

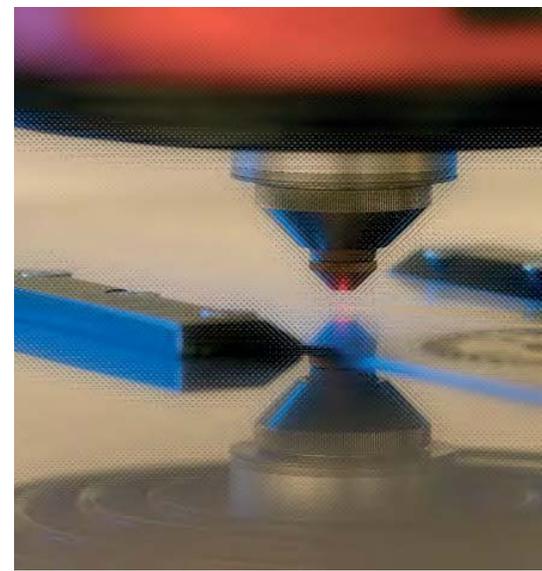
Redaktion: Wie sehen die entsprechenden Forschungsschwerpunkte in Ihrer Abteilung aus?

Dr. Wetzig: Beim letzten Thema beispielsweise führen wir Grundlagenuntersuchungen im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Politecnico di Bari durch, deren Ziel es ist, mit Hilfe eines verbesserten Prozessverständnisses Strategien zur Qualitätsverbesserung beim Dickblechschneiden zu entwickeln. Hier besteht sehr großes Interesse sowohl bei Laserherstellern als auch bei Anwendern. Mit unseren Arbeiten zum Remote-Laserschneiden von Metallen und Verbundwerkstoffen sind wir gerade dabei, ein neuartiges Verfahren der Lasermaterialbearbeitung zu entwickeln, das wir zusammen mit Industriepartnern in die Fertigung überführen werden.

Last but not least erforschen wir auch alternative Konzepte zur Dynamikerhöhung beim klassischen 2D-Schneiden. Als ein Resultat dieser Entwicklungen konnten wir im vergangenen Jahr auf der Euroblech einen funktionstüchtigen Prototypen unseres schnellen Formcutters vorstellen, der insbesondere für das hochdynamische Schneiden kleiner Konturelemente in einem begrenzten Arbeitsraum prädestiniert ist.

Redaktion: Soweit zum Laserschneiden. Und was gibt es Neues von der Mikromaterialbearbeitung zu berichten?

Dr. Wetzig: Auch hier wird die Verfahrens- und Systementwicklung durch die zunehmende Verfügbarkeit von neuartigen Laserquellen, in diesem Fall von Ultrakurzpulslasern mit Puls-längen bis in den Femtosekundenbereich hinab, getrieben. Um unseren Kunden ein optimales Entwicklungsumfeld zu bieten, investieren wir im Augenblick an mehreren Stellen in die entsprechende Laser- und Anlagentechnik. Details dazu im nächsten Jahr. Außerdem gibt es die ersten erfolgreichen Anwendungen der direkten Laserinterferenzstrukturierung für die Oberflächenfunktionalisierung. In diesem Bereich ist es uns im vergangenen Jahr außerdem gelungen, die ersten Kunden aus der Automobil- bzw. Photovoltaikbranche zu gewinnen. Damit bestätigt sich, dass diese Methode eine sinnvolle Ergänzung zu den bisherigen Aktivitäten der Mikromaterialbearbeitung darstellt.



KOMPETENZEN

FASERLASER UND SCANNERTECHNOLOGIE

Neue oder weiterentwickelte Technologien der Lasermaterialbearbeitung sowie die optimale technische und wirtschaftliche Nutzung des Leistungsvermögens und der Qualität neuartiger Laserstrahlquellen erfordern oft den Einsatz neuartiger Systemtechnik. Sind die systemtechnischen Komponenten noch nicht kommerziell verfügbar, entwickeln wir kundengerechte Lösungen. Beispiele sind Bearbeitungsoptiken mit erweiterter Funktionalität, Steuerungstechnik und CAD / CAM-Tools für die Remote- und »on the fly«-Bearbeitung sowie Systemtechnik und Software für die online-Prozesskontrolle, -überwachung und -regelung.

SCHNEIDEN

Forschungsschwerpunkte im Bereich Laserstrahlschneiden sind Technologieentwicklungen, wie beispielsweise die Prozess- oder Teiletaktzeitoptimierung für Bauteile aus allen in der modernen Fertigung eingesetzten Werkstoffen. Dafür stehen am IWS hochdynamische 2D- und 3D-Schneidmaschinen mit Lineardirektantrieben und moderne Roboter sowie Laser unterschiedlicher Leistung und Strahlqualität zur Verfügung. Für die Strahlfokussierung werden neben kommerziellen Bearbeitungsoptiken auch Sonderlösungen und Eigenentwicklungen, wie z. B. Scannersysteme für die Remote-Bearbeitung, eingesetzt.

MIKROBEARBEITEN

Die umfangreiche und moderne Ausstattung sowie das fundierte Know-how ermöglichen angewandte Forschung zur Mikro- und Feinbearbeitung mit Laserstrahlen für die Miniaturisierung von Funktionselementen im Maschinen-, Anlagen-, Fahrzeug- und Gerätebau sowie in der Bio- und Medizintechnik. Beispiele sind die Erzeugung von 3D-Strukturen im Sub-mm-Bereich und Flächenstrukturen an Polymeren, Metallen, Keramiken oder quarzitischen und biokompatiblen Werkstoffen sowie das Reinigen mittels Lasertechnik.

OBERFLÄCHFUNKTIONALISIERUNG

Mit neuen Methoden zur Herstellung von 2- und 3-dimensionalen Mikro- und Nanostrukturen auf Polymeren, Metallen, Keramiken und Beschichtungen gelingt es, strukturierte Oberflächen zu erzeugen, die über makroskopische Bereiche hinweg Mikro- bzw. Nano-Merkmale aufweisen. Zusätzlich zur Topographie können auch die elektrischen, chemischen und / oder mechanischen Eigenschaften periodisch variiert werden. Diese strukturierten Oberflächen können unter anderem in der Biotechnologie, in der Photonik und in der Tribologie eingesetzt werden.

ABTEILUNGSLEITER

DR. ANDREAS WETZIG

Telefon +49 351 83391-3229
andreas.wetzig@iws.fraunhofer.de



**GRUPPENLEITER FASERLASER
UND SCANNERTECHNOLOGIE**

DR. JAN HAUPTMANN

Telefon +49 351 83391-3236
jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER SCHNEIDEN

DR. THOMAS HIMMER

Telefon +49 351 83391-3238
thomas.himmer@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

MIKROBEARBEITEN

DR. UDO KLOTZBACH

Telefon +49 351 83391-3252
udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

OBERFLÄCHFUNKTIONALISIERUNG

DR. ANDRÉS-FABIÁN LASAGNI

Telefon +49 351 83391-3007
andres-fabian.lasagni@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2010

1. Hochdynamischer Formcutter HDFC₆₀₆₀ zum Bearbeiten komplexer Bauteile 22
2. Remote-Bearbeitung von carbonfaserverstärkten Polymeren mit brillanten Strahlquellen 24
3. Von der Zeichnung zum Bauteil – höchste Präzision beim Remote-Schneiden 26
4. Neuartiges universelles Faserlasersystem für den mobilen Einsatz 28
5. Biomimetische Strukturierung durch Laserinterferenzlithographie 30
6. Zellbasierte Biochips mit integrierten Mikrokreisläufen für die tierversuchsfreie Substanztestung 32

HOCHDYNAMISCHER FORMCUTTER HDFC₆₀₆₀ ZUM BEARBEITEN KOMPLEXER BAUTEILE

DIE AUFGABE

Der Einsatz neuester brillanter Festkörperlaser ermöglicht es, im Dünnblechbereich wesentlich höhere Schneidgeschwindigkeiten als mit konventionell eingesetzten CO₂-Lasern bei vergleichbarer Laserleistung zu erzielen. Die Umsetzung dieses Potenzials in gesteigerte Produktivität im industriellen Umfeld erfordert das Verschieben der Dynamikgrenzen von Führungsmaschinen. Insbesondere für das Schneiden komplexer Werkstückgeometrien mit häufigen Richtungsänderungen sind zum Erzielen kürzester Prozesszeiten hohe Anforderungen an das Beschleunigungs- und vor allem Ruckvermögen der Maschinenachsen gestellt. Der Ruck bestimmt den zeitlichen Anstieg der Beschleunigung und ist damit eine signifikante Einflussgröße zur Erhöhung der mittleren Bearbeitungsgeschwindigkeit.

UNSERE LÖSUNG

Für eine systematische Analyse der gegenwärtigen Diskrepanz zwischen technologisch möglicher und tatsächlich erreichter Geschwindigkeit im Konturschnitt wurde am Fraunhofer IWS eine Maßzahl zur Beschreibung der Komplexität beliebiger Schneidgeometrien entwickelt. Diese Maßzahl wird als Wendigkeit bezeichnet und beschreibt die Änderung des Richtungsvektors einer Bewegung entlang einer Geometrie-kante im Verhältnis zur dabei zurückgelegten Strecke. Die Einheit der Wendigkeit wird entsprechend in Grad pro Millimeter angegeben.

Ein im Fraunhofer IWS entwickeltes Softwaremodul ermöglicht es, beliebige NC-Codes von Einzelteilen oder ganzen Schneidplänen (Tafelbelegungen) einzulesen und die Wendigkeit zu bestimmen. So wird die Möglichkeit geschaffen, bereits im Vorfeld zu entscheiden, für welchen Maschinentyp das NC-Programm am besten geeignet ist. Darüber hinaus kann der Wendigkeit eine mittlere Geschwindigkeit zugeordnet werden, womit über die Konturlänge eine Abschätzung der Bearbeitungszeit (Taktzeit) bereits außerhalb der Maschine erfolgen kann.

Mit der Entwicklung des hochdynamischen Formcuttersystems HDFC₆₀₆₀ und der damit verbundenen Umsetzung eines neuartigen Bewegungs- und Strahlführungskonzepts gelang die Verschiebung der bestehenden Grenzen der Maschinendynamik. Unter Verwendung einer parallelkinematischen Achsstruktur und der damit einhergehenden geringen zu bewegenden Massen ist es gelungen, die Dynamikeigenschaften in drei Dimensionen erheblich zu steigern. Der in Kooperation zwischen Fraunhofer IWS und Held Systems entwickelte HDFC₆₀₆₀ stellt für sich eine vollwertige Führungsmaschine dar. Die integrierte z-Achse in Kombination mit einer kapazitiven Abstandssensorik ermöglicht eine zuverlässige Prozessführung insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten. Der konsequente Einsatz von Standardschnittstellen gewährleistet eine problemlose Integration von HDFC-Systemen in bestehende Maschinensteuerungen.

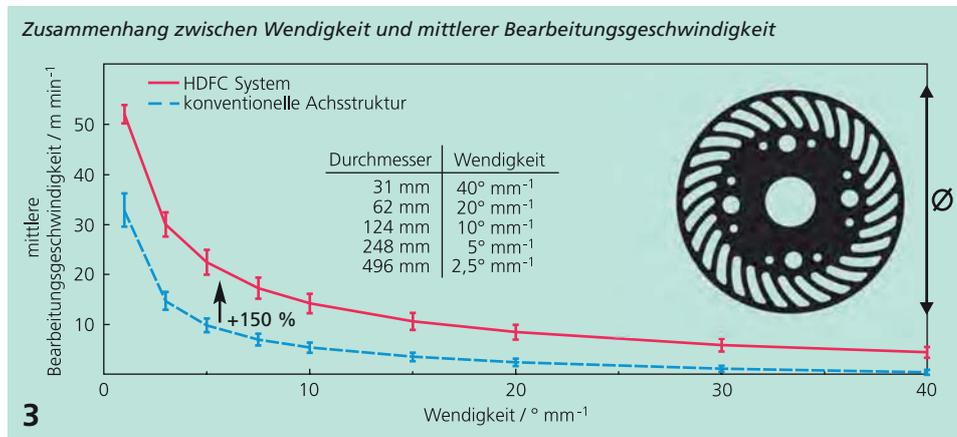


2

ERGEBNISSE

Das Hauptanwendungsfeld ist das hochproduktive Schneiden komplexer Werkstückgeometrien in der Serien- und Massenfertigung. Bandmaterial vom Coil kann dabei sowohl im Nachsetzbetrieb als auch bei kontinuierlicher Durchlaufbewegung (on-the-fly) bearbeitet werden. Die Produktivitätssteigerung im industriellen Umfeld ist gegeben durch Absenkung der Taktzeiten und niedrige Maschinenkosten. Das in Abb. 2 dargestellte Bauteil (Wendigkeit $35^\circ / \text{mm}$) kann mit dem HDFC-System in weniger als 16 Sekunden gefertigt

werden, wozu konventionelle Achsstrukturen mindestens die doppelte Zeit benötigen. Weitere Vorteile liegen im kompakten Anlagenaufbau, in der Flexibilität und der hohen Integrationsfähigkeit des Systems. Aufgrund der Verwendung hochbrillanter Strahlquellen und hochwertiger Optikkomponenten können bei Spotgrößen von $15 \mu\text{m}$ Geometriedetails im Bereich von $30 \mu\text{m}$ präzise bearbeitet werden.



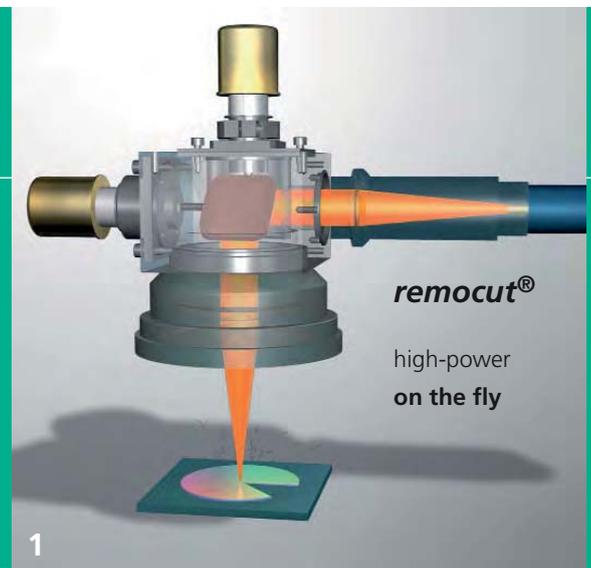
3

- 1 Prozessaufnahme
- 2 Mittels HDFC₆₀₆₀ erzeugte Geometrien

KONTAKT

Dipl.-Ing. Florian Bartels
Tel.: +49 351 83391-3233
florian.bartels@iws.fraunhofer.de





REMOTE-BEARBEITUNG VON CARBONFASER-VERSTÄRKTEN POLYMEREN MIT BRILLANTEN STRAHLQUELLEN

DIE AUFGABE

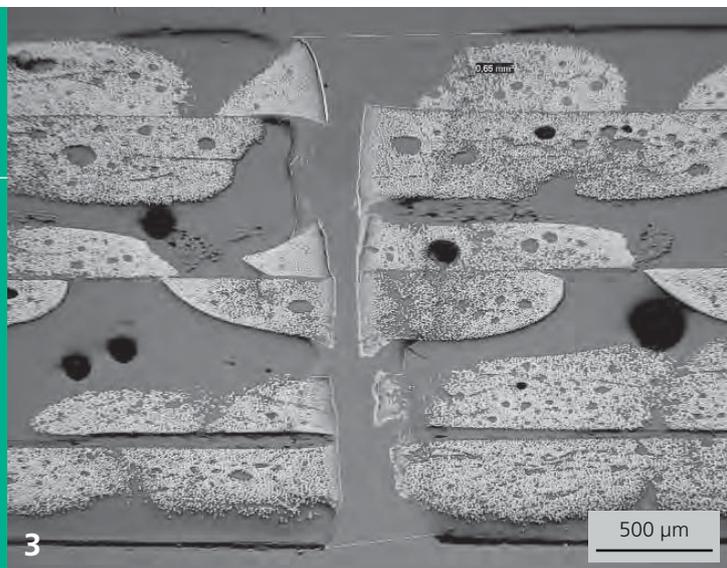
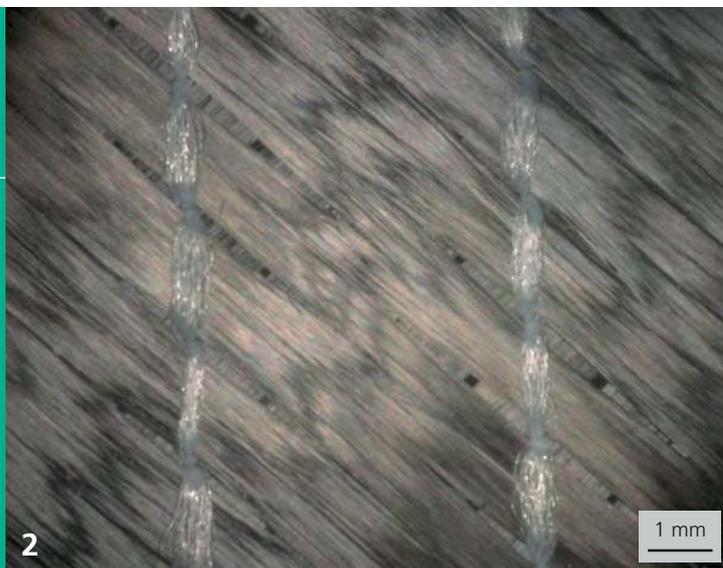
Die Entwicklung energieeffizienter Transportmittel für den Personen- und Güterverkehr verstärkt das Streben nach Fertigungstechnologien für Hochleistungs-Konstruktionsstrukturen. Carbonfaserverstärkte Materialien (CFK) verfügen aufgrund ihrer hohen spezifischen Zugfestigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte über ein hohes Anwendungspotenzial. Obwohl in der Luft- und Raumfahrtindustrie bereits seit vielen Jahren CFK-Strukturen hergestellt und integriert werden, ist eine »high volume«-Produktion, wie im Automobilbau gefordert, aktuell nur ansatzweise umgesetzt. Ein Grund dafür ist die bisher praktizierte endkonturnahe Urformung der CFK-Bauteile mit vorrangig duroplastischer Matrix. Diese erfordert lange Aushärtezeiten und spezielle Konsolidierungsstrategien für eine optimale Verbindung zwischen den einzelnen Carbonfasern und dem Matrixmaterial. Außerdem besitzen die Einzelfasern stark anisotropische Festigkeitseigenschaften, so dass bei multiaxialer Bauteilbeanspruchung ein komplexer Verbundaufbau mit gezielter Ausrichtung der unidirektionalen Faser-Polymer-Lagen erforderlich ist.

Neben der Bauteil-Urformung ist der Materialbeschnitt bzw. die Fertigung von Durchbrüchen oder Bohrungen sehr zeitaufwendig. Die vorliegenden Materialkennwerte erschweren die mechanische Bearbeitung, so dass entweder starke mechanische Schädigungen in der Schnittzone auftreten oder nur geringe Abtragsraten mit hohem Werkzeugverschleiß zu verzeichnen sind. Delaminationen der Faserlagen sowie Zugänglichkeitsprobleme an gekrümmten Flächen begrenzen die Einsatzgebiete des Wasserstrahlschneidens.

Die Bearbeitung mittels Laser für das Strukturieren bzw. Abtragen von CFK-Materialien wird bereits industriell durchgeführt, jedoch sind die Abtragsraten aufgrund des Einsatzes gepulster Strahlquellen mittlerer Leistung für eine flexible Massenproduktion unzureichend. Diese Erkenntnisse erfordern die Erarbeitung neuer flexibler und prozesseffizienter Technologien.

UNSERE LÖSUNG

Deutliche Effizienzverbesserungen bei der Laserbearbeitung von polymerbasierten Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen konnten am Fraunhofer IWS durch den Einsatz der hochdynamischen Strahlableitung erzielt werden. Bei dieser Technologie wird der Laserstrahl über schnell verkippbare Spiegel abgelenkt und auf das Material projiziert. Die Strahlbewegung ist aufgrund der geringen Masse der vorwiegend mittels Galvanometerscanner bewegten Ablenkspiegel auch bei sehr hohen Bahngeschwindigkeiten äußerst präzise. Beschleunigungen von mehreren 10 g sind erreichbar. Die Besonderheit von sehr hohen Prozessgeschwindigkeiten und damit sehr kurzen Wechselwirkungszeiten zwischen der Laserstrahlung und dem zu trennenden Material verringert im Vergleich zum klassischen, gasunterstützten Laserschnitt die thermische Schädigung des Matrixwerkstoffes an der Schnittfuge erheblich. Zusätzlich zur schnellen Strahlbewegung ist die Auswahl der erforderlichen Bearbeitungs-Wellenlänge unabdingbar, um sowohl in der Matrix als auch im Fasermaterial eine Mindestabsorption zu erhalten.

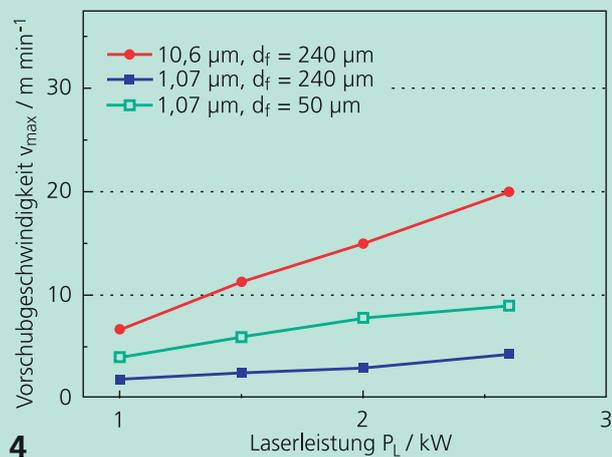


ERGEBNISSE

Die Reduzierung der Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Verbund verringert die thermische Zersetzung des Matrixwerkstoffes und ermöglicht so bessere Abtrags- und Trennergebnisse. Je nach Matrixtyp kommen sowohl Hochleistungs-CO₂-Laser als auch brillante Festkörperlaser, wie Faser- oder Scheibenlaser zum Einsatz. Während CO₂-Laserstrahlung in nahezu allen Kunststoffen ausreichend absorbiert wird, können Festkörperlaser durch eine deutlich bessere Fokussierbarkeit effizienzsteigernd wirken.

Das Diagramm zeigt realisierbare Bearbeitungsgeschwindigkeiten an einem Carbonfaser-Duromer-Verbund. Aufgrund der eingesetzten nahezu trägheitslosen Galvanometerscannerantriebe ist es möglich, diese Bearbeitungsgeschwindigkeiten auch bei nicht linearen Schneidkonturen oder kleinen Bohrungen und Strukturen zu garantieren und somit gleichbleibende Ergebnisse in der Schnittqualität zu erzielen. Eine aktive Bewegungskopplung von Bearbeitungsoptik und Handlingsystem ermöglicht die Bearbeitung »on the fly«.

Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit von der Laserleistung bei verschiedenen Bearbeitungswellenlängen und Variation der Leistungsdichte
Material: Bidiagonal-Carbongelege + VE-Harz, 2,4 mm dick, Faseranteil: 50 % (gew.)



Trotz der Verfügbarkeit von Lasern mit Dauerstrich-Leistungen im kW-Bereich ist bei typischen Bauteilstärken ein zyklischer Materialabtrag erforderlich. Er beträgt im Allgemeinen einige 100 µm. Die Zyklanzahl zum vollständigen Durchtrennen ist dabei abhängig von:

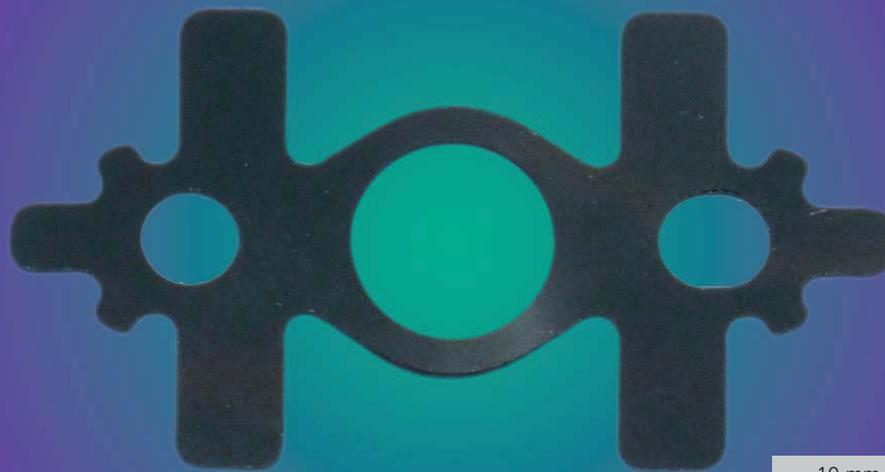
- Materialzusammensetzung,
- Absorption der Laserstrahlung in Matrix und Fasermaterial,
- Leistungsdichte im Bearbeitungspunkt,
- Abtragungsgeschwindigkeit.

- 1 Prinzip der high-speed-Strahlableitung
- 2 Bidiagonal-Carbongelege (Draufsicht)
- 3 Schnittfuge eines Carbonfaser-verstärkten Duromers (Querschliff)

KONTAKT

Dipl.-Ing. Annett Klotzbach
Tel.: +49 351 83391-3235
annett.klotzbach@iws.fraunhofer.de





VON DER ZEICHNUNG ZUM BAUTEIL – HÖCHSTE PRÄZISION BEIM REMOTE-SCHNEIDEN

DIE AUFGABE

Hochdynamische Spiegelablenksysteme für eine Remote-Bearbeitung finden nicht nur beim Laserstrahlschweißen sondern zunehmend auch beim Laserstrahlschneiden Verwendung. Durch den gezielten Verzicht auf eine Schneidgasdüse kann der Laserstrahl auch bei Schneidapplikationen hochdynamisch im entsprechenden Arbeitsfeld des genutzten Objektivs ausgeleitet werden. Arbeitsabstände von 200 mm und mehr ermöglichen Bearbeitungsgeschwindigkeiten von 800 m / min auf der Bauteiloberfläche.

Diese ungewöhnlich hohen Prozessgeschwindigkeiten gestatten die Herstellung beliebiger Bauteilgeometrien innerhalb weniger Millisekunden. Andererseits stellen sie die genutzten Spiegelablenksysteme aber auch vor enorme Herausforderungen. Trotz der geringen Massenträgheit dieser Systeme führen die genannten Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu Ungenauigkeiten in der erzeugten Bauteilkontur. Ecken erscheinen leicht verrundet, Konturelemente sind nicht immer maßhaltig. Dieses Problem tritt beim konventionellen Laserstrahlschneiden mit Gasunterstützung ebenfalls auf, wenn auch in einem deutlich geringeren Geschwindigkeitsbereich. Um dennoch hohe Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen, wird im Allgemeinen auf eine Reduzierung der Bearbeitungsgeschwindigkeit gesetzt.

Beim Remote-Schneiden metallischer Werkstoffe ist diese Vorgehensweise jedoch nur bedingt möglich. Durch den gezielten Verzicht auf eine Schneidgasunterstützung muss das Material der Schnittfuge nicht nur aufgeschmolzen, sondern auch partiell verdampft werden. Dies erfordert möglichst kurze Wechselwirkungszeiten zwischen Laserstrahl und Werkstück und damit möglichst hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten.

UNSERE LÖSUNG

Um dennoch höchste Genauigkeiten am Bauteil zu erreichen, wurden am Fraunhofer IWS Dresden Softwaretools zur Bahnkorrektur untersucht und entwickelt. Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist die gezielte Beeinflussung der ursprünglichen Bewegungsbahn der Scannerspiegel. Die Manipulation erfolgt dabei ohne Laserstrahlung vor dem eigentlichen Schneidprozess. Das Erzeugen von Probe-Bauteilen ist nicht notwendig.

Für den gezielten Eingriff ist zunächst die Erfassung der vorgegebenen Bewegungsbahn notwendig. Sie stellt die Sollbahn des Systems dar. Anschließend erfolgt die Ermittlung der tatsächlich abgefahrenen Bewegungsbahn der Spiegel des Scannersystems, der Istbahn. Die Kenntnis beider Bahnen ermöglicht einen Vergleich zwischen Soll- und Ist-Werten und somit die Bestimmung eventueller Abweichungen. Diese Abweichungen sind es, die später am Bauteil zu den nicht erwünschten Ungenauigkeiten führen. Durch eine iterative Annäherung der Istbahn an die ursprüngliche Sollbahn sind diese vermeidbar. Wenn die Abweichung beider Bahnen den geforderten Toleranzvorgaben entspricht, kann dann unter Emission der entsprechenden Laserstrahlung das Bauteil ausgeschnitten werden.

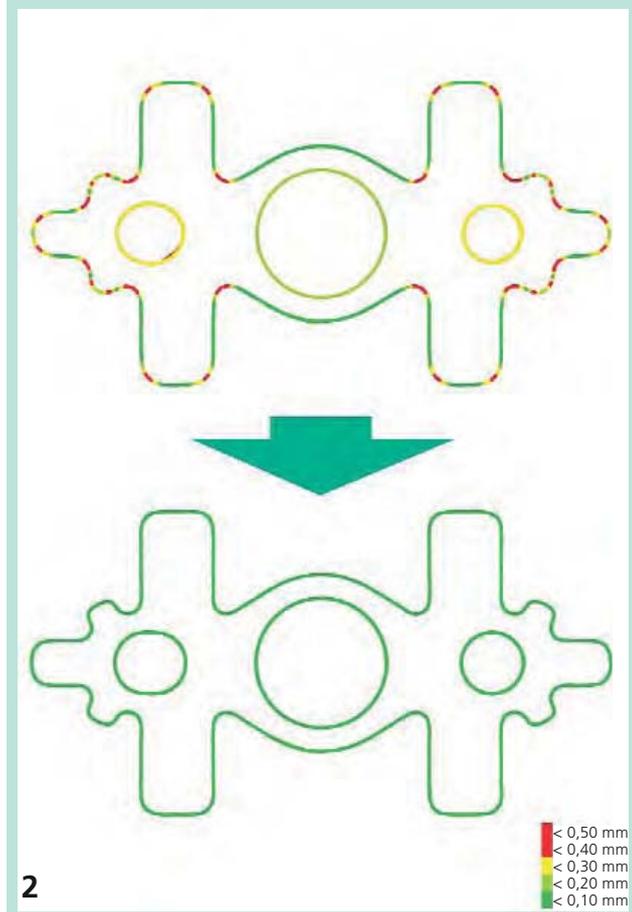
ERGEBNISSE

Der beschriebene Algorithmus wurde in eine am Fraunhofer IWS Dresden entwickelte Scanner-Software implementiert. Das Programm namens *PathControl* ermöglicht die erforderliche Ansteuerung von Laser- und Strahlableitungs-system. Dieses Programm gestattet es, automatisiert die entsprechenden Soll- und Istbahnen zu ermitteln, miteinander zu vergleichen und die zugehörige Abweichung zu bestimmen. Die erforderliche Manipulation der Bewegungsbahn kann voll- oder teilauto-matisch erfolgen. *PathControl* ist in der Lage, die Abweichung

der Bewegungsbahnen erheblich zu reduzieren und ermöglicht die Einhaltung der geforderten Genauigkeiten.

Das in Abb. 1 dargestellte Bauteil aus 0,1 mm dickem Edelstahl 1.4301 lässt sich durch Remote-Schneiden bei 1,2 kW Laserleistung in weniger als 0,2 s erzeugen. Unter Berücksichtigung der Schnittlänge ergibt sich eine durchschnittliche Schneidgeschwindigkeit von $v_{av} = 100 \text{ m / min}$. Trotz dieser hohen Geschwindigkeit läßt sich bei Nutzung des Softwaretools *PathControl* die Abweichung am Bauteil auf Werte unter 0,1 mm senken. *PathControl* wird als lernfähiges System weiterentwickelt, welches immer weniger iterative Schritte bis zur Abbildung der richtigen Ist-Kontur auf dem Bauteil benötigt.

Bahngenauigkeit vor (oben) und nach (unten) automatisierter Korrektur mit *PathControl*



- 1 Bauteilgeometrie aus Edelstahl 1.4301, Dicke 0,1 mm, 1,2 kW Laserleistung, Schneidzeit < 0,2 s

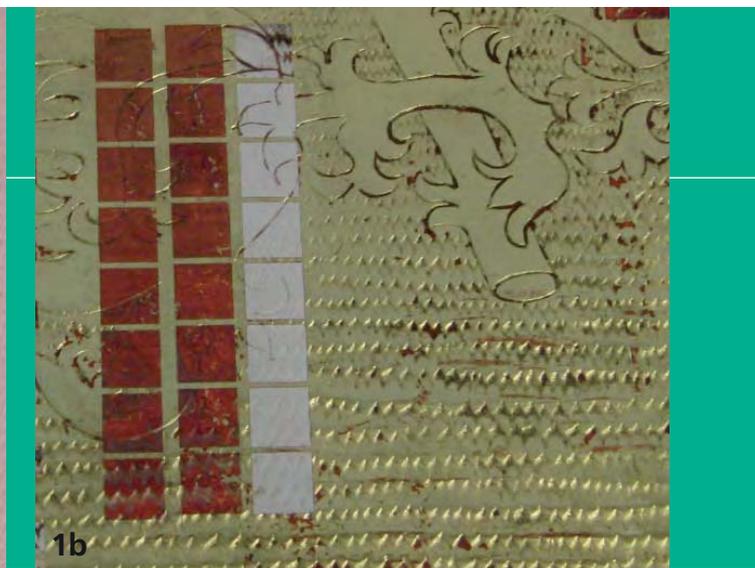
KONTAKT

Dipl.-Ing. Matthias Lütke

Tel.: +49 351 83391-3292

matthias.luetke@iws.fraunhofer.de





NEUARTIGES UNIVERSELLES FASERLASER-SYSTEM FÜR DEN MOBILEN EINSATZ

DIE AUFGABE

Der Einsatz des Werkzeugs Laser ermöglicht in vielen Bereichen des Maschinenbaus und der Produktionstechnik eine signifikante Steigerung von Qualität und Quantität bei gleichzeitiger Reduktion der Betriebskosten. Ausgewählte Anwendungsgebiete wie das Oberflächenstrukturieren, Reinigen oder das Beschriften sind Beispiele, für die der Laser ein derartiges etabliertes Werkzeug repräsentiert.

Üblicherweise werden die Lasersysteme als separate Bearbeitungsstationen umgesetzt oder direkt in eine laufende Fertigungslinie integriert. Durch den Umfang an möglichen Applikationsgebieten existiert jedoch auch eine Vielzahl an Laseranwendungen, die nicht unter definierten Anlagenbedingungen realisierbar sind bzw. ein leichtes und schnelles Wechseln zwischen unterschiedlichen Bearbeitungsanlagen erfordern. So ist die Bearbeitung sehr großer Bauteile oder ortsfester Gegenstände, wie z. B. Ornamente oder Statuen, ein prädestiniertes Beispiel, das den Einsatz von mobilen Anlagenkonzepten zwingend erfordert. Wichtige Bewertungskriterien derartiger Anlagen sind neben einem möglichst breiten Parameterspektrum für eine breitgefächerte Anwendbarkeit, vor allem in der Handlichkeit, Kompaktheit und Flexibilität des Systems zu sehen. Diese Anforderungen sind auf alle Systembestandteile gleichermaßen anzuwenden. Die leistungsfähigen gepulsten Faserlasersysteme mit sehr guter Strahlqualität, hoher Parameterstabilität und geringem Gewicht sind prädestiniert für die Integration in mobile Anlagenkonzepte.

UNSERE LÖSUNG

Ein am Fraunhofer IWS entwickeltes Anlagenkonzept umfasst zwei Teilkomponenten: die Versorgungseinheit und das Handstück zur Bearbeitung. In der Versorgungseinheit befinden sich alle betriebsrelevanten Komponenten wie die Netzteile, der Laserkopf, sowie die Steuerung. Herzstück der Steuerung ist eine stand-alone-fähige Controller-Karte. Auf einem zusätzlichen externen Speicher können verschiedene Applikationsparameter für den mobilen Einsatz hinterlegt werden. Im Handstück sind der Laserisolator und die optischen Strahlführungs- und -formungskomponenten integriert.

Durch einen modularisierten Aufbau des Handstückes und die Nutzung etablierter mechanischer und optischer Schnittstellen kann die mobile Anlage schnell und einfach mit unterschiedlichen Faserlasersystemen in Betrieb genommen werden. Der Einsatz etablierter elektrischer Schnittstellen ermöglicht eine leichte Einbindung des Lasers in die Steuerung.

Eine speziell entwickelte Justageeinheit und die leicht austauschbare Strahlaufweitung gewährleisten auch im Handstück eine unkomplizierte Laserintegration. Damit bietet das entwickelte mobile Anlagenkonzept vielfältige Ansatzpunkte zur applikationsangepassten Optimierung. Alle Komponenten befinden sich in einer ergonomisch geformten Hülle und sind vor äußeren mechanischen Einflüssen und Verschmutzung geschützt. Durch ein Schnittstelleninterface können applikationsangepasste Abstandshalter und Laserschutzkomponenten zur Anwendung kommen. Für den Transport werden Handstück und Laserkopf in der Versorgungseinheit verstaut.



2



3

Für eine einfache Bedienung wurde auf Grund der umfassenden Parametermöglichkeiten ein angepasstes Bedienkonzept entwickelt. Dieses ist zweistufig ausgelegt und sieht im ersten Schritt ein materialabhängiges Parameterscreening unter Laborbedingungen vor. Hier können alle Laserparameter frei variiert und auf ihre Wirkung charakterisiert werden. Die relevanten Parameter werden als abrufbare Datensätze auf dem Speicher des Controllers hinterlegt. Die Bedienung im »vor-Ort-Betrieb« erfolgt über ein Touchpanel, welches die Anpassung der vordefinierten Parameter an die Bedingungen vor Ort im geringen Umfang möglich macht.

ERGEBNISSE

Das vorgestellte Anlagenkonzept wurde durch Verwendung eines MOPA-M-HP 20-Faserlasers als universell einsetzbares mobiles Lasersystem am Fraunhofer IWS aufgebaut und getestet (Abb. 2). Das System bietet die Möglichkeit, die Pulsdauer in einem Bereich von 10 bis 200 ns bei Repetitionsraten von 1 Hz bis 500 kHz und einer Pulsspitzenleistung von bis zu 12 kW an die jeweilige Beschriftungs-, Reinigungs- oder Strukturierungsaufgabe anzupassen (Abb. 3).

Zunächst erfolgte die Prüfung des Systems auf die Anwendbarkeit in den verschiedenen angestrebten Applikationsgebieten. Im Bereich der Beschriftung wurden unterschiedliche Materialien wie Stahl, Kupfer und Polymer untersucht. Durch Aufstellen der Parametermatrix unter Laborbedingungen und Ablage der Datensätze im Controller-Speicher konnte die vor Ort nötige Zeit zur Ermittlung optimaler Bearbeitungsparameter um mehrere Stunden auf wenige Minuten reduziert werden.

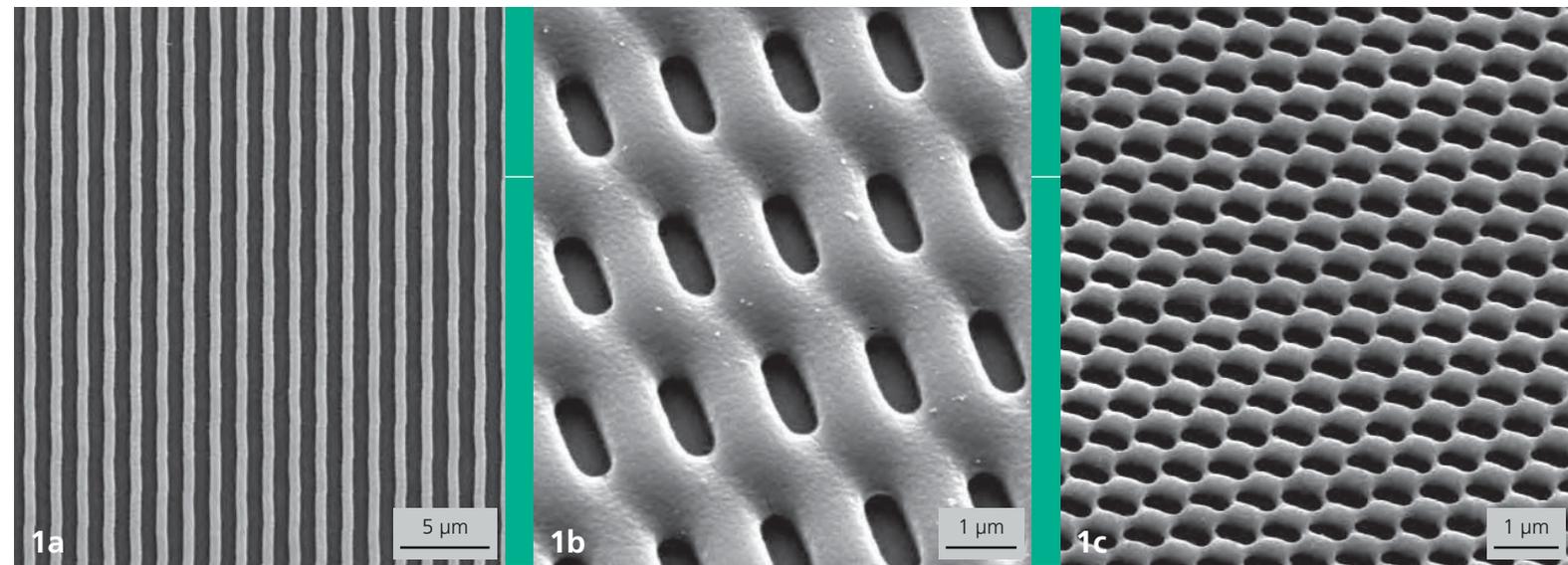
Als weitere Applikation wurden im Bereich der Reinigung und Restauration erste Aufgabenstellungen mit dem System umgesetzt. Die hier angestrebte Ausnutzung selbstbegrenzender Effekte ist mit dem aufgebauten System trotz der im Vergleich mit etablierten Systemen geringeren Pulsenergien adäquat möglich.

- 1 *Anwendungsbeispiel des Lasers in Restauration und Reinigung*
- 2 *Komplettsystem, bestehend aus Handstück und Versorgungseinheit*
- 3 *Wirkungsmatrix auf Stahl zum Aufzeigen von Reinigungs- und Beschriftungsmöglichkeiten*

KONTAKT

Dipl.-Ing. Niels Schilling
 Tel.: +49 351 83391-3436
 niels.schilling@iws.fraunhofer.de





BIOMIMETISCHE STRUKTURIERUNG DURCH LASERINTERFERENZLITHOGRAPHIE

DIE AUFGABE

Die Herstellung biomimetischer Materialien, welche die Strukturen und Funktionen lebender Organismen imitieren, stellt eine Schlüsseltechnologie im Bereich der Werkstoffwissenschaft dar. Sie spielt eine zunehmend wichtige Rolle bei unterschiedlichen innovativen Technologien.

Die Oberfläche biomimetischer Materialien besteht meist aus komplexen ein- oder zweidimensionalen Strukturen, die zudem oft hierarchisch angeordnet sind. Verschiedene technologische Ansätze für die Designentwicklung und die Synthese solcher komplexer Oberflächen wurden in den letzten Jahren intensiv verfolgt. Jedoch benötigen einerseits viele dieser Technologien für die Erzeugung spezifischer Geometrien oder Strukturformen Masken oder Formkörper und sind bei der Herstellung hierarchischer Muster nicht einsetzbar. Andererseits erfolgt die Behandlung großer Flächen oder Volumina mit Hilfe maskenloser Methoden nur sequentiell und ist somit zeitintensiv (bis zu einigen Stunden).

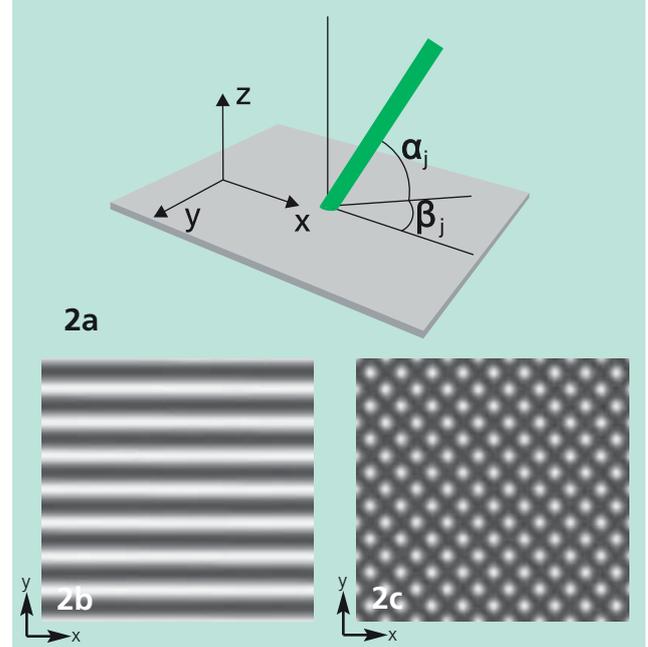
Das Fraunhofer IWS Dresden bietet eine leistungs- und konkurrenzfähige Technologie zur Fertigung solcher Oberflächenstrukturen. Die Methode kann für die Erzeugung eines breiten Spektrums an topografischen, komplexen Mustern auf fast jeder Geometrie angewendet werden.

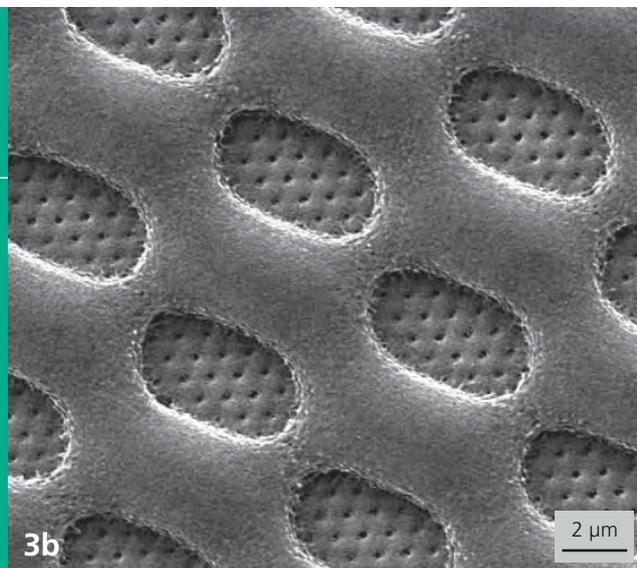
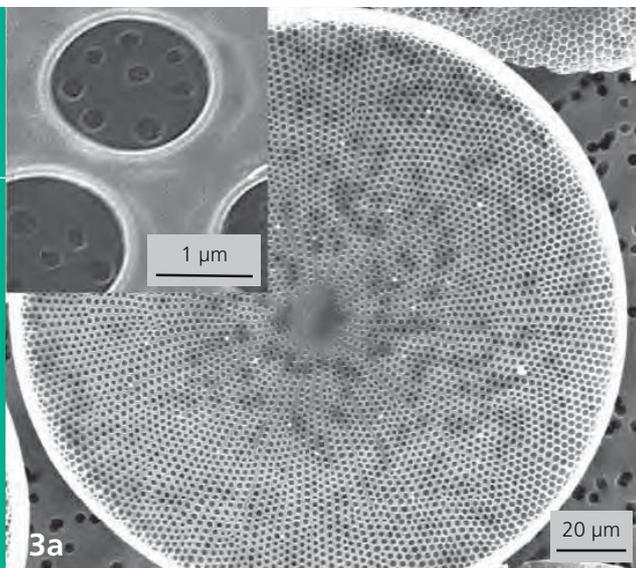
UNSERE LÖSUNG

Die Laserinterferenzlithographie erlaubt es, große planare und nicht planare Flächen mit periodischen Mikro- und Nanostrukturen zu versehen (Abb. 1). Um das Interferenzmuster zu erzeugen werden N kollimierte und kohärente Laserstrahlen auf der Oberfläche eines Fotolacks zur Interferenz gebracht.

Nach der Bestrahlung wird der Lack mit einem Entwickler behandelt und es entsteht aufgrund des unterschiedlichen Löslichkeitsverhaltens der verschiedenen belichteten Bereiche eine poröse Struktur im Fotolack. Ein großer Vorteil dieser Methode ist, dass die Form und die Ausdehnung des Interferenzmusters lediglich durch die Anzahl der Laserstrahlen sowie deren geometrische Konfiguration (Abb. 2a) bestimmt werden. Ein Zweistrahl Aufbau erzeugt eine linienartige periodische Struktur (Abb. 2b), ein Vierstrahl Aufbau mit identischen azimuthalen Winkeln ein gitterartiges Array (Abb. 2c).

- 2a Einfallender Laserstrahl mit Bezeichnung der geometrischen Konfiguration (polarer Winkel α , azimuthaler Winkel β)
- 2b Periodische Linienstruktur durch Zweistrahl-Intensitätsverteilung
- 2c Gitterarray durch Vierstrahl-Intensitätsverteilung





Des Weiteren können mit Hilfe des Verfahrens durch die Überlappung verschiedener periodischer Arrays mit kontrolliert definierten Abmessungen hierarchische Oberflächen hergestellt werden. Zusätzlich dazu bietet die Laserinterferenzlithographie die Möglichkeit, eine Fläche von einigen Quadratzentimetern pro Sekunde auf verschiedenen technologisch relevanten Materialien zu bearbeiten.

ERGEBNISSE

Der Negativ-Fotolack SU-8 wurde mit Hilfe des Spincoatings auf Siliziumsubstrate in dünnen Schichten aufgebracht. Anschließend erfolgte die Herstellung eines linienartigen Musters durch Verwendung des Zweistrahlbaus (Abb. 1a). Dabei wurden zwei Laserstrahlen mit einer Wellenlänge im UV-Bereich (355 nm) unter einem Winkel von $2\alpha = 13,6^\circ$ zur Interferenz gebracht und damit eine Periode von 1,5 µm erzeugt.

Für die Herstellung gitterartiger Strukturen wurden zwei verschiedene Verfahren verwendet. Beim ersten Verfahren wurden vier Laserstrahlen zur Erzeugung der gewünschten Struktur benutzt. Allerdings ist dabei ein präzises Einstellen der einzelnen azimuthalen Winkel erforderlich, da schon kleine Abweichungen zu linearen Defekten führen.

Das zweite Verfahren besteht aus einem Prozess mit zweifacher Belichtung, wobei die Probe zwischen den Belichtungsschritten um einen bestimmten Winkel gedreht wird. Die Wahl des Rotationswinkels definiert die Form der kreuzartigen Strukturen (Abb. 1b-c). Um eine stabile polymere Struktur zu erzeugen, müssen verschiedene Parameter wie die Strukturperiode, die Schichtdicke des Fotolacks, die Breite der fotopolymerisierten Bereiche sowie die Temperaturen bei den Tempereschritten vor und nach der Belichtung genau eingestellt werden. Bei einer kreuzartigen Struktur lässt sich die mechanische Standfestigkeit zusätzlich erhöhen, indem durch doppelte Belichtung stabilisierende Knotenpunkte erzeugt werden.

