



Fraunhofer

IWS



Dresden



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFF- UND STRAHLTECHNIK IWS

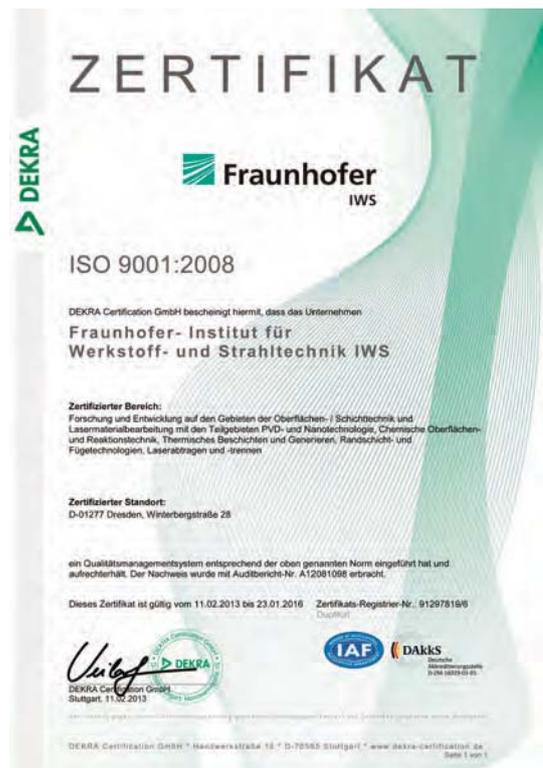
JAHRESBERICHT 2013

www.iws.fraunhofer.de





JAHRESBERICHT 2013



INSTITUTSLEITER PROF. DR. RALF ECKHARD BEYER



VORWORT

*»Es ist das lebendige Wort, das die Brücke
darstellt, über die Menschen zueinander finden.«*

Erna Endres

Das Jahr 2013 war durch eine relativ stabile wirtschaftliche Situation in Deutschland geprägt. Auch die IWS-Bilanz ist positiv. Es ist uns gelungen, das hohe Niveau der Ergebnisse der vergangenen Jahre beizubehalten, obwohl wir im Jahr 2012 einen überproportionalen Anstieg des Betriebshaushalts zu verzeichnen hatten.

Das Jahr brachte aber auch noch andere Höhepunkte mit sich. So fanden das Renommee und die wissenschaftlichen Arbeiten unseres Instituts in diesem Jahr auf verschiedene Art besondere Bestätigung. Gleich drei wissenschaftliche Mitarbeiter des IWS erhielten eine Professur an einer Fachhochschule, der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, einem weiteren Mitarbeiter wurde eine Open Topic Tenure Track Professur an der TU Dresden angeboten. Weitere Anerkennungen waren der German High Tech Champions Award, der Masing-Gedächtnispreis der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde, der Dorothy Hegarty Award sowie eine Ehrendoktorwürde der TU Wroclaw.

Im Jahr 2013 konnte eine Reihe von Großprojekten akquiriert werden. So wurde im Rahmen des Programms »Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation« der Bundesrepublik das Projekt »Additiv-generative Fertigung – Die 3D-Revolution zur Produktherstellung im Digitalzeitalter« bewilligt. Das Initialkonsortium unter der Leitung des IWS erhält in den nächsten sieben Jahren ca. 45 Mio. € Förderung (plus 45 Mio. € Industriebeteiligung). Weitere Großprojekte waren u. a. »PEGASUS II«, ein Projekt mit 13 Partnern zur Herstellung reibungsarmer Schichten, sowie das Batterieprojekt »BamoSa«, welches mit Partnern des DRESDEN-concept, d. h. mit anderen Dresdner außeruniversitären Forschungseinrichtungen und der TU Dresden, bearbeitet und ebenfalls vom IWS koordiniert wird.

Im Rahmen von Projekten mit Industriepartnern gab es auch 2013 wieder eine Vielzahl von IWS-Entwicklungen, die in die Serienfertigung überführt werden konnten. Einige dieser Höhepunkte möchten wir Ihnen in diesem Jahresbericht vorstellen.

In den letzten Jahren hat das IWS seine Aktivitäten verstärkt auf Themen der Energietechnik und Energieeffizienz ausgerichtet. Diese Themen sind aktueller denn je und werden auch das Jahr 2014 prägen, welchem wir sehr optimistisch entgegensehen.

An dieser Stelle möchte ich allen Projektpartnern für ihr Vertrauen und die gute Zusammenarbeit danken.

Eckhard Beyer

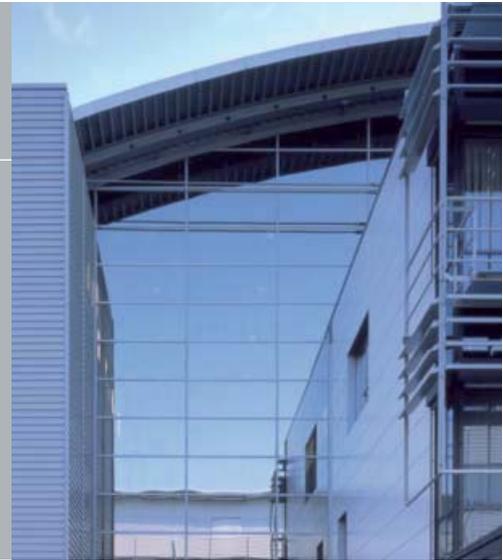
INHALT

DAS FRAUNHOFER IWS

VORWORT	3
INHALT	4
HIGHLIGHTS IM JAHR 2013	6
AUS DEM KURATORIUM	10
DAS INSTITUT IM PROFIL	12

AUS DEN GESCHÄFTSFELDERN

CHEMISCHE OBERFLÄCHEN- UND REAKTIONSTECHNIK	20
NEUE TECHNOLOGIEN VERBESSERN FUNKIONALITÄT VON OBERFLÄCHEN	
PVD-VAKUUM-SCHICHTTECHNOLOGIE	40
NEUARTIGE SCHICHTSYSTEME ERWEITERN ANWENDUNGSSPEKTRUM	
THERMISCHES BESCHICHTEN UND GENERIEREN	54
SYMBIOSE ZWISCHEN BESCHICHTUNGSTECHNIK UND WERKSTOFF-KNOW-HOW	
FÜGEN	68
FÜGETECHNOLOGIEN FÜR METALLISCHE UND NICHTMETALLISCHE WERKSTOFFE	
ABTRAGEN UND TRENNEN	86
DER LASER ALS WERKZEUG ZUM TRENNEN UND MIKROBEARBEITEN	
RANDSCHICHTTECHNIK	104
GANZHEITLICHER WERKSTOFF-, VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNISCHER ANSATZ	



ZENTREN, NETZWERKE, EHRUNGEN

ZENTREN 116

ZENTRUM BATTERIEFORSCHUNG	117
ZENTRUM TAILORED JOINING	118
ZENTRUM LASERINTEGRATION	119
ZENTRUM NANOTECHNOLOGIE	120
ZENTRUM KOHLENSTOFFTECHNIK	121
ZENTRUM FASERVERBUNDTECHNIK	122
ZENTRUM MEDIZIN- UND BIOSYSTEMTECHNIK	123
ZENTRUM NANOTUBES UND -PARTIKEL	124
ZENTRUM PROZESSÜBERWACHUNG UND SENSORIK	125
DORTMUNDER OBERFLÄCHENCENTRUM (DOC®)	126
PROJECT CENTER WROCLAW (PCW)	128
CENTER FOR COATINGS AND LASER APPLICATIONS (CCL)	130

NETZWERKE 132

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT	133
FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES	134
EXZELLENTER KOOPERATIONSPARTNER: TU DRESDEN	136
DRESDNER INNOVATIONSZENTRUM ENERGIEEFFIZIENZ	138

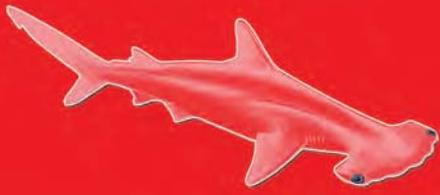
BESONDERE EREIGNISSE 140

AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN 142

VERÖFFENTLICHUNGEN 144

KONTAKTADRESSEN UND ANFAHRT 150

IMPRESSUM 151



HIGHLIGHTS IM JAHR 2013

EU-PROJEKT PLIANT GESTARTET

Um speziell im Bereich der nanostrukturierten Oberflächen den nächsten Schritt in Richtung Produktion und Anwendungen zu gehen, hat sich unter der Leitung des Fraunhofer IWS ein auf europäischer Ebene breit aufgestelltes Konsortium zusammengefunden. Ziel des im Februar 2013 gestarteten und mit 13,4 Mio. Euro budgetierten Verbundprojekts »PLIANT - Process Line Implementation for Applied Surface Nanotechnologies« ist es, die wissenschaftliche und produktionstechnische Führungsrolle Europas durch die Entwicklung innovativer Nano- und Oberflächentechnologien auszubauen. Kompetenzen von 13 Unternehmen, 5 Forschungseinrichtungen und 3 Universitäten aus 8 Ländern fließen zusammen und formen ein starkes Forschungsteam.

ZENTRUM FÜR BATTERIEFORSCHUNG EXPANDIERT

Im Juni 2013 konnte das Zentrum für Batterieforschung in Dresden einen weiteren Erfolg vermelden. 8 Mio. Euro Fördermittel des Bundes fließen in den nächsten 3 Jahren in die sächsische Landeshauptstadt, um die materialwissenschaftliche und prozesstechnische Forschung und Entwicklung für elektrische Energiespeicher weiter voranzutreiben. Mit den vom Bund bereitgestellten Mitteln können 864 Personennominate Wissenschaftler an mehreren außeruniversitären Forschungseinrichtungen und der TU Dresden finanziert werden.

Im Mittelpunkt des vom BMBF geförderten und vom Projektträger Jülich betreuten Projektes »BamoSa« (WING-Zentrum: Batterie - mobil in Sachsen) steht die Entwicklung von Materialien und Fertigungskonzepten für kobaltfreie Lithium-Ionen-Zellen sowie die Entwicklung von neuen Materialien und Zellkonzepten für Lithium-Schwefel-basierte Zellen. Die Arbeiten werden in drei instituts- und einrichtungsübergreifenden Forschergruppen durchgeführt und widmen sich den Themen Zellmorphologie, Zelldesign und -analytik sowie Zellprozessierung. Die Validierung der Ergebnisse erfolgt in drei Industrievorhaben.

ZWANZIG20 – PARTNERSCHAFT FÜR INNOVATION

Produkte im Computer zu entwerfen und dann direkt in einem automatisierten Prozess ohne weitere Zwischenschritte einbaufertig herzustellen, das ist nur eine der Visionen, die im Rahmen des Projekts »Additiv-generative Fertigung« verwirklicht werden sollen. Ein Konsortium von 40 Partnern hat sich unter Federführung des Fraunhofer IWS Dresden zum Ziel gesetzt, additiv-generative Fertigung zur Schlüsseltechnologie zu entwickeln und dabei ein starkes Netzwerk zwischen der Industrie und Forschungsinstituten aufzubauen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung stellt dem Konsortium in den nächsten sieben Jahren insgesamt bis zu 45 Mio. Euro zur Verfügung, um die Forschung und Entwicklung auf diesem zentralen Innovationsfeld der Werkstoff- und Fertigungstechnik zu unterstützen.

ENERGIEEFFIZIENZ IN DER FERTIGUNG

Die Herstellung von Kohlenstoffschichten zur Minimierung von Reibverlusten ist auch in den nächsten Jahren ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt des Fraunhofer IWS in Dresden. Unmittelbar nach Abschluss des BMWi-Verbundprojektes »PEGASUS« startete im Juli 2013 das Folgeprojekt »PEGASUS II«. Die vom BMWi geförderte Aktivität mit 3 ¼ Jahren Laufzeit und einem Gesamtvolumen von 20 Mio. Euro wird von 8 Unternehmen und 3 Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft vorangetrieben.

THERMOELEKTRISCHE ENERGIERÜCKGEWINNUNG

Im November 2013 startete das von der EU geförderte Projekt »NanoCaTe«. In dem vom Fraunhofer IWS koordinierten Verbundprojekt arbeiten 5 Unternehmen, 4 Universitäten und 3 Forschungseinrichtungen aus 5 europäischen Ländern an der Entwicklung innovativer nanostrukturierter Kohlenstoffmaterialien für energieautarke drahtlose Sensoren sowie »energy harvester«. Die Projektlaufzeit ist mit 4 Jahren angesetzt, das Gesamtbudget beträgt 5,5 Mio. Euro.

HIGHLIGHTS IM JAHR 2013



MESSGERÄT ZUR CHARAKTERISIERUNG VON BARRIEREMATERIALIEN SCHAFFT DEN SPRUNG IN DIE SERIE

Der enorm hohe technologische Aufwand sowie die große Messunsicherheit bei der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Ultrabarrierematerialien gehören nunmehr der Vergangenheit an. Technologien des Fraunhofer IWS ermöglichen die zuverlässige Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit im Bereich $< 10^{-4} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Somit sind insbesondere Ultrabarrierematerialien für die OLED-Fertigung, die im Bereich von $10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ liegen, einfach und zuverlässig bestimmbar. Die Verbesserung der Nachweisgrenze um nahezu zwei Größenordnungen wurde durch das Zusammenwirken einer hochempfindlichen laserspektroskopischen Bestimmung des permeierten Wasserdampfes mit einer dezidierten Mess Versuchsdurchführung ermöglicht. Die Technologie wurde in ein kompaktes Tischgerät implementiert, welches sowohl einen weiten Messparameterraum abdeckt (Temperatur: 10 - 50 °C; vorgelegte Feuchte: 50 - 100 % r. F.) als auch einen einzigartigen Dynamikbereich von 100 - $10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ aufweist. In enger Kooperation mit dem Entwicklungspartner Sempa Systems GmbH konnten im Jahr 2013 die ersten Messsysteme unter der Marke »HiBarSens« in die industrielle Anwendung überführt werden.

INFRA-SORP®, DAS MESSGERÄT ZUM HOCHDURCHSATZ-SCREENING PORÖSER MATERIALIEN

Porös, »ja« oder »nein«? Diese Frage kann innerhalb von wenigen Minuten simultan für bis zu 12 Proben geklärt werden, ohne die herkömmliche, vergleichsweise langsam und seriell arbeitende Messtechnik einsetzen zu müssen. In einer einzigen Kurzzeitmessung kann die Aufnahmekapazität von bis zu 12 Proben parallel getestet und klassifiziert werden. Die durch das Fraunhofer IWS entwickelte Technologie ist somit ein ideales Instrument für die Qualitätskontrolle und die Bestimmung der spezifischen Oberfläche und Adsorptionskapazität einer Probe. Unter Federführung des Entwicklungspartners Rubotherm GmbH und dem Markennamen »InfraSORP« startete 2013 der Markteintritt der Fraunhofer IWS-Technologie.

PRODUKTIONSEINFÜHRUNG EINES KOCHMESSERS MIT SELBSTSCHÄRFEEFFEKT

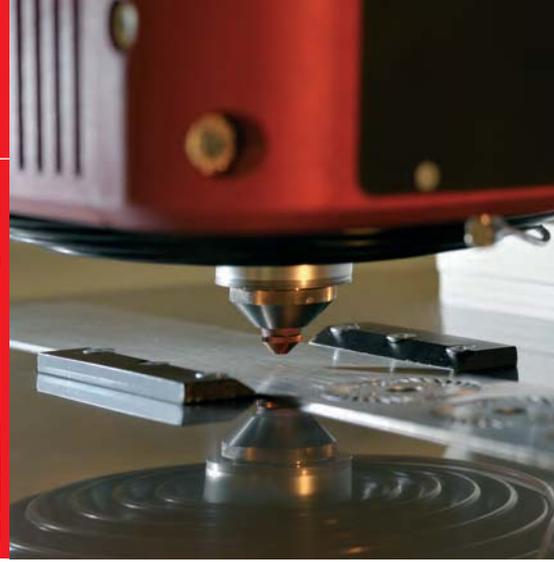
Ausgehend von bionischen Prinzipien entwickelte das Fraunhofer IWS den Prototypen eines selbstschärfenden Messers durch die einseitige Beschichtung der Messerschneide mit extrem hartem, tetraedrisch gebundenem Kohlenstoff (ta-C). In enger Zusammenarbeit mit der Fissler GmbH wurde das Abscheideverfahren im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und reproduzierbar hohe Produktqualität bis zur Serientauglichkeit ertüchtigt. So konnte im Jahr 2013 ein selbstschärfendes Kochmesser in zwei Varianten (Santoku und europäisches Kochmesser) erfolgreich in den Markt eingeführt werden (siehe auch S. 46/47).

LASERINTEGRIERTES FRÄSZENTRUM FÜR DIE ADDITIV-GENERATIVE FERTIGUNG

In Zusammenarbeit mit der Firma Sauer Lasertec ist ein CNC-Fräszentrum als innovatives Fertigungszentrum für die Laser-generative Bauteilfertigung ausgerüstet worden. Die IWS-Technologie zum generativen Laser-Pulver-Auftragschweißen in Form von Systemtechnik und Prozessbausteinen wurde intelligent mit der Finishbearbeitung durch Fräsen verkettet. Auf diese Weise sind komplexe metallische Bauteile mit hoher Geometriefreiheit unmittelbar aus den 3D-CAD-Datensätzen herstellbar. Die erste öffentliche Präsentation der Maschine zur Euromold 2013 stieß auf außerordentlich große Resonanz.

PULVERDÜSEN UND DRAHT-BESCHICHTUNGSKOPF ZUM AUFTRAGSCHWEISSEN

Im Jahr 2013 sind wieder etwa 25 Laser-Bearbeitungsköpfe zum Auftragschweißen mit Pulver und Draht für produzierende Unternehmen in Europa, Asien und Nordamerika in die Fertigung überführt worden. Neben Großflächenbeschichtungen für Anwendungen im Bergbau, der Energieerzeugung sowie der Ölförderung ist ein Ansteigen von Anwendungen des Hochpräzisions- und Mikroauftragschweißens zu verzeichnen. Das Fraunhofer IWS schulte die Unternehmensmitarbeiter im Umgang mit der Technik.



LASER-MSG-HYBRIDSCHWEISSANLAGE ZUM LÄNGS- NAHTSCHWEISSEN VON MOBILKRANKOMPONENTEN

Durch die Fraunhofer IWS-Projektgruppe am Dortmunder OberflächenCentrum DOC® wurden bei der Firma KSK-Vlassenroot am Standort Schwerte eine 19 m lange Laser-MSG-Hybridschweißanlage sowie eine Laser-Hand-Schweißanlage zum Heftschweißen der Bauteile in die Produktion überführt. Die auf einer Großportalanlage der Firma Reis basierende Hybridschweißanlage ist mit einem 12 kW Faserlaser und Sensorik für eine automatische Nahtverfolgung ausgestattet.

Auf der Anlage werden zzt. Teleskoprohre für Mobilkräne bis zu einer Höhe von 180 m aus höchstfesten Feinkornbaustählen im Blechdickenbereich von 4 - 12 mm aus einer Ober- und Unterschale mit zwei Längsnähten in PC-Position zusammengefügt. Die Halbschalen werden vor dem Hybridschweißen an 3 Bautischen mittels Laser-Hand-Heftschweißen geheftet.

Durch die automatische Nahtverfolgung und hohe Flexibilität des Laser-Hand-Heftschweißens können auf der Anlage auch andere Stahlbaukomponenten mit minimiertem Bauteilverzug verschweißt werden. Die gesamte Prozessentwicklung erfolgte durch das Fraunhofer IWS, das auch beim Aufbau und der Inbetriebnahme sowie beim Produktionsstart maßgeblich beteiligt war.

HOCHDYNAMISCHES SCHNEIDEN MIT FASERLASERN ERSTMALIG IN DIE INDUSTRIE ÜBERFÜHRT

Zusammen mit dem Partner Scheuermann + Heilig, einem international führenden Hersteller von Stanz-, Stanz-Biege- und Montageteilen, wurden sowohl der hochdynamische Formcutter (HDFC) zum Schmelzschnitten als auch das Remote-Laserschneiden von metallischen Stanz- und Biegeteilen erstmalig in eine industrielle Fertigungslinie integriert. Erste Vorserienteile für einen Kunden aus der Automobilbranche sind unter Zuhilfenahme des HDFC bereits gefertigt worden.

Im Unterschied zum klassischen Laserschneiden werden Taktzeiten erreicht, die denen des Stanzens nahekomen. Gegenüber dem Stanzen bietet das hochdynamische Laserschneiden dem Konstrukteur mehr Freiheiten bei der Bauteilgestaltung. Ein weiterer Vorteil des verschleißfreien Werkzeugs Laser besteht darin, dass hohe Werkzeugkosten und ungeplante Produktionsausfälle bei Werkzeugversagen vermieden werden.

LASERSTRAHLHÄRTEANLAGE FÜR DAMPFTURBINEN- SCHAUFELN FÜR FUJI ELECTRIC, JAPAN

Fuji Electric in Kawasaki, Japan, ist weltweit der zweite Industriekunde, der seit Juli 2013 eine Laserstrahlhärteanlage für Dampfturbinenschaufeln für Kraftwerke betreibt. Das Fraunhofer IWS transferierte die Technologie und unterstützte den Anlagenaufbau durch Entwicklung und Lieferung der verfahrensangepassten Kernkomponenten. Das dynamische Strahlformungssystem »LASSY« gewährleistet in Kombination mit orts aufgelöster Temperaturmessung und dem speziell für Laserprozesse entwickelten Regelsystem »LompocPro« belastungsangepasste Härte zonen im Bereich der Schaufeleintrittskanten.

MESS- UND REGELSYSTEME FÜR LASERPROZESSE

Insgesamt 6 speziell für Laserprozesse entwickelte kamerabasierte Temperaturmesssysteme »E-MAqS« konnten 2013 in die Fertigung überführt werden. In Kombination mit dem Regelsystem »LompocPro« kommen die Systeme bei vier Industriekunden und einer Forschungseinrichtung für Laserprozesse wie Härten, Löten und Auftragschweißen zum Einsatz. Das IWS unterstützte die Firmen Alotec Dresden (Härten), Bekaert, Belgien (Laserstrahl-Auftragschweißen), Fuji Electric, Kawasaki, (Laserstrahlhärten) System S.A., Kattwice, Polen, (Härten und Auftragschweißen), sowie das BIAS, Bremen, (Laserlöten) bei der Inbetriebnahme und Technologieentwicklung.

AUS DEM KURATORIUM



Das Kuratorium berät und unterstützt die Institutsleitung sowie die Organe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 23. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 22. März 2013 im Fraunhofer IWS Dresden statt. Mitglieder des Kuratoriums waren im Berichtszeitraum:

FRANK JUNKER, DR.

Vorsitzender des Kuratoriums
Selbstständiger Berater,
Radebeul

REINHOLD ACHATZ, DR.

ThyssenKrupp AG, Leiter
Corporate Technology, Innovation & Quality,
Essen

DIETER FISCHER

Geschäftsführer EMAG Leipzig Maschinenfabrik GmbH,
Leipzig

PETER KÖSSLER

Werkleiter AUDI AG,
Ingolstadt

UWE KRAUSE, DR.

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

HANS MÜLLER-STEINHAGEN, PROF. DR.

Rektor der Technischen Universität Dresden

PETER G. NOTHNAGEL

Geschäftsführer Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH,
Dresden

MARKUS RALL, DR.

Geschäftsführer Adolf Mohr Maschinenfabrik GmbH & Co.
KG, Hofheim / Taunus

HERMANN RIEHL, MINR

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

CHRISTOPH ULLMANN, DR.

Geschäftsführer Laserline GmbH,
Mülheim-Kärlich

RENÉ UMLAUFT, DR.

Sprecher des Vorstandes, MAN Diesel & Turbo SE,
Augsburg

FRANZ-JOSEF WETZEL, DR.

BMW Motorrad, Geschäftsbereichsplanung, Kooperationen,
München

PETER WIRTH, DR.

Rofin-Sinar Laser GmbH,
Hamburg

REINHARD ZIMMERMANN, MINR DR.

Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst,
Dresden



»Vom Grund her durchgängig positiv und über den Erwartungen«, sagte ein guter Freund und Fachmann in der Wirtschaft zu mir, als ich ihn um seine Einschätzung zum Jahr 2013 fragte, und sie deckt sich auch mit meiner. Die Konjunktur hat sich, wenn auch nicht in allen Branchen, gut entwickelt. Die positive Gesamtgeschäftsentwicklung wird dabei durch einen sehr hohen Export getragen und wirkt in vielen Bereichen nachhaltig. Eine gute Basis für die Zukunft, auch wenn nicht alle Länder der EU das positiv werten. Die Exportaussichten der deutschen Wirtschaft sind trotz der noch bestehenden Finanzkrise sehr gut. Vor allem in Europa ist das Vertrauen in die Zukunft wieder gewachsen.

Die Politik hat es 2013 sehr spannend gemacht. Nach den Wahlen und zähen Koalitionsverhandlungen werden die Ergebnisse mehrheitlich positiv bewertet. Es ist zu hoffen, dass die Rahmenbedingungen für die Wirtschaft auch den Erwartungen entsprechen. Eine wichtige Basis auch für die Institute der Fraunhofer-Gesellschaft.

Die Fraunhofer-Gesellschaft konnte sich 2013 wieder gut behaupten und erfolgreich weiterentwickeln. Eine stabile Nachfrage aus der Wirtschaft nach Forschungs- und Entwicklungsleistungen bestimmen das Wachstum. Es zeigt aber auch die Qualität ihrer Forschungsleistungen für die deutsche Wirtschaft. International hat die Fraunhofer-Gesellschaft sich weiter engagiert und vernetzt. Es ist eine wichtige Ausgangssituation, um die wissenschaftliche Kooperation mit den international Besten zu organisieren.

Für 2013 kann das Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS auf eine sehr erfolgreiche Entwicklung zurückblicken. Die Auftragsituation zeigt eine stabile Nachfrage nach Forschungsleistungen und folgt mit den Ergebnissen in überzeugender Weise dem Anspruch an hohe Innovationsfähigkeit. Die Forschungsergebnisse des IWS tragen damit zur wirtschaftlichen Stärke und der globalen Wettbewerbssituation der Unternehmen bei.

Mit der weiteren Ausprägung auf die Schwerpunkte der Oberflächen- und Lasertechnik sowie der Energiespeichertechnik und Energieeffizienz werden Projekte mit hohem Innovationsgrad und Anwendernutzen bearbeitet.

Das DRESDEN-concept als Wissenschaftsnetzwerk verbindet erfolgreich die Grundlagenforschung der Technischen Universität Dresden, der Max-Planck-Institute, der Leibniz-Institute und des Helmholtz-Zentrums mit der angewandten Forschung der Dresdner Fraunhofer-Institute.

Auch die Außenstelle des IWS in den USA und der Projektpartner in Wrocław, Polen, haben sich im Jahr 2013 weiter positiv entwickelt.

Der Institutsleiter, Prof. Eckhard Beyer, wurde am 15. November 2013 von der Technischen Universität Wrocław mit der Ehrendoktorwürde für seinen wissenschaftlichen Beitrag und sein Engagement beim Aufbau eines gemeinsamen Ausbildungs- und Forschungszentrums für Lasertechnik geehrt. Wir als Kuratoren freuen uns sehr über diese Auszeichnung und gratulieren Prof. Eckhard Beyer und dem Institut ganz herzlich für diese Wertschätzung.

Über die Entwicklung des Institutes im Jahr 2013 freuen wir uns außerordentlich und sehen einer weiteren strategischen Ausrichtung mit Spannung entgegen. Das Kuratorium dankt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes, der Institutsleitung und allen Partnern für die Zusammenarbeit und die erreichten Ergebnisse. Unser Dank gilt auch den Kunden für das gezeigte Vertrauen. Wir wünschen Ihnen für die Zukunft viel Gesundheit und Erfolg.

Ihr
Dr. Frank Junker

KERNKOMPETENZEN

Die Überführung aktueller Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis ist wesentlicher Antrieb für die Forschungsarbeiten des Institutes. Um dieser »Mission« gerecht zu werden, haben wir uns auf folgenden Gebieten Kernkompetenzen erarbeitet und ständig weiter ausgebaut:

LASERMATERIALBEARBEITUNG

- Hochgeschwindigkeitsschneiden von Metallen
- Schneiden und Schweißen von Kunststoffen sowie anderen Nichtmetallen
- Schweißverfahren für schwer schweißbare Werkstoffe
- Laser-Auftragschweißen sowie Generieren
- Laserrandschichthärten, Umschmelzen und Legieren speziell für hoch beanspruchte und komplizierte Bauteile
- Kurzzeitwärmebehandlungen
- Laserhybridtechnologien, wie z. B.
 - Laserinduktionsschweißen und -auftragschweißen
 - Plasma-, WIG- oder MIG-unterstütztes Laserstrahlschweißen und -auftragschweißen
 - Laserinduktionswalzplattieren
- Abtragen, Reinigen und Strukturieren
- prozessspezifische Überwachung und Regelung

OBERFLÄCHENFUNKTIONALISIERUNG UND BESCHICHTUNG

- Plasma-, Lichtbogen- und Flammstrahlverfahren mit Pulver und Suspensionen
- Hochrate- und Präzisionsbeschichtungsverfahren auf Basis der physikalischen Dampfphasenabscheidung
- Laser-Arc-Verfahren als Hybridtechnologie
- Plasma- und chemisches Ätzen, Abtragen, Reinigen und Funktionalisieren
- chemische Gasphasenabscheidung und Beschichtung
- Pastenauftrag (auch im Rolle-zu-Rolle-Verfahren)
- Sprühauftrag ultradünner Schichten
- Nano- und Mikrostrukturierung

SYSTEMTECHNIK

- Umsetzung des Verfahrens-Know-hows in Entwicklung, Fertigung und Design von Komponenten, Anlagen und Systemen mit der dazugehörigen Software
- Systemlösungen für das Schneiden, Schweißen, Abtragen, Auftragen, Randschichtveredeln und Charakterisieren mit Laser, z. B.
 - Bearbeitungsoptiken, Sensorik, Strahlableit- und Monitoringsysteme inklusive Steuerungssoftware für die Hochgeschwindigkeits- und Präzisionsbearbeitung
 - Systeme zur Strahlformung, Prozessüberwachung und -kalibrierung für die Randschichtveredelung mittels Hochleistungsdiodenlaser
- Beschichtungsköpfe zur kontinuierlichen richtungsunabhängigen Pulver- oder Drahtzufuhr sowie Prozessüberwachung und CAM-Steuerungssoftware
- verfahrensorientierte Prototypenentwicklung von Komponenten und Beschichtungsanlagen für die PVD-Präzisions- und Hochratebeschichtung sowie die chemische und thermische Oberflächenveredlung
- Messsysteme zur Schichtcharakterisierung bzw. zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung mittels laserakustischer und spektroskopischer Methoden
- Systeme zur spektroskopischen Überwachung von Gasgemischen
- Software- und Steuerungstechnik

»Ein großer Brückenschlag gelingt selten ohne Stützpfiler.«

B. Geller-Wollentin



WERKSTOFFTECHNIK / NANOTECHNIK

- Ermittlung von Werkstoffkennwerten für Werkstoffauswahl, Bauteilauslegung und Qualitätssicherung
- metallographische, elektronenmikroskopische und mikroanalytische Charakterisierung der Realstruktur von Metallen, Keramiken und Schichtverbänden
- Versagens- und Schadensanalyse
- Charakterisierung der Schwingfestigkeit bis $N \leq 10^9$ durch Hochfrequenz-Ermüdung
- Thermoschockcharakterisierung von Hochtemperaturwerkstoffen
- Eigenschaftsbewertung von randschichtbehandelten, beschichteten und geschweißten Werkstoffen und Bauteilen
- optisch-spektroskopische Charakterisierung von Oberflächen und Schichten (nm- bis mm-Bereich)
- mechanisch-tribologische Charakterisierung
- Schichtdicken- und E-Modul-Messungen von nm- bis mm-Schichten mittels Laserakustik
- Ellipsometrie, Röntgenreflektometrie und -diffraktometrie
- bildgebende Oberflächenanalyse
- Elektrochemie und Elektrodenchemie
- Herstellung, Funktionalisierung und Verarbeitung von Nanopartikeln und Nanotubes

PROZESSSIMULATION

- Eigenentwicklung von Simulationsmodulen zum
 - thermischen Randschichtbehandeln bzw. Laserhärten
 - Laser-Pulver-Auftragschweißen
 - Vakuumbogenbeschichten
 - Laserschneiden und -schweißen
- Berechnung der optischen Eigenschaften von Nanoschichtsystemen mit eigenen Simulationstools
- Nutzung kommerzieller Simulationsmodule zum
 - Laserstrahlschweißen und -schneiden
 - Optimieren der Gas- und Plasmaströmung bei Beschichtungsprozessen und der Lasermaterialbearbeitung

Geschäftsfelder	Kernkompetenzen				
	Lasermaterialbearbeitung	Oberflächenfunktionalisierung und Beschichtung	Werkstoff- / Nanotechnik	Systemtechnik	Prozesssimulation
Abtragen / Trennen	■	□	□	■	□
Fügen	■		■	□	□
Oberflächentechnik					
Randschichttechnik	□	□	■	■	□
Therm. Beschichtungstechnik	□	■	□	□	□
PVD-Vakuum-Schichttechnik	□	■	■	□	□
Chemische Oberflächen- und Reaktionstechnik		■	□	□	□

■ Hauptkompetenzen
 □ weitere Kompetenzen

VERWALTUNGSLEITERIN DR. ANJA TECHEL



»Kleinigkeiten sind es, die Perfektion ausmachen, aber Perfektion ist alles andere als eine Kleinigkeit.«

Sir Frederick Henry Royce

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

MITARBEITER AM IWS

	Anzahl
Stammpersonal	196
Wissenschaftler / Ingenieure (TU, FH)	130
Facharbeiter mit techn. oder kaufmänn. Ausbildung	57
Auszubildende	9
Mitarbeiter TU Dresden (Arbeitsort Fraunhofer IWS)	39
Stipendiaten + externe Mitarbeiter	12
Wissenschaftliche Hilfskräfte	210
GESAMT	457

PUBLIKATIONEN AM IWS

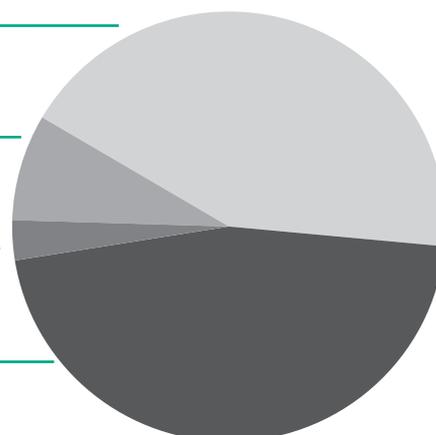
	Anzahl
Promotionen	3
Diplomarbeiten	17
Masterarbeiten	1
Bachelorarbeiten	4
Veröffentlichungen	126
GESAMT	151
Patente (Erstanmeldung)	14

43 % Stammpersonal

8 % TU-Mitarbeiter

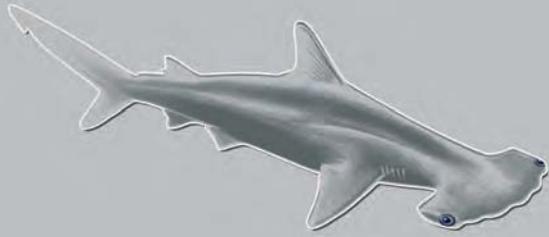
3 % Stipendiaten + externe Mitarbeiter

46 % Wissenschaftliche Hilfskräfte



MITARBEITER AM FRAUNHOFER CCL (USA)

17



Erträge 2013 (Mio. €)*	Betrieb	Investitionen	Gesamt
Projekterträge aus der Industrie	10,5 45 %	0,2 6 %	10,7 40 %
Projekterträge durch Bund, Land und EU	7,2 31 %	0,2 6 %	7,4 28 %
Grundfinanzierung und interne Programme	5,6 24 %	2,9 88 %	8,5 32 %
	23,3	3,3	26,6

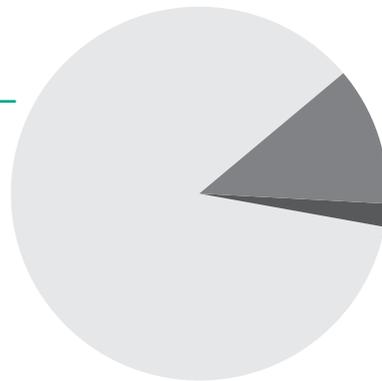
Aufwand 2013 (Mio €)*	
Personalaufwendungen	11,4 43 %
Sachaufwendungen	11,9 45 %
Investitionen	3,3 12 %
	26,6

Fraunhofer Industrie $\rho_{\text{Ind}} = 45,9 \%$

*STAND JANUAR 2014

HERKUNFT DER INDUSTRIERTRÄGE

Deutschland 86 %

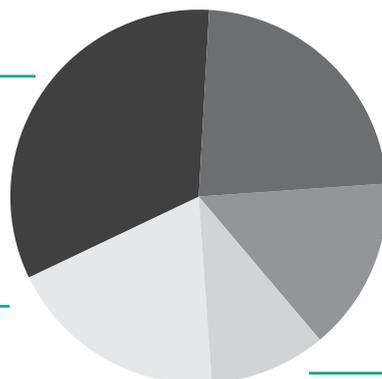


Europa 12 %

Asien 2 %

HERKUNFT DER ÖFFENTLICHEN ERTRÄGE

BMBF 33 %

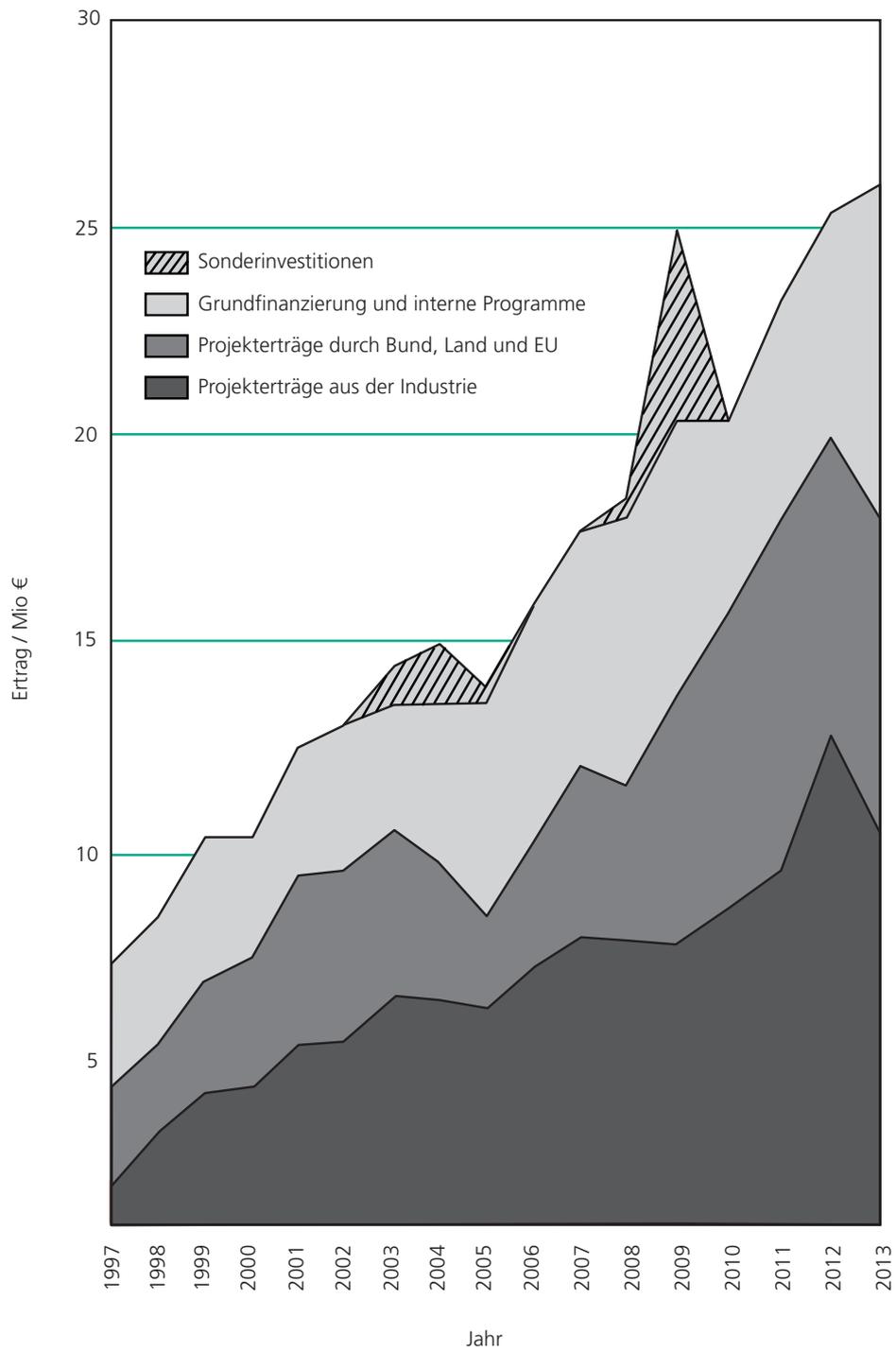


Länder 23 %

EU 15 %

Bund ohne BMBF 19 %

Sonstige 10 %



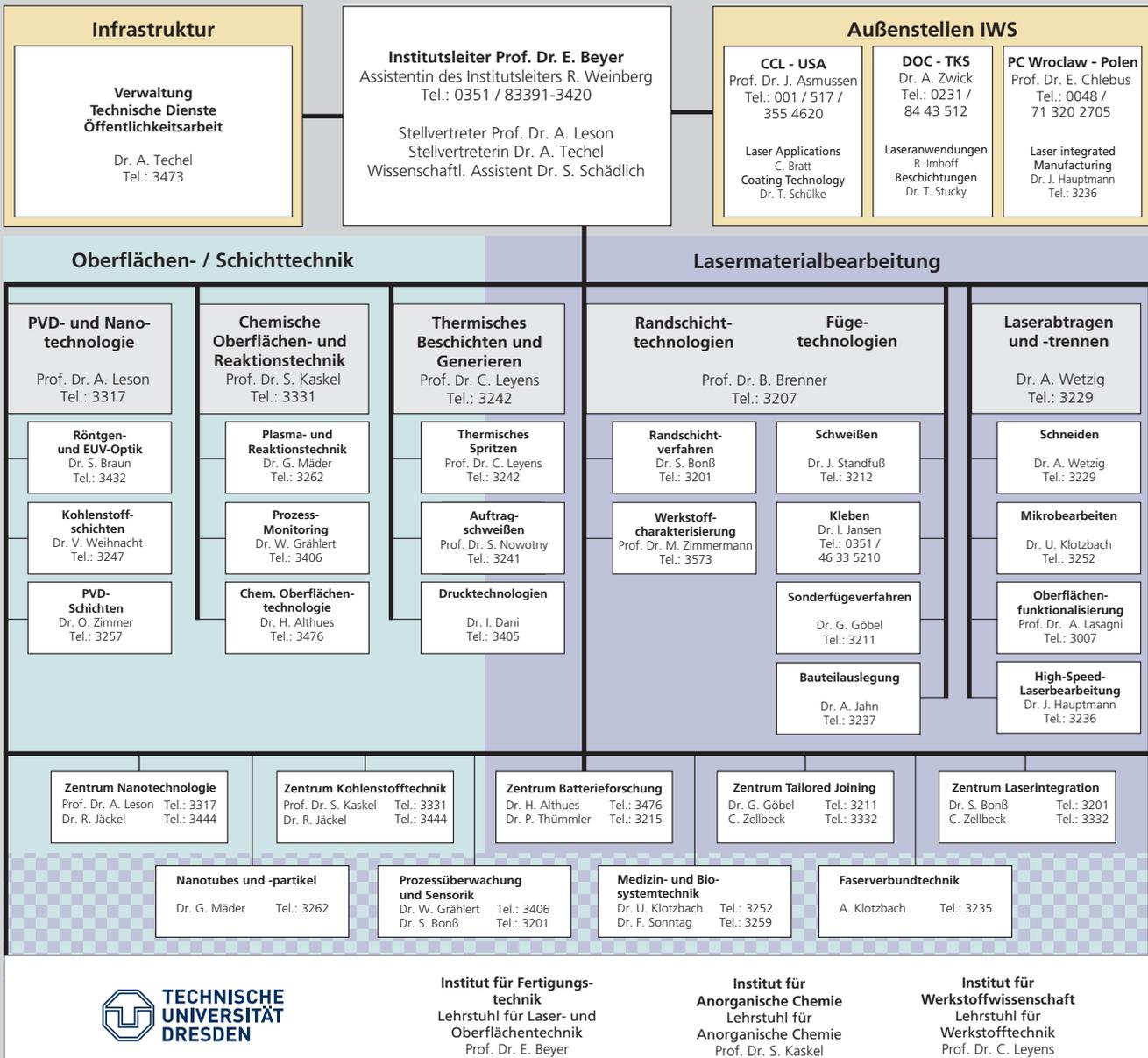
DAS LEITUNGSTEAM

»Zwischen Wissen und Schaffen liegt eine ungeheure Kluft, über die sich oft erst nach harten Kämpfen eine vermittelnde Brücke aufbaut.«

Robert Schumann



ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. STEFAN KASKEL



»Das einzige Mittel gegen Aberglauben ist Wissenschaft.«

Henry Thomas Buckle



GESCHÄFTSFELD CHEMISCHE OBERFLÄCHEN- UND REAKTIONSTECHNIK

Redaktion: Professor Kaskel, welche Schwerpunkte setzen Sie für die nächsten Jahre?

Prof. Kaskel: Die Metall-Schwefel-Batterie und die darum liegenden Entwicklungen werden auch in den nächsten Jahren einen Schwerpunkt in meiner Abteilung darstellen. Nachdem wir im letzten Jahr die Zyklenstabilität der Lithium-Schwefel-Batterie signifikant auf über 1000 Zyklen erhöhen und eine neue Klasse von Anodenmaterialien etablieren konnten, haben wir in den aktuellen Arbeiten einen starken Schwerpunkt auf den Bereich der Natrium-Schwefel-Batterie gesetzt. Aufgrund der guten Verfügbarkeit von Natrium ist dabei noch einmal eine deutliche Kostensenkung der Batterien zu erwarten. Dies spielt insbesondere für stationäre Anwendungen eine Schlüsselrolle. Trotzdem muss man sagen, bis heute gibt es eigentlich nur Natrium-Schwefel-Batterien, die bei hohen Temperaturen (300 °C) betrieben werden, was enorme Sicherheitsprobleme mit sich bringt. Unsere Arbeiten zeigen jedoch, dass es auch möglich ist, bei Raumtemperatur derartige Zellen zu betreiben. Der Schlüssel liegt dabei in einer neuen Separator-Entwicklung, die auf sehr eindrucksvolle Weise den Shuttle-Mechanismus (ein typischer Versagensmechanismus bei Schwefel-Batterien) unterbindet. Am besten, Sie besuchen uns bei einem unserer jährlich stattfindenden Workshops zum Thema Schwefel-Batterien, um sich über den aktuellen Stand zu informieren.

Redaktion: Herr Professor Kaskel, warum widmen Sie sich wieder vermehrt den Atmosphärendruckprozessen?

Prof. Kaskel: Nun, Beschichtungsprozesse bei Atmosphärendruck haben den Vorteil, dass man kein großes Vakuumequipment benötigt. Bauteile müssen nicht erst über lange Zeit in Vakuumkammern eingeschleust werden, bevor sie beschichtet werden können. Insofern sind die Verfahren in der

Regel sehr einfach und können auch an großen Oberflächen durchgeführt werden. Unsere LARGE-Plasmaquelle hat mittlerweile einen Stand erreicht, der sie sowohl für das Beschichten als auch für die Oberflächenaktivierung sehr attraktiv macht. So können Polymere auf einer Breite bis zu 15 cm vorbehandelt werden, beispielsweise für Druckprozesse oder auch Klebevorbehandlungen. Zudem kann diese Quelle auch großflächig für das Spritzen eingesetzt werden. Wir sehen dort große Vorteile gegenüber Einzeldüsen-Systemen, welche in der Regel nur punktförmig eingesetzt werden können. Wenn sie hintereinander geschaltet werden, steigen die Kosten dann mit der Zahl der Quellen. Wir können aber eine ganze Zahl unterschiedlicher Schichten durch Atmosphärendruckprozesse abscheiden, z. B. auch transparente und leitfähige Oxidschichten, die wir über einen Transferprozess auch auf Kunststofffolien applizieren können.

Redaktion: Wo sehen Sie Anwendungspotenzial für das Verfahren?

Prof. Kaskel: Transparente, leitfähige Oberflächen werden in einer Vielzahl von Produkten in der Display- bis hin zur Photovoltaikindustrie eingesetzt. Eine Herausforderung ist dabei die Homogenität der Beschichtungen. Jedoch haben wir auch hierzu inzwischen eine Lösung gefunden und eine neue bildgebende Analysetechnik am Fraunhofer IWS etabliert.

Redaktion: Können Sie uns mehr darüber erzählen?

Prof. Kaskel: Natürlich! Das sogenannte Hyperspectral Imaging (HSI) ermöglicht die orts aufgelöste chemische Analyse von Schichten und Defekten aller Art auf Oberflächen mit einer Eindringtiefe von einigen Mikrometern. Damit werden nicht nur Inhomogenitäten sichtbar, sondern auch Schadensfälle und Oberflächenverunreinigungen können detektiert werden.



KOMPETENZEN

PLASMA- UND REAKTIONSTECHNIK

Plasmagestützte Prozesse und chemische Gasphasenabscheidung bei Atmosphärendruck ermöglichen die kostengünstige großflächige Aktivierung, Reinigung oder Abscheidung qualitativ hochwertiger Funktionsschichten. Damit sind kontinuierliche Beschichtungsprozesse auf temperaturempfindlichen Materialien sowie auf leicht gekrümmten Substraten realisierbar. In der Arbeitsgruppe werden Prototypen von Reaktoren zur Herstellung von oxidischen und nichtoxidischen Schichten sowie Gasphasenreaktoren für die Herstellung von Nanopartikeln und Nanoröhren entwickelt. Die Optimierung des Reaktordesigns basiert auf experimentellen Ergebnissen und thermofluidodynamischen Simulationen. Modulares Reaktordesign bietet eine kostengünstige Adaption des Prozesses an neue Anwendungsgebiete.

PROZESS-MONITORING

Optisch-spektroskopische Verfahren sind ein hervorragendes Werkzeug des Prozess-Monitorings, um industrielle Produktionsprozesse sowie deren Produkte während oder nach der Fertigung zu charakterisieren. Je nach genutzter Methode werden relevante Informationen über Prozessatmosphären (Gaszusammensetzung) und Produkteigenschaften (Oberflächen, Schichten, Zusammensetzung, Porosität etc.) berührungslos und hochempfindlich, z. T. sogar lateral aufgelöst, gewonnen. Die dabei erhaltenen Ergebnisse können zur automatisierten Überwachung, Steuerung und Optimierung der Prozesse eingesetzt werden. Neben der Anpassung vorhandener Technologien für Prozess-Monitoring-Aufgaben werden in der Arbeitsgruppe auch neuartige Sensortechnologien bis zur Marktreife entwickelt.

CHEMISCHE OBERFLÄCHENTECHNOLOGIE

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



ABTEILUNGSLEITER

PROF. STEFAN KASKEL

Telefon +49 351 83391-3331

stefan.kaskel@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

PLASMA- UND REAKTIONSTECHNIK

DR. GERRIT MÄDER

Telefon +49 351 83391-3262

gerrit.maeder@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



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2013

1. Produktionstechnologien zur Herstellung von Batteriezellen	24
2. Ionen-selektive Membranen für stabile Lithium- und Natrium-Schwefel-Batterien	26
3. Transfer-Verfahren für anorganische Funktionsschichten auf Polymerfolien	28
4. Bildgebende Spektroskopie in neuen Dimensionen	30
5. Schnelle Charakterisierung poröser Materialien durch optische Kalorimetrie	32
6. Plasmaquelle zur großflächigen Oberflächenvorbehandlung	34
7. Von Mikro bis Nano: Kontrollierte Strukturierung von Silizium-Solarwafern	36
8. Bor-dotierte Diamantelektroden für die elektrochemische Analyse	38



PRODUKTIONSTECHNOLOGIEN ZUR HERSTELLUNG VON BATTERIEZELLEN

DIE AUFGABE

Hersteller von Lithium-Ionen-Batteriezellen stehen weiterhin vor der Herausforderung, die Produktionskosten deutlich zu reduzieren. Damit die Elektromobilität den von der Bundesregierung anvisierten Durchbruch schafft, müssen die Speicherpreise zum aktuellen Niveau um mindestens Faktor zwei sinken. Bei annähernd gleichbleibenden Materialkosten sind die Preise für Li-Ionen-Batterien in den letzten Jahren zwar gefallen, dennoch bieten die derzeit in der Serie angewandten Produktionsprozesse weiterhin ein deutliches Einsparpotential.

Die Elektrodenherstellung z. B. erfolgt meist unter Verwendung von NMP, einem toxischen Lösemittel, welches in aufwendigen Trocknerstrecken entfernt und anschließend aufbereitet werden muss. In einem weiteren Bearbeitungsschritt werden aus den fertigen Elektrodenbahnen die Elektroden herausgeschnitten. Der Materialfluss der Elektrodenbahn wird hierfür bei jedem Zuschnitt gestoppt und anschließend wieder angefahren.

Alle Schritte bei der Li-Ionen-Zellherstellung von der Pulververarbeitung bis hin zur fertigen Zelle werden in einer Trockenluftatmosphäre abgebildet, um den schädlichen Eintrag von Wassermolekülen auf die Zellchemie so gering wie möglich zu halten. Durch den üblichen Einsatz von großen begehbaren Trockenräumen entsteht ein erheblicher Anteil an Produktionsnebenkosten. Diese bieten zwar den Vorteil, dass Mitarbeiter diverse Arbeiten direkt an den Anlagen durchführen können und nah an den Abläufen der Produktionsprozesse sind. Zugleich aber wird die Trockenhaltung der Luft durch den zwangsläufigen Feuchtigkeitseintrag aufwendiger.

UNSERE LÖSUNG

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts DryLIZ (FKZ: 02PJ2302) werden gezielt Technologien weiterentwickelt, die zu einer Verkürzung der Prozesszeiten führen und somit einen wesentlichen Beitrag zum Aufbau effizienter Fertigungsstrecken liefern. Zudem wird die Reduzierung der in der Li-Ionen-Batteriefertigung nicht unerheblichen Fertigungsnebenkosten angestrebt.

Das Verfahren der trockenen Elektrodenherstellung, welches vom IWS entwickelt wurde, konnte für den Einsatz in neuen Zelltypen erweitert und verbessert werden. Durch die Entwicklung entsprechender Vorbereitungs- und Verarbeitungsschritte ist es hier zukünftig wesentlich einfacher, Elektroden mit hoher spezifischer Kapazität für den Einsatz in Prototyp-Pouchzellen zu generieren.

In der Entwicklung ist die »on-the-fly«-Konfektionierung der Elektroden von der Rolle. Dabei wird der Materialfluss nicht gestoppt, während die Elektrodenkontur herausgetrennt wird. Um ein möglichst breites Spektrum an Kundeninteressen bedienen zu können, werden derzeit zwei Wege verfolgt: das rotative Stanzen als Weiterentwicklung der herkömmlichen Stanztechnologie und das Remote-Laserstrahlschneiden als kontakt- und damit verschleißfreies Schneidverfahren. Beim mechanischen Trennen sind die Materialverschleppung und die Abnutzung der Schneidkanten des Werkzeugs die besonderen Herausforderungen. Beim Laserstrahlschneiden sind Rauch- und Spritzerbildung zu minimieren. Besonders die hohen Schneidgeschwindigkeiten von 130 m min^{-1} bei einer zu konfektionierenden Elektrodengröße von $142 \cdot 194 \text{ mm}^2$ verdeutlichen jedoch das Potenzial, welches in dieser Technologie steckt.



2

Ein im Rahmen von DryLIZ umzusetzendes neuartiges Trockenluftkonzept sieht die Minimierung des Trockenluftbedarfs und die damit einhergehende Nebenkostenreduzierung vor. Wenn nur der Prozessraum, in dem die Handhabung der empfindlichen Elektroden stattfindet, mit Trockenluft versorgt wird, ergibt sich im Vergleich zum Trockenraumkonzept eine erhebliche Verringerung des Luftvolumens. Durch ein weitgehend luftdichtes Einhausungskonzept und den deutlich reduzierten Eintrag von Feuchtigkeit durch im Raum befindliche Mitarbeiter sinkt der energetische Aufwand für die Aufrechterhaltung der geforderten Trockenluftqualität erheblich.

ERGEBNISSE

Bei den Untersuchungen an einzelnen Fertigungstechnologien zur Batteriezellenherstellung konnte bereits ein beachtliches Kostenreduzierungspotential für folgende Teilschritte aufgezeigt werden:

- trockene Elektrodenprozessierung, die technisch aufwendige Trocknerstrecken obsolet macht; keine organischen Lösemittel in der Produktion
- rotatives Stanzen oder Remote-Laserstrahlschneiden der Elektroden führt zu einer Prozesszeiteinsparung durch Aufrechterhaltung des Materialflusses beim Konfektionieren
- Verringerung des Trockenluftvolumens auf den technisch notwendigen Prozessraum der Elektroden reduziert die Nebenkosten deutlich
- Automatisierungs- und Transportkonzept zum Nachweis der Industrialisierungstauglichkeit

Gemeinsam mit den Projektpartnern werden die Technologien weiterentwickelt und Demonstratoren am IWS aufgebaut.

Zusätzlich zu den Entwicklungsarbeiten im Rahmen des DryLIZ-Projektes erfolgt der Aufbau einer durchgängigen Demonstratoranlage für die Zellfertigung. Von der Abwicklung der Elektrodenfolien über die Konfektionierung der Elektroden und Separatoren bis hin zum Aufbau, Fügen und Einschweißen eines Zellstapels in Pouchfolie erfolgen alle Arbeitsschritte automatisiert und qualitätsgesichert in trockener Atmosphäre (Taupunkt -20 °C) auf einer Fläche von $3 \cdot 8\text{ m}^2$. Der fertige Zellstapel verlässt die Anlage für die Elektrolytbefüllung und Versiegelung.

Der Demonstrator steht in Kürze auch Industriepartnern zum Bau von Prototyp-Zellen sowie zur Evaluierung und Vermarktung der Technologien zur Verfügung.

- 1 *Pilot-Pouchzelle des Fraunhofer IWS im Format $50 \times 75\text{ mm}^2$*
- 2 *Stapelanlage zum automatisierten Aufbau von Zellstapeln*

KONTAKT

Dr. Philipp Thümmler
 Telefon: +49 351 83391-3215
philipp.thuemmler@iws.fraunhofer.de





IONEN-SELEKTIVE MEMBRANEN FÜR STABILE LITHIUM- UND NATRIUM-SCHWEFEL-BATTERIEN

DIE AUFGABE

Die Alkali-Schwefel-Batterie zählt zu den zukunftsreichsten Zellsystemen, um die Lithium-Ionen-Batterie als elektrischen Energiespeicher dauerhaft abzulösen. Schwefel ist ungiftig, kann eine große Menge an elektrischer Ladung speichern und ist aufgrund ergiebiger natürlicher Ressourcen sehr preiswert.

Um die große Menge an elektrischer Ladung nutzen zu können, muss Schwefel mit einem Reaktionspartner in Verbindung gebracht werden. Aufgrund ihrer hohen Reaktivität gegenüber Schwefel und ihrem geringen Gewicht sind die Alkalimetalle Lithium und Natrium ideale Partner. Lithium ist vorwiegend für mobile Anwendungen geeignet, in denen es auf geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher Energiedichte ankommt. Natrium dagegen ist aufgrund seiner hohen Verfügbarkeit um ein Vielfaches günstiger als Lithium. Es wird bei stationären Anwendungen favorisiert, wo eine hohe Energiedichte weniger entscheidend ist.

Eine der größten Herausforderungen bei der Lithium- und auch der Natrium-Schwefel-Batterie ist es, den sogenannten Polysulfid-Shuttle zu hemmen. Der Polysulfid-Shuttle bezeichnet den Transfer von in Elektrolyten löslichen Zwischenprodukten, die bei der Reaktion von Lithium bzw. Natrium mit Schwefel entstehen (so genannte Polysulfide). Die Bewegung der Polysulfide von der Schwefelelektrode zur Alkalimetallegrode lässt die elektrochemisch aktiven Schwefelspezies inaktiv werden. Dies wiederum mündet in einem stetig abnehmenden Vermögen der Zelle, elektrische Ladung zu speichern.

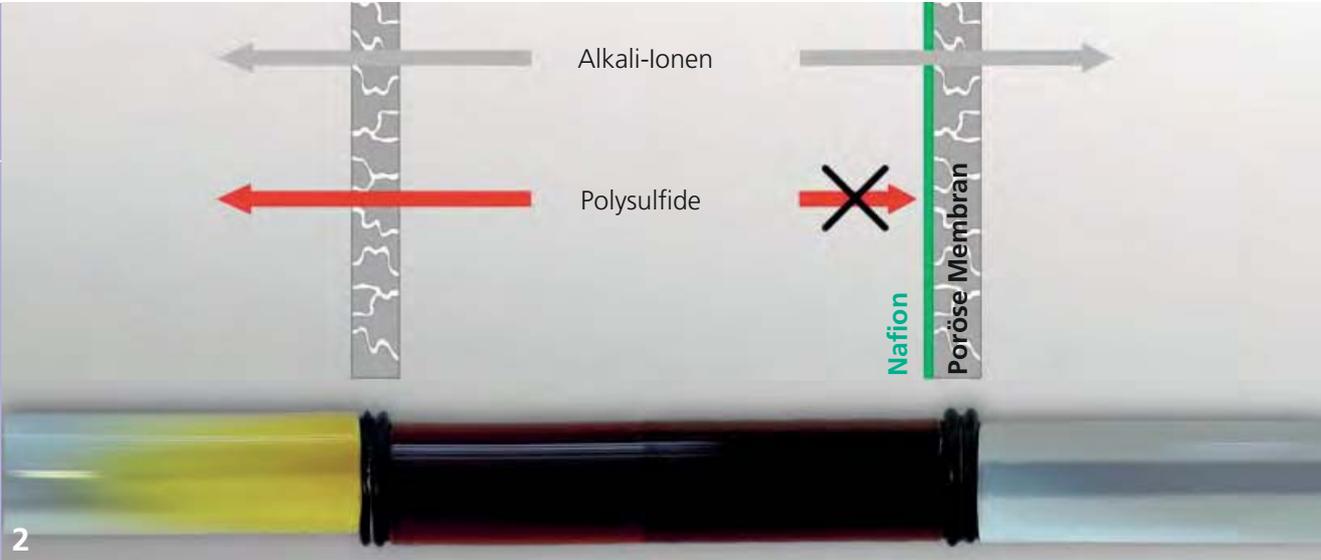
UNSERE LÖSUNG

Der Ansatz am Fraunhofer IWS besteht in der Entwicklung von neuartigen Separatoren, die verhindern, dass im Elektrolyten gelöste, negativ geladene Polysulfide zur Alkalimetallegrode wandern. Gleichzeitig ist es notwendig, dass der Transport von positiv geladenen Lithium- bzw. Natrium-Ionen gewährleistet wird. Hierfür kommen keramische Materialien ebenso wie Polymere mit negativ geladenen funktionellen Gruppen in Frage.

Keramische Materialien sind sehr selektiv, jedoch ist ihre Verwendung in großformatigen Batterien aufgrund ihrer hohen Kosten, der Brüchigkeit bei geringer Dicke und der insgesamt geringen Leitfähigkeit für Lithium- und Natrium-Ionen schwierig umsetzbar. Weiterhin führt das hohe Gewicht der keramischen Separatoren zu einer Verringerung der Energiedichte der gesamten Batterie.

Polymermaterialien sind hingegen wegen ihrer Flexibilität gut als Separatormaterialien geeignet. Nafion, ein perfluoriertes, mit negativ geladenen Sulfonsäuregruppen funktionalisiertes Polymer, kann als Polysulfid zurückhaltendes Material eingesetzt werden. Allerdings ist auch hier die Gesamtleitfähigkeit bei freistehenden Membranen nicht zufriedenstellend.

Um dieses Problem zu umgehen, werden am Fraunhofer IWS dünne Nafion-Filme auf ein poröses Polymerträgergerüst aufgebracht und als ionenselektiver Separator verwendet. Dadurch können die positiven Eigenschaften des porösen Polymers, wie mechanische Stabilität und Flexibilität, mit der hohen ionischen Gesamtleitfähigkeit eines dünnen Nafion-Films kombiniert werden.



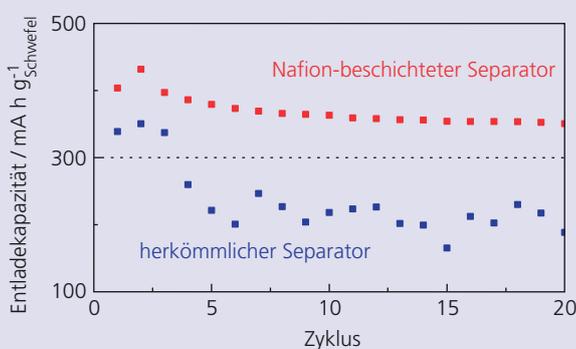
2

Der so hergestellte Separator besitzt eine im Vergleich zu kommerziellen Separatoren vergleichbare Masse und Dicke und hält die Polysulfid-Spezies sicher zurück. Da nur ein dünner Nafion-Film aufgetragen wird, sind auch die Materialkosten hierfür deutlich geringer als bei freistehenden Nafion-Membranen.

ERGEBNISSE

Die Ergebnisse zeigen, dass das Potenzial von Natrium-Schwefel-Batterien durch die Verringerung des Polysulfid-Shuttles erheblich besser ausgenutzt werden kann. Durch den Einsatz der am IWS entwickelten ionenselektiven Membranen konnte die Kapazität von Natrium-Schwefel-Batterien bei Raumtemperatur im Vergleich zu herkömmlichen Separatoren um etwa 75 % gesteigert werden (Abb. 3).

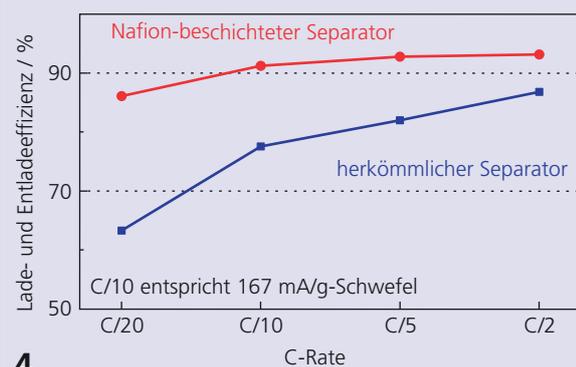
Kapazitätsmessungen von Natrium-Schwefel-Batterien mit herkömmlichem Separator und mit Nafion-beschichtetem Separator



3

Im Lithium-Schwefel-System kann mit Hilfe des Nafion-beschichteten Separators die Lade- / Entladeeffizienz über einen großen Stromstärkebereich gesteigert werden (Abb. 4). Da beim Laden der Transport von Polysulfiden durch den Separator behindert wird, können diese nicht an der Alkali-metallelektrode reduziert werden. Das verringert den Verlust von Ladungen und verbessert somit die Lade- / Entladeeffizienz. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Selbstentladung in Batterien mit dem modifizierten Separator geringer ist. Dies resultiert in einer verbesserten Lagerbarkeit der Batterien.

Lade- / Entlade-Effizienz von Lithium-Schwefel-Batterien mit herkömmlichem Separator und Nafion-beschichtetem Separator



4

- 1 Polymerseparator und Lithium-Schwefel-Pouchzelle
- 2 Rückhaltung von Polysulfiden

KONTAKT

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





TRANSFER-VERFAHREN FÜR ANORGANISCHE FUNKTIONSSCHICHTEN AUF POLYMERFOLIEN

DIE AUFGABE

Die Veredelung von Polymerfolien mit anorganischen Funktionsschichten führt zu Produkten mit breiten Einsatzmöglichkeiten. Beispiele für Anwendungen solcher Folien sind in technologischen Zukunftsfeldern zu finden:

- Folien mit transparenter, leitfähiger Beschichtung für Displays, Solarzellen und Beleuchtungselemente
- Barriere-Folien für Verpackungen mit verminderter Wasserdampf-Permeation
- optische Funktionen (Antireflex, UV- und IR-Absorption)

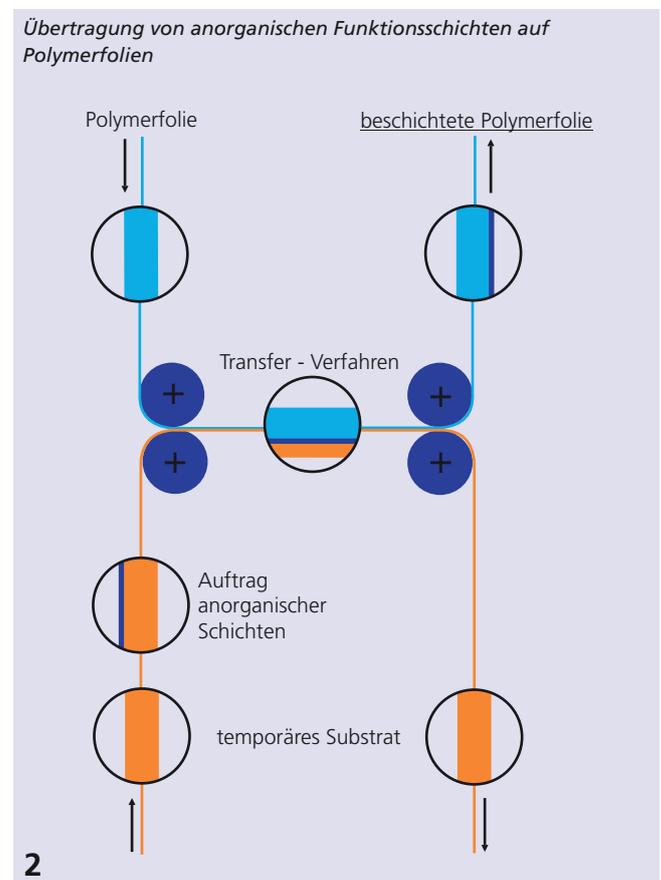
Für diese Funktionen werden an die Schichtqualität allerhöchste Ansprüche gestellt. Gleichzeitig sind die Beschichtungsmethoden durch die Temperatursensitivität der Polymerfolien sehr stark limitiert. Geringe Substrattemperaturen bedingen in der Regel auch geringe Schichtqualität (z. B. Dichte, Leitfähigkeit). Durch diesen Zusammenhang sind bisher die Kombinationsmöglichkeiten von Substrat- und Schichtmaterialien sehr stark eingeschränkt.

UNSERE LÖSUNG

Ein am Fraunhofer IWS entwickeltes Verfahren umgeht diese Problematik, indem die Schichtabscheidung vom zu beschichtenden Substrat getrennt wird. Dadurch können bestehende Verfahren mit etablierten Prozessbedingungen (und -temperaturen) zur Erzeugung von hochleitfähigen, kristallinen Schichten weiter genutzt werden.

Durch die Verwendung temporärer Substrate mit einem nachgelagerten Übertrag der Schicht auf das Zielsubstrat gelingt es, temperatursensitive Materialien mit Schichten aus

temperaturintensiven Verfahren zu kombinieren. Dadurch lassen sich verschiedenste Materialkombinationen erzeugen, welche sich durch direkte Schichtabscheidung auf entsprechenden Materialien nicht, oder nur mit verminderten Eigenschaften, erzeugen lassen. Das Wirkprinzip ist in Abbildung 2 dargestellt.