Die Herstellung bio-inspirierter Oberflächen mit hierarchischen Strukturen erfolgt durch einen Schicht-für-Schicht-Aufbau. In dem hier vorgestellten Beispiel wird die Herstellung der Diatomee *C. Walesii* gezeigt (Abb. 3a). Diese Kieselgelalge weist eine komplexe hierarchische Struktur bestehend aus hexagonalen Mustern (aerolae) mit einem Gitterabstand von 3 - 5 µm sowie eine periodische Anordnung von Kavitäten mit einem Durchmesser von 100 bis 250 nm innerhalb dieser Muster auf. Bei der künstlichen Synthese dieser Struktur wurde zunächst eine dünne Fotolackschicht mit dem hexagonalen Submikrometernmuster durch zweimaliges Belichten mit einer Periode von 500 nm und einem Rotationswinkel von 60° versehen. Anschließend wurde eine zweite Fotolackschicht auf den schon strukturierten und entwickelten Film aufgebracht und mit einem linienartigen Interferenzmuster mit 5 µm Periode bestrahlt. Die so generierte Struktur besitzt einen hohen Grad an geometrischer Gleichförmigkeit (Abb. 3b).

Die hier präsentierte einfache Prozessfolge verdeutlicht das Potenzial der Laserinterferenztechnologie bei der Erzeugung komplexer periodischer Arrays.

- 1a *Linienstruktur mit 1,5 µm Periode*
- 1b *Gitterstruktur mit 1,5 µm Periode und 30° Rotation*
- 1c *Gitterstruktur mit 0,5 µm Periode und 60° Rotation*
- 3a *Diatomee *C. Walesii* und*
- 3b *ihre künstliche bio-inspirierte Struktur*

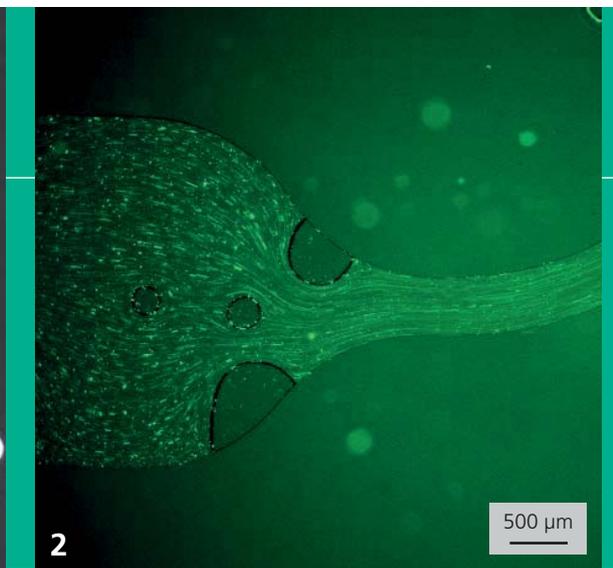
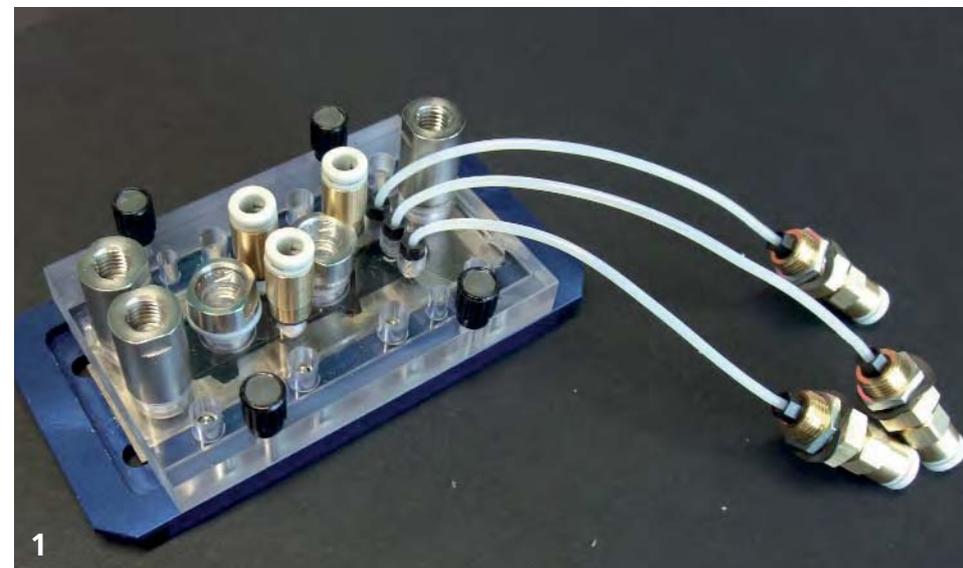
KONTAKT

Dr. Andrés-Fabián Lasagni

Tel.: +49 351 83391-3007

andres-fabian.lasagni@iws.fraunhofer.de





ZELLBASIERTE BIOCHIPS MIT INTEGRIERTEN MIKROKREISLÄUFEN FÜR DIE TIERVERSUCHSFREIE SUBSTANZTESTUNG

DIE AUFGABE

Die deutliche Zunahme von Allergien in der Bevölkerung, die in Europa erkannte weltweite Fehlprognose zur allgemeinen Chemikaliengtoxizität, die zum Teil verheerenden Fehleinschätzungen von Arzneimittelrisiken sowie die Diskussion zu potenziellen Gesundheitsrisiken von Nanostäuben haben in den zurückliegenden Jahren gezeigt, dass bisher keine adäquaten Methoden zur Vorhersage komplexer Wechselwirkungen zur Verfügung stehen. Dies gilt speziell für den Einfluss verbraucherrelevanter synthetischer und natürlicher Substanzen auf den menschlichen Organismus in seinem typischen Umfeld und seiner genotypischen Individualausprägung. Die biologischen und biochemischen Vorgänge derartiger Wechselwirkungen sind bereits weitgehend verstanden. Es fehlt an technischen Lösungen, mit denen diese komplexen Wechselwirkungen zwischen dem menschlichen Organismus und den Substanzen, denen er ausgesetzt ist, unter realen Bedingungen vor Exposition am Menschen modelliert werden können.

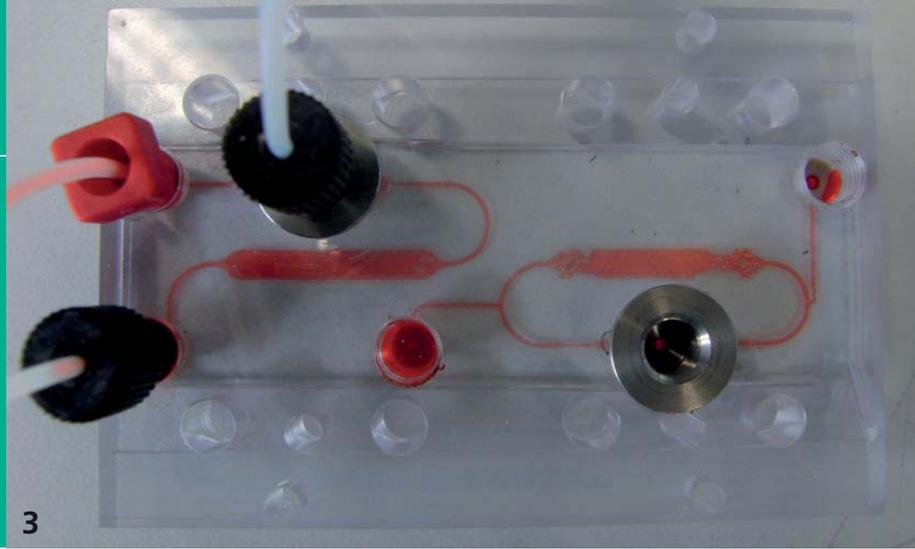
Für die prädikative Substanztestung müssen analog zum menschlichen Körper unterschiedliche Zellen bzw. Gewebe in einem gemeinsamen Kreislauf über Stoffaustausch miteinander interagieren können. Dazu wurden im Fraunhofer IWS Dresden auf einer Biochipplattform Mikrokreislaufsysteme realisiert, die aus mehreren Zellkultursegmenten, Reservoiren und Mikropumpen bestehen. Die Entwicklung und Umsetzung erfolgte im Rahmen der BMBF Gründungsoffensive Biotechnologie (GO-Bio) in einem gemeinsamen Projekt mit der

Technischen Universität Berlin. Die Vermarktung dieser zellbasierten Biochips erfolgt über das Unternehmen TissUse GmbH.

UNSERE LÖSUNG

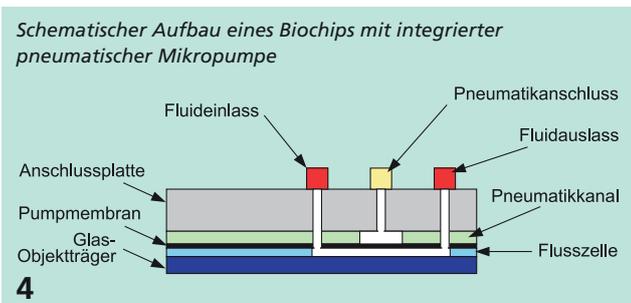
Für die Realisierung dieser miniaturisierten Mikrokreislaufsysteme wurde die etablierte, modulare Biochipplattform um eine Technologie zur Realisierung pneumatisch betriebener Düse-Diffusor- bzw. Peristaltikmikropumpen erweitert. Die Peristaltikpumpen bestehen aus drei in Reihe geschalteten Pumpkammern, die Düse-Diffusor-Pumpen aus einer Pumpkammer und zwei richtungsabhängigen Strömungswiderständen. Das Volumen der Pumpkammern kann durch pneumatische Auslenkung der Membran aktuiert werden, indem auf der flüssigkeitsabgewandten Seite der Membran wahlweise Über- bzw. Unterdruck angelegt wird. Zu diesem Zweck wurde ein autarkes, mikrokontrollerbasiertes Ansteuersystem entwickelt, welches neben den Mikropumpen auch die Temperierung steuert, Messdaten erfasst und speichert, Grenzwerte überwacht sowie den Datenaustausch mit dem zentralen Steuerrechner realisiert.

Für das Mikrokreislaufsystem wird eine Flusszelle aus Polydimethylsiloxan an eine Anschlussplatte aus Polycarbonat angegossen und anschließend gegen eine Abschlussplatte gedichtet. In An- und Abschlussplatte können Anschlüsse für die Fluidik, Sensoren (Elektroden, Mikrolinsen) und Aktoren (Heizelemente, Elektromagnete, Piezoschwinger) integriert werden. Die Flusszelle beinhaltet das Mikrofluidiksystem, bestehend aus Kanälen, Zellkultursegmenten, Pumpenmembranen, Düse-Diffusor-Strukturen sowie optionalen Sensoren und



Aktoren. Sie wird durch Abformung von einem Masterwerkzeug gefertigt. Dieses wird mit der am Fraunhofer IWS Dresden etablierten Laserbearbeitungstechnologie oder lithographisch gefertigt. Über die Einschraubtiefe der Formeinsätze kann die Dicke der Pumpmembranen definiert eingestellt werden. Typische Werte liegen zwischen 300 und 700 µm.

In den entwickelten Mikrokreisläufsystemen konnten humane Zellen über einen Zeitraum von mehreren Tagen erfolgreich kultiviert werden. Die Systeme bilden eine Basis für die Realisierung von Biochips in denen unterschiedliche Zellen bzw. Gewebe analog zum menschlichen Organismus in einem gemeinsamen Kreislauf über Stoffaustausch miteinander interagieren können. Sie stellen somit eine Grundlage für die Entwicklung von komplexen Systemen für die tierversuchsfreie Substanztestung dar.



ERGEBNISSE

Basierend auf der etablierten, modularen Biochipplattform wurden offene und geschlossene Mikrozirkulationskreisläufe mit Düse-Diffusor- und Peristaltikmikropumpen realisiert und mit Hilfe von Strömungssensoren sowie durch Aufzeichnung der Bewegung von fluoreszenzmarkierten Nanopartikeln charakterisiert.

Für beide Pumpprinzipien wurden geeignete Prozessparameter ermittelt. Die entwickelten pneumatischen Mikropumpen eignen sich sehr gut für den aktiven Flüssigkeitstransport in zellbasierten Biochipanwendungen, da sie:

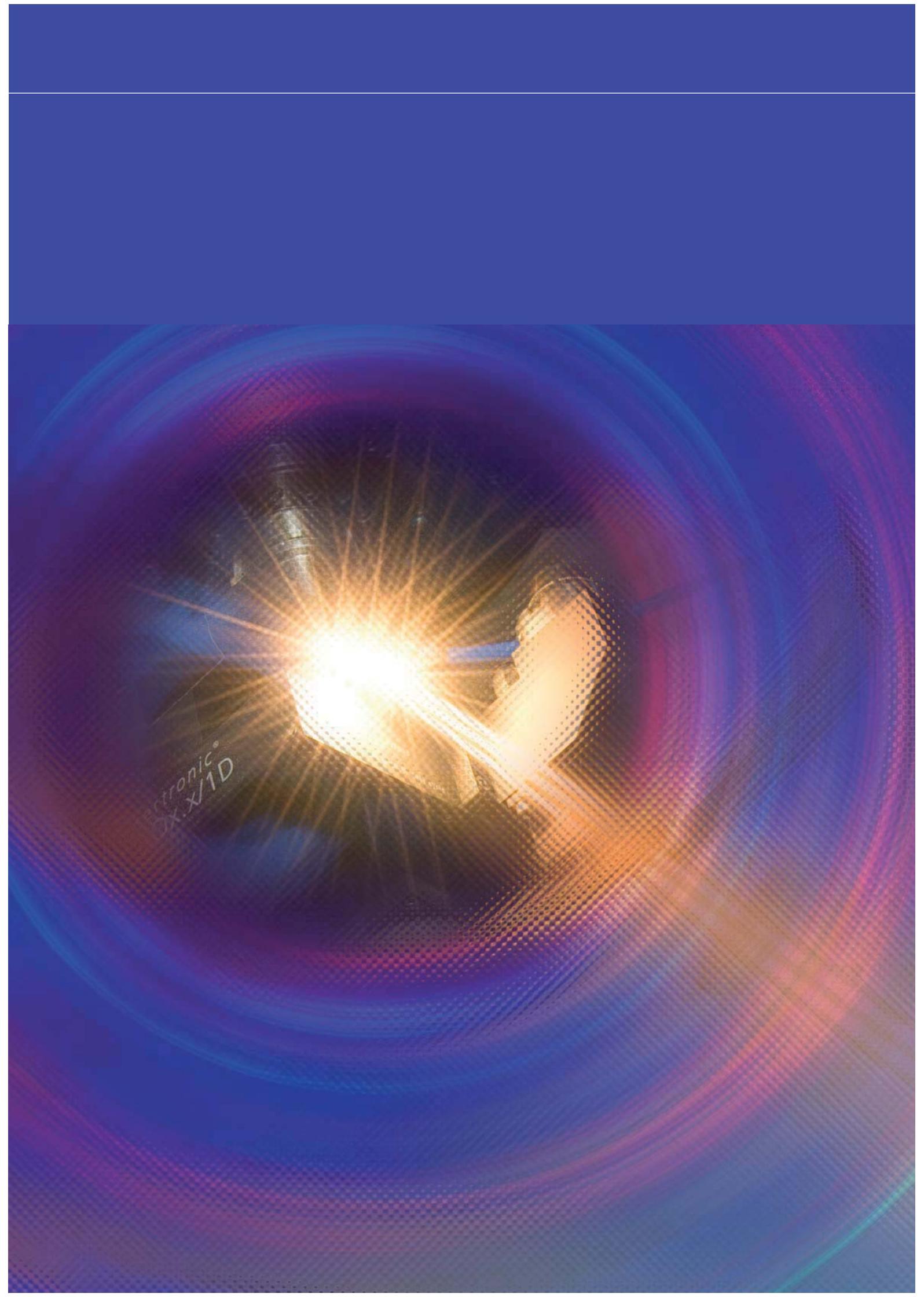
- keine elektrischen oder magnetischen Felder emittieren,
- aufgrund der geringen Größe in jeden Biochip integrierbar sind,
- vollständig autoklavier- und sterilisierbar sind,
- in großer Stückzahl mit überschaubaren Kosten herstellbar sind und
- verbunden mit weiteren Mikrofluidikstrukturen die Realisierung eines geschlossenen Kreislaufsystems ermöglichen.

- 1 *Biochip in Mikroskopaufnahmevorrichtung mit Mikrokreisläufsystem, angetrieben durch eine Peristaltikpumpe*
- 2 *Fluoreszenzaufnahme von strömenden, fluoreszierenden Nanopartikeln im Mikrokreisläufsystem*
- 3 *Biochip mit einem offenen und einem geschlossenen Mikrokreisläufsystem, angetrieben durch eine Düse-Diffusor-Pumpe, beide mit rotem Farbstoff befüllt*

KONTAKT

Dr. Frank Sonntag
Tel.: +49 351 83391-3259
frank.sonntag@iws.fraunhofer.de





Electronic
XXV1D

*Ein Pessimist sieht in jeder Aufgabe ein Problem,
ein Optimist in jedem Problem eine Aufgabe.*

Anonymer Autor



GESCHÄFTSFELD FÜGEN

Redaktion: Das Stichwort Elektromobilität ist in aller Munde; die deutsche Automobilindustrie und ihre Zulieferer stellen sich mit intensiven Entwicklungsanstrengungen darauf ein, neue Firmen z. B. zur Batterieherstellung etablieren sich. Wie begegnen Sie diesem Wandel?

Prof. Brenner: Durch unsere langfristige strategische Positionierung zum Fügen schwer schweißbarer Werkstoffe und konventionell nicht schmelzschweißbarer Werkstoffkombinationen sind wir gut für diese Herausforderungen gerüstet. Darüber hinaus haben wir in den letzten drei Jahren unsere Entwicklungsanstrengungen verstärkt, zwei der zentralen fügetechnischen Herausforderungen der Elektromobilität – dem effektiven Fügen von Kupfer mit Aluminium und dem konsequenten Leichtbau – gewachsen zu sein.

So sind wir beispielsweise heute in der Lage, der Industrie mit den Verfahren

- Laserstrahlschweißen mit höchster Strahlqualität und extrem schneller Strahloszillation,
- Laserinduktionswalzplattieren,
- Laserstrahllöten,
- Kleben mit laser- bzw. plasmagestützter Klebflächenvorbereitung,
- Rührreibschweißen,
- und elektromagnetisches Pulsfügen

gleich sechs verschiedene neue Fügetechnologien anbieten zu können, die für die Fügeaufgabe Kupfer / Aluminium imstande sind, unterschiedliche Aufgabenstellungen und Einsatzszenarien abzudecken. Sie sind geeignet, den Anforderungen hinsichtlich mechanischer und thermischer Belastungsfähigkeit, geringer elektrischer Übergangswiderstände, angepasster Fügegeometrien, hoher Fügegeschwindigkeiten und effizienter Prozessführung spezifisch zu genügen.

Redaktion: Welche Lösungsvorschläge haben Sie für die zweite Entwicklungs Herausforderung – den fortgeschrittenen Materialleichtbau parat?

Prof. Brenner: Bedingt durch die im Vergleich zu chemischen Energiespeichern geringere Energiedichte elektrischer Energiespeicher und systemspezifischer Zusatzgewichte kommt einem konsequenten Leichtbau eine herausragende Bedeutung für die weitere Entwicklung der Elektromobilität zu. Diese Herausforderung lässt sich ohne ein Multimaterial-Design nicht lösen. Dazu müssen aber effizientere Fügeverfahren entwickelt werden, die zu höher belastbaren Fügeverbindungen führen. Neben effizienteren, taktzeitkompatiblen Klebverfahren denken wir auch an das EMP-Fügen und die Entwicklung von effizienten Verfahren von Geometrie-variablen transition joints aus den Werkstoffkombinationen Al / Stahl bzw. Al / Mg, die anschließend mit serienbewährten Schweißverfahren weiterverarbeitet werden können. Für die Herstellung dieser transition joints erscheint uns das Laserinduktionswalzplattieren als das Verfahren der Wahl.



KOMPETENZEN

SCHWEISSEN SCHWER SCHWEISSBARER WERKSTOFFE

Das Laserstrahlschweißen ist ein modernes Schweißverfahren, das einen breitgefächerten industriellen Einsatz insbesondere in der Massenfertigung gefunden hat. Einen neuen Zugang zur Herstellung rissfreier Schweißverbindungen aus härtbaren und hochfesten Stählen, Guss-eisen, Al- und Sonderlegierungen sowie Bauteilen mit hoher Steifigkeit ermöglichen Laserstrahl-schweißverfahren mit integrierter Kurzzeitwärmebehandlung sowie werkstoffangepassten Zusatzwerkstoffen. Auf der Basis eines umfangreichen metallphysikalischen und anlagentechnischen Hintergrundwissens bieten wir Ihnen die Entwicklung von Schweißtechnologien, Proto-typschweißungen, Verfahrens- und Anlagenoptimierung sowie Ausarbeitung von Schweißan-weisungen an.

OBERFLÄCHENVORBEHANDLUNG UND KONSTRUKTIVES KLEBEN

Um eine gute Benetzung und eine hohe Klebfestigkeit zu erreichen, werden die Fügeteil-oberflächen vor dem Kleben häufig vorbehandelt. Dafür werden am IWS vor allem Plasma- und Lasertechniken verwendet. Die Charakterisierung der vorbehandelten Oberflächen sowie der geklebten Verbunde erfolgt mittels Kontaktwinkel-, Rauheits- und Schichtdickenmessun-gen, Lichtmikroskopie, REM / EDX und spektroskopischer Methoden. Eine neue Zielrichtung besteht in der Integration von Carbon-Nanotubes in Klebstoffe, wodurch die Klebfestigkeiten erhöht oder / und elektrisch leitfähige Verbunde hergestellt werden können. Wir bieten Füge-flächenvorbehandlungen und Oberflächencharakterisierung, konstruktives Kleben verschie-denster Materialien, die Bestimmung der Klebfestigkeit und Alterungsuntersuchungen an.

SONDERFÜGEVERFAHREN

Häufig lassen sich moderne Funktionswerkstoffe nur noch eingeschränkt mittels Standard-Schmelzschweißverfahren fügen, bei Metallen betrifft dies beispielweise viele hochfeste Aluminiumlegierungen. Wird eine Verbindung verschiedener Metalle gewünscht, etwa Aluminium und Kupfer, verschärft sich das Problem noch: In der Regel entstehen aus der Schmelze stark festigkeitsmindernde intermetallische Phasen. Am Fraunhofer IWS werden daher gezielt Fügeverfahren weiterentwickelt, die eine Schmelze vermeiden und so diese Probleme umgehen. Unser primärer Fokus liegt dabei auf den Verfahren Rührreibschweißen, dem Laserstrahllöten sowie dem elektromagnetischen Pulsfügen, für die wir Prozess-entwicklungen und Prototypenschweißungen anbieten.

ABTEILUNGSLEITER

PROF. BERNDT BRENNER

Telefon +49 351 83391-3207
berndt.brenner@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2010

1. Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen	38
2. Elektromagnetisches Pulsfügen zum Herstellen von Mischverbindungen	40
3. Walzplattierte Kupfer-Aluminium-Verbinder	42
4. Kleben von textilverstärkten Leichtbaumaterialien	44

GRUPPENLEITER SCHWEISSEN

DR. JENS STANDFUSS

Telefon +49 351 83391-3212
jens.standfuss@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITERIN KLEBEN

DR. IRENE JANSEN

Telefon +49 351 463-35210
irene.jansen@iws.fraunhofer.de



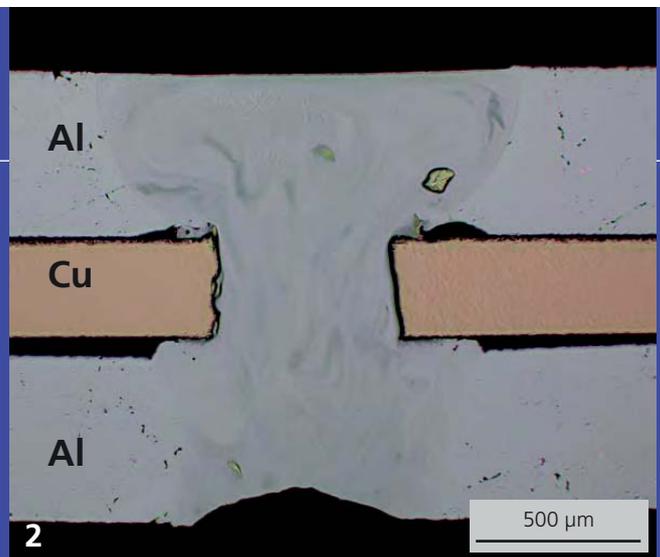
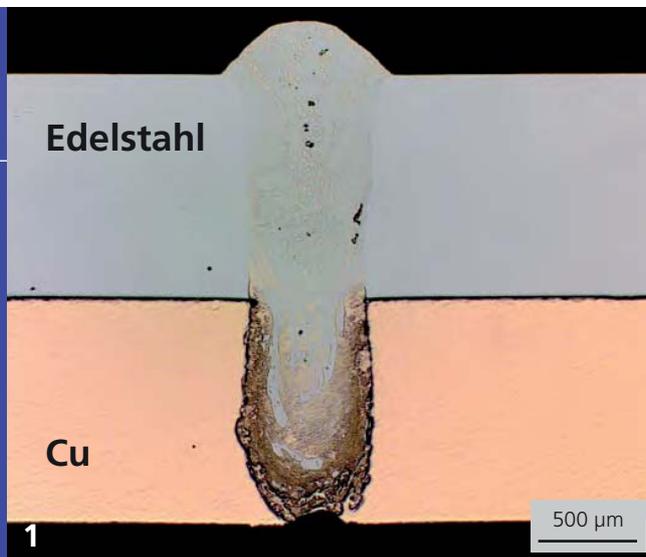
GRUPPENLEITER

SONDERFÜGEVERFAHREN

DR. GUNTHER GÖBEL

Telefon +49 351 83391-3211
gunther.goebel@iws.fraunhofer.de





LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON MISCHVERBINDUNGEN

DIE AUFGABE

Getrieben von der allgemeinen Forderung, Bauteile möglichst effizient eigenschafts- und gewichtsoptimiert herzustellen, haben sich stoffschlüssig gefügte Mischverbindungen in vielen Anwendungsbereichen etabliert. Das Schweißen von Kombinationen aus verschiedenen Werkstoffen ermöglicht es, die spezifischen Eigenschaften der Stoffe optimal zu nutzen. Eine stärkere Funktionsintegration und hocheffiziente gewichtsoptimierte Bauteile erreicht man vor allem über einen beanspruchungsgerechteren Werkstoffeinsatz und eine bessere Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften.

Leider gestaltet sich das Schweißen von Mischverbindungen häufig schwierig, da sich die Komponenten deutlich in ihren thermophysikalischen und stofflichen Eigenschaften unterscheiden können. Stark unterschiedliche Schmelztemperaturen, Wärmeleitfähigkeiten und thermische Ausdehnungskoeffizienten führen nicht selten zu Problemen im Aufschmelzverhalten beider Fügepartner und zu Schmelzbadturbulenzen. Erstarrt die Schmelze, bilden sich neuartige Mischkristalle und Legierungsphasen mit extremer Härte und Sprödigkeit, wie z. B. intermetallische Phasen. Diese entstehen auch durch Wärmebehandlung oberhalb werkstoffspezifischer Temperaturen infolge von Diffusionsprozessen. In beiden Fällen beeinflussen sie entscheidend die metallurgische Verträglichkeit einer Werkstoffkombination.

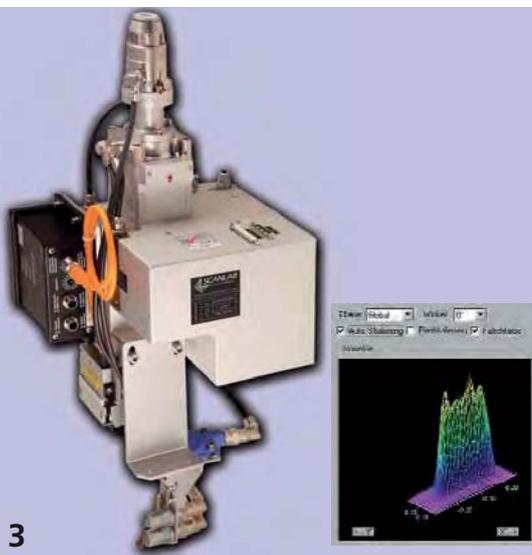
Trotzdem sind insbesondere Strahlschweißverfahren vergleichsweise gut geeignet, Mischverbindungen wirtschaftlich zu erzeugen. So sind zum Beispiel mit Hilfe von Lasern die Werkstoffkombinationen Al / Stahl, HSS / Vergütungsstahl

oder auch Gusseisen / Einsatzstahl wirtschaftlich hoch effektiv schweißbar. Auch mit dem Elektronenstrahl erweitert sich die erzeugbare Palette von Mischverbindungen beträchtlich. Allerdings erfordert die Umsetzung erheblich höhere Investitionskosten. Zudem ist die Integrierbarkeit des Verfahrens in bestehende Prozesse aufgrund des erforderlichen Vakuums äußerst aufwändig. Diese Erkenntnisse erfordern die Suche nach neuen flexiblen und prozesseffizienten Technologien.

UNSERE LÖSUNG

Qualitätsverbesserungen beim Laserschweißen der Mischverbindungen Al / Cu, Edelstahl / Cu und Al / Mg konnten am Fraunhofer IWS durch den Einsatz einer hochdynamischen Strahlablenkung erzielt werden. Bei dieser Technologie wird ein brillanter Laserstrahl über schnell verkippbare Spiegel abgelenkt und auf den Fügestoß projiziert. Dazu erfolgte im Rahmen des Verbundprojektes WELDIMA die Entwicklung eines hochdynamischen 2D-Scanners mit Ablenkfrequenzen von bis zu 2,5 kHz (Abb. 3).

Durch die zeitliche und leistungsmäßige Strahlmanipulation verbessern sich Aufmischungsgrad und Schmelzbadturbulenz. Zudem kann das Aufschmelzverhalten beider Fügepartner entscheidend beeinflusst werden. Die gute Fokussierbarkeit der Laserstrahlen hoher Brillanz ermöglicht extrem schmale Schweißnähte mit hohen Schachtverhältnissen und extrem kurzen Schmelzbadlebensdauern. Der Energieeintrag in das Werkstück kann dadurch erheblich reduziert und die Bildung der spröden intermetallischen Phasen erheblich verringert werden.



3

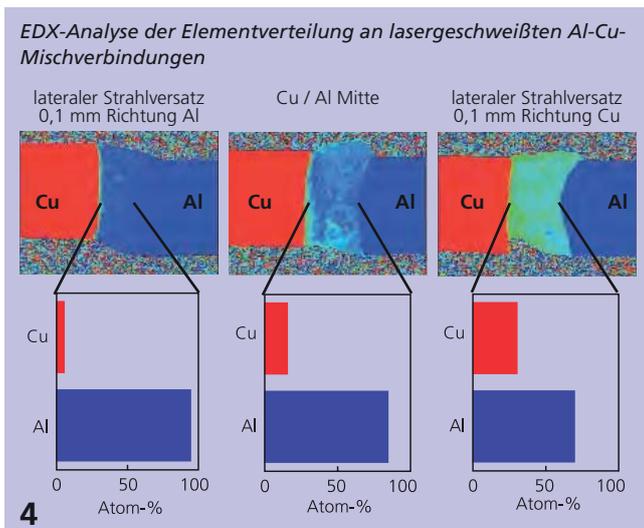
ERGEBNISSE

Die Beeinflussung des Mischungsverhältnisses beider Werkstoffpartner im Schweißgut über lateralen Strahlversatz zum Fügestoß und hochfrequente Strahloszillation ermöglicht es, den Anwendern gezielt und reproduzierbar die Breite des sich bildenden harten intermetallischen Phasensaums einzustellen. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse einer lasergeschweißten Mischverbindung des Systems Al / Cu.

Durch den Einsatz von brillanten Lasern im kW-Bereich lässt sich die Phasensaumbreite in Abhängigkeit vom Strahlversatz für die Mischverbindung Al / Cu auf Werte kleiner 10 µm senken. Dies bedeutet für die geschweißte Mischverbindung, dass bei Werkstoffdicken im Millimeterbereich Zugfestigkeiten von 70 % des Niveaus des schwächeren unbeeinflussten GW-Partners erreicht werden. Gegenüber der artgleichen Verbindung des schwächeren Partners werden sogar identisch große Zugfestigkeiten erreicht.

Mit Hilfe der hochfrequenten 2D-Strahlableitung und überlagerter Leistungsmodulation ist es möglich, den metallphysikalischen Grenzen noch näher zu kommen und so dem Laser bisher verschlossen gebliebene Anwendungsfelder zu erschließen. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, Mischverbindungen wie z. B. Cu / Stahl, Cu / austenitischer Stahl, Cu / Al oder Ni / härtpbarer Kohlenstoffstahl wirtschaftlich zu erzeugen.

Die dargestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes WELDIMA (Förderkennzeichen 13N 10197).

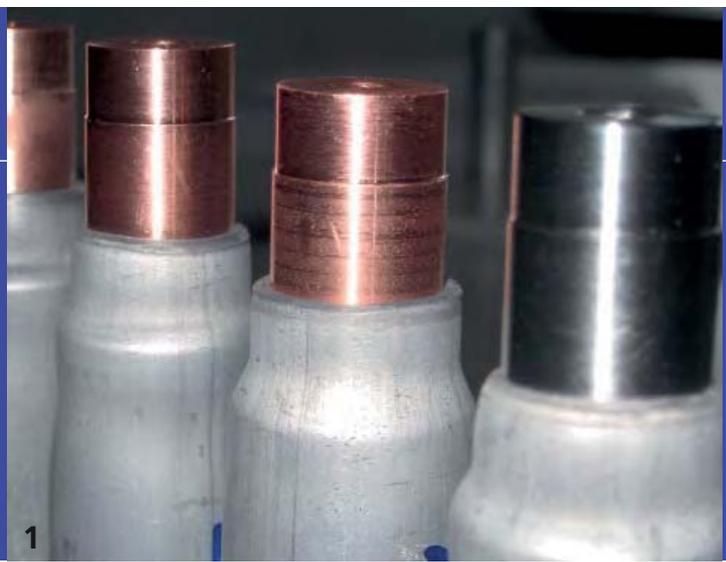


- 1 *Schliffbild einer laserstrahlgeschweißten Mischverbindung Edelstahl / Cu*
- 2 *Schliffbild einer laserstrahlgeschweißten Mischverbindung Al / Cu*
- 4 *Laserstrahlschweißkopf WSS intelliscan 20 FC zur hochdynamischen 2D-Strahlableitung*

KONTAKT

Dr. Jens Standfuß
 Telefon: +49 351 83391-3212
 jens.standfuss@iws.fraunhofer.de





ELEKTROMAGNETISCHES PULSFÜGEN ZUM HERSTELLEN VON MISCHVERBINDUNGEN

DIE AUFGABE

Schmelzschweißverfahren sind aus modernen Fertigungsketten nicht wegzudenken und gerade moderne Fügeverfahren wie etwa das Laserstrahlschweißen gelten als Mittel der Wahl, wenn Fügepartner schnell und qualitativ hochwertig gefügt werden sollen. Bestehen die Partner jedoch aus deutlich verschiedenen Metallwerkstoffen, beispielsweise Kupfer und Aluminium, treffen Schmelzschweißverfahren auf erhebliche Probleme, da die in diesen Mischverbindungen unvermeidlichen intermetallischen Phasen die erreichbare Festigkeit der Naht stark einschränken können. Ähnliche Herausforderungen ergeben sich bei stark heißbrisanfälligen Legierungen. Hier entstehen durch Aufschmelzen und Erstarren oft bereits rissbehaftete Gefüge, die Naht ist dann ebenfalls nur gering belastbar.

Ziel ist es daher, alternative Fügeverfahren für die industrielle Anwendung zu etablieren, die eine stoffliche Verbindung ohne Umweg über eine lokale Schmelze erzeugen können und damit auch bei kritischen Mischverbindungen hoch belastbare Nähte erzeugen.

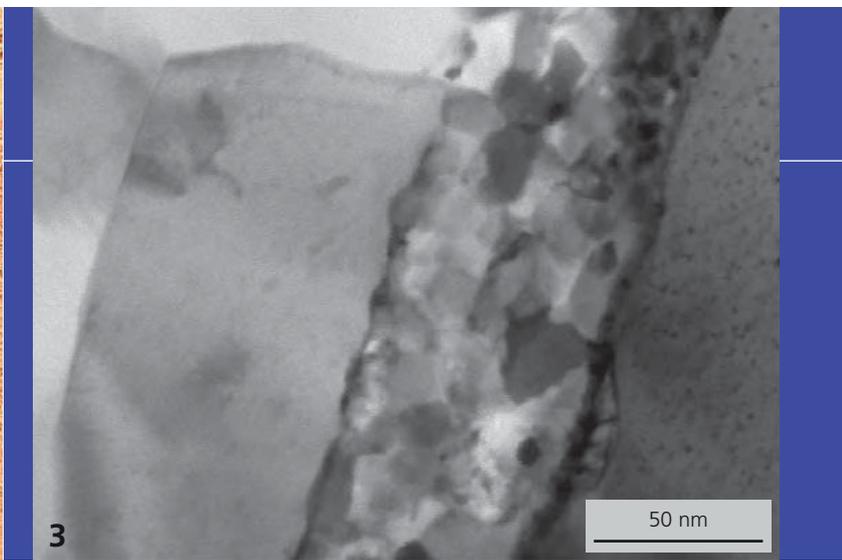
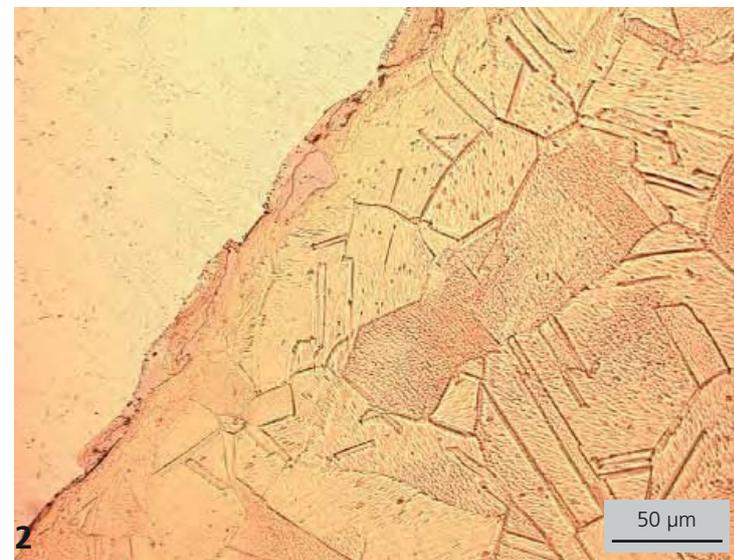
UNSERE LÖSUNG

Vom Explosivschweißen ist bekannt, dass durch Erzeugen extremer lokaler Drücke ein quasi schmelzefreies Schweißen nahezu beliebiger metallischer Fügepartner möglich ist. Nachteilig sind jedoch der hohe materielle und zeitliche Aufwand und die geometrischen Einschränkungen dieses Verfahrens. Das gleiche physikalische Prinzip lässt sich jedoch deutlich einfacher beim sogenannten elektromagnetischen

Pulsfügen ausnutzen: Hier wird der lokale Druckimpuls durch berührungsloses Einwirken eines Magnetfeld-Pulses im Bauteil selbst erzeugt. Die Technologie ist vor allem für die Möglichkeit bekannt, Metalle berührungslos umzuformen, und formschlüssige Verbindungen herzustellen. Bei entsprechender Wahl der Parameter ist aber auch eine atomare Schweißverbindung möglich (»Electro-Magnetic Pulse Welding«, EMPW).

Das am IWS angewendete Verfahren nutzt eine stromdurchflossene Werkzeugspule, die, etwa an einem Rohrende, mittels ihres Magnetfelds Wirbelströme in ein Bauteil einkoppelt. Die Überlagerung von Feld und Strom führt zu Lorentzkräften, die das Rohr schlagartig komprimieren. Prallt das Rohr dabei auf ein Gegenstück, etwa eine Welle, ergibt sich bei geeigneter Anordnung und ausreichender Geschwindigkeit eine flächige stoffschlüssige Verbindung mit extrem geringem Wärmeeintrag und ohne Wärmeeinflusszone.

Die für die Umsetzung des Verfahrens erforderliche Anlagentechnik wurde in Kooperation mit dem Hochfeldlabor des Forschungszentrums Dresden-Rossendorf entwickelt. Daran werden durch das IWS sowohl Grundlagenuntersuchungen zur Weiterentwicklung des Verfahrens betrieben, als auch industriennahe Aufgaben zum Fügen von Mischverbindungen oder zur Verfahrensoptimierung durchgeführt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Analyse der Ausbildung der Grenzfläche zwischen den Materialien, da diese eine Schlüsselstellung für die Belastbarkeit einer Verbindung einnimmt. Die Untersuchungen helfen, das Verfahren nicht nur besser zu verstehen, sondern es auch gezielt auf gewünschte Eigenschaften hin zu optimieren.



ERGEBNISSE

Mischverbindungen verschiedener Materialkombinationen (Abb. 1) wurden in einem breiten Parameterfeld auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Die Fähigkeit des Verfahrens, stark unterschiedliche Metalle atomar verschweißen zu können, wurde bestätigt. Durch die metallographische Charakterisierung (Abb. 2) sowie REM- und TEM-Analysen (Abb. 3) konnte dabei erstmals gezeigt werden, dass an den untersuchten Materialkombinationen Al / Cu und Al / Stahl auch in scheinbar übergangszonenlos geschweißten Mischverbindungen nanoskalige intermetallische Phasen an den Grenzflächen auftreten. Dabei war nicht nur die Phasensaumdicke abhängig von der eingebrachten Pulsenergie, sondern auch der auftretende Phasentyp. Erst durch höchstauflösende TEM-Aufnahmen wurde ersichtlich, dass derartige Säume quasi durchgehend auftreten, wenn auch abschnittsweise mit sehr geringen Schichtdicken im Bereich von 50 nm – 200 nm. Die Analysen zeigten weiterhin, dass in den Säumen ab einer Dicke von 5 µm Risse auftreten können.

Durch Optimierung der Fügeparameter, speziell der Minimierung der Pulsenergie, konnte an allen untersuchten Materialkombinationen die Ausbildung der intermetallischen Phasen stark reduziert und eine hohe Nahtqualität der axialsymmetrisch gefügten Bauteile erreicht werden. Relevant für das Verständnis der Nahteigenschaften ist auch die Kenntnis der Veränderungen in der nahen Umgebung der Grenzfläche. Hier wurden in Kupfer-Aluminium-Nähten druck- bzw. verformungsinduzierte Rekristallisationszonen mit Ultra-Feinkorngefüge in der direkten Umgebung der Grenzfläche festgestellt. Diese sind ein Nebeneffekt des physikalischen Prinzips und tragen ebenfalls positiv zur Erhöhung der Belastbarkeit der Verbindungen bei.

- 1 *Rohr-Zapfen Verbindungen, Mischverbindungen aus Aluminium / Kupfer bzw. Aluminium / Stahl*
- 2 *Lichtmikroskopische Detailaufnahme atomar verschweißter Aluminium-Kupfer-Grenzfläche*
- 3 *Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme einer Grenzschicht zwischen Aluminium und Kupfer mit nanoskaligem Feinkorngefüge*



KONTAKT

Dr. Gunther Göbel
 Telefon: +49 351 83391-3211
gunther.goebel@iws.fraunhofer.de





WALZPLATTIERTE KUPFER-ALUMINIUM-VERBINDER

DIE AUFGABE

Im Zuge neuer Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektromobilität wächst zunehmend der Bedarf an neuen und auf die jeweiligen Aufgaben zugeschnittenen Verbindungen, die die Eigenschaften verschiedener Werkstoffe vereinen. Zwar lassen sich derartige Werkstoffkombinationen mit den nicht stoffschlüssigen Klemm- oder Schraubverbindungen realisieren, hinsichtlich Produktivität, Materialeinsatz und Langzeitstabilität des Übergangswiderstandes zeigt diese Verbindungstechnik jedoch Defizite. Klassische Schmelzschweißverbindungen gehen meist mit der Bildung intermetallischer Phasensäume an den Werkstoffübergängen einher. Diese wiederum bewirken eine Erhöhung der Übergangswiderstände der Verbindungen.

Verbundhalbzeuge beispielsweise aus Kupfer und Aluminium könnten neue konstruktive Freiräume für die Umsetzung möglichst kompakter und leichter elektrischer Antriebskomponenten eröffnen. Die effektive Herstellung einer langzeitstabilen Verbindung zwischen Teilen aus Kupfer und Aluminium ist deshalb Gegenstand der Entwicklungen im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes »DeLIZ«.

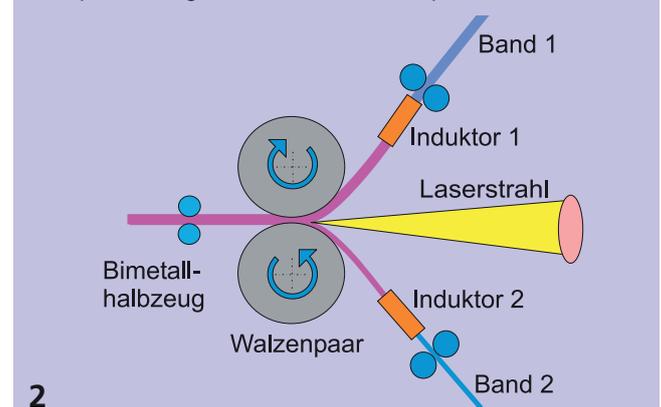
UNSERE LÖSUNG

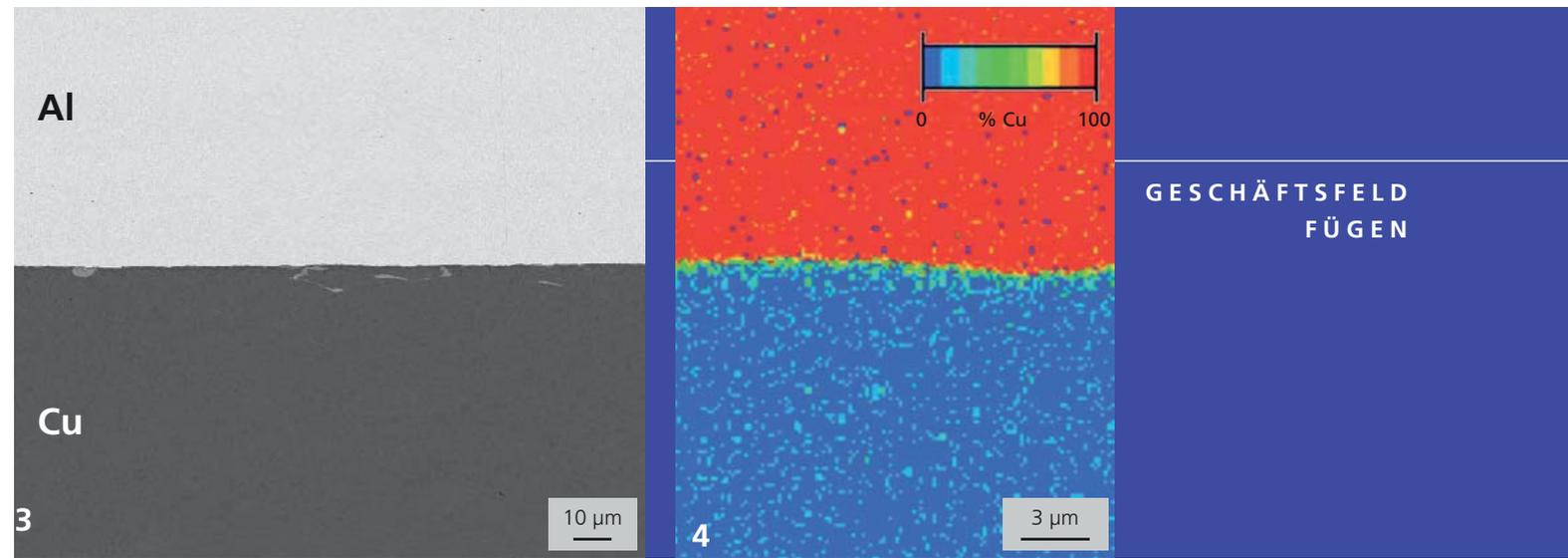
Um die Vorteile einer stoffschlüssigen Verbindung von stromführenden Komponenten aus den beiden Werkstoffen mit einem niedrigem Übergangswiderstand zu gewährleisten und gleichzeitig auch eine Langzeitstabilität der elektrischen Eigenschaften zu garantieren, sollen die Schweißverbindungen zwischen Aluminium und Kupfer durch den Einsatz geeigneter walzplattierter Bimetall-Verbinder (Transition Joints) ausgeführt werden. Hierzu werden mit einem am Fraunhofer IWS entwickelten speziellen Walzplattierverfahren, dem Laserinduktionswalzplattieren (LIWP, Abb. 2), die geeigneten Halb-

zeuge entwickelt, hergestellt und getestet. Die Besonderheit dieses Verfahrens liegt in der Kombination aus einer sehr geringen Gesamtverformung ($< 11\%$), einem einzigen Verformungsschritt und den nur in der Fügezone sehr kurzzeitig wirkenden Spitzentemperaturen. Dieses wird möglich durch das Zusammenspiel einer induktiven Vorwärmung der zu verbindenden Halbzeuge mit der nur sehr partiell im Walzspalt wirkenden Energie eines zur Linie geformten Laserstrahls. Hierdurch können bei der Ausbildung der Fügezone sowohl verformungsinduzierte als auch temperaturgesteuerte metallurgische Reaktionen gleichzeitig wirken.

Durch das lokale Wirken der eingebrachten Prozessenergie und die Realisierung der Verbindung in nur einem Walzschritt ergibt sich ein vergleichsweise großer Freiheitsgrad bei der Kombination der zu fügenden Halbzeuge. Diese müssen nicht geometrisch deckungsgleich sein. Beispielsweise kann ein Verbund aus zwei Bändern auch als Material sparende Überlappung ausgeführt sein. Dadurch können neben einer fast beliebigen Variation der Dicken der zu fügenden Halbzeuge auch ihre Breiten in einem bestimmten Rahmen anwendungsspezifisch konfektioniert werden.