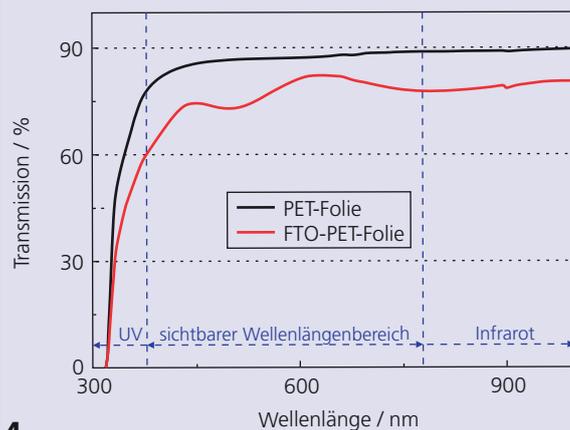




ERGEBNISSE

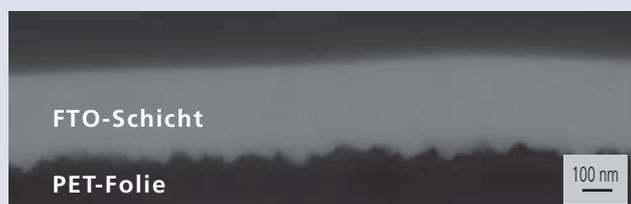
Um eine transparente und leitfähige Schicht zu erzeugen, wurde mittels chemischer Gasphasenabscheidung bei Atmosphärendruck (AP-CVD) Fluor-dotiertes Zinnoxid (FTO) abgeschieden. Die dabei verwendeten Substrattemperaturen sind mit über 400 °C viel höher als die Zersetzungstemperatur der meisten Polymere. Dennoch konnte durch das am IWS entwickelte Übertragsverfahren die Kombination einer solchen FTO-Hochtemperaturschicht mit PET hergestellt werden (Abb. 5).

Transmission einer FTO-PET-Folie im Vergleich zu einer unbeschichteten PET-Folie



4

REM-Aufnahme einer FTO-PET-Folie



5

Es wurden FTO-PET-Folien mit < 200 Ohm Flächenwiderstand bei 75 % Lichttransmission erzeugt (Abb. 4). Damit kann dieser Materialverbund für elektrooptische Anwendungen genutzt werden. Er stellt eine äußerst kostengünstige Alternative zu den etablierten Indiumbasierten (ITO-PET) Lösungen dar.

Durch dieses Verfahren lassen sich prinzipiell vielfältige Eigenschaften anorganischer Materialien mit verschiedenen Polymerfolien kombinieren, insbesondere:

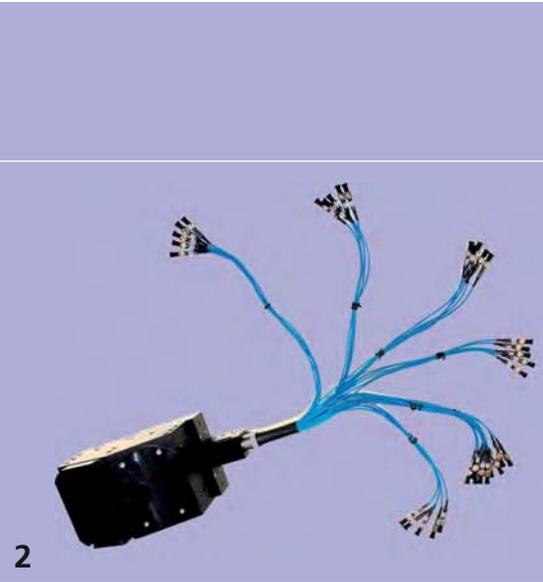
- optische Eigenschaften (IR-, UV-Absorption, Farbe, Lumineszenz)
- elektrische Eigenschaften (Leiter, Halbleiter, Isolatoren)
- Benetzung (abweisend, hydrophob/hydrophil)
- Barrierewirkung (Schutz vor Oxidation und Korrosion)

- 1 Elektrolumineszenz-Folie mit transparenter Frontelektrode
- 3 Elektrisch-leitende FTO-PET-Folie

KONTAKT

Dipl.-Ing. Thomas Abendroth
 Telefon: +49 351 83391-3294
 thomas.abendroth@iws.fraunhofer.de





BILDGEBENDE SPEKTROSKOPIE IN NEUEN DIMENSIONEN

DIE AUFGABE

Moderne und automatisierte Produktionsverfahren verlangen eine immer bessere Produktüberwachung. Oftmals besteht sogar der Anspruch einer 100 %-Kontrolle. Die herkömmliche Inspektion mit einer Graustufen- oder Farbkamera ist für einige Materialien oder Produkte manchmal nicht ausreichend. Die Verwendung einer spektral auflösenden Kamera ist dann die richtige Alternative. Mit Hilfe dieser Technik lassen sich 2D-ortsaufgelöst die einzelnen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums aufzeichnen und materialspezifische Informationen, wie z. B. Fluoreszenzcharakteristika im sichtbaren Bereich des Lichts, ableiten. Nutzt man die Technologie im nahen Infrarotbereich, können auch chemische Informationen der Materialien oder Produkte erfasst werden. Unter dem Begriff »Hyperspectral Imaging« (HSI) werden alle Versionen der Technologie für die verschiedenen spektralen Bereiche zusammengefasst.

Bei der ortsaufgelösten Erfassung spektraler Eigenschaften reicht es nicht, ausschließlich die Daten aufzuzeichnen. Vielmehr ist eine angepasste Auswertung der Datenmengen notwendig. Neben der Extraktion und Aufbereitung der gewünschten Information aus dem kontinuierlichen Datenfluss ist auch die Geschwindigkeit des Systems von entscheidender Bedeutung für die notwendige Echtzeitsteuerung eines Produktionssystems. Am Fraunhofer IWS Dresden wurden deshalb verschiedene Lösungsansätze entwickelt, um erfolgreiche hyperspektrale Messungen durchzuführen.

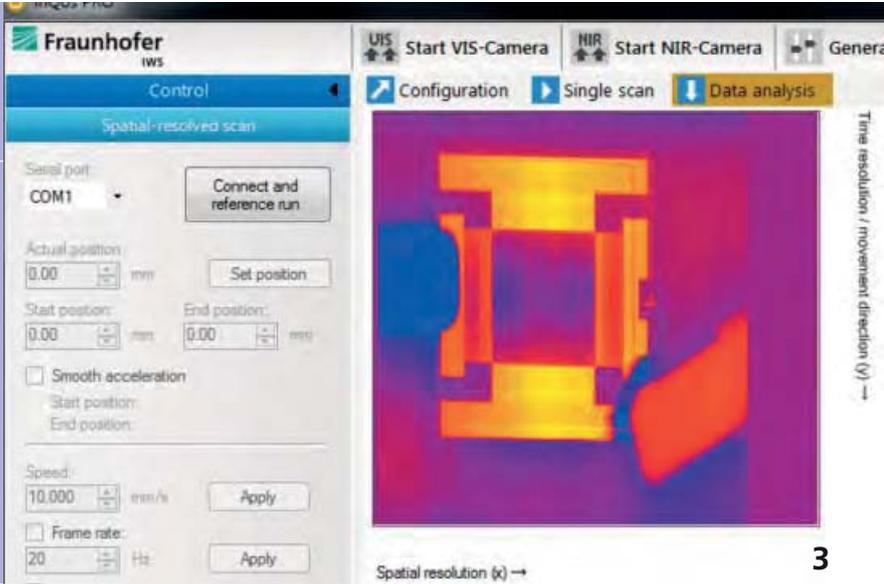
UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer IWS sind Untersuchungen für die Spektralbereiche von 400 bis 1000 nm und von 1000 bis 2500 nm möglich. Das Sichtfeld und die Größe der Untersuchungsobjekte sind durch flexible optische Kombinationsmöglichkeiten nahezu unbegrenzt. Mit einem speziellen Diffusor-Aufbau aus optischem PTFE können auch spiegelnde und stark reflektierende Substrate aller Art zuverlässig untersucht werden.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Forschungsarbeiten lag in der Entwicklung eines geeigneten Softwaretools, welches eine Vielzahl einzelner Routinen sinnvoll miteinander verknüpft. So entstand ein Softwaremodul, mit dem die HSI-Konfiguration, die Datenerfassung und auch die Datenauswertung in einfacher Art und Weise erfolgen kann. Die Einbindung zusätzlicher Bibliotheken ermöglicht zum einen die chemisch-statistische Auswertung auf Basis vieler bekannter Methoden (Regressionsanalyse, multivariate Methoden) und zum anderen eine effiziente Rechenperformance durch eine prozessnahe Implementierung.

ERGEBNISSE

Für die Prozessapplikation des Hyperspectral Imagings bietet das Fraunhofer IWS alle Entwicklungen aus einer Hand. Von der Beratung über Machbarkeitsstudien bis zur Adaption der HSI-Systeme an den Prozess und Entwicklung einer geeigneten Auswertung mit Echtzeitsteuerung können alle Schritte vor Ort realisiert werden.



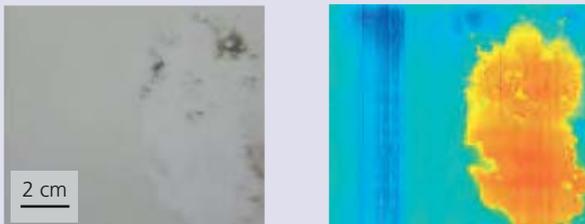
3



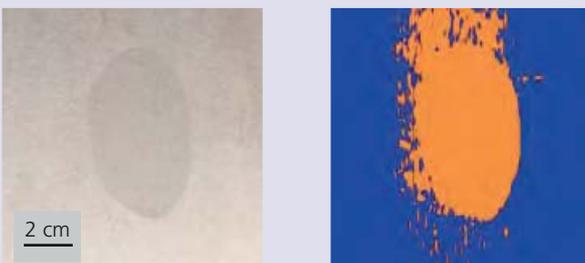
Das Hyperspectral Imaging ermöglicht Aufnahmegeschwindigkeiten bis zu 200 Hz und stellt damit ein ideales Werkzeug für die Untersuchung von Oberflächen und deren Beschaffenheit dar. Gegenüber am Markt erhältlichen Standardsystemen garantiert der Einsatz von optimierten mathematischen Routinen in der Datenverarbeitung bis zu 30 Mal schnellere Ergebnisse sowie einen wesentlich geringeren Rechenaufwand. Sämtliche Datenverarbeitung kann dadurch in Echtzeit erfolgen, bei vollem Erhalt der Aufnahmefrequenz.

Der Einsatz im nahen Infrarotbereich macht auch »versteckte« Features sichtbar und stellt somit eine wesentliche Erweiterung optischer Inspektionsmethoden dar. Die Detektion ermöglicht ein Screening von Defektbereichen an transparenten Oberflächen, wie sie u. a. dünne leitfähige Schichten aufweisen. So können fehlerhafte Chargen bereits vor der Endfertigung erkannt und aus dem Produktionsprozess entfernt werden.

Mit Fluor-dotiertem Zinnoxid beschichtetes Glassubstrat (links) und Visualisierung im nahen Infrarotbereich (rechts) bei 1727 nm



Visualisierung und eindeutige chemisch-statistische Auswertung (rechts) der fetthaltigen Verschmutzung eines Stahlsubstrates (links)



4

Auch in der Eingangskontrolle von Werkstücken kann das HSI eine wichtige Rolle übernehmen, z. B. in der Oberflächenbegutachtung von Stahlsubstraten. In Kombination mit einer multivariaten Auswertung (hier gezeigt als Clusteranalyse) ist eine automatisierbare Entscheidungsfindung möglich.

Weitere Anwendungen sind in der Sortierung und im Polymerrecycling zu finden. Für letztere Anwendung ist mit Hilfe von chemisch-statistischen Modellen jetzt auch die Trennung schwarzer Polymere möglich. In Zusammenarbeit mit der TU Dresden und weiteren Partnern konnte das Fraunhofer IWS die Entwicklung auf diesem Gebiet weiter vorantreiben.

- 1 *Hyperspectral Imaging-System für den sichtbaren Bereich*
- 2 *Faserkopplung eines Hyperspectral Imaging-Systems*
- 3 *Softwareausschnitt*

Die HSI-Technologie kann Aufgaben in der Wareneingangskontrolle, der Qualitätssicherung oder auch in der direkten Prozesskontrolle übernehmen. Neben Applikationen in der automatisierten Erkennung für Sortierprozesse sind Schichtauftragskontrollen und die Detektion von Verunreinigungen, Fehlstellen oder Fremdmaterial weitere wichtige Anwendungsfelder, insbesondere für Materialien, die sich im sichtbaren Bereich des Lichts nicht untersuchen lassen.

KONTAKT

Dr. Philipp Wollmann
 Telefon: +49 351 83391-3316
 philipp.wollmann@iws.fraunhofer.de





SCHNELLE CHARAKTERISIERUNG PORÖSER MATERIALIEN DURCH OPTISCHE KALORIMETRIE

DIE AUFGABE

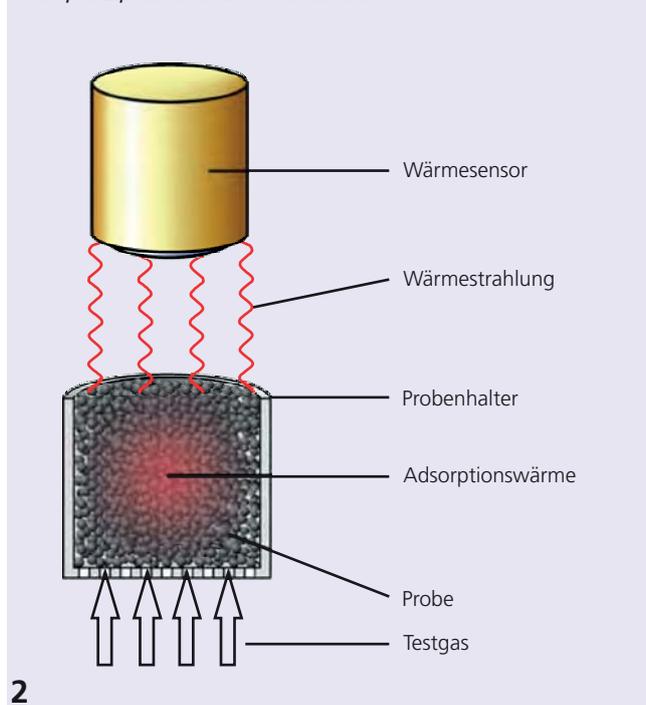
Die Charakterisierung poröser Materialien erfolgt durch Stickstoff-Physisorption bei tiefen Temperaturen (77 K). Mit den so erhaltenen Adsorptionsisothermen lassen sich die Proben umfassend beschreiben. Es können Aussagen zur Porenstruktur getroffen sowie die Größe der inneren Oberfläche (BET-Oberfläche) ermittelt werden. Prinzipbedingt sind diese Messungen sehr zeitaufwendig und somit insbesondere bei einem hohen Probenaufkommen sowie für zeitkritische Anwendungen eher ungeeignet.

UNSERE LÖSUNG

Die am Fraunhofer IWS Dresden entwickelte Methode der »optischen Kalorimetrie« ermöglicht eine schnelle Charakterisierung poröser Materialien.

Die zu untersuchende Probe wird dabei dem zu adsorbierenden Testgas ausgesetzt. Findet am Material die Adsorption statt, kommt es zur Freisetzung der Adsorptionswärme. Die Wärmeabgabe führt wiederum zur Erhöhung der Proben-temperatur, welche mittels eines berührungslosen, optischen Temperatursensors erfasst wird (Abb. 1).

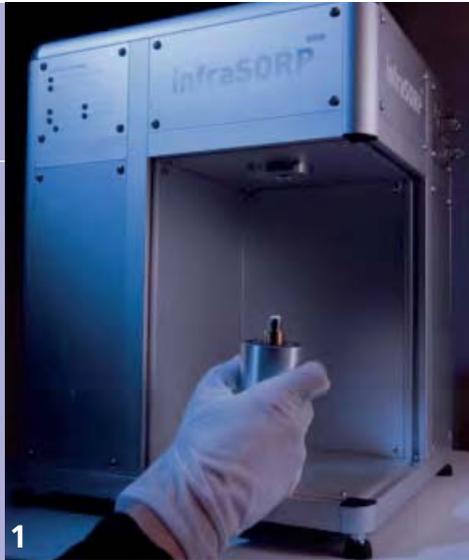
Messprinzip des Schnelltestverfahrens



Anhand des gemessenen individuellen zeitlichen Temperaturprofils der Probe können Aussagen über die aufgenommene Gasmenge sowie über die Kinetik des Adsorptionsprozesses getroffen werden. Die Messdauer zur Untersuchung einer Probe liegt dabei in der Regel im Bereich weniger Minuten.

ERGEBNISSE

Durch die Weiterentwicklung der Messmethode und des apparativen Aufbaus ist es nun möglich, den Verlauf der Adsorptionsisotherme einer Probe in kurzer Zeit zu bestimmen. Im Gegensatz zur bisherigen Versuchsdurchführung, der Durchströmung der Probe durch das Testgas, wird analog – zum etablierten volumetrischen Verfahren – die Probe evakuiert und anschließend das Testgas pulsweise bis zum Erreichen des jeweils gewünschten Zieldruckes zugegeben. Die Temperaturänderung für jeden Puls wird aufgezeichnet (Abb. 2).



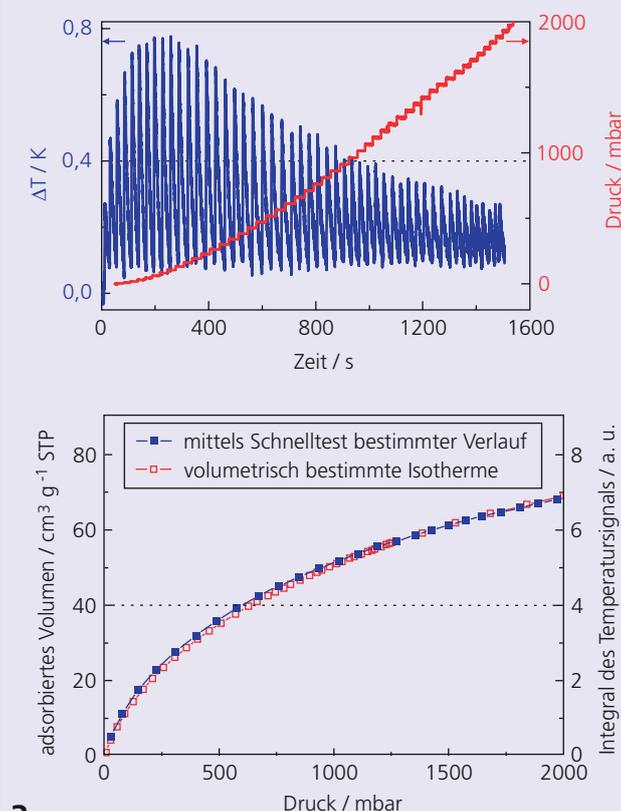
1

Das Integral des Temperatursignals wird dabei kontinuierlich ermittelt und gegen den sich nach jedem Puls einstellenden Gleichgewichtsdruck aufgetragen. Mit dieser Methode lässt sich der Verlauf der Adsorptionsisotherme hinreichend genau beschreiben. Abbildung 3 zeigt im Vergleich die mittels Volumetrie bei 25 °C mit CO₂ gemessene Adsorptionsisotherme einer Aktivkohleprobe sowie den im Schnelltestverfahren ermittelten Isothermenverlauf bis 2 bar Absolutdruck.

Beide Messkurven wurden durch einfache Skalierung zur Deckung gebracht. Die Messmethode ermöglicht somit eine schnelle Bestimmung der Probeneigenschaften, was insbesondere für große Probenmengen und zeitkritische Anwendungen von Vorteil ist.

Wie auch bei der Versuchsdurchführung im Durchfluss, ist diese Messvariante nicht auf bestimmte Gase beschränkt. Grundvoraussetzung ist jedoch auch hier eine hinreichende Wärmetönung des Adsorptionsvorganges bzw. eine ausreichende Adsorptionskapazität des porösen Materials, welche eine messbare Temperaturerhöhung der Probe bewirkt.

Messprinzip des Schnelltestverfahrens



1 Messgerät zur statischen Versuchsdurchführung

KONTAKT

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



PLASMAQUELLE ZUR GROSSFLÄCHIGEN OBERFLÄCHENVORBEHANDLUNG

DIE AUFGABE

Eine Plasmaoberflächenbehandlung bei Atmosphärendruck kann in verschiedenen Anwendungsgebieten zur Oberflächenmodifizierung eingesetzt werden. Einsatzfelder sind beispielsweise die Funktionalisierung von Verbundmaterialien zur Verbesserung der Adhäsion oder der Auftrag von Haftvermittlerschichten zum strukturellen Kleben.

In der Luftfahrtindustrie z. B. müssen Haftvermittlerschichten konform auf gekrümmten TiAl6V4-Oberflächen mit einem Arbeitsbereich von ± 40 mm abgeschieden werden. Essentiell für diese Anwendung ist eine hohe Haftfestigkeit und Langzeitstabilität gegenüber Umwelteinflüssen (z. B. Feuchte, Temperatur) zwischen den nanostrukturierten und funktionalisierten Klebverbindungen.

In der Stahlindustrie ist die Abscheidung einer Haftvermittlerschicht für die hocheffiziente Massenproduktion von vorgeprägten Bauteilen, wie z. B. Leichtbaukonstruktionen mit Honigwabenstrukturen, notwendig. Die Herausforderung ist hier die Behandlung großer Flächen bei gleichzeitig geringen Betriebskosten.

Um eine großflächige Plasma-Oberflächenbehandlung industriell zu etablieren, wurden Skalierbarkeit, Flexibilität sowie minimale Verbrauchskosten als Hauptanforderungen an die Plasmaquelle identifiziert.

UNSERE LÖSUNG

Für die großflächige Plasma-Oberflächenbehandlung wurde am Fraunhofer IWS Dresden die LARGE-Plasmaquelle (Long-Arc-Generator) entwickelt. Mit dieser wird ein linearer Licht-

bogen mit einer skalierbaren Länge von bis zu 350 mm generiert. Beim Umströmen des Lichtbogens mit Gas werden freie Radikale und atomare Spezies generiert und aus der Plasmaquelle ausgetrieben. Die Art und Konzentration des aktivierten Prozessgases ist von dessen Zusammensetzung und Menge abhängig.

Ein besonderes Merkmal der LARGE-Plasmaquelle ist deren Eignung für eine Vielzahl von verschiedenen Plasmagasen sowie deren Mischung, z. B. Druckluft, Ar, O₂, N₂, CO₂, H₂, NH₃. Durch die Anpassung des Prozessgases können die Plasmagaspezies gezielt auf die zu behandelnde Oberfläche angepasst werden. Durch die Adaption einer Reaktivgaszuführung (Abb. 1) können zusätzlich Precursoren in das Plasma außerhalb der Plasmaquelle eingespeist werden. Damit wird die LARGE-Plasmaquelle zum Auftrag von Haftvermittlerschichten einsetzbar. Weitere Anwendungsbereiche sind das chemische Ätzen, Funktionalisieren und Reinigen.

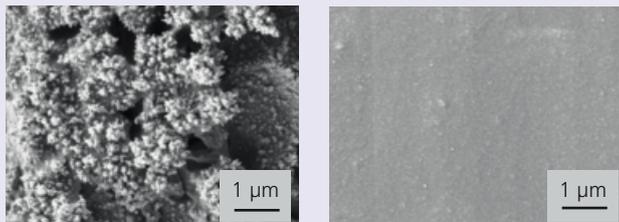
Aufgrund ihrer kompakten Bauweise ist die LARGE-Plasmaquelle leicht an einen Roboterarm zu montieren und damit beweglich. Sie kann auch sehr einfach an in-line Prozesse adaptiert werden, da keine Vakuumschleusen notwendig sind. Bandbreiten von bis zu 350 mm können so mit einer Quelle behandelt werden. Für größere Dimensionen werden mehrere LARGE-Plasmaquellen versetzt zueinander angeordnet.

ERGEBNISSE

Die LARGE-Plasmaquelle ohne Reaktivgaszuführung erzeugt ein langes und sehr intensives Plasmasheet (Abb. 2). Beim Einsatz von Druckluft werden Fackellängen bis zu 90 mm erreicht. 3D-Bauteile können so sehr wirkungsvoll und schnell

behandelt werden. Zur Abscheidung von Haftvermittlerschichten (z. B. SiO_2) wird die LARGE-Plasmaquelle mit Reaktivgaszuführung (Abb. 1) eingesetzt. Damit können bei einem Abstand bis 40 mm zur Plasmaquelle nanostrukturierte SiO_2 -Schichten an offener Atmosphäre abgeschieden werden. Der verwendete Precursor bestimmt dabei die chemische Struktur der Schichten. So werden mit HMDSO¹ kohlenstoffhaltige SiO_2 -Schichten abgeschieden, welche hydrophobes Benetzungsverhalten aufweisen. Bei der Verwendung von TEOS² als Precursor werden die CH_3 -Gruppen vollständig dissoziiert. Die resultierenden SiO_2 -Schichten sind kohlenstofffrei und weisen aufgrund ihrer OH-Gruppen hydrophile Eigenschaften auf. Die Morphologie kann durch entsprechende Prozessparameter von rau für eine bessere mechanische Verankerung des Klebers bis glatt und dicht für Barrierschichten gesteuert werden (Abb. 3).

REM-Aufnahmen nanostrukturierter SiO_2 -Schichten auf TiAl6V4 zum strukturellen Kleben (links) bzw. als Barrierschicht (rechts)



3

Die Verbindung von vorgeprägten Edelstahlblechen für eine spätere Honigwaben-Leichtbaukonstruktion wurde mit 100 nm bis 200 nm dicken SiO_2 -Schichten beschichtet. Mit dem einachsigen Abreißversuch, angelehnt an die DIN EN ISO 4624, wurde für das Metall-Epoxidharzklebstoffsystem eine ausgezeichnete Haftung mit Abreißfestigkeiten > 16 MPa bestimmt. Mit unbehandelter Oberfläche wurden demgegenüber nur 5 MPa erreicht.

¹ Hexamethyldisiloxan

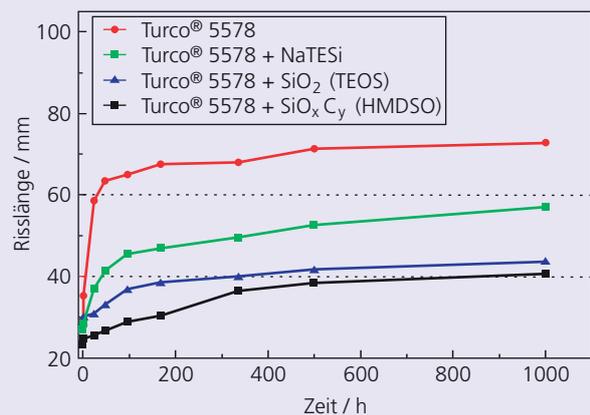
² Tetraethoxysilan

³ Alkalisches Beizen mit Turco 5578 bei 95 °C für 5 min

⁴ NaTESi - Vorbehandlungsverfahren

Ein weiteres Beispiel ist die strukturelle Verbindung von gebeiztem³ TiAl6V4 für die Luft- und Raumfahrt. Die Haftfestigkeit und Langzeitstabilität einer Klebverbindung wurde mit dem Keiltest (DIN 65448) bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass mit einer 50 nm dicken SiO_2 -Schicht die Haftfestigkeit gegenüber dem bisherigen Standardverfahren NaTESi⁴ verbessert wird (Abb. 4).

Ergebnis des Keiltests analog DIN 65448, Darstellung des Rissfortschrittes gegenüber der Zeit an vorbehandelten TiAl6V4



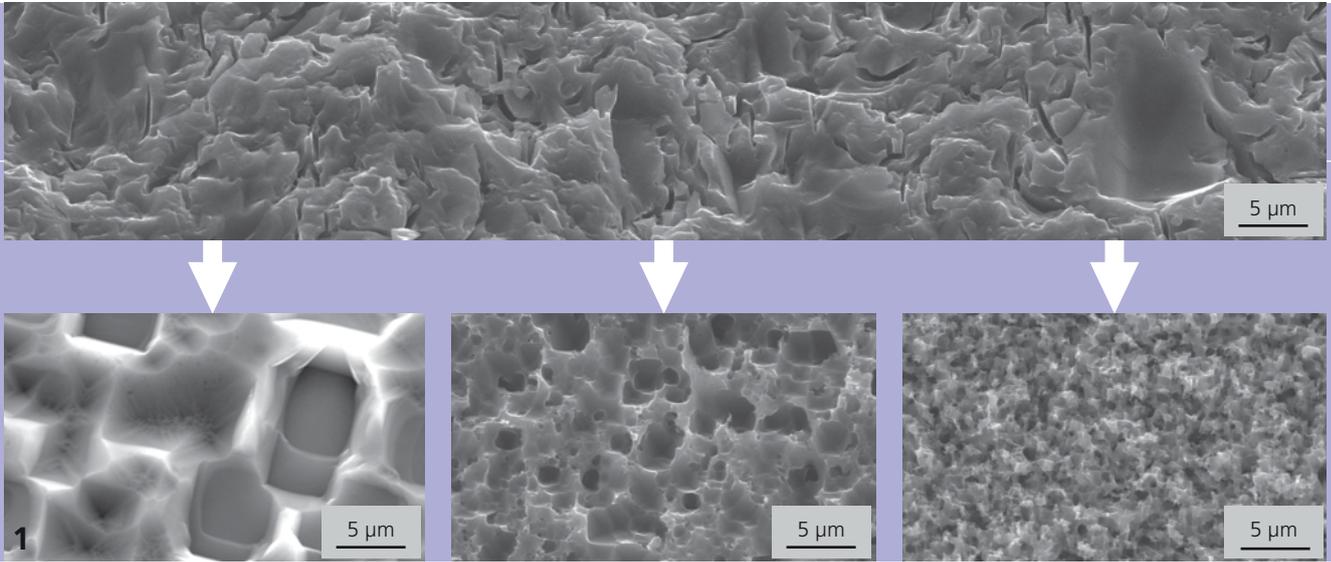
4

- 1 150-mm-LARGE-Plasmaquelle mit vorgeschaltetem Bornitrid-Flansch zur Schichtabscheidung
- 2 150-mm-LARGE-Plasmaquelle mit einem Ar-N₂-Plasma ohne Reaktivgaszuführung

KONTAKT

Dipl.-Ing. Liliana Kotte
 Telefon: +49 351 83391-3439
 liliana.kotte@iws.fraunhofer.de





VON MIKRO BIS NANO: KONTROLLIERTE OBERFLÄCHEN-STRUKTURIERUNG VON SILIZIUM-SOLARWAFERN

DIE AUFGABE

Die Prozesskette bei der Herstellung von kristallinen Si-Solarwafern umfasst unter anderem verschiedene Ätzschritte zur Entfernung des Sägeschadens, zur Oberflächentexturierung und zur Kantenisolation. Um eine kostengünstige Alternative zum konventionellen nasschemischen Ätzen bereitzustellen, wurde am Fraunhofer IWS Dresden eine Ätztechnologie entwickelt, die auf der Nutzung von Fluor (F_2) als Ätzgas basiert und bei Atmosphärendruck (atmospheric pressure, AP) eingesetzt wird.

Die Anlage sollte dahingehend weiterentwickelt werden, dass Wafer (bis zu 6 Zoll; diverse Formen) je nach Bedarf ein- oder beidseitig sowohl sägeschadengeätzt, geglättet oder texturiert werden können. Dabei stand die Erweiterung der Texturpalette hinsichtlich Form und Aspektverhältnis der geätzten Strukturen im Vordergrund.

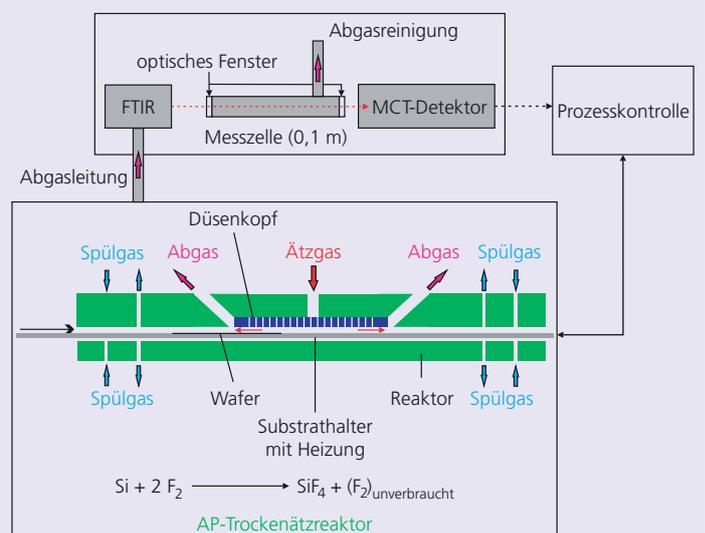
UNSERE LÖSUNG

Für die Optimierung und Anpassung der Anlagentechnik sowie die anschließende Überführung der neu entwickelten Ätztechnologie in die Industrie ist eine kontinuierliche und langzeitstabile Prozessüberwachung und -steuerung essentiell. Mit Hilfe dadurch gewonnener Informationen können verschiedene Ätzprozesse charakterisiert und so ein vertieftes Prozessverständnis erlangt werden. Erst damit wird es möglich, kontrolliert unterschiedliche Texturen in Abhängigkeit von den Prozessparametern zu erzeugen. Mit Hilfe der durch das Prozessmonitoring gewonnenen Informationen wurde ein modular aufgebauter und für

die Erzeugung verschiedener Oberflächenstrukturen anpassbarer Ätzreaktor entwickelt. Durch die Adaption der Ätzgaseinspeisung in Kombination mit der Prozessparametervariation gelang es, die Strukturierung von Silizium-Oberflächen im Mikro- bis Nano-Bereich gezielt zu steuern.

Als vielversprechendste Methode zur in-line Prozessüberwachung wurde die FTIR-Spektroskopie evaluiert. Diese kontaktlose und zerstörungsfreie Messmethode eignet sich für die zeitaufgelöste quantitative Bestimmung von Siliziumtetrafluorid (SiF_4), das als Hauptprodukt beim Ätzen von Silizium mit Fluor gebildet wird. Die Prozessüberwachung erfolgt im Abgas (Abb. 2). Die in Echtzeit gemessenen Spektren werden von einer Software verarbeitet und der entstehende

Prinzipskizze des Trockenätzreaktors mit integrierter in-line-Prozessüberwachung



2

SiF₄-Volumenstrom in Abhängigkeit der Zeit dargestellt (Abb. 3). Durch Integrieren dieser Messkurve werden die Gesamtmenge SiF₄ und daraus alle interessierenden Kenngrößen berechnet.

ERGEBNISSE

Mit Hilfe der quantitativen FTIR-Messung der SiF₄-Absorptionsbanden wurden unterschiedliche Ätzprozesse hinsichtlich Ätztiefe und -rate charakterisiert. Die spektroskopisch ermittelten Werte stimmen sehr gut mit den konventionell gravimetrisch (off-line) ermittelten Werten überein und zeigen zudem die Reproduzierbarkeit des Prozesses.

Auf Basis der dadurch gewonnenen Erkenntnisse wurde das Herzstück des Reaktors, der Düsenkopf, durch den das Ätzgas auf das Substrat gelangt, während mehrerer Iterationsschritte modifiziert. Im Ergebnis der Optimierung können jetzt unterschiedliche Mikro- und Nanotexturen mit unterschiedlicher Tiefe und Dichteverteilung auf Siliziumoberflächen gezielt und kontrolliert erzeugt werden, indem Prozessparameter wie Hardware-Konfiguration, Gesamtgasfluss (5 - 60 slm), F₂-Konzentration (0,08 - 10 %) und Substrat-Temperatur (150 - 400 °C) aufeinander abgestimmt werden.

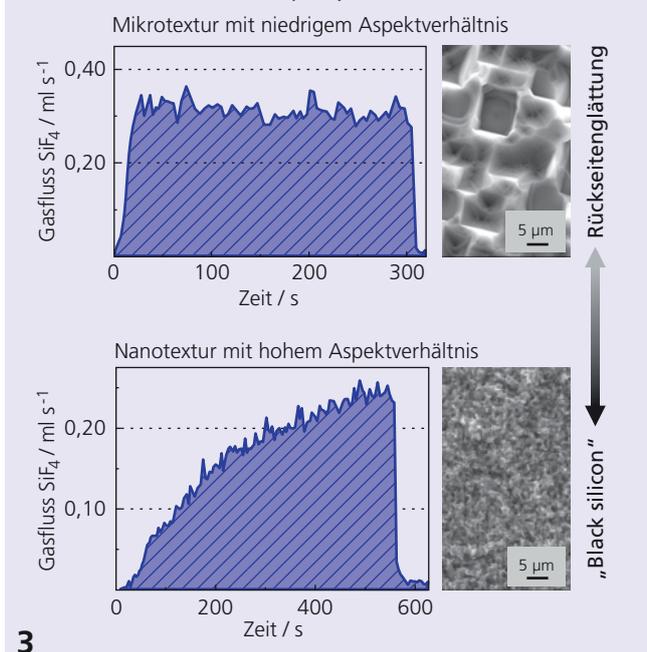
In der Solarwaferherstellung kann die weiterentwickelte Ätztechnologie in folgenden Prozessschritten eingesetzt werden:

- Texturierung sägeschadengeätzter Wafer
- Kombination Sägeschadenätzen und Texturierung
- Rückseitenglättten

Die verfügbare Textur-Palette wurde hinsichtlich Form und Aspektverhältnis der geätzten Strukturen deutlich erweitert, was dieses Verfahren auch für andere Einsatzfälle außerhalb der Photovoltaik interessant macht.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des EU-geförderten Projektes SOLNOWAT (FKZ: 286658) erzielt.

On-line-Auswertung von FTIR-Spektren zur Echtzeit-Überwachung des Ätzfortschritts. Unterschiedliche SiF₄-Profile in Abhängigkeit von der entstehenden Textur (REM)



3

- 1 REM-Abbildungen von Si-Waferoberflächen
oben: ungeätzt (as cut)
unten: verschiedene durch F₂-Ätzen erzeugte Texturen

KONTAKT

Dr. Gerrit Mäder
Telefon: +49 351 83391-3262
gerrit.maeder@iws.fraunhofer.de



BOR-DOTIERTE DIAMANTSCHICHTEN FÜR ELEKTROCHEMISCHE ANWENDUNGEN

DIE AUFGABE

Bereits in den späten 1980er Jahren wurden für elektrisch leitfähigen Bor-dotierten Diamant (BDD) hervorragende Eigenschaften in der Anwendung als Elektrodenwerkstoff für die Elektrochemie entdeckt. Dazu zählen das größte nutzbare elektrochemische Potenzialfenster, die geringe Kapazität der Ladungsdoppelschicht, die geringen Hintergrundströme, die geringe Adsorption und die exzellente Korrosionsbeständigkeit in aggressiven Medien. Dank dieser Eigenschaften eignet sich BDD als vielseitiges Elektrodenmaterial und kann für eine Vielzahl von Anwendungen beispielsweise bei der elektrochemischen Analyse, der Wasserbehandlung oder der chemischen Synthese eingesetzt werden.

Durch das besonders große elektrochemische Potenzialfenster in Kombination mit den geringen Hintergrundströmen und geringer Adsorptionstendenz eignet sich BDD besonders für Anwendungen mit niedrigen Nachweisgrenzen, wie bei der Spurenanalyse und Neurochemie. Eingesetzt werden dort Mikroelektroden und Mikroelektrodenarrays (MEA). Diese haben Vorteile hinsichtlich der Analytdiffusion gegenüber Makroelektroden. Die vorzugsweise radiale Diffusion an den Mikroelektroden führt zu einem verbesserten Massentransport über die sensitive Elektrode und somit zu einer höheren Stromdichte bei gleichzeitig geringerem Hintergrundstrom.

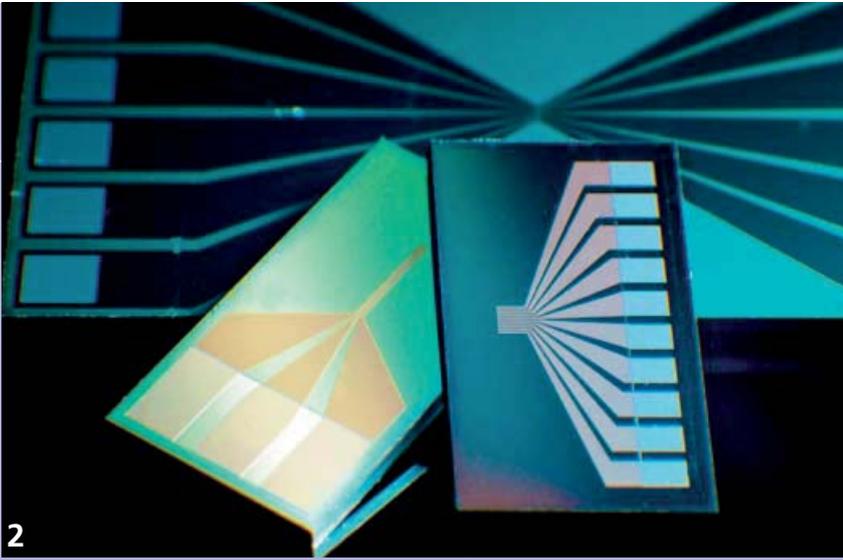
Durch den Einsatz von Mikroelektroden und MEA mit Bor-dotiertem Diamant können Elektroden mit hervorragenden Eigenschaften und gegenüber dem Stand der Technik erhöhter Nachweisempfindlichkeit hergestellt werden. Bei geeignetem Design des MEA können räumlich aufgelöste Messungen und Mehrelementanalysen durchgeführt werden.

UNSERE LÖSUNG

Im Fraunhofer CCL wurde ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von BDD-Mikroelektroden und MEA entwickelt. Die gesamte Prozesskette wird dabei abgedeckt. Dadurch kann für jede Anwendung eine eigens zugeschnittene Lösung angeboten werden.

Das Grundmaterial Diamant wird mittels Mikrowellen-Plasma-CVD hergestellt. Die Bandbreite reicht von ultrananokristallinen Diamanten bis zu einkristallinen, einschlussfreien Diamanten optischer Qualität. Weiterhin kann der Diamant dotiert werden, um die hervorragenden Eigenschaften als Halbleiter auszunutzen. Dort ist die Bor-dotierte Variante BDD im Fokus der aktuellen Forschung. BDD kann auf einer Vielzahl von Substratmaterialien wie Silizium, Quarz und Metall aufgebracht werden.

Die Herstellung von MEA stellt höhere Anforderungen an die Ebenheit der Substratoberfläche. Daher werden für MEA-Anwendungen Wafer aus Silizium oder Quarzglas eingesetzt. Somit können etablierte Prozesse aus der Mikroelektronik für die Herstellung der MEA genutzt werden. Dies schließt angepasste Prozesse wie fotolithografische Strukturierung, Nassätzen, Plasmaätzen, Metallisierung und Isolierung ein. Im letzten Schritt wird der gefertigte Wafer mittels Laser in einzelne Chips geschnitten.

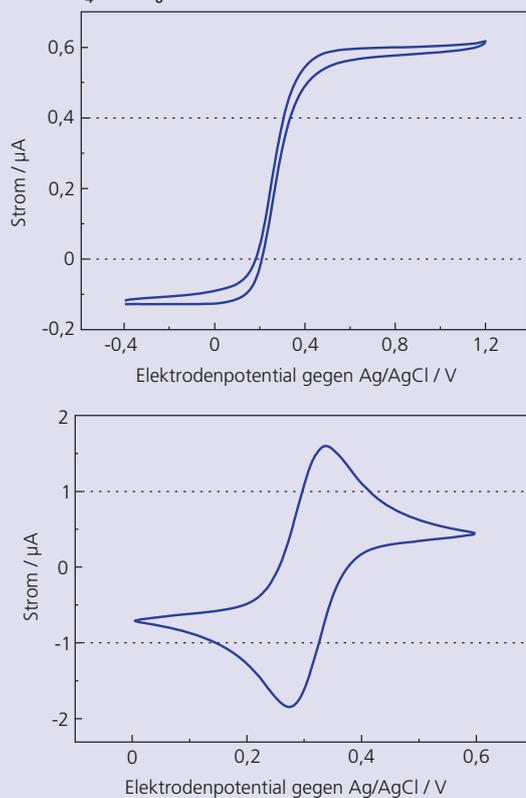


2

ERGEBNISSE

Die etablierten mikroelektronischen Verfahren erlauben eine anwendungsspezifische und kosteneffiziente Herstellung von Bor-dotierten Diamant-MEA in variablen Strukturdimensionen, wie Abb. 1 mit den dargestellten MEA und Makroelektroden zeigt.

Zyklische Voltammogramme eines Mikroelektrodenarrays (MEA) ($1 \text{ mM } K_4Fe(CN)_6$ in $0,1 \text{ M KCl}$), oben und einer Makroelektrode ($1 \text{ mM } K_4Fe(CN)_6$ in 1 M KCl), unten



3

Die Struktur der Elektroden in Abb. 2 erlaubt über 3 bis 12 unabhängige Mikroelektroden eine gleichzeitige Messung verschiedener Spezies oder alternativ eine orts aufgelöste Messung auf kleinstem Raum. Damit kann beispielsweise die Reaktion eines einzelnen Neurons in der Neurochemie untersucht werden.

Abb. 3 zeigt die zyklischen Voltammogramme für ein BDD-MEA mit bevorzugter radialer Diffusion im Vergleich zu einer Makroelektrode mit hauptsächlich planarer Diffusion. Beide Elektroden zeigen die erwarteten Kurvenverläufe und Gleichgewichtszustände. Durch die mikroelektronische Fertigung können Chips mit identischen Kennlinien prozesssicher hergestellt werden.

Neben den MEA werden im Fraunhofer CCL auch großflächige Elektroden bis 150 mm Durchmesser und Makroelektroden bis 4 mm Durchmesser für elektrochemische Anwendungen erzeugt. Ebenfalls werden optisch transparente Elektroden, frei stehende und gerahmte BDD-Folien und -Fenster fertiggestellt.

- 1 Auf Siliziumwafer gefertigte Mikroelektrodenarrays (MEA) und Makroelektroden
- 2 Geschnittene MEA-Chips

KONTAKT

Dr. Thomas Schülke
 Telefon: +1 517 432 8173
 tschuelke@fraunhofer.org



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. ANDREAS LESON



»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-SCHICHTTECHNOLOGIE

Redaktion: Eine der zentralen Kernkompetenzen des IWS ist die Abscheidung extrem präziser Multischichten, die beispielsweise für den Einsatz in Röntgenoptiken und auch in der EUV-Lithographie eine zentrale Schlüsselkomponente darstellen. Was hat sich auf diesem Gebiet im letzten Jahr getan?

Prof. Leson: Die EUV-Lithographie steht momentan an der Schwelle zur Markteinführung, erste Produktions-Tools für die Serienfertigung wurden bereits gebaut. Mit wachsendem Reifegrad werden auch die technologischen Anforderungen zunehmend immer anspruchsvoller und erfordern neue Lösungen, an denen wir arbeiten. Zugleich nutzen wir unser so erworbenes Know-how für andere Anwendungen. So arbeiten wir derzeit intensiv an der Entwicklung von neuartigen höchstaflösenden Röntgenlinsen, mit denen sich perspektivisch eine zerstörungsfreie Werkstoffprüfung bis in den Nanometerbereich realisieren lässt. Die bisherigen Resultate sind sehr ermutigend.

Redaktion: Eine starke Nachfrage nach FuE-Dienstleistungen kann wiederum auch die Gruppe, die sich mit Kohlenstoffschichten befasst, aufweisen. Welche Entwicklungen hat es hier im letzten Jahr gegeben?

Prof. Leson: Wir arbeiten seit einiger Zeit gemeinsam mit Automobilfirmen und einer Reihe von Zulieferern an der Erschließung des Potenzials, das Kohlenstoffschichten bei der Reibungsreduzierung aufweisen. Die Notwendigkeit zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und damit zur Verringerung des Verbrauchs ist ja eine große gesellschaftliche Aufgabe. Insbesondere die ta-C-Schichten, auf die wir uns fokussiert haben, weisen hier enorme Vorteile auf. 2013 konnten wir viele grundlegende Fragestellungen aufklären und erfolgreich ein vom BMWi gefördertes Projekt abschließen. Besonders

freut es uns, dass das BMWi die Fortsetzung des Projektes unterstützt, bei der es um die Übertragung der Ergebnisse auf reale Bauteile im Antriebsstrang gehen wird.

Redaktion: Neben den PVD-Schichten, deren Schichtdicken typischerweise im Bereich von einigen Mikrometern liegen, befasst sich Ihre Abteilung ja auch mit der Herstellung deutlich dickerer Schichten mit Dünnschichtverfahren bis in den Bereich von 100 Mikrometern und mehr. Gibt es für solche dicken Schichten ebenfalls Anwendungen?

Prof. Leson: Es ist uns im letzten Jahr gelungen, deutlich dickere Schichten abzuscheiden als es bisher in der Dünnschichttechnik üblich ist. Durch eine gezielte Prozessoptimierung beherrschen wir sowohl die Eigenspannungen wie auch das Defektwachstum. Zudem können wir diese dicken Schichten auch wirtschaftlich herstellen, da wir die Beschichtungsrate deutlich steigern konnten. Daraus ergibt sich in der Tat eine ganze Fülle interessanter Einsatzmöglichkeiten. So lässt sich beispielsweise die Standzeit von Wendeschneidplatten oder Tiefziehwerkzeugen deutlich erhöhen. Auch eine nachträgliche Feinbearbeitung und damit eine deutlich höhere Präzision werden damit erstmals denkbar. Ich bin überzeugt, dass wir diese Schichten in den nächsten Jahren in einer Vielzahl neuer Anwendungen einsetzen werden.



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 Schichtdickengenauigkeit, Rauheit, chemischer Reinheit, lateraler Homogenität und Reproduzierbarkeit. Genutzt werden diese Schichtsysteme in Röntgenoptiken und röntgenoptischen Systemen sowie als reaktive Multischichten zum hochpräzisen Fügen. Neben der Entwicklung und Herstellung von Präzisionsschichten bietet die Arbeitsgruppe langjährige Erfahrungen auf den Gebieten der Charakterisierung und Modellierung von Nanometerschichten an.

KOHLLENSTOFFSCHICHTEN

Die in der Arbeitsgruppe entwickelten superharten ta-C Kohlenstoffschichten (Diamor®) eignen sich hervorragend als reibungsmindernde Schutzschichten für geschmierte und ungeschmierte Anwendungsbedingungen. Sie können auf verschiedensten Werkzeugen und Bauteilen mit sehr guter Haftung in einem weiten Schichtdickenbereich abgeschieden werden. Die Beschichtung erfolgt mit der speziell für ta-C-Schichten entwickelten Laser-Arc-Technologie. 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 Dickenbereich von wenigen Nanometern bis zu einigen hundert Mikrometern. Dafür stehen in der Arbeitsgruppe Verfahren von der Hochrate-Bedampfung bis hin zu hochaktivierten Plasmaverfahren sowie deren Kombinationen zur Verfügung. Besondere Schwerpunkte sind die Nutzung von Bogenentladungen als effizienteste Quelle energiereicher Dampfstrahlen sowie die Herstellung sehr dicker PVD- Schichten für verschiedene Anwendungen.



ABTEILUNGSLEITER

PROF. 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

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 2013

- | | |
|--|----|
| 1. Industrialisierte Abscheidung dicker Kohlenstoffschichten auf Kolbenringen | 44 |
| 2. Von der Idee zum Produkt: Kohlenstoffschichten schneiden gut ab | 46 |
| 3. Neue Beschichtungslösungen für Umformwerkzeuge | 48 |
| 4. Mit Multischicht-Laue-Linsen zur höchstauflösenden Röntgenoptik | 50 |
| 5. Laser-akustisches Prüfsystem zur Oberflächenanalyse von Siliziumblöcken und Solarwafern | 52 |



INDUSTRIALISIERTE ABSCHIEDUNG VON DICKEN KOHLENSTOFFSCHICHTEN AUF KOLBENRINGEN

DIE AUFGABE

Ein wesentlicher Teil der Reibungsverluste im Motor wird durch den Reibungskontakt Kolbenring/Zylinderwand verursacht. Das Kolbenringpaket, bestehend aus Kolben, Ringen und Zylinderlaufbahn, hat deshalb eine besondere Bedeutung unter den Motorenkomponenten. Bis zu 4 % des Gesamtverbrauches lassen sich unter motorischen Teillastbedingungen auf die Reibleistung des Kolbenringpaketes zurückführen. Entsprechend groß wäre der Gewinn an Kraftstoffeinsparung und Verminderung des CO₂-Ausstoßes, könnte eine geeignete reibungsreduzierende Beschichtung der Kolbenringe im industriellen Maßstab vorgenommen werden. Gefordert werden verschleiß- und temperaturbeständige Beschichtungen für den Dauereinsatz mit Schichtdicken deutlich über 10 µm.

UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer IWS werden seit Jahren tetraedrische amorphe Kohlenstoffschichten (ta-C) mittels lasergesteuertem Vakuumbogen (Laser-Arc-Technologie) für verschiedene Anwendungen hergestellt. Dieser Schichttyp kann im Gegensatz zu den amorphen wasserstoffhaltigen (a-C:H) Schichten mit nahezu beliebiger Dicke abgeschieden werden, solange die Voraussetzung einer sehr guten Schichthaftung gegeben ist. Eine entsprechend angepasste Haftschicht-Technologie ermöglicht heute die Abscheidung von ta-C-Schichten mit mehr als 20 µm Dicke. Damit sind die mittels Laser-Arc-Technologie abgeschiedenen ta-C-Schichten prädestiniert für die Anwendung auf Kolbenringen (Abb. 1).

Die Übertragung der Technologie in die industrielle Fertigung begann zunächst mit dem Laser-Arc-Modul LAM 400 in Kombination mit einer standardmäßigen PVD-Grundanlage.

Im ersten Schritt erfolgte die Anpassung der Technologie auf zwei Kolbenringwerkstoffe, einerseits nitrierte Stahlringe andererseits Grauguss. Damit konnte die haftfeste Abscheidung von 20 µm dicken ta-C-Schichten auf beiden Werkstoffen erfolgreich demonstriert werden. Im zweiten Schritt wurde die Beschichtungstechnologie auf das leistungsfähigere Beschichtungsmodul LAM 500 übertragen. Damit wird eine deutlich höhere Beschichtungsrate sowie ein größerer homogener Beschichtungsbereich von etwa 500 mm Höhe erreicht.

Neben der Abscheidung der dicken ta-C-Schichten war auch die Glättung der Schichten ein Schwerpunkt der Arbeiten. Dahingehend wurde eine Optimierung der Bearbeitungsparameter vorgenommen. Da die Schichten durch die Arc-typischen Droplets und Partikel derzeit dennoch eine für den Einsatz zu große Rauheit aufweisen, müssen die Schichten nachbearbeitet werden. Dazu wurde ein spezielles, vom IWS Dresden patentiertes Bürstverfahren, an die Besonderheiten der Kolbenringaußenkontur angepasst.

REM-Querschnittsaufnahme einer ta-C-Schicht auf einem Stahl-Kolbenring an einer Bruchkante



1



ERGEBNISSE

Die erreichbare Abscheidungsrate bei PVD-Arc-Prozessen wird quellenseitig durch den mittleren Arc-Strom bestimmt. Im Falle der gepulsten Arc-Entladung, wie sie beim Laser-Arc-Verfahren vorliegt, sind die Pulsfrequenz, die Pulshöhe sowie die Pulslänge entscheidend. Mit der Aufskalierung vom LAM 400 zum LAM 500 konnten alle Parameter deutlich gesteigert werden.

Mit den leistungsstarken Stromparametern des LAM 500 (1600 A Pulsstrom; 0,33 ms Pulslänge; 200 A mittlerer Strom) werden Beschichtungsrate von mehr als $2 \mu\text{m h}^{-1}$ erreicht. Dieser Nachweis erfolgte bei voller Beladung der Anlage auf allen 8 Rotationsachsen und zweifach rotierenden Bauteilen. Zunächst kamen Rohrkörper zum Einsatz, welche später teilweise mit Kolbenringen bestückt wurden (Abb. 3). Für die Beschichtung von Kolbenringen mit $20 \mu\text{m}$ ta-C in einer voll bestückten Beschichtungsanlage wird nunmehr nur noch eine reine Beschichtungszeit von 10 Stunden benötigt.

Nach Sicherstellung der Beschichtungshomogenität und einer hohen Beschichtungsrate erfolgten Tests zur Dauerstabilität des LAM 500 Moduls. So wurde die Reproduzierbarkeit der Schichteigenschaften, insbesondere der Schichthärte, im Verlaufe von mehr als 10 Beschichtungen untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte keine signifikanten Abweichungen in der Versuchsreihe festgestellt werden.

Die nachträgliche Glättung der ta-C-Schichten erfolgte mit dem speziell im IWS entwickelten Bürstverfahren. Die Qualität der Schichtoberfläche erreichte dabei Werte von $R_z < 0,6 \mu\text{m}$ und $R_{pk} < 0,06 \mu\text{m}$ (Abb. 4). Mit der Optimierung der Bearbeitungsgeschwindigkeit konnte der Prozess beschleunigt und die prinzipielle Automatisierbarkeit dieser Technik nachgewiesen werden.

Mit den ta-C beschichteten und nachbearbeiteten Kolbenringen erfolgten Motorprüfläufe beim Kunden. In den befeuerten Motortests wurden die Ringe einem 240 h

Dauerlauf unterzogen und die Schichten hinterher hinsichtlich ihrer mechanischen und strukturellen Eigenschaften untersucht. Dabei konnte nur ein minimaler Verschleiß und keinerlei Anzeichen einer sonstigen Schichtschädigung festgestellt werden. Die Schichten erwiesen sich damit hinsichtlich Reibleistung, Verschleiß- sowie Brandspurbeständigkeit allen bisher bekannten Schichten weit überlegen.

Durch das hervorragende Einsatzpotenzial und die gezeigte Darstellbarkeit der Schichten im industriellen Maßstab wurde sofort eine industrielle Produktion in die Wege geleitet. Inzwischen konnte eine komplette ta-C-Beschichtungsanlage, bestehend aus einem LAM 500, integriert in einer DREVA 600, an einen Kunden übergeben werden (Abb. 2). Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme ist die Grundlage für den Start der Serienproduktion ta-C-beschichteter Kolbenringe im Jahr 2014 gelegt worden.

- 2 *An einen Kolbenringhersteller überführte PVD-Beschichtungsanlage mit LAM 500*
- 3 *Kolbenringe und Probekörper mit einer $20 \mu\text{m}$ dicken ta-C-Beschichtung*
- 4 *ta-C-beschichtete Kolbenringe nach mechanischer Glättung*

KONTAKT

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



VON DER IDEE ZUM PRODUKT: KOHLENSTOFFSCHICHTEN SCHNEIDEN GUT AB

DIE AUFGABE

Messer werden stumpf, Nagetierzähne im Gegensatz dazu nicht. Ursache hierfür ist ihr Aufbau aus zwei Materialien: dem elastischen Zahnbein und dem Zahnschmelz mit einer deutlich höheren Härte. Beim Nagen verschleißt hauptsächlich das weiche Zahnbein, der Zahnschmelz bleibt als scharfe Schneidkante stehen.

Das IWS hat dieses Prinzip in eine technische Lösung umgesetzt (Abb. 1). Hierbei werden Kochmesser einseitig mit tetraedrisch gebundenem, amorphen Kohlenstoff (ta-C) beschichtet. Dafür wird der gepulste Hochstrombogen eingesetzt, mit dem sehr harte Schichten extrem haftfest abgeschieden werden können. Die Temperaturbelastung für die Messer ist dabei so niedrig, dass kein Härteverlust eintritt.

Schneidleistungsversuche nach DIN EN ISO 8442 haben gezeigt, dass die so beschichteten Messer im Vergleich zu unbeschichteten eine überragende Schneidhaltigkeit aufweisen, was auf den oben beschriebenen Selbstschärfeneffekt zurückzuführen ist.

Im Auftrag eines Industriepartners ist diese Idee nun zu einem marktgängigen Produkt weiter zu entwickeln. Dazu gehört die Lösung folgender Aufgaben:

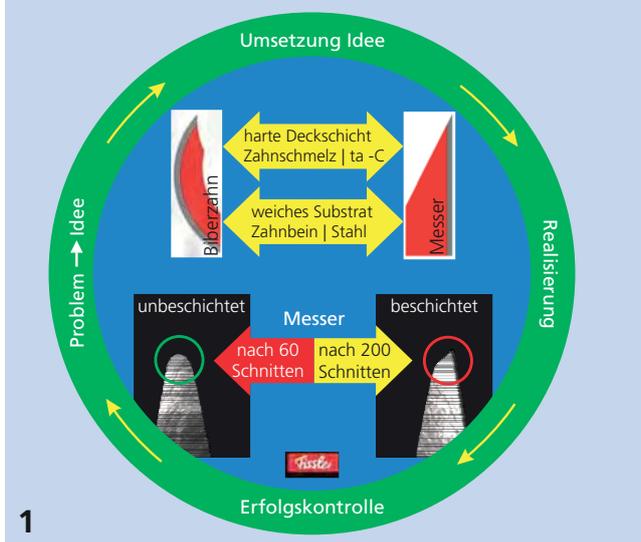
- wirtschaftlich darstellbare Kosten
- ansprechendes Produktdesign
- Eintakten der Beschichtung in die Fertigungskette der Messer
- hohe Produktqualität auch in der Serie

UNSERE LÖSUNG

Im ersten Schritt wurde der Beschichtungsprozess im Hinblick auf exzellente Schichthaftung und höchste Schneidhaltigkeit bei gleichzeitig kürzest möglicher Prozessdauer optimiert. Die Schneidhaltigkeit der beschichteten Messer wurde wiederholt gemessen, um den Prozess zu optimieren.

Um ein ansprechendes Produktdesign zu realisieren, wurde kundenseitig entschieden, nur einen ca. 10 mm breiten Streifen entlang der Schneide zu beschichten. Hierzu wurde die existierende Halterung so weiterentwickelt, dass die Messer bis auf den zu beschichtenden Bereich trennscharf abgedeckt werden. Dabei war auch sicherzustellen, dass die Halterung leicht zu bedienen ist und die gleichzeitige Beschichtung einer möglichst großen Zahl an Messern erlaubt. Zur Erreichung der anderen vorgenannten Zielstellungen wurden alle in der Serie üblichen qualitätssichernden Maßnahmen durchgeführt und die qualitätskritischen Parameter identifiziert, optimiert und überwacht.

Schematischer Vergleich eines einseitig beschichteten Messers mit dem Aufbau eines Nagetierzahns





2



3

Es erfolgte die Definition von Schnittstellen zwischen den verschiedenen Prozessen der Fertigungskette (Schmieden, Schleifen, Beschichten, Angießen des Griffes, Versäumen, Endabzug), Grenzmustern und Kommunikationswegen sowie die Festlegung von Maßnahmen zur Reduzierung der Kosten.

ERGEBNISSE

Im Rahmen der Erprobung wurden mehrere Chargen unter seriennahen Bedingungen beschichtet, um Arbeitsabläufe und Produktqualität zu verbessern. Die optimierten Halterungen waren einfach und schnell zu bedienen und erlaubten die Ausbildung einer exzellenten Trennschärfe zwischen dem beschichteten und dem unbeschichteten Bereich. Durch Optimierung der Konstruktion konnte die Chargengröße auf 132 Messer erhöht werden (Abb. 2).

Die einzelnen Arbeitsschritte wurden zeitlich exakt erfasst und hinsichtlich ihres Einsparpotenzials analysiert. Durch Optimierung der Arbeitsabläufe konnten die Nebenzeiten reduziert und die Kosten gegenüber dem ursprünglichen Ansatz um 8 % gesenkt werden. Die optimierten Abläufe wurden in Arbeitsanweisungen dokumentiert.

Dem erfolgreichen Eintakten der Beschichtung zwischen die vor- und nachgelagerten Fertigungsschritte und der Etablierung schneller Kommunikationspfade ist es zu verdanken, dass nahezu keine Produktionsstockungen auftraten. Produktfehler wurden schnell identifiziert, bewertet und einem bestimmten Glied der Fertigungskette zugeordnet. Daraus ließen sich Maßnahmen zur Beseitigung der Fehlerursache ableiten und die Zahl der Fehler und die Zahl der jeweils betroffenen Messer (Ausschuss) minimieren.

Erneute Schneidleistungsuntersuchungen haben gezeigt, dass die nach der Optimierung des Fertigungsprozesses beschichteten Messer eine Schneidhaltigkeit besitzen, die ein Dreifaches der Norm für nicht nachzuschärfende Messer beträgt. Damit wird auch die Schneidhaltigkeit von Keramikmessern deutlich übertroffen. In Verbindung mit dem ästhetischen Produktdesign (Abb. 3) haben diese Eigenschaften dazu geführt, dass die Messer in zwei Varianten eine hohe Marktakzeptanz gefunden haben.

Das Fraunhofer IWS dankt der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW) in Remscheid für die Durchführung der Schneidleistungsuntersuchungen.

2 *PVD-Großkammerbeschichtungsanlage mit 132 Messern in 33 Halterungen*

3 *Geschmiedetes, geschliffenes, beschichtetes und fertig gestelltes Messer (v.l.n.r.)*

KONTAKT

Dr. Thomas Stucky

Telefon: +49 231 844-3888

thomas.stucky@iws.fraunhofer.de





NEUE BESCHICHTUNGSLÖSUNGEN FÜR UMFORMWERKZEUGE

DIE AUFGABE

Die Massivumformung ist eine Gruppe moderner Fertigungstechnologien zur Umformung metallischer Werkstoffe. Typisch für diese Verfahren sind Materialverdrängungen bzw. Materialanhäufungen während des Umformprozesses, die in aller Regel erhebliche Kräfte erfordern. Typische Produkte der Massivumformung sind Antriebs Elemente, wie verzahnte Wellen oder Pleuel, aber auch Schrauben sowie zahlreiche Arten von Halbzeugen und Vorformen.

Werkzeuge zur Massivumformung sind erheblichen Belastungen, insbesondere im oberflächennahen Bereich, ausgesetzt. Hohe Flächenpressungen in Kombination mit Relativbewegungen belasten die Werkzeugoberfläche extrem. Insbesondere abrasiver Verschleiß begrenzt die Lebensdauer der eingesetzten Werkzeuge. Oft stellt darüber hinaus eine hohe Arbeitstemperatur eine zusätzliche Belastung dar.

Damit die Werkzeuge bei langer Lebensdauer hochwertige Produkte erzeugen, werden für die Massivumformung teils hochwarmfeste Werkstoffe eingesetzt. Dies kann zu hohen Werkzeugkosten führen. Um die Wirtschaftlichkeit bei Prozessen mit extremer Werkzeugbelastung zu steigern, sind Oberflächenmodifikationen gesucht, die geeignet sind, Reibung und Verschleiß zu minimieren und die Lebensdauer der Werkzeuge zu erhöhen. Optimaler Weise gelingt es damit auch, preiswertere Grundwerkstoffe einzusetzen und so Werkzeugkosten einzusparen.

Im Rahmen eines Kooperationsprojektes wurden deshalb Möglichkeiten zur Reibungs- und Verschleißminimierung in Umformprozessen evaluiert.

UNSERE LÖSUNG

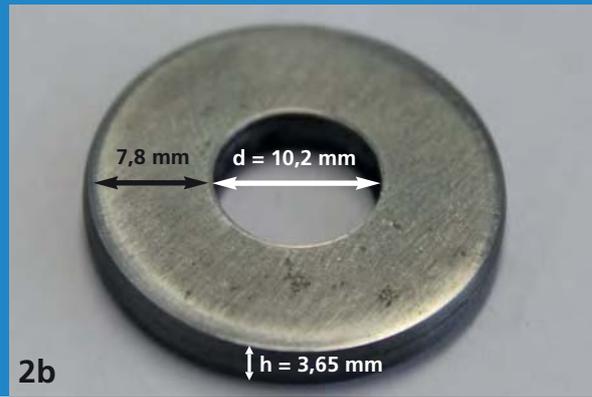
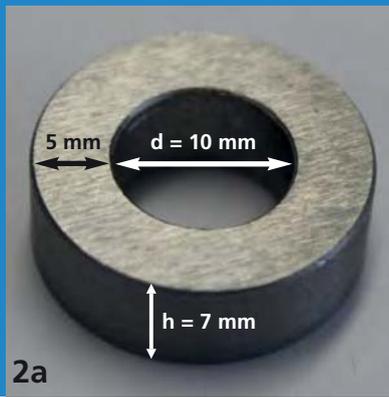
Der Schwerpunkt der Arbeiten des Fraunhofer IWS Dresden lag auf der Entwicklung und Erprobung einer geeigneten hochwarmfesten Beschichtung. Für diese Beschichtung wurde folgender Anforderungskatalog formuliert:

- hohe Härte und Abrasionsbeständigkeit bei hohen Flächenpressungen
- möglichst geringe Reibung (gegenüber Stahloberflächen) im geschmierten Tribosystem
- keine Kaltaufschweißungen
- keine Neigung zu Rissbildung sowie exzellente Haftfestigkeit

An Hand von Testbeschichtungen auf Probekörpern und anschließenden Modelltests wurden geeignete Schichtsysteme identifiziert und charakterisiert. Die Beschichtungen erfolgten mit Hilfe der Arc-Technologie, einer industriellen Standardtechnologie für die Werkzeugbeschichtung.

Das tribologische Verhalten der beschichteten Oberflächen wurde mit Hilfe eines Tribometers in der Kugel-Scheibe Anordnung charakterisiert. Unter geschmierten Bedingungen wird über die zu prüfenden Oberfläche eine Stahlkugel mit definierter Anpresskraft hin und her bewegt. Dabei werden z. B. Reibwert und Oberflächenverschleiß analysiert.

Darüber hinaus wurden anwendungsbezogene Tests mit Hilfe des Ringstauchversuchs durchgeführt. Dabei wird ein Stahling zwischen zwei parallelen Werkzeugen (Stauchplatten) auf die Hälfte seiner Ausgangshöhe gestaucht. Für die rundenförmigen Werkzeuge ergibt sich dabei eine für viele Umformwerkzeuge typische Belastung.



ERGEBNISSE

Die Auswertung der Tribometertests ergab eine unterschiedlich starke Ausprägung der Verschleißspuren auf den verschiedenen Proben. Während die unbeschichtete Stahlprobe stark verschlissen ist, waren Reibspuren auf den AlCrSiN- und den AlCrTiN-beschichteten Proben kaum nachweisbar. Dies ist wegen der bei diesen Tests angewendeten wesentlich höheren Flächenpressung (> 2000 MPa im Vergleich zu 1750 MPa unbeschichtet) besonders bemerkenswert.

Unbeschichtete und beschichtete Stahlronden dienten als Stauchplatten für die Ringstauchversuche (Abb. 3). Im unbeschichteten Fall kam der höherwertige Stahl 1.2379 zum Einsatz, bei den beschichteten der Stahl C45. Abbildung 3

zeigt die Verschleißentwicklung unbeschichteter und beschichteter Ronden. Selbst nach 50 Stauchungen ist an den beschichteten Ronden kein Verschleiß erkennbar (rechts unten).

Diese Ergebnisse zeigen das Potenzial dieser Beschichtungen für Umformwerkzeuge. Eine Verschleißreduzierung kann sogar bei Verwendung eines unlegierten Stahls als Werkzeugwerkstoff erreicht werden.

Das Fraunhofer IWS dankt dem Fraunhofer IWU für die Durchführung und Auswertung der Umformversuche.

Unbeschichtete Stauchplatten (oben) und beschichtete Stauchplatten (unten)

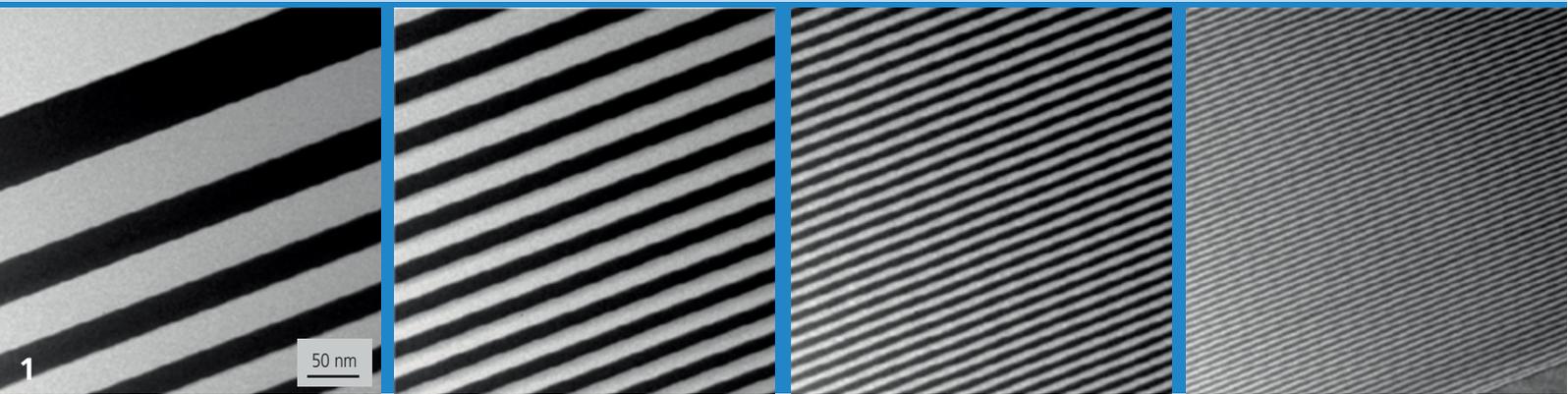


- 1 Beschichtetes Demonstratorwerkzeug (Fließpresstempel)
- 2 Ring für Ringstauchversuch,
 - a) vor dem Versuch
 - b) nach dem Versuch

KONTAKT

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





MIT MULTISCHICHT-LAUE-LINSEN ZUR HÖCHSTAUFLÖSENDEN RÖNTGENOPTIK

DIE AUFGABE

Die immer weiter fortschreitende Miniaturisierung der Mikroprozessoren erfordert auch verbesserte Untersuchungsverfahren. Mit Röntgenmikroskopie ist es möglich, kleine Strukturen quasi zerstörungsfrei und bei entsprechenden Aufbauten im Betrieb zu untersuchen, um Fehlstellen zu identifizieren und in Zukunft zu vermeiden. Der Einsatz von Röntgenstrahlung für die Analyse ermöglicht es, zusätzlich zur Absorption, Informationen über die Zusammensetzung der Elemente in einer Probe zu gewinnen.