Prinzipdarstellung des Laserinduktionswalzplattier-Verfahrens





ERGEBNISSE

Analog zu den mittels Laserinduktionswalzplattieren (Abb. 2) bisher realisierten Werkstoffverbunden aus verschiedenen Stählen, aus Stahl und Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen sowie aus Stahl und Kupfer bzw. Kupferlegierungen lassen sich auch Plattierungen aus Kupfer bzw. Kupferlegierungen und Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen herstellen (Abb. 1). Bisher konnten je nach verwendeten Bandgeometrien (12 bzw. 22 mm Breite bei Banddicken zwischen 1,0 bis 2,0 mm) und eingesetzten Leistungen (Laser bis maximal 10 kW, Induktion bis maximal 45 kW) Plattiergeschwindigkeiten bis zu 8 m / min erreicht werden. Generell ist zu beobachten, dass sich der Walzplattierprozess mit höheren Plattiergeschwindigkeiten stabilisiert. Die erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten sind jedoch stark abhängig von den eingesetzten Halbzeugen (Maße, Werkstoff) sowie den zur Verfügung stehenden Leistungen von Laser und Induktion.

Neben der Forderung nach dem Erreichen guter elektrischer Kennwerte werden an die Bimetallhalbzeuge der Werkstoffpaarung Kupfer und Aluminium natürlich auch sehr hohe Anforderungen an ihre mechanischen Eigenschaften, wie ausreichende Festigkeit und gute Verformbarkeit, gestellt. Insbesondere die Fügezone steht hier im Fokus der Untersuchungen. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass für einen Großteil der hergestellten Plattierungen keine direkten Werte zu Haft- bzw. Schälfestigkeiten ermittelt werden konnten. Das Versagen des Verbundes erfolgte überwiegend neben der Fügezone im Aluminium. Das gleiche Verhalten zeigte sich auch im Scherzugversuch. Mit Ausnahme vereinzelter Fehlstellen liegen die Scherbruchflächen innerhalb der Wärmeeinflusszone des Aluminiumbandes. Die ermittelten Scherfestigkeiten lagen je nach genutztem Parameterfeld für diese Werkstoffpaarung zwischen 32 und 52 MPa.

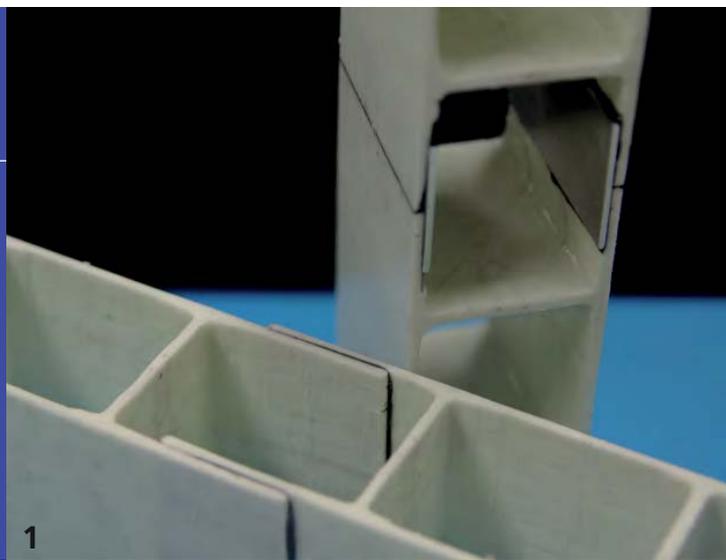
Obwohl auf den Innenflächen der beiden zu fügenden Bänder durch das Einwirken des Laserstrahls unmittelbar vor dem Walzspalt sehr hohe Spitzentemperaturen erreicht werden (z. T. oberhalb der Liquidustemperaturen), kann die Ausbildung eines zusammenhängenden intermetallischen Phasensaumes vermieden werden (Abb. 3 und 4). Hierdurch bildet sich eine störungsarme Fügezone aus, welche auch gleichzeitig eine wichtige Voraussetzung für das Erreichen der erforderlichen guten elektrischen Kennwerte darstellt. Deren Ermittlung sowie weiterführende Untersuchungen zur zyklischen Belastbarkeit dieser Werkstoffverbunde sind Gegenstand laufender Aktivitäten.

- 1 *Plattiertes Band aus Kupfer und Aluminium*
- 3 *REM-Aufnahme: Fügezone eines walzplattierten Kupfer-Aluminium-Bandes, Kupfer hell, vereinzelte kupferhaltige Phasengemenge im Aluminium*
- 4 *EDX-Analyse des Fügezonbereiches, quantitative Verteilung des Kupfergehaltes*

KONTAKT

Dipl.-Ing. Volker Fux
 Telefon: +49 351 83391-3243
 volker.fux@iws.fraunhofer.de





KLEBEN VON TEXTILVERSTÄRKTEN LEICHTBAU-MATERIALIEN

DIE AUFGABE

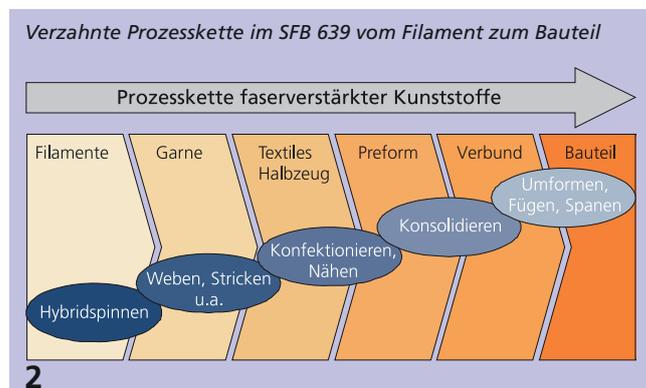
Um das vorhandene hohe Leichtbaupotenzial in Zukunft besser auszuschöpfen, steht die durchgängige Untersuchung des gesamten Entwicklungs- und Herstellungsprozesses von Leichtbaustrukturen in Mischbauweise im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten des SFB 639. Darin bearbeitet das Fraunhofer IWS in Zusammenarbeit mit der TU Dresden das Teilprojekt B4 »Stoffschlüssige Verbindungstechniken bei Mischbauweisen mit textilverstärkten Verbunden«.

Die Herstellung von glasfaserverstärkten Thermoplasten, welche sich sowohl zur Übertragung hoher Kräfte eignen als auch in komplexen Geometrien herstellbar sind, gestaltete sich bislang nicht zufriedenstellend. Das Spritzgießen von kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten ermöglicht das Herstellen von Bauteilen mit komplexer Geometrie, jedoch können diese Bauteile aufgrund der kurzen Faserlängen nur bedingt zur Übertragung hoher Kräfte verwendet werden. Gepresste glas-mattenverstärkte Thermoplaste (mehrere Lagen Glasmatten und Thermoplastfolien übereinandergelegt) ermöglichen hingegen eine durchgängige Kraftübertragung durch die Faser, bieten aber nur eingeschränkte Möglichkeiten zur Fertigung komplexer Geometrien. Das Flüssiginjektionsverfahren, bei dem das Fasergewebe mit einer niederviskosen Monomer- oder Oligomerschmelze getränkt und anschließend die Polymerisation gestartet wird, ist nur mit einzelnen Thermoplasten (z. B. PA) möglich.

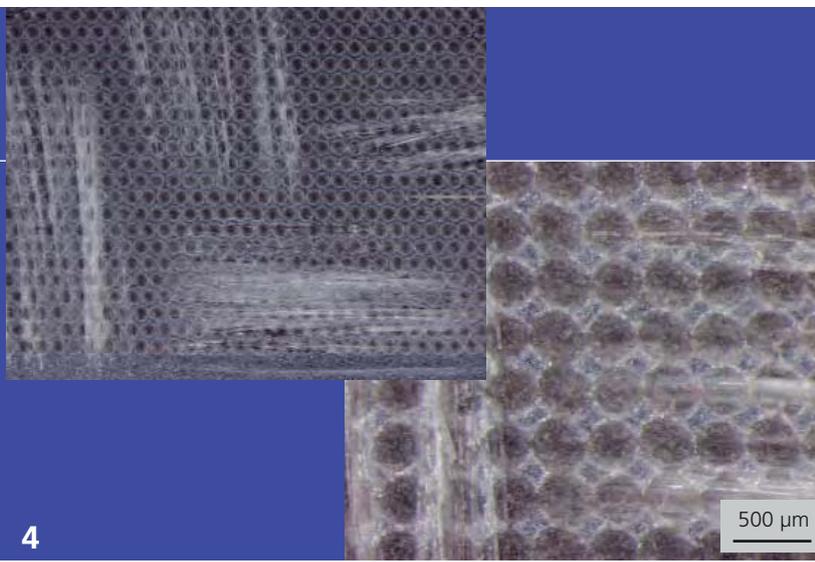
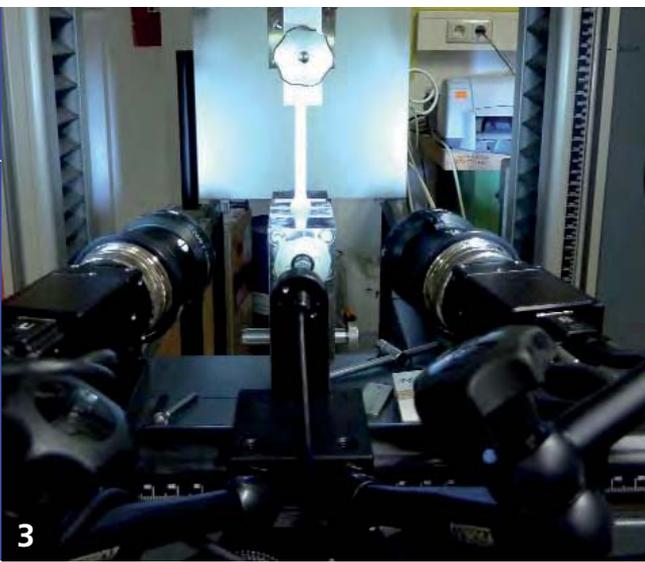
UNSERE LÖSUNG

Im Rahmen des SFB wurde die Herstellung von faserverstärkten Thermoplasten unter der Verwendung von Hybridgarnen, z. B. Polypropylen- und Glasfasern entwickelt. Damit können

neben 2D- auch komplexe 3D-Strukturen (spacer fabrics) hergestellt werden (Abb. 1). Verschiedene Bindungstechniken, wie das Weben, Nähen und Stricken, ermöglichen die kraftflussoptimierte Herstellung solcher Abstandsstrukturen. Neben diesen vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten verspricht man sich die Möglichkeit zur Herstellung komplexer Strukturen in kurzen Zykluszeiten (Abb. 2).



Das hohe Leichtbaupotenzial der neuartigen Hybridgarn-Textil-Thermoplast-Verbunde (HGTT-Verbunde) kann nur mittels werkstoffgerechter Fügeverfahren in komplexen Produkten umgesetzt werden. Hierbei bietet sich das stoffschlüssige Fügeverfahren Kleben aufgrund seiner flächigen, gleichmäßigen Lastübertragung in besonderer Weise an. Niederenergetische Oberflächen, wie die von Polyolefinen (z. B. Polyethylen, Polypropylen und Polytetrafluorethylen), sind bekannt für ihre schlechten adhäsiven Eigenschaften und deshalb mit Hilfe der Klebtechnik schwer zueinander und mit anderen Materialien zu fügen. Aus diesem Grund ist eine Verbesserung der Adhäsion dieser Werkstoffe durch eine effektive Vorbehandlung zwingend notwendig. Dazu werden in der Literatur verschiedene Herangehensweisen diskutiert, welche teilweise die Polarität, das Benetzungsverhalten und die Oberflächenenergie erhöhen sowie die Oberfläche strukturell verändern.



Um eine für das Kleben notwendige Verbesserung der Adhäsion herbeizuführen, ist eine Modifikation der Polypropylenoberfläche notwendig. Am Fraunhofer IWS wurden zwei physikalische Methoden zur Oberflächenvorbehandlung untersucht. Zum Einen wurde ein Plasma unter Atmosphärendruck (AD-Plasma) angewandt, mit dem funktionelle Gruppen erzeugt werden können. Vergleichend dazu kam ein Nd:YAG-Festkörperlaser zum Einsatz, mit dem oberste kontaminierte Schichten abgetragen sowie die Oberflächen strukturiert und somit vergrößert werden. Beide Verfahren sind inline-fähig und robotertauglich in Prozessketten einsetzbar. Um den Einfluss der Oberflächenvorbehandlung abschätzen zu können, wurden vergleichend Proben mit Ethanol entfettet.

ERGEBNISSE

Der untersuchte Werkstoff ist ein glasfasertextilverstärktes Polypropylen, welches als HGTT-Material in Plattenform hergestellt wurde. Der verwendete Klebstoff ist ein handelsübliches Epoxidharz. Mit einem optischen Dehnungsmesssystem (Abb. 3) wurden reine Klebstoffkennwerte ermittelt sowie die Klebungen beurteilt.

Die Oberflächenvorbehandlung durch AD-Plasma erzielte eine verbesserte Benetzung der Polypropylenoberfläche, welche mit dem Messen des Kontaktwinkels nachgewiesen werden konnte. Eine Oberflächenveränderung fand nicht statt, da auf genügend Arbeitsabstand geachtet wurde und somit keine thermischen Schädigungen an den Oberflächen eintraten.

Mit dem Einsatz des Nd:YAG-Faserlasers zur Oberflächenvorbehandlung können gezielt Strukturen eingestellt werden, welche in Abhängigkeit von der Spot- und Spurüberlappung unterschiedlich ausfallen (Abb. 4). Weiterhin wurde beobachtet, dass neben der Strukturierung aufgrund der für den Lasertyp charakteristischen Wellenlänge auch eine Schädigung der Oberfläche sowie eine partielle Faserfreilegung und -zerstörung stattfand. Aufgrund der Bindungsart des

untersuchten HGTT-Thermoplasts liegen unterschiedlich dicke Polypropylen-deckschichten vor. Dies hat eine ungewollte Faserfreilegung zur Folge.

Die anschließend durchgeführten Klebungen an HGTT-Plattenmaterial zeigten eine deutliche Steigerung der zu übertragenden Festigkeiten nach AD-Plasma- und Laservorbehandlung im Vergleich zu den mit Ethanol gereinigten Proben. Darüber hinaus konnte nach der Durchführung eines künstlichen Klimawechseltests eine höhere Alterungsbeständigkeit für die mit Laser vorbehandelten Proben ermittelt werden.



- 1 Realisierung doppelt überlappender Klebverbindungen von Abstandsstrukturen (spacer fabrics) ohne und mit metallischem Fügepartner
- 3 Kennwertermittlung mit optischem Dehnungsmesssystem
- 4 Rasterelektronische Aufnahmen des HGTT-Materials nach Laservorbehandlung

KONTAKT

MEng József-Sebastian Pap
 Telefon: +49 351 4633-2242
jozsef-sebastian.pap@iws.fraunhofer.de





*Nicht der Wind,
sondern die Segel bestimmen den Kurs.*
Unbekannter chinesischer Autor



GESCHÄFTSFELD RANDSCHICHTTECHNIK

Redaktion: Ein Entwicklungsschwerpunkt war bisher die verfahrensbezogene Systemtechnik für das Laserrandschicht härten. Welche Fortschritte gab es dazu im letzten Jahr?

Prof. Brenner: Wir haben die Entwicklung unserer Komponenten zur Laserrandschicht härten weiter fortgesetzt und sie zu einem Systembaukasten »Temperaturregelung von schnellen lokalen Wärmebehandlungs- und Flüssigphasenprozessen« ausgebaut. Charakteristisch für diese Entwicklung ist z. B. der industrielle Einsatz des schnellen Temperaturregelsystems »EFAqS« für das Laserlöten von Solarzellen in einer Vielzahl von Anlagen und Aktivitäten zur Qualifizierung des Temperaturregelsystems für schnelle Induktionshärteprozesse.

Hervorhebenswert ist in diesem Kontext die Entwicklung und Industrieüberführung eines neuen Regelkonzeptes für das Laserauftragschweißen. Als Regelgröße wird hier die Fläche gewählt, innerhalb der die Schmelztemperatur des Auftragschweißgutes überschritten ist. Es hat sich gezeigt, dass dieser Kennwert eine gut steuerbare Regelgröße ist, die prozess-technisch gut mit der in ganz engen Grenzen zu haltenden Aufschmelzung des Substratwerkstoffes korreliert. In einem gemeinsamen Projekt mit der Abteilung »Thermische Beschichtungsverfahren« entstanden daraus ein Laserstrahlhärte- und ein Laserstrahlaufragschweißmodul für eine kombinierte Anlage zum Härten und Auftragschweißen von Großwerkzeugen im Werkzeugbau eines deutschen Automobilherstellers.

Ebenfalls weiterentwickelt wurde eine Laserstrahlhärteeinheit mit einer Drehspiegeloptik, die eine temperaturgeführte Wärmebehandlung der Innenseiten von Halbkugelflächen gestattet. Damit wird erstmals die Randschicht härten von rotationssymmetrischen konkaven Funktionsflächen an Bauteilen möglich, deren Geometrie bisher eine belastungsangepasste lokale Randschicht härten nicht zuließ.

Redaktion: Mitte letzten Jahres ging ein neues Elektronenmikroskop in Betrieb. Wozu beabsichtigen Sie das Gerät zu nutzen?

Prof. Brenner: Wir sind sehr froh darüber, dass wir durch die Beschaffung und Inbetriebnahme des analytischen TEM JEM 2100 unsere Möglichkeiten und Fähigkeiten zur hochauflösenden Strukturcharakterisierung auf eine qualitativ neue Stufe stellen konnten. Angesichts der immer komplexer werdenden Werkstoffe, Mikrostrukturen und Schichtsysteme ist es im Sinne einer praxisorientierten Technologieentwicklung unumgänglich, die eigenschaftskontrollierenden Faktoren auf der Strukturebene zu charakterisieren, in der sie angesiedelt sind.

Da moderne Konstruktionswerkstoffe ihre Eigenschaften in der Regel erst durch eine sehr ausgefeilte Abfolge von thermischen Behandlungsschritten erreichen, besteht die Gefahr, dass sie durch eine anschließende Temperaturbeaufschlagung z. B. infolge Füge-, Randschichtveredlungs-, Beschichtungs- oder Trennprozessen irreversibel geschädigt werden. Die mikrostrukturellen Ursachen solcher Schädigungen zu erkennen, zu minimieren oder gar auszuschließen ist eine wesentliche Aufgabenstellung für die Nutzung des TEM.



KOMPETENZEN

TECHNOLOGIEN ZUM BEANSPRUCHUNGSGERECHTEN HÄRTEN VON STÄHLEN MITTELS LASER UND INDUKTION

Bei Bauteilgeometrien, Verschleißfällen und Werkstoffen, bei denen konventionelle Härte-technologien versagen, bietet das Laserhärten vielfach neue Lösungsansätze zur Erzeugung verschleißfester Oberflächen. Das trifft insbesondere zu auf die selektive Härtung von Bauteilen mit mehrdimensional gekrümmten, innenliegenden oder schwer zugänglichen Flächen, Bohrungen oder Kerben sowie auf stark verzugsgefährdete Bauteile. Gestützt auf langjährige umfangreiche Erfahrungen und fachübergreifendes Know-how von der Analyse des Verschleißfalles bis zur optimalen technologischen Realisierung von Härteaufgaben bieten wir an:

- Entwicklung von Randschichthärtetechnologien mit Hochleistungs-Diodenlasern, CO₂-Lasern, Nd:YAG-Lasern oder Induktion bzw. beidem,
- Randschichtveredelung von Entwicklungs- und Prototypmustern.

KOMPLEXE WERKSTOFF- UND BAUTEILCHARAKTERISIERUNG

Die Beherrschung moderner Füge- und Randschichtverfahren erfordert Kenntnisse von den ablaufenden strukturellen Änderungen bis zu den resultierenden Bauteileigenschaften. Auf der Basis langjähriger Erfahrungen und einer modernen Geräteausstattung für die strukturelle, mikroanalytische und mechanische Werkstoffcharakterisierung bieten wir an:

- metallographische, elektronenmikroskopische (REM, TEM) und mikroanalytische (EDX) Charakterisierung der Realstruktur von Metallen, Keramiken und Werkstoffverbunden,
- Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die Bauteilauslegung und Qualitätssicherung,
- Eigenschaftsbewertung von randschichtbehandelten und geschweißten Bauteilen,
- Strategien zur werkstoff- und beanspruchungsgerechten Bauteilgestaltung,
- Aufklärung von Schadensfällen.

ABTEILUNGSLEITER

PROF. BERNDT BRENNER

Telefon +49 351 83391-3207
berndt.brenner@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2010

- | | |
|--|----|
| 1. Systemtechnik zum Laserbearbeiten in Prozessgasatmosphären | 50 |
| 2. Analytische Transmissionselektronenmikroskopie zur produktbegleitenden Werkstoffentwicklung | 52 |
| 3. Kamerabasiertes Prozessregelsystem »E-MAqS« nun auch für das Laserauftragschweißen nutzbar | 54 |
| 4. Festwalzen von 3D-Freifformflächen | 56 |

GRUPPENLEITER

RANDSCHICHTVERFAHREN

DR. STEFFEN BONSS

Telefon +49 351 83391-3201
steffen.bonss@iws.fraunhofer.de



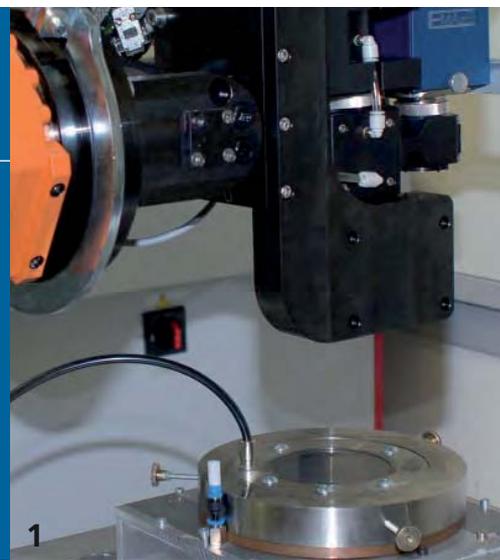
GRUPPENLEITER

WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG

DR. JÖRG KASPAR (kommissarisch)

(seit 1. August 2010)
Telefon +49 351 83391-3216
joerg.kaspar@iws.fraunhofer.de





SYSTEMTECHNIK ZUM LASERBEARBEITEN IN PROZESSGASATMOSPHÄREN

DIE AUFGABE

Laserprozesse zur Randschichtveredlung müssen aus verschiedenen Gründen nicht selten in besonderen Gasatmosphären ausgeführt werden. Beim Laserstrahlhärten will man zum Beispiel häufig die Oxidation der Bauteile verhindern. Die Laserstrahlbehandlung von Titanwerkstoffen hingegen wird zum Teil ganz gezielt mit einem gewissen Anteil von Stickstoff in einer ansonsten inerten Gasatmosphäre ausgeführt. Trotz der Notwendigkeit einer präzise eingestellten Gasmischung in der Prozessumgebung sollen die Prozesse ohne aufwändige Prozesskammern, wie sie für Vakuumprozesse notwendig sind, stattfinden können, um deren industrielle Anwendung nicht zu erschweren. Eine wichtige Anforderung ist ausreichende Flexibilität sowie sichere Kontrolle von Sauerstoffgehalt und Gaszusammensetzung.

UNSERE LÖSUNG

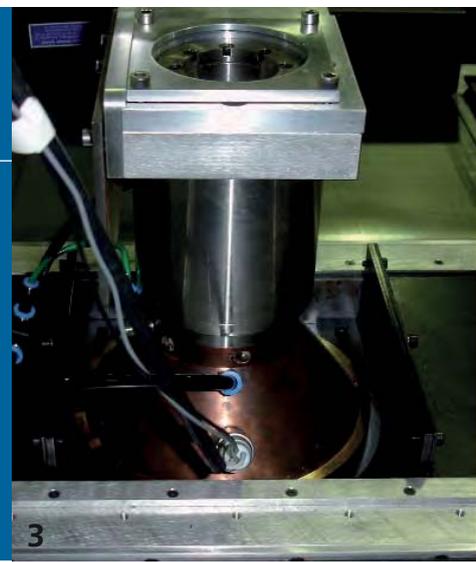
Das angewendete Prinzip ist ein leichter Prozessgasüberdruck in einer lokal wirkenden glockenartigen Prozessabschirmung, die auf der Bauteilspannvorrichtung oder auf dem Bauteil selbst gleitet. Diese kann entweder mechanisch mit der Laseroptik verbunden sein oder von dieser entkoppelt angewendet werden. Das Gas strömt im Wesentlichen an der Gleitfläche aus, so dass dadurch die Reibung bei bewegter Glocke reduziert wird. Speziell für größere Bauteile, die während der Laserbearbeitung zusätzlich noch gedreht oder geschwenkt werden müssen, wurde eine Prozesskammer entwickelt, die mit einer Gasglocke abgedichtet wird.

Der Sauerstoffgehalt in der Prozessgasvorrichtung wird mit einer Lambda-Sonde überwacht, während die notwendigen Gasmischungen in einem vierkanaligen System durchflussgeregelt aufbereitet werden.

ERGEBNISSE

Für die Behandlung ebener Bauteile wurde eine einfache Prozessgasglocke entwickelt. Der Laserstrahl tritt über ein Quarzglasfenster in die Glocke ein. Eine einfache Teleskopkonstruktion ermöglicht die Anpassung an sehr kurze Brennweiten der Laseroptik. Die Glocke kann unmittelbar an einen Halter einer Laseroptik montiert werden. Sie bewegt sich dann während des Prozesses mit der Optik mit. Die Teleskopkonstruktion ermöglicht, dass die Glocke auch bei vertikaler Bewegung der Laseroptik durch die Schwerkraft immer auf dem Bauteil bzw. der Spannvorrichtung aufliegt und den Prozessraum abdichtet. Für die Bearbeitung kleiner Bauteile kann auf die Bewegung der Glocke verzichtet werden, indem ein großes Schutzglas mit 100 mm Durchmesser als Fenster eingesetzt wird (Abb. 1). In einem solchen Fall wird die Prozessgasglocke einfach aufgelegt. Die Laseroptik führt die notwendigen Bewegungen so aus, dass der Laserstrahl immer durch das große Eintrittsfenster zum Prozess gelangen kann. In einer Vielzahl von Härte-, Schweiß- und Umschmelzprozessen wurde die Funktionalität der einfachen Prozessgasglocke erfolgreich genutzt.

Für die Bearbeitung größerer zu bewegender Bauteile wurde eine Prozessgaskammer (Abb. 4) entwickelt, in die ein schwenkbares Joch zur Aufnahme von Spannvorrichtungen integriert ist. Die Spannvorrichtungen können so ausgeführt werden, dass die zu bearbeitende Kontur nahe der Drehachse



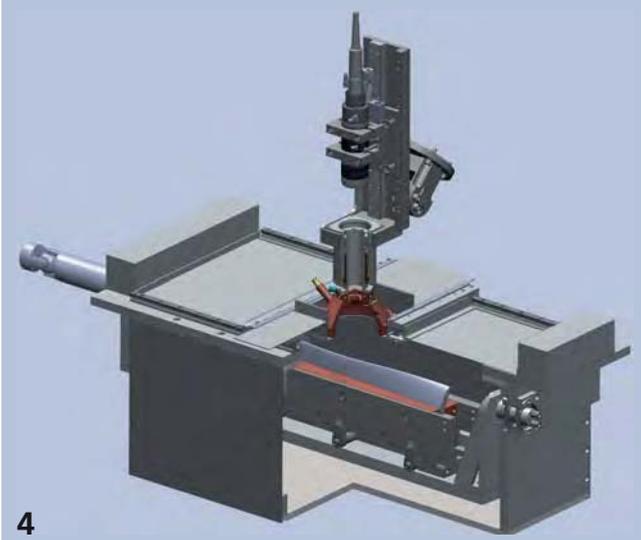
liegt. Damit reduzieren sich die radial orientierten Linearbewegungen auf ein Minimum. Der Einbau bzw. die Entnahme schwerer Spannvorrichtungen in die Vorrichtungen erfolgt durch die Seitenwand mit Hilfe eines an einen Kran zu hängenden Hilfsrahmens. Die Abdichtung der kastenförmigen Kammer erfolgt in der langen Achse über zwei Metallrollen und in der kurzen Achse über verschiebbare Bleche. Die Kreuzung enthält eine Aufnahme, die durch eine an einem Roboter montierte Schutzgasglocke verschlossen wird.

Die Glocke ist über ein stabiles Längslager mit der Maschinenachse oder Roboterhand verbunden (Abb. 2), an der auch die Laseroptik montiert ist. So ist sie in zwei Richtungen zur Optik fixiert und gleichzeitig in der Lage, die Metallrollen während der Bearbeitung mitzuführen. Die Abdichtung der Prozesskammer während der Laserbearbeitung erfolgt wieder durch die Eigenmasse der Glocke (Abb. 3). Das Prozessgas wird bei der großen Kammer nicht ausschließlich durch die Glocke eingelassen. Um die Spülzeit zu reduzieren, werden zusätzliche Gaseinlässe in der Kammerwand genutzt.

Erfolgreiche Versuche zum Lasergaslegieren von Titanwerkstoffen mit Stickstoff zur Erzeugung verschleißfester Randschichten bestätigten die Wirksamkeit der Schutzgasvorrichtung und des angewendeten Prinzips. So konnte zum Beispiel nachgewiesen werden, dass der Sauerstoffgehalt von Titanlegierungen im Bereich der Umschmelzzone auf Grund des geringen Sauerstoffpartialdrucks während des Laserprozesses sogar noch reduziert wurde.

- 1 Einfache Prozessgasglocke mit großem Schutzglas beim Schweißen unter Schutzgas
- 2 Prozessgasglocke mit stabilem Längslager zur Montage an Roboterarm
- 3 Prozessgaskammer, abgedichtet durch Prozessgasglocke

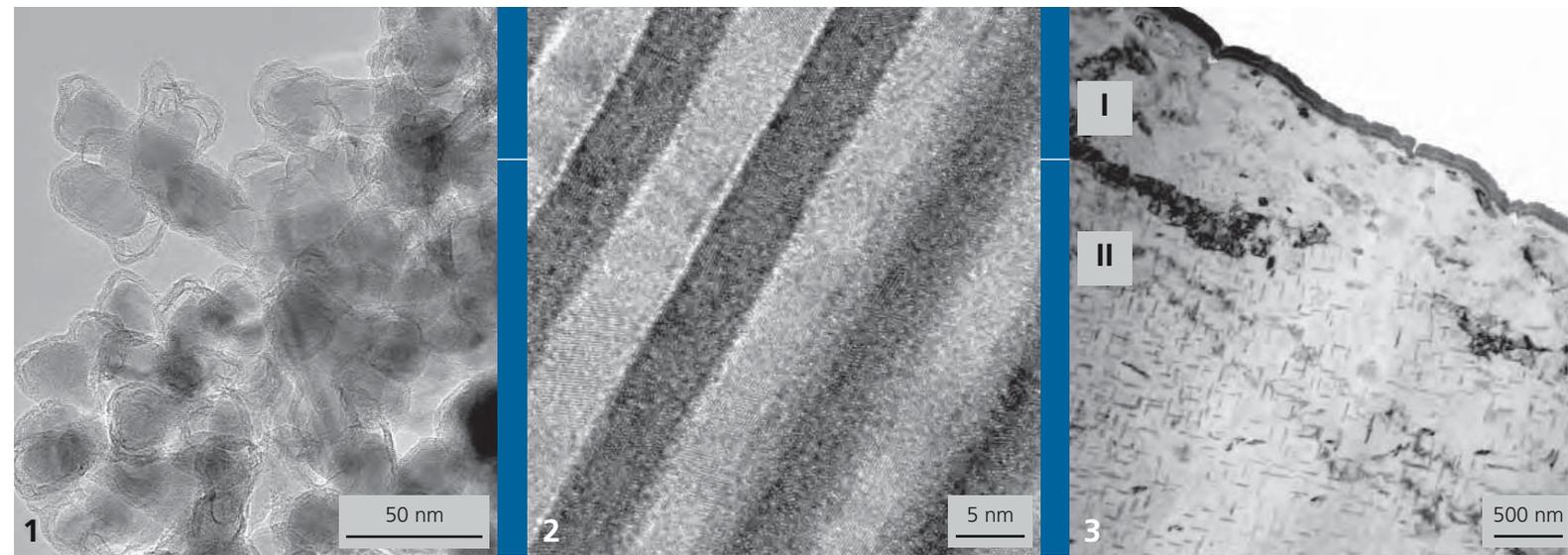
Prinzipskizze der Prozessgaskammer mit integrierter dreh- bzw. schwenkbarer Spannvorrichtung und aufgesetzter Prozessgasglocke



KONTAKT

Dr. Steffen Bonß
 Telefon: +49 351 83391-3201
 steffen.bonss@iws.fraunhofer.de





ANALYTISCHE TRANSMISSIONSELEKTRONEN- MIKROSKOPIE ZUR PRODUKTBEGLEITENDEN WERKSTOFFENTWICKLUNG

DIE AUFGABE

Werkstoffe und Werkstoffaspekte bilden die Grundlage für einen großen Teil der angestrebten technologischen Innovationen. Da das von den Werkstoffen gewünschte Eigenschaftsspektrum in hohem Maße durch ihren strukturellen Aufbau bestimmt wird, sind zur Werkstoffverbesserung umfassende und hochauflösende Charakterisierungsverfahren zur Strukturanalyse unerlässlich. Dabei spielt die analytische Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) eine zentrale Rolle, da sie das einzige Verfahren ist, das eine vollständige Charakterisierung der Struktur bis in den atomaren Bereich erlaubt. Eine umfassende Werkstoffcharakterisierung wird auch dadurch ermöglicht, dass die analytische Transmissionselektronenmikroskopie die drei fundamentalen Methoden der Abbildung, Beugung und Spektroskopie in einem Gerät vereint.

Die analytische Transmissionselektronenmikroskopie hat entscheidend dazu beigetragen, die Gefüge von Materialien hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften maßzuschneidern. Seine Vorteile prädestinieren das Verfahren nicht nur für die grundlagenorientierte Werkstoffforschung, sondern auch für

- den Einsatz bei der produktbezogenen Werkstoffverbesserung (z. B. Randschichttechnologien),
- die Weiterentwicklung von werkstoffabhängigen Fertigungsprozessen (z. B. Fügen),
- die Schadensfallanalyse und
- die Beurteilung der Qualität von Fertigungsverfahren.

Ziel der Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWS ist es daher, diese Methode für die produktbezogene Werkstoffentwicklung einzusetzen und als Dienstleistung anzubieten.

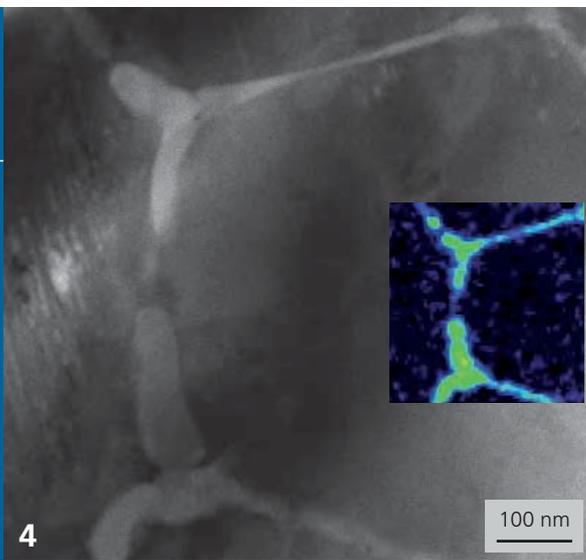
LÖSUNG

Im Fraunhofer IWS wird die analytische Transmissionselektronenmikroskopie in Kombination mit einer leistungsfähigen Metallographie, Rasterelektronenmikroskopie und Werkstoffprüfung betrieben. Wesentliche Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz des Verfahrens sind ein breit angelegtes werkstoffkundliches Wissen, langjährige methodische Erfahrung sowie eine moderne und leistungsfähige Labor- und Geräteausstattung. Wichtige Merkmale des seit diesem Jahr am Fraunhofer IWS verfügbaren TEM JEM-2100 sind u. a. ein hochauflösender analytischer Polschuh, eine Scanning-Einheit, ein EDX-System zur Elementanalyse, zwei sich ergänzende Kamerasysteme sowie ein sehr präziser piezogesteuerter Probenstisch. Für verschiedenste Materialien und Bauteile stehen Prozeduren für die zielgenaue Herstellung elektronentransparenter Präparate zur Verfügung.

Die folgenden Beispiele geben einen Überblick über die Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWS zur produktbegleitenden Werkstoffentwicklung.

ERGEBNISSE

Aktuelle Forschungsarbeiten widmen sich der Synthese von Silizium-Kohlenstoff-Nanopartikeln in sogenannter »core&shell« Anordnung, die für den Einsatz als Elektrodenmaterial in Lithium-Ionen-Batterien vorgesehen sind (Abb. 1). TEM-Untersuchungen ermöglichen die Aufklärung von Struktur, Größe und Verteilung der sich bildenden Nanopartikel in Abhängigkeit von den Herstellungsbedingungen. Daraus sind optimierte Syntheseparameter ableitbar.



Das Fraunhofer IWS beschäftigt sich zudem mit der Entwicklung von Reaktivmultischichten (RMS), die zum wärmearmen Fügen unterschiedlichster Materialkombinationen eingesetzt werden (vgl. S. 86 / 87). Ein wesentlicher Aspekt ist die Vermeidung der Interdiffusion zwischen den einzelnen Multischichtstapeln bereits während der Herstellung. Durch die TEM-Analyse konnte nachgewiesen werden, dass die unerwünschte Interdiffusion durch die Einbindung geeigneter Barrierschichten effektiv unterdrückt werden kann (Abb. 2).

Neue Werkstoffe und Werkstoffkombinationen erfordern geeignete und vor allem effizient anwendbare Verfahren zum Fügen von Mischverbindungen. Im IWS werden mit dem Laserinduktionswalzplattieren und dem elektromagnetischen Pulsfügen sehr vielversprechende Technologien für die Realisierung von Mischbauweisen entwickelt. Mit Hilfe der analytischen Transmissionselektronenmikroskopie werden die auf Grund ihrer Eigenschaften unerwünschten Phasensäume analysiert, die sich an der Grenzfläche bilden. Die TEM-Ergebnisse liefern Hinweise für die Reduzierung der intermetallischen Phasenbildung und schaffen damit die Grundlage für eine Verbesserung von Qualität und Belastbarkeit der gefügten Mischverbindungen (vgl. S. 40 / 41, 42 / 43).

Moderne Hochleistungsmotoren für PKW unterliegen im Betrieb einer starken Verschleißbeanspruchung. Die Optimierung der Kolben- und Zylinderwerkstoffe erfordert ein umfassendes Verständnis der im Betrieb wirksam werdenden Verschleißmechanismen. Es hat sich gezeigt, dass konventionelle metallographische und rasterelektronenmikroskopische Charakterisierungsverfahren bei der Analyse der in der Randzone von Zylinderlaufbahnen im Betrieb auftretenden strukturellen Veränderungen an ihre Grenzen stoßen. Deshalb wurden zur Klärung der Problemstellung ergänzende TEM-Untersuchungen durchgeführt. Dabei konnte u. a. nachgewiesen werden, dass sich die Güte der Endbearbeitung signifikant auf den sich im Betrieb einstellenden Verschleiß auswirkt (Abb. 3).

Bei Stählen für den Werkzeugbau spricht man wegen ihrer hohen Kohlenstoffgehalte im Allgemeinen von einer schlechten Schweißbarkeit. Dieses trifft auch zu, wenn moderne Schweißverfahren, wie z. B. das Laserstrahlschweißen, eingesetzt werden. Umfangreiche TEM-Untersuchungen ermöglichen die Aufklärung der Strukturausbildung im Schweißgut und liefern damit einen Beitrag zur Verbesserung der Schweißbarkeit von Schnellarbeitsstählen (Abb. 4).

- 1 *SiC-Nanopartikel, umhüllt mit amorphem und graphitischem Kohlenstoff (TEM)*
- 2 *Zr/Al-RMS mit (o. li.) und ohne (u. re.) Diffusionsbarriere (TEM)*
- 3 *Nachweis der bearbeitungsbedingten Verformungsschicht auf einer Zylinderlaufbahn aus ALUSIL: I rekristallisiert, II Al/Cu-Partikel deformiert*
- 4 *Erstarrungsgefüge im Schweißgut eines Schnellarbeitsstahls (TEM, EDX): Molybdänseigerungen an den Zellgrenzen*

KONTAKT

Dr. Jörg Kaspar
 Telefon: +49 351 83391-3216
joerg.kaspar@iws.fraunhofer.de





KAMERABASIERTES PROZESSREGELSYSTEM »E-MAQS« NUN AUCH FÜR DAS LASER- AUFTRAGSCHWEISSEN NUTZBAR

AUFGABENSTELLUNG

Laserauftragschweißprozesse werden vielfältig z. B. zur Reparatur von Großwerkzeugen und zum Schutz teurer Verschleißteile eingesetzt. Entscheidend für das Erreichen der im Vergleich zu anderen Auftragschweißverfahren besseren Eigenschaften ist das minimale aber sehr konstante Aufschmelzen des Substratwerkstoffes. Dieser Forderung stehen aber die meist lokal unterschiedlichen Wärmeableitungsbedingungen und das generelle Aufheizen kleinerer Bauteile während der Prozessführung entgegen. Wenn die Bedingungen des Materialauftrags konstant gehalten werden sollen, müssen die Prozessparameter daher lokal angepasst werden, damit optimale Schichteigenschaften realisiert werden können. Ziel war daher die Entwicklung eines geeigneten Prozessregelsystems.

LÖSUNGSWEG

Zur Anwendung kommt ein kamerabasiertes Temperaturerfassungssystem, das ursprünglich zum geregelten Laserstrahlhärten entwickelt wurde. Basis ist eine CCD-Kamera, die eine ausreichende Empfindlichkeit im nahen Infrarotbereich besitzt. Schmalbandfilter ermöglichen die eindeutige Zuordnung eines Grauwertes zu einer Temperatur der betrachteten Oberfläche. Damit ist eine untere Temperaturschwelle von 600 °C zu erreichen.

Für den Einsatz des Systems im industriellen Umfeld wird es in einem robusten und staubsicheren Gehäuse installiert (Abb. 1). Im Gehäuse befindet sich eine pneumatische Linear-einheit, die die Filter vor der Optik bewegt, wenn entsprechende Befehle von einer CNC oder an der Bedienoberfläche der Regelsoftware ausgelöst werden. Die Kamera kann dadurch neben der Messung des Temperaturfeldes auch im sichtbaren Wellenlängenbereich verwendet werden und zum Justieren der Prozesse Anwendung finden. Sie kann über einen Auskoppelwürfel an eine Laseroptik angeflanscht werden und so koaxial zum Laserstrahl den Prozess beobachten oder von der Seite, separat gehalten, die Wärmestrahlung des Prozesses erfassen.

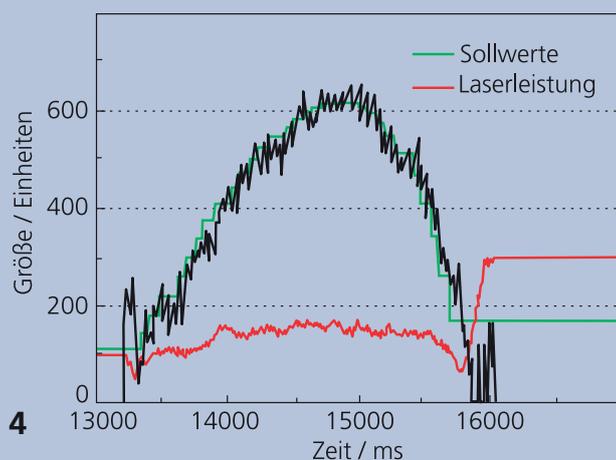
Die Kalibrierung des Systems erfolgt mit einem schwarzen Strahler. In der Software hinterlegte nichtlineare Kennlinien ermöglichen einen sehr großen Gesamtmessbereich ab 600 °C bis zu Schmelztemperaturen von Metallen. Versuche haben ergeben, dass beim Laserauftragschweißen nicht die Temperatur des Schmelzbades konstant gehalten werden muss. Wesentlicher für ein reproduzierbares Prozessergebnis ist die Konstanz der Schmelzbadgröße. Diese Sollgröße ist abhängig von einer ganzen Reihe von Prozessparametern wie z. B. Pulvermassenstrom, Laserfleckgröße, Pulverwerkstoff usw. und muss anwendungsspezifisch ermittelt werden. Im geregelten Betrieb wird dann ein lokal unterschiedlicher Wärmebedarf zum Erreichen der gleichen Schmelzbadgröße durch Regelung der Laserleistung ausgeglichen.



ANWENDUNGEN

Zum Laserauftragschweißen gibt es bereits mehrere industrielle Anwendungen. Das System ist auch zur Reparatur von Triebwerkskomponenten geeignet. Die besondere Schwierigkeit hierbei sind einerseits die zum Teil sehr filigranen Auftragschweißungen und zum anderen solche, bei denen sich der Sollwert wegen der Bauteilform während des Auftragschweißprozesses ändern muss (Abb. 4). Durch Anpassung der Kameraoptik lässt sich ein kleineres Bildfeld erzeugen, in dem dann selbst filigrane Prozesse als große Objekte im Kamerabild erscheinen. Eine NC-satzweise Änderung des Flächengrößen-Sollwertes wurde in die Regelsoftware integriert. Die Übergabe erfolgt über Profi-Bus von der Maschinensteuerung. Die Sollwerte selbst werden in Abhängigkeit von der Größe einer gemessenen Bauteilkontur in einem offline-Programmiersystem errechnet und in den NC-Code integriert.

Prozessregelverhalten des Systems »LompocPro« während eines zyklischen Laserauftragschweißprozesses mit variablem Sollwert, grün: Sollwert, schwarz: Istwert, rot: Regelwert Laserleistung



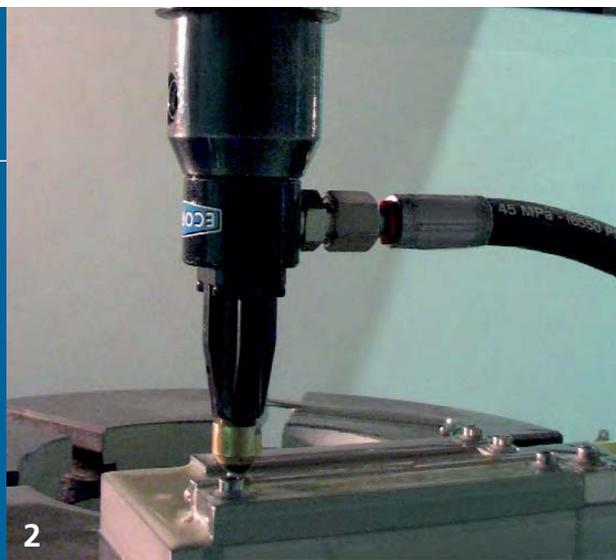
Eine weitere Anwendung ist im Bereich Großwerkzeugbau für Karosseriewerkzeuge realisiert. Seit Mitte 2010 setzt die Audi AG am Standort Ingolstadt ein solches System zur Bearbeitung von Umformwerkzeugen ein (Abb. 2, 3).

- 1 System »E-MAqS« mit robustem Aluminium-Gehäuse
- 2 Bedienstand einer Laserauftragschweißanlage mit integrierter Prozessregelung »LompocPro«
- 3 »E-MAqS« integriert in ein Laserauftragschweißmodul im Werkzeugbau der Audi AG Ingolstadt während der Inbetriebnahme

KONTAKT

Dr. Steffen Bonß
 Telefon: +49 351 83391-3201
 steffen.bonss@iws.fraunhofer.de





FESTWALZEN VON 3D-FREIFORMFLÄCHEN

DIE AUFGABE

Die Steigerung der Lebensdauer und Sicherheit zyklisch beanspruchter Bauteile rückt vermehrt in den Fokus aller Bereiche des Maschinen- und Anlagenbaus. Zyklische Bauteilbeanspruchungen führen insbesondere bei Biegebelastung der Außenwandungen von Bauteilen zur Bildung kritischer Risse. Als Gegenmaßnahmen sind u. a. folgende Strategien zur Erhöhung der Bauteillebensdauer und Sicherheit bekannt:

- Einbringen von lokalen Druckeigenstressungen: kritische zugbelastete Konturen können höher belastet werden, da die für ein Risswachstum nötigen Zugspannungen erst die Druckspannungen übertreffen müssen,
- Reduzierung der Oberflächenrauheit: dies verringert die Kerbwirkung und erschwert die Rissbildung,
- Erhöhung der Versetzungsdichte im Material: dies steigert die Sicherheit gegen Rissbildung.

Die mechanische Randschichtverfestigung stellt eine Lösung dieser Problematik dar. Insbesondere Ermüdungsfestigkeit und Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit können damit teilweise drastisch erhöht werden. Das Festwalzen bietet in diesem Zusammenhang eine effektive Lösung. Folgende Vorteile sind, etwa gegenüber konkurrierenden Verfahren wie dem Kugelstrahlen, bekannt:

- herausragende Oberflächengüte,
- relativ große Tiefenwirkung,
- präzise ortsselektive Behandlung möglich,
- moderate Anschaffungskosten.

Jedoch ist die mangelnde Integrationsfähigkeit in moderne Werkzeugmaschinen oft ein Hindernis.

Neben der Bearbeitung rotationssymmetrischer Bauteile an Drehmaschinen nach Stand der Technik birgt diese Technologie hinsichtlich des Einsatzes an 3D-Bearbeitungsmaschinen zur Behandlung von Freiformflächen bisher kaum genutztes Potenzial.

UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer IWS wurden, in Zusammenarbeit mit der Verbundinitiative Maschinenbau Sachsen sowie der Metrom GmbH und mit Förderung des Sächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, Untersuchungen zur Integration von Festwalzwerkzeugen (Abb. 2) sowie zum kraftregelnden Festwalzen von Bauteilen an einer 3D-Fräsmaschine durchgeführt. Vorteile dieses Ansatzes sind:

- Kraftregelung erlaubt Steuerung der Wirtiefe,
- volle 3D-Fähigkeit: Walzbahn per CNC frei programmierbar, eine lokale Anpassung der Kraft ist einfach technisch möglich,
- spanende Bearbeitung und Oberflächenbehandlung in einer Aufspannung.

Anlagentechnik

Die Versuche wurden auf einem 3D-fähigen Fräsbearbeitungszentrum durchgeführt, welches auf dem Konzept der Parallelkinematik basiert - ein sogenannter Pentapod (Abb. 2). In Zusammenarbeit mit dem Hersteller wurde die Anlage der Firma Metrom dabei so modifiziert, dass eine schnelle interne Kraftmessung und -regelung der Andruckkraft der Arbeitsspindel möglich ist. Dies ist ein wichtiger Vorteil in Hinblick auf das Festwalzen, da auch bei komplexen Geometrien und unterschiedlichen Bauteiltoleranzen bzw. -verformungen eine gleichbleibende Andruckkraft und somit Oberflächengüte gewährleistet werden kann.