Eine häufig genutzte Untersuchungsmethode ist die Vollfeldabbildung von Proben an laborbasierten Röntgenmikroskopieaufbauten. Des Weiteren kann der einfallende Parallelstrahl einer Synchrotronstrahlungsquelle genutzt werden, um durch Abrastern der Probe ein entsprechendes Bild zu bekommen.

Die Auflösung ist bei den Untersuchungen in erster Linie durch die verwendeten Optiken begrenzt. Zonenplatten und refraktive Röntgenlinsen bieten Abbildungseigenschaften mit Auflösungsvermögen besser als 100 nm. Strukturgrößen von inzwischen unter 50 nm erfordern eine entsprechende Entwicklung. Insbesondere bei harter Röntgenstrahlung von 8 keV und mehr stoßen Zonenplatten bei der lithografischen Herstellung an Prinzip bedingte Grenzen, durch die sowohl die Effizienz als auch die Fokusgröße begrenzt sind.

Um mit aktuellen technischen Entwicklungen Schritt halten zu können, ist die Auflösung der Optiken weiter zu verbessern. Dies soll optimaler Weise erreicht werden, ohne den praktischen Einsatz des Aufbaus unnötig einzuschränken.

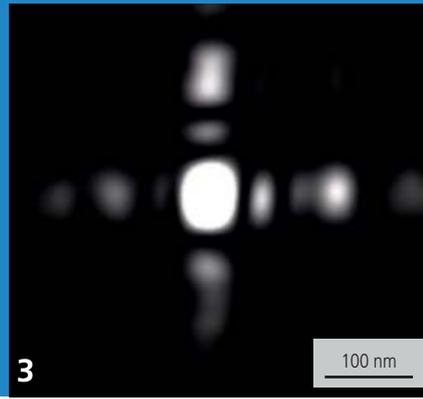
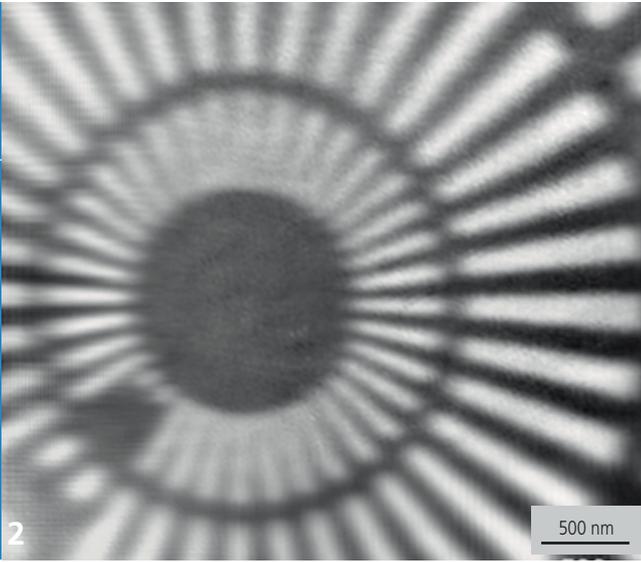
UNSERE LÖSUNG

Multischicht-Laue-Linsen machen sich das Prinzip der Röntgenbeugung zunutze und verbessern die technologischen Limitierungen der derzeit eingesetzten Fresnelschen Zonenplatten an entscheidenden Punkten. Da sich das Auflösungs- und Fokussierungsvermögen in der Größenordnung der kleinsten hergestellten Schichtdicken bewegt, müssen entsprechend dünne Schichten abgeschieden werden. Schichten mit 1 Nanometer Schichtdicke stellen das bisher errechnete Limit der Auflösung dar.

Um eine solche Linse herzustellen, ist es notwendig, tausende Schichten entsprechend dem Zonenplattengesetz mit zunehmenden Dicken abzuschneiden. Dabei kann sich die Gesamtdicke auf über 50 μm belaufen. Die notwendige Stabilität des Prozesses ist sicherzustellen und die Vorgabe der Schichtdicken sind präzise einzuhalten.

Im IWS Dresden wurden Zonenbreiten zwischen 5 nm und über 300 nm realisiert. Es werden hierbei keine vollständigen, sondern Teile halber Linsen auf einer Seite der optischen Achse hergestellt.

Die so erzeugte Beschichtung wird im Anschluss so präpariert, dass nur noch eine wenige Mikrometer dicke freistehende Lamelle übrigbleibt; dies ist die eigentliche Linse. Da es sich bei einem Element um eine linear fokussierende Linse handelt, werden zwei Linsen mit Glue Bonding fixiert und so eine punktfokussierende Optik gebildet.



ERGEBNISSE

Untersuchungen mit Multischicht-Lauelinzen als fokussierende Optik erfolgten an der Synchrotronstrahlungsquelle in Hamburg sowie am ESRF in Grenoble, Frankreich. In den ersten Experimenten wurde eine Multischicht-Lauelinze in gekreuzter Anordnung mit einer nanofokussierenden refraktiven Linse verwendet. Durch geschicktes Kombinieren, der aus dem Beugungsbild gewonnenen Informationen mit Hilfe der sogenannten ptychografischen Rekonstruktion, können nicht nur Informationen über die Struktur der untersuchten Probe erlangt werden. Auch das komplexe Wellenfeld der Optik sowie die Form des Fokus und die Kaustik werden mit bestimmt (Abb. 2).

In weiteren Experimenten mit der nächsten Linsengeneration wurden zwei Multischicht-Lauelinzen gekreuzt und integrierte Schaltkreise und Proben für Nanostressmessungen untersucht. Mit den gekreuzten Multischicht-Lauelinzen wurde bei 20 keV Röntgenenergie ein Punktfokus mit einer Größe von $39 \cdot 49 \text{ nm}^2$ (Abb. 3) und eine Beugungseffizienz von etwa 12 % erreicht. Die Beugungseffizienzen von Fresnel Zonenplatten liegt bei der verwendeten harten Röntgenstrahlung üblicherweise im niedrigen einstelligen Prozentbereich.

Ein Vergleich von theoretischen Berechnungen mit den Messergebnissen hat zu einem verbesserten Verständnis der während der Beschichtung variablen Parameter geführt. Ausgehend von der jeweils letzten Beschichtung kann so eine kontinuierliche Verbesserung der Kaustik und des Strahlprofils erreicht werden.

Weitere Experimente mit gekreuzten Multischicht-Lauelinzen wurden an einem Laborröntgenmikroskop in Dresden durchgeführt. Hier konnte mit 8 keV Röntgenenergie zum ersten

Mal überhaupt eine Vollfeldabbildung mit Multischicht-Lauelinzen realisiert werden. Dabei ist bereits eine mit konventionell eingesetzten Zonenplatten vergleichbare Auflösung sowie ein vergleichbarer Kontrast erreicht worden. Dies wird die Messzeiten aufgrund der Effizienzsteigerung reduzieren und die Auflösung der Röntgenmikroskopie aufgrund der herstellungsbedingten Vorteile verbessern.

Das Projekt wird durch den Freistaat Sachsen gefördert (FKZ 75694/2583). Das Fraunhofer IWS dankt dem Fraunhofer IZFP, dem Institut für Strukturphysik für kondensierte Materie der Technischen Universität Dresden sowie dem Industriepartner Globalfoundries für die Unterstützung bei der Entwicklung und Charakterisierung der Multischicht-Lauelinzen.

- 1 *TEM-Bildausschnitt einer tiefengradierten Multischicht-Lauelinze inklusive Substrat (re. unten) und Übergang zur Umgebung (li. oben)*
- 2 *Ptychografisch rekonstruiertes Phasenbild einer bei den Synchrotronversuchen verwendeten Testprobe mit kleinsten Strukturgrößen von 30 nm*
- 3 *Amplitude einer Linse, bestehend aus zwei senkrecht zueinander positionierten Multischicht-Lauelinzen*

KONTAKT

Dipl.-Phys. Adam Kubec
 Telefon: +49 351 83391-3572
adam.kubec@iws.fraunhofer.de





LASER-AKUSTISCHES PRÜFSYSTEM ZUR OBERFLÄCHENANALYSE VON SILIZIUMBLÖCKEN UND SOLARWAFERN

DIE AUFGABE

Die Solarindustrie liefert einen großen Beitrag zur Energiegewende. Grundbaustein der Solarmodule sind Siliziumwafer. Die Herstellung der Wafer beginnt mit dem Ziehen der Siliziumkristalle. Die Kristalle werden zu Blöcken mit einer Länge von etwa einem Meter und einem Querschnitt von $156 \times 156 \text{ mm}^2$ konfektioniert. Die Seiten dieser Blöcke bilden die späteren Kanten der Wafer. Sie sollten eine geringe Schädigung aufweisen, da von ihnen bevorzugt Rissbildung ausgehen kann. Demzufolge werden diese Schnittflächen optional durch Schleifen veredelt.

Anschließend werden die spröden Siliziumblöcke mittels Drahtsägeverfahren in Wafer zerschnitten. Zwangsläufig bleibt an der Schnittfläche der Wafer eine Zone hoher Materialschädigung zurück. Die Randzone ist meist durch eine Vielzahl von Mikrorissen geschädigt, die nicht nur die Festigkeit verringern, sondern auch vor dem Prozessieren zur Zelle komplett abgetragen werden müssen. Es ist deshalb erstrebenswert, die Säge-technologie im Hinblick auf eine möglichst geringe Schädigungstiefe zu optimieren. Eine zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung der Schädigungstiefe würde die Optimierung dieser Technologie erheblich erleichtern.

Ein Unternehmen der Solarbranche und das Fraunhofer IWS Dresden haben sich deshalb das Ziel gesetzt, die Tiefe, der durch den Sägeprozess an Siliziumblöcken und Solarwafern hervorgerufenen Materialschädigungen, mit Hilfe der laserakustischen Methode LAwave® zerstörungsfrei zu bestimmen.

UNSERE LÖSUNG

Akustische Oberflächenwellen sind sehr empfindlich gegen Änderungen der Oberflächeneigenschaften. Für ein homogenes Material ohne Randschicht ist die Wellengeschwindigkeit konstant. Sie hängt nicht von der Frequenz, sondern nur vom Elastizitätsmodul und der Dichte des Werkstoffes ab.

Dies ändert sich, wenn die Oberfläche eine Randschicht besitzt. Dann ist die Geschwindigkeit dieser Schallausbreitung auch von der Frequenz abhängig (Dispersion). Die Dispersionskurve kann ansteigen, wenn die Schicht einen höheren Elastizitätsmodul als das Substrat besitzt. Sägeschäden in der Oberfläche erniedrigen hingegen den Elastizitätsmodul in der Oberflächenzone, da die Vielzahl von Mikrorissen den Zusammenhalt des Werkstoffes in der Randschicht verringert. Dies führt zu einer Abnahme der Wellengeschwindigkeit mit zunehmender Frequenz. Bei stärkerer Schädigung ist die Abnahme steiler.

Die LAwave®-Methode misst die Dispersionskurve akustischer Oberflächenwellen. Zur Anregung der Welle dienen kurze Laserimpulse, die auf der Oberfläche in einer Linie fokussiert werden. Ein piezoelektrischer Sensor, der auf der Oberfläche aufgesetzt wird, empfängt die akustischen Impulse und wandelt sie in elektrische Signale um, die mit einem Oszilloskop aufgezeichnet werden.

ERGEBNISSE

Abb. 2 zeigt Dispersionskurven, die an Solarwafern gemessen wurden, bei denen das Material schrittweise durch reaktives

Ionenätzen abgetragen wurde. Für den gesägten Wafer fällt die Dispersionskurve steil ab. Ursache dafür ist die verringerte Eindringtiefe der Oberflächenwelle mit zunehmender Frequenz, so dass der Einfluss der Oberflächenschädigung auf die Wellenausbreitung zunimmt. Trägt man die geschädigte Randzone schrittweise ab, verringert sich die Neigung der Kurve. Wenn die nachweisbare Schädigung abgetragen worden ist, geht der Anstieg gegen Null. Dies legt nahe, die Neigung der Dispersionskurve als Maß für die Schädigungstiefe zu nutzen.

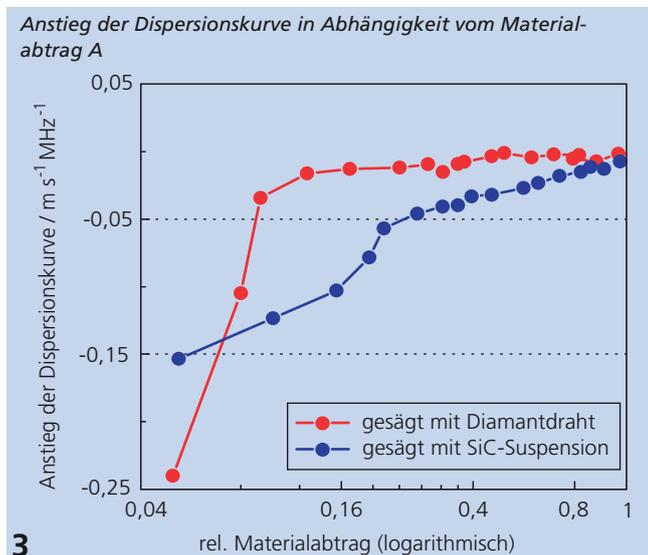
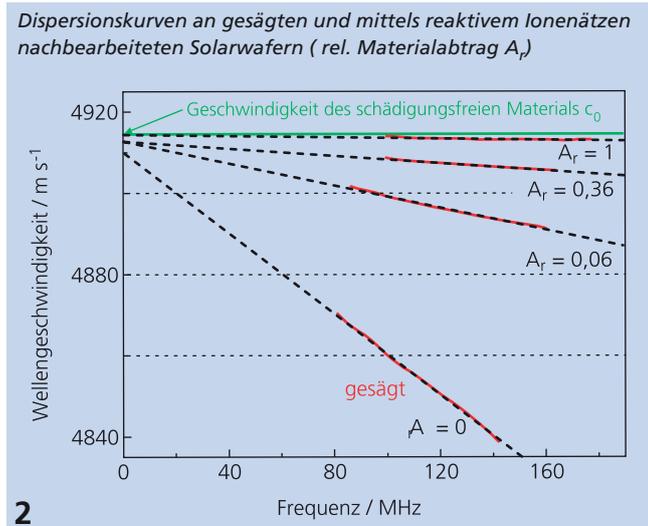


Abb. 3 zeigt, wie sich der Anstieg der Dispersionskurve mit dem Materialabtrag verändert. Im Diagramm sind zwei verschiedene Sägetechnologien, das Sägen mit Diamantdraht und das Sägen mit SiC-Suspension, dargestellt. Das Tiefenprofil der Schädigungen unterscheidet sich deutlich. Das Sägen mit Diamantdraht zerstört das Material an der Oberfläche deutlich stärker. Die Schädigungstiefe selbst ist hingegen geringer als nach dem Sägen mit SiC-Suspension.

Um die Schädigungstiefe mit dem LAwave[®]-Verfahren quantitativ zu ermitteln, muss das Verfahren kalibriert werden. Dafür werden die Dispersionskurven für jeden Ätzschritt aufgenommen. Aus dem Materialabtrag wird die Schädigungstiefe bestimmt und der Neigung der Dispersionskurve zugeordnet. Für jeden Prozess wird eine eigene Kalibriertabelle erstellt. Diese erlaubt konkrete Rückschlüsse für die Optimierung bzw. Überwachung der Bearbeitungsprozesse.

Für den Industriepartner wurde ein Prüfsystem gebaut, mit dem sowohl Wafer mit einem Gewicht ca. 10 g als auch Siliziumblöcke mit einem Gewicht ca. 50 kg geprüft werden können. Für einen effizienten Messvorgang wurde die Fokussierung des Laserstrahls und die Absenkung des Sensor mit Piezomotoren automatisiert. Ein manueller x-y-Tisch ermöglicht es, die laterale Verteilung der Schädigung aufzunehmen.

1 Laserakustisches Messsystem
LAwave[®]-Solar mit Siliziumblock

KONTAKT

Dr. Dieter Schneider
Telefon: +49 351 83391-3451
dieter.schneider@iws.fraunhofer.de



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. CHRISTOPH LEYENS



»Gehe nicht, wohin der Weg führen mag, sondern dorthin, wo kein Weg ist, und hinterlasse eine Spur.«

Jean Paul



GESCHÄFTSFELD THERMISCHES BESCHICHTEN UND GENERIEREN

Redaktion: Im Rahmen des BMBF-Förderprogrammes »Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation« gehört das von Ihnen koordinierte Vorhaben »Additiv-generative Fertigung – Die 3D-Revolution zur Produktherstellung im Digitalzeitalter« zu den 10 Siegern des Wettbewerbs. Welche Ziele verfolgt das IWS mit dem Vorhaben?

Prof. Leyens: Additiv-generative Fertigungsverfahren bringen den richtigen Werkstoff an die richtige Stelle, mit hoher Präzision, Flexibilität, Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit und ohne nennenswerte Nacharbeit. Im Rahmen des Vorhabens wollen wir gemeinsam mit einem Konsortium aus rund 40 Partnern einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, die additiv-generative Fertigung zur Schlüsseltechnologie für Industrie 4.0 zu entwickeln. Dazu wird uns das BMBF bis zu 45 Millionen Euro Fördermittel zur Verfügung stellen.

Redaktion: Kunststoffteile und auch Bauteile aus anderen Werkstoffen lassen sich doch bereits heute mittels 3D-Drucker herstellen. Worin besteht denn bei dem neuen Vorhaben die Innovation?

Prof. Leyens: Die heute mit additiv-generativen Verfahren hergestellten Bauteile genügen meist besonderen ästhetischen Anforderungen, eine besondere Langlebigkeit oder Stabilität ist in vielen Fällen nicht gefragt. In unserem Verbundvorhaben wollen wir das Fertigungsverfahren aber für die Produktion von Industriegütern zum Einsatz bringen. Hier werden ganz andere Anforderungen an die Belastung, Sicherheit und nicht zuletzt auch an die Kosten gestellt. Daher werden wir in dem Vorhaben komplette Wertschöpfungsketten abbilden und die additiv-generativen Fertigungsverfahren für viele Branchen verfügbar machen. Das IWS kann dabei auf einer langjährigen Expertise aufbauen. Bereits heute liefern wir unseren Kunden

Komplettlösungen für Einzelteile und die Serienproduktion und sind Schrittmacher für die Entwicklung innovativer 2D-Beschichtungen und 3D-Strukturen.

Redaktion: Wird die additiv-generative Fertigung die Bauteilherstellung revolutionieren?

Prof. Leyens: In Zukunft werden wir uns immer weniger Gedanken über die Komplexität eines Bauteils machen müssen. Wir können Bauteile funktionsoptimiert herstellen und sind nicht durch die Frage nach der Fertigungstechnik begrenzt. Die neuen Verfahren erlauben außerdem eine Kombination von verschiedenen Werkstoffen in bislang nicht gekannter Weise, so dass ein weiterer Freiheitsgrad für den Bauteilentwurf entsteht. Schließlich verbrauchen wir nur so viele Ressourcen, wie für das fertige Bauteil selbst benötigt werden. Und wenn in 50 Jahren einmal ein Ersatzteil gefertigt werden muss, dann helfen uns die gespeicherten CAD-Files und ein neues Teil in altbewährter Qualität wird ohne großen Aufwand hergestellt.

Redaktion: Es sieht so aus, als ob sich inzwischen alles nur um die additiv-generative Fertigung dreht?

Prof. Leyens: Im IWS können wir in der Tat viele unserer Kompetenzen und Technologien für diesen hochattraktiven Bereich einsetzen. Angefangen von den draht- und pulverbasierten Laserprozessen über die Drucktechnologie bis hin zum Thermischen Spritzen steht uns eine große Verfahrensvielfalt zur Verfügung, mit der wir aber nicht nur generieren sondern auch beschichten können und zwar einerseits mit hoher Präzision und andererseits mit hoher Produktivität.



KOMPETENZEN

THERMISCHES SPRITZEN

Zum thermischen Beschichten von Bauteilen aus Stahl, Leichtmetallen oder anderen Werkstoffen mit Metallen, Hartmetallen und Keramik stehen in der Arbeitsgruppe das atmosphärische (APS) sowie das Flamm- und Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF und HVOF) mit Pulvern und Suspensionen zur Verfügung. Zu den Kernkompetenzen zählt die Entwicklung von beanspruchungsgerechten Beschichtungslösungen, die Entwicklung und Fertigung von systemtechnischen Komponenten und deren Integration in angepasste Anlagenkonzepte. Die Technologieeinführung beim Anwender stellt einen wichtigen Aspekt des Know-how Transfers dar.

AUFTRAGSCHWEISSEN

Das Kompetenzfeld der Arbeitsgruppe umfasst die ganzheitliche Anwendung des Laser-Auftragschweißens mit Draht und Pulver für die additiv-generative Fertigung, Großflächenbeschichtungen sowie die Mikrobearbeitung und Oberflächenfunktionalisierung. Die generative Fertigung erstreckt sich über die direkte Bauteilfertigung hinaus auf schnelle Designänderungen sowie Reparaturen von Werkzeugen und Bauteilen. Für die industrielle Nutzung stehen dem Anwender langjährige Expertise auf den Gebieten der Prozessentwicklung und -simulation, der Systemtechnik und der Vor-Ort-Betreuung der Produktionseinführung wie auch umfangreiche Beratungs-, Fortbildungs- und Trainingsangebote zur Verfügung.

DRUCKTECHNOLOGIEN

Durch Drucken lassen sich 2D- und 3D-Strukturen auf Oberflächen mit hoher Präzision und Reproduzierbarkeit zu vergleichsweise geringen Kosten aufbringen. Das präzise und flexible Aufbringen von Multimaterialsystemen und das additiv-generative Erzeugen von Mikrokomponenten ermöglichen Produkte mit radikal neuen Funktionalitäten und Eigenschaftsprofilen. Die innovativen Fertigungstechnologien erlauben z.B. die Integration von gedruckter Elektronik wie Sensoren, thermoelektrischen Generatoren oder Energiespeichern in die Komponenten.



ABTEILUNGSLEITER

PROF. CHRISTOPH LEYENS

Telefon +49 351 83391-3242

christoph.leyens@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

THERMISCHES SPRITZEN

PROF. CHRISTOPH LEYENS

Telefon +49 351 83391-3242

christoph.leyens@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2013

- | | |
|--|----|
| 1. Generative Fertigung metallischer Bauteile durch Auftragschweißen mit Pulver und Draht | 58 |
| 2. Gedruckte Thermoelektrik: Materialentwicklung für flexible thermoelektrische Generatoren | 60 |
| 3. Werkstoffwissenschaftliche Analyse selbstheilender Schichten | 62 |
| 4. Steigerung der Haftreibung durch thermisch gespritzte Hartmetallschichten | 64 |
| 5. Spraypyrolyse von Aluminiumoxid zur Abscheidung von Passivierungsschichten auf Wafermaterialien | 66 |

GRUPPENLEITER

AUFTRAGSCHWEISSEN

PROF. STEFFEN NOWOTNY

Telefon +49 351 83391-3241

steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITERIN

DRUCKTECHNOLOGIEN

DR. INES DANI

Telefon +49 351 83391-3405

ines.dani@iws.fraunhofer.de





GENERATIVE FERTIGUNG METALLISCHER BAUTEILE DURCH AUFTRAGSCHWEISSEN MIT PULVER UND DRAHT

DIE AUFGABE

Unter dem Begriff »Additive Manufacturing« werden heute alle Verfahrensvarianten zusammengefasst, die für den Auftrag von Schichten auf Oberflächen sowie die generative Fertigung und die Reparatur von Bauteilen zur Verfügung stehen. Das Laser-Auftragschweißen mit pulver- und drahtförmigen Zusatzmaterialien stellt hierbei eine der etablierten Basistechnologien dar.

Im Unterschied zum klassischen Pulverbettverfahren ist beim generativen Laser-Auftragschweißen die Geometriefreiheit limitiert. Dagegen werden signifikant höhere Bauraten erreicht, und die Bauteilgröße ist nicht verfahrensbedingt begrenzt. Mit dieser Charakteristik wird das Laser-Auftragschweißen heute im Wesentlichen in Reparaturprozessen angewendet, um zum Beispiel im Bereich der Triebwerksinstandsetzung vielfach anspruchsvolle 3D-Geometrien darzustellen.

Gerade mit Blick auf die höhere Produktivität und die großen bearbeitbaren Bauteildimensionen besitzt das Laser-Auftragschweißen als formgebender Prozess auch wachsendes Potential in der direkten Bauteilfertigung. Hierbei spielen Pulver als Schweißgut eine wichtige Rolle, da sie in einem großen Spektrum unterschiedlichster Metalllegierungen und auch in Form von Composite-Werkstoffen zur Verfügung stehen. Allerdings werden sie auf Grund der stets unvollständigen Materialausnutzung und teilweise gesundheits-schädlicher Prozessrückstände zunehmend kritisch bewertet.

Als Alternative rücken deshalb verstärkt Drähte in den Blick der Anwender. Sie werden bislang überwiegend in kleinen

handgeführten Lasergeräten oder in einfachen seitlichen Bearbeitungsköpfen eingesetzt welche nur eine begrenzte Kontur- und 3D-Fähigkeit zulassen. Um hier die gleiche Flexibilität wie für die pulverbasierte Fertigung zu erlangen, sind neue technologische Ansätze gefragt.

UNSERE LÖSUNG

Um mit hoher Präzision die im CAD-Modell virtuell aufbereitete Bauteilgestalt fehlerfrei in das reale metallische Bauteil zu übertragen, muss sowohl für Pulver als auch für Draht eine stabile und richtungsunabhängige Werkstoffzufuhr gewährleistet sein. Während das für Pulver in Form der Koaxialpulverdüsen seit langem komfortabel erfüllt ist, erfordern Drähte einen höheren technischen Aufwand, um die richtungsabhängige Prozessführung langzeitstabil zu gewährleisten.

Der in Abb. 1 gezeigte neue Bearbeitungskopf COAX-wire löst diese Aufgabe in der Form, dass der Draht mit Durchmessern zwischen 400 µm und 1,0 mm zentrisch in der Laserstrahlachse zugeführt wird. Es erfolgt ein gleichmäßiger Materialauftrag lagenweise in 2D-Flächen und auch in 3D-Freiflächen bis hin in die Über-Kopf-Position.

Beide Typen der Bearbeitungsköpfe, Pulver- und Draht-Bearbeitungsköpfe, stellen kompakte Einheiten mit der jeweiligen Laseroptikkonfiguration dar und können leicht in Robotersystemen und CNC-Maschinen geführt werden. In diesen Anlagen wird der 3D-Strukturaufbau schließlich mit angepassten Baustrategien im automatisierten Betrieb ausgeführt.



2



3



4

ERGEBNISSE

Mit dem Laser-Draht-Bearbeitungskopf (Abb. 1) sind erstmals auch mit drahtförmigem Schweißgut Kontur- und 3D-Schweißungen ausführbar. Der minimal zuführbare Drahtdurchmesser beträgt derzeit 400 μm , die resultierende minimale laterale Strukturauflösung etwa 600 μm . Bisher sind einige für verschiedene technische Anwendungen geeignete Metalllegierungen verarbeitbar. Beispiele sind: Werkzeugstahl 1.2343, Inconel 625, Inconel 718, TiAl6V4 sowie Legierungen auf der Basis von Aluminium und Kupfer.

Abbildung 2 und 3 zeigen exemplarisch zwei Bauteile, die durch generatives Laser-Draht-Auftragschweißen hergestellt worden sind. Die Turbinenschaufel (Abb. 2) mit einer Höhe von 100 mm ist hohl und aus Inconel 718 gefertigt. Die defekt- und rissfreie Mikrostruktur kennzeichnet sich durch eine feinkristalline Gussstruktur. Bemerkenswert ist die geringe Oberflächenrauheit quer zu den Einzellagen von nur $R_z = 63 \mu\text{m}$. Mit 1200 W Laserleistung beträgt die Baurate bei dieser Anwendung und Werkstoff 51 $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$.

Der Ansaugbogen (Abb. 3) ist aus der Aluminium-Legierung AlMg5 gefertigt und weist bei einer Wandstärke von 4 mm ebenfalls eine defekt- und rissfreie Mikrostruktur auf. Bei diesem Werkstoff ergibt sich mit 2500 W Laserleistung eine Baurate von 198 $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$.

Zur weiteren Steigerung der Produktivität, respektive der Baurate, ist bei den drahtbasierten Prozessen das Schweißen im Heißdrahtmodus praktikabel. Durch die effiziente elektrische Erwärmung des Drahtes sind auf 200 % vergrößerte Bauraten erreicht worden.

Ein repräsentatives Beispiel der Pulver-Variante ist die in Abb. 4 metallische Eintrittskante großer Verdichterschaufeln. Diese als »Metal Leading Edge« (MLE) bezeichneten Bauteile dienen dem Schutz der Fan Blades von Flugtriebwerken, die aus

Gründen der Gewichtseinsparung heutzutage aus einem CFK-Verbundmaterial gefertigt sind. Die Eintrittskante besteht im vorliegenden Fall aus TiAl6V4 und ist mit der gegebenen Geometrie konventionell nur schwer gieß- oder umformtechnisch herstellbar. Daraus ergibt sich die Motivation für einen laser-generativen Aufbau.

Das gezeigte Bauteil ist mit einem Festkörperlaser und einer Koaxial-Pulverdüse hergestellt worden. Zum Vermeiden unerwünschter Reaktionen des Titan-Pulvers mit der Umgebungsluft erfolgte der Bauprozess in einer mitlaufenden Schutzgasglocke. Die Höhe der Schaufel beträgt 650 mm und die Wandstärke 2,5 mm. Die model-to-part-Toleranz liegt ortsabhängig zwischen + 50 und + 150 μm . Mit der online-geregelten und vergleichsweise geringen Laserleistung von 800 W beträgt die Baurate hier 38 $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$.

- 1 Koaxial-Laser-Draht-Auftragschweißkopf für die generative Bearbeitung in Robotersystemen
- 2/3 Musterbauteile
z. B. Turbinenschaufel (2) aus Inconel 718 und Ansaugbogen (3) aus AlMg5 hergestellt
- 4 Mittels Laser-Pulver-Auftragschweißens generativ hergestellte metallische Eintrittskante aus TiAl6V4

KONTAKT

Prof. Steffen Nowotny

Telefon: +49 351 83391-3241

steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de



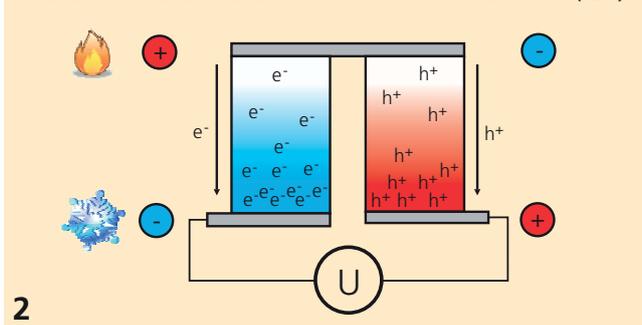
GEDRUCKTE THERMOELEKTRIK: MATERIALENTWICKLUNG FÜR FLEXIBLE THERMOELEKTRISCHE GENERATOREN

DIE AUFGABE

Die energieeffiziente Nutzung verfügbarer Ressourcen beinhaltet neben der Verbesserung von technischen Abläufen auch die Nutzung der in allen technischen Prozessen entstehenden Abwärme. Die hier verfügbare Wärmemenge stellt ein enormes Energiereservoir dar, welches in vielen Fällen ungenutzt bleibt. Mit Hilfe von thermoelektrischen Generatoren (TEG) kann anfallende Abwärme in elektrische Energie umgewandelt und dem Prozess wieder zugeführt werden. Dies erhöht die Energieeffizienz.

Ein klassischer TEG besteht aus zwei halbleitenden Materialien mit elektronenleitenden und lochleitenden Eigenschaften (n- und p-Leitung). In ihrer Kombination erzeugen diese Materialien im Falle eines anliegenden Temperaturgradienten eine elektrische Spannung (Seebeck-Effekt) zwischen der Warm- und Kaltseite (Abb. 2). Die erzeugte Seebeckspannung liegt im Bereich von einigen $\mu\text{V K}^{-1}$. Werden die halbleitenden Materialien jedoch elektrisch seriell verbundene Einzelspannungen auf.

Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Generators (TEG)



2

Zur großflächigen Nutzung von TEG werden neben effizienten und kostengünstigen Materialien auch massenfertigungstaugliche Herstellungsverfahren benötigt. Deshalb werden am Fraunhofer IWS Dresden thermoelektrische Materialien für Druckprozesse entwickelt und hinsichtlich ihrer thermoelektrischen Eigenschaften optimiert.

UNSERE LÖSUNG

Elektrisch leitfähige Polymere stellen aufgrund ihrer Eigenschaften eine interessante Materialklasse für die flexible Thermoelektrik dar. Das Verarbeiten dieser Polymere mit skalierbaren Druckverfahren ermöglicht eine massenfertigungstaugliche Technologie für den Bau von thermoelektrischen Generatoren.

Als Druckprozess wird der Dispenserdruck gewählt. Das maskenlose Verfahren ist sehr flexibel hinsichtlich Geometrie- und Parametervariationen und besitzt ein breites Verarbeitungs-fenster für vielfältige Pasten. Dabei wird die Paste aus einem Vorratsbehälter durch eine feine Kanüle gefördert und in einem rasternden Verfahren auf ein Substrat gedruckt.

Als ein aussichtsreiches intrinsisch leitfähiges Polymer für die Thermoelektrik wird PEDOT:PSS¹ gehandelt. Der Seebeckkoeffizient von PEDOT:PSS in seiner oxidierten Form beträgt etwa $16 \mu\text{V K}^{-1}$. Durch die Zugabe von 6 Gew. % Dimethylsulfoxid (DMSO) kann die elektrische Leitfähigkeit von 8 auf 84 S cm^{-1} erhöht werden ohne den Seebeck-Koeffizienten negativ zu beeinflussen.

1 (poly(3,4-ethylenedioxythiophen) poly(styrolsulfonate)

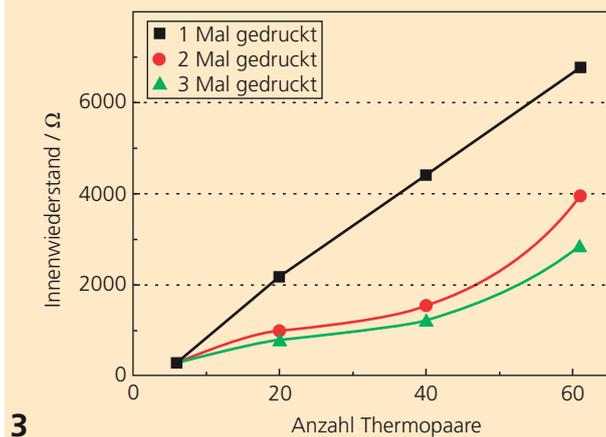


ERGEBNISSE

Als Substrat wird eine 75 μm dicke Polyimidfolie verwendet. Sie weist eine hohe Temperaturstabilität und gute Flexibilität auf. Die Verbindungsleiter werden mit einer Silberdruckpaste realisiert.

DMSO-modifiziertes PEDOT:PSS wird auf Bänder aus Polyimid mit einer Länge von z. B. 300 mm gedruckt. Dies entspricht 60 Paaren aus Silber und PEDOT:PSS. Die aufgedruckten Strukturen weisen eine Breite von 1 mm und eine Länge von 10 mm auf. Durch einen mehrlagigen Druck von PEDOT:PSS kann der Innenwiderstand des TEG deutlich verringert werden (Abb. 3).

Innenwiderstand eines gedruckten Polymer-TEG über der Anzahl an Thermopaaren (Silber-Polymer)

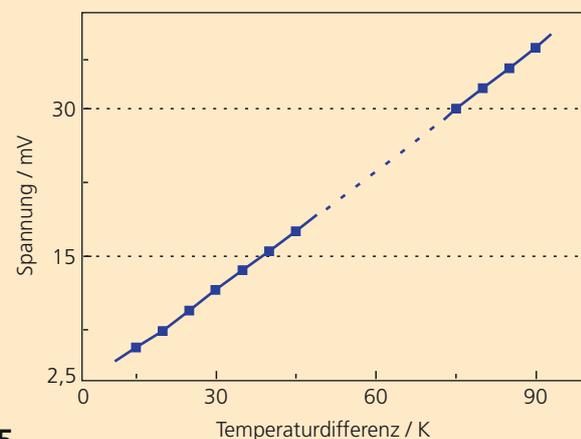


3

Nach dem Trocknen und Ausheizen wird das TEG-Band zur Charakterisierung auf einen Adapter aufgerollt (Abb. 4) und zwischen einer Wärmequelle und einer Wärmesenke platziert. Die Kaltseite wird konstant auf 20 $^{\circ}\text{C}$ gehalten und die Temperatur der Warmseite schrittweise erhöht. Mit steigender Temperatur nimmt die Leerlaufspannung des TEG linear zu.

Bei einer Temperaturdifferenz von 90 K kann eine Spannung von 37 mV erzeugt werden (Abb. 5).

Leerlaufspannung eines gedruckten TEG über der Temperaturdifferenz



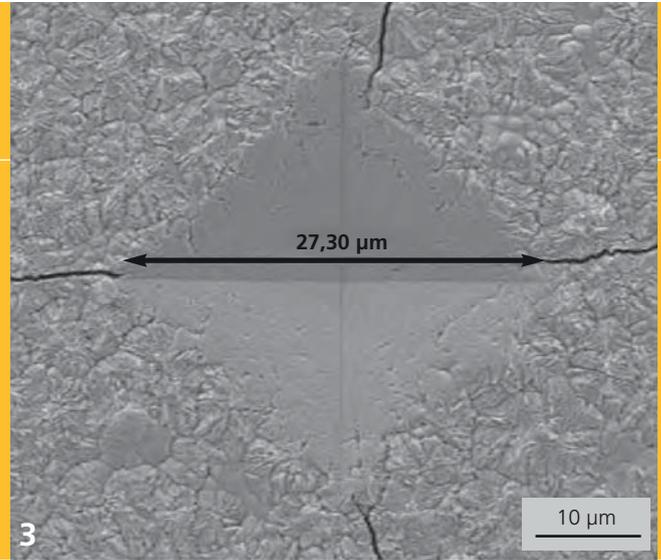
5

- 1 Gedrucktes TEG-Band aus PEDOT:PSS und Silber
- 4 Flexibles TEG-Band aufgewickelt auf einen Adapter

KONTAKT

M.Sc. Lukas Stepien
 Telefon: +49 351 83391-3092
 lukas.stepien@iws.fraunhofer.de





WERKSTOFFWISSENSCHAFTLICHE ANALYSE SELBSTHEILENDER SCHICHTEN

DIE AUFGABE

Als »selbstheilend« werden Werkstoffe dann verstanden, wenn sie in der Lage sind Fehler, wie z. B. Risse, teilweise oder vollständig in-situ oder durch einen externen Trigger auszuheilen, so dass die ursprüngliche Funktionalität wieder hergestellt wird [1]. Dabei ist es nicht zwingend erforderlich, dass sich nach der Heilung dieselbe Mikrostruktur einstellt, vielmehr liegt der Fokus auf der Reparatur des Schadens. Die Vorteile der Selbstheilung von Werkstoffen liegen auf der Hand; durch sie wird eine höhere Werkstoffzuverlässigkeit erreicht, die Lebensdauer von Bauteilen kann erheblich verlängert werden und im Fall von schwer zugänglichen Bauteilen macht sie die Reparatur der beschädigten Komponente überhaupt erst möglich.

Das DFG-Schwerpunktprogramm 1568 »Design and Generic Principles of Self-healing Materials« erforscht die der Selbstheilung zugrunde liegenden Mechanismen von Polymeren und deren Verbundwerkstoffen, Metallen und Keramiken. Innerhalb des Schwerpunktprogramms wird von der Professur für Werkstofftechnik der Technischen Universität Dresden in Kooperation mit dem Fraunhofer IWS und weiteren Partnern das Selbstheilungsvermögen von dünnen keramischen Schichten untersucht. Die Forschungsaufgabe besteht in der mechanismentorientierten Untersuchung der Wirkzusammenhänge zwischen der Schichtstruktur, dem »Heilungsprozess« und den resultierenden Eigenschaften der geheilten Schichten.

UNSERE LÖSUNG

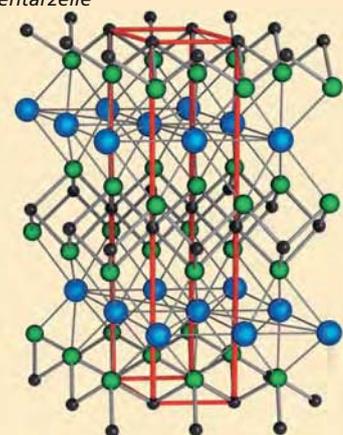
Untersucht wurden Nanolaminatschichten, die auch als MAX-Phasen bezeichnet werden. Sie stellen eine Klasse von Werkstoffen dar, die aufgrund ihres strukturellen Aufbaus ein

Eigenschaftsprofil besitzen, bei dem sowohl die Vorteile metallischer als auch keramischer Werkstoffe genutzt werden können. Dazu zählen eine hohe chemische Stabilität in korrosiver und oxidierender Umgebung, sehr gute Schadens-toleranz, Steifigkeit, Thermoschockbeständigkeit, gute elektrische und thermische Leitfähigkeit, gute Plastizität und gute maschinelle Bearbeitbarkeit.

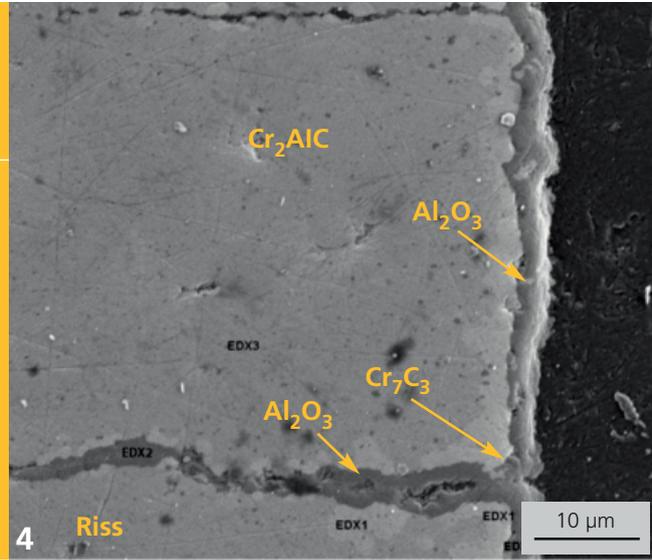
Die Verbindungen können mit der generellen Formel M_2AX beschrieben werden, wobei M ein Übergangsmetall, A ein Element aus der A-Gruppe und X entweder C oder N sind. M_2AX -Phasen besitzen eine hexagonale Struktur, wobei A-Metall-Schichten mit M_2X -Schichten alternieren, wie in Abbildung 1 dargestellt. Ein modellhafter Vertreter dieser MAX-Phasen ist das System Cr_2AlC , das sich in Form von dünnen Schichten, z.B. mittels einer speziellen Form des Magnetron-Sputterns, dem sogenannten »high power impulse magnetron sputtering (HIPIMS)« herstellen lässt [2]. Während des Herstellungsprozesses findet ein Selbstorganisationsprozess statt, in dessen Folge ein Nano-Verbundwerkstoff entsteht.

Modell der Cr_2AlC -Elementarzelle

grün:
Chrom
blau:
Aluminium
schwarz:
Kohlenstoff

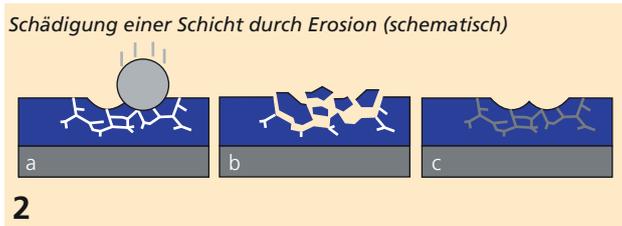


1



ERGEBNISSE

Risse in Schichten können beim Betrieb eines Bauteils durch mechanische Beanspruchung oder Überbeanspruchung der Oberfläche entstehen, z. B. bei Erosion (Abb. 2 a). Fortschreitende Erosion führt zur Ausbildung eines Rissnetzwerkes, in dessen Folge die Schichten abplatzen (Abb. 2 b). Durch Verschließen der Risse kann der Verlust der Schichten vermieden werden (Abb. 2 c).



Zur Herstellung definierter Rissgeometrien wurden mit Hilfe eines Vickers-Indenters Risse in die Cr_2AlC -Schichten eingebracht (Abb. 3). In einem nachfolgenden Heilungsprozess wurden diese dann wieder verschlossen. Dazu wurden die Schichten im Temperaturbereich zwischen 700 und 1200 °C für unterschiedlich lange Zeiträume wärmebehandelt. Durch Reaktion der Rissflanken mit dem Luftsauerstoff bildet sich Aluminiumoxid. Wenn die richtigen Prozessparameter gewählt werden, ist es in der Lage, das gesamte Rissvolumen zu schließen (Abb. 4).

Die Geschwindigkeit der Rissheilung sowie die mechanische Güte der »Narbe« (des Aluminiumoxids) können durch die Zugabe von geringen Mengen Yttrium zu den Cr_2AlC -Schichten gesteuert werden [2]. Yttrium ist in der Lage, die Haftfestigkeit und die Wachstumsgeschwindigkeit des Aluminiumoxids positiv zu beeinflussen. Darüber hinaus unterstützt es die Bildung des thermodynamisch stabilen $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, das unter den möglichen Aluminiumoxidmodifikationen die beste Schutzwirkung bei hohen Temperaturen aufweist.

Untersuchungen der Projektpartner an gesintertem »Bulk«- Cr_2AlC zeigen, dass durch Riss-schließung mit Aluminiumoxid als Oxidationsprodukt die mechanischen Eigenschaften von Cr_2AlC vollständig wiederhergestellt werden könnten. Der Nachweis hierfür ist bei dünnen Schichten deutlich aufwändiger und Gegenstand laufender Untersuchungen.

Die Erforschung der Selbstheilungsmechanismen von Werkstoffen ist Gegenstand des seit 2011 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms 1568 »Design and Generic Principles of Self-healing Materials«. Das Forschungsvorhaben ist ein gutes Beispiel dafür, wie im Rahmen des »DRESDEN-concept« Grundlagenforschung an der TU Dresden mit anwendungsorientierter Weiterentwicklung am Fraunhofer IWS verbunden werden kann.

- 3 Makroskopische Risse in einer Cr_2AlC -Schicht, eingebracht durch einen Vickers-Indenter
- 4 REM-Aufnahme eines durch Aluminiumoxid geschlossenen Risses

- [1] M. D. Hager, P. Greil, C. Leyens, S. van der Zwaag, U. S. Schubert: *Self-Healing Materials*, *Advanced Materials* 22 (2010) 5424–5430
- [2] O. Berger, C. Leyens, S. Heinze, M. to Baben, J. M. Schneider, *Self-healing of yttrium-doped Cr_2AlC MAX phase coatings deposited by HIPIMS*, *Proc. 4th Int. Conference on Self-healing Materials (ICSHM 2013)*, Ghent, Belgium, 2013, p. 319-323

KONTAKT

Prof. Christoph Leyens
 Telefon: +49 351 83391-3242
christoph.leyens@iws.fraunhofer.de





STEIGERUNG DER HAFTREIBUNG DURCH THERMISCH GESPRITZTE HARTMETALLSCHICHTEN

DIE AUFGABE

Thermisch gespritzte Hartmetallschichten werden vorwiegend für den Schutz gegenüber verschiedenen Verschleißformen wie Abrasion, Erosion und Reib-/Gleitverschleiß angewendet. Beim Einsatz unter geschmierten und ungeschmierten (inkl. Hochtemperatur bis rund 900 °C) Reib/Gleitverschleißbedingungen sind die Reibwertminimierung und Verschleißreduzierung die wichtigsten Ziele.

Dagegen sind Anwendungen zur Steigerung des Haftreibungswertes weitestgehend unbekannt. Bis jetzt gibt es einzelne Anwendungen wie der Einsatz in Windkraftanlagen als reibschlüssige Verbindung zwischen Rotorwelle und Getriebeeingangsseite. Dabei werden beidseitig beschichtete Reibscheibensegmente in die Verbindung eingebracht und mittels Schrauben verspannt. Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen ist es, die Haftreibungswerte thermisch gespritzter Hartmetallschichten gegenüber dem Stand der Technik weiter zu erhöhen und insbesondere die Streuung der Reibwerte zu verringern.

Ein weiteres Anliegen der Arbeiten ist es, die werkstoffwissenschaftlichen Mechanismen, die zur Erhöhung von Reibwerten führen, zu verstehen, um so z.B. für die industrielle Praxis günstige und zuverlässige Beschichtungslösungen anbieten zu können.

UNSERE LÖSUNG

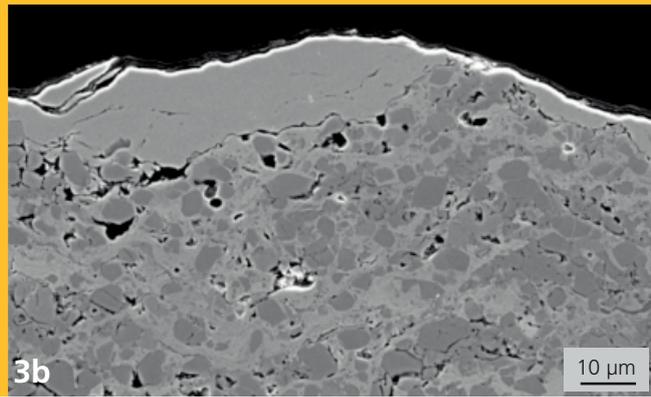
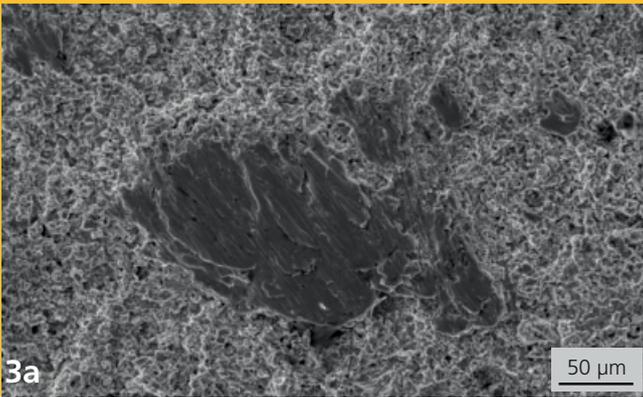
Für die ersten Versuchsreihen wurden $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ und $(\text{Ti,Mo})(\text{C,N})$ -Ni-Schichten ausgewählt. Beide Zusammensetzungen weisen ungefähr gleiche Volumenanteile an Hartstoffen und

Bindemetallen auf. Während für $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ -Schichten in früheren Untersuchungen zum ungeschmierten Reib/Gleitverschleiß hohe Gleitreibwerte in Paarungen mit Gegenkörpern aus gesintertem Aluminiumoxid bzw. artgleichen Gegenkörpern ermittelt wurden, zeichneten sich $(\text{Ti,Mo})(\text{C,N})$ -Ni-Schichten durch relativ niedrige Gleitreibwerte aus.

Die Schichten wurden mit einem flüssigbrennstoffbetriebenen HVOF-Verfahren aus einem kommerziellen $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ -Beschichtungspulver und einem experimentellen $(\text{Ti,Mo})(\text{C,N})$ -Ni-Beschichtungspulver hergestellt. Die in Abb. 1 im Zustand nach dem Test gezeigten speziellen Testsubstrate bestanden aus blindgehärtetem 42CrMo4. Die effektive ringförmige Kontaktfläche auf der oberen Stirnkante der Proben hatte einen inneren Durchmesser von $D_1 = 15 \text{ mm}$ und einen äußeren Durchmesser von $D_A = 30 \text{ mm}$.

Die Schichten wurden mit optimierten Parametern mit einer Dicke von 300 μm gespritzt und ohne Nachbearbeitung untersucht. Die Oberflächenrauheiten betragen $R_a = 5,5 \mu\text{m}$ und $R_z = 31,1 \mu\text{m}$ für die $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ -Schichten bzw. $R_a = 4,0 \mu\text{m}$ und $R_z = 22,3 \mu\text{m}$ für die $(\text{Ti,Mo})(\text{C,N})$ -Ni-Schichten.

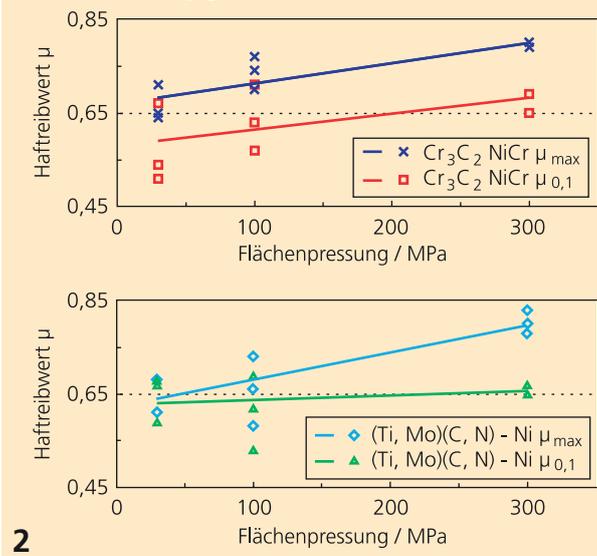
Nach der Charakterisierung aller geometrischen Eigenschaften, wie Form, Welligkeit und Rauheit mit einer 3D-Bewertungsmethode wurden Reibwertversuche an einem speziellen Haftreibungsprüfstand der TU Chemnitz durchgeführt. Die Prüfung erfolgte bei nominellen Flächenpressungen von 30, 100 und 300 MPa.



ERGEBNISSE

Abbildung 2 zeigt die aus den Rutschkurven berechneten Haftreibungswerte $\mu_{0,1}$ und μ_{max} in Abhängigkeit von der Flächenpressung. Dabei ist $\mu_{0,1}$ der Haftreibungswert bei einem relativen Verdrehwinkel von $0,1^\circ$, während μ_{max} aus dem maximalen Torsionsmoment der Rutschkurve mit versuchsabhängigem relativem Verdrehwinkel berechnet wird.

Abhängigkeit der Haftreibungswerte $\mu_{0,1}$ und μ_{max} von der Flächenpressung für die Cr_3C_2 -NiCr-Schicht und (Ti,Mo)(C,N)-Ni-Schicht



Beide Haftreibungswerte sind bei 300 MPa Flächenpressung am höchsten, gleichzeitig nimmt die Streuung mit steigender Flächenpressung erheblich ab. Trotz Unterschiede in der Form der Rutschkurven sind die Haftreibungswerte der Cr_3C_2 -NiCr-Schicht und der (Ti,Mo)(C,N)-Ni-Schicht vergleichbar.

In Abbildung 3a ist eine REM-Aufnahme der spritzrauen Cr_3C_2 -NiCr-Schichtoberfläche nach den Reibwertversuchen bei 100 MPa dargestellt. Der dunkle Bereich im Zentrum ist Materialübertrag von der Gegenkörperoberfläche. Abbildung 3b zeigt den Materialübertrag bei 300 MPa im Querschliff.

Mit steigender Flächenpressung konnte ein zunehmender Materialübertrag von der Gegenkörperoberfläche auf die beschichtete Oberfläche beobachtet werden. Sowohl die Anzahl als auch die Größe der Kontaktstellen, an denen Materialübertrag stattgefunden hat, nimmt mit steigender Flächenpressung zu. Dieses Verhalten ist charakteristisch für beide Schichtzusammensetzungen.

Es wurde keine Beschädigung der Schicht selbst festgestellt. Das Erscheinungsbild der nicht mit Material des Gegenkörpers bedeckten Schichtoberfläche entspricht der Schicht im gespritzten Zustand. Dies ist auch Zeugnis für die überaus hohe Haftung HVOF-gespritzter Hartmetallschichten.

Die hier vorgestellten Arbeiten erfolgten im Rahmen des AiF/DFG-Forschungsclusters (FKZ 13N10063) in Kooperation mit dem Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik und dem Institut für Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung der TU Chemnitz.

- 1 Probekörper mit (Ti,Mo)(C,N)-Ni-(links) und Cr_3C_2 -NiCr-Hartmetallschicht (rechts) nach den Reibwertversuchen
- 3 Cr_3C_2 -NiCr-Schichtoberfläche nach dem Reibwertversuch bei 100 MPa Flächenpressung
a) Schichtoberfläche
b) Querschliff

KONTAKT

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





SPRAYPYROLYSE VON ALUMINIUMOXID ZUR ABSCHIEDUNG VON PASSIVIERUNGSSCHICHTEN AUF WAFERMATERIALIEN

DIE AUFGABE

Für kostengünstige dünne Solarwafer werden alternative Konzepte zur Rückseitenpassivierung der Zellen gesucht. Eine Dünnschichtpassivierung mit Aluminiumoxid hat gegenüber einer konventionellen Passivierung mit einer Siebdruck-Aluminiumpaste den Vorteil, dass sich auch dünnere Zellen bei nachfolgenden Feuerungsschritten in der Zellfertigung nicht verbiegen. Durch einen hohen Anteil an negativen Ladungen in Aluminiumoxidschichten eignet sich das Material besonders für die Feldeffektpassivierung von p-dotierten Siliziumoberflächen.

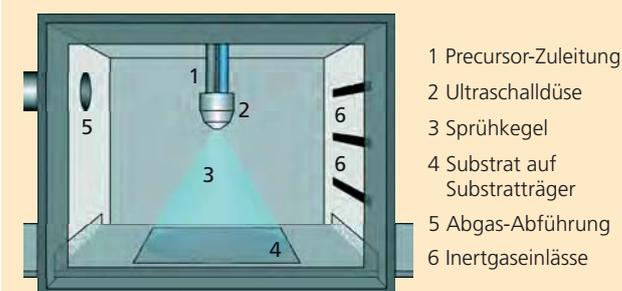
Übliche Verfahren, um qualitativ hochwertiges Aluminiumoxid auf Silizium aufzubringen, sind die Atomlagenabscheidung (ALD) und die plasmagestützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD). Zum Aufbringen von Aluminiumoxidschichten im Nanometerbereich ist ein alternatives Atmosphärendruck-Verfahren zu entwickeln. Im Vordergrund stehen dabei der Einsatz von sicheren, leicht anwendbaren und kostengünstigen Precursoren zur Schichtabscheidung, der Verzicht auf Vakuumkammern, die Skalierbarkeit und die In-line-Fähigkeit des Prozesses. Hohe Abscheideraten sind essentiell, um einen Waferdurchsatz von 3600 Wafer pro Stunde zu erzielen.

UNSERE LÖSUNG

Zur Abscheidung von Aluminiumoxidschichten wird im Fraunhofer IWS Dresden ein Ultraschall-Spraypyrolyse-Verfahren entwickelt. Der Sprühprozess arbeitet bei Atmosphärendruck in Luft oder Stickstoffatmosphäre. Eine

Ultraschalldüse (Frequenz 120 kHz, Durchflussrate 1 ml min⁻¹) vernebelt die Precursorlösung. Das entstehende Aerosol wird durch eine Stickstoffströmung zu einem Hohlkegel geformt und in Richtung des geheizten Substrats gelenkt. Kurz vor dem Substrat geht das Aerosol in die gasförmige Phase über; auf dem Substrat bildet sich durch Gasphasenabscheidung die Aluminiumoxidschicht. Ein Thermoelement bestimmt die Temperatur im beheizten Graphithalter. Die Ultraschalldüse wird mit Hilfe eines 2-Achs-Linearmotorsystems bewegt, um ein homogenes Sprühmuster zu erhalten.

Schema der Beschichtungskammer



2

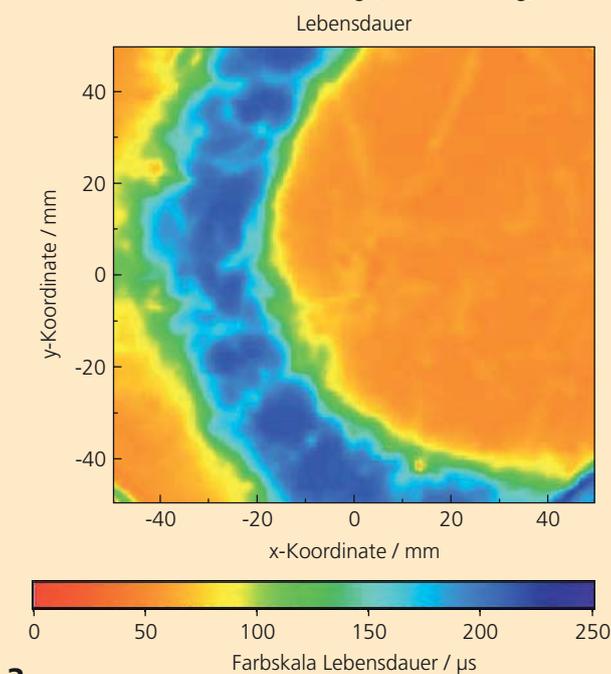
ERGEBNISSE

Getestet wurde eine Precursorlösung bestehend aus Aluminiumacetylacetonat mit Methanol, Diethylglycolmonobutylether und 3 oder 33 % Wasser. Die Schichtabscheidung erfolgte auf 156 mm · 156 mm großen Substraten mit Referenzschichten aus mittels ALD hergestelltem Aluminiumoxid auf der Rückseite.

Zur Evaluierung der Schichtqualität wurden Mikrowellen-detektierte Photoleitfähigkeitsmessungen (MDP) durchgeführt. Diese bestimmen orts aufgelöst die effektive Ladungsträgerlebensdauer (LTLD) in passivierten Cz-Siliziumwafern (p-dotiert, $1 - 5 \Omega \text{ cm}$, Dicke $525 \mu\text{m}$).

Auf Wafern mit gesprühtem Aluminiumoxid auf der Vorderseite wurden effektive Ladungsträgerlebensdauern bis zu $260 \mu\text{s}$ gemessen (Abb. 3). Daraus resultiert eine effektive Oberflächen-Rekombinationsgeschwindigkeit von 113 cm s^{-1} . Diese wird von der gesprühenden Aluminiumoxidschicht bestimmt. Da die Substrattemperatur bei der Abscheidung der Schichten bereits $340 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt, ist eine thermische Nachbehandlung der gesprühenden Schicht zur Aktivierung der Aluminiumoxidschichten nicht notwendig.

Topogramm der Minoritätsladungsträgerlebensdauer für eine statische Aluminiumoxid-Beschichtung (blauer Kreisring)



Die für die Passivierung optimale Dicke der Aluminiumoxidschicht beträgt ca. $15 - 20 \text{ nm}$. Die Schichtabscheiderate beim Einsatz dieser Precursorlösung liegt mit $16,6 \text{ nm min}^{-1}$ im Bereich der mit PECVD-Verfahren erzielbaren Abscheiderate. Während der Abscheidung werden keine Partikel in die Schicht eingebaut. Die mittlere Rauheit der Schichten beträgt $0,55$ bis $0,59 \text{ nm}$.

Durch die Erhöhung des Wassergehaltes in der Precursorlösung von 3% auf 33% konnte die Passivierungswirkung der mit Sprühpyrolyse aufgetragenen Aluminiumoxidschichten gesteigert werden. Ein hoher Wasseranteil in der Sprühlösung bewirkt danach eine bessere Defektab sättigung durch Wasserstoff an der Grenzfläche $\text{AlO}_x/\text{SiO}_2$ (chemische Passivierung).

Mit dem Verfahren der Spraypyrolyse ist auch die Abscheidung anderer Schichtsysteme wie z.B. transparente leitfähige Schichten (TCO) denkbar.

Die hier vorgestellten Arbeiten erfolgten im Rahmen des Projektes S-PAC - Sächsisches Photovoltaik-Automatisierungscluster - Chemnitz/Dresden (FKZ 03WKBW03C), welches Bestandteil der BMBF-Initiative »Innovative regionale Wachstumskerne« ist.

1 Ultraschalldüse mit Kühlkörper

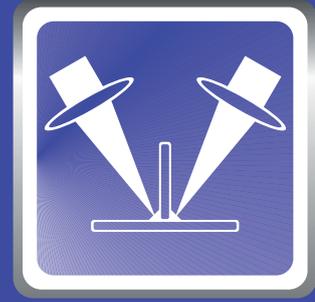
KONTAKT

Dipl.-Ing. Dorit Linaschke
 Telefon: +49 351 83391-3295
 dorit.linaschke@iws.fraunhofer.de



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. BERNDT BRENNER





»Zukunft ist, was wir daraus machen«
Lebensweisheit 2013

GESCHÄFTSFELD FÜGEN

Redaktion: Herr Prof. Brenner, im vergangenen Jahr gründeten Sie eine neue Arbeitsgruppe »Bauteilauslegung«. Welche Erwartungen verbinden Sie damit?

Prof. Brenner: Wir sehen darin einen wichtigen Baustein zur strategischen Weiterentwicklung des Geschäftsfeldes »Fügen«, der aber auch auf das Kompetenzfeld »Werkstoffcharakterisierung« und das Geschäftsfeld »Randschichttechnik« ausstrahlen soll. Bildlich gesprochen wollen wir damit mehrere Fliegen mit einer Klappe schlagen.

So erfordern zum Beispiel die steigenden und komplexer werdenden Anforderungen an die Energie- und Ressourceneffizienz sowie zukünftige Konzepte zur Mobilität eine viel stärkere Zuwendung zu Lösungsansätzen für den integrativen Leichtbau im Werkstoffmix. Gestützt auf unsere langjährigen Erfahrungen bei der Entwicklung von neuen Fügeverfahren für schwer schweißbare Werkstoffe und Mischverbindungen einerseits und zur Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung andererseits bestehen beste Voraussetzungen, die Forschungs- und Entwicklungskette durch den zielgerichteten Ausbau eines Kompetenzfeldes zur werkstoff-, verfahrens- und beanspruchungsgerechten Bauteilauslegung durchgängig zu gestalten.

Wir sind sehr erfreut darüber, dass diese Kompetenzerweiterung von unseren industriellen Kunden sehr gut angenommen wird. Ein Beispiel dafür besteht in der Entwicklung eines neuartigen Stoßbügels für den Schienenfahrzeugbau. Mittels einer laserschweißgerecht ausgeführten Leichtbaukonstruktion aus Stahlblechen, einer innovativen Füge-technologie basierend auf Steg-Schlitz-Bauweise und einer rechnergestützten Auslegungsoptimierung gelingt es, die Fertigungskosten bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion um mehr als die Hälfte zu senken (siehe Seite 74 / 75).

Redaktion: Haben Sie auch die Auslegung von CFK-Strukturen im Auge, die sich derzeit anschicken, auch in der Automobilindustrie zu völlig neuen Bauweisen zu führen?

Prof. Brenner: Ja, auf jeden Fall. Auch dieses Feld, auf das sich gegenwärtig die Entwicklungsziele vieler Akteure aus mehreren Branchen richten, haben wir uns vorgenommen. In einem ersten Schritt möchten wir auf einem aus unserer Sicht bisher nicht ausreichend bestellten Feld, nämlich der Entwicklung von weitgehend automatisierbaren Fertigungstechnologien für CFK/Metall-Hybridverbindungen für höchste Belastungen tätig werden. Gerade solche Entwicklungsziele sind ohne die numerische Berechnung der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaftsprofile sowie der daraus folgenden Anforderungen an die Füge-technologie, die Fügestellengestaltung und die Fügezonengeometrie nicht erreichbar. Als erste Entwicklungsaufgabe wird eine spezielle hochbelastete Welle-Nabe-Verbindung für den automobilen Leichtbau ausgelegt, die mit einer neuartigen Füge-technologie gefertigt werden soll.

Redaktion: Wie geht es weiter mit dem Laser-Mehrlagen-Engstspaltschweißen?

Prof. Brenner: Hier konnten wir eine wesentliche Entwicklungsetappe erreichen. Es gelang, 30 mm dicke Platten aus einer heißbrissanfälligen Aluminiumlegierung mit einem 4 kW-Laser heißbrissfrei vollflächig zu verbinden. Mit dem fehlerfreien Schweißen dicker Platten aus heißbrissanfälligen Legierungen konnte ein Feld erschlossen werden, das selbst dem Elektronenstrahl bisher verschlossen geblieben ist. Unsere zukünftigen Entwicklungsanstrengungen gelten der Steigerung der Prozesseffizienz, den nötigen systemtechnischen Entwicklungen und der Entwicklung von Schweißtechnologien für plattierte Werkstoffe und Großkomponenten.



KOMPETENZEN

SCHWEISSEN SCHWER SCHWEISSBARER WERKSTOFFE

Das Laserstrahlschweißen hat einen breitgefächerten industriellen Einsatz insbesondere in der Massenfertigung gefunden. Laserstrahlschweißverfahren mit integrierter Kurzzeitwärmebehandlung, mit werkstoffangepassten Zusatzwerkstoffen sowie hochfrequenter Strahlmanipulation ermöglichen einen neuen Zugang zur Herstellung rissfreier Schweißverbindungen aus härtbaren und hochfesten Stählen, Gusseisen, Al- und Sonderlegierungen, heißanfälligigen Legierungen sowie Bauteilen mit hoher Steifigkeit. Auf der Basis eines umfangreichen metallphysikalischen und anlagentechnischen Hintergrundwissens bietet die Arbeitsgruppe die Entwicklung von Schweißtechnologien, Prototypschweißungen, Verfahrens- und Anlagenoptimierung sowie die Ausarbeitung von Schweißanweisungen an.

OBERFLÄCHENVORBEHANDLUNG UND KONSTRUKTIVES KLEBEN

Um eine gute Benetzung und eine hohe Klebfestigkeit zu erreichen, werden die Fügeiteiloberflächen vor dem Kleben häufig mittels Plasma- und Lasertechniken vorbehandelt. Die Charakterisierung der Oberflächen sowie der geklebten Verbunde erfolgt mittels Kontaktwinkel-, Rauheits- und Schichtdickenmessungen, Lichtmikroskopie, REM / EDX und spektroskopischer Methoden. Durch die Integration von Carbon-Nanotubes in Klebstoffe können die Klebfestigkeiten erhöht oder / und elektrisch leitfähige Verbunde hergestellt werden. Die Arbeitsgruppe bietet Fügeflächenbehandlung und Oberflächencharakterisierung, konstruktives Kleben verschiedenster Materialien, die Bestimmung der Klebfestigkeit und Alterungsuntersuchungen sowie Beratungsleistungen in allen klebtechnischen Fragestellungen an.

SONDERFÜGEVERFAHREN

Häufig lassen sich moderne Funktionswerkstoffe nur noch eingeschränkt mit Standardschmelzschweißverfahren fügen, bei Metallen betrifft dies beispielweise viele hochfeste Aluminiumlegierungen. Wird eine Verbindung verschiedener Metalle gewünscht, etwa Aluminium und Kupfer, verschärft sich das Problem durch die aus der Schmelze entstehenden stark festigkeitsmindernden, intermetallischen Phasen noch. In der Arbeitsgruppe werden daher gezielt Fügeverfahren weiterentwickelt, die eine Schmelze und damit verbundene Probleme vermeiden. Primärer Fokus liegt auf den Verfahren Rührreibschweißen, Laserstrahllöten, Laserinduktionswalzfügen sowie dem elektromagnetischen Pulsfügen, für die Prozessentwicklungen, Prototypschweißungen und systemtechnische Weiterentwicklungen angeboten werden.