ERGEBNISSE

Das integrierte Festwalzen ist mit dem vorgeschlagenen Anlagen- und Regelkonzept realisierbar, es konnten reproduzierbar gleichmäßig hohe Oberflächengüten an den gewalzten Proben erreicht werden (Abb. 3). Die Reduktion der Oberflächenrauheit betrug dabei bis zu 78 %. Werkstoffabhängig ist auch eine Erhöhung der oberflächennahen Härte möglich, an den geprüften Materialien betrug sie bis zu 10 %.

Die Tiefenwirkung des Verfahrens ist auch in einer Veränderung der Härte sichtbar. Es wurde ein Anstieg der Härte bis zu einer Tiefe von 1,5 mm unter der Oberfläche gemessen. Ermüdungsversuche zeigten, dass scharfe Konturübergänge (Kanten, Schrägen) vermieden werden sollten, da diese eine Rissinitiierung bei zyklischer Beanspruchung begünstigen können.

Anwendungsgebiete

Anwendungsbeispiele für Bauteile mit anspruchsvoller Geometrie finden sich in vielen Bereichen, z. B.:

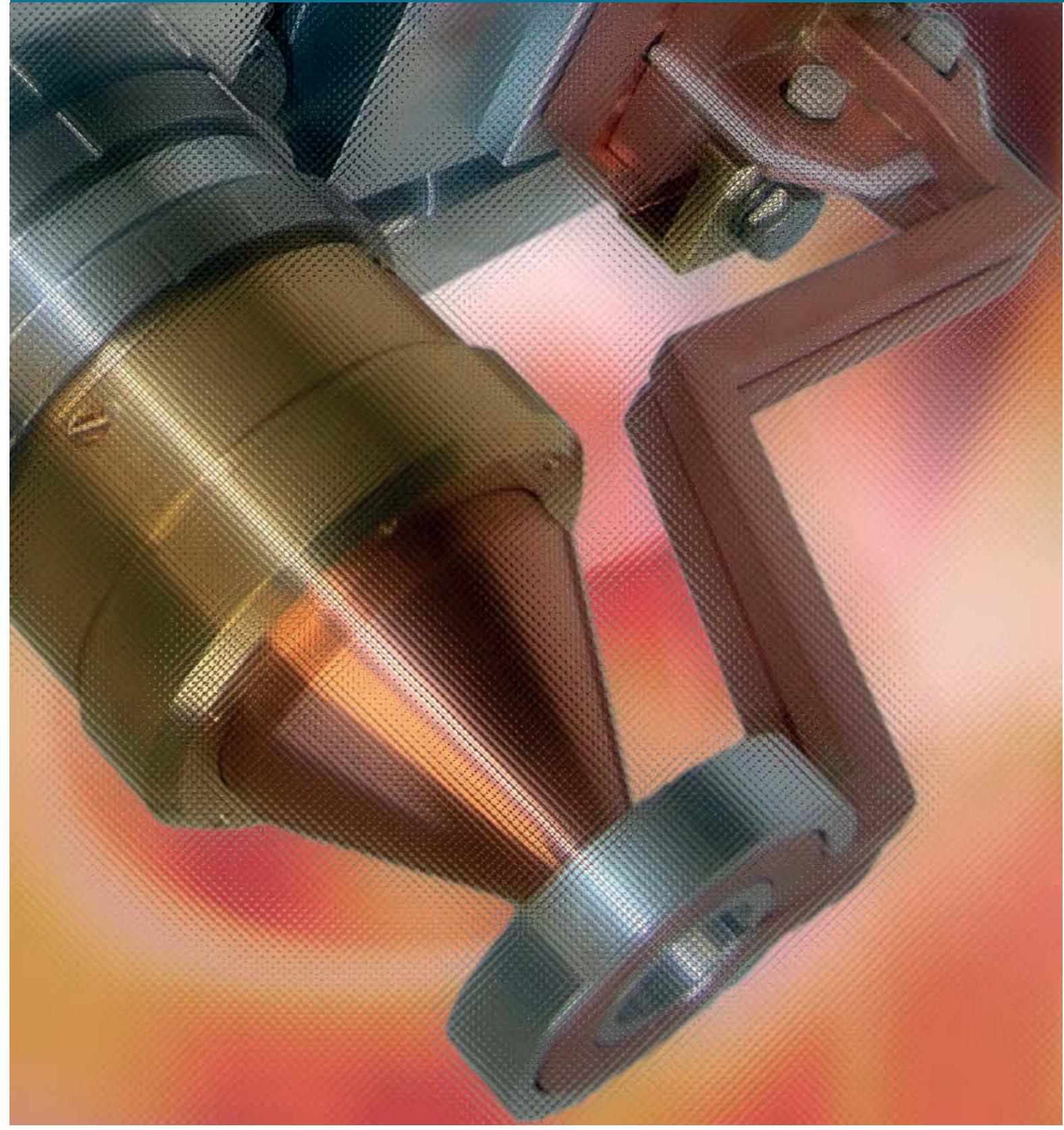
- Energieerzeugung:
 - Wellen, Schaufelfußhalterungen und Schaufelfüße moderner Gas- und Dampfturbinen
 - Verdichter, Pumpenräder
- Fahrzeugbau:
 - PKW-Fahrwerkskomponenten, z. B. Quer- und Längslenker aus Blechumformteilen bzw. Aluminium-Gusswerkstoffen
- Maschinen- und Anlagenbau:
 - Lasteinleitungspunkte und Lagerstellen an Getriebe- und Motorenhäusen
- Luft- und Raumfahrt:
 - Festwalzen laserstrahlgeschweißter Strukturelemente zur Kompensation des Schweißnaht-Undermatchings

- 1 *3D-Bewegungsmaschine (Pentapod) mit integrierter Kraftregelung*
- 2 *Hydraulisches Walzwerkzeug im Versuchsaufbau*
- 3 *Lokal gewalzte Probe mit geglätteter Oberfläche*

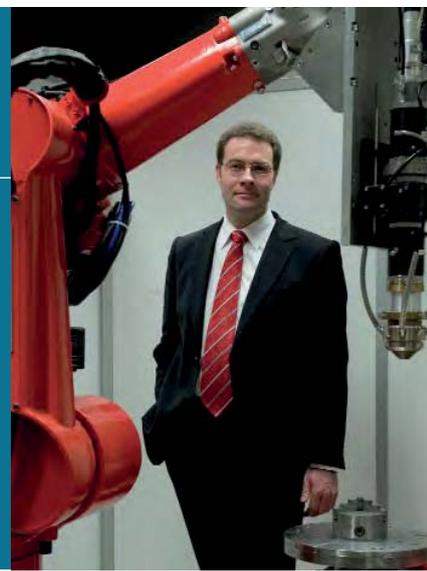
KONTAKT

Dr. Gunther Göbel
 Telefon: +49 351 83391-3211
gunther.goebel@iws.fraunhofer.de





*Visionen ohne Aktionen bleiben Tagträume,
Aktionen ohne Visionen sind ein Alptraum.*
Japanisches Sprichwort



GESCHÄFTSFELD THERMISCHES BESCHICHTEN

Redaktion: Seit nunmehr einem Jahr zeichnen Sie am IWS für das Geschäftsfeld Thermisches Beschichten verantwortlich. Wie fällt Ihre Bilanz für das vergangene Jahr aus?

Prof. Leyens: Trotz der wirtschaftlich allgemein angespannten Situation können wir auf ein erfolgreiches Geschäftsjahr zurückblicken. Mit vielen unserer Kunden pflegen wir seit Jahren eine vertrauensvolle und aktive Zusammenarbeit, so dass unsere Expertise auch in wirtschaftlich schwierigen Zeiten nachgefragt wird. In einigen Fällen schafften sogar gerade diese »ruhigeren« Zeiten den notwendigen Freiraum für Weiterentwicklungen. Aber nicht nur langjährige Kunden haben uns die Treue gehalten auch neue Geschäftsbeziehungen konnten geknüpft werden.

Redaktion: Wo liegen die Entwicklungsschwerpunkte des Geschäftsfeldes?

Prof. Leyens: Große Fortschritte konnten wir beim Suspensionsspritzen machen. Es zeichnet sich immer deutlicher ab, dass sich mit dieser Technologie die Lücke zwischen den klassischen Dünnschichtverfahren und dem konventionellen Thermischen Spritzen mit Pulvern schließen lässt. Beim Suspensionsspritzen können feine Pulverpartikel verwendet werden, weil diese in einer Flüssigkeit suspensiert vorliegen, so dass wir auch dünne Schichten herstellen können. Diese sind nicht nur dicht und sehr homogen sondern auch überraschend glatt. Gepaart mit entsprechenden Schichtwerkstoffen erschließen sich mittels Suspensionsspritzen als Hochrateverfahren neue Applikationen.

Beim Laser-Auftragschweißen haben wir unsere Schwerpunkte auf die Präzision der erzeugbaren Geometrien sowie die Produktivität der Prozesse gesetzt. Mit der neuesten Pulverdüsensentwicklung aus unserer COAX-Familie, der COAX-powerline, setzen wir auf die Energiequellenkombination von

Laserstrahl und induktiver Bauteilerwärmung, wodurch eine erheblich verbesserte Wirtschaftlichkeit des Pulverauftrags erzielt werden kann. Höchste Präzision ist hingegen gefragt, wenn filigrane Strukturen mit Breiten von deutlich weniger als 100 µm generiert werden sollen. Hierfür entwickeln wir neue Pulverdüsen mit noch kleineren Pulverfoki, die außerdem einen verbesserten Pulverausnutzungsgrad erreichen.

Redaktion: Die Entwicklung von Systemtechnik ist also weiterhin ein wichtiges Thema?

Prof. Leyens: Definitiv. Unsere Kunden profitieren nicht nur von unserem Werkstoff- und Prozess-Know-how. Wir bieten ihnen außerdem applikationsspezifische Systemtechnik und die dazugehörige Systemintegration an. Und schließlich begleiten wir die Überführung in die industrielle Anwendung so lange, bis die bei uns im Technikum entwickelten Prozesse beim Kunden in der Serienanwendung laufen. Alles aus einer Hand sozusagen.

Redaktion: Sie erwähnten das Werkstoff-Know-how. Können Sie das näher erläutern?

Prof. Leyens: Verschiedene Werkstoffe erfordern für ein optimales Ergebnis aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften eine Anpassung der Prozessparameter. Andererseits beeinflusst der Prozess die Eigenschaften des Werkstoffs. Hieraus wird eine enge Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Prozess und den resultierenden Bauteileigenschaften ersichtlich. Nur wenn wir diese Kopplung verstehen, sind wir z. B. in der Lage schwer schweißbare Werkstoffe wie Nickelbasislegierungen oder Titanaluminide mit dem Laser als Schicht oder Struktur oder thermisch gespritzte Schichten in den geforderten Qualitäten herzustellen.



KOMPETENZEN

THERMISCHES SPRITZEN

Zum thermischen Beschichten von Bauteilen aus Stahl, Leichtmetallen oder anderen Werkstoffen mit Metallen, Hartmetallen und Keramik stehen im IWS das atmosphärische (APS) und das Flamm- und Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF und HVAF) mit Pulvern und Suspensionen zur Verfügung.

In Kooperation mit weiteren Fraunhofer-Instituten in Dresden umfaßt das Angebotsspektrum:

- Konzeption beanspruchungsgerechter Schichtsysteme,
- Entwicklung von vollständigen Beschichtungslösungen vom Werkstoff bis zum beschichteten Bauteil,
- Entwicklung und Fertigung von systemtechnischen Komponenten,
- Mitwirkung bei der Systemintegration,
- Unterstützung des Anwenders bei der Technologieeinführung.

AUFTRAGSCHWEISSEN

Zur Reparatur und Beschichtung von Bauteilen, Formen und Werkzeugen stehen das Laserstrahl- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen sowie Hybridtechnologien in der Kombination von Laser, Plasma und Induktion zur Verfügung. Durch Auftragen, Legieren oder Dispergieren von Metalllegierungen, Hartstoffen und Keramik können dichte Schichten und 3D-Strukturen erzeugt werden. Für alle Technologien ist die geschlossene Prozesskette von der Digitalisierung und Datenaufbereitung bis zur Endbearbeitung nutzbar.

Für diese Anwendungsfelder bieten wir an:

- Simulation von Auftragschweißprozessen,
- Beschichten und formgebendes Laser-Auftragschweißen mit höchster Präzision und Produktivität,
- Bearbeitungsköpfe und CAM-Software für die industrielle Nutzung der Lasertechnologie,
- Vor-Ort-Betreuung der Produktionseinführung in der Praxis.

ABTEILUNGSLEITER

PROF. CHRISTOPH LEYENS

Telefon +49 351 83391-3242

christoph.leyens@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2010

1. Effizienzsteigerung beim Laser-Auftragschweißen durch Energiequellenkombination 62
2. Keramische Schichtheizelemente – thermisch gespritzt 64
3. Möglichkeiten der online-Schichtdickenmessung beim thermischen Spritzen 66

GRUPPENLEITER

THERMISCHES SPRITZEN

DR. LUTZ-MICHAEL BERGER

Telefon +49 351 83391-3330

lutz-michael.berger@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

AUFTRAGSCHWEISSEN

DR. STEFFEN NOWOTNY

Telefon +49 351 83391-3241

steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de



EFFIZIENZSTEIGERUNG BEIM LASER-AUFTRAGSCHWEISSEN DURCH ENERGIEQUELLENKOMBINATION

DIE AUFGABE

Exzellente Präzision, höchste mechanische Festigkeit und maßgeschneiderte Eigenschaften von Oberflächenschichten und generativ erzeugten 3D-Strukturen: diese Merkmale haben dem Auftragschweißen mit Laserstrahlen zum Durchbruch in der industriellen Serienfertigung verholfen. Die niedrigen Auftragsraten und die geringe Energieeffizienz setzen der Technologie jedoch Grenzen - insbesondere wenn es um größere und simpel geformte Teile geht. Beispiele sind lange Hydraulikzylinder im offshore-Bereich, Werkzeuge der Ölförderung und des Bergbaus sowie große Förderschnecken, die hochverschleißfeste Oberflächen erfordern. Überall dort gibt es aus Sicht der Schichteigenschaften keine vernünftige Alternative zum Laser, die langen Fertigungszeiten und die vergleichsweise hohen Beschichtungskosten limitieren aber bisher dessen Anwendung.

Beim Laser-Auftragschweißen treten, wie bei allen anderen Auftragschweißverfahren auch, Energieverluste auf. Sie sind mit dem Schweißprozess notwendigerweise verbunden und beeinflussen gleichermaßen dessen Effizienz. Vor allem die Wärmeleitung in den Grundwerkstoff spielt eine Schlüsselrolle, weil sie einerseits die Erstarrung des laserinduzierten Schmelzbades zur Schweißbraupe ermöglicht, andererseits den Hauptverlustanteil der teuer erzeugten und hochpräzise zugeführten Laserenergie ausmacht. So fließen bis zu 90 % der absorbierten Laserenergie in das Bauteil ab. Die schnelle Ableitung der Wärme in kaltes Grundmaterial führt zudem beim Strahlwerkzeug Laser zu besonders hohen Abkühlraten und räumlichen Temperaturgradienten, was für rissempfindliche Schichtwerkstoffe kritisch werden kann.

UNSERE LÖSUNG

Die hier vorgestellte Lösung verwirklicht eine simultane Unterstützung des Laserstrahls durch lokale induktive Erwärmung. Das Grundprinzip dieser einstufigen Hybridtechnologie besteht in der Kombination von zwei Energiequellen mit sehr unterschiedlichen Leistungsdichten. Damit können zwei unabhängig voneinander einstellbare Temperatur-Zeit-Zyklen überlagert werden. So wird ein großer Anteil der Verlustenergie durch die preiswerte induktive Wärmequelle kompensiert. Gleichzeitig können die Temperatur-Zeit-Verläufe in einem Maße verändert werden, wie es beim Laserstrahl-Auftragschweißen allein nicht möglich ist.

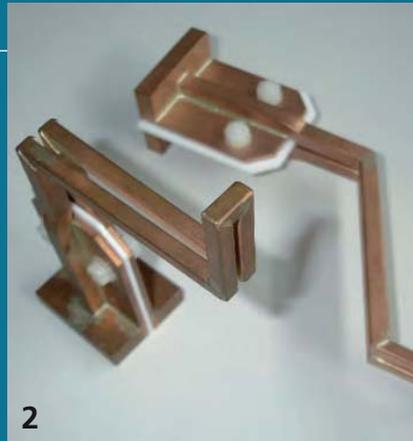
Die technische Umsetzung erfolgt in Form eines modular aufgebauten Koaxial-Laserbeschichtungskopfes neuer Generation mit einem integrierten, lokal wirkenden und richtungsunabhängigen Induktionsmodul (Abb. 1). Der neue Bearbeitungskopf ordnet sich in die IWS-COAXn-Serie ein und trägt die Bezeichnung COAXpowerline.

ERGEBNISSE

Das Prinzip der Pulverzufuhr ist koaxial, alle Medien (Pulver, Gas, Kühlwasser) werden in einer geschützten innen liegenden Medienzufuhr geführt. Die Schweißbraupenbreite kann durch eine CNC-gesteuerte z-Achsenverstellung während des laufenden Prozesses variiert werden. Die induktive Erwärmung ist als Modul in den Bearbeitungskopf integriert. Je nach Bearbeitungsaufgabe kann aus einem Sortiment unterschiedlicher Induktoren gewählt werden (Abb. 2). Vorlaufend angeordnete linienförmige Induktoren tragen zur Maximierung der



1



2



3

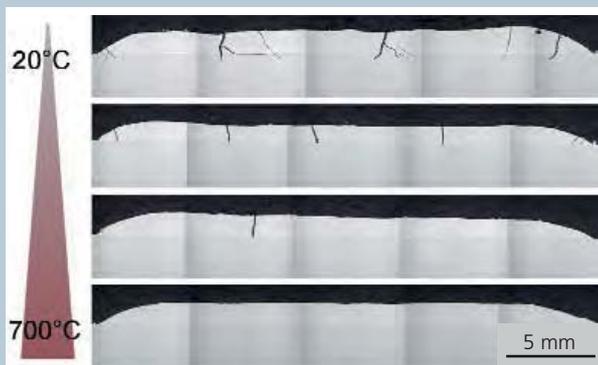
Auftragsrate bei, nachlaufend angeordnete Induktoren verringern die Temperaturgradienten und mindern die Rissneigung der Schichten. Des weiteren steht ein koaxial zur Laser- und Pulverstrahlachse angeordneter ringförmiger Induktor zur Verfügung, der eine vollständige Richtungsunabhängigkeit auch des hybriden Prozesses gewährleistet.

Erstmals eingesetzt wurde der neue Bearbeitungskopf bei der Herstellung von Korrosionsschutzschichten aus INCONEL 625 auf großen zylindrischen Bauteilen aus Stahl (Abb. 3). Durch Kombination eines 4 kW-Diodenlasers mit 12 kW Induktionsleistung wurden Auftragsraten von 8 kg / h und Schweißgeschwindigkeiten von 3 m / min erreicht. Für das Laser-Auftragschweißen ergeben sich damit bereits bei kleinen, preiswerten Lasern Abschmelzleistungen, die im Bereich des Plasma-Pulver-Auftragschweißens (PTA) liegen. Als Rekord-Auftragsrate sind mit INCONEL 625 bisher 21,5 kg / h mit 10 kW Diodenlaserleistung und 14 kW Induktion erzielt worden.

Neben der verbesserten Effizienz und Produktivität wird die Energiequellenkombination auch für die Vergrößerung des fehlerfrei verarbeitbaren Werkstoffspektrums eingesetzt. Durch die infolge der lokalen Zusatzheizung signifikant verlängerte $t_{8/5}$ -Abkühlzeit und die verringerten räumlichen Temperaturgradienten können auch harte, verschleißfeste Metalllegierungen rissfrei verarbeitet werden. Ein Beispiel sind Schutzschichten aus Stellite 20, bei denen Härtewerte von 62 HRC defektfrei erreicht worden sind (Abb. 4).

- 1 *COAXpowerline: Koaxial-Laserbearbeitungskopf mit integriertem Induktionsmodul*
- 2 *Leicht auswechselbare und weitgehend von der Bauteilgeometrie unabhängige Induktoren: mit Simulationsrechnungen optimiert*
- 3 *Prozess des flächenhaften Auftragschweißens von zylindrischen Bauteilen mit induktiver Vorwärmung*

Rissvermeidung durch lokale, prozesssimultane induktive Zusatzheizung: Querschliffe einer Flächenbeschichtung aus Stellite 20, 62 HRC



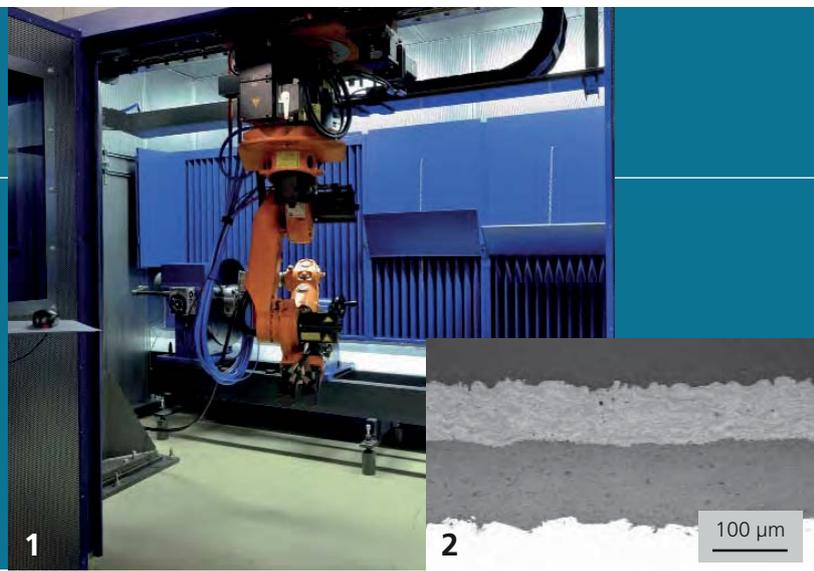
4

Für die wirtschaftliche Bewertung ist in diesem Zusammenhang maßgeblich, dass sich die Investitionskosten pro Kilowatt Gesamtleistung um etwa 50 % reduzieren und der energetische Gesamtwirkungsgrad um etwa das Doppelte steigt.

KONTAKT

Dr. Steffen Nowotny
 Telefon: +49 351 83391-3241
steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de





KERAMISCHE SCHICHTHEIZELEMENTE - THERMISCH GESPRITZT

DIE AUFGABE

Die Verfahren des thermischen Spritzens, allen voran das Atmosphärische Plasmaspritzen (APS) und das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF), haben sich als vielseitige Beschichtungstechnologien in der Industrie etabliert. Neben Einzelschichtlösungen wie z. B. Keramik-, Metall- oder Hartmetallschichten bieten Mehrschichtsysteme ein besonders hohes Potenzial für neue Anwendungen.

Durch die Kombination von elektrisch leitfähigen und isolierenden Schichten können angepasste Schichtheizelemente nahezu jeder beliebigen Geometrie direkt auf ein zu beheizendes Bauteil aufgebracht werden. Vorteilhaft sind dabei neben der sehr geringen Bauhöhe auch die Möglichkeit großflächige Bauelemente zu beheizen und der unmittelbare Kontakt zum Substrat, der die Wärme mit geringsten Übergangsverlusten in das Bauteil leitet.

Um Wärme aus elektrischer Energie zu erzeugen, werden leitfähige Schichten mit einem definierten und temperaturstabilen Widerstand angestrebt. Die Umsetzung mit metallischen Werkstoffen scheiterte in der Vergangenheit an der Beständigkeit der Schichten gegenüber thermischen und / oder oxidativen Belastungen und der dadurch bedingten geringen Lebensdauer.

Ein vollkeramisches Schichtheizelement wurde im Rahmen eines von der DKG / AiF geförderten Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS entwickelt.

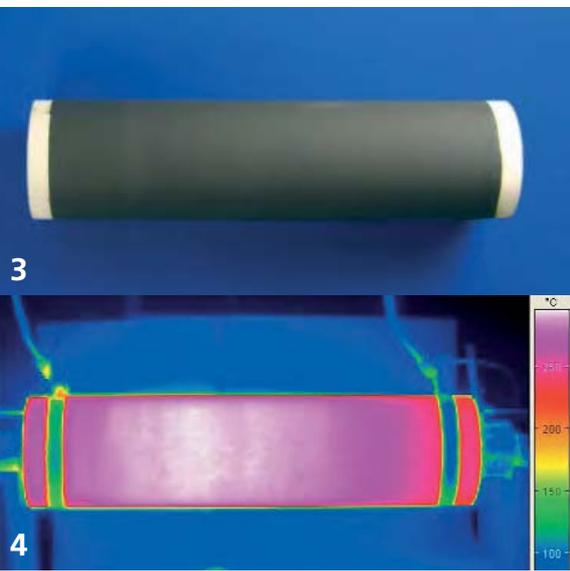
UNSERE LÖSUNG

Für elektrisch isolierende Schichten werden nach dem aktuellen Stand der Technik keramische Werkstoffe aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) verwendet. Mit konventionellen APS- und HVOF-Verfahren können isolierende Schichten aus Spinell (MgAl_2O_4) ohne die bekannten Nachteile von thermisch gespritzten Al_2O_3 -Schichten, wie z. B. Phasenumwandlungen im Spritzprozess und Abnahme der Isolationswirkung bei hohen Luftfeuchtigkeiten, hergestellt werden.

Elektrisch leitfähige, keramische Schichten sind eine bisher kaum genutzte Alternative. In Abhängigkeit von der Einsatztemperatur können dabei unterschiedliche Werkstoffe zum Einsatz kommen. Eine bedeutende Rolle spielt dabei der Werkstoff Titandioxid (TiO_2). Unter reduzierenden Bedingungen, wie sie beim thermischen Spritzen oft vorliegen, entsteht ein elektrisch leitfähiges, unterstöchiometrisches Titansuboxid (TiO_x). Durch Zusatz von Cr_2O_3 kann die Temperaturstabilität erhöht werden. Weitere Werkstoffe sind für einen Einsatz bei noch höheren Temperaturen geeignet.

Im Rahmen des Projektes wurden sowohl isolierende, als auch leitfähige, keramische Schichten hinsichtlich ihrer Mikrostruktur, Phasenzusammensetzung und elektrischen Eigenschaften untersucht. Im Ergebnis konnten optimale Schichtverbunde für verschiedene Arbeitstemperaturen ausgewählt werden.



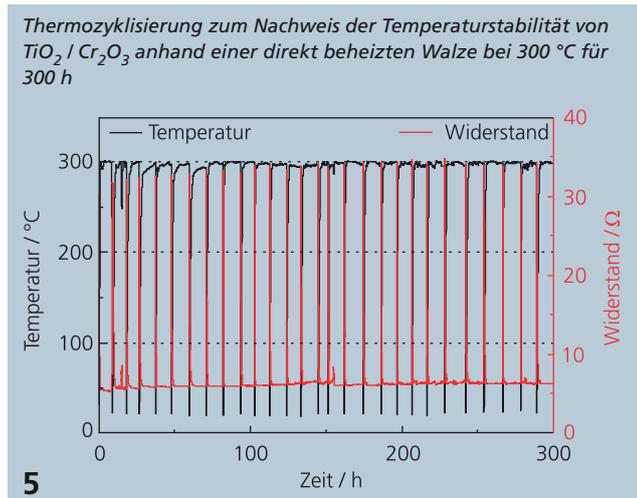


ERGEBNISSE

Isolationsschichten aus Spinell erzielen unter dem Einfluss einer hohen Luftfeuchtigkeit (>70 % RH) die besten Isolationswerte. Zudem ist die Durchschlagfestigkeit im Vergleich zu den Al_2O_3 -Schichten höher und es kommt zu keinen Phasenumwandlungen beim Spritzprozess.

Aus den Vorteilen einer frei wählbaren Kombination von Isolationsschicht, Heizleiter und Deckschicht, ergeben sich eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten zum Temperieren und Heizen von Bauteilen. Als Demonstrator wurde eine beheizbare Walze bei 300 °C über 300 h erfolgreich geprüft (Abb. 3 u. 4). In Langzeituntersuchungen wurde anhand von Thermozyklisierungen die Stabilität der Schichtheizelemente für unterschiedliche Temperaturbereiche nachgewiesen (Abb. 5). Das bisher entwickelte Schichtheizelement wird durch eine Auswahl an geeigneten Deckschichten ergänzt. Damit ist es möglich, anwendungsgerechte Lösungen anzubieten.

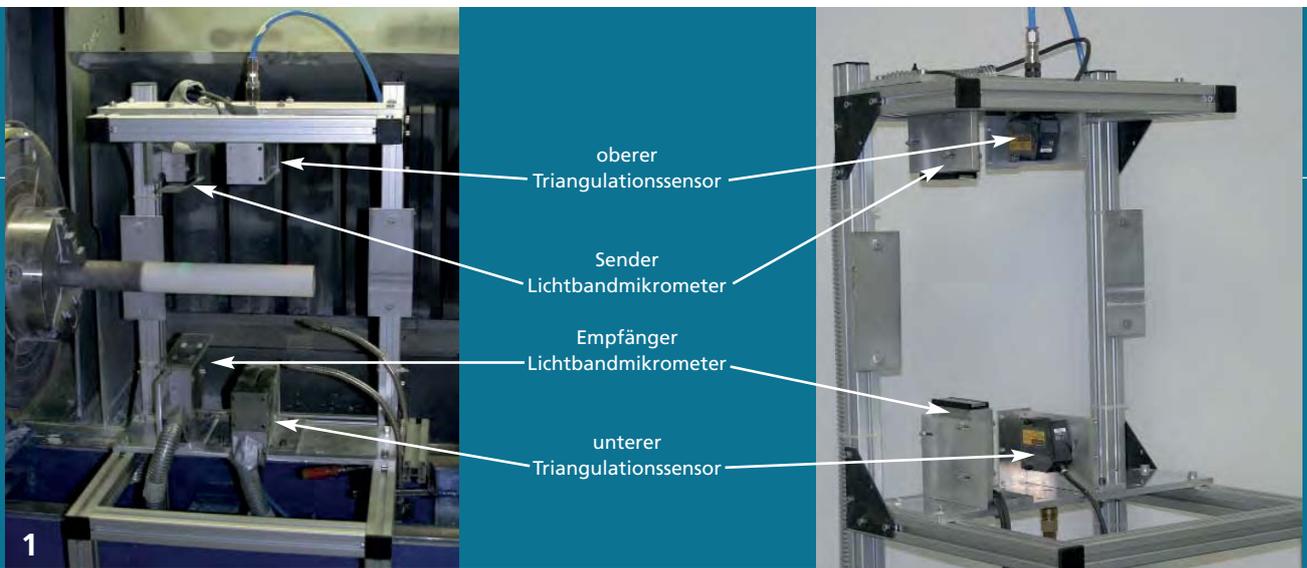
- 1 *Spritzanlage am Fraunhofer IWS*
- 2 *Schichtaufbau einer thermisch gespritzten Heizleiterstruktur aus keramischen Werkstoffen*
- 3 *Walze mit flächiger Heizlerschicht*
- 4 *Thermografieaufnahme einer direkt beheizten Walze bei 300 °C*



KONTAKT

Dr. Lutz-Michael Berger
 Telefon: +49 351 83391-3330
lutz-michael.berger@iws.fraunhofer.de





MÖGLICHKEITEN DER ONLINE-SCHICHTDICKENMESSUNG BEIM THERMISCHEN SPRITZEN

AUFGABE

Neben der Auswahl des richtigen Spritzwerkstoffes und der notwendigen Schichtdicke ist die möglichst genaue Realisierung der gewünschten Schichtdicke ein wesentlicher wirtschaftlicher Faktor beim Thermischen Spritzen. Die Vermeidung von Werkstoffauftrag über das Nennmaß hinaus kann Material- und andere Verbrauchskosten entscheidend verringern.

Heute übliche offline-Messverfahren erfordern entweder eine längere Unterbrechung des Spritzprozesses oder die Beschichtung von Mitlaufproben und deren Untersuchung. Einige dieser Messverfahren können nur für bestimmte Schicht- bzw. Substratwerkstoffe angewandt werden. Konzepte mit kontaktlosen Messverfahren zur online-Überwachung der Schichtdicke könnten dagegen einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit thermisch gespritzter Beschichtungslösungen leisten.

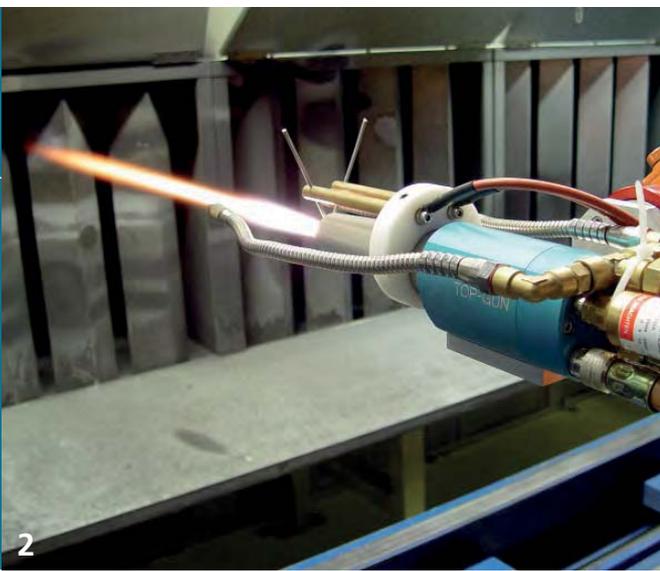
Mitarbeiter des Fraunhofer IWS haben deshalb die technischen Möglichkeiten von einfachen kontaktlosen optoelektronischen Messverfahren zur online-Schichtdickenmessung beim Thermischen Spritzen untersucht. Wichtigste Aufgabe dabei war die Bestimmung der Zuverlässigkeit der Messverfahren einschließlich der Streuungen der Messwerte und der auftretenden Störgrößen für die Verfahren atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) und Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF).

UNSERE LÖSUNG

Für die Untersuchungen zur online-Überwachung wurden am IWS zwei verschiedene optische Messverfahren eingesetzt. Mit dem Lichtbandmikrometer wird die geometrische Veränderung eines Messobjekts bestimmt. Demgegenüber erfasst ein Laser-Triangulationssensor die Schichtdicke über die Veränderung eines definierten Abstands zwischen Messobjekt und Sensor. Durch die Integration der Messsysteme in die Spritzanlage des Fraunhofer IWS ist eine Messwerterfassung simultan zum Beschichtungsprozess möglich.

Die Evaluierung der Meßmethode erfolgte an einer Vollstahlwalze, die in ca. 30 Überfahrten mit einer etwa 450 µm dicken Schicht aus Aluminiumoxid versehen wurde. Die Schichtdickenmesswerte wurden mit der online-Überwachung bei jeder Brennerüberfahrt erfasst. Die offline-Vermessung mit Messschieber und magnetinduktiver Schichtmessung erfolgte nach jeweils 10 Überfahrten. Anschließend wurden die online-Messwerte mit Messwerten von üblichen offline-Schichtdickenmessgeräten verglichen.

Im Hinblick auf die Nutzung der optischen Messverfahren im industriellen Serieneinsatz wurde zudem der Einfluss von Störgrößen untersucht, beispielsweise die thermische Ausdehnung des Werkstücks, die Oberflächenrauheit der Schicht, die Strahlung der Brennerflamme oder des Plasmas und die mechanischen Einflüsse der Spritzanlage wie z. B. Schwingungen der Drehachse.

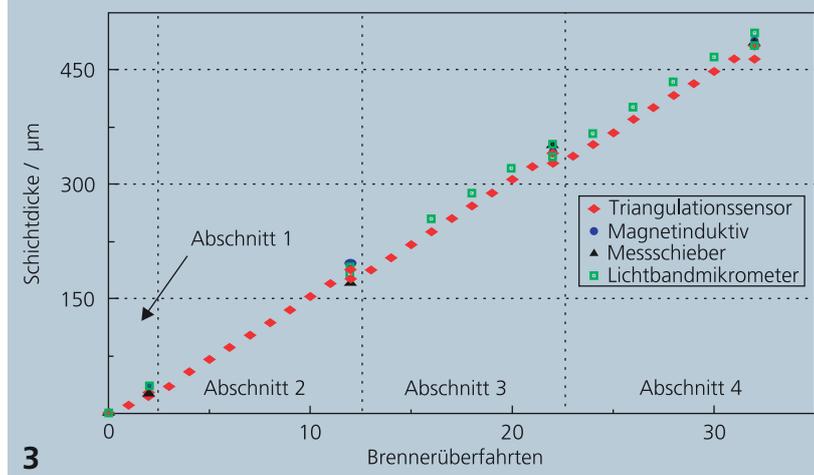


ERGEBNISSE

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass sowohl das Lichtbandmikrometer als auch der Triangulationssensor für die online-Schichtdickenmessung beim thermischen Spritzen geeignet sind. Bei beiden Messsystemen ist die Zunahme der Schichtdicke deutlich in Form von Stufen zu erkennen, die jeweils einer Überfahrt des Beschichtungsbrenners entsprechen. Die Messwertabweichungen der beiden online-Messverfahren fallen in der Gegenüberstellung mit den offline-Messverfahren sehr gering aus.

Unter den Störgrößen hat die Wärmeausdehnung der Walze bei beiden Messgeräten einen maßgeblichen Anteil an der Verfälschung der online-Schichtdickenmesswerte. Daher ist eine Kompensation dieser Störgröße in der Zukunft durch synchrone Temperaturmessung und softwaretechnische Kompensation erforderlich. Die Messwertstreuung unter Berücksichtigung einer Kompensation für die thermische Ausdehnung lag beim Lichtbandmikrometer bei ± 5 bis $\pm 10 \mu\text{m}$ und beim Triangulationssensor bei ± 10 bis $\pm 20 \mu\text{m}$.

Schichtdickenzunahme beim APS-Versuch mit vier Beschichtungsabschnitten und Vergleich der online-Messsysteme mit den offline-Messverfahren



- 1 Aufbau der Messapparatur
- 2 HVOF-Brenner im Einsatz

Im direkten Vergleich hat das Lichtbandmikrometer eine höhere Messgenauigkeit und Messwertstabilität (Abb. 3). Der Triangulationssensor besitzt hingegen eine größere Flexibilität im Bezug auf die Geometrie des Bauteils.

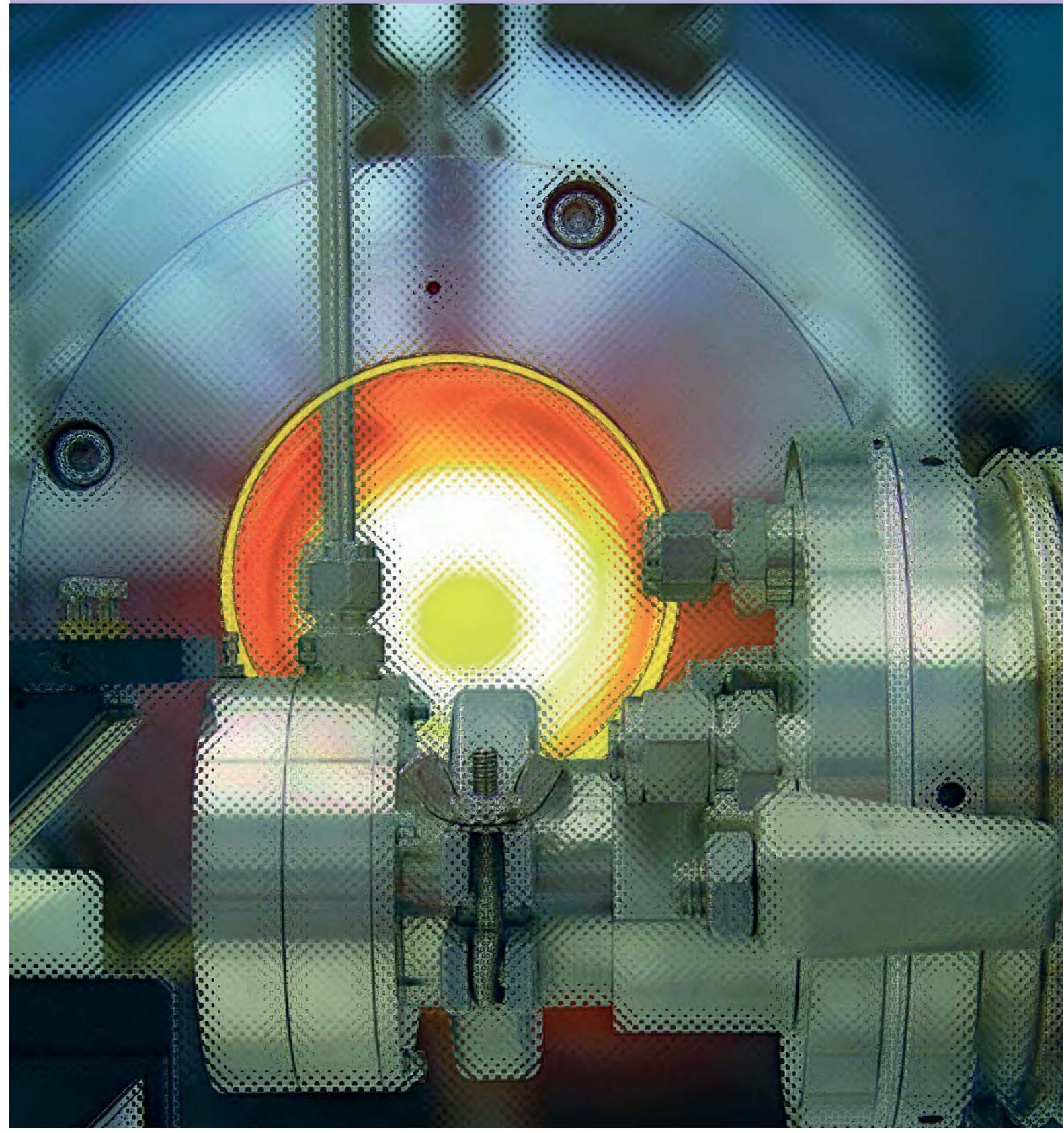
KONTAKT

Dr. Lutz-Michael Berger

Telefon: +49 351 83391-3330

lutz-michael.berger@iws.fraunhofer.de





*Man wird Schiffe ohne Ruder bauen,
so dass die größten von einem Mann zu steuern sind.
Und unglaublich schnelle Fahrzeuge, vor die kein Tier gespannt werden muss.
Und fliegende Maschinen.
Und solche, die ohne Gefahr
bis auf den Grund der Meere und Ströme tauchen können.*

Roger Bacon (1214 - 1294)



GESCHÄFTSFELD CVD-ATMOSPÄRENDRUCK-SCHICHTTECHNIK

Redaktion: Ihre Abteilung fokussiert sich seit Jahren auf die Entwicklung von Materialien für die Energietechnik. In der Photovoltaikindustrie stehen jetzt durch die veränderte Einspeiseverordnung schmerzhaft Einschnitte bevor, zudem befindet sich dieser Industriezweig durch die asiatische Konkurrenz unter starkem Kostendruck. Ist die Photovoltaikindustrie in Deutschland mittelfristig konkurrenzfähig? Wo sehen Sie Chancen und Risiken?

Prof. Kaskel: Wir sehen hier eine unserer zentralen Aufgaben, nämlich als Forschungs- und Dienstleistungsunternehmen für die Industrie, innovative und kostengünstigere Produktionsprozesse zu entwickeln. Dabei arbeiten wir eng mit den Anlagenbauern zusammen, von denen in Deutschland immer wieder entscheidende Impulse ausgehen, um kostengünstiger Solarzellen mit verbesserter Effizienz herstellen zu können. Wir konzentrieren uns dabei auf die Optimierung von Stoffströmen und das Recycling. Letztendlich steckt in der wirtschaftlichen Verwertung von Nebenprodukten in der PV-Industrie ein Kostensenkungspotenzial von bis zu 30 %. Die Effizienzsteigerung bei Abgasentsorgungsanlagen und die Etablierung von Prozessgasen, welche nicht zur Erderwärmung beitragen, können aber auch als umweltschonende Hochtechnologie exportfähig gemacht werden.

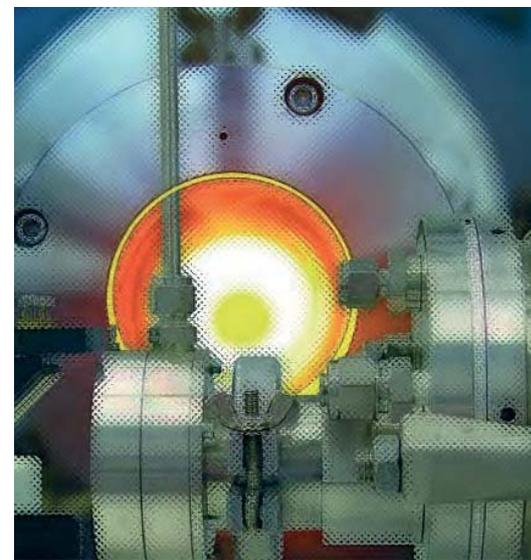
Redaktion: Aber liegen die aktuellen Energieprobleme nicht eher im Bereich der Energiespeicherung als bei der Energiewandlung?

Prof. Kaskel: Da gebe ich Ihnen völlig Recht. Im letzten Jahr haben wir dieser Entwicklung auch Rechnung getragen und ein eigenständiges Batterielabor aufgebaut. Dabei decken wir die gesamte Produktionskette ab, von der Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien über die Beschichtungstechnologie und Verpackungstechnik bis hin zum Testen einzelner Zellen.

Der Fokus liegt am Fraunhofer IWS allerdings bei Systemen mit hoher Leistungsdichte, die sich z. B. durch Supercaps realisieren lassen. Das sind Doppelschichtkondensatoren, die sehr schnell geladen und entladen werden können und damit als Ergänzung zur Batterie ideal geeignet sind. Ebenso werden Elektrodenmaterialien für Lithium-Schwefel-Batterien nachgefragt. Hier konnten wir mit unseren nanostrukturierten Kohlenstoffelektroden bereits signifikante Leistungssteigerungen im Vergleich zum Stand der Technik realisieren.

Redaktion: Durch die Presse haben wir von einem Großprojekt mit dem Land Katar erfahren. Was steckt dahinter?

Prof. Kaskel: Die Nutzung hochkonzentrierter Sonnenstrahlung für chemische Reaktionen ist ein völlig neuer Zweig der Energieforschung am IWS. Dabei steht die solarthermische Spaltung von Gasen im Mittelpunkt, um höherwertige Produkte zu erzeugen. Übrigens hat bereits Tschirnhaus bei der Entdeckung des Meissner Porzellans konzentrierte Solarstrahlung zur Erzeugung hoher Temperaturen genutzt. Wir stehen also sozusagen in guter Dresdner Tradition. In unserem ersten Projekt geht es um die Herstellung von Kohlenstoffnanopartikeln, welche als Kunststoffadditiv oder in Lithium-Ionen-Batterien als Leitadditiv zugesetzt werden. Der Charme des Verfahrens besteht zudem darin, dass als Nebenprodukt Wasserstoff anfällt, also ein sauberer Energieträger bzw. ein chemischer Rohstoff. Da kein Sauerstoff eingesetzt wird, entsteht kein CO₂. Es handelt sich also um ein komplett CO₂-freies Verfahren.



KOMPETENZEN

CVD-TECHNOLOGIEN BEI ATMOSPHÄRENDRUCK

Plasmagestützte Prozesse zur chemischen Gasphasenabscheidung bei Atmosphärendruck erlauben eine großflächige Abscheidung qualitativ hochwertiger Funktionsschichten ohne Einsatz kostenintensiver Vakuumanlagen. Damit sind kontinuierliche Beschichtungsprozesse mit hohen Raten auf temperaturempfindlichen Materialien sowie auf leicht gekrümmten Substraten unterschiedlicher Dicke realisierbar. Am Fraunhofer IWS werden Prototypen von Durchlaufreaktoren mit Gasschleusen zur Herstellung von oxidischen und nichtoxidischen Schichten sowie zum plasmachemischen Ätzen bei Normaldruck entwickelt. Die Optimierung des Reaktordesigns basiert auf experimentellen Ergebnissen und thermofluidodynamischen Simulationen. Das modulare Reaktordesign sorgt für eine kostengünstige Adaption des Prozesses an neue Anwendungsgebiete und Schichtmaterialien.

PROZESS-MONITORING

Die optimale Funktion von Industrieanlagen und die Qualität der gefertigten Produkte steht oftmals im direkten Zusammenhang mit der sich in der Anlage befindenden Gasatmosphäre. Eine industrietaugliche In-situ-Gasanalytik ist essentiell für die Qualitätssicherung von chemischen Beschichtungs-, Ätz- oder Sinterprozessen sowie bei der Überwachung von Emissionen aus Industrieanlagen. Für kundenspezifische Lösungen zur kontinuierlichen Überwachung der chemischen Zusammensetzung und Konzentration von Gasgemischen nutzt das IWS Sensoren, die wahlweise auf der NIR-Diodenlaser- oder FTIR-Spektroskopie beruhen. Weiterhin werden Bauteiloberflächen und Schichtsysteme mit Methoden wie FTIR-Spektroskopie, Spektro-Ellipsometrie oder Raman-Mikroskopie charakterisiert.

CHEMISCHE OBERFLÄCHENTECHNOLOGIE

Den Oberflächeneigenschaften vieler Werkstoffe und Materialien kommt für deren Anwendung eine besondere Bedeutung zu. Durch funktionale Dünnschichten lassen sich Oberflächen beispielsweise mit leitfähigen, kratzfesten oder selbstreinigenden Eigenschaften ausstatten. Die Entwicklung nanostrukturierter Materialien mit definierter Oberflächenchemie ist die Voraussetzung, um die Performance von Doppelschichtkondensatoren und Batterien der nächsten Generation entscheidend zu verbessern. In der Gruppe Chem. Oberflächentechnologie werden Gasphasen- (CVD) und Flüssigphasen-Verfahren entwickelt, mit denen sich großflächig Beschichtungen auf Basis neuer Materialien auftragen lassen. Schwerpunkte sind transparente, funktionale Dünnschichten und poröse Kohlenstoffschichten für elektrische Energiespeicher.

ABTEILUNGSLEITER

PROF. STEFAN KASKEL

Telefon +49 351 83391-3331
 stefan.kaskel@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2010

- | | |
|---|----|
| 1. Leitfähig in einem Schritt - Integration von Kohlenstoffnanoröhren in Polymeroberflächen | 72 |
| 2. Infrarorb: Hochdurchsatzscreening von porösen Materialien | 74 |
| 3. Partikelbeschichtete Glasfasern für eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit in Vakuumisulationspaneelen | 76 |
| 4. Neue Materialien und Prozesse für elektrische Energiespeicher | 78 |
| 5. Homogene B-dotierte Siliziumoxid-Schichten für die Photovoltaik | 80 |

**GRUPPENLEITERIN
 CVD-TECHNOLOGIE**

DR. INES DANI

Telefon +49 351 83391-3405
 ines.dani@iws.fraunhofer.de



**GRUPPENLEITER
 PROZESS-MONITORING**

DR. WULF GRÄHLERT

Telefon +49 351 83391-3406
 wulf.graehlert@iws.fraunhofer.de



**GRUPPENLEITER
 CHEM. OBERFLÄCHENTECHNOLOGIE**

DR. HOLGER ALTHUES

Telefon +49 351 83391-3476
 holger.althues@iws.fraunhofer.de





LEITFÄHIG IN EINEM SCHRITT - INTEGRATION VON KOHLENSTOFFNANORÖHREN IN POLYMER OBERFLÄCHEN

DIE AUFGABE

Der größte Anteil technisch bedeutender Polymere besteht aus elektrisch isolierenden Werkstoffen. Dennoch gibt es für elektrisch leitende Polymere einen großen und wachsenden Markt mit vielfältigen Anwendungen. Eingesetzt werden leitfähige Polymere vor allem für:

- Antistatik zur Vermeidung elektrostatischer Aufladungen,
- Gehäuse mit elektromagnetischer Abschirmung,
- elektrostatische Lackierung,
- gedruckte Elektronik,
- Elektroden für Displays / Beleuchtung,
- Elektroden für Photovoltaik.