BAUTEIL AUSLEGUNG

Erhöhte Bauteilanforderungen, innovative Werkstoffe bzw. Werkstoffkombinationen sowie neuartige Fertigungsverfahren erfordern in der Regel auch neue konstruktive Ansätze. Für eine erfolgreiche Umsetzung der am Fraunhofer IWS entwickelten Verfahren, insbesondere der verschiedenen Füge- und Wärmebehandlungstechnologien, bietet die Arbeitsgruppe deshalb strukturmechanische FE-Simulationen, thermisch-mechanisch gekoppelte Berechnungen sowie deren experimentelle Verifizierung an. Zielstellung ist dabei eine prozessgerechte und belastungsangepasste Bauteilgestaltung entsprechend der Vorgaben des Kunden. Die Lösungen entstehen in enger Zusammenarbeit mit der Verfahrensentwicklung und der Werkstoffcharakterisierung in unserem Hause.



GRUPPENLEITER SCHWEISSEN

DR. JENS STANDFUSS

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



ABTEILUNGSLEITER

PROF. BERNDT BRENNER

Telefon +49 351 83391-3207
berndt.brenner@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



GRUPPENLEITER

BAUTEIL AUSLEGUNG

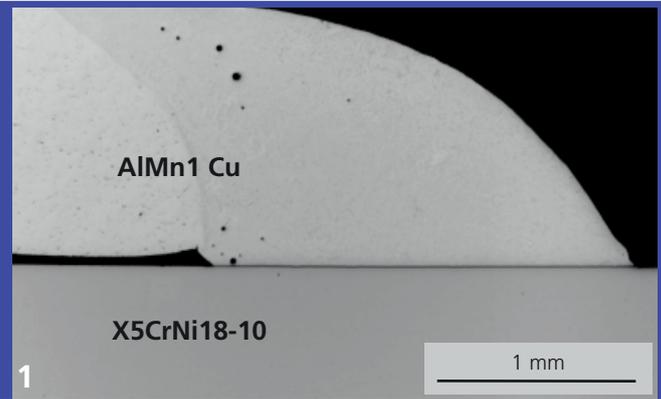
DR. AXEL JAHN

Telefon +49 351 83391-3237
axel.jahn@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2013

1. Neue Ansätze zur Weiterentwicklung des Laserstrahl­löten	72
2. Belastungs- und lasergerechte Gestaltung eines Crashbauteils für den Schienenfahrzeugbau	74
3. Laserstrahlgeschweißte Rumpfstrukturen aus hochfesten Aluminium-Lithium-Legierungen	76
4. Laserstrahlschweißen hochbelasteter Bauteile aus schwarzem Temperguss	78
5. Automatisiertes Laserstrahlschweißen von Rohr-Rohrboden-Verbindungen	80
6. Prozessbegleitende Gefügeanalyse von Al-Cu-Fügeverbindungen für die Elektromobilität	82
7. Vakuum-Saugstrahlen als effektive Methode zur Kleb­flächen­vor­be­handlung	84



NEUE ANSÄTZE ZUR WEITERENTWICKLUNG DES LASERSTRAHLLÖTENS

DIE AUFGABE

Fügen von Blechen mit hoher Naht-Oberflächenqualität ist ein wichtiges Thema für eine große Zahl von Industriezweigen. Entsprechend viele Technologien sind verfügbar, um diese Aufgabe effizient zu lösen. Viele dieser Ansätze sind jedoch unzureichend, wenn Mischverbindungen artungleicher Metalle hergestellt werden sollen und / oder wenn sehr hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität bestehen.

Das Laserstrahllöten stellt einen der wenigen bekannten Ansätze für diese Herausforderungen dar. Es ist z. B. im Karosseriebau an artgleichen Metallen im Sichtbereich etabliert. Mit bestehenden Lötssystemen stößt die Weiterentwicklung der Technologie in Richtung Lötgeschwindigkeit und Robustheit jedoch bereits an ihre Grenzen, insbesondere dann, wenn zusätzlich Mischverbindungen gefordert werden. Daher besteht die Notwendigkeit, aktuelle Entwicklungen der Laserbearbeitung zu nutzen, um hier neue Möglichkeiten zum linienförmigen Fügen von Blechen mit beliebigen Konturen aufzuzeigen.

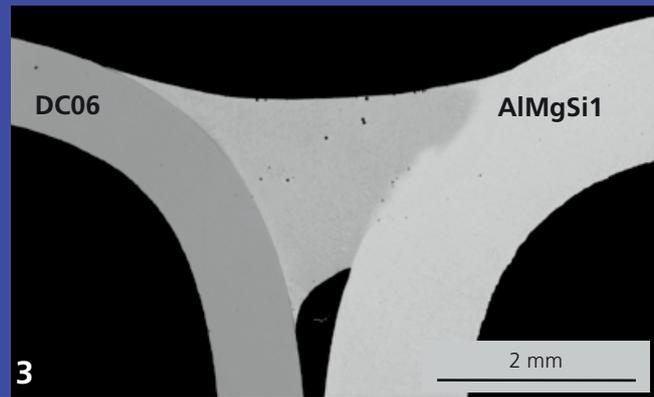
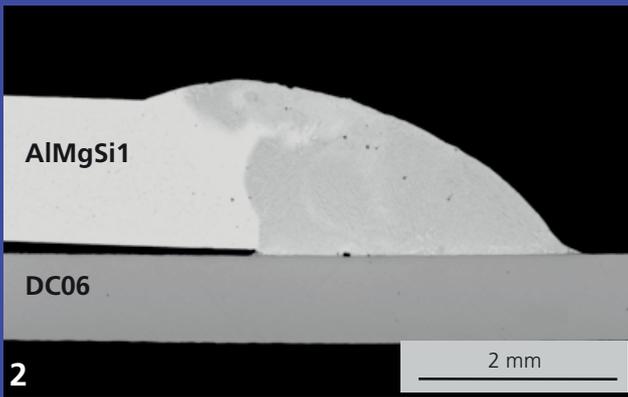
UNSERE LÖSUNG

Im Unterschied zu klassischen Lötverfahren, wie etwa Flamm- oder Induktionslötens, werden beim Laserstrahllöten nicht primär die Fügepartner durchgewärmt, zwischen die dann ein Lot mithilfe eines Kapillarspalts eindringt. Stattdessen wird primär das Lot erwärmt und die Oberfläche der Fügepartner über den Laserstrahl aktiviert. Typische Geometrien für diese Technologie sind Blech-Überlappstöße oder Bördelnähte.

Der normalerweise nutzbare Kapillareffekt beim klassischen Lötens ist damit nur untergeordnet wirksam, eine Lotbenetzung wird an den direkt bestrahlten aktivierten Partneroberflächen erreicht. Wo und wie viel Energie den Bauteilen zugeführt wird, ist folglich ein entscheidender Faktor für die Benetzungsvorgänge.

Insbesondere bei Mischverbindungen, wo mindestens zwei unterschiedliche Ausgangsmaterialien und der Zusatzwerkstoff vorliegen, ist von einem sehr differenzierten lokalen Energiebedarf auszugehen. Daraus ergibt sich, dass Form und Energieverteilung des Laserstrahls eine zentrale Rolle für den Prozess und die Nahtqualität spielen. Ein runder Strahl mit Standard-Energieverteilung der Laserquelle, wie sie in den meisten herkömmlichen Laserlötensystemen zum Einsatz kommt, führt in den wenigsten Fällen bereits zu einem optimalen Nahtergebnis. Daher entwickelt und testet das Fraunhofer IWS Dresden Eigenentwicklungen zur Strahlableitung, -formung und Regelung. Die Systeme, die vor allem beim Laserstrahlhärten weit verbreitet im Industrieinsatz sind, wurden für den Lötprozess angepasst.

Zusätzlich werden Analysemöglichkeiten wie etwa Hochgeschwindigkeits-Thermographie und Hochgeschwindigkeits-Videographie eingesetzt. Ziel ist es, den teilweise hochdynamischen Schmelzfluss des Lotes mit Nahtausbildungen und -störungen zu korrelieren, um Gegenmaßnahmen gezielt ableiten zu können. Diese Methodik ist auch zur Verbesserung des Lötbildes bei gleichartigen Verbindungen wie Stahl / Stahl sinnvoll, insbesondere jedoch bei Mischverbindungen aufgrund des komplexeren Schmelzverhaltens.



ERGEBNISSE

Eine Vielzahl von Mischverbindungen wurde bisher untersucht und mittels Laserstrahllöten hergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Anpassung der Strahlfleckgeometrie und der Energieverteilung im Spot oft eine Verbesserung der Lötnahtqualität erreichbar ist. Konkret wirkte sich in der Regel eine Verlängerung des Strahlflecks in Vorschubrichtung positiv aus, wobei die Energiedichteverteilung zwischen vor- und nachlaufenden Bereichen je nach Drahtdicke und -art angepasst werden muss. Häufige Anwendungsfelder waren unter anderem Aluminium-Stahl Mischverbindungen (siehe Abb. 1 - 3).

Die als kritisch bekannten intermetallischen Phasen können dabei auch mit optimierten Parametern nicht vollständig vermieden werden, da die löttypische Diffusion der Metalle auch beim Laserstrahllöten präsent ist. Vordergründiges Ziel

der Optimierung ist daher immer eine Reduzierung auf un-kritische Dicken, in der Regel Werte kleiner fünf Mikrometer. Dies lässt sich durch Einsatz des flexiblen Strahlwerkzeugs deutlich einfacher erreichen.

Beispielsweise können die zur Oberflächenaktivierung nötigen Energiedichten im vorderen Strahlfleckbereich gezielt konstant gehalten werden, während die Aufschmelzenergie für den Lötendraht je nach Geschwindigkeit angepasst wird. Änderungen im Aufschmelz- und Benetzungsverhalten werden wiederum durch die Analysesysteme direkt sichtbar, Abb. 4.

Durch die Kombination der Analysemethoden mit der Einstellung von Strahlfleckgeometrie und Energieverteilung im Strahlfleck wurde eine sehr flexible und effektive Methode geschaffen, Verfahrensentwicklungen für Lötprozesse durchzuführen und eine signifikant verbesserte Qualität der Nähte zu erzielen.

Einzelbild Highspeed-Prozessanalyse, deutlich erkennbar sind Abschmelzverhalten, Benetzung und Oxidierung



1-3 Beispiele gelöteter Mischverbindungen

KONTAKT

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





BELASTUNGS- UND FERTIGUNGSGERECHTE GESTALTUNG EINES CRASHBAUTEILS FÜR DEN SCHIENENFAHRZEUGBAU

DIE AUFGABE

Moderne Schienenfahrzeuge müssen sich hauptsächlich durch eine gute Herstellbarkeit, einen wirtschaftlichen Betrieb sowie eine hohe Sicherheit und Funktionalität auszeichnen. Im Rahmen der Neuentwicklung einer Straßenbahn in Leichtbauweise wurde am Fraunhofer IWS Dresden deshalb ein neues fertigungs- und belastungsgerechtes Design für einen Stoßbügel erarbeitet. Dieses Bauteil soll im Crashfall die Stoßenergie bei vorgegebener maximaler plastischer Deformation aufnehmen und in die dahinter liegenden Crashabsorber weiterleiten. Darüber hinaus muss beim Bahn-Bahn-Crash auch ein »Aufklettern« der Wagen übereinander sicher vermieden werden.

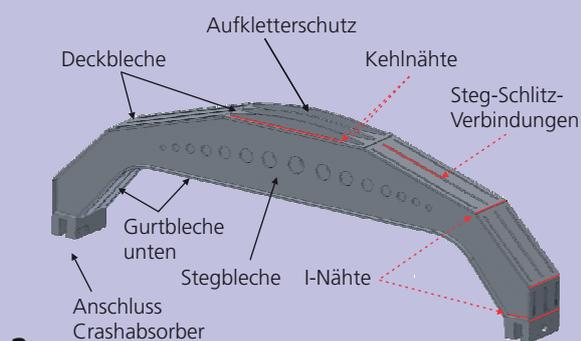
Für die Neuentwicklung wurden folgende Ziele definiert:

- Reduzierung der Fertigungsaufwendungen
- Reduzierung der Materialkosten
- keine Erhöhung der Bauteilmasse
- Garantie der Crashbelastbarkeit
- Gewährleistung des Aufkletterschutzes

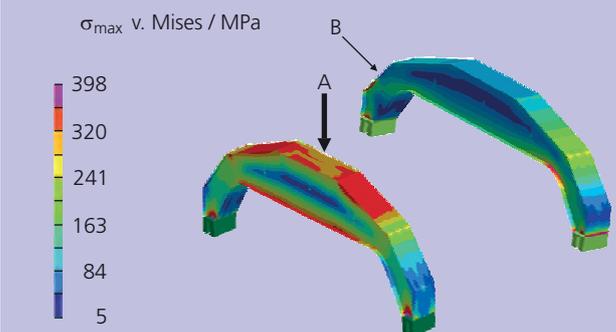
UNSERE LÖSUNG

Das im Fraunhofer IWS Dresden entwickelte Design basiert auf einer lasergeschweißten Stahlblechkonstruktion in Steg-Schlitz-Bauweise unter Verwendung des Feinkornstahls S355N mit Blechdicken zwischen 4 und 8 mm (Abb. 2). Dabei sind in den Deckblechen sowie in den unteren Gurtblechen Schlitzte vorgesehen, in welche die drei Stegbleche beim Zusammenbau eingesteckt und anschließend von außen verschweißt werden. Im Mittelteil sind die Stegbleche durch das Deckblech hindurchgeführt und bilden dadurch den Aufkletterschutz. Bei der Bauteilgestaltung wurden insbesondere eine einfache Herstellbarkeit der Einzelteile (überwiegend ebene Blechteile), eine hohe Struktursteifigkeit der Konstruktion (ausgesteifte Kastenkonstruktion) und eine hohe Wirtschaftlichkeit bei der Herstellung der Schweißverbindungen (lange, von außen zugängliche Nähte) angestrebt.

Konstruktionsprinzip Stoßbügel mit Aufkletterschutz



Crash-Simulation (v. Mises Spannung)



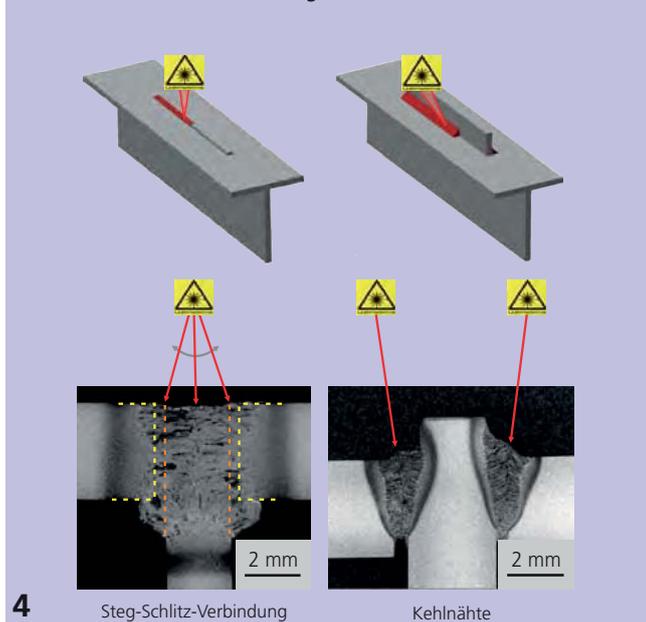
ERGEBNISSE

Die Auslegung der Konstruktion erfolgte über Finite Elemente Crashesimulationen. Dabei wurde sowohl der Frontalcrash (A) als auch eine Front-Seitencrash-Situation (B) unter praxisrelevanten Randbedingungen abgebildet (Abb. 3). Die Berechnungen erfolgten mit dem impliziten PAM-CRASH Solver für rein elastisches Materialverhalten. Über die Auswertung der berechneten Strukturspannungen und Bauteildeformationen erfolgte eine schrittweise Optimierung des Bauteildesigns unter der Maßgabe einer minimalen Bauteilmasse. Das Herstellungs-konzept orientiert sich an einem minimalen Fertigungsaufwand und einer hohen Bauteilqualität infolge mechanisierter Fertigungsabläufe. Die Blecheinzelteile inklusive der Schlitze in den Deckblechen bzw. der Durchführungen an den Stegblechen werden mittels Laserstrahlschneiden erzeugt. Der Zusammenbau der Kastenstruktur erfolgt manuell mit punktweisem Heften zur sicheren Positionierung der Einzelteile.

Das Ausschweißen der Konstruktion wird vorteilhaft über Laserstrahlschweißen von außen realisiert. Dabei werden die Steg-Schlitz-Verbindungen mittels lateral gependeltem Laserstrahl über die gesamte Stegbreite mit dem Deckblech verschweißt (Abb. 4, links). Für besonders dicke Stegbleche ($t = 8 \text{ mm}$) können auch zwei separate Schweißnähte hergestellt werden.

Im Bereich des Aufkletterschutzes wird jeweils eine beidseitige Kehlnaht ausgeführt (Abb. 4, rechts). Die Gurtbleche untereinander und die Anschlüsse zu den Crashabsorbern werden mittels I-Nähten realisiert. Aufgrund der zu berücksichtigenden Toleranzen der Einzelteile können im Zusammenbau Fügespalte von bis zu 1 mm auftreten. Dies macht unter Umständen den Einsatz von Schweißzusatzwerkstoff erforderlich. Im Ergebnis der Entwicklung konnte beispielhaft ein neuartiges Konzept für die Gestaltung eines Stoßbügels für Straßenbahnen unter Berücksichtigung der fertigungstechnischen und belastungsseitigen Randbedingungen umgesetzt werden. Mit der neuartigen Stahlblech-Steg-Schlitz-Bauweise wurden die Herstellungskosten (Material + Fertigung) im Vergleich zum Referenzbauteil (monolithische Al-Bauweise) um mehr als 50 % reduziert. Dabei ist die neu entwickelte Variante im Vergleich zur Referenz gewichtsneutral und weist eine vergleichbare Crashperformance auf. Die notwendigen Funktionalitäten, wie integrierter Aufkletterschutz und wechselbare Anbindung an die Crashabsorber, wurden in vollem Umfang berücksichtigt.

Schweißen von Steg-Schlitz-Verbindungen und Kehlnähten, Blechüberstand bei den Kehlnähten gewährleistet Aufkletterschutz



1 *Designstudie zukünftiger Straßenbahnen*

KONTAKT

Dr. Axel Jahn
 Telefon: +49 351 83391-3237
 axel.jahn@iws.fraunhofer.de



LASERGESCHWEISSTE RUMPFSTRUKTUREN AUS HOCHFESTEN AL-LI-LEGIERUNGEN

DIE AUFGABE

Die Weiter- und Neuentwicklung von Flugzeugrumpfstrukturen hat in den letzten Jahren zu einer Reihe von innovativen Produkten im Bereich der Passagierflugzeuge geführt. Flugzeughersteller, die auf metallische Strukturen setzen, profitierten dabei im Wesentlichen von der Einführung der Laserstrahltechnik zum Schweißen von Aluminiumlegierungen mit hoher Festigkeit. Für kleinere Flugzeuge, so genannte Regionalflugzeuge, steht nun ein ähnlicher Entwicklungsschub an. Bei diesen Flugzeugtypen ist die zur Absenkung der Abgasemission notwendige Gewichtsreduzierung durch einen noch stärkeren Kostendruck bei der Herstellung limitiert. Dies erfordert Werkstoffe mit optimierter Mikrostruktur, die durch geeignete Fertigungsmethoden kostengünstig herstellbar ist.

Die Aluminium-Lithium-Legierung 2198 erfüllt das gewünschte Gewicht-zu-Kostenziel sehr gut, da sie eine geringere Dichte, einen höheren E-Modul und eine ebenso hohe Festigkeit wie die bisherigen schweißgeeigneten Aluminium-Legierungen aufweist. Im Rahmen des EU-Projekts Clean Sky I (Förderkennzeichen CSJU-GAM-GRA-2008-001) bestand die Aufgabe des Fraunhofer IWS Dresden in der Entwicklung eines schweißtechnischen Konzeptes für einen Flugzeugunterrumpf basierend auf dem Werkstoff 2198. Beginnend mit der Auslegung bis hin zur Fertigung durch Laserstrahlschweißen war die Fertigung eines deutlich gewichtsreduzierten Panels für den Flugzeugunterrumpf darzustellen.

UNSERE LÖSUNG

Zunächst wurde ein Unterrumpfpanel in der Dimension 1600 x 900 mm² durch klassische Berechnungsmethoden

grob ausgelegt und als CAD-Modell dargestellt. Ausgehend von diesem Modell wurden kleinere Testbereiche festgelegt, so genannte T-Stoßverbindungen, an denen die Schweißtechnologie der schwer schweißbaren Legierung erprobt werden konnte. Zahlreiche Kleinproben wurden geschweißt und zur Absicherung der mechanischen Festigkeit der Schweißverbindung sowohl statisch als auch zyklisch geprüft. Eine besondere Herausforderung stellten dabei die im Bereich der Schweißnaht nur 1,2 mm dicken Hautbleche dar. Nur die exakte Steuerung des Lasers kann den thermisch bedingten Durchgriff der Schweißnaht auf die Panel-Außenseite minimieren.

Mittels 1-Stringer-Streifen-Proben wurde das Materialverhalten der mit optimierten Parametern geschweißten Strukturen unter Druckbelastung untersucht (Abb. 2 a). Diese idealisierten Proben dienen zur Validierung eines vorläufigen Finite-Elemente-Modells, Abb. 2 b. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurde der endgültige Lösungsansatz für das Finite-Elemente-Modell zur Berechnung des gesamten Panels festgelegt und die ertragbare Beullast bzw. die Versagenslast abgeschätzt.

Anschließend wurde das Finite-Elemente-Modell geometrisch erweitert, um umfangreiche Rechnungen zur Gewichtsoptimierung unter Berücksichtigung der zu ertragenden Last durchzuführen. Mit einer für Druckbelastung optimierten Struktur wurde das CAD-Modell konkretisiert und in eine schweißtechnische Lösung umgesetzt. Nach Auslegung der erforderlichen Spanntechnik und Erprobung der Schweißstrategie konnte ein prüffähiger Demonstrator (5-Stringer-Panel) erstellt und dem experimentellen Test zugeführt werden.

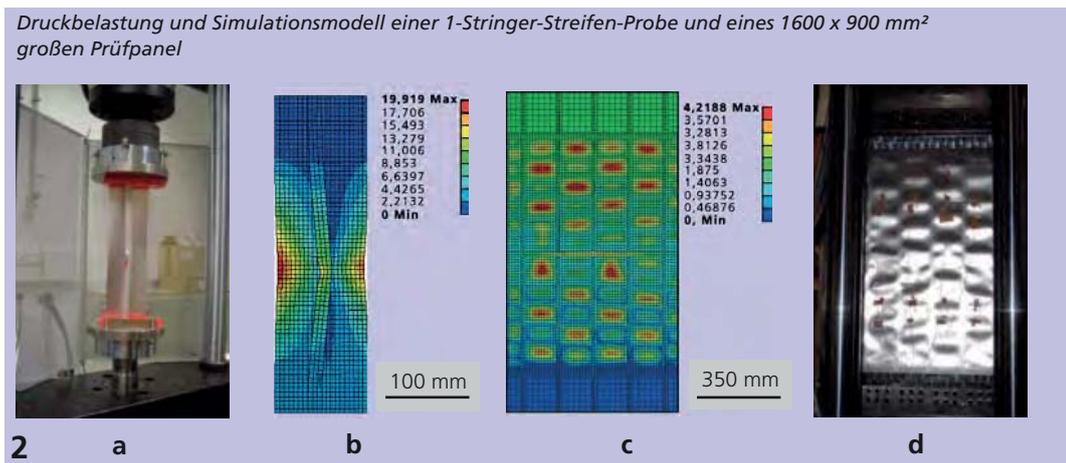
ERGEBNISSE

Die aus dem Schweißprozess resultierenden Forderungen wurden durch beidseitig gleichzeitiges Laserstrahlschweißen erfolgreich erfüllt. Zwei unter einem flachen Winkel zum Hautblech orientierte CO₂-Laserstrahlen schweißen die Stringer auf, nachdem die Oberfläche des Werkstoffs durch chemisches Beizen abgetragen wurde. Die für das Material typischerweise erhöhte Gefahr der Heißrissbildung kann durch einen werkstoffangepassten Zusatzwerkstoff beseitigt werden.

In der Finite-Elemente-Simulation konnte gezeigt werden, dass eine metallische Struktur mit 5-Stringern und 3 Spanten bei einer Größe von 1600 x 900 mm² und einer minimalen Hautblechdicke von 0,9 mm ein Gewicht von weniger als 7 kg aufweist und trotzdem der geforderten Maximallast und der Überlast standhalten kann (Abb. 2 c).

Für eine eher konservativ angesetzte Auslegungsstrategie wurde mit der Finite-Elemente-Simulation eine Versagenslast von 99 kN abgeschätzt. Mit 103 kN lag der Wert des Experiments leicht über dem vorausgesagten Wert. Das anhand der Vorversuche ermittelte Finite-Elemente-Modell und die angenommenen Randbedingungen sind somit tragfähig. Zudem wurde bestätigt, dass unter Verwendung der hochfesten Aluminium-Lithium-Legierung 2198 ein sehr leichtes Panel gefertigt werden kann, das die erforderliche Drucklast sicher erträgt.

Mit der im Fraunhofer IWS entwickelten Schweißtechnologie für sehr dünnwandige und große Prüfstrukturen ist zudem eine kostengünstige Fertigung darstellbar. Für die weitere Umsetzung des gewählten Leichtbauansatzes und die Ausnutzung des aufgezeigten Potenzials in Rumpfstrukturen von Regional-Flugzeugen ist nun ein Barrel-Test erforderlich.



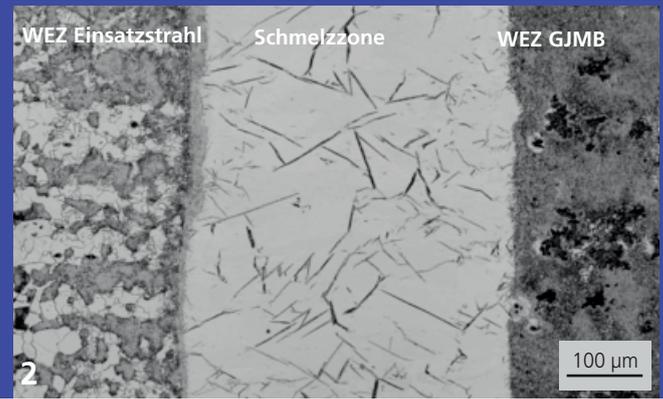
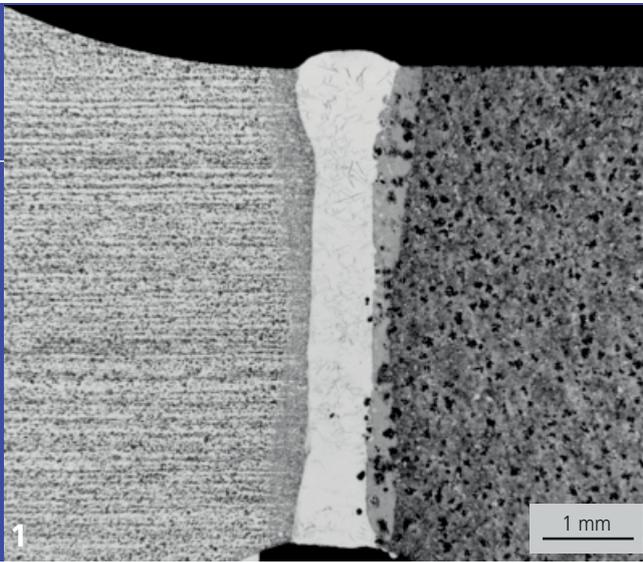
Im nachfolgenden experimentellen Druckversuch am Fraunhofer-Institut LBF in Darmstadt wurde das Panel geprüft. Ähnlich wie in der Simulation idealisiert, wurden die Panelseiten in einem Zusatz-Spannrahmen der Prüfmaschine geführt. Unter Druckbelastung wurde ein mit der Simulation vergleichbares Beulverhalten experimentell nachgewiesen und die kritische Versagenslast bestimmt, siehe Abb. 2 d.

1 Passagierflugzeug

KONTAKT

Dr. Dirk Dittrich
 Telefon: +49 351 83391-3228
 dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de





LASERSTRAHLSCHWEISSEN HOCHBELASTETER BAUTEILE AUS SCHWARZEM TEMPERGUSS

DIE AUFGABE

Seit mehr als 15 Jahren werden weltweit zunehmend schweißtechnische Mischverbindungen aus Gusseisen und Einsatzstahl zum Standard im Getriebebau der Automobilindustrie. Diese Mischverbindungen ersetzen mit beträchtlichen fertigungstechnischen und Gewichtsvorteilen die bis dahin aufwendigen Schraub- und Nietverbindungen insbesondere bei Differentialgetrieben.

Wegen des weiter anhaltenden allgemeinen Kosten- und Qualitätsdrucks wird als Konstruktionswerkstoff neben dem zyklisch hochbelastbaren globularen Gusseisen (GJS) zunehmend auch der schwarze Temperguss (GJMB) mit seinen spezifischen Kostenvorteilen eingesetzt. Er gilt als einfacher vergieß- und leicht zerspanbar. Der für die Zerspannung vorteilhafte hohe Schwefelgehalt von etwa 0,17 % (Faktor 8 - 10 gegenüber GJS) stellt aus schweißtechnischer Sicht jedoch eine neue Herausforderung dar, da beim typischen Laserschweißprozess mit CO₂-Laser und nickelhaltigem drahtförmigen Zusatzwerkstoff Heißrisse in der Schweißschmelze gebildet werden können. Sie basieren auf niedrig schmelzenden Eisensulfiden und müssen vermieden werden.

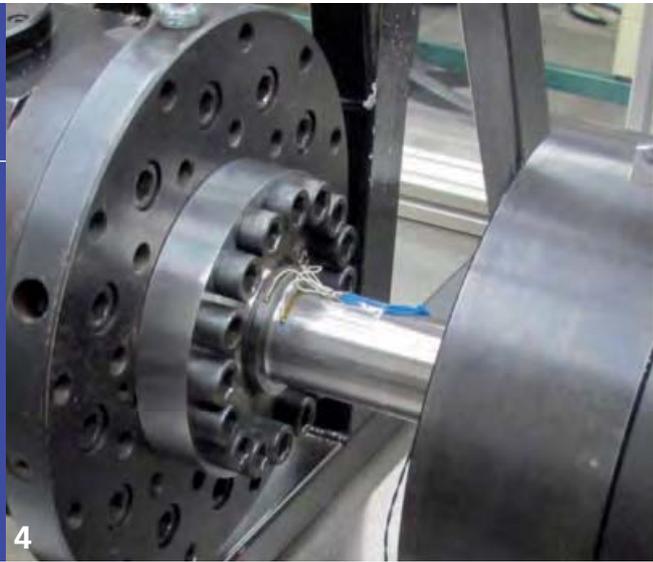
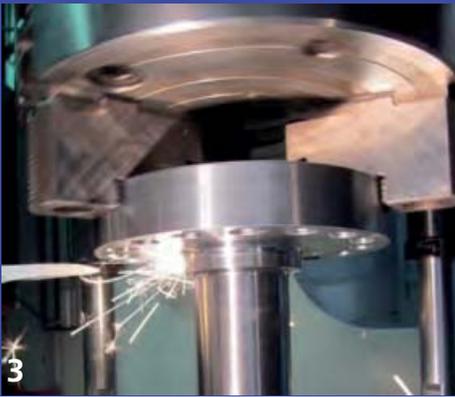
Ein weiterer wichtiger Aspekt beim Laserstrahlschweißen von Gusswerkstoffen ist die angestrebte generelle Reduzierung von Fertigungskosten. Weiterentwickelte Laserstrahlquellen und stabile, energieeffiziente, Ressourcen schonende Schweißprozesse sind dafür die wesentlichen Stellschrauben. Nicht zuletzt können auch mit einer optimalen Bauteilauslegung Kosten gespart werden. Konkrete Auslegungskennwerte für derartige Schweißverbindungen in typischen Axial-Torsionsbelastungen sind bisher jedoch Mangelware und deshalb Gegenstand der Forschungsarbeiten am Fraunhofer IWS.

UNSERE LÖSUNG

Gemeinsam mit Partnern aus der Automobilindustrie wurde ein leistungsfähiger Laserschweißprozess entwickelt, der es ermöglicht, schwarzen Temperguss (GJMB) in einer Mischverbindung mit Einsatzstahl zuverlässig rissfrei zu verbinden (Abb. 2).

Hierbei wird ein moderner Scheibenlaser mit seiner vorteilhaften Strahlqualität verwendet. Er erzeugt Schweißnähte mit weitgehend parallelen Nahtflanken (Abb. 1). Durch eine geeignete Kombination von Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit und relativer Schweißposition wird es über die Einstellung eines definierten Mischungsverhältnisses in der Schmelzzone möglich, Erstarrungs- und Abkühlbedingungen in der Schweißnaht zu schaffen, die die Entstehung von Heißrisse wirkungsvoll verhindern können. Das über die relative Strahlposition gegenüber dem Schweißspalt einstellbare wichtige Mischungsverhältnis kann mit Hilfe einer speziellen strahlführenden Optik auf wenige Hundertstel Millimeter zuverlässig und genau eingestellt werden.

Dass bei den sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten nahezu keine rissempfindlichen Gefügebereiche, wie z. B. der extrem harte Ledeburit, in der gusseitigen Wärmeeinflusszone entstehen können, ist ein weiterer nützlicher Nebeneffekt der parallelen Nahtflanken. Zudem verursachen die äußerst niedrigen Energieeinträge ins Schweißbauteil geringere thermische transiente Spannungen und Verformungen. Ein draht- oder folienförmiger nickelhaltiger Zusatzwerkstoff ist in dem Prozess nicht mehr erforderlich, was zur weiteren Kostenreduzierung entscheidend beiträgt.



ERGEBNISSE

Im Ergebnis einer Reihe von Schweißversuchen an Prüfbau-
teilen aus GJMB und Einsatzstahl wurden geeignete Schweiß-
parameter generiert und untersucht. Dabei gelang es mit
wesentlich geringeren Laserleistungen und Energieeinträgen
als bisher, qualitativ hochwertige Schweißnähte mit sehr
günstigen, nahezu parallelen Nahtflanken an Mischverbin-
dungen aus GJS und GJMB herzustellen. Nickelhaltige Zusatz-
werkstoffe kamen nicht zum Einsatz.

In der Schmelzzone entsteht das angestrebte metastabile
reustenitische Gefüge mit seinen vorteilhaften duktilen
Eigenschaften (Abb. 3). Trotz des sehr hohen Schwefelgehaltes
im GJMB entstehen nur wenige Heißrisse, ihre Ausprägung ist
drastisch geringer als bei konventionellen Laserschweiß-
prozessen. Ledeburit wird nur noch inselförmig in geringsten
Mengen in der Wärmeeinflusszone (WEZ) beobachtet.

Im Ergebnis der Untersuchungen ist festzustellen, dass Misch-
verbindungen aus GJS oder GJMB und Einsatzstahl bei Einsatz
eines Scheibenlasers mit weitgehend ähnlichen Schweißpara-
metern hergestellt werden können. Die für typische Laser-
schweißaufgaben an einem Differentialgetriebe (ca. 150 mm
Schweißdurchmesser und 5,0 mm Schweißtiefe) nötigen
Energieeinträge liegen dabei mit nur 25 % deutlich unter dem
des bisher etablierten Schweißprozess mit CO₂-Laser und
Zusatzwerkstoff.

Mit Blick auf die Gewinnung von Kennwerten zur Optimie-
rung der Bauteilauslegung wurden erste mit dem Scheiben-
laser geschweißte Bauteile in der servohydraulischen Axial-
Torsions-Prüfmaschine des Fraunhofer IWS auf ihre zyklische
Belastbarkeit geprüft (Abb. 4). Die Prüfkörper wurden dabei
gemäß der Vergleichsspannungshypothese nach Mises mit
dem für Differentialgetriebe typischen Lastfall in einer
Schweißnaht als Kombination von Biegung und Torsion
belastet.

Die Mischverbindungen GJMB / Einsatzstahl erreichten in den
durchgeführten Tests ein vergleichbar hohes Lastniveau wie
Mischverbindungen aus GJS und Einsatzstahl. Weit über-
troffen wurden in diesem Vergleich die bisher in der Auto-
mobilindustrie verbreitet mit konventionellen CO₂-Lasern und
Zusatzwerkstoff hergestellten Mischverbindungen aus GJS und
Einsatzstahl.

Die derzeit laufenden Schwingfestigkeitsuntersuchungen
geben die berechtigte Hoffnung, dass sich in Zukunft weitere
beträchtliche Kosteneinsparpotenziale durch die Realisierung
belastungsangepasster Einschweißtiefen erzielen lassen.