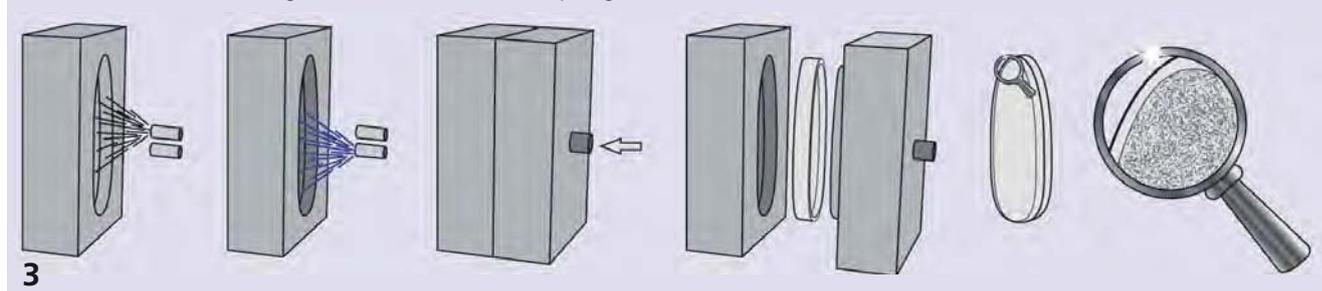
Um Kunststoffe elektrisch leitend auszustatten, finden verschiedene technische Lösungen Anwendung. Ein Ansatz ist das Einbringen von leitfähigen Additiven wie Leitruße, Kohlenstofffasern, Metallpulver oder -fasern, z. B. über die Polymer-schmelze. Aufgrund der hohen nötigen Volumenanteile dieser Fremtteilchen ist allerdings mit einer Veränderung der mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften

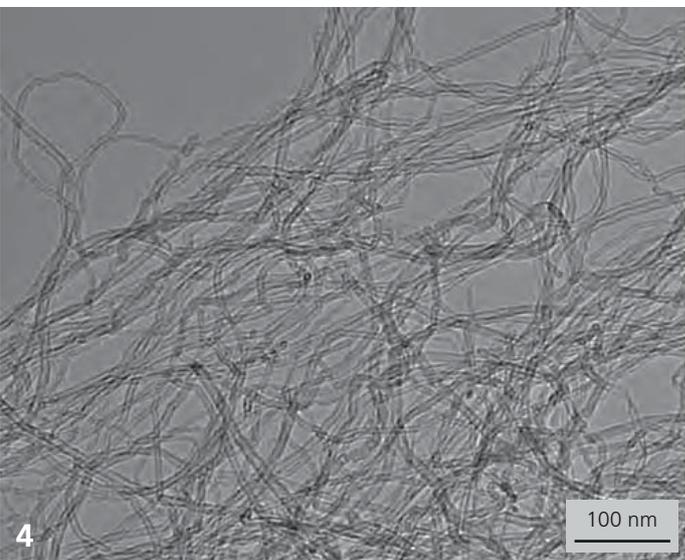
zu rechnen. Im Falle transparenter Polymere wird die Lichttransmission stark verringert. Ein weiterer Ansatz ist die Beschichtung der Kunststoffe mit leitfähigen Schichten. Dafür können nur Verfahren eingesetzt werden, die bei niedrigen Temperaturen arbeiten. Hier wirken sich Haftungsprobleme oder hohe Kosten infolge aufwendiger Verfahrensschritte nachteilig aus. Intrinsisch leitfähige Polymere kommen aufgrund von hohen Kosten und geringer Stabilität nur für Spezialanwendungen infrage. Eine Alternative dazu bietet das hier vorgestellte Verfahren, mit dem Polymeroberflächen durch den Einsatz von Kohlenstoffnanoröhren (CNT) elektrisch leitend ausgestattet werden können.

UNSERE LÖSUNG

Während des Herstellungsprozesses eines Polymerbauteils bzw. einer Folie wird eine nur wenige Nanometer dicke CNT-Schicht in die Oberfläche integriert. Abb. 3 zeigt das Verfahren für die Herstellung eines 3D-Formteils mittels Spritzguss. Dabei wird eine wässrige Dispersion, in welcher CNT mittels eines Tensids stabilisiert sind, auf das Formwerkzeug aufgesprüht und getrocknet. Anschließend wird das Tensid ausgewaschen

Verfahren für die Herstellung eines 3D-Formteils mittels Spritzguss





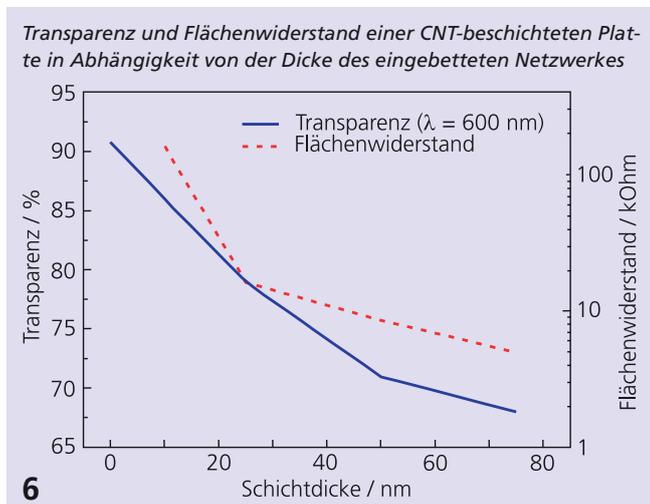
und eine poröse CNT-Dünnschicht (Abb. 4) bleibt auf der Oberfläche des Formwerkzeugs zurück. Beim Einspritzen der Polymerschmelze infiltriert diese das CNT-Netzwerk und bettet dieses während der Abkühlung in der Oberfläche fest ein. Das Verfahren lässt sich auch auf andere thermoplastische Verarbeitungsverfahren übertragen, bei denen die Einbettung über die Polymerschmelze erfolgt (z. B. Folienextrusion). Somit kann der Prozess für viele verschiedene Polymermaterialien angewendet werden und ist aufgrund der geringen CNT-Schichtdicken besonders für transparente Bauteile geeignet. Die Materialkosten sind sehr gering und die Eigenschaften des Grundmaterials bleiben nahezu unverändert.

ERGEBNISSE

Die Umsetzbarkeit und Funktionalität des Verfahrens konnte an verschiedenen Proben mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren nachgewiesen werden. Abb. 1 zeigt eine PMMA-Platte (Plexiglas), welche eine Transparenz von 82 % bei einem Flächenwiderstand von bis zu 1 kOhm aufweist. Schichtwiderstand und Transparenz sinken mit zunehmender Schichtdicke des eingebetteten Netzwerkes (Abb. 6).

Weiterhin ist das Verfahren für die Herstellung von Folien geeignet (Abb. 2), da das CNT-Netzwerk eine hohe Flexibilität aufweist und selbst bei mechanischen Verformungen (Biegen, Knicken) ein leitfähiger Pfad erhalten bleibt. In Abb. 5 sind Lampenabdeckungen zu sehen, welche im Spritzguss gefertigt wurden. Die eingebrachten CNT-Schichten sind < 30 nm und zeigen Flächenwiderstände von 10 kOhm. Die Bauteile werden in explosionsgeschützten Umgebungen eingesetzt und dürfen sich aus Sicherheitsgründen nicht aufladen. Die Richtlinien für Antistatik liegen bei einem Oberflächenwiderstand < 1 GOhm. Sie können mit diesem Verfahren um Größenordnungen unterschritten werden.

Laufende Arbeiten beschäftigen sich mit der Optimierung und Automatisierung der Prozesstechnik, der Verbesserung der Eigenschaften des CNT-Netzwerks und der Veränderung und Optimierung der eingesetzten CNT-Dispersionen.



- 1 PMMA-Scheibe mit integrierter CNT-Schicht
- 2 PET-Folie mit hoher Flexibilität
- 4 TEM Aufnahme eines CNT-Netzwerks
- 5 Antistatische PC-Spritzgussformteile

KONTAKT

Dipl.-Ing. Jens Liebich
 Telefon: +49 351 83391-3564
 jens.liebich@iws.fraunhofer.de





INFRASORB: HOCHDURCHSATZSCREENING VON PORÖSEN MATERIALIEN

DIE AUFGABE

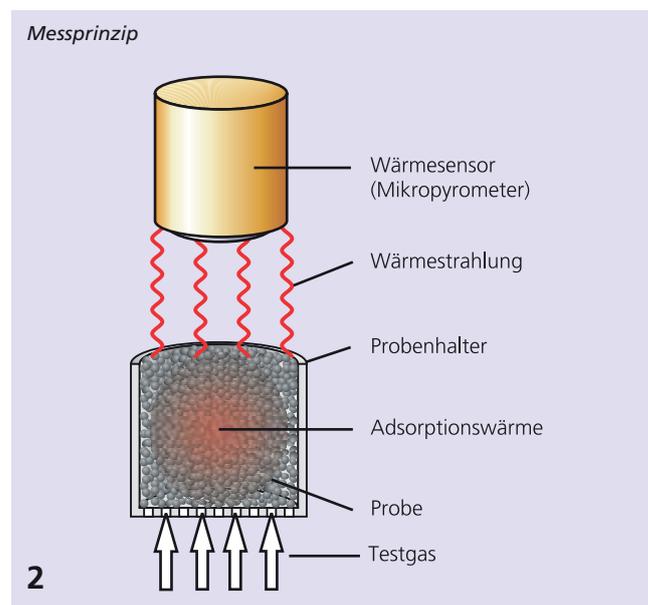
Bei der Entwicklung poröser Materialien, wie z. B. Zeolithen, Aktivkohlen oder den neuartigen metallorganischen Gerüstverbindungen (Metal organic frameworks MOF), kommen immer häufiger Methoden der Hochdurchsatzsynthese zum Einsatz. Dabei wird eine Vielzahl von Syntheseparametern systematisch variiert, um den - unter Umständen nur sehr kleinen - Parameterbereich einer neuen Produktsynthese zu finden oder um bestehende Syntheserouten zu optimieren. Die dabei erzeugten Produkte werden anschließend mittels Röntgendiffraktometrie oder durch volumetrische Messungen zur Bestimmung der spezifischen Oberflächen charakterisiert. Diese Charakterisierungsverfahren sind sehr zeitaufwendig und relativ teuer: Die Untersuchung einer einzigen Probe kann mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Zudem weist oft nur ein kleiner Teil der mittels Hochdurchsatzsynthese erhaltenen Verbindungen die gewünschten Eigenschaften auf. Die große Menge der potenziellen Negativproben durchläuft dennoch die zeitintensive Charakterisierung. Der Flaschenhals in der Anwendung der Hochdurchsatzsynthese besteht somit im Auffinden der wenigen vielversprechenden - hochporösen - Proben. Ein signifikant beschleunigtes und dabei gleichermaßen zuverlässiges Screening der gesamten synthetisierten Probenmenge bietet somit ein enormes Potenzial hinsichtlich Zeit- und Kostenersparnis.

UNSERE LÖSUNG

Poröse Materialien kommen häufig bei der adsorptiven Gasreinigung zum Einsatz. Die unerwünschten Bestandteile eines Gases belegen dabei die große Oberfläche des porösen Materials, werden adsorbiert und somit aus dem Gasstrom

abgetrennt. Bei diesem Vorgang wird pro adsorbiertes Molekül eine bestimmte Energie freigesetzt, die Adsorptionswärme.

Am Fraunhofer IWS wurde ein Messverfahren entwickelt, welches auf Grundlage der freigesetzten Wärmemenge die Adsorptionsfähigkeit eines Materials überprüft. Die zu untersuchende Probe wird dabei einem Gasstrom ausgesetzt, welcher das zu adsorbierende Gas enthält. Findet am Material eine Adsorption statt, kommt es zur Freisetzung der Adsorptionswärme. Diese wird durch Verwendung eines berührungslosen optischen Temperatursensors erfasst (Abb. 2). Die Messdauer zur Untersuchung einer Probe liegt dabei im Bereich weniger Minuten. Durch das einfache und modularisierbare Messprinzip ist es möglich, eine Parallelisierung von Messungen und Messanordnung zu realisieren.





3

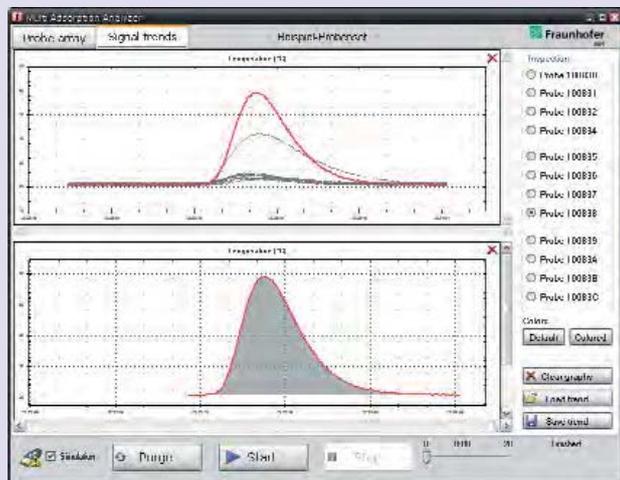
ERGEBNISSE

Der aktuelle Gerätetyp (Abb. 3) ermöglicht die parallele Messung von bis zu 12 Proben. Zudem wurde eine einfach zu bedienende Software entwickelt, welche den Anwender in wesentlichen Schritten der Messdurchführung und -auswertung sowie beim Datenhandling unterstützt. Für den Betrieb benötigt das Gerät lediglich einen PC und eine Gasversorgung für das zu wählende Prüfgas sowie für das frei wählbare Inertgas.

Die Messergebnisse wurden bei unterschiedlichen Modellproben durch gravimetrische Bestimmung der Aufnahmekapazitäten bestätigt.

Dieses einfache und schnelle Messverfahren ermöglicht somit nicht nur eine Zeit- und Kostenersparnis im Bereich der Synthese neuer Materialien, sondern kann auch zur Qualitätskontrolle in bestehenden Herstellungsverfahren eingesetzt werden.

Ansicht der Messkurven in der Gerätesoftware



4

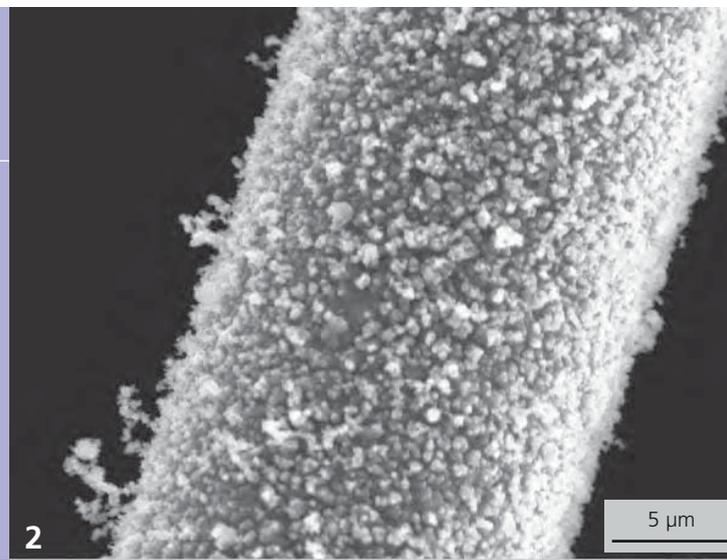
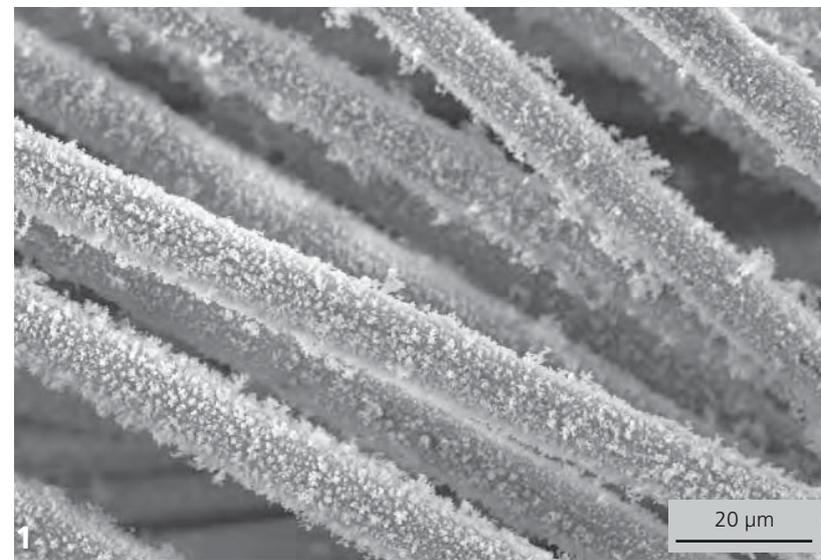
Abb. 4 zeigt typische Messkurven des Temperaturverlaufes während der Adsorption eines Gases an den Proben. Das Messergebnis ist das Integral unter diesen Kurven. Als Werkzeug in der Hochdurchsatzsynthese kann bereits eine qualitative Interpretation genügen: Liegt ein Messsignal vor, war die Synthese erfolgreich (Adsorption findet statt). Darüber hinaus ist eine quantitative Interpretation des Messergebnisses möglich. So konnte gezeigt werden, dass das Flächenintegral proportional zur Menge des adsorbierten Gases ansteigt.

- 1 Proben neuartiger metall-organischer Gerüstverbindungen (MOF)
- 3 Prototyp des Adsorptionsschnelltesters

KONTAKT

Dipl.-Chem. Matthias Leistner
 Telefon: +49 351 83391-3421
 matthias.leistner@iws.fraunhofer.de





PARTIKELBESCHICHTETE GLASFASERN FÜR EINE REDUZIERTE WÄRMELEITFÄHIGKEIT IN VAKUUMISOLATIONSPANEELEN

DIE AUFGABE

Das Prinzip der Vakuumisolation zur Wärmedämmung ist seit über 100 Jahren von der Thermoskanne bekannt. In den letzten Jahren wurde eine verstärkte Übertragung dieses Verfahrens auf die Dämmung wärmetechnischer Anlagen (z. B. Kühlschränke, Kühltransporter) oder die thermische Isolation von Häusern durch Verwendung von Vakuumisulationspaneelen (VIP) beobachtet. Ist ein Hohlraum evakuiert, so lastet jedoch auf der Hülle der Atmosphärendruck von 1 bar. Durch die zylindrische Form der Thermoskanne kann dieser Druck von der Hülle aufgenommen werden. Bei ebenen Vakuumisulationspaneelen muss ein Füllmaterial mit einer hohen Druckbelastbarkeit, aber geringer Wärmeleitfähigkeit diese Stützfunktion erfüllen. Flache evakuierte Vakuumisulationspaneele bestehen heute aus nanoporösen Füllmaterialien, die von Hochbarrierefolien umhüllt sind. Schon bei einem Zehntel bis maximal einem Fünftel der Dicke konventionelle Dämmstoffe erzielen VIP die gleiche Isolationswirkung.

Die Wärmeleitung der VIP wird maßgeblich durch die Wärmeleitung des verwendeten Füllmaterials (z. B. Glasfasern) und des darin eingeschlossenen Gases beeinflusst. Eine Möglichkeit zur Senkung der Wärmeleitung der VIP besteht in der Reduzierung der Wärmeleitung im Füllmaterial. So kann pyrogene Kieselsäure bei Atmosphärendruck eine Wärmeleitfähigkeit von $18 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ erreichen. Füllstoffe aus geschäumtem Polyurethan (PU) oder Polystyrol (PS) mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. $32 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und Glasfasern ($35 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) stellen den aktuellen Stand der Technik dar.

[1] J. Fricke et al., Nanotechnology 2006

Um den Beitrag des Gases zur Gesamtwärmeleitung zu mindern, wird der Gasdruck auf 50 bis 1 mbar verringert. Die Wärmedämmeigenschaften der Füllmaterialien ändern sich bei Evakuierung jedoch sehr unterschiedlich. VIP mit einem Füllmaterial aus agglomerierten SiO_2 -Partikeln (pyrogene Kieselsäure), die Porengrößen von 100 bis 200 nm aufweisen, erreichen minimale Wärmeleitungskoeffizienten von $2 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ bereits bei Drücken von 10 mbar [1]. Da der Druck im Inneren von VIP über ihrer Nutzungsdauer unvermeidbar ansteigt, verschlechtern sich somit die Isoliereigenschaften im Laufe der Zeit. Die Entwicklungsaufgabe bestand deshalb darin, ein Füllmaterial zu entwickeln, das über einen möglichst großen Druckbereich eine stabile Wärmeleitfähigkeit aufweist.

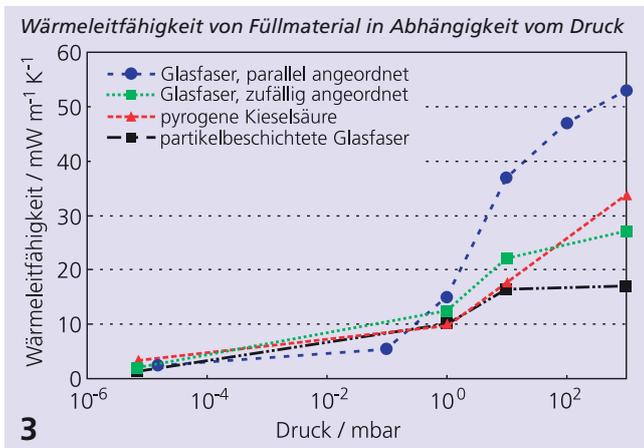
UNSERE LÖSUNG

In Kooperation zwischen dem Fraunhofer IWS, dem Fraunhofer CCL (USA) und der Mackinac Technology Company wurden partikelbeschichtete Glasfasern mit geringer Wärmeleitfähigkeit über einen weiten Druckbereich entwickelt. Zum Einsatz kamen Glasfasern mit einem Faserdurchmesser von ca. $15 \mu\text{m}$. Die Abscheidung der SiO_2 -Partikel erfolgt in einem mikrowellenplasmagestützten chemischen Gasphasenbeschichtungsprozess (PECVD) bei Atmosphärendruck. Die Aktivierung eines Argon-Stickstoff-Gemisches erfolgte in einer 6" CYRANNUS-Plasmaquelle. Nach Durchströmen der Plasmaquelle gelangen die aktivierten Plasmaspezies durch ein Düsenfeld in die Beschichtungszone. Im Düsenfeld werden der Precursor Tetraethoxysilan (TEOS) und Sauerstoff eingespeist. Die Glasfasern werden mit einer Geschwindigkeit von 50 mm s^{-1} in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren durch den Reaktor bewegt.

ERGEBNISSE

Die beschichteten Glasfasern wurden zunächst im Raster-elektronenmikroskop (REM) untersucht. Durch zweiseitiges Beschichten der Fasern konnte eine gleichmäßige Bedeckung der gesamten Faseroberfläche mit Partikeln erreicht werden. Die Partikel weisen Durchmesser von ca. 400 nm auf. Kleinere Partikel bilden Agglomerate. In Abhängigkeit vom Druck wurde die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien analysiert (Abb. 3). Unterschiedliche Proben partikelbeschichteter Glasfasern weisen eine gute Reproduzierbarkeit der Wärmeleitung auf.

Durch eine Partikelbeschichtung von Glasfasern konnte eine deutliche Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften eines etablierten Isolationsmaterials im Labormaßstab erreicht werden. Die eingesetzte Technologie zur kontinuierlichen Beschichtung der Glasfasern ermöglicht eine großvolumige Produktion im Rolle-zu-Rolle-Verfahren bei Atmosphärendruck.



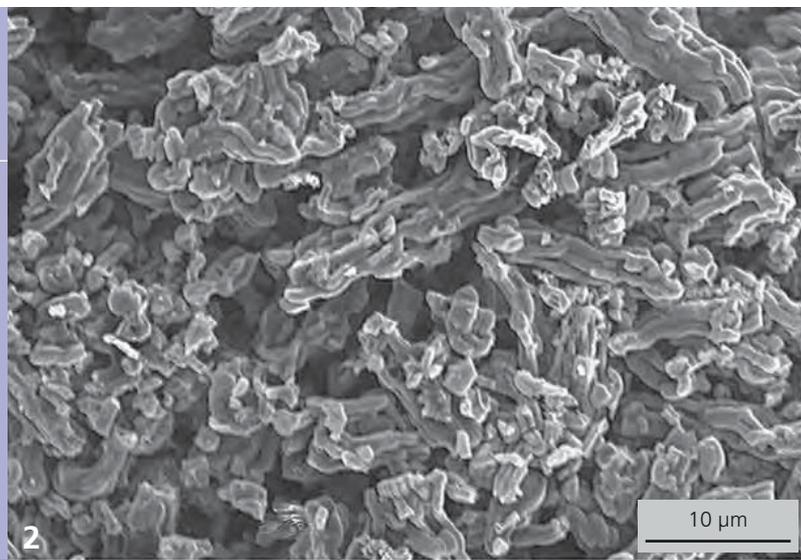
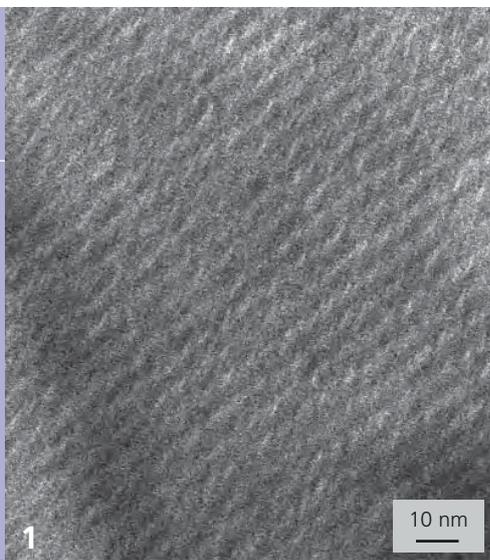
Bei Drücken von 10⁻⁵ mbar erreichen alle untersuchten Materialien nahezu die gleiche Wärmeleitfähigkeit von 2 bis 4 mW m⁻¹ K⁻¹. Bis zu einem Druck von 1 mbar ist der Unterschied der Wärmeleitung der Materialien nur marginal (10 bis 16 mW m⁻¹ K⁻¹). Parallel zueinander angeordnete Glasfasern zeigen mit weiter ansteigendem Druck die am stärksten steigende Wärmeleitfähigkeit. Die Reduzierung der Kontaktflächen der Glasfasern durch die Partikelbeschichtung führt, verglichen mit unbeschichteten Fasern, bei weiter steigenden Gasdrücken zu einem deutlich verringerten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit. Mit einer Wärmeleitfähigkeit von 18 mW m⁻¹ K⁻¹ zeigen die partikelbeschichteten Fasern die geringsten Werte der untersuchten Materialien bei Atmosphärendruck.

1/2 REM-Aufnahmen partikelbeschichteter Glasfasern

KONTAKT

Dipl.-Ing. Julius Roch
 Telefon: +49 351 83391-3347
 julius.roch@iws.fraunhofer.de





NEUE MATERIALIEN UND PROZESSE FÜR ELEKTRISCHE ENERGIESPEICHER

DIE AUFGABE

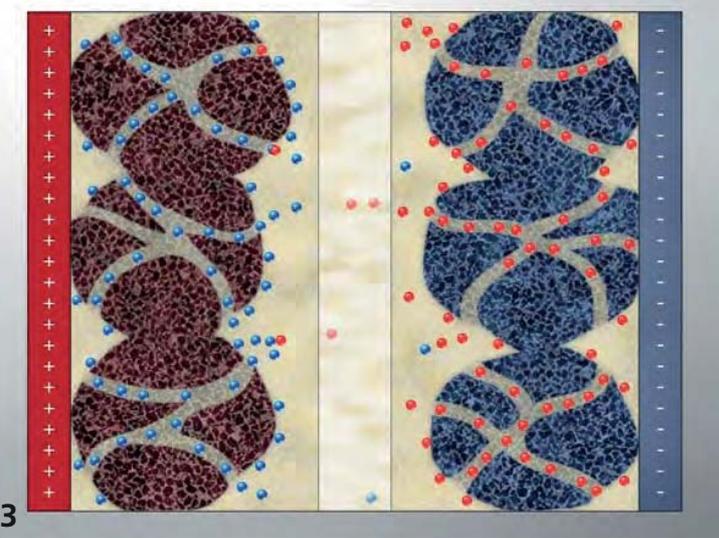
Elektrische Energiespeicher sind der Schlüssel und zugleich der Flaschenhals für viele technologische Zukunftsfelder, u. a. auch für Elektro- und Hybridfahrzeuge. Für die Elektromobilität nehmen Doppelschichtkondensatoren (EDLC) als Energiespeicher neben den Batterien eine Schlüsselfunktion ein. Die hohe Leistungsdichte und Lebensdauer (Zyklusstabilität) der EDLC sind eine ideale Voraussetzung für die Leistungsbereitstellung beim Starten / Anfahren / Beschleunigen und die Rekuperation von Bremsenergie in Elektro- und Hybridfahrzeugen. In Kombination mit Batterien können EDLC diese durch die Aufnahme und Abgabe von Leistungsspitzen entlasten und erlauben eine höhere Lebensdauer bzw. eine kleinere Dimensionierung der Batterieeinheit. Weiterentwicklungen sind jedoch notwendig, um die Energiedichte der EDLC-Zellen und -Module weiter zu erhöhen. Eine deutliche Steigerung der Leistungsfähigkeit von Energiespeichern kann nur durch grundlegend neue Materialkonzepte gelöst werden. In EDLC kann beispielsweise durch spezielles Porendesign in den eingesetzten hochporösen Kohlenstoffmaterialien eine deutliche Leistungssteigerung bewirkt werden. Eine Kostenreduktion kann vor allem durch effizientere Produktionstechnologien erreicht werden. Bei diesen Herausforderungen setzt das Fraunhofer IWS an und erarbeitet Lösungen in den Bereichen Material- und Prozessentwicklung für die Fertigung elektrischer Energiespeicher. Ein Beispiel wird im Folgenden näher erläutert.

UNSERE LÖSUNG

Die spezifische Oberfläche und die Porengeometrie von Kohlenstoffen bestimmen maßgeblich die Leistungsparameter beim Einsatz in Doppelschichtkondensatoren. In diesen Systemen werden Elektroden aus porösen Kohlenstoffen als

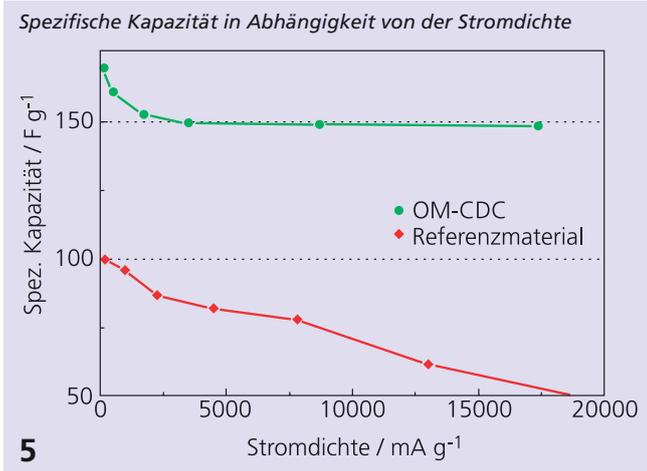
Schicht auf Metallfolien (Stromableiter) eingesetzt. Zwei dieser Elektroden werden durch einen Separator getrennt und durch einen Elektrolyten benetzt. Beim Ladevorgang werden Ionen des Elektrolyten in der elektrochemischen Doppelschicht an der Oberfläche der Elektroden akkumuliert (Anionen an der positiv geladenen Elektrode, Kationen an der negativ geladenen Elektrode). Eine große Oberfläche führt zu einer hohen Kapazität und offene Poren mit Durchmessern > 2 nm ermöglichen einen schnellen Stofftransport. Der Transport von Elektrolytionen in dem Porensystem bestimmt maßgeblich den inneren Widerstand des Kondensators und damit die maximal erreichbare Leistung. Materialien, die diese Bedingungen außerordentlich gut erfüllen, sind geordnete, mesoporöse aus Karbiden gewonnene Kohlenstoffe (OM-CDC). CDC werden durch die Chlorierung von Karbiden (z. B. Siliziumkarbid) bei Temperaturen > 600 °C hergestellt. Durch die Extraktion von Silizium als SiCl_4 bleibt ein hochporöser Kohlenstoff mit Mikroporen (Durchmesser < 1 nm) und Oberflächen > 1000 m^2/g zurück.

Durch eine Templat-gestützte Synthese gelingt die Herstellung von Siliziumkarbid mit hexagonal geordneten Mesoporen. Die Chlorierung dieses Materials führt zu den OM-CDC, also zu Kohlenstoffen, die zusätzlich zu einem hohen Mikroporenvolumen, geordnete Mesoporen aufweisen. Spezifische Oberflächen bis zu 2800 m^2/g können mit dieser Syntheseroute erreicht werden. Diese Materialklasse bildet ein perfektes System, um den Einfluss unterschiedlicher Porengeometrien für die Anwendung als Elektrodenmaterial in Supercaps zu untersuchen. Durch den Einsatz von OM-CDC sind zudem deutliche Leistungssteigerungen gegenüber herkömmlichen Materialien zu erwarten.



ERGEBNISSE

Die Kohlenstoffmaterialien wurden mit einer 2-Elektrodenkonfiguration in organischem Elektrolyten elektrochemischen Untersuchungen unterzogen. Tatsächlich zeigen die OM-CDC-Materialien gegenüber porösen Kohlenstoffen, die bisher in Supercaps eingesetzt werden, drastische Vorteile im Leistungsverhalten. Während herkömmliche Materialien spezifische Kapazitäten von maximal 100 F / g erreichen, wurden an OM-CDC Werte von über 150 F / g gemessen. Dieser Unterschied ist vor allem durch die hohe Oberfläche der OM-CDC zu begründen. Der Vorteil der mesoporösen Struktur zeigt sich beim Verhalten gegenüber höheren Ladestromdichten. Während herkömmliche Materialien eine deutliche Abnahme der Kapazität mit steigender Stromdichte aufweisen, bleibt die Kapazität der OM-CDC bis zu einer Stromdichte von 20 A / g nahezu konstant.



Dieses Verhalten ist durch eine schnelle Kinetik beim Ladungstransport im Elektrolyten zu erklären. Die geordneten Mesoporen ermöglichen einen schnellen Transport und eine gute Zugänglichkeit des Materials für die Elektrolytionen. Für die Anwendung im Doppelschichtkondensator bedeutet dies, dass durch das OM-CDC-Material gleichzeitig sowohl die Energiedichte (proportional zur Kapazität), als auch die Leistungsdichte deutlich gesteigert werden kann.

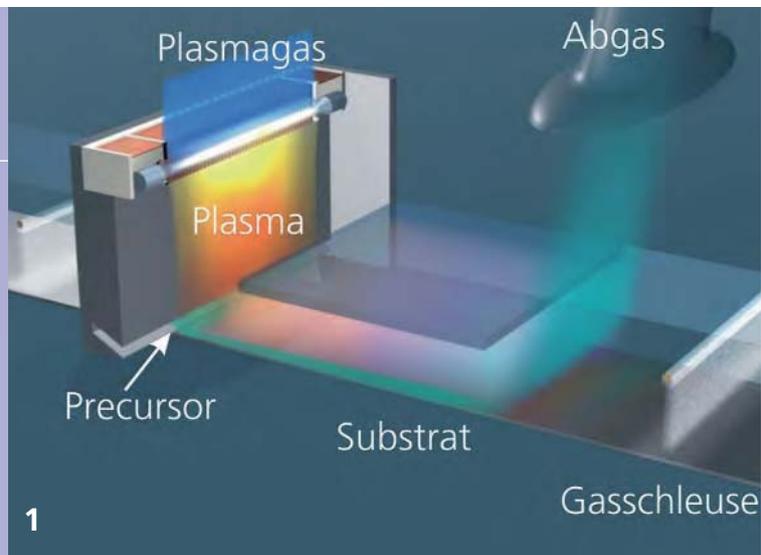
Für diese und viele weitere Fragestellungen im Bereich der Entwicklung von Elektroden und elektrischen Energiespeichern werden am IWS Lösungen erarbeitet. Neben innovativen Materialien steht die Entwicklung skalierbarer Verfahren im Vordergrund, um eine industrielle Umsetzung der Ergebnisse mittelfristig zu ermöglichen. Eine neue Laborausstattung am IWS ermöglicht die Elektrodenherstellung im Rolle-zu-Rolle-Verfahren und das nötige Equipment zur Materialaufbereitung und Charakterisierung steht zur Verfügung.

- 1 Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme (Nanostruktur) des mesoporösen CDC-Materials
- 2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (Mikrostruktur) des mesoporösen CDC-Materials
- 3 Schematischer Aufbau eines Doppelschichtkondensators
- 4 Rolle-zu-Rolle Beschichtungsanlage zur Fertigung von Supercap-Elektroden

KONTAKT

Dr. Holger Althues
 Telefon: +49 351 83391-3476
 holger.althues@iws.fraunhofer.de





HOMOGENE B-DOTIERTE SILIZIUMOXID-SCHICHTEN FÜR DIE PHOTOVOLTAIK

DIE AUFGABE

In der heutigen Solarzellenproduktion kommen zur Herstellung des pn-Übergangs entweder Rohrofen- oder Durchlauf-Diffusionsprozesse zum Einsatz. Bei ersterem wird in einem Rohrofen der Dotierstoff aus einem Dotierstoff-haltigen Gas als dünne Glasschicht (»Emitter«, z. B. Borosilikatglas – BSG) auf dem Wafer abgeschieden und danach im selben Diffusionsrohr bei hoher Temperatur eingetrieben. Im Gegensatz dazu wird bei der Durchlaufdiffusion zunächst eine Dotierstoff-haltige Flüssigkeit als dünner Film mittels Sprüh- oder Vernebelungsverfahren auf den Wafer aufgebracht und danach der Dotierstoff in einem Durchlauf-Diffusionsofen eingetrieben.

Insbesondere auf stark texturierten Oberflächen kommt es in beiden Fällen jedoch immer wieder zu Problemen mit der Homogenität des resultierenden Emitters. So kann sich dieser in tiefen Strukturen sammeln und Spitzen werden dementsprechend mit weniger Dotierstoff versorgt. Da diese lokalen Inhomogenitäten bei der Kontaktierung zu Widerstandsverlusten führen, sind diese möglichst zu vermeiden.

UNSERE LÖSUNG

Mit der im Fraunhofer IWS etablierten Atmosphärendruck-CVD-Technologie können auch auf texturierten Oberflächen homogene und gleichmäßig dicke Emitterschichten erzeugt werden. Sie sichern nach der Diffusion eine homogene Verteilung des Dotierstoffes im Wafer. Zwei verschiedene Atmosphärendruck-CVD-Prozesse zur Herstellung homogener Bor-dotierter SiO_2 -Schichten sowie reiner Boroxidschichten auf Si-Wafern wurden für die industrielle Anwendung qualifiziert.

Thermisch aktivierte Atmosphärendruck-CVD

Für die thermisch aktivierte Oxidschichtabscheidung wird eine bei Atmosphärendruck arbeitende CVD-Laboranlage verwendet. Als Ausgangsstoffe kommen Tetraethylorthosilikat (TEOS) und Trimethylborat (TMB) sowie Ozon zum Einsatz. Die flüssigen, metallorganischen Precursoren werden in die Gasphase überführt und gemeinsam mit dem Ozon der Beschichtungsanlage zugeführt. Eine nachfolgende Erwärmung der Solarwafer auf Temperaturen von ca. 400 °C bewirkt, dass an deren Oberfläche eine thermisch initiierte Schichtabscheidungs-Reaktion stattfindet.

Plasmaaktivierte Atmosphärendruck-CVD

Als Atmosphärendruck-Plasmaquelle wird eine linienförmige DC-Bogenentladung mit 150 mm Arbeitsbreite eingesetzt. Das Plasmagas durchströmt den Bogen senkrecht zu dessen Achse und transportiert angeregte Plasmaspezies aus der Quelle heraus in Richtung Substrat. Analog zur thermisch aktivierten Beschichtung kommt Trimethylborat (TMB) als Bor-Precursor zum Einsatz. Gemeinsam mit Hexamethyldisiloxan (HMDSO) sowie Sauerstoff wird es innerhalb der Reaktionszone dem Afterglow-Plasma zugeführt. Infolge der Plasmaanregung ist der Einsatz von Ozon nicht notwendig. Zudem kann die Wafertemperatur auf 250 °C reduziert werden.

ERGEBNISSE

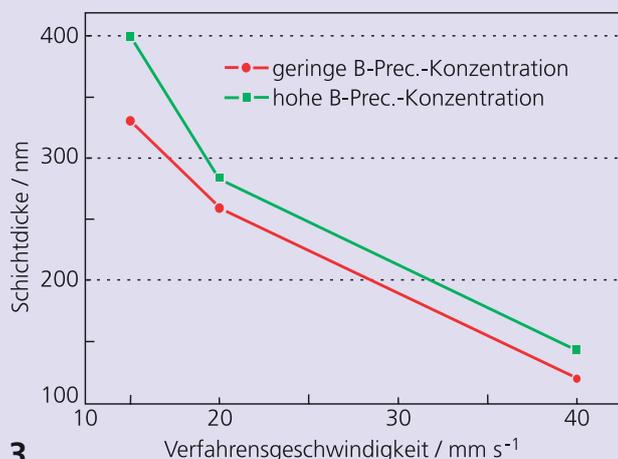
Die mit beiden Verfahren gebildeten Schichten eignen sich hervorragend als Dotierstofflieferanten für die Erzeugung des pn-Übergangs in Solarzellen.



Auf Si-Solar-Wafern wurden homogene Bor-dotierte Siliziumoxidschichten mit unterschiedlichen Schichtdicken und Bor-Konzentrationen erzeugt. Die Abscheiderate hängt bei beiden Methoden sowohl von der Substrattemperatur und den Precursorkonzentrationen als auch von der O_2 - bzw. O_3 -Konzentration ab. In Abb. 3 ist der Zusammenhang von abgeschiedener Schichtdicke und Verfahrensgeschwindigkeit für zwei unterschiedliche B-Precursorkonzentrationen dargestellt. Die FTIR-spektroskopische Analyse zeigte Unterschiede bei den mit verschiedenen Verfahren abgeschiedenen Schichten. Die mit Plasma-CVD hergestellten Schichten enthalten deutlich mehr Wasserstoff, der teilweise direkt am Bor gebunden ist (Abb. 4).

Im Rahmen der Arbeiten wurden Verfahren entwickelt, welche zu einer hohen chemischen Stabilität der Dotierschichten führen. Schichtdicken und damit die Stoffmenge des Dotierelementes lassen sich durch Abscheideparameter und Verfahrensgeschwindigkeit effizient steuern. Beide Verfahren arbeiten bei Atmosphärendruck und sind dadurch problemlos und kostengünstig in die Solarzellenprozesskette integrierbar.

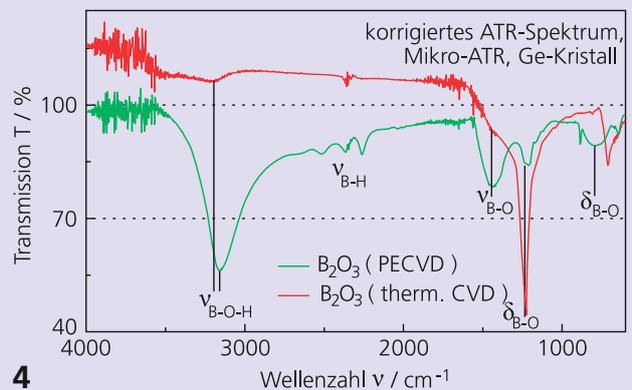
Abhängigkeit der Schichtdicke von der Verfahrensgeschwindigkeit und der Konzentration des B-Precursors



3

Ein weiterer Vorteil dieser CVD-Verfahren wird insbesondere dann deutlich, wenn in der Solarzellenfertigung mehrere Dotierschritte miteinander verbunden werden sollen. Da die Beschichtung nur einseitig erfolgt, können Wafervorder- und -rückseite in zwei direkt aufeinanderfolgenden Beschichtungsschritten mit unterschiedlichen Emitterschichten versehen werden, die in einem einzigen Diffusionsschritt unterschiedlich dotierte Bereiche auf Vorder- und Rückseite des Wafers erzeugen.

FTIR-Spektren von B_2O_3 -Schichten, die mit unterschiedlichen Verfahren abgeschieden wurden



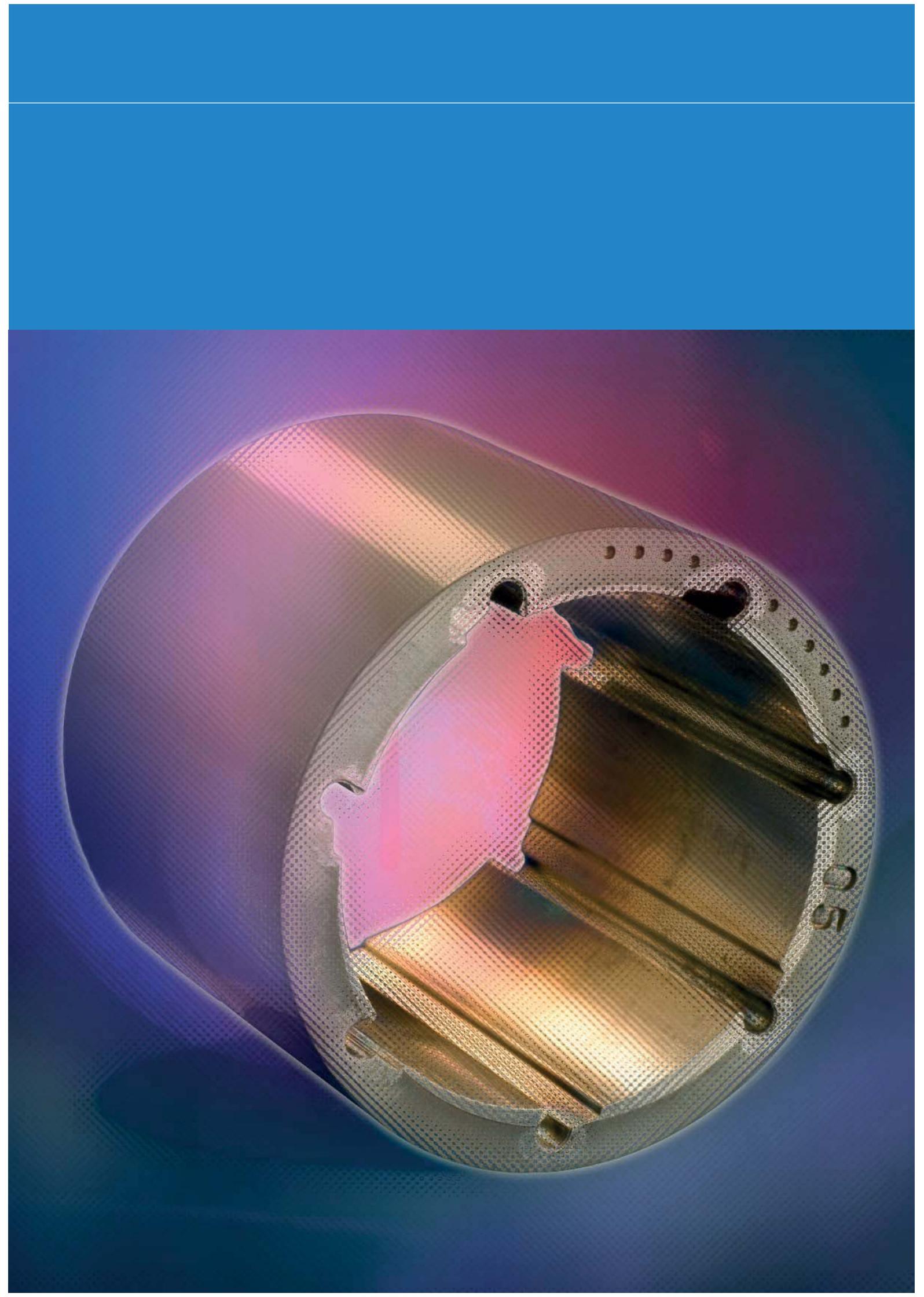
4

- 1 Funktionsprinzip des plasmaaktivierten AP-CVD-Verfahrens
- 2 Homogene SiO_2 -Schicht, abgeschieden mit dem thermisch aktivierten AP-CVD-Verfahren

KONTAKT

Dipl.-Chem. Birte Dresler
 Telefon: +49 351 83391-3453
 birte.dresler@iws.fraunhofer.de





*Man muss nicht nur mehr Ideen haben als andere,
sondern auch die Fähigkeit besitzen,
zu entscheiden, welche dieser Ideen gut sind.*

Linus Pauling



GESCHÄFTSFELD PVD-VAKUUM-SCHICHTTECHNIK

Redaktion: Im Automobilbau bietet die Beschichtung von Komponenten im Motor wie im Antriebsstrang mit superharten ta-C-Kohlenstoffschichten neben hohem Verschleißschutz auch ein großes Potenzial zur Reibungsminderung und damit zur Effizienzverbesserung und Reduzierung des CO₂-Ausstoßes. Hierzu gibt es in Ihrer Abteilung ja vielfältige Aktivitäten. Was lässt sich hierzu Neues berichten?

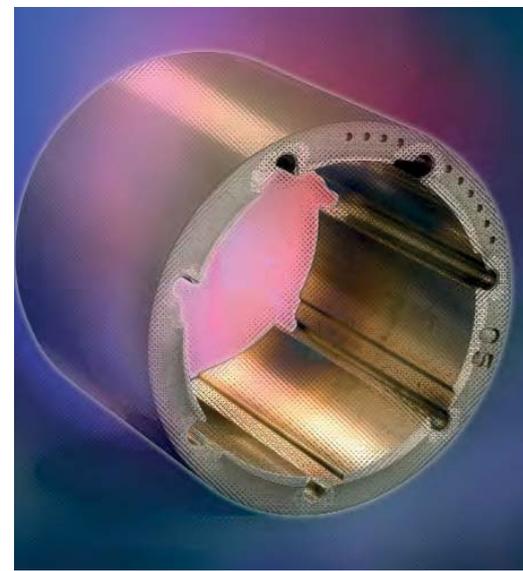
Dr. Leson: Im Jahr 2010 haben wir etliche Fortschritte bei der industriellen Überführung der von uns entwickelten Technologie erzielt. So arbeiten wir im Rahmen eines großen BMWi-geförderten Projektes eng mit Automobilbauern, Zulieferern und Anlagenbauern zusammen. Parallel dazu qualifizieren wir derzeit mit einem industriellen Partner die von uns entwickelte gefilterte Diamor[®]-Abscheidung, mit der die Herstellung besonders glatter Schichten, die keine weitere Nachbearbeitung erfordern, bei hoher Rate möglich ist. Wir spüren an dem zunehmenden Interesse aus der Industrie und einer steigenden Nachfrage nach unseren FuE-Leistungen, dass sich aufgrund der deutlichen Vorteile von ta-C gegenüber klassischen DLC-Schichten ein wachsender Markt für ta-C-Beschichtungen entwickelt. Hierfür sind wir mit unserer Entwicklung des Laser-Arc-Verfahrens, das in Bezug auf die Produktivität konkurrenzlos ist, bestens gerüstet.

Redaktion: Eine der zentralen Kernkompetenzen ihrer Abteilung mit langjähriger Tradition ist die Herstellung höchstpräziser Multischichtstapel für röntgenoptische Komponenten im harten wie im weichen Röntgenbereich. Wie hat sich dieser Zweig entwickelt?

Dr. Leson: Auch für diesen Bereich konnten wir im Jahr 2010 eine erfreuliche Steigerung der Nachfrage verzeichnen. So gelang es uns erneut, gemeinsam mit einem industriellen Anlagenbauer als Partner eine Großanlage mit unserer Technologie an einen industriellen Kunden zu überführen. Zudem haben wir aufbauend auf unserem Know-how bei der Multischichtabscheidung damit begonnen, Reaktivmultischichten zu entwickeln. Diese lassen sich vorteilhaft zum hochpräzisen Fügen einsetzen und besitzen ein großes Potenzial. Obwohl wir noch nicht lange an dem Thema arbeiten, haben wir erfreulicherweise schon einige Kunden aus der Industrie, mit denen wir den praktischen Einsatz dieser Reaktivmultischichten erproben.

Redaktion: Ihre Abteilung befasst sich seit einigen Jahren intensiv mit Carbon Nanotubes. Von diesen Materialien verspricht man sich ja aufgrund ihrer spektakulären Eigenschaften interessante Anwendungen in vielen unterschiedlichen Feldern. Sind für diese hochinteressanten Materialien auch Anwendungen in Reichweite?

Dr. Leson: Bei Carbon Nanotubes (CNT) unterscheidet man zwischen einwandigen und mehrwandigen Röhren. Viele der interessanten Eigenschaften kommen nur bei einwandigen Röhren zum Tragen, die allerdings schwieriger herzustellen sind. Hier ist es uns gelungen, unseren eigenen Herstellungsprozess für hochwertige einwandige CNTs weiter aufzuskalieren und zu optimieren. Damit haben wir beispielsweise hochflexible transparente Elektroden hergestellt, die auch bei sehr hohen Dehnungen ihre guten elektrischen Eigenschaften beibehalten und dabei mehrwandige CNT um Größenordnungen übertreffen.



KOMPETENZEN

RÖNTGEN- UND EUV-OPTIK

Zur Abscheidung von Nanometer-Einzel- und Multischichten für EUV- und Röntgenoptiken setzen wir die Verfahren der Magnetron- und Ionenstrahl-Sputter-Deposition sowie der Puls-Laser-Deposition ein. Die Schichtsysteme genügen höchsten Ansprüchen hinsichtlich Schichtdicken-genauigkeit, Rauheit, chemischer Reinheit, lateraler Homogenität und Reproduzierbarkeit. Neben der Entwicklung und Herstellung von Präzisionsschichten bieten wir langjährige Erfah-rungen auf den Gebieten der Charakterisierung und Modellierung von Nanometerschichten an.

NANOTUBES UND -PARTIKEL

Am IWS entwickelte Verfahren zur Synthese einwandiger Carbon Nanotubes und nichtoxidi-scher Core-Shell-Nanopartikel können technisch relevante Mengen dieser Materialien mit besonderen Eigenschaften herstellen. Beide Materialklassen bewirken in Verbunden schon bei sehr geringen Anteilen völlig neue Funktionalitäten des Matrixmaterials und werden von uns in verschiedenen Qualitäten und Verarbeitungsstadien angeboten. Verbundentwicklungen kön-nen durch Modellierungen und umfangreiche Verbundcharakterisierungen begleitet werden.

KOHLSTOFFSCHICHTEN

Die vom IWS entwickelten amorphen Kohlenstoffschichten (Diamor®) eignen sich hervorragend als Schutzschichten und können mit sehr guter Haftung in einem weiten Schichtdickenbereich abgeschieden werden. Die Abscheidung erfolgt bei niedrigen Temperaturen im Vakuum mit speziell entwickelten Puls-Bogen-Verfahren. Für die industrielle Einführung der Diamor®-Schichten liefert das IWS zusammen mit Partner-Unternehmen neben der Technologie auch die erforderlichen Beschichtungsquellen und -anlagen sowie die laserakustische Prüftechnik LAwave® zur Qualitätssicherung und Schichtoptimierung.

PVD-SCHICHTEN

Verfahren der Physikalischen Dampfphasenabscheidung (PVD = Physical Vapor Deposition) erlauben die Abscheidung hochwertiger tribologischer und funktioneller Schichten im Dicken-bereich von wenigen Nanometern bis zu einigen zehn Mikrometern. Dazu stehen im IWS Verfahren von der Hochrate-Bedampfung bis hin zu hochaktivierten Plasmaverfahren sowie deren Kombinationen zur Verfügung. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die umfassende Nutzung von Bogenentladungen als der effektivsten Quelle energiereicher Dampfstrahlen.

ABTEILUNGSLEITER

DR. ANDREAS LESON

Telefon +49 351 83391-3317
andreas.leson@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

RÖNTGEN- UND EUV-OPTIK

DR. STEFAN BRAUN

Telefon +49 351 83391-3432
stefan.braun@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

NANOTUBES UND -PARTIKEL

DR. OLIVER JOST

Telefon +49 351 83391-3477
oliver.jost@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

KOHLENSTOFFSCHICHTEN

DR. VOLKER WEIHNACHT

Telefon +49 351 83391-3247
volker.weihnacht@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

PVD-SCHICHTEN

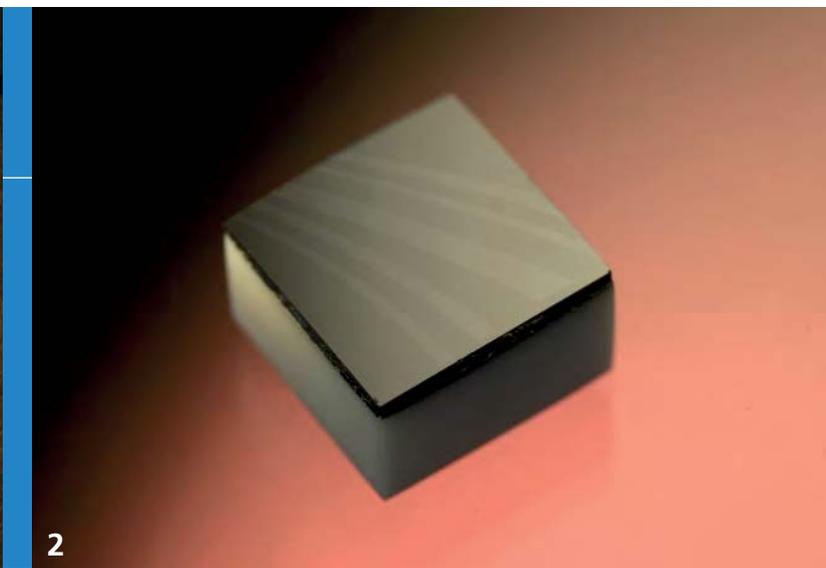
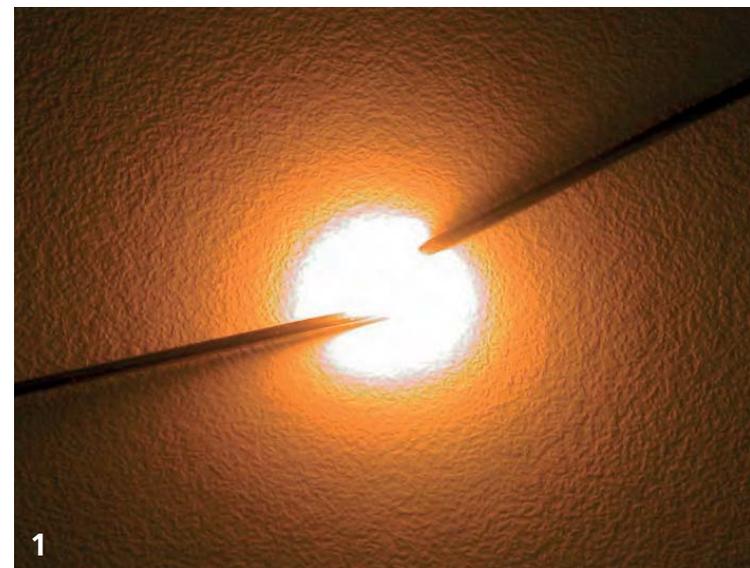
DR. OTMAR ZIMMER

Telefon +49 351 83391-3257
otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2010

1. Reaktive Nanometermultischichten: Maßgeschneiderte Wärmequellen für spannungsarmes Fügen 86
2. Hochflexible und hochtransparente Polymerelektroden auf CNT-Basis 88
3. Reibungs- und verschleißreduzierende Schichtsysteme für Vakuumanwendungen 90
4. Laser-Arc-Modul mit neuartigem Filter zur Abscheidung glatter, defektarmer ta-C-Schichten (Diamor®) 92
5. Der Einsatz von Kohlenstoffschichten in der Energietechnik 94
6. Reinigung von Metalloberflächen mittels elektrischer Entladungen an Atmosphäre oder im Vakuum 96



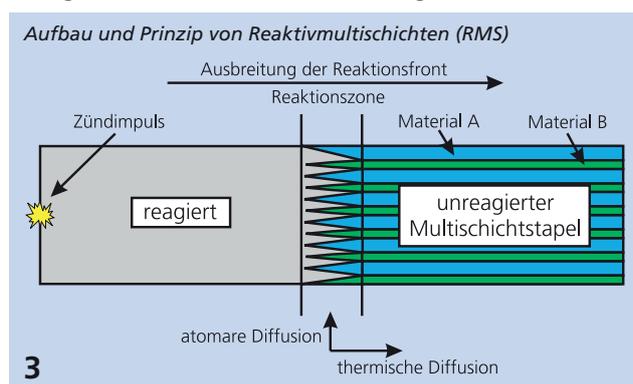
REAKTIVE NANOMETERMULTISCHICHTEN: MASSGESCHNEIDERTE WÄRMEQUELLEN FÜR SPANNUNGSARMES FÜGEN

DIE AUFGABE

Üblicherweise zum Fügen eingesetzte Löt- oder Schweißverfahren erfordern in der Regel eine Erwärmung größerer, an die Fügezone angrenzender Bereiche der zu verbindenden Bauteile. Veränderungen der Materialeigenschaften oder das Auftreten von Spannungen in der Fügezone aufgrund der thermischen Belastung könnten vermieden werden, wenn es gelänge, eine Wärmequelle bereit zu stellen, die punktgenau nur unmittelbar in der Fügezone Wärme erzeugt. Erfolgt diese Wärmeeinwirkung nur für kurze Zeit, können Lotmaterialien aufgeschmolzen werden, ohne dass die Grundmaterialien signifikant erwärmt werden müssen.

UNSERE LÖSUNG

Der Einsatz von Reaktivmultischichten (RMS) eröffnet die Möglichkeit, kurzzeitig Wärmeenergie lokal, äußerst präzise und reproduzierbar in die Fügezone einzubringen. Diese RMS bestehen aus Nanometer-Multischichten, deren hunderte bis tausende Einzelschichten im Ausgangszustand separiert vorliegen und exotherm miteinander reagieren können.



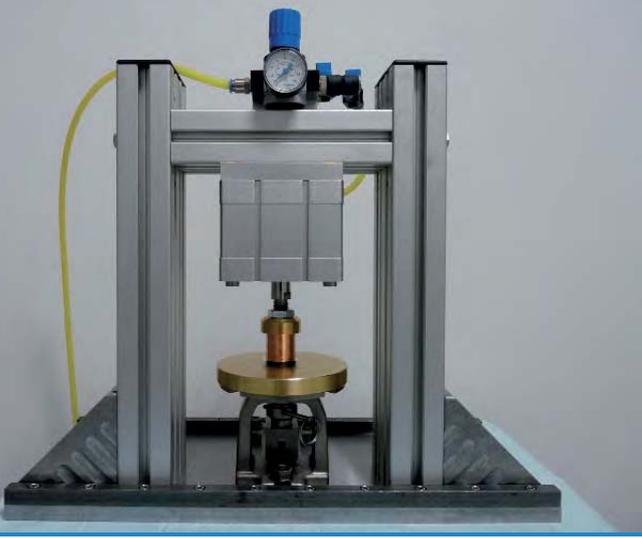
Durch das Einbringen einer Aktivierungsenergie wird an den Grenzflächen die atomare Diffusion der ursprünglich getrennt vorliegenden Materialien angeregt. Bei geeigneter Materialauswahl ist die atomare Interdiffusion mit einer exothermen chemischen Reaktion verbunden (z. B. $5 \text{ Ti} + 3 \text{ Si} \rightarrow \text{Ti}_5\text{Si}_3$), die sich selbstfortschreitend durch die gesamte RMS ausbreitet und Wärmeenergie zum Aufschmelzen von Loten bereitstellt. Mit Hilfe einer gezielten Einflussnahme auf das Schichtdesign ist es möglich, speziell an das Fügeproblem angepasste Wärmequellen herzustellen. Reaktivmultischichten können sowohl auf Bauteilebene als auch als freistehende Reaktivmultischichtfolie hergestellt werden. Belotungen sind ebenso möglich.

ERGEBNISSE

Im Fraunhofer IWS sind Reaktivmultischichten unterschiedlicher Materialkombinationen entwickelt worden. Experimentell bestimmte Maximaltemperaturen nach dem Zünden der RMS liegen derzeit im Bereich von 900 °C bis 1400 °C. Die mittels Differenzthermoanalyse vermessenen freiwerdenden Energiemengen liegen bei rund 1,4 bis 1,6 kJ g⁻¹. Die insgesamt freiwerdende Wärmemenge korreliert unmittelbar mit der Gesamtdicke der RMS, welche im Bereich von 10 µm bis derzeit ca. 60 µm liegen kann.

Ein weiterer wichtiger Parameter – die Geschwindigkeit der Reaktionsfront – kann durch das konkrete Design der RMS angepasst werden. Je niedriger die Periodendicken der RMS sind, desto kürzere Diffusionswege entstehen, was zu einer Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der thermischen Welle und damit der Reaktionsgeschwindigkeit führt.

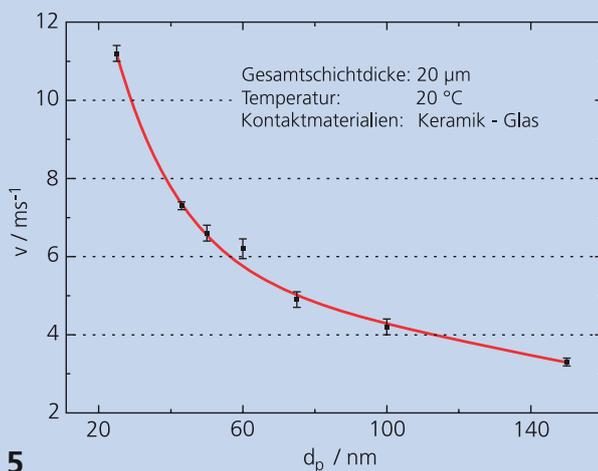
4



Aus der Differenzthermoanalyse (DTA) ist bekannt, dass sich infolge der Änderung der Periodendicke keine Änderung des Energieinhaltes der Reaktivmultischichten ergibt. Somit ist es möglich, RMS-Systeme genau an das Fügeproblem anzupassen.

- 1 Elektrische Zündung einer Reaktivmultischicht (RMS)
- 2 Fügung eines Si-Wafers mit Marcor Glaskeramik unter Anwendung von Reaktivmultischichten
- 4 Vorrichtung zum Druckbeaufschlagten Fügen mit Reaktivmultischichten

Ausbreitungsgeschwindigkeit der Reaktionsfront in Abhängigkeit von der Periodendicke der Reaktivmultischicht



5

Aus der Nutzung von Reaktivmultischichten ergeben sich zahlreiche Vorteile. So kann die freisetzbare Wärmemenge exakt dosiert werden, da die chemische Reaktion der RMS aufgrund ihres definierten Lagenaufbaus berechenbar ist. Weiterhin findet aufgrund der extrem geringen Prozesszeiten von weniger als einer Sekunde keine signifikante Volumenerwärmung der zu fügenden Bauteile statt. Vielmehr wird die Wärme sehr lokal und kurzzeitig direkt in der Fügezone freigesetzt, so dass auch thermosensitive Bauteile und Werkstoffe mit extrem unterschiedlichen thermodynamischen Kennwerten, wie zum Beispiel Metalle mit Keramiken, ffügbar sind. Aufgrund des definierten RMS-Aufbaus wird eine gute Reproduzierbarkeit der Fügungen gewährleistet. Gegenüber Klebverbindungen bietet das Fügen mit Reaktivmultischichten den Vorteil des Herstellens einer elektrisch und thermisch gut leitenden metallischen Verbindung. Weiterhin ist zu erwarten, dass die Fügeverbindung nicht ausgast oder altert. Zudem

benötigt die exotherme Reaktion der Reaktivmultischicht keinen Sauerstoff. So sind auch Sondereinsatzfälle, wie das Fügen unter Vakuum, Schutzgas oder auch unter Wasser möglich.

Die Anwendung der RMS zum Fügen ist im IWS bisher für folgende Materialkombinationen erfolgreich erprobt worden: Messing-Messing, Keramik-Silizium, Invar-Silizium, Silizium-Silizium, Keramik-Edelstahl. Prinzipiell ist jedoch zu erwarten, dass sich das Fügen mit RMS für beliebige Materialkombinationen anwenden lässt.

Die Nutzung der Reaktivmultischichten zum Fügen bietet sich immer dann an, wenn konventionelle Fügeverfahren nicht anwendbar sind. Besondere Vorteile des RMS-Fügens ergeben sich bei Präzisionsfügungen in der Mikrosystemtechnik, Optik oder Feinwerktechnik, im Maschinen- und Anlagenbau, sowie in der Fahrzeug- und Flugzeugtechnik.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Georg Dietrich
Telefon: +49 351 83391-3287
georg.dietrich@iws.fraunhofer.de



1

2

200 nm

HOCHFLEXIBLE UND HOCHTRANSPARENTE POLYMERELEKTRODEN AUF CNT-BASIS

DIE AUFGABE

Sowohl flexiblen als auch transparenten Elektroden werden große Marktchancen vorausgesagt. In besonderem Maße gilt dies, wenn man beides – Flexibilität und ausreichende Transparenz – miteinander kombinieren kann, zum Beispiel für taktile Displays in Consumer-Anwendungen oder auch in der Automobilindustrie. Der Standard für transparente Elektroden basiert derzeit auf dem keramischen Material Indium-Zinn-Oxid (ITO), welches aufgrund seiner keramischen Natur nur schwer in Polymere integrierbar ist und kaum Flexibilität erlaubt.

Flexible Elektroden bestehen meist aus sehr dünnen und intransparenten metallischen Schichten, mit Graphit gefülltem Silikonöl oder aus Polymeren, die eine hohe Zahl (oft mehr als 30 %) an leitfähigen Partikeln (Silberpartikel, Leitruße, feine Metalldrähte) enthalten. Mit diesen Werkstoffen lässt sich eine gute und stabile Leitfähigkeit bei gleichzeitig guter und stabiler Flexibilität nicht erreichen. Der Kompromiss führt entweder zu niedrigen Leitfähigkeiten oder zu einer kurzen Lebensdauer.

Die für ihre besonders hohe elektrische Leitfähigkeit bekannten Kohlenstoff-Nanoröhren könnten hierfür eine interessante Variante darstellen.

UNSERE LÖSUNG

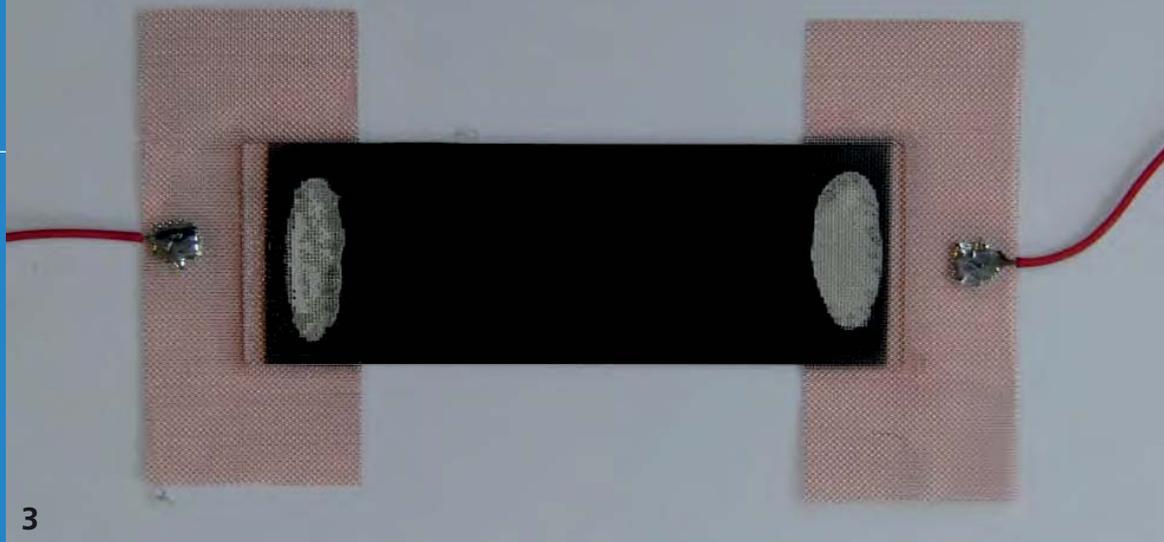
Das Fraunhofer IWS entwickelte ein großtechnisches Verfahren für die maßgeschneiderte Herstellung und Modifikation von einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhren (SWCNT). Derzeit verfügt das Institut über eine weltweit einmalige Herstellmöglichkeit von knapp 500 g überwiegend metallischer SWCNT je

Tag. Die SWCNT werden gereinigt und geeignet funktionalisiert. Halbleitende SWCNT werden zur Verbesserung der Leitfähigkeit p-dotiert. Durch die sehr schonende Weiterverarbeitung und die bei der Herstellung erreichte Defektarmut bleibt die ursprüngliche SWCNT-Länge über sämtliche Weiterverarbeitungsschritte weitgehend erhalten. Die im Mittel mehr als 10 µm langen einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhren bieten beste Voraussetzungen sowohl für eine niedrige Perkolationsschwelle in Polymeren als auch für besonders gute Leitfähigkeiten im perkolierenden Netzwerk.

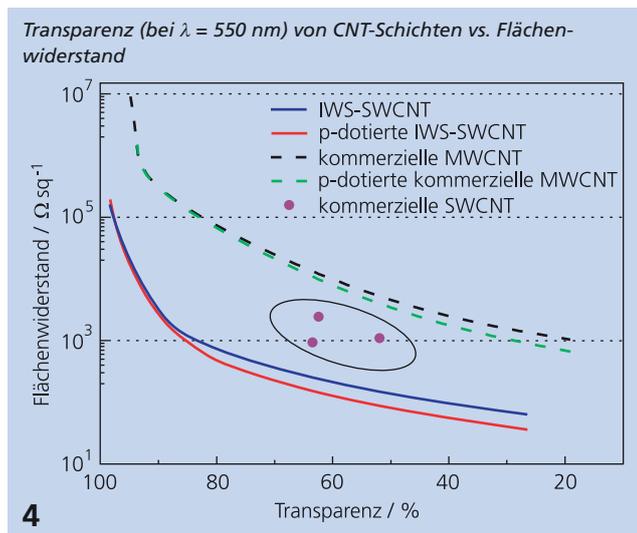
Um die Passfähigkeit der Röhren mit flexiblen, transparenten Polymerfolien nachzuweisen, wurden die SWCNT des Fraunhofer IWS auf eine ca. 100 µm dicke Silikonfolie mit einer aktiven Fläche von 50 mm x 25 mm aufgesprüht. In einigen Versuchen wurde die SWCNT-beschichtete Oberfläche anschließend mit einer weiteren Silikonschicht infiltriert, vernetzt und ausgehärtet, so dass eine SWCNT/Silikon-Kompositschicht zwischen zwei reinen Silikonschichten vorliegt (Abb. 1 und 2).

ERGEBNISSE

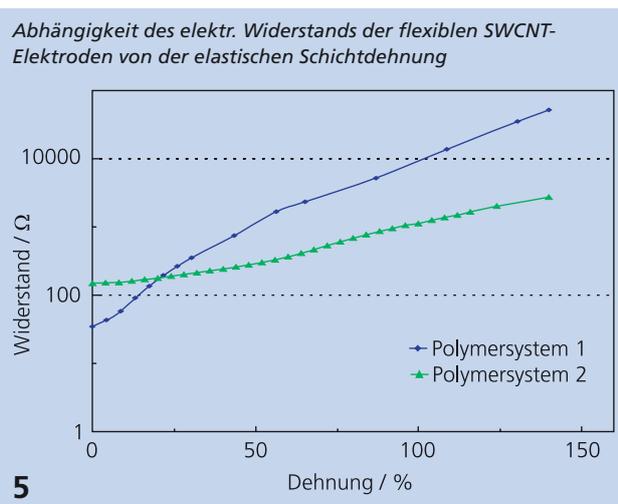
Abb. 4 zeigt den Flächenwiderstand der dotierten und undotierten IWS-SWCNT in Abhängigkeit von der Transparenz der Schichten. Bei abgeschiedenen $0,15 \mu\text{g SWCNT} / \text{cm}^2$ (Transparenz > 98 %) wird von den IWS-SWCNT die Perkolationsschwelle überschritten, antistatisches Verhalten liegt vor. Bei einer SWCNT-Schichtdicke von ca. 20 nm und einer Transparenz von 90 % haben die SWCNT-Schichten einen Flächenwiderstand R_{\square} von ca. 2000 - 3000 Ω / sq erreicht (ITO: $R_{\square} \approx 100 \Omega / \text{sq}$). Aufgrund der einfachen und unkomplizierten Herstellung solcher dünner SWCNT-Schichten



bei geringstem Masseinsatz können die SWCNT-Schichten für diesen Schichtdickenbereich bereits als ernsthafte ITO-Alternative angesehen werden. Speziell bei kleinen Schichtdicken (und damit großer Transparenz) ist zudem die Überlegenheit der IWS-Lösung gegenüber den Kohlenstoff-Nanoröhren anderer Hersteller (einwandig und mehrwandig) bemerkenswert (Abb. 4).



Für flexible Elektroden sind SWCNT-Schichten mit Schichtdicken $\leq 5 \mu\text{m}$ aufgrund der guten mechanischen Adaptation von Vorteil. Für diesen Schichtdickenbereich (Abb. 3) sind mit dotierten SWCNT spezifische Leitfähigkeiten von $>5000 \text{ S/cm}$ und Dehnungen bis zu 250 % ohne Delaminationen oder Abrisse erreicht worden, was sich in kontinuierlichen Widerstandsänderungen äußert (Abb. 5). Dehnungen bis ca. 70 % erzeugen dabei reversible Widerstandsänderungen. Je nach Polymersystem kommt es bei Dehnungen zu unterschiedlichen Ausgangsleitfähigkeiten und Widerstandsänderungen (Abb. 5). Die Leitfähigkeiten polymerinfiltrierter Schichten müssen somit spezifisch für jedes Polymersystem optimiert werden.

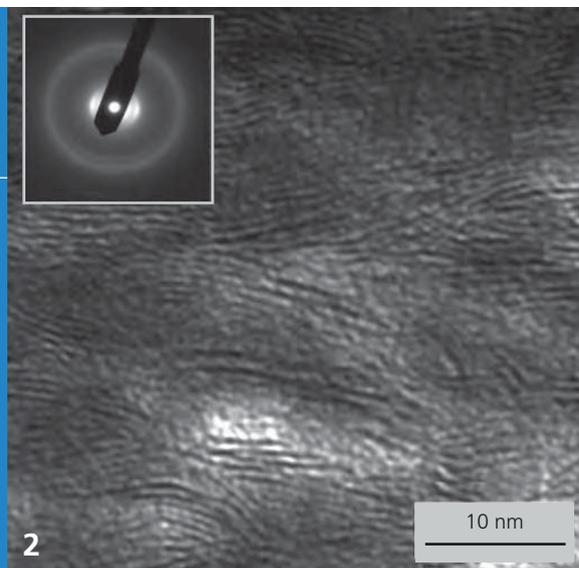
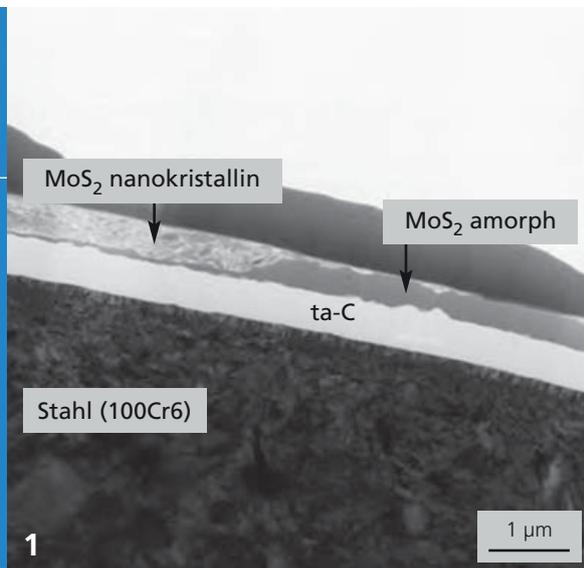


- 1 80 nm dicke Silikon/SWCNT-Kompositschicht zwischen zwei reinen Silikonschichten mit 66 % Transparenz
- 2 Gesprühte SWCNT-Schicht im Elektronenmikroskop
- 3 800 nm dicke Silikon/SWCNT-Kompositschicht

KONTAKT

Dipl.-Ing. Esther Roch Talens
 Telefon: +49 351 83391-3531
 esther.roch.talens@iws.fraunhofer.de





REIBUNGS- UND VERSCHLEISSREDUZIERENDE SCHICHTSYSTEME FÜR VAKUUMANWENDUNGEN

DIE AUFGABE

Wenn mechanische Komponenten wie Zahnräder, Lager oder Gleitschienen unter Vakuum eingesetzt werden, stellen sich im Vergleich zu konventionellen Bedingungen völlig neue Herausforderungen bezüglich ihrer Schmierfähigkeit und damit ihres Reibungs- und Verschleißverhaltens. So können bei derartigen Komponenten, wie sie bei Satelliten und Weltraummissionen sowie (mikro-)mechanischen Systemen unter technischen Vakuumbedingungen zu finden sind, keine flüssigen Schmierstoffe verwendet werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die natürliche Bildung von schützenden Deckschichten durch Wasser und Luftsauerstoff im Vakuum unterbunden ist und die ungeschmierten tribologischen Kontaktpartner auch bei niedrigen Lasten zum Fressen bzw. zu Kaltaufschweißungen neigen.

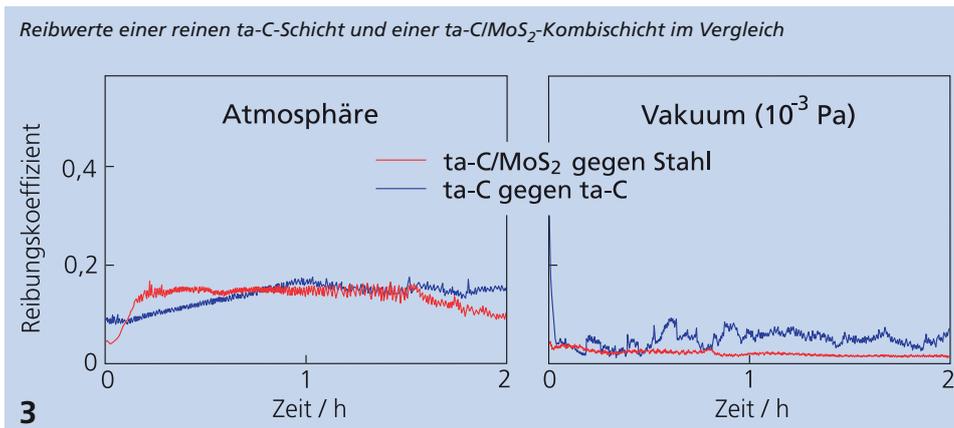
Auswege ergeben sich in erster Linie aus der Aufbringung von Festschmierstoffschichten wie MoS₂. Hochwertige MoS₂-Schichten lassen sich beispielsweise durch Sputterverfahren herstellen. Trotz der Vorteile dieser Schichten mit außerordentlich niedrigen Reibungswerten im Vakuum ist deren Verschleißfestigkeit begrenzt und die Schichten versagen relativ schnell an Atmosphäre. Diamantartige Kohlenstoffschichten (DLC- bzw. a-C:H- und ta-C-basierte Schichten) eignen sich dagegen hervorragend unter trockenen atmosphärischen Bedingungen, verlieren aber ihre guten Eigenschaften meist im Vakuum. Eine Ausnahme bilden a-C:H-basierte Schichten mit einem sehr hohen Wasserstoffanteil, die jedoch ebenfalls nur eine begrenzte Verschleißfestigkeit besitzen. Daher besteht weiterhin ein großer Bedarf an Schichtsystemen, welche die Anforderungen an niedrige Reibung und Verschleiß sowohl unter Vakuum- als auch unter atmosphärischen Bedingungen zuverlässig gewährleisten.

UNSERE LÖSUNG

In einem vom BMWi geförderten IGF-Vorhaben mit den Partnern Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) wurden vom IWS mehrere Varianten von ta-C- und MoS₂-Einzel- und Kombischichten systematisch untersucht. Unter Nutzung der Laser-Arc-Technologie wurden zunächst reine ta-C-Schichten, dann gemischte ta-C/MoS₂-Schichten sowie verschiedenartig gestapelte ta-C/MoS₂-Schichten hergestellt und im Vakuumtribometer an der BAM getestet.

ERGEBNISSE

Zunächst wurde mit der Abscheidung reiner ta-C-Schichten mittels Laser-Arc-Verfahren begonnen. Die tribologischen Tests erfolgten in Kugel-Scheibe-Anordnung sowohl in Luft als auch im Hochvakuum bei einer Pressung von maximal 1000 MPa. Dabei zeigte sich, dass im Gegensatz zu den bisher in der Fachliteratur untersuchten DLC-Schichten die ta-C-Schichten bei beidseitiger Beschichtung der Tribopartner im Hochvakuum sogar bessere Reibwerte aufweisen als an Luft (Abb. 3). Mit den niedrigen Reibwerten geht auch ein niedriger Verschleiß einher.



Neben reinen ta-C- und MoS₂-Schichten wurden eine Reihe von ta-C/MoS₂-Mischschichten und Multilagen-Schichten mittels Laser-Arc-Verfahren hergestellt und im Tribometer unter Luft- und Vakuumbedingungen analysiert. Dabei erwies sich ein einfach gestapeltes Kombinations-Schichtsystem aus einer ta-C-Basisschicht sowie einer MoS₂-Deckschicht als vielversprechendste Variante.

Die gemessenen Reibwerte dieser optimierten ta-C/MoS₂-Kombischichten überzeugen sowohl an Luft als auch im Hochvakuum. Die Reibwerte an Luft liegen mit Werten von ca. 0,15 vergleichsweise niedrig. Im Hochvakuum werden mit Reibungskoeffizienten von 0,008 bis 0,02 außerordentlich niedrige Werte erreicht. Diese bleiben auch im Langzeitversuch mit noch höherer Last von maximal 1250 MPa über 24 Stunden stabil. Mit der ta-C-Basisschicht erhält das Schichtsystem eine abrasiv-verschleißfeste Reserve, die MoS₂-Deckschicht sorgt für das signifikant niedrige Reibwertniveau im Vakuum. Wie die TEM-Untersuchungen zeigen, sind die MoS₂-Schichten zunächst amorph, wandeln sich jedoch partiell unter dem Einfluss der mechanischen Belastung in nanokristalline Bereiche um.

- 1 TEM-Querschnittsaufnahme einer ta-C/MoS₂-Kombinationsschicht. Im Bereich des mechanischen Tribokontaktes kommt es zur lokalen Kristallisation der ansonsten amorphen MoS₂-Schicht.
- 2 TEM-Hochauflösungsbild des Bereiches »MoS₂-nanokristallin« sowie Feinbereichs-Beugungsbild (kleiner Ausschnitt). Die (0002)-Basalebene des MoS₂ ist parallel zur Oberfläche orientiert.

KONTAKT

Dr. Volker Wehnacht
 Telefon: +49 351 83391-3247
 volker.wehnacht@iws.fraunhofer.de





LASER-ARC-MODUL MIT NEUARTIGEM FILTER ZUR ABSCHIEDUNG GLATTER, DEFEKTARMER TA-C-SCHICHTEN (DIAMOR®)

DIE AUFGABE

Der klassische Weg der Reduzierung von Reibung ist eine ausreichende Schmierung. Bei deren Ausfall oder bei Anwendungen, wo nicht geschmiert werden kann oder darf, werden Reibung und Verschleiß ausschließlich durch Oberflächeneigenschaften der eingesetzten Materialien bestimmt. Große Fortschritte wurden durch Einsatz von neuartigen Hartstoff- und kohlenstoffbasierenden Schichten in Verbindung mit modifizierten Schmierstoffen (Additive) erzielt. Dabei besitzen wasserstofffreie ta-C Schichten das höchste Potenzial zur Reibungs- und Verschleißreduzierung.

Klassische DLC-Schichten (a-C:H, Me-C:H) fanden schnell Einzug in die industrielle Anwendung, da sie mit einer geringfügig modifizierten Anlagentechnik für die Abscheidung von Hartstoffschichten (z. B. TiN/CrN) abgeschieden werden. Dem wachsenden Interesse am industriellen Einsatz von ta-C-Schichten konnte bisher nicht nachgekommen werden, da für ihre Abscheidung eine neuartige Plasmaquelle benötigt wird, die zwar im Labormaßstab, aber nicht für industriell genutzte Anlagentechnik zur Verfügung stand.

Wasserstofffreie ta-C-Schichten mit hohem Diamantbindungsanteil bilden sich unter Vakuumbedingungen und bei niedrigen Temperaturen durch das Auftreffen von energetischen Kohlenstoffionen auf die zu beschichtende Oberfläche. Die erforderlichen Ionen können durch kurze, hochenergetische Laserimpulse von einem Target oder bei einer (gepulsten) Bogenentladung zwischen einer Kathode und Anode unter Vakuumbedingungen erzeugt werden. Als geeignete Quelle

für den industriellen Einsatz hat sich die im Fraunhofer IWS entwickelte lasergesteuerte, gepulste Bogenentladung (Laser-Arc) erwiesen.

UNSERE LÖSUNG

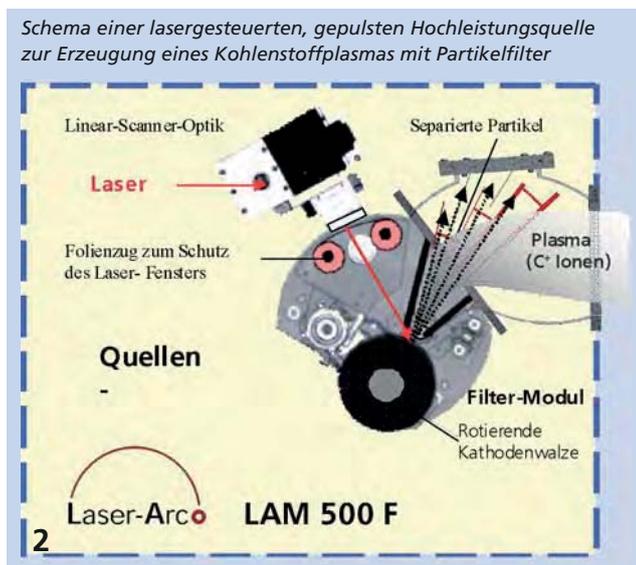
Beim Laser-Arc wird mit Hilfe eines kurzen Laserpulses (ca. 120 ns Pulslänge) auf einer rotierenden Graphitwalze (Kathode) ein Bogenpuls mit Spitzenströmen von ca. 1,5 kA gezündet (Abb. 2). Dessen Dauer ist auf 130 - 330 Mikrosekunden begrenzt. Durch die Rotation der Walze und die lineare Ablenkung des Laserstrahls über die gesamte Länge der Walze werden ein homogener Abtrag, eine hohe Ausnutzung des Kathodenmaterials und somit konstante Beschichtungsbedingungen gewährleistet. Die unter industriellen Bedingungen mit zwei- bzw. dreifach rotierenden Bauteilen / Werkzeugen in einem entsprechenden Substrathalter (Planetary) erforderlichen Beschichtungsraten werden durch eine hohe Folgefrequenz (ca. 600 Hz) erzielt. Durch die Anordnung der rotierenden Kathodenwalze gemeinsam mit der Anodenanordnung in einer separaten Kammer kann diese Quelle mittels eines Adapterflansches mit handelsüblicher Beschichtungstechnik verbunden werden. Mittels einer Linear-Scanner-Optik erfolgt die gesteuerte Führung des Laserstrahls über die gesamte Kathodenlänge. Das Laserfenster wird durch einen automatisierten Folienzug vor Streubeschichtung geschützt, so dass ein Dauerbetrieb der Quelle gewährleistet wird.

ERGEBNISSE

Im Rahmen eines von der SAB geförderten Projektes (FZK (PT) 0030/007) wurde gemeinsam mit dem Industriepartner Vakuumtechnik Dresden GmbH (VTD) der Laser-Arc-Modul LAM 500 entwickelt, der eine homogene Beschichtung über eine Höhe von 500 mm ermöglicht. Die Quellenkammer des LAM 500 wurde so gestaltet, dass sie über einen Adapterflansch an die Beschichtungsanlage DREVA 600 angepasst ist, um die industrielle Abscheidung von ta-C-Schichten auf Bauteilen und Werkzeugen mit einer Dicke bis 10 µm zu gewährleisten. Die Oberflächenrauheit solcher Schichten wird durch den Einbau von Teilchen, die von der Graphitkathode emittiert werden, für viele Anwendungen zu groß. Um die Oberflächenrauheit an die der Einsatzbedingungen anzupassen, ist deshalb zuweilen ein Glättungsprozess erforderlich.

Adapterflansch zwischen Quellenkammer und Beschichtungsanlage platziert wird (Abb. 1, 2). Im Filterbetrieb werden glatte, defektarme ta-C-Schichten abgeschieden, die hinsichtlich ihrer Oberflächenqualität denen der Einsatzbedingungen entsprechen. Die Abscheiderate reduziert sich lediglich um etwa 40 %.

Vorteilhaft ist zudem, dass das komplette LAM 500 in allen Grundfunktionen und seinen Komponenten (Steuerlaser, Impulsstromquelle, Steuereinheit) unverändert und uneingeschränkt genutzt werden kann, ebenso, dass ein vollautomatisierter Abscheideprozess gesichert bleibt.



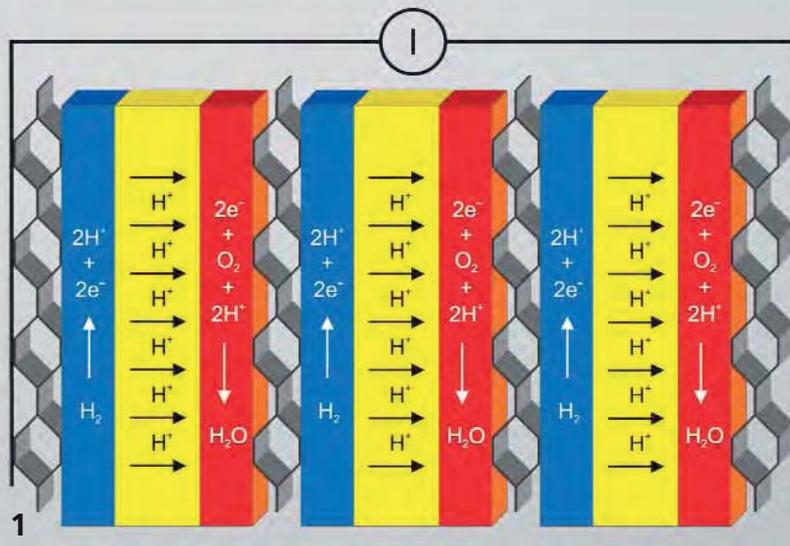
1 Beschichtungsanlage DREVA 600 mit integrierter LAM 500 Plasmaquelle mit Filter-Modul im Fraunhofer IWS Dresden

Dieser zusätzliche Prozessschritt kann eingespart werden, indem ein im IWS entwickelter, patentierter und im Labormaßstab erprobter Prozess der Separierung der emittierten Teilchen aus dem Plasma eingesetzt wird. Dies kann durch eine Filtereinheit in Form eines Moduls erreicht werden, der anstelle des

KONTAKT

Dr. Hans-Joachim Scheibe
 Telefon: +49 351 83391-3455
 hans-joachim.scheibe@iws.fraunhofer.de





DER EINSATZ VON KOHLENSTOFFSCHICHTEN IN DER ENERGIETECHNIK

DIE AUFGABE

Energie – ihre nachhaltige Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung – ist eines der großen Zukunftsthemen unserer Zeit. Über 6 Milliarden Menschen weltweit mit steigenden Bedürfnissen einerseits und unsere natürliche Umgebung mit begrenzten Ressourcen und endlichem Aufnahmepotenzial für CO₂ andererseits verlangen nach intelligenten Lösungen. Dies gilt insbesondere für den Individualverkehr: Von den knapp 10 Tonnen CO₂, die jeder Deutsche pro Jahr (2008) »erzeugt«, sind im Mittel 2,6 Tonnen Pkw-Emissionen.

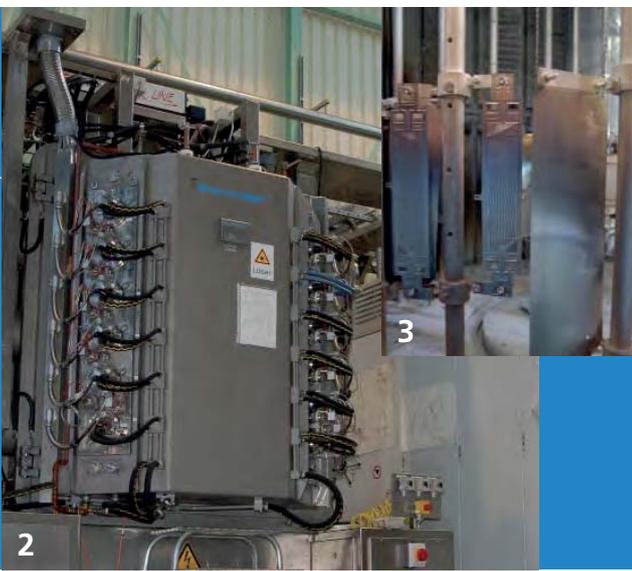
Fachleute sind sich daher weitgehend einig, dass die Zukunft dem Elektromotor gehört. Unklar ist hingegen noch, woher die benötigte elektrische Energie kommen soll: von mit Generatoren gekoppelten Verbrennungsmotoren, Batterien, Supercaps oder Brennstoffzellen. All diese Technologien weisen gegenüber dem Verbrennungsmotor noch Nachteile auf, so dass bereits im Markt befindliche Elektrofahrzeuge zumeist eine Kombination mehrerer dieser Technologien einsetzen (Hybridfahrzeuge). Um mit der über hundertjährigen Optimierung des Verbrennungsmotors gleichzuziehen, ist daher noch ein hoher Entwicklungsaufwand nötig.

UNSERE LÖSUNG

Bei modernen Verbrennungsmotoren gehen 25 % der im Motor erzeugten Leistung durch Reibung verloren. Das Fraunhofer IWS hat auf der Grundlage seiner Werkstoffkompetenz eine Schicht aus reinem Kohlenstoff entwickelt, die sehr hohe Härte und Verschleißbeständigkeit mit einem niedrigen Reibungskoeffizienten vereint: Diamor®. Mit dem gefilterten Laser-Arc wurde darüber hinaus ein Verfahren entwickelt, das für die Abscheidung sehr glatter, reib-

mindernder Schichten besonders gut geeignet ist. Gemeinsam mit führenden Automobilherstellern und -zulieferern werden derzeit Bauteile des Antriebsstrangs bemustert, um durch eine Beschichtung mit Diamor® die Reibung zu reduzieren und CO₂-Einsparpotenziale bei den im Einsatz befindlichen Verbrennungsmotoren zu realisieren.

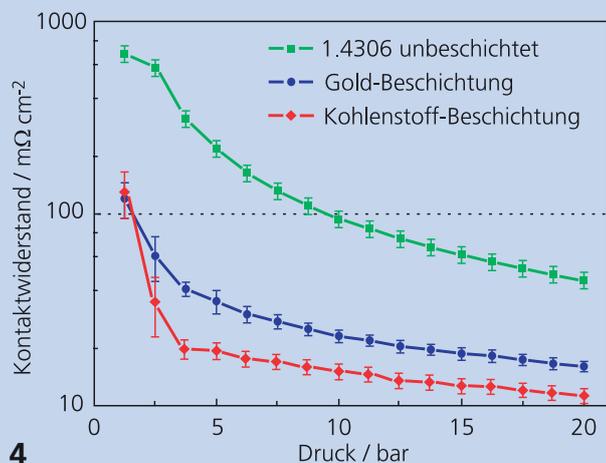
Dünne Metallfolien, wie sie für stromführende Teile von Brennstoffzellen und Batterien eingesetzt werden, weisen aufgrund ihrer schlecht leitenden, nativen Passivschichten (Cr₂O₃ bei Edelstahl, Al₂O₃ bei Aluminium) hohe Übergangswiderstände auf, die Verluste produzieren und damit die Effizienz des Aggregats reduzieren. Eine am Fraunhofer IWS entwickelte Modifikation des Diamor®-Abscheidungsprozesses erlaubt es, statt harter, diamantartiger Kohlenstoffschichten amorphe Schichten abzuscheiden, in denen die graphitische Bindung überwiegt und die daher eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen (GLC: graphite like carbon). Durch die Beschichtung von Metallfolien ist es möglich, die Vorteile der Metalle (niedriger Preis, gute Verarbeitbarkeit, mechanische Stabilität) mit denen des Graphits (hohe Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit) zu verbinden. Diese werkstoffkundliche Innovation erlaubt es, in Zukunft kleinere, leichtere und effizientere Brennstoffzellenstapel für die Pkw-Traktion sowie effizientere Hochleistungsbatterien mit längerer Lebensdauer zu entwickeln.



ERGEBNISSE

Durch die Beschichtung von 0,1 mm dicken Edelstahlfolien mit GLC kann der Kontaktwiderstand gegenüber dem unbeschichteten Ausgangsmaterial signifikant gesenkt werden und ist sogar geringer als der einer Goldbeschichtung (Abb. 3). Dies erlaubt die Nutzung der beschichteten Edelstahlfolien für die Herstellung von Bipolarplatten von Brennstoffzellenstapeln, die damit kleiner, leichter und effizienter gestaltet werden können.

Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes von unbeschichtetem, mit Gold und mit GLC beschichtetem Edelstahl 1.4306 vom mechanischen Anpressdruck

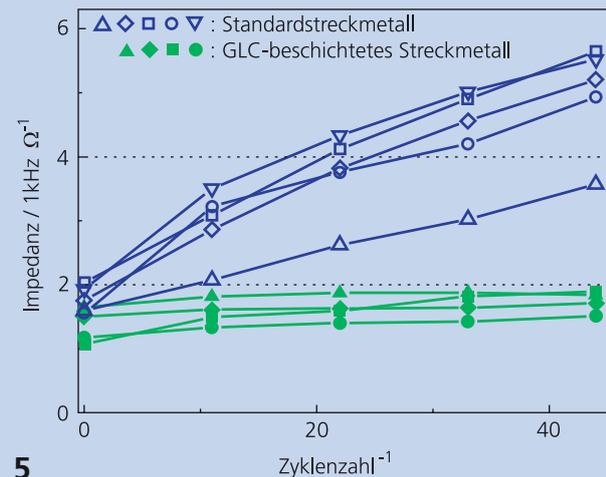


4

Das gleiche Prinzip kann auch erfolgreich auf Batterien angewendet werden. Hier werden anoden- und kathoden-seitig Aluminium- und Kupfer-Streckmetallfolien verwendet, um der Batterie elektrische Ladung zuzuführen (beim Laden) oder sie zu entnehmen (während der Fahrt). Auch hier bewirkt die natürliche Oxidschicht der verwendeten Metalle Effizienzverluste. Wie erste Messungen an Testzellen zeigen, die mit GLC-beschichtetem Streckmetall aufgebaut wurden, ist deren Übergangswiderstand gering und ändert sich auch bei mehrfachem Be- und Entladen nicht, im Gegensatz zu Zellen aus

unbeschichtetem Streckmetall (Abb. 4). Dies lässt, nach entsprechender Entwicklung, für die Zukunft Hochleistungs-batterien mit erhöhter Performance und längerer Lebensdauer erwarten.

Abhängigkeit der Impedanz von Nokiaformatbatterien (3,2 x 5,6 cm²) von der Zahl der Lade- / Entladezyklen für Testzellen mit Stromableitern aus unbeschichtetem Al-Streckmetall (Standard) und solchen aus GLC-beschichtetem Al-Streckmetall



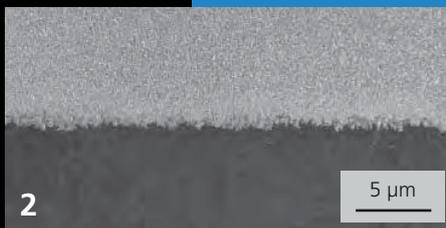
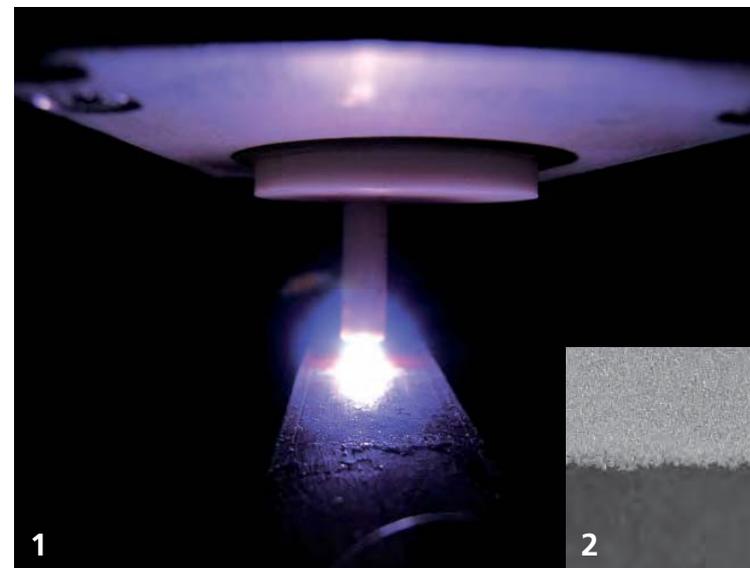
5

- 1 Schema eines Brennstoffzellenstacks, bestehend aus drei Zellen (grau: Bipolarplatten)
- 2 Beschichtungsanlage
- 3 Blick in die geöffnete Anlage mit beschichteten Testblechen

KONTAKT

Dr. Thomas Stucky
Telefon: +49 231 844-3888
thomas.stucky@iws.fraunhofer.de





REINIGUNG VON METALLOBERFLÄCHEN MITTELS ELEKTRISCHER ENTLADUNGEN AN ATMOSPHERE ODER IM VAKUUM

DIE AUFGABE

Die Reinigung bzw. Konditionierung von Metalloberflächen ist eine häufige Aufgabenstellung in vielen Bereichen der Technik. Dies betrifft insbesondere Füge- oder Beschichtungsprozesse, aber auch Umformungen oder sonstige mechanische Bearbeitungen können eine vorherige Reinigung erfordern. Je nach Art der Verunreinigung steht eine Vielzahl von Reinigungsverfahren zur Verfügung.

Die Nutzbarkeit dieser Verfahren hängt in starkem Maße von der konkreten Reinigungsaufgabe und dem vorhandenen Umfeld ab. Sind beispielsweise nur wenige Teile von groben Verschmutzungen zu reinigen, können mechanische Verfahren sehr sinnvoll eingesetzt werden. Für großflächige Reinigungen kommen häufig chemische Verfahren zum Einsatz, die kontinuierlich betrieben werden können. Aufgrund steigender Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit sind jedoch die klassischen Reinigungsverfahren in der Nutzbarkeit mehr und mehr eingeschränkt. Mechanische Reinigungseinrichtungen unterliegen hohem Verschleiß (Bürsten) bzw. erzeugen erhöhten Aufwand zur Handhabung der Hilfsstoffe (Strahlgut beim Sandstrahlen). Chemische Verfahren erfordern umfangreiche Aufbereitungs- und Sicherheitstechnik, um relevante Umweltschutzbestimmungen zu erfüllen. Es besteht daher ein Bedarf an Reinigungsverfahren, die wirtschaftlich betrieben werden können, für verschiedenste Anwendungen geeignet sind und die ohne Hilfs- oder Abfallstoffe arbeiten.

UNSERE LÖSUNG

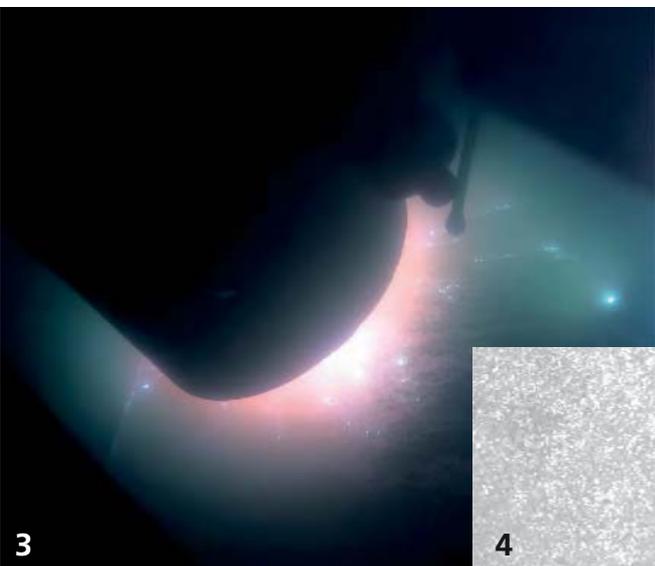
Elektrische Bogenentladungen eignen sich prinzipiell zum ortsselektiven wie zum großflächigen Abtrag von Oberflächen, sowohl an normaler Umgebungsatmosphäre als auch unter Vakuumbedingungen.

Ortsselektive Reinigung an Atmosphärendruck:

Mit einer gepulsten Hochspannungsentladung können Oberflächen unter Atmosphärenbedingungen ortsselektiv abgetragen werden. Der Aufbau besteht aus dem zu reinigenden Werkstück und einer Elektrode, die in wenigen Millimetern Abstand zur Werkstückoberfläche angeordnet ist. Ein Generator erzeugt Spannungsimpulse, die zu einer kurzzeitigen elektrischen Entladung zwischen Werkstück und Elektrode führen. Diese Entladung führt zu einem räumlich begrenzten Abtrag der Werkstückoberfläche. Werden die Entladungen kontinuierlich wiederholt und die Elektrode über das Werkstück bewegt, kann ein flächiger Materialabtrag erreicht werden. Durch Variation von Entladungsstromstärke, Frequenz und Verfahrensgeschwindigkeit der Elektrode werden Abtragtiefe und Bearbeitungsgeschwindigkeit gezielt eingestellt. Darüber hinaus ist es möglich, in die Bearbeitungszone Prozessgase einzublasen. Damit kann der Reinigungsprozess z. B. durch das Austreiben von Reaktionsprodukten oder die Vermeidung der Bildung neuer Beläge unterstützt werden.

Großflächige Reinigung im Vakuum:

Die aus der Beschichtungstechnik bekannte Gleichstrom-Vakuumbogenentladung stellt ein effektives Werkzeug zum großflächigen Abtrag von Oberflächen dar. Unter Vakuum-



3



4

bedingungen können metallische Oberflächen mit hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit gereinigt werden. Der Aufbau besteht aus dem zu reinigenden Metall und einer Gegenelektrode in der Bearbeitungskammer. Darüber hinaus wird ein Generator zum kontinuierlichen Betrieb der Entladung benötigt. Die Entladung erzeugt mikroskopisch kleine Brennflecken auf der Metalloberfläche, die sich mit hoher Geschwindigkeit über diese bewegen. Innerhalb dieser Brennflecken wird das Material schlagartig verdampft, wobei nur eine wenige Mikrometer dicke Schicht abgetragen wird. Der Rest des Werkstückes wird nur mäßig erwärmt. Auf Grund der schnellen Bewegung der Brennflecken erfolgt der Abtrag linienförmig sowie bei entsprechender Überlagerung flächig. Die Bewegung der Brennflecken kann durch die geometrische Gestaltung der Elektroden oder auch durch extern angelegte Magnetfelder gesteuert werden. Durch parallelen Betrieb mehrerer Elektroden wird die Bearbeitungsfläche vergrößert.

ERGEBNISSE

Beide Verfahren wurden zur Reinigung von Metalloberflächen eingesetzt. Sie wurden speziell für die Entfernung fester Verunreinigungen, wie z. B. Zunder, entwickelt. Aber auch die Entfernung von Ölen oder Fetten konnte mit diesen Verfahren bereits erfolgreich demonstriert werden. Das ortselektive Verfahren an Atmosphärendruck eignet sich besonders dort, wo begrenzte Flächen für eine Weiterverarbeitung vorbereitet werden müssen. Das kann z. B. die Vorbereitung zum Fügen (Schweißen, Kleben) sein. Abb. 2 zeigt eine Metalloberfläche, die mit Hilfe gepulster Entladungen partiell gereinigt wurde. Die Reinigung erfolgt rein elektrisch, es werden keine Hilfsstoffe benötigt. Als Arbeitsgas wird in der Regel Luft, in besonderen Fällen Stickstoff oder Argon verwendet.

Abb. 4 zeigt eine Metalloberfläche, die mit dem hochproduktiven Reinigungsprozess im Vakuum gereinigt wurde. Die Reinigung erfolgt unter Feinvakuumbedingungen. Die Bearbei-

tungsgeschwindigkeit hängt von der Charakteristik der verwendeten Entladung und vom Versuchsaufbau ab und kann in weiten Bereichen eingestellt werden. Flächenabtragsraten von mehreren Quadratmetern pro Sekunde sind technisch beherrschbar. Da der Reinigungsprozess eine leichte Aufrauung der Oberfläche bewirkt, eignet sich dieses Verfahren besonders für die Vorbereitung von Fügeprozessen, wie z. B. für die Klebflächenvorbehandlung.

- 1 *Reinigung einer Metalloberfläche mittels elektrischer Entladungen unter Atmosphärenbedingungen*
- 2 *Partiell gereinigte Metalloberfläche*
- 3 *Vakuumbogenentladung zum Abtrag von Verunreinigungen auf Metallen*
- 4 *Großflächig gereinigte Metalloberfläche*

KONTAKT

Dr. Otmar Zimmer
Telefon: +49 351 83391-3257
otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de



AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN 2010

Die »Young Professionals« der Schweißszene kommen im Jahr 2010 aus dem Fraunhofer IWS.



Für seinen Vortrag zur Wissenschaftlichen Tagung »Jugend forscht & schweißt« belegte Herr **Florian Woelke** im Rahmen der DVS-Initiative »Young Professionals« den 1. Platz. Sein Thema »Grundlagenversuche zum Reibrührschweißen von Aluminium-Werkstoffen unter der Nutzung einer 5-Achs-Parallelkinematik« basiert auf den in der Arbeitsgruppe Sonderfügeverfahren des Fraunhofer IWS durchgeführten Forschungsarbeiten.



Als bestes Poster dieser wissenschaftlichen Tagung wurde der Beitrag von Herrn **Tilo Witt** bewertet. Sein Poster zum Thema »Laser-Pulver-Auftragschweißen mit Rechteckspot für hohe Auftragraten« beeindruckte die Jury sowohl mit der Auswahl des fachlichen Inhalts als auch mit der überzeugenden Darstellung.

Am 17. Dezember wurden die IWS-Preisträger des Jahres 2010 gekürt.

Der Preis für die beste innovative Produktidee zur Eröffnung eines neuen Geschäftsfeldes wurde in diesem Jahr zweimal verliehen. Herr **Oliver Throl** und Herr **Matthias Leistner** entwickelten innerhalb weniger Monate ein Messsystem zum Hochdurchsatzscreening von porösen Materialien. Verfahren



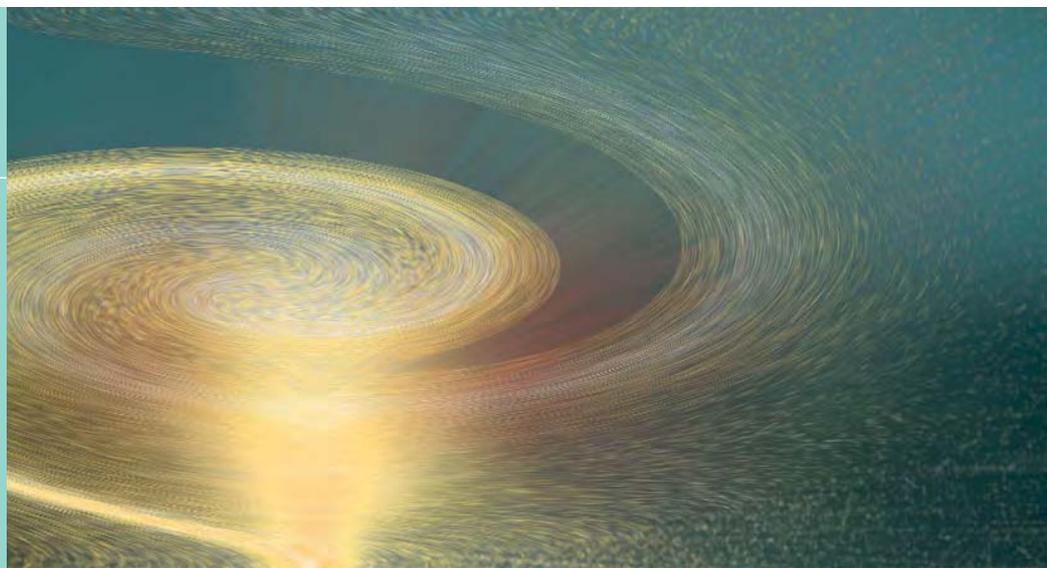
und System sind auf den Seiten 74 / 75 des Jahresberichtes ausführlich dargestellt. Für die Vermarktung des Gerätes hat die Firma Rubotherm die Lizenzrechte erworben.



Für ihre Arbeiten zur Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten der Pentapod-Anlage wurden Herr **Dr. Gunther Göbel** (v. l.), Herr **Dr. Jens Standfuß** (v. m.) und Herr **Andreas Grimm** (v. r.) ausgezeichnet. Die erst 2009 beschaffte parallelkinematische Anlage wird im Fraunhofer IWS nunmehr zur spanenden Bearbeitung, zum Laserstrahlschweißen und -härten sowie zum Reibrührschweißen und Festwalzen eingesetzt. Sie ist voll 3D-fähig, leicht umzurüsten und somit äußerst flexibel einsetzbar. Innerhalb des ersten Nutzungsjahres konnten bereits Projekterträge in Höhe von 600 T€ generiert werden.



Den Preis für die beste wissenschaftlich-technische Leistung erhielt Herr **Dr. Frank Sonntag** für die Entwicklung von Mikrofluidikkonzepten zur Sensitivitätssteigerung von Lab-on-Chip-Systemen. Gewürdigt wurden damit die modular aufgebauten Simulationsmodelle zur Beschreibung der physikalischen und strömungstechnischen Vorgänge im Reaktionsbereich, die Charakterisierung des Einflusses zahlreicher Parameter sowie die Ansätze zur Steigerung der Sensitivität. Sie mündeten letztlich in sparsame und preiswerte Mikrofluidiksysteme.



Frau **Esther Roch Talens** (2. v. l.) und Herr **Aljoscha Roch** (3. v. l.) erhielten den Preis für die beste wissenschaftliche Leistung eines Nachwuchswissenschaftlers. Gemeinsam gelang es den beiden Preisträgern, die im Fraunhofer IWS hergestellten SWCNT zerstörungsfrei in Lösungsmitteln zu dispergieren und damit Schichtentwicklung zu betreiben. Durch Dotierung und Optimierung des Kontaktwiderstands konnte die Leitfähigkeit der IWS-SWCNT um eine Größenordnung verbessert werden. Basierend auf diesen Ergebnissen können flexible, transparente, leitfähige Elektroden für Anwendungen in der Photovoltaik, Adaptronik, Sensorik oder Elektronik hergestellt werden (siehe auch S. 72 / 73 und 88 / 89).

Als herausragende studentische Leistung im Bereich der Nanotechnologie wurden die Arbeiten von Frau **Claudia Richter** und Herrn **Martin Kroll** gewürdigt. Frau Richter arbeitete die Syntheseparameter des Herstellungsprozesses heraus, die zur



selektiven Optimierung des Anteils halbleitender oder metallischer Nanoröhren bevorzugt eingestellt werden sollen. Dafür entwickelte sie eine auf Adsorptionsspektroskopie basierende Charakterisierungsmethode zur halbquantitativen Bestimmung des Anteils halbleitender und metallischer Nanoröhren in einer Charge. Herr Kroll führte eine technologieorientierte Analyse zum Thema: »Entwicklungstrends und Anwendungsfelder einwandiger Kohlenstoff-Nanoröhren« durch. Seine Studie fand große Anerkennung in der Innovationsallianz Carbon Nanotubes – CNT des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und steht auf den Internetseiten des IWS als Download zur Verfügung.



Auch die Arbeiten von Herrn **Markus Hauser** und Herrn **Ronny Wappler** wurden als herausragende studentische Leistung ausgezeichnet. Die von Herrn Hauser durchgeführten



Untersuchungen zum Abtragen und Trennen von faserverstärkten Kunststoffen sind Basis des Jahresberichtsbeitrages auf den Seiten 24 / 25 und eröffnen dem IWS das Geschäftsfeld Remotebearbeitung faserverstärkter Verbundmaterialien mit hoher Prozesseffizienz. Herr

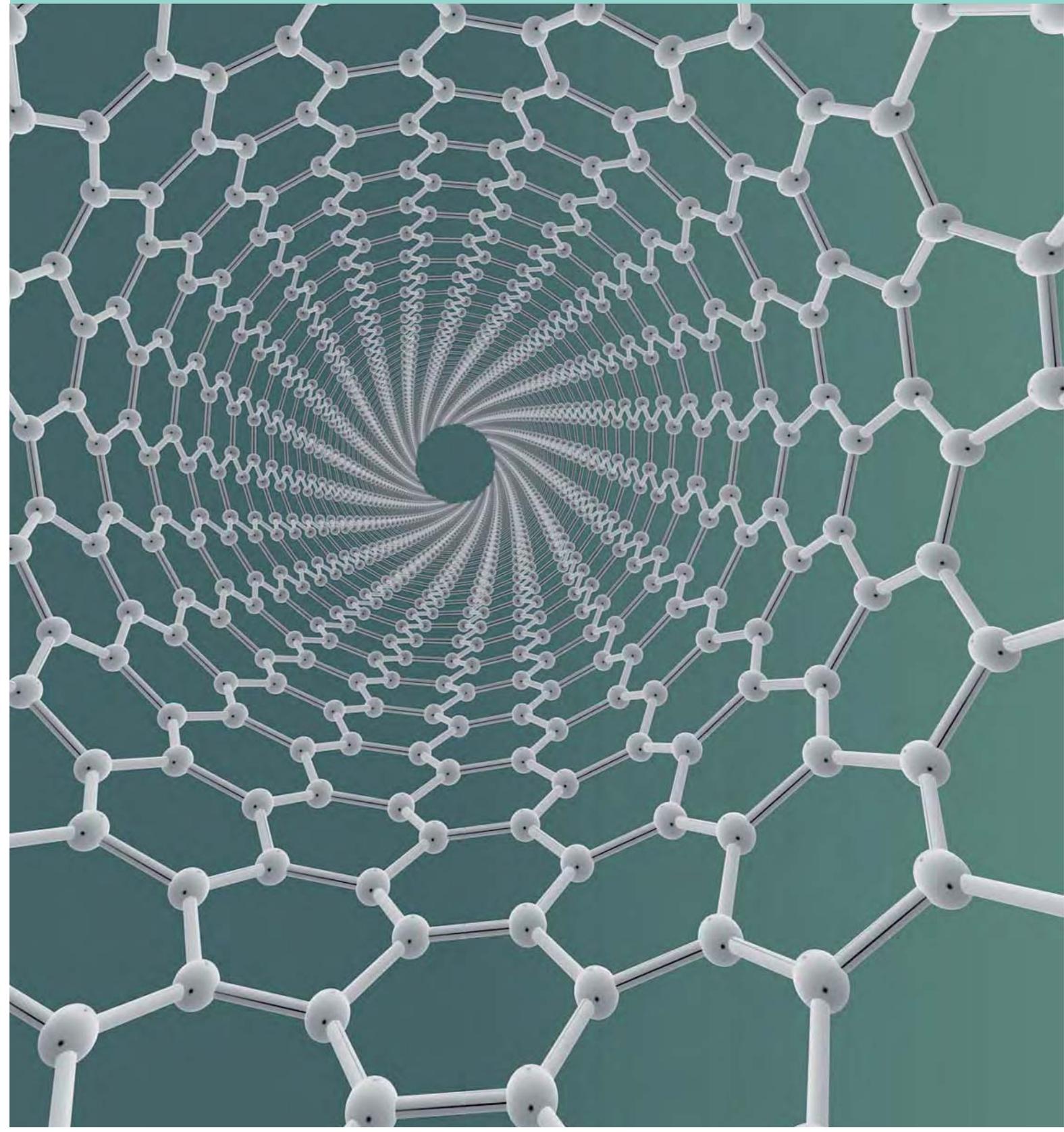


Wappler leistete einen entscheidenden Beitrag bei der Entwicklung eines neuartigen technischen Systems für das Laserstrahl-Auftragschweißen. Die mit einem induktiven Vorwärmmodul und zahlreichen Neuerungen versehene Koaxialpulverdüse wurde zum Patent angemeldet und wird unter dem Namen COAXpowerline bereits erfolgreich vermarktet (siehe S. 62 / 63).

Der Sonderpreis des Institutes ging an Frau **Birgit Schaub** (2. v. l.), die entscheidend an der Vorbereitung und Durchführung der Nanofair 2010 mitgewirkt hat.



NETZWERKE





DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit mehr als 80 Forschungseinrichtungen, davon 60 Institute. Mehr als 18 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,65 Milliarden Euro. Davon fallen 1,40 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen erarbeiten können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

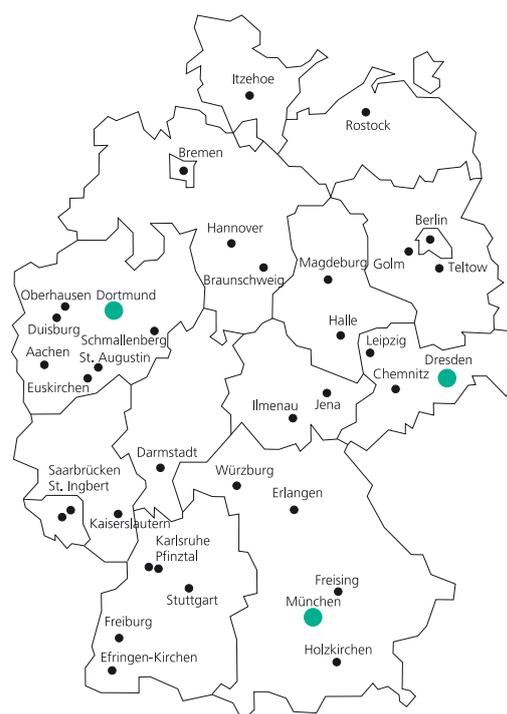
Internationale Niederlassungen sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie

fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

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

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





*Die Gegenwart eines Landes
wird durch seine Wirtschaftskraft bestimmt,
die Zukunft eines Landes
wird durch seine Jugend bestimmt.*

Autor unbekannt

ANBINDUNG AN DIE TU DRESDEN

KOOPERATION FRAUNHOFER IWS - TU DRESDEN

Durch eine Kooperationsvereinbarung ist die Zusammenarbeit zwischen dem IWS und der TU Dresden geregelt. Auf Basis einer gemeinsamen Berufung ist der Lehrstuhlinhaber, Prof. Beyer, gleichzeitig Leiter des Fraunhofer IWS. Hierbei gilt folgende Aufgabenteilung: Forschung und Lehre werden schwerpunktmäßig am Lehrstuhl, die angewandte Forschung und Entwicklung am IWS durchgeführt. Dabei sind IWS-Mitarbeiter in die Arbeiten des Lehrstuhls und TU-Mitarbeiter ins IWS eingebunden. Letztlich stellen IWS und Lehrstuhl eine Einheit mit unterschiedlichen Schwerpunkten dar.

Vorteile für das IWS:

- kostengünstige Grundlagenforschung
- Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern für das IWS
- Zugang zu wissenschaftlichen Hilfskräften

Vorteile für die TU:

- FuE-Einbindung in Industrieprojekte
- Integration neuester FuE-Ergebnisse in die Lehre
- Ausbildung von Studenten an modernstem Equipment

PROF. DR.-ING. HABIL. E. BEYER

PROFESSUR FÜR LASER- UND OBERFLÄCHENTECHNIK

- Themen:
- Lasersystemtechnik
 - Laserbearbeitungsverfahren
 - Plasmen in der Fertigungstechnik
 - Oberflächen-, Mikro- und Nanotechnik

Als Abteilungsleiter sind weitere Professoren der TU Dresden im IWS tätig:

PROF. DR. RER. NAT. HABIL. S. KASKEL

PROFESSUR FÜR ANORGANISCHE CHEMIE

- Themen:
- Synthese, Charakterisierung und Verwendung poröser Materialien
 - Anorganische Nanopartikel
 - Nanokomposite und Hybridmaterialien

PROF. DR.-ING. C. LEYENS

PROFESSUR FÜR WERKSTOFFTECHNIK

- Themen:
- Metallische und intermetallische Leichtbauwerkstoffe
 - Hochtemperaturwerkstoffe
 - Dünnschichtsysteme
 - Werkstoffprüfung

PROF. DR.-ING. U. GÜNTHER

PROFESSUR FÜR PRODUKTIONSTECHNIK STEINBEIS- HOCHSCHULE

- Themen:
- Spanende Oberflächenbearbeitung
 - Produktionsgestaltung

DRESDEN concept



»DRESDEN-CONCEPT«

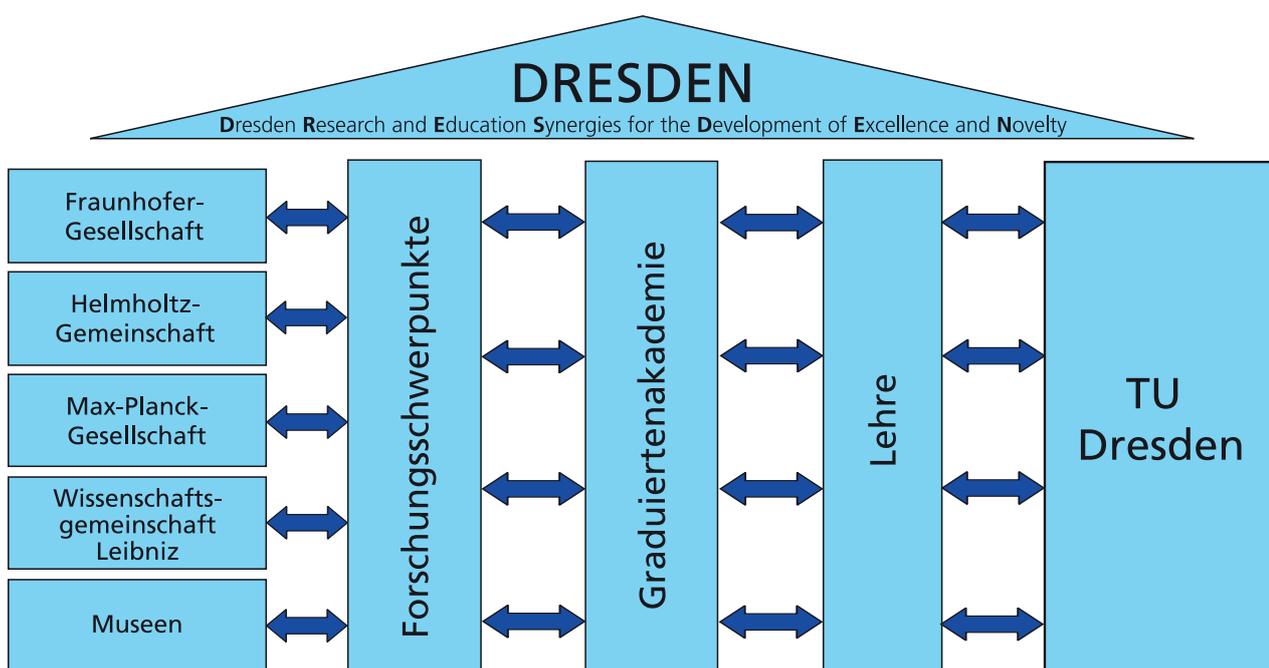
Dresden gehört zu den führenden Forschungsstandorten Deutschlands mit einer hohen Dichte wissenschaftlich arbeitender Institutionen: zehn Hochschulen, darunter die TU Dresden, die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTW), 12 Fraunhofer-Einrichtungen, drei Institute der Max-Planck-Gesellschaft, drei Institute der Leibniz-Gemeinschaft sowie das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.

Um diesen Vorsprung weiter auszubauen, wird die Dresdner Wissenschaftslandschaft zu einem exzellenten Forschungs- und universitären Ausbildungsraum vernetzt. Dazu bilden seit Februar 2009 die TU Dresden und die in der Region Dresden ansässigen außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie Museen der Landeshauptstadt eine Allianz der Spitzenforschung, die es in dieser Form bisher in Deutschland und auch weltweit nicht gibt.

Der Name dieser Allianz ist ihr Programm: DRESDEN-concept (Dresden Research and Education Synergies for the Development of Excellence and Novelty). In einem gemeinsamen Dresdner Forschungs- und universitären Ausbildungsraum werden Synergien zwischen den außeruniversitären Instituten und der TU Dresden hinsichtlich Forschung, Graduiertenausbildung und wissenschaftlicher Infrastruktur geschaffen.

Als konkrete Ziele des DRESDEN-concept wurden vereinbart:

- Definition gemeinsamer Forschungsschwerpunkte,
- Gründung von Graduiertenschulen in diesen Bereichen,
- Zusammenarbeit bei der Gewinnung exzellenter Wissenschaftler aus aller Welt,
- Nutzung von Synergien bei der vorhandenen Infrastruktur (Labore, Geräte) sowie der Ausbildung der Studenten.



»DRESDNER INNOVATIONSZENTRUM ENERGIEEFFIZIENZ DIZE^{EFF}«

Das Dresdner Innovationszentrum Energieeffizienz ist eine themenspezifische Weiterentwicklung der erfolgreichen Kooperation zwischen der Technischen Universität Dresden und der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen des DRESDEN-concepts.

Ziel des Innovationszentrums ist es, in enger wissenschaftlicher Zusammenarbeit sowohl die akademische Lehre und Forschung als auch die Innovationskompetenz beider Einrichtungen zu stärken. Dieses kommt auch dem Forschungsstandort Dresden und der Region zugute.

4 Institute der Fraunhofer-Gesellschaft sowie 8 Institute und eine Fachrichtung der TU Dresden bündeln ihre Kompetenzen und bearbeiten gemeinsam den Forschungsschwerpunkt Energieeffizienz in den Komplexen:

- Hochleistungssolarzellen,
- Brennstoffzellen,
- Hochtemperaturenergietechnik,
- Leichtbau und energieeffiziente Fertigung,
- Energiesparende Displays.

In diesen Bereichen besteht seitens der Industrie ein großer Bedarf an Forschungsleistungen und an herausragend ausgebildeten Naturwissenschaftlern und Ingenieuren.

Innerhalb des Dresdner Innovationszentrums engagieren sich die TU Dresden und die Fraunhofer-Gesellschaft intensiv für die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Sie bieten jungen Forscherinnen und Forschern an ihren hervorragend ausgestatteten Standorten attraktive Arbeitsbedingungen.

TU - Einrichtungen	Fraunhofer - Institute	Werkstoff- und Strahltechnik	Elektronenstrahl- und Plasmatechnik	Keramische Technologien und Systeme	Photonische Mikrosysteme
Oberflächen- und Fertigungstechnik	<input type="checkbox"/>				
Anorganische Chemie	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	
Angewandte Physik			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Werkstoffwissenschaft				<input type="checkbox"/>	
Leichtbau und Kunststofftechnik	<input type="checkbox"/>				
Halbleiter- und Mikrosystemtechnik					<input type="checkbox"/>
Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik					<input type="checkbox"/>
Festkörperelektronik			<input type="checkbox"/>		
Energietechnik			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Das Dresdner Innovationszentrum Energieeffizienz erreicht durch die enge Verbindung der Grundlagenforschung an der Technischen Universität Dresden mit der Fraunhofer-Kompetenz zur industriellen Umsetzung eine höhere Leistungsfähigkeit. Die Geschwindigkeit der Einführung von Innovationen in die industrielle Praxis steigt. Damit stärken Universität und Fraunhofer den Wirtschaftsstandort Deutschland.



Von der Fraunhofer-Gesellschaft wird das Innovationszentrum mit sechs Millionen Euro gefördert, der Freistaat Sachsen stellt weitere vier Millionen Euro bereit. Damit werden in den Jahren 2009 bis 2013 zahlreiche hochqualifizierte Arbeitsplätze im Wissenschaftsbereich finanziert. Zusätzliche finanzielle Mittel aus der Industrie garantieren die Schaffung von weiteren Wissenschaftlerstellen in den Folgejahren.

Das Fraunhofer IWS koordiniert das Verbundprojekt und ist autorisierter Ansprechpartner.

SPRECHER

PROF. ECKHARD BEYER

Telefon +49 351 83391-3420
eckhard.beyer@iws.fraunhofer.de

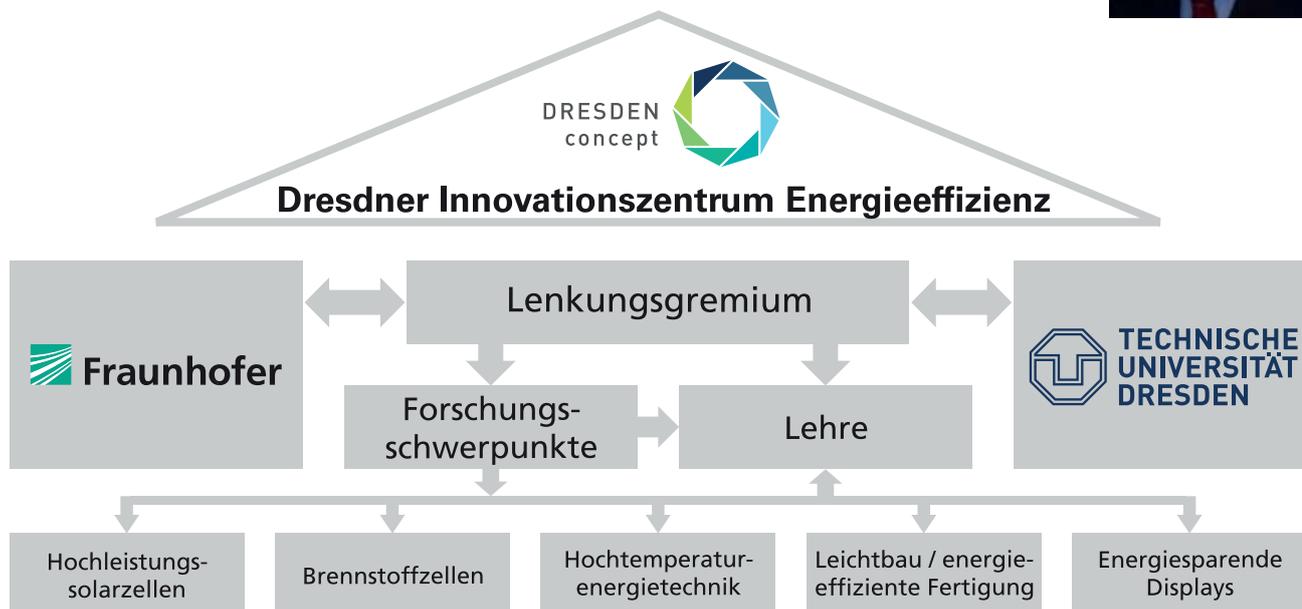


www.innovation-energieeffizienz.de
www.iws.fraunhofer.de

PROJEKTKOORDINATION

DR. STEFAN SCHÄDLICH

Telefon +49 351 83391-3411
stefan.schaedlich@iws.fraunhofer.de





PROJEKTGRUPPE IM DORTMUNDER OBERFLÄCHENCENTRUM (DOC)

Das DOC Dortmunder OberflächenCentrum entwickelt maßgeschneiderte Beschichtungen, die in kontinuierlichen Verfahren auf Stahlband applizierbar sind. Vorrangiges Entwicklungsziel ist die Verbesserung von Funktionen wie Korrosionsbeständigkeit, Kratzfestigkeit, elektrische Leitfähigkeit oder Reinigungseigenschaften.

Das Fraunhofer IWS ist als Kooperationspartner direkt am DOC mit einer Projektgruppe vertreten. Schwerpunkte der Entwicklungstätigkeiten dieser Gruppe liegen in der Beschichtung von Oberflächen mittels PVD, PACVD sowie Spritzverfahren und in der Lasermaterialbearbeitung.

Ein herausragendes Ergebnis dieser Zusammenarbeit sind neuartige Zink-Legierungsüberzüge (ZE-Mg). Sie vereinen bei einer Halbierung der Überzugsdicke die sehr gute Korrosionsbeständigkeit bewährter Zinküberzüge mit einer wesentlich verbesserten Laserschweißignung. Außerdem wurden Hybrid- und Kombinationsprozesse entwickelt, insbesondere das Hybrid-schweißen von hochfesten Stahlbaukomponenten. Auch Kombinationen aus Reinigen und Schweißen oder aus Schweißen und Nachverzinken sind möglich.

Darüber hinaus bietet die Fraunhofer-Projektgruppe auf einer Fläche von 1100 m² eine Reihe sich ergänzender Verfahren zur Oberflächenveredlung an. Mit modernster Anlagentechnik lassen sich nahezu porenfreie und äußerst haftfeste Plasmaspritzschichten herstellen oder hoch beanspruchte Bereiche von Bauteilen und Werkzeugen mit dem Laserauftragschweißen gezielt mit millimeterdicken Verschleißschutzschichten panzern. Aber auch im Vakuum lassen sich metergroße und

LEITER DER PROJEKTGRUPPE AM DOC IN DORTMUND

DR. AXEL ZWICK

Telefon +49 231 844 3512
axel.zwick@iws.fraunhofer.de
www.iws.fraunhofer.de/doc



tonnenschwere Teile mit nano- bis mikrometerdicken Höchstleistungsschichten, z. B. mit Diamor®-Schichtsystemen, versehen. Diese zeichnen sich durch eine überragende Härte und exzellente Gleiteigenschaften aus. Schichtsysteme mit zusätzlichem Korrosionsschutz sind in der Entwicklung.

Die breite Palette dieser Verfahren, die sich teilweise untereinander kombinieren lassen, bietet zusammen mit dem Know-how des Fraunhofer IWS die Gewähr, dass ein TKS-Kunde oder der Kunde eines anderen Unternehmens die technisch und wirtschaftlich optimale Problemlösung bekommt. Mit Hilfe neuartiger, kompakter und mobiler Festkörperlaser hoher Strahlqualität bis 8 kW Laserleistung ist es möglich, Verfahrensentwicklungen, aber auch »Trouble shooting« direkt beim Industriekunden zu realisieren und produktionsnah umzusetzen.



PROJECT CENTER LASER INTEGRATED MANUFACTURING IN WROCLAW (PCW)

Das 2008 eröffnete Fraunhofer Project Center arbeitet aktiv an der Etablierung des Fraunhofer Modells auf dem polnischen Forschungsmarkt. Das Jahr 2010 war geprägt durch die beachtliche Erweiterung der gerätetechnischen Basis der Wrocław University of Technology im Rahmen des polnischen Investitionsprojektes »Optolas«. Die Ausstattung konnte sowohl im Bereich der Lasertechnik als auch auf Seiten der Analysemethoden und -geräte vervollkommen werden. Den Abschluss des Investitionsprojektes bildete ein Seminar zum Thema »Optomechanics and laser technologies for industrial and medical applications«, welches sich insbesondere an Industrieinteressenten, aber auch an Forschungseinrichtungen wandte.

Im Rahmen des Messeauftrittes auf ITM 2010 in Poznan wurde der Workshop »Optical Technologies for Energy Efficiency in Manufacturing and Product Design« durchgeführt. Mit anwendungsorientierten Beiträgen wurde in erster Linie die polnische und osteuropäische Industrie angesprochen. Beide Veranstaltungen führten zu einer Erweiterung bestehender Netzwerke und zur Gewinnung neuer Kontakte. Sie werden im Jahr 2011 Fortsetzungen finden. Die Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen polnischen und deutschen Wissenschaftlern erfolgt aktuell in zwei Forschungsprojekten.

Das Projekt »BioReactor« befasst sich mit der generativen Herstellung eines biokompatiblen Reaktors. Ziel ist die Schaffung der werkstoff- und verfahrenstechnischen Grundlagen zur Erstellung von eingehausten Scaffold-Strukturen. Mit dem im Fraunhofer IWS entwickelten Scaffold-Printer und dem

www.iws.fraunhofer.de/polen.html

INSTITUTSDIREKTOR

PROF. EDWARD CHLEBUS

TU Wrocław

Telefon +48 71 320 2705

edward.chlebus@pwr.wroc.pl



PROJEKTKOORDINATION

DR. JAN HAUPTMANN

Fraunhofer IWS

Telefon +49 351 83391-3236

jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de



Prozess-Know-how der polnischen Kollegen im Bereich Rapid Prototyping und generative Fertigung bündeln beide Einrichtungen ihre Stärken zur Gewinnung neuer Erkenntnisse und Realisierung neuer Entwicklungen.

Im Projekt »RemCoVis« soll mit der Entwicklung von Visualisierungs- und Monitoring-Lösungen ein Beitrag zur Überwindung von Hindernissen bei der Umsetzung von CO₂-Laserbasierten Remote-Prozessen geschaffen werden. Im Rahmen des Projektes werden Werkzeuge geschaffen, die zu einem verstärkten Prozessverständnis beitragen und die Verfahrensentwicklung beschleunigen werden. Die Erfahrungen und Kenntnisse von Laser-Remote-Anwendungen des Fraunhofer IWS werden ergänzt durch die weitreichenden Kompetenzen der Wrocław University of Technology auf dem Gebiet der optischen Inspektion und Bildverarbeitung.



FRAUNHOFER CENTER FOR COATINGS AND LASER APPLICATIONS (CCL)

Für die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung ist der US-amerikanische Markt einer der wichtigsten internationalen Benchmarks und Innovationsmotoren. Aus diesem Grunde konzentriert das Fraunhofer IWS Dresden seine USA-Aktivitäten seit 1997 im »Fraunhofer-Center for Coatings and Laser Applications CCL«.

Das Fraunhofer-Center for Coatings and Laser Applications CCL spiegelt die Hauptaktivitäten des IWS, die Laser- und die Schichttechnologie, wider. Mit einem Jahresumsatz von 4,2 Mio. US-\$ ist das Center eines der umsatzstärksten Fraunhofer-Center in den USA. Seit 2003 wird das CCL von Dr. Jes Asmussen, Professor an der Michigan State University, geleitet. Seine bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet der Diamantbeschichtung und -herstellung ergänzen in idealer Weise das Know-how des IWS auf dem Gebiet der Diamor®-Beschichtungen.

Das CCL hat zwei Divisions, die »Coating Technology Division« an der Michigan State University in East Lansing und die »Laser Applications Division« mit Sitz im Gebäude des Headquarters von Fraunhofer USA in Plymouth, Michigan.

Coating Technology Division

Unter Leitung von Prof. Jes Asmussen und Dr. Thomas Schülke arbeiten in Lansing erfahrene Fraunhofer-Forscher und deutsche Studenten gemeinsam mit Fakultätsmitgliedern und Studenten der Michigan State University an neuen Lösungen auf folgenden Forschungsgebieten:

- Beschichtung mit amorphen diamantähnlichen Kohlenstoffschichten,
- chemische Gasphasenabscheidung von ultranano-, poly- und einkristallinen Diamanten,
- Diamantdotieren,
- physikalische Gasphasenabscheidung von amorphem Diamant.

Für die Beschichtung mit amorphen diamantähnlichen Kohlenstoffschichten kommt das im IWS Dresden entwickelte Laser-Arc-Verfahren zum Einsatz. Seit einigen Jahren verbessert das CCL die Lebensdauer von Werkzeugen vor allem für die Aluminiumbearbeitung durch das Aufbringen der amorphen diamantähnlichen Kohlenstoffschichten. Bei der Beschichtung von Motor-, Antriebs- und Bremsenkomponenten kooperiert das Fraunhofer-Center eng mit dem Michigan State Formula Racing Team. Die Zusammenarbeit bietet dem Racing Team Wettbewerbsvorteile und den Forschern des CCL Hinweise zur Schichtoptimierung basierend auf höchsten realen Bauteilbeanspruchungen.

In den letzten Jahren konnte sich die Coating Technology Division in Lansing vor allem mit Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Synthese und Dotierung von einkristallinen Diamanten durch mikrowellen-basierte chemische Gasphasenabscheidung international etablieren.

Laser Applications Division

Die Lasergruppe des CCL ist in Plymouth (Michigan) in unmittelbarer räumlicher Nähe zur amerikanischen Autoindustrie von Detroit angesiedelt. Die Gruppe führt zahlreiche Projekte zum Laserstrahlschweißen von Bauteilen aus dem Antriebsstrang aus, insbesondere das Fügen von Differentialen, Getrieben und Antriebswellen. Für seine Entwicklungen zur Verbesserung der Dachfestigkeit von Super Trucks durch Laserstrahlschweißen erhielt das CCL im Jahr 2007 den Henry Ford Technology Award.

Die Entwicklung, Patentierung und Lizenzierung eines Verfahrens zum Laser-Auftragschweißen von Schichten höchster abrasiver Verschleißfestigkeit, basierend auf nahezu Millimeter großen synthetischen Diamantpartikeln und metallischem Binder, stellt ein Highlight der Forschungsarbeiten dar. Die Technologie findet Anwendung für Bohrausrüstungen in der Ölförderindustrie der USA und Kanadas.

Die enge Vernetzung mit dem Fraunhofer CCL bietet dem IWS mehrere Vorteile. Über Angebot und Nachfrage werden neue Trends und Entwicklungen in den USA schneller erkannt, wodurch die Entwicklungsrichtungen im IWS beeinflusst werden. Durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den USA entsteht zusätzliches Know-how und eine erweiterte Kompetenz, welche der Akquisition auf dem deutschen und europäischen Markt zugute kommt. Durch einen zeitweisen Aufenthalt von IWS-Mitarbeitern in den USA werden Erfahrungen gesammelt, die dem Mitarbeiter während seiner gesamten beruflichen Laufbahn zugute kommen.

CENTER DIRECTOR CCL / USA

PROF. JES ASMUSSEN

Telefon +1 517 355 4620
jasmussen@fraunhofer.org



LEITER DER DIVISION COATING TECHNOLOGY

DR. THOMAS SCHÜLKE

Telefon +1 517 432 8173
tschuelke@fraunhofer.org

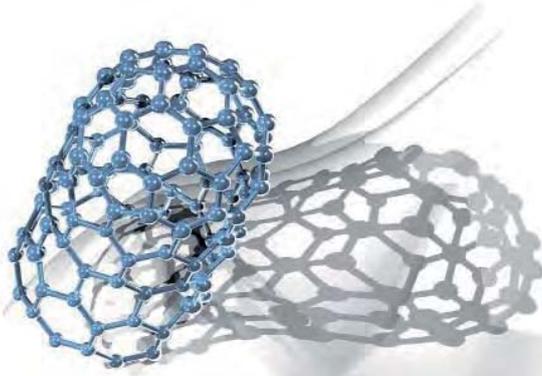


LEITER DER DIVISION LASER APPLICATIONS

CRAIG BRATT

Telefon +1 734 738 0550
cbratt@fraunhofer.org





nano for production

NANOTECHNOLOGIE-AKTIVITÄTEN

Von der Nanotechnologie können alle Branchen profitieren - vom Autobau bis zur Medizintechnik. Damit die Forschungsergebnisse dieser Zukunftstechnologie in Deutschland schneller und besser in Anwendungen umgesetzt werden, kooperieren Forscher und Unternehmer. In Dresden, einem erfolgreichen Standort für Nanotechnologie, arbeiten Firmen und Forschungseinrichtungen seit November 2006 im **Nanotechnologie-Innovationscluster »nano for production«** zusammen. Ziel der Arbeit des Innovationsclusters ist es, nanotechnologische Entwicklungen aus dem Stadium der Grundlagenforschung an die Schwelle zur industriellen Einführung zu bringen und damit die Voraussetzungen für eine breite wirtschaftliche Nutzung zu schaffen. Zum anderen werden wesentliche Elemente der Nanoproduktionstechnik entwickelt, erprobt und für einen weiten Anwenderkreis zugänglich gemacht.

Zur konsequenten Erschließung dieser industriellen Anwendungsmöglichkeiten haben sich im September 1998 51 Unternehmen, 10 Hochschulinstitute, 22 außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und 5 Verbände im **Nanotechnologie-Kompetenzzentrum »Ultradünne funktionale Schichten«** zusammengeschlossen, welches vom BMBF als bundesweites Kompetenzzentrum für den Bereich ultradünne funktionale Schichten ausgezeichnet wurde. Die Arbeiten des Kompetenzzentrums konzentrieren sich auf den Bereich der Öffentlichkeitsarbeit (z. B. Teilnahme an Messen, Unterstützung und Durchführung von Veranstaltungen) bis hin zur Ausarbeitung und Förderung von Machbarkeitsstudien.

Im Rahmen der Nanotechnologie-Aktivitäten war das IWS in den letzten Jahren Organisator der »Nanofair – Internationales Nanotechnologie-Symposium«, welche am 6. und 7. Juli 2010

PROJEKTKOORDINATION

DR. ANDREAS LESON

Telefon +49 351 83391-3317
andreas.leson@iws.fraunhofer.de



KOMPETENZZENTRUM

DR. RALF JÄCKEL

Telefon +49 351 83391-3444
ralf.jaekkel@iws.fraunhofer.de



INNOVATIONSCUSTER

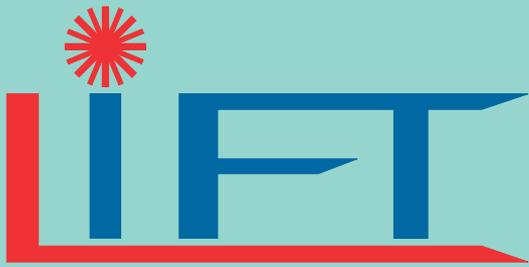
DR. OTMAR ZIMMER

Telefon +49 351 83391-3257
otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de



www.nanotechnology.de
www.iws.fraunhofer.de/innovationscluster

zum 8. Mal stattfand. Bereits jetzt wird die 9. Nanofair vorbereitet, die am 12. und 13. Juni 2012 im Internationalen Kongresszentrum Dresden in der gemeinsamen Trägerschaft der Landeshauptstadt Dresden, Amt für Wirtschaftsförderung und des Fraunhofer IWS Dresden stattfinden wird.



LASERINTEGRATION IN DIE FERTIGUNGSTECHNIK - INITIATIVE LiFT

Sachsens Potenziale des Maschinen- und Anlagenbaus durch die Lasertechnik nachhaltig und flächendeckend erweitern und Wettbewerbsfähigkeit sichern - diesem Anspruch stellt sich die **Initiative LiFT**, die 2007 als Sieger aus dem Innovationswettbewerb »Wirtschaft trifft Wissenschaft« des Bundesverkehrsministeriums (BMVBS) hervorging.

Das Fraunhofer IWS Dresden kooperiert in LiFT mit der Hochschule Mittweida (FH) und dem Institut für innovative Technologien, Technologietransfer, Ausbildung und berufsbegleitende Weiterbildung (ITW) e. V. Chemnitz, um den Transfer entwickelter Technologien auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung in Innovationen, also in wirtschaftliche Anwendungen voranzutreiben.

Ziel der Netzwerkstruktur ist es, Potenziale zu zeigen, Leistungen anzubieten und die erreichbaren Vorteile für die Maschinen- und Anlagenbauer sowie Fertiger aufzuzeigen. Vorteile können sein:

- Zeit- und Kosteneinsparung durch Verkürzung der Prozessketten,
- höhere Effizienz der Fertigungsverfahren und Produkte,
- höhere Qualität, Marktfähigkeit der Produkte,
- Alleinstellungsmerkmal technischen Höchststands.

Als Technologieentwickler und Wissensvermittler stehen die Projektpartner der Initiative LiFT den kleineren und mittelständischen Unternehmen aus Sachsen aber auch aus anderen Regionen anwendungsfallbezogen zur Verfügung.

Das Projekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung gefördert (Förderkennzeichen 03WWSN019).

PROJEKTKOORDINATION

DR. STEFFEN BONSS

Telefon +49 351 83391-3201
steffen.bonss@iws.fraunhofer.de



ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

CLAUDIA ZELLBECK

Telefon +49 351 83391-3332
claudia.zellbeck@iws.fraunhofer.de



www.laserintegration.de
www.iws.fraunhofer.de

Die Nachfrage nach Laseranwendungen steigt. Kernpunkt der Netzwerkaktivitäten 2010 waren wiederum Beratungen im Fraunhofer IWS und bei Interessenten vor Ort. Dies gehört zu den Kernaufgaben des Projektes. Verstärkt werden europäische Kontakte, gemeinsam mit Partnern aus der Wirtschaft.



FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

KOMPETENZ DURCH VERNETZUNG

Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Light & Surfaces. Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an die Erfordernisse in den verschiedensten Anwendungsfeldern zur Lösung aktueller und zukünftiger Herausforderungen, insbesondere in den Bereichen Energie, Umwelt, Produktion, Information und Sicherheit. Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten zum Nutzen der Kunden.

KERNKOMPETENZEN DES VERBUNDS

- Schicht- und Oberflächentechnologie
- Strahlquellen
- Mikro- und Nanotechnologie
- Materialbearbeitung
- Opto-mechanische Präzisionssysteme
- Optische Messsysteme

KONTAKT

Verbundvorsitzender
Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Fraunhofer IOF
Albert-Einstein-Straße 7
07745 Jena
Telefon: +49 3641 807-201

Verbundassistentin
Susan Oxfart
Telefon: +49 3641 807-207

www.light-and-surfaces.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ELEKTRONENSTRAHL- UND PLASMATECHNIK FEP, DRESDEN

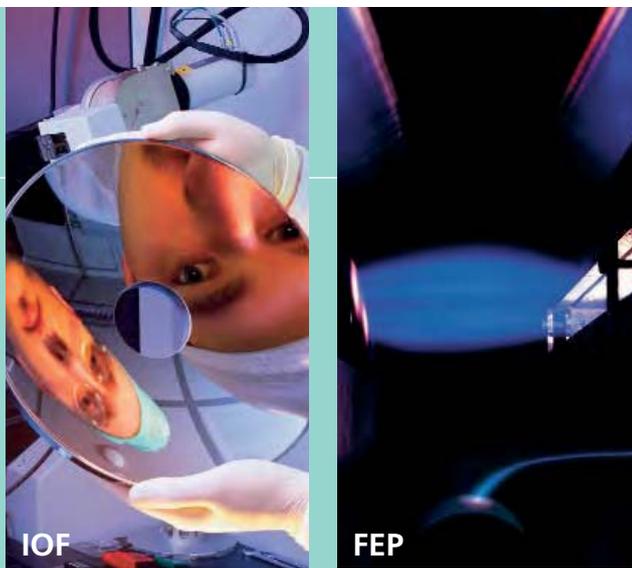
Die Kernkompetenzen des Fraunhofer FEP sind Elektronenstrahltechnologie, Puls-Magnetron-Sputtern und Plasmaaktivierte Hochratebedampfung. Unsere Arbeitsgebiete umfassen die Vakuumbeschichtung sowie die Oberflächenbearbeitung und -behandlung mit Elektronen und Plasmen. Neben der Entwicklung von Schichtsystemen, Produkten und Technologien ist ein wichtiger Schwerpunkt die Aufskalierung der Technologien für die Beschichtung und Behandlung großer Flächen mit hoher Produktivität. Unsere Technologien und Prozesse finden Anwendung im Maschinenbau, in der Solarenergie, der Biomedizintechnik, der Architektur und für den Kulturguterhalt, in der Verpackungsindustrie, im Bereich Umwelt und Energie, der Optik, Sensorik und Elektronik sowie in der Landwirtschaft.

www.fep.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR LASERTECHNIK ILT, AACHEN

Im Bereich Laserentwicklung und -anwendung zählt das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT weltweit zu den bedeutendsten Auftragsforschungs- und Entwicklungsinstituten. Unsere Technologiefelder umfassen Laser und Optik, Lasermesstechnik, Medizintechnik und Biophotonik sowie Lasermaterialbearbeitung. Hierzu zählen u.a. das Schneiden, Abtragen, Bohren, Schweißen und Löten sowie die Oberflächenbearbeitung, die Mikrofertigung und das Rapid Manufacturing. Übergreifend befasst sich das Fraunhofer ILT mit Laseranlagentechnik, Prozessüberwachung und -regelung, Modellierung sowie der gesamten Systemtechnik.

www.ilt.fraunhofer.de



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ANGEWANDTE OPTIK UND FEINMECHANIK IOF, JENA

Das Fraunhofer IOF entwickelt zur Bewältigung drängender Zukunftsfragen in den Bereichen Energie und Umwelt, Information und Sicherheit sowie Gesundheit und Medizintechnik Lösungen mit Licht. Die Kompetenzen umfassen die gesamte Prozesskette vom Optik- und Mechanik-Design über die Entwicklung von Fertigungsprozessen für optische und mechanische Komponenten sowie Verfahren zur Systemintegration bis hin zur Fertigung von Prototypen. Schwerpunkte liegen auf den Gebieten multifunktionale optische Schichtsysteme, Mikro- und Nanooptik, Festkörperlichtquellen, optische Messsysteme und opto-mechanische Präzisionssysteme.

www.iof.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE MESSTECHNIK IPM, FREIBURG

Fraunhofer IPM entwickelt und realisiert optische Sensor- und Belichtungssysteme. Bei den vorwiegend Laser-basierten Systemen sind Optik, Mechanik, Elektronik und Software ideal aufeinander abgestimmt. Die Lösungen sind besonders robust ausgelegt und jeweils individuell auf die Bedingungen am Einsatzort zugeschnitten. Auf dem Gebiet der Thermoelektrik verfügt das Institut über Know-how in Materialforschung, Simulation und Systemen. In der Dünnschichttechnik arbeitet Fraunhofer IPM an Materialien, Herstellungsprozessen und Systemen.

www.ipm.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SCHICHT- UND OBERFLÄCHENTECHNIK IST, BRAUNSCHWEIG

Das Fraunhofer IST bündelt als industrienahes FuE-Dienstleistungszentrum Kompetenzen auf den Gebieten Schichtherstellung, Schichtenanwendung, Schichtcharakterisierung und Oberflächenanalyse. Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure arbeiten daran, Oberflächen der verschiedensten Grundmaterialien neue oder verbesserte Funktionen zu verleihen, um auf diesem Wege innovative, marktgerechte Produkte zu schaffen. Das Institut ist in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Luft- und Raumfahrt, Werkzeuge, Energie, Glas und Fassade, Optik, Information und Kommunikation, Mensch und Umwelt.

www.ist.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFF- UND STRALHENTECHNIK IWS, DRESDEN

Das Fraunhofer IWS ist das führende Institut für Innovationen im Bereich der Laser- und Oberflächentechnik. Es bietet kundenspezifische Lösungen zum Fügen, Trennen, Auftragen, Abtragen, Randschichtbehandeln und Beschichten mit Laser sowie PVD- und CVD-Verfahren. Umfangreiches werkstoff- und nanotechnisches Know-how ist Basis zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Systemtechnik und Prozesssimulation ergänzen die zentralen Kompetenzen in den Bereichen Lasermaterialbearbeitung und Plasma-Beschichtungsverfahren. Das IWS bietet Lösungen aus einer Hand, von der Erforschung und Entwicklung neuer Verfahren und Systeme über die Integration in die Fertigung bis hin zur Behebung von Problemen und Fehlern aller Art.

www.iws.fraunhofer.de

BESONDERE EREIGNISSE



15. JANUAR 2010

»Fraunhofer-Kick-Off« - Jahresauftakt mit dem Präsidenten der Fraunhofer-Gesellschaft Prof. Bullinger im Fraunhofer-Institutszentrum Dresden

2.-3. MÄRZ 2010

8. Workshop »Industrielle Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

4. MÄRZ 2010

Kolloquium »50 Jahre Laser« zu Ehren des Kuratoriumsvorsitzenden Dr. Peter Wirth

17.-18. MÄRZ 2010

TAW-Symposium »Thermisches Beschichten mit laserbasierten Fertigungsverfahren« der Technischen Akademie Wuppertal e. V. in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWS Dresden

19. MÄRZ 2010

Besichtigung des Fraunhofer IWS durch den sächsischen Ministerpräsidenten Stanislav Tillich

15. APRIL 2010

Workshop der EFDS »Gasmanagement für Atmosphärendruck-Plasmaprozesse«

22. APRIL 2010

Beteiligung des Fraunhofer IWS am bundesweiten »Girls Day 2010«

6. MAI 2010

Workshop »Supercapacitors: materials, processes and applications« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

7. MAI 2010

»Technology Day Dresden« - 6. Treffen der ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fraunhofer IWS Dresden und des Lehrstuhls LOT der TU Dresden

18. JUNI 2010

Beteiligung des Fraunhofer-Institutszentrums an der »Langen Nacht der Wissenschaft« der Landeshauptstadt Dresden

25. JUNI 2010

Workshop »Hartmetallschichten der neuen Generation« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)



5. JULI 2010

»4. Nanofair Nachwuchsforum« – Veranstaltung im Rahmen der »Nanofair 2010« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

6.-7. JULI 2010

8. Internationales Nanotechnologie-Symposium »Nanofair – Neue Ideen für die Industrie« im Internationalen Kongresszentrum Dresden (Organisatoren: Fraunhofer IWS Dresden und Landeshauptstadt Dresden)

8. JULI 2010

Workshop »Commercializing Future Technologies for Energy and Energy Efficiency« – Veranstaltung im Rahmen der »Nanofair 2010« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

17. AUGUST - 3. SEPTEMBER 2010

»Jugend forscht« (Praktikumsbetreuung: Fraunhofer-Projektgruppe im DOC)

7.-9. SEPTEMBER 2010

»SMT 24 – International Conference on Surface Modification Technologies« im Internationalen Kongresszentrum Dresden (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

28. SEPTEMBER 2010

Tagung der Expertenkreise »Steuerungs- und Automatisierungstechnik« sowie »Fertigungs- und Bearbeitungstechnik«

30. SEPTEMBER 2010

Unterzeichnung der ersten bilateralen Forschungskooperation zwischen Katar und Deutschland in Berlin: Projekt zur klimaneutralen Gewinnung von Energieträgern aus Erdgas durch Solarenergie

5.-6. OKTOBER 2010

»FiSC 2010 - Internationales Laser-Symposium Fiber & Disc« im Internationalen Kongresszentrum Dresden (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

25. NOVEMBER 2010

»MOF Synthesis and Structure«, Workshop in London, (Organisator: TU Dresden, Institut für Anorganische Chemie, Mitorganisator: Fraunhofer IWS Dresden)

VERÖFFENTLICHUNGEN

[L01]

H.-A. Bahr, H.-J. Weiß, U. Bahr, M. Hofmann, G. Fischer, S. Lampenschurf, H. Balke

»Scaling Behavior of Thermal Shock Crack Patterns and Tunneling Cracks Driven by Cooling or Drying«

Journal of the Mechanics and Physics of Solids 58 (2010) 9, S. 1411-1421

[L02]

F. Bartels

»Ruck Zuck zum Bauteil - hochdynamische Achssysteme zum Laserstrahlschneiden mit Festkörperlaser hoher Strahlbrillanz«

International Laser Symposium Fiber & Disc, 5. - 6. Oktober 2010, Dresden, Tagungs-CD, ISBN 978-3-8396-0197-6

[L03]

F. Bartels, B. Süß, J. Hauptmann, A. Wetzig, E. Beyer

»Ruck Zuck zum Bauteil – Hochdynamischer Form-Cutter erweitert Möglichkeiten von Laserschneid- und -schweißanwendungen«

Laser Technik Journal (2010) 3, S. 40-43, ISSN: 1613-7728

[L04]

J. Berger, M. G. Holthaus, N. Pistillo, K. Rezwan, A. Lasagni

»Ultraviolet Laser Interference Patterning of Hydroxyapatite Surfaces«

Applied Surface Science (2010), DOI: 10.1016/j.apsusc. 2010.10.120

[L05]

L.-M. Berger, S. Saaro, T. Naumann, M. Kašparova, F. Zahálka

»Influence of Feedstock Powder Characteristics and Spray Processes on Microstructure and Properties of WC-(W,Cr)₂C-Ni Hardmetal Coatings«

Surface and Coatings Technology 205 (2010) 4, S. 1080-1087, ISSN 0257-8972

[L06]

L.-M. Berger, M. Woydt, S. Saaro, C.C. Stahr, S. Thiele

»High-Temperature Sliding Wear of APS-Sprayed Coatings of the Cr₂O₃-TiO₂ System«

Proceedings of the 14th Nordic Symposium on Tribology, Nordtrib 2010, Luleå and Storforsen, Schweden, 7. – 10. Juni 2010 Luleå, Luleå University of Technology (2010), ISBN 978-91-7439-124-4

[L07]

M. Bieda, E. Beyer, A.-F. Lasagni

»Direct Fabrication of Hierarchical Microstructures on Metals by Means of Direct Laser Interference Patterning«

Journal of Engineering Materials and Technology 132 (2010) 3, Art.031015/1-6, ISSN: 0094-4289

[L08]

M. Bieda, A.-F. Lasagni, E. Beyer,

»Fabrication of Hierarchical Microstructures on Metals by Means of Direct Laser Interference Patterning«

29th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics ICALEO, Proceedings, paper M504 (2010) S. 900-907, ISBN: 978-0-912035-61-1

[L09]

R. Böhme, I. Jansen, L. Girdauskaite
»Verbundkunststoffe - Reproduzierbare Preformfertigung für textilverstärkte Kunststoffe«

Lightweight Design (2010) 1, S. 55-60

[L10]

S. Bonß

»Der Laser in der Produktion«

Heat Treatm. Mat. 65 (2010) 3, S. A8

[L11]

S. Bonß

»Laser Transformation Hardening of Steel«

In Jonathan Lawrence, David KY Low, Juan Pou and Ehsan Toyserkani: Advances in Laser Materials Processing - Technology, Research and Applications, Woodhead Publishing Ltd. (2010), S. 291-326

[L12]

S. Bonß

»Laserstrahlhärten zum Härten lokal beanspruchter Bauteile – Integration in die Fertigung ermöglicht schlanke Prozesse«

Gießerei-Erfahrungsaustausch (2010) 5 / 6, S. 8-10

[L13]

S. Bonß, J. Hannweber, U. Karsunke, S. Kuehn, M. Seifert, E. Beyer

»Local Laser Heat Treatment of Stainless Steel at Very High Speed«

29th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics ICALEO, Proceedings, paper 1702 (2010) S. 249-258, ISBN: 978-0-912035-61-1

[L14]

T. Börner, L.-M. Berger, S. Saaro, S. Thiele

»Rollkontaktermüdung von HVOF gespritzten Hartmetallschichten auf ungehärteten Substraten«

Schriftenreihe »Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen«, Band 37, Herausgeber: B. Wielage, TU Chemnitz (2010) S. 178-187, ISBN: 978-3-00-032471-0, ISSN: 1439-1597

[L15]

S. Braun, P. Gawlitza, M. Menzel, A. Leson, F. Allenstein, M. Nestler, D. Rost, A. Seifert, M. Zeuner

»Large Area Sputter Deposition for High-Precision Nanometer Films«

PSE (2010), S. 306

[L16]

B. Brenner, J. Standfuß, U. Stamm, G. Göbel, S. Schrauber

»Neue Perspektiven für das rissfreie Fügen von schwer schweißbaren Werkstoffen im Bereich Powertrain«

European Automotive Laser Applications (2010), Tagungsband (Hrsg: Automotive Circle International), S. 17-32

[L17]

F. Brückner, S. Nowotny, M. Riede, D. Lepski, E. Beyer

»Generation of high-precision metallic 3D structures with brilliant lasers«

International Laser Symposium Fiber & Disc, 5. - 6. Oktober 2010, Dresden, Tagungs-CD, ISBN 978-3-8396-0197-6

[L18]

E. Büchter, I. Jansen, R. Rechner
 »Lasereinsatz in der Klebvorbehandlung«

10. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik (2010), S. 68-70

[L19]

A. Cramer, S. Landgraf, E. Beyer, G. Gerbeth

»Marangoni Convection in Molten Salts: Physical Modeling Toward Lower Prandtl Numbers«

Springer-Verlag (2010), DOI: 10.1007/s00348-010-0951-8, <http://www.springerlink.com/content/u8234640387946w1/>

[L20]

I. Dani, L. Kotte, P. Grabau, B. Leupolt, S. Kaskel, E. Beyer

»Atmosphärendruck-Plasmabehandlung von Polypropylen zur Haftungsverbesserung«

Workshop »Haftverbesserung durch Oberflächenfunktionalisierung mittels Atmosphärendruckplasma« (2010), Tagungsband

[L21]

I. Dani, E. Lopez, D. Linaschke, S. Kaskel, E. Beyer

»Großflächiges plasmachemisches Ätzen bei Atmosphärendruck«

Workshop »Gasmanagement für Atmosphärendruck-Plasmatechnologien«, 15. April 2010, Tagungsband, S. 1-9

[L22]

N. Danz, F. Sonntag, A. Kick, B. Höfer, U. Klotzbach, M. Mertig

»SPR Plattformtechnologie zur Multi-Parameter-Analyse auf polymeren Chips«

15. Heiligenstädter Kolloquium »Technische Systeme für die Lebenswissenschaften«, Tagungsband

[L23]

G. Dietrich, S. Braun, M. Rühl, A. Leson

»Reactive Nanoscaled Multilayers for High Precision Joining«

PSE (2010), S. 313

[L24]

D. Dittrich, B. Brenner, G. Kirchhoff, J. Hackius

»New Stiffener Designs and Al-Alloys for Laser Welded Integral Structures to Sustain Higher Load at Reduced Weight«

European Conference on Materials and Structures in Aerospace (2010), Tagungs-CD

[L25]

D. Dittrich, B. Winderlich, G. Kirchhoff, B. Brenner, J. Hackius

»Verbesserung der Bewertung von laserstrahlgeschweißten Flugzeugrumpf-Strukturen und deren Belastbarkeit anhand von Tests an Kleinproben«

DGM-Tagung »Werkstoffprüfung« (2010), Tagungsband

[L26]

K. Florschütz, A. Schröter, M. Körner, S. Schmieder, F. Sonntag, U. Klotzbach, G. Kunze

»Detection of Phytopathogenic RNA-Viruses«

15. Heiligenstädter Kolloquium »Technische Systeme für die Lebenswissenschaften«, Tagungsband

[L27]

F.-U. Gast, M. Bürger, T. Gehring, S. Howitz, K. Meißner, J. Steidl, U. Klotzbach, F. Sonntag

»Der Nano-Plotter, eine flexible Robotikplattform zur Herstellung von 2D- und 3D-Strukturen für die Zellbiologie und die regenerative Medizin«

Regenerative Medizin (2010)

[L28]

P. Gawlitzka, S. Braun, A. Leson, W. Soer, M. Jak, V. Banine

»DLC/Si Multilayer Mirrors for EUV Radiation«

Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash: Advances in X-Ray/EUV Optics and Components V: San Diego, CA, USA, 02.-03. August 2010, Bellingham, WA: SPIE (2010), Paper 78020A

[L29]

L. Girdauskaite, S. Krzywinski, H. Rödel, A. Wildasin-Werner, R. Böhme, I. Jansen

»Local Structure Fixation in the Composite Manufacturing Chain«

Appl. Compos. Mater. 17 (2010), S. 597-608, DOI: 10.1007/s10443-010-9130-6

[L30]

G. Göbel, J. Kaspar, T. Herrmannsdörfer, B. Brenner, E. Beyer

»Insights into Intermetallic Phases on Pulse Welded Dissimilar Metal Joints«

4th International Conference on High Speed Forming ICHSF 2010 Online-Proceedings Columbus/USA (2010), S. 127-136

[L31]

W. Grählert, H. Beese, S. Kaskel, J. Grübler, K. Pietsch

»HiBarSens - ein neuartiges Messsystem zur Bestimmung der Permeationsrate flexibler Ultrabariere-materialien«

Workshop »Anforderungen an Schichten auf flexiblen Substraten für Barrierschutz und weitergehende Eigenschaften« (2010), Tagungsband

[L32]

W. Grählert, C. Jakschik, V. Türschmann

»Ressourcen schonen - Innovative Absaugtechnik für Laserbearbeitung von Wafern senkt Kosten«

EuroLaser (2010) 1

[L33]

M. Gruchow, U. Marx, S. Hoffmann, N. Schilling, S. Schmieder, U. Klotzbach, S. Howitz, F. Sonntag

»Pneumatisch betriebene Mikropumpen für Lab-on-a-Chip Anwendungen«

15. Heiligenstädter Kolloquium »Technische Systeme für die Lebenswissenschaften«, Tagungsband

[L34]

H. Gutzmann, J.-O. Kliemann, R. Albrecht, F. Gärtner, T. Klassen, F.-L. Toma, L.-M. Berger, B. Leupolt

»Evaluation of the Photocatalytic Activity of TiO₂-Coatings Prepared by Different Thermal Spray Techniques«

DVS Media GmbH (2010) CD, S. 182-186, ISBN: 978-3-87155-590-9

[L35]

L. Haubold, T. Schülke, M. Becker, G. Woodrough

»The Influence of the Surface Texture of Hydrogen-Free Tetrahedral Amorphous Carbon Films on their Wear Performance«

Diamond and Related Materials 19 (2010) 2/3, S. 225-228

[L36]

J. Hauptmann, A. Klotzbach, T. Himmer, A. Wetzig, E. Beyer,

»Domain Refinement of Grain Oriented Silicon Steel«

Inductica Technical Conference 22-24 Juni 2010, Berlin, Tagungsband

[L37]

A. Henseleit, S. Schmieder, T. Bley, F. Sonntag, N. Schilling, P. Weber, U. Klotzbach, E. Boschke

»An Advanced Low-Cost Bench-Top SPR-Based Aptasensor«

Journal Sensors, ISSN 1424-8220

[L38]

C. Hinüber, C. Kleemann, R.-J. Friederichs, L. Haubold, H.-J. Scheibe, T. Schuelke, C. Boehlerl, M.-J. Baumann

»Biocompatibility and Mechanical Properties of Diamond-Like Coatings on Cobalt-Chromium-Molybdenum Steel and Titanium-Aluminum-Vanadium Biomedical Alloys«

Journal of Biomedical Materials Research. Part A 95 (2010) 2, S. 388-400

[L39]

A. Jahn, M. Heitmanek, J. Standfuß, B. Brenner, B. Donat, G. Wunderlich, P. Mickel, T. Vogel

»Lokale Laserbehandlung zur Steigerung der Crash-Belastbarkeit von Karosseriebauteilen«

DVS-Berichte 267 (2010), S. 306-311

[L40]

F. Kaulfuß, O. Zimmer

»Unterdrückung des Defektwachstums. Neue Perspektiven bei der Arc-Abscheidung von Hartstoffschichten«

Vakuum in Forschung und Praxis 22 (2010) 2, S. 39-42

[L41]

S. Kaskel, H. Althues, I. Dani, V. Hopfe, E. Beyer

»Chemical Vapour Deposition at Atmospheric Pressure«

PSE (2010), Tagungsband

[L42]

A. Kick, M. Bönsch, B. Katzschner, J. Voigt, A. Herr, W. Brabetz, M. Jung, F. Sonntag, U. Klotzbach, N. Danz, S. Howitz, M. Mertig

»DNA Microarrays for Hybridization Detection by Surface Plasmon Resonance Spectroscopy«

Biosensors and Bioelectronics (2010) DOI: 10.1016/j.bios.2010.07.108

- [L43]**
A. Klausch, H. Althues, C. Schrage, P. Simon, A. Szatkowski, M. Bredol, D. Adam, S. Kaskel
»Preparation of Luminescent ZnS:Cu Nanoparticles for the Functionalization of Transparent Acrylate Polymers«
Journal of Luminescence 130 (2010) 4, S. 692-697
- [L44]**
A. Klotzbach
»Lasereinsatz für flexible Verbindungen«
Fachtagung High-Tech-Textilien (2010), Tagungsband
- [L45]**
A. Klotzbach
»Schnelles Trennen von Faserverbundwerkstoffen«
Photonik (2010) 6
- [L46]**
A. Klotzbach, M. Hauser, E. Beyer
»Remote Processing of Fiber Reinforced Plastics«
29th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (2010), Tagungs-CD, ISBN: 978-0-912035-61-1
- [L47]**
U. Klotzbach
»LIFT Leadership in Fibre Laser Technology Perspectives of fibre lasers - Challenges and Potential«
High Power Diode Lasers & Systems Congress, Photonex November 2010, Telford UK, Tagungsband
- [L48]**
S. Kozerski, F.-L. Toma, L. Pawlowski, B. Leupolt, L. Latka, L.-M. Berger
»Suspension Plasma Sprayed TiO₂ Coatings Using Different Injectors and Their Photocatalytic Properties«
Surface and Coatings Technology 205 (2010) 4, S. 980-986, ISSN 0257-8972
- [L49]**
S. Kühn
»Dynamisches Strahlformungssystem zur Erzeugung ringförmiger Härtezone«
8. Workshop »Industrielle Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern« (2010), Tagungs-CD
- [L50]**
D. Langheinrich, O. Paetzold, L. Raabe, M. Stelter
»VGF Growth of Germanium Single Crystals without Crucible Contact«
Journal of Crystal Growth 312 (2010) 16/17, S. 2291-2296
- [L51]**
A.F. Lasagni, C. Holzapfel, M. Engstler, F. Mücklich
»3D-Mikrostrukturuntersuchung an einer AlSi₃Mg₅-Legierung mit der FIB-Tomographie«
Praktische Metallographie 47 (2010) 9, S. 487-499
- [L52]**
A.F. Lasagni, B.S. Menendez-Ormaza
»Two- and Three-Dimensional Micro- and Sub-Micrometer Periodic Structures Using Two-Beam Laser Interference Lithography«
Advanced Engineering Materials 12 (2010) 1/2, S. 54-60
- [L53]**
A.-F. Lasagni, P. Shao, J. Hendricks, C.-M. Shaw, D.-C. Martin, S. Das
»Direct Fabrication of Periodic Patterns with Hierarchical Sub-Wavelength Structures on Poly(3,4-Ethylene Dioxathiophene)-Poly(styrene Sulfonate) Thin Films Using Femtosecond Laser Interference Patterning«
Applied Surface Science 256 (2010) 6, S. 1708-1713
- [L54]**
A. Leson
»Nanotechnologie - Risiko oder Chance?«
Vakuum in Forschung und Praxis Vol. 22 (2010) 2
- [L55]**
A. Leson
»Umsetzung in industrielle Prozesse und Produkte«
Nano-Energie, Newsletter (2010) 1, CeNIDE, S. 6
- [L56]**
J. Liebich, H. Althues, S. Kaskel
»Leitfähige CNT-Dünnschichten in Polymeroberflächen«
Kunststoffe (2010) 12
- [L57]**
M. Lütke, T. Himmer, A. Wetzig
»From Drawing to the Device – Requirements and Approaches in Remote Cutting«
Fraunhofer IWS International Laser Symposium Fiber & Disc (FiSD), (2010), Tagungs-CD, ISBN 978-3-8396-0197-6
- [L58]**
M. Lütke, T. Himmer, A. Wetzig, E. Beyer
»Enlarging the Application Area for Remote Cutting«
International Sheet Metal Review (ISMR) (2010) 2/3, S. 18-19
- [L59]**
A. Mahrle, M. Lütke, E. Beyer
»Fibre Laser Cutting: Beam Absorption Characteristics and Gas-Free Remote Cutting«
Journal of Mechanical Engineering Science: Special Issue on Laser Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C (2010) 224, No. C5, S. 1007-1018, ISSN: 0954-4062
- [L60]**
K. Meißner, F. Sonntag, J. Steidl, M. Bürger, S. Howitz, U. Klotzbach
»Entwicklung eines Mehrkanalplotter zur Herstellung von Multi-Komponenten-Scaffolds mit definierten Versorgungskanälen«
15. Heiligenstädter Kolloquium »Technische Systeme für die Lebenswissenschaften«, Tagungsband
- [L61]**
S. Nowotny
»3D-Laserauftragschweißen bei erschwerter Zugänglichkeit«
Photonik 42 (2010) 3, S. 18
- [L62]**
S. Nowotny, F. Brückner, F. Kubisch, R. Wappler, S. Scharek, E. Beyer
»Increased Productivity of Laser Surface Cladding by Simultaneously Assisting Energy Sources«
24th International Conference on Surface Modification Technologies SMT24, 7. - 9. September 2010, Dresden, Tagungsband
- [L63]**
S. Nowotny, R. Münster, S. Scharek, E. Beyer
»Integrated Laser Cell for Combined Laser Cladding and Milling«
Emerald's Assembly Automation 30 (2010) 1, S. 36-38, ISSN: 0144-5154
- [L64]**
J.-S. Pap, I. Jansen
»Adhesive Bonding of Hybrid Yarn Textile Thermoplastic Composites«
14th European Conference on Composite Materials (2010), Paper ID: 067-ECCM14
- [L65]**
J.-S. Pap, I. Jansen
»Techniques for Adhesion Improvement – Adhesive Bonding of a Glass Fibre / Polypropylene Composite«
4th World Congress on Adhesion and Related Phenomena (2010), Tagungsband, S. 103
- [L66]**
J.-S. Pap, M. Kästner, I. Jansen
»An Approach to Experimentally Characterise the Mechanical Behaviour of an Epoxy-Based Adhesive«
4th World Congress on Adhesion and Related Phenomena (2010), Tagungsband, S. 215
- [L67]**
M. Panzner, U. Klotzbach, W. Köhler, A. Schmid, E. Beyer
»Untersuchung von Kunstobjekten mit Terahertz-Zeitdomänenspektroskopie - Chancen und Herausforderungen eines neuen Messverfahrens«
Restauro Callwey Verlag (2010)
- [L68]**
R. Rechner, I. Jansen, E. Beyer
»Effect of Laser Pretreatment on Aluminium Oxide Surfaces«
4th World Congress on Adhesion and Related Phenomena (2010), Tagungsband, S. 177
- [L69]**
R. Rechner, I. Jansen, E. Beyer
»Laser- und Plasmaverfahren im wirtschaftlichen Vergleich: Vorbehandlung von Aluminiumoberflächen«
Adhäsion. Kleben und Dichten 54 (2010) 1/2, S.36-38, S. 40-43, ISSN: 0943-1454
- [L70]**
R. Rechner, I. Jansen, E. Beyer
»Influence on the Strength and Aging Resistance of Aluminium Joints by Laser Pre-Treatment and Surface Modification«
International Journal of Adhesion and Adhesives 30 (2010) 7, S. 595-601

[L71]

T. Roch, M. Bieda, A. Lasagni
 »Innovative Methode für die direkte Herstellung periodischer Oberflächenstrukturen auf Metallen und Beschichtungen«
 Laser Magazine 4, S. 30-31

[L72]

T. Roch, A. Lasagni
 »Direct Laser Interference Patterning of Tetrahedral Amorphous Carbon Thin Films«
 8th International Nanotechnology Symposium »Nanofair 2010, New Ideas for the Industry«, Dresden, 6. – 7. Juli 2010, Tagungsband

[L73]

T. Roch, A. Lasagni, E. Beyer
 »Surface Modification of Thin Tetrahedral Amorphous Carbon Films by Means of UV Direct Laser Interference Patterning«
 Diamond Related Materials (2010) 19, Issue 12, S. 1472-1477
 DOI: 10.1016/j.diamond.2010.10.003

[L74]

T. Roch, A. Lasagni, E. Beyer
 »Nanosecond UV Laser Modification of Thin Tetrahedral Amorphous Carbon Films with Different sp^3/sp^2 Content«
 Thin Solid Films, im Druck
 DOI: 10.1016/j.tsf.2011.01.338

[L75]

D. Rost, M. Zeuner, A. Seifert, M. Nestler, S. Braun, A. Leson, P. Gawlitza, M. Menzel
 »Deposition of Large Area Multi-layer Coatings for High End Optics«
 PSE (2010), S. 518

[L76]

N. Schilling, S. Schmieder, M. Gruchow, U. Marx, S. Hoffmann, U. Klotzbach, F. Sonntag
 »Prägetechnologie zur Umsetzung von fluidischen Strukturen in Gel für die 3D-Zellkulturtechnik«
 15. Heiligenstädter Kolloquium »Technische Systeme für die Lebenswissenschaften«, Tagungsband

[L77]

W. Schork
 »Reibungsminderung an Antriebs- und Motorkomponenten durch Beschichtungen mit diamantähnlichem amorphen Kohlenstoff«
 Fraunhofer Verlag (2010), ISBN 3-8396-0101-0

[L78]

W. Schork, B. Schultrich, V. Weihnacht
 »A New Kind of Oscillating Dynamic Load Test for Tribological Coatings«
 Wear 268 (2010) 7-8, S. 955-959

[L79]

C. Schrage, H. Althues, A. Klausch, D. Adam, S. Kaskel
 »ZnS:Cu Polymer Nanocomposites for Thin Film Electroluminescent Devices«
 Journal of Nanoscience and Nanotechnology 10 (2010) 7, S. 4335-4340

[L80]

B. Schultrich
 »Lexikon der Dünnschichttechnologie«
 Sonderausgabe der Zeitschrift Vakuum in Forschung und Praxis (2010)

[L81]

B. Schultrich
 »Reibungs- und verschleißmindernde Schichten«
 In G. Blasek, G. Bräuer (Herausg.): Vakuum-Plasma-Technologien, Leuze-Verlag, Bad Saulgau, 2010, S. 901-982

[L82]

B. Schumm, H. Althues, S. Kaskel
 »CdTe Nanoparticles for the Deposition of CdTe Films Using Close Spaced Sublimation«
 Journal of Crystal Growth 312 (2010) 16/17, S. 2449-2453

[L83]

L.-D. Scintilla, L. Tricarico, A. Mahrle, A. Wetzig, T. Himmer, E. Beyer
 »A Comparative Study on Fusion Cutting with Disk and CO₂ Lasers«
 29th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics ICALEO, Anaheim/USA Proceedings, paper 702 (2010), S. 249-258, ISBN: 978-0-912035-61-1

[L84]

L.-D. Scintilla, L. Tricarico, A. Wetzig, T. Himmer, E. Beyer
 »Experimental Investigation on Inert-Gas Laser Beam Fusion Cutting with CO₂ and Disc Lasers«
 Germany International Laser Symposium Fiber & Disc (FISC), (2010), Tagungs-CD, ISBN 978-3-8396-0197-6

[L85]

F. Sonntag, M. Henke, M. Gruchow, F. Mehringer, S. Schmieder, M. Rabenau, R. Poll, U. Klotzbach
 »Steigerung der Sensitivität von Lab-on-a-Chip-Systemen durch magnetophoretische Fokussierung paramagnetischer Analyte«
 15. Heiligenstädter Kolloquium »Technische Systeme für die Lebenswissenschaften«, Tagungsband

[L86]

F. Sonntag, K. Meißner, J. Steidl, M. Bürger, S. Howitz, U. Klotzbach
 »Mehrkanalplotterssystem zur Herstellung von Multi-Komponenten-Scaffolds mit definierten Versorgungskanälen«
 Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomaterialien, Heilbad Heiligenstadt, Tagungsband

[L87]

F. Sonntag
 »Mikrofluidikkonzepte zur Sensitivitätssteigerung von Lab-on-a-Chip-Systemen«
 Fraunhofer Verlag (2010), ISBN 3-8396-0158-4

[L88]

F. Sonntag, N. Schilling, K. Mader, M. Gruchow, U. Klotzbach, G. Lindner, R. Horland, I. Wagner, R. Lauster, S. Howitz, S. Hoffmann, U. Marx
 »Design and Prototyping of a Chip-Based Multi-Micro-Organoid Culture System for Substance Testing, Predictive to Human (Substance) Exposure«
 Journal of Biotechnology 148 (2010) 1, S. 70-75

[L89]

J. Standfuß

»Ganzheitliche innovative fügetechnische Konzepte am Beispiel des PKW-Antriebsstranges: - Laserpowertrain -«

Fraunhofer Verlag (2010), ISBN 3-8396-0125-8

[L90]

J. Standfuß, B. Brenner, M. Krätzsch, A. Klotzbach

»Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen mit brillanten Strahlquellen und hochfrequenter Strahloszillation«

7. Jenaer Lasertagung (2010), Tagungsband

[L91]

J. Standfuß, A. Klotzbach, M. Heitmanek, M. Krätzsch

»Laserstrahlschweißen mit hochfrequenter Strahloszillation: Untersuchungen zum Schweißen von Mischverbindungen mit brillanten Strahlquellen«

International Laser Symposium Fiber & Disc (FiSC), (2010) Tagungs-CD, ISBN 978-3-8396-0197-6

[L92]

J. Standfuß, R. Schedewey, R. Nieberle

»Laserschweißen von Lithium-Ionen-Batterien für die Automobil-industrie«

International Laser Symposium Fiber & Disc (FiSC), (2010), Tagungs-CD, ISBN 978-3-8396-0197-6

[L93]

W. Storch, I. Jokiel, S. Nowotny, C. Frank

»Instandhaltung von Dampfturbinenventilen mittels Schweißen«

DVS Congress (2010), Tagungsband

[L94]

W. Storch, J. Seilkopf, S. Nowotny, H. Hillig, C. Frank

»EB- und Laserschweißtechnologien für den Turbinenbau: Erfahrungen und Erwartungen«

8. Konferenz Strahltechnik (2010), Tagungsband

[L95]

T. Stucky

»Korrosionsfeste Verschleißschichten«

Vakuum in Forschung und Praxis

[L96]

S. Thiele, K. Sempff, K. J. Roessler, L.-M. Berger, J. Spatzier

»Thermophysical Studies on Thermally Sprayed Tungsten Carbide - Cobalt Coatings«

DVS Media GmbH (2010) CD, S. 281-286, ISBN: 978-3-87155-590-9

[L97]

F.-L. Toma, C.-C. Stahr, L.-M. Berger, S. Saaro, M. Herrmann, D. Deska, G. Michael

»Corrosion Resistance of APS- and HVOF-Sprayed Coatings in the Al₂O₃-TiO₂ System«

Journal of Thermal Spray Technology 19 (2010) 1/2, S. 137-147

[L98]

F.-L. Toma, L.-M. Berger, S. Langner, T. Naumann

»Suspension Spraying – The Potential of a New Spray Technology«

Thermal Spray Bulletin Band 3 (2010) 1, S. 24-29, ISSN 1866-6248

[L99]

F.-L. Toma, L.-M. Berger, C.-C. Stahr, T. Naumann, S. Langner

»Microstructures and Functional Properties of Suspension-Sprayed Al₂O₃ and TiO₂ Coatings: An Overview«

Journal of Thermal Spray Technology 19 (2010) 1/2, S. 262-274

[L100]

F.-L. Toma, S. Scheitz, L.-M. Berger, V. Sauchuk, M. Kusnezoff

»Comparative Study of the Electrical Properties and Microstructures of Thermally Sprayed Alumina- and Spinel-Coatings«

DVS Media GmbH (2010) CD, S. 287-292, ISBN: 978-3-87155-590-9

[L101]

R. Trache, L.-M. Berger, S. Saaro, R.S. Lima, B.R. Marple

»The Influence of Particle Temperature, Particle Velocity and Coating Surface Temperature on the Sliding Wear Performance of TiO₂-Cr₂O₃ Coatings«

DVS Media GmbH (2010) CD, S. 336-341, ISBN: 978-3-87155-590-9

[L102]

R. Trache, L.-M. Berger, S. Saaro, R.S. Lima, B.R. Marple

»Untersuchung der Einflüsse wichtiger Beschichtungsparameter auf die elektrischen Eigenschaften von Cr₂O₃-TiO₂ Schichten«

Schriftenreihe »Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen« Band 37, Herausgeber: B. Wielage, TU Chemnitz (2010) S. 13-24, ISBN: 978-3-00-032471-0, ISSN: 1439-1597

[L103]

V. Weihnacht, S. Makowski, G. Englberger

»A Systematic Study of Friction and Wear Behaviour of DLC Coatings under Various Testing Conditions«

PSE (2010), S. 58

[L104]

P. Zhang, J. Lindemann, C. Leyens

»Influence of Shot Peening on Notched Fatigue Strength of the High-Strength Wrought Magnesium Alloy AZ80«

Journal of Alloys and Compounds 497 (2010) 1/2, S. 380-385

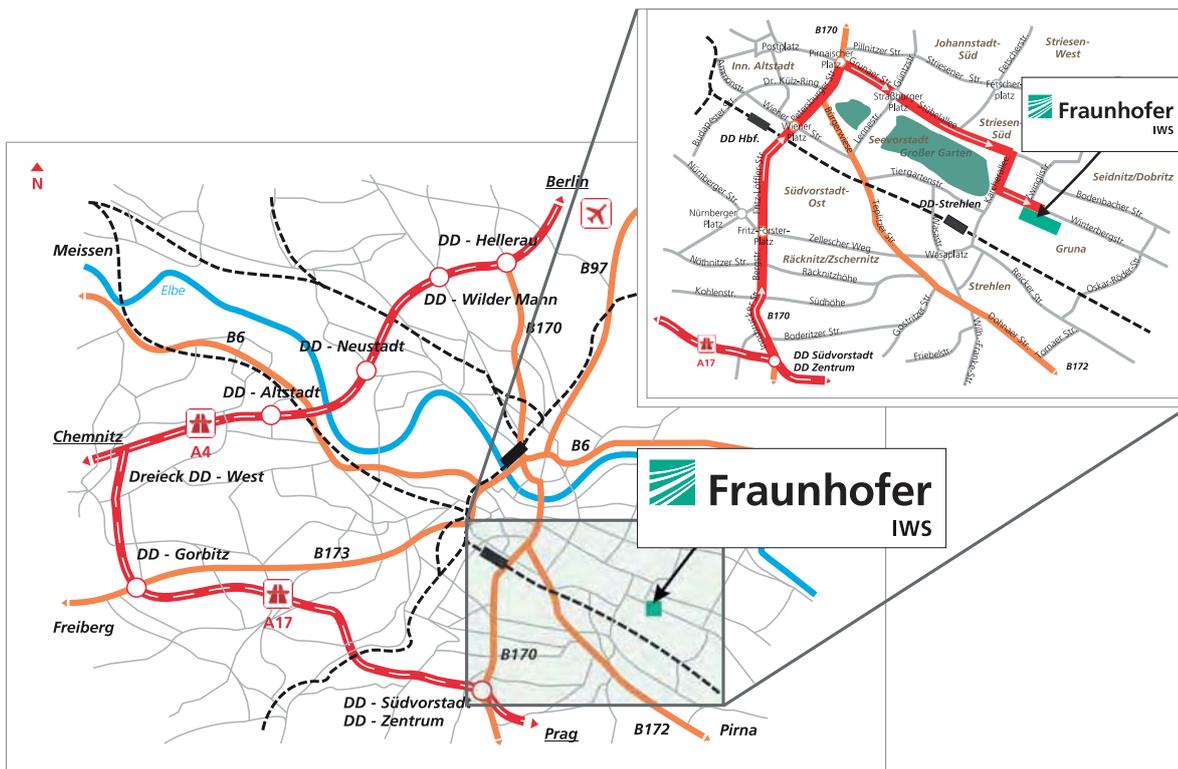
[L105]

P. Zhang, J. Lindemann, W.-J. Ding, C. Leyens

»Effect of Roller Burnishing on Fatigue Properties of the Hot-Rolled Mg-12Gd-3Y Magnesium Alloy«

Materials Chemistry and Physics 124 (2010) 1, S. 835-840

KONTAKTADRESSEN UND ANFAHRT



Mit dem Auto (ab Autobahn):

- Autobahn A4 oder A13 bis Dreieck Dresden-West, dann über die neue Autobahn A17, Ausfahrt Südvorstadt / Zentrum,
- Bundesstraße B170 folgend Richtung Stadtzentrum bis Pirnaischer Platz (ca. 6 km),
- am Pirnaischen Platz rechts abbiegen Richtung »Gruna / VW-Manufaktur«,
- geradeaus, am Ende des »Großen Gartens« rechts in die Karcherallee,
- an der folgenden Ampel links in die Winterbergstraße.

Post-Adresse:

Fraunhofer-Institut für Werkstoff-
und Strahltechnik IWS Dresden
Winterbergstr. 28

01277 Dresden

Mit der Straßenbahn (ab Dresden-Hauptbahnhof):

- Straßenbahnlinie 10 zum Straßburger Platz,
- mit den Linien 1 (Prohlis) oder 2 (Kleinzschachwitz) stadtauswärts bis Haltestelle Zwinglistraße,
- 10 min zu Fuß (Richtung Grunaer Weg).

Internet-Adresse:

www.iws.fraunhofer.de

Mit dem Flugzeug:

- ab Flughafen Dresden-Klotzsche mit dem Taxi zur Winterbergstraße 28 (ca. 10 km),
- oder mit der S-Bahn (unterirdische S-Bahn-Station) zum Hauptbahnhof, weiter s. Bahn.

Telefon +49 351 83391-0

Fax +49 351 83391-3300

E-mail: info@iws.fraunhofer.de

IMPRESSUM

Redaktion: Dipl.-Ing. Karin Juch
Dr. Anja Techel
Dr. Ralf Jäckel

Koordination / Gestaltung: Dipl.-Ing. Karin Juch
Dr. Ralf Jäckel

Bildnachweis:	S. 6	Marcus Schmidt (privat)
	S. 8 (o.)	MTU AERO Engines
	S. 9 (o. li.)	Roth & Rau Microsystems GmbH
	S. 9 (o. re)	VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH
	S. 11	Dr. F. Junker (privat)
	S. 32 (Abb. 2)	TU Berlin
	S. 44 (Abb. 2)	TU Dresden, ILK
	S. 65 (Abb. 4, 5)	Fraunhofer IKTS
	S. 90 (Abb. 1)	BAM
	S. 98 (o. li.)	SLV Halle GmbH
	S. 105	Fraunhofer IWS / Bolko Kosel
	S. 107	TU Wrocław
	S. 2, 3, 16, 18, 19, 22, 23, 34, 35, 46, 47, 56, 57, 58, 59, 64 (Abb. 1), 65, 67, 68, 69, 82, 83, 86 (Abb. 2), 114	Fraunhofer IWS / Frank Höhler
	Titel	Fraunhofer IWS / Frank Höhler
	alle anderen Abbildungen	Fraunhofer IWS

© Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2011

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.