- 1 *Geschweißte Mischverbindung
GJMB / Einsatzstahl (Übersicht)*
- 2 *Schweißgefüge der Mischver-
bindung GJMB / Einsatzstahl*
- 3 *Laserschweißen eines Prüfbau-
teils aus GJMB / Einsatzstahl*
- 4 *Dauerschwingtest eines
Prüfbauteils in einer servo-
hydraulischen Axial-Torsions-
Prüfmaschine*

KONTAKT

Dipl.-Ing. Uwe Stamm
Tel.: +49 351 83391-3152
uwe.stamm@iws.fraunhofer.de





AUTOMATISIERTES LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON ROHR-ROHRBODEN-VERBINDUNGEN

DIE AUFGABE

Wärmetauscher ermöglichen die Kühlung von Flüssigkeiten in verschiedensten industriellen Anlagen. Die räumliche Trennung von Primär- und Sekundärmedium erlaubt eine Nutzung der Abwärme und leistet damit einen Beitrag zur effizienten Nutzung der energetischen Ressourcen. Die Herstellung der Wärmetauscher ist jedoch noch sehr zeit- und energieaufwendig.

Für die Herstellung von Rohr-Rohrboden-Verbindungen existieren WIG-Schweißköpfe, welche sich mittels eines Dorns im Rohr zentrieren und das Schweißen über eine rotierende Elektrode realisieren. Diese Technologie hat sich über Jahre bewährt und ist durch die feste Verbindung mit dem Werkstück gegenüber äußeren Störungen unempfindlich. Jedoch besitzt dieses Verfahren einen hohen Wärmeeintrag und eine geringe Vorschubgeschwindigkeit, was in der Folge zu thermischem Verzug und einer langen Bearbeitungszeit führt.

Somit besteht die Aufgabe, die Fertigung hinsichtlich zeitlicher und energetischer Aufwendung zu verbessern und eine Automatisierbarkeit des Prozesses zu ermöglichen. Das Laserschweißen kann diesen Anforderungen prinzipiell gerecht werden.

UNSERE LÖSUNG

Das Laserschweißen von Rohr-Rohrboden-Verbindungen wurde bereits mehrfach erfolgreich nachgewiesen, jedoch scheiterte die industrielle Umsetzung an Bedenken hinsichtlich der Robustheit gegenüber den vorherrschenden Produktionsbedingungen.

Ein internationales Konsortium mit den Projektpartnern AIMEN Technology Center, Labor, CMF, ENSA, Fraunhofer IWS, Integasa, Precigal, Precitec und Sill Optics haben das beim WIG-Schweißen verwendete Konzept nun erfolgreich auf das Laserschweißen übertragen. Die Bewegung des Schweißkopfes von einer Fügestelle zur nächsten erfolgt nun nicht mehr von Hand, sondern automatisiert mittels eines Industrieroboters.

Die Entwicklung und Erprobung des Laserschweißkopfes für Rohr-Rohrboden-Verbindungen wurde durch die Europäische Union im Rahmen des Projektes Orbital (FP7 262455) gefördert. Das Fraunhofer IWS Dresden entwickelte in dem Projekt das opto-mechanische Konzept, welches die benötigte Schweißbahn in Kombination mit dem axialen Zentrierdorn ermöglicht und führte die Erprobung sowie Validierung des Systems durch.

Kenndaten des Schweißkopfs

Lasertyp	fasergekoppelter Festkörperlaser
Wellenlänge	1030 - 1090 nm
Faserstecker	QBH, D-connector
maximale Laserleistung	2000 W
maximale Schweißgeschwindigkeit	5 m min ⁻¹
Industrieroboter	KUKA, ABB, weitere auf Anfrage

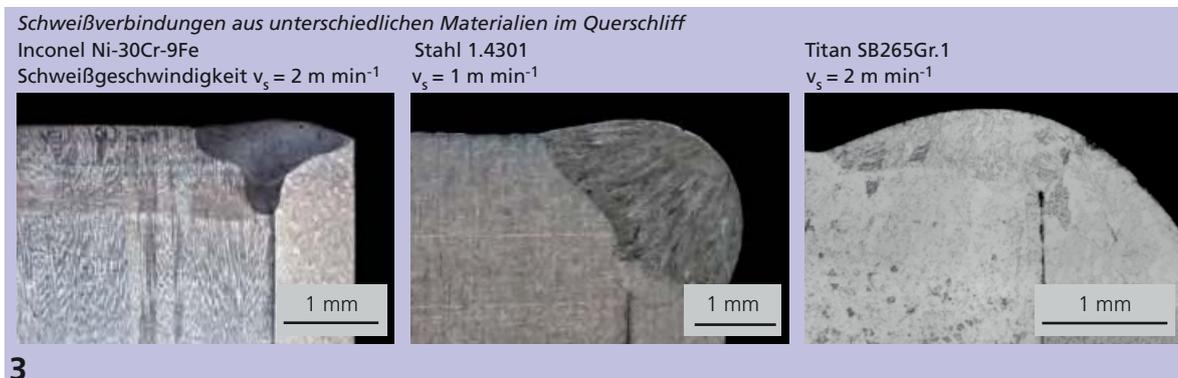
2



ERGEBNISSE

Die Fertigung der Schweißungen erfolgt vorzugsweise voll automatisiert (Abb. 2). Die Geometrie der Bodenplatte liegt als CAD-Datensatz vor. Mittels eines Postprozessors wird das Bewegungsprogramm des Roboters erstellt. Für das Einmessen des Koordinatensystems stehen im jeweiligen Roboter entsprechende Routinen zur Verfügung.

der Fertigungszeit. In der Summe ergibt sich ein Bruchteil der gewohnten Bearbeitungszeit im Vergleich zur konventionellen Fertigung. Aus werkstofftechnischer Sicht wurden bereits Rohr-Rohrboden-Verbindungen aus Inconel, Edelstahl und Titan geschweißt (Abb. 3). Auf Wunsch der Endanwender entsprechen die Nahtquerschnitte der Geometrie von WIG-Schweißnähten.



Die Bedienoberfläche der Software ermöglicht die Wahl aller zum Laserschweißen benötigten Parameter, beziehungsweise die Anwahl eines bereits vorhandenen Parametersatzes.

Mit der Aktivierung des Automatikmodus erfolgt das voll-automatische Schweißen des Rohrbodens. Für Testzwecke steht ein manueller Modus zur Verfügung, welcher die Evaluierung von Schweißparametern ermöglicht. Derzeit ist eine Zulassung nach Laserschutzklasse 1 in Vorbereitung.

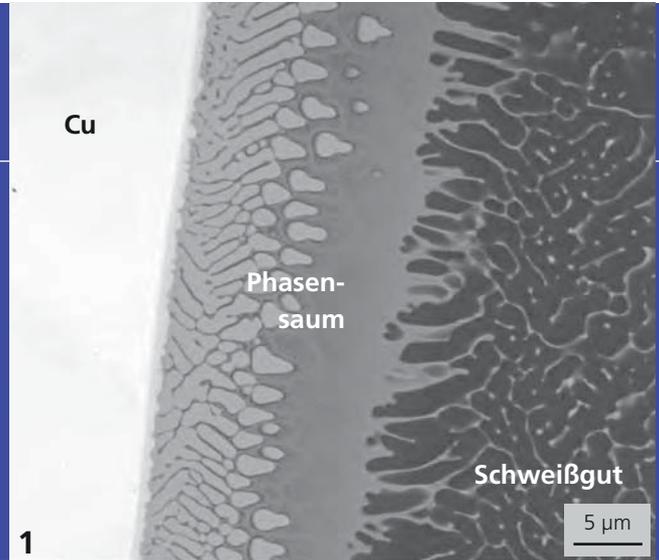
Im Vergleich zum konventionellen WIG-Prozess, konnte die Schweißzeit auf ein Zehntel reduziert werden. Das automatisierte Verfahren des Schweißkopfes führt auch über die Einsparung von Nebenzeiten zu einer weiteren Reduzierung

- 1 *Titanschweißprozess einer Rohr-Rohrboden-Verbindung*
- 2 *Laserschweißkopf für Rohr-Rohrboden-Verbindungen*

KONTAKT

Dipl.-Ing. Patrick Herwig
 Telefon: +49 351 83391-3199
patrick.herwig@iws.fraunhofer.de





PROZESSBEGLEITENDE GEFÜGEANALYSE VON AL-CU-FÜGEVERBINDUNGEN FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT

DIE AUFGABE

Ein wesentlicher Prozess beim Aufbau von Batteriemodulen aus einzelnen Batteriezellen ist die Verschaltung mittels Hochstromzellverbinder. Derzeit erfolgt dies über ein mechanisches Verschrauben der Aluminium- und Kupferableiter. Damit verbunden sind Nachteile in Bezug auf Kosten und Langzeitzuverlässigkeit. Ziel zahlreicher Forschungsarbeiten ist deshalb die Entwicklung funktionsintegrierter Hochstromverbinder für Batteriemodule mittels kostenoptimierter Fertigungstechnologien, um damit die bestehenden Schraublösungen zu ersetzen.

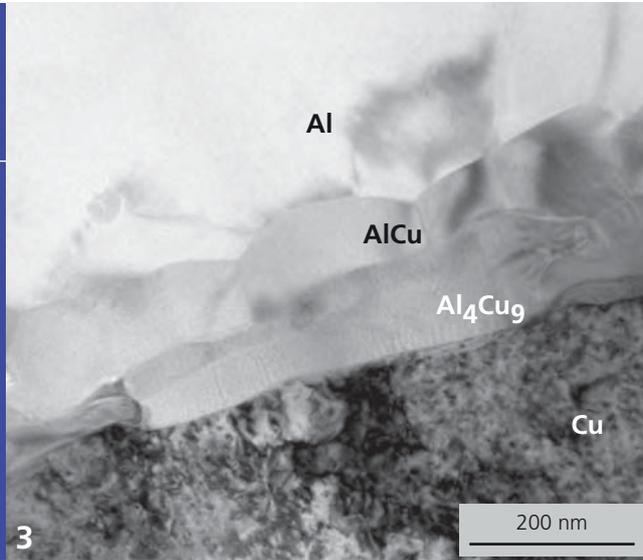
Die Materialkombination Aluminium und Kupfer erfordert völlig neue Fügestrategien, da die zu fügenden Werkstoffe nur eine begrenzte Löslichkeit aufweisen und hinsichtlich Schmelztemperatur, thermischer Leitfähigkeit sowie thermischem Ausdehnungskoeffizient weit auseinander liegen. Die Herstellung stoffschlüssiger Verbindungen aus Aluminium und Kupfer beinhaltet durch das Auftreten spröder Phasen, durch Mikrorissbildung oder auch Kontaktkorrosion eine Vielzahl an Herausforderungen. Durch Laser- bzw. Elektronenstrahlschweißen lässt sich das Ausmaß der spröden Phase und Mikrorisse im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren zwar verringern, aber nicht auf ein unterkritisches Maß begrenzen.

Eine prozessbegleitende Charakterisierung der sich durch den Fügeprozess einstellenden Zonen und Phasen ist für die Entwicklung serientauglicher Herstellroutinen daher von essentieller Bedeutung. Nur ein fundiertes Verständnis der Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessparametern und dem entstehenden Gefüge erlaubt eine Vorhersage der zu erwartenden Eigenschaften der Aluminium-Kupfer-Verbindung.

UNSERE LÖSUNG

Im BMWi-Verbundprojekt BatCon entwickelt das Fraunhofer IWS Dresden gemeinsam mit den Industriepartnern Robert Bosch GmbH, ElringKlinger AG und Wieland-Werken AG neuartige Hochstromverbinder für Batteriemodule und -systeme mittels kostenoptimierter Fertigungstechnologien. Das IWS bringt hierzu sein Know-how im Bereich innovativer Fügeverfahren in das Projekt ein. Das Laserstrahlschweißen und neue Verfahren wie das Laserinduktionswalzplattieren, das Rührreibschweißen und das elektromagnetische Pulsfügen wurden zum Fügen der nur bedingt schmelzschweißbaren Werkstoffkombination Aluminium mit Kupfer eingesetzt. Es gilt, das am besten geeignete Verfahren zu identifizieren, um zukünftig damit Aluminium-Kupfer-Zellverbinder als Halbzeug reproduzierbar und effizient unter Berücksichtigung der Funktionsanforderungen herstellen zu können.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten liegt in der Aufklärung der beim stoffschlüssigen Fügen von Aluminium und Kupfer wirksamen Fügemechanismen. Ziel ist die Optimierung der Verbindungseigenschaften und Gestaltung eines belastungsangepassten Bauteilverhaltens. Dazu wird auf die IWS-Kompetenz hinsichtlich der metallographischen Präparationsroutinen und der Durchführung und Interpretation der hoch- bis höchstauflösenden Elektronenmikroskopie sowie Röntgenmikroanalyse zurückgegriffen. Im Fokus stehen insbesondere die sich ausbildenden Grenzflächen an der Fügestelle.



ERGEBNISSE

Beim Laserstrahlschweißen können in I-Stoßkonfiguration nur für Blechdicken bis ca. 1mm gute Fügequalitäten erreicht werden. Für dickere Bleche lässt sich die Phasensaumdicke auch beim Einsatz von brillanten Lasern im kW-Bereich nicht unter 10 µm absenken (Abb. 1). Dies führt zu Festigkeits- und Duktilitätseinbußen im Schweißgut der Mischverbindung und schränkt den Einsatz des Laserstrahlschweißens für dicke Bleche ein.

Im Gegensatz dazu kann man mit dem Rührreibschweißen, dem Laserinduktionswalzplattieren und dem elektromagnetischen Pulsfügen die Phasensaumdicke auf ein unterkritisches Maß von weniger als 1 µm reduzieren. In den mechanischen Test wird dadurch der Versagensort von der Fügezone in das Aluminium-Grundmaterial verschoben.

Die sehr geringe Phasensaumdicke wirkt sich auch positiv auf den sich einstellenden Übergangswiderstand aus. So können bei den drei Fügeverfahren im Vergleich zum Laserstrahlschweißen und insbesondere zu den bisher eingesetzten Schraubverbindungen deutlich reduzierte Übergangswiderstände erzielt werden. TEM-Analysen liefern außerdem wertvolle Informationen zum Wachstum und Typ der sich bildenden Phasen.

Bei den betrachteten Fügeverfahren hängt die Qualität der Mischverbindung auch stark von den mechanischen Eigenschaften der verwendeten Legierung sowie den geometrischen Abmessungen und der gewählten Nahtkonfiguration ab. Höherfeste Aluminium-Legierungen sind z.B. besser für das Rührreibschweißen geeignet als Reinaluminium. Die nachteilige Durchmischung von Aluminium und Kupfer beim Rührreibschweißen in I-Stoßkonfiguration kann in angepassten Überlappkonfigurationen vermieden werden.

Auch das elektromagnetische Pulsfügen ist mehr für teilweise überlappende Fügegeometrien geeignet. Die Herausforderung aus verfahrenstechnischer Sicht liegt hier im Fügen nicht rotationssymmetrischer Probenpaarungen. Aus werkstoffkundlicher Sicht sind Prozessinstabilitäten, die zum lokalen Anschmelzen des Materials führen, eine offene Fragestellung.

Mit dem Laserinduktionswalzplattieren ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt möglich, vollständig überlappende Aluminium-Kupfer-Verbindungen bis zu einer Bandbreite von 22 mm mit höchster Fügequalität herzustellen (Abb. 2 und 3). Das Verfahren wird nicht nur aus verfahrens- sondern auch aus werkstofftechnischer Sicht für das Fügen von Aluminium und Kupfer favorisiert. Durch zwei unterschiedliche Wärmequellen (Laser und Induktion) ist es möglich, das bei Raumtemperatur unterschiedliche plastische Verhalten der Fügepartner gezielt an die zu lösende Fügeaufgabe anzupassen und somit eine optimale Fügequalität zu erreichen. Daraus resultiert auch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Auswahl der für das Verfahren geeigneten Legierungstypen.

Die Forschungsarbeiten sind Gegenstand des seit 2013 vom BMWi im Rahmen der Förderinitiative Elektro Power geförderten Projektes BatCon (FKZ 0101X12055C).

- 1 REM-Aufnahme des Phasensaums einer Laserschweißnaht
- 2 Vollständig überlappend plattiertes Aluminium-Kupfer-Bimetal
- 3 TEM-Aufnahme des sich beim Laserinduktionswalzplattieren bildenden Phasensaums

KONTAKT

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



VAKUUM-SAUGSTRAHLEN ALS EFFEKTIVE METHODE ZUR KLEBVORBEHANDLUNG

DIE AUFGABE

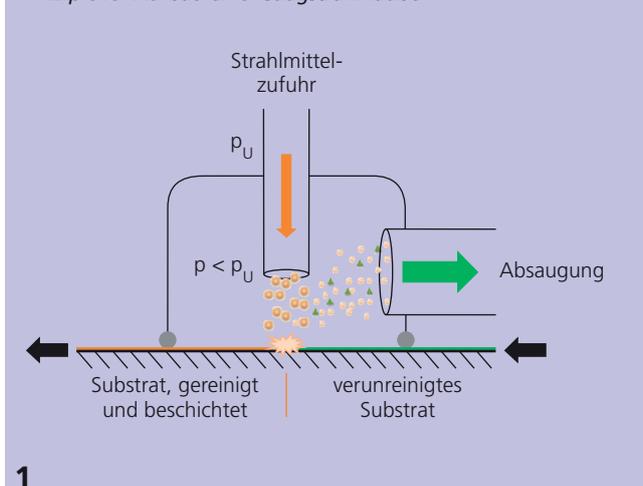
Sandstrahlen (Druckstrahlen) ist eine effektive Methode zur Klebvorbehandlung. Es bewirkt sowohl die Reinigung als auch die Strukturierung des Substrats. Zusätzlich kann durch die Verwendung von alkoxyisilanmodifiziertem Strahlmittel (SACO®) eine haftvermittelnde Silikatschicht aufgebracht werden.

In Hinblick auf neue Anwendungsfelder sind Staubentwicklung, starke abrasive Wirkung und schlechte Inline-Fähigkeit noch von Nachteil. Zudem leidet die Homogenität des Behandlungsergebnisses infolge des Strömungsprofils bei Düsenaustritt. Das Fraunhofer IWS Dresden hat sich die Lösung dieser Nachteile durch Nutzung des Saugstrahlens zur Aufgabe gemacht.

UNSERE LÖSUNG

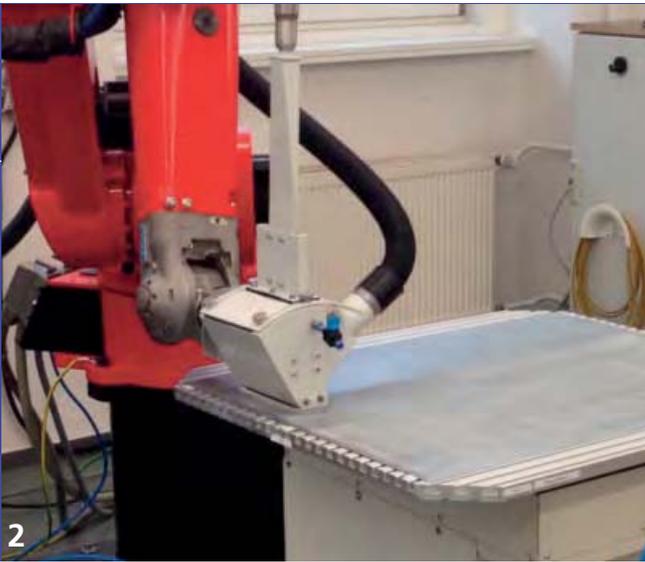
Beim beschichtenden Vakuum-Saugstrahlen wird das Strahlgut ausschließlich durch das Evakuieren einer am Substrat abdichtenden Strahlhaube beschleunigt (Abb. 1). Unmittelbar nach der Interaktion mit dem Substrat wird das Strahlgut abgesaugt. Somit arbeitet das Verfahren praktisch staubfrei und selektiv. Weitere Einhausungen oder Kabinen werden nicht benötigt. Die Strahlhaube wird als Werkzeug über das Substrat geführt. Die beim Druckstrahlen unvermeidliche Expansion des Trägergas-Strahlgut-Gemischs beim Düsenaustritt entfällt. Das Vakuum-Saugstrahlen bewirkt ein nahezu homogenes Strömungsprofil und somit sehr gleichmäßige Aufprallgeschwindigkeiten der Strahlpartikel. Folglich kann das gewünschte Behandlungsergebnis sehr präzise eingestellt werden.

Prinzipieller Aufbau einer Saugstrahlhaube



Die Versuchsanlage des Fraunhofer IWS Dresden ist vollständig automatisiert (Abb. 2). Als Basis dient ein 6-Achs-Industrieroboter. Damit wird eine hohe Flexibilität bezüglich der Bauteil- bzw. Halbzeuggeometrie erreicht. Durch die Erweiterung des Verfahrens um eine präzise gravimetrische Regelung des Strahlmitteldurchsatzes hat das Fraunhofer IWS das Vakuum-Saugstrahlen in Bezug auf Prozessstabilität und Materialeffizienz weiter optimiert.

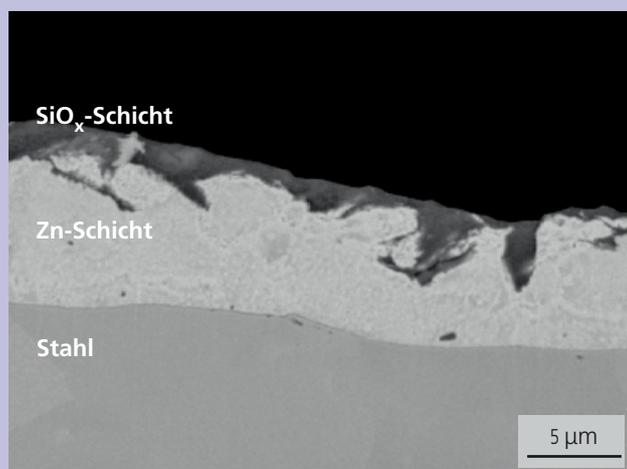
Die hohe Präzision ermöglicht einen submikrometergenauen Abtrag und somit die Behandlung von faserverstärkten Kunststoffen, ohne Faserschädigung, sowie die Behandlung von dünn beschichteten Substraten, ohne die Beschichtung zu durchbrechen.



ERGEBNISSE

An schmelztauchverzinkten Stählen konnte durch die Oberflächenvorbehandlung die Scherfestigkeit von Stahl-Kunststoff-Verbunden um ca. 15 MPa gesteigert werden. In nur einem Prozessschritt wird die Substratoberfläche gereinigt, strukturiert und beschichtet. Durch die schonende Arbeitsweise des Verfahrens wird die Zinkschicht nur minimal abgetragen.

Rasterelektronenmikroskopischer Querschnitt des Schichtaufbaus: schmelztauchverzinkter Stahl nach dem Vakuum-Saugstrahlen



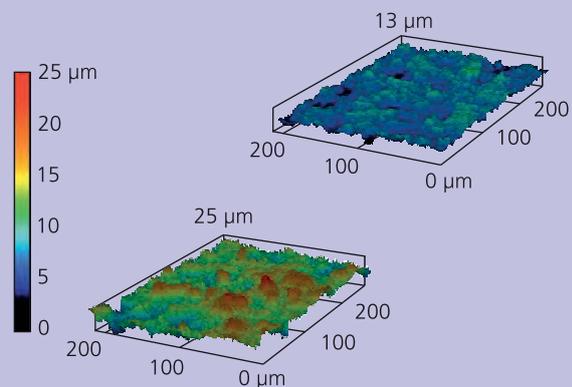
3

Eventuelle Kratzer in der Zinkschicht werden durch die Silikatbeschichtung verfüllt (Abb. 3). Der Korrosionsschutz bleibt in vollem Umfang erhalten. Die für das Kleben effektive Oberfläche vergrößert sich um ein Vielfaches. Im Vergleich zum Druckstrahlen wird die Oberfläche sehr viel feiner strukturiert (Abb. 4).

Auf dem Gebiet der Systemtechnik kooperiert das Fraunhofer IWS Dresden mit einem erfahrenen Anlagenbauer. Auf diese Weise wird Industriekunden des IWS die Integration des Verfahrens in ihre Prozessketten erleichtert.

Die schonende Arbeitsweise des Vakuum-Saugstrahlens ermöglicht die Anwendung auf thermisch und mechanisch sensiblen Werkstoffen. Das Verfahren eignet sich damit insbesondere für die definierte Oberflächenvorbehandlung von Kunststoffen, GFK, CFK, Metallen wie Stahl, Titan, Magnesium sowie Glas. Einsatzgebiete für das Vakuum-Saugstrahlen sind vor allem die Behandlungen vor Füge-, Beschichtungs- und Lackierprozessen innerhalb vollautomatisierter oder manueller Fertigung.

Oberflächentopografie des Behandlungsergebnisses oben – SACO®-Vakuum-Saugstrahlen unten – SACO®-Druckstrahlen



4

2 Vakuum-Saugstrahl-Versuchsanlage zur Behandlung von verzinktem Stahlblech

KONTAKT

Dr. Irene Jansen
Tel.: +49 351 463 35210
irene.jansen@iws.fraunhofer.de



ABTEILUNGSLEITER DR. ANDREAS WETZIG





»Tu erst das Notwendige, dann das Mögliche, und plötzlich schaffst du das Unmögliche.«

Franz von Assisi

GESCHÄFTSFELD ABTRAGEN UND TRENNEN

Redaktion: In Ihrer Abteilung gab es in den vergangenen Jahren vielfältige Forschungen, die technologisch möglichen Geschwindigkeiten bei der Laserbearbeitung mit Hilfe von Dynamikerhöhungen der Führungssysteme zu erreichen. Wie sieht hier die praktische Umsetzung aus?

Dr. Wetzig: Wir haben bei der Umsetzung unserer Ideen in den letzten Jahren durchaus Erfolge erzielt. Aus Gründen der Geheimhaltung können wir einige der Projekte für Industriekunden jedoch nicht offenlegen. Im Bereich des Laserschneidens gibt es zwei Industrieüberführungen, über die wir aber berichten dürfen. Zum einen ist der vom IWS entwickelten hochdynamische Formcutter (HDFC) bei einem Hersteller von Stanz- und Biegeteilen erstmalig erfolgreich in eine Fertigungsline integriert worden. Die ersten Vorserienteile für einen Kunden aus der Automobilbranche werden gerade unter Zuhilfenahme des HDFC gefertigt. Zum anderen ist es uns gelungen, bei dem gleichen Industriepartner das Laser-Remote-Schneiden zum Trennen von Stanz- und Biegeteilen mit Blechdicken von 0,5 mm und geringer zu implementieren.

Redaktion: Welche Neuigkeiten gibt es aus dem Bereich der Mikrostrukturierung zu berichten?

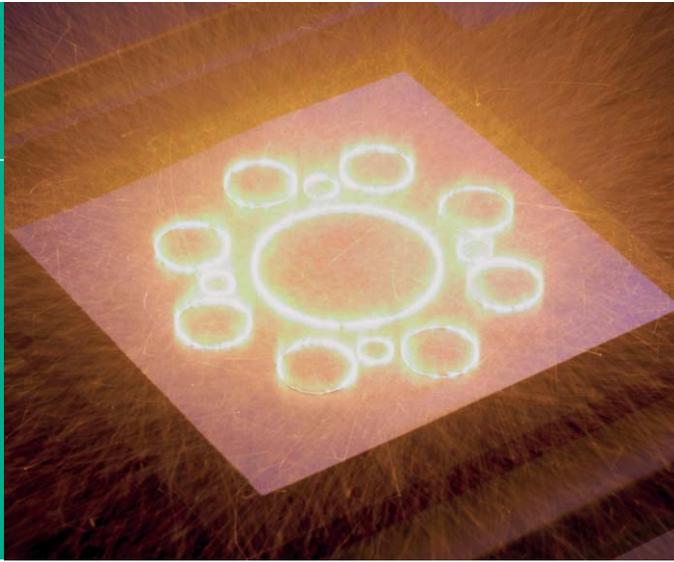
Dr. Wetzig: Neben der klassischen Lasermikrobearbeitung ist die Weiterentwicklung der direkten Laserinterferenzstrukturierung zu einem industriereifen Verfahren zu erwähnen, was in den letzten Jahren innerhalb eines Fraunhofer-internen Projekts zu Wege gebracht wurde. Das Besondere der Laserinterferenzstrukturierung besteht darin, dass ein Laserverfahren zur flächenhaften, periodischen Strukturierung von Oberflächen jeder Art im Submikrometerbereich zur Verfügung steht. Besonders hervorzuheben sind die hohen Flächenbearbeitungsgeschwindigkeiten, die mit keinem anderen Verfahren der Lasermikrostrukturierung erreicht werden können. Damit haben wir ein Alleinstellungsmerkmal.

Redaktion: Und wie sieht es auf diesem Gebiet mit ersten Industrieüberführungen aus?

Dr. Wetzig: Soweit sind wir noch nicht ganz. Zuerst einmal ist es uns gelungen, durch die Bewilligung von einigen öffentlich geförderten Projekten die Finanzierung durch Eigenmittel abzulösen. Darüber hinaus haben wir zahlreiche Machbarkeitsstudien zum Einsatz der direkten Laserinterferenzstrukturierung für Kunden aller Branchen vom Maschinenbau bis zur Medizintechnik durchgeführt. Uns stimmt zuversichtlich, dass ausgewählte Projekte das Potential haben, in den nächsten ein oder zwei Jahren in die Industrie überführt zu werden.

Redaktion: Bei der großen Bandbreite von Themen innerhalb Ihrer Abteilung gibt es doch sicherlich noch weitere hervorhebende Forschungsergebnisse?

Dr. Wetzig: Ja, das ist in der Tat richtig. Auf zwei Dinge möchte ich mich beschränken. Ein schöner Erfolg ist es, dass unsere Arbeiten auf dem Gebiet der Lab-on-a-Chip-Technologie innerhalb der Biosystemtechnik mit dem »Dorothy Hegarty Award 2012« für das beste Paper im Journal »ATLA« gewürdigt worden sind. Als letztes möchte ich auf die Zusammenarbeit mit dem Paul-Scherrer-Institut in der Schweiz hinweisen. Mit Hilfe von Neutronenstrahlung ist der erstmalige experimentelle Nachweis von durch Laserbearbeitung hervorgerufenen Veränderungen der magnetischen Domänenstruktur gelungen, was nicht nur wissenschaftliche Bedeutung hat, sondern auch relevant ist für alle industriellen Anwender von weichmagnetischen Werkstoffen.



KOMPETENZEN

HIGH-SPEED-LASERBEARBEITUNG

Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe sind verfahrens- und systemtechnische Entwicklungen für Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Dabei bildet das Prozessverständnis die Basis für die erfolgreiche Umsetzung verschiedenster Technologie- und Systementwicklungen in die industrielle Anwendung. Höchste Prozessgeschwindigkeiten kennzeichnen die angebotenen Verfahren und Lösungen. Das Leistungsspektrum umfasst neben der Technologieentwicklung von Remote-Prozessen zum Schneiden, Oberflächenbehandeln und Schweißen auch das Entwerfen, Aufbauen und Qualifizieren hochdynamischer Bearbeitungssysteme. Des Weiteren existiert eine breite Palette von Scannersystemtechnik, u.a. Eigenentwicklungen, die auf die speziellen Kundenbedürfnisse zugeschnitten werden.

SCHNEIDEN

Die Arbeitsgruppe widmet sich Verfahrensentwicklungen auf dem Gebiet des Laserschmelzschneidens. Schwerpunkte sind z. B. die Verbesserung der Schneidqualität beim Trennen mit Festkörperlasern oder die Optimierung des Laserschneidens von Elektroblechen unter Beibehaltung der magnetischen Eigenschaften. Darüber hinaus steht die Qualifizierung neuartiger Schneidverfahren wie das Remote-Laserschneiden für die Fertigungsintegration im Mittelpunkt. Dafür stehen moderne Laserquellen unterschiedlicher Wellenlänge, Leistung und Strahlqualität zur Verfügung. Außerdem existieren Möglichkeiten, die Bearbeitungsergebnisse zu charakterisieren, angefangen von Rauheitsmessungen an der Schnittkante bis zu detaillierten Gefügeuntersuchungen in Schnittkantennähe mittels REM und TEM.

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. Die Arbeitsgruppe erzeugt Strukturen im Mikrometerbereich an Polymeren, Metallen, Keramiken und biokompatiblen Werkstoffen. Innerhalb des Feldes Biosystemtechnik werden Technologieplattformen entwickelt, die es erlauben, in einem Lab-on-a-Chip-System mit integrierten Mikropumpen komplexe Zellkulturexperimente für medizinische Diagnostik und Substanztestung durchzuführen. Damit sind u.a. die im lebendigen Organismus ablaufenden Prozesse nachbildbar.

OBERFLÄCHFUNKTIONALISIERUNG

Die Arbeitsgruppe widmet sich der Herstellung von 2- und 3-dimensionalen Mikro- und Nanostrukturen auf Polymeren, Metallen, Keramiken und Beschichtungen. Mit neuen Methoden 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 mechanischen Eigenschaften periodisch variiert werden. Diese strukturierten Oberflächen können unter anderem in der Biotechnologie, in der Photonik und in der Tribologie eingesetzt werden. Darüber hinaus ist die Gruppe auch in der Lage, Systemkonzepte für die flächige Bearbeitung einschließlich der benötigten speziellen Bearbeitungsköpfe zu entwickeln.



GRUPPENLEITER HIGH-SPEED-LASERBEARBEITUNG

DR. JAN HAUPTMANN

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



ABTEILUNGSLEITER

DR. ANDREAS WETZIG

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



GRUPPENLEITER SCHNEIDEN

DR. ANDREAS WETZIG

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



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2013

1. Systemtechnik für die hochdynamische Strahlablenkung	90
2. Zeitaufgelöste Charakterisierung von Laseroptiken	92
3. Prozesscharakterisierung beim Laserstrahlschmelzschnitten	94
4. Eigenschaftencharakterisierung laserbearbeiteter Laserverbundbauteile	96
5. Laserstrukturieren zur Erzeugung von Interferenz-Farbeffekten	98
6. Generieren von Hohlfasern für Bioreaktorsysteme durch 2-Photonen-Polymerisation	100
7. Punktgenaue Dosierung und Detektion in Lab-on-a-Chip-Systemen	102

GRUPPENLEITER MIKROBEARBEITEN

DR. UDO KLOTZBACH

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



GRUPPENLEITER OBERFLÄCHENFUNKTIONALISIERUNG

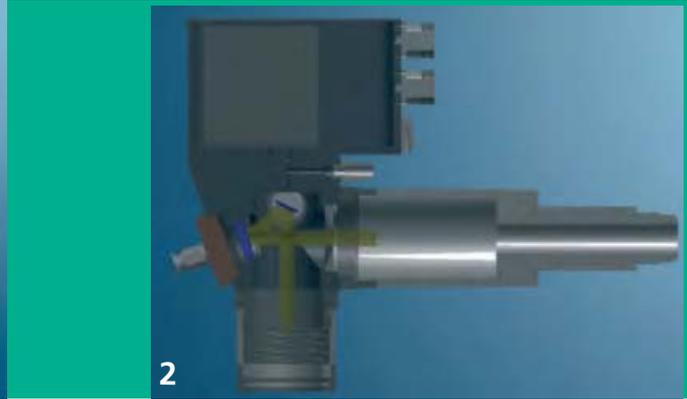
PROF. ANDRÉS-FABIÁN LASAGNI

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





1



2

SYSTEMTECHNIK FÜR DIE HOCHDYNAMISCHE STRAHLABLENKUNG

DIE AUFGABE

Während Scannersysteme noch vor ca. 10 Jahren ausschließlich für Markieraufgaben mit gepulsten Lasern zum Einsatz kamen, werden aktuell cw-Laserleistungen von 6 kW und mehr über mittels Galvanometer angetriebene, verkippbare Spiegel abgelenkt. Zu den Einsatzgebieten der Scannertechnik zählen heute auch das Laserstrahlschweißen, das Sublimationsschneiden von Metallen, Textilien und Verbundmaterialien und die dynamische Strahlformung zur Laseroberflächenveredlung.

Die hierfür geeignete Systemtechnik muss dabei unterschiedliche technische Anforderungen erfüllen. Aufgrund der Vielzahl an Auslegungsmöglichkeiten und Systemanbietern gestaltet sich die Auswahl des für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Systems jedoch schwierig. Das Fraunhofer IWS hat sich deshalb zur Aufgabe gemacht, wissenschaftlich fundierte Ansätze zu erarbeiten, die eine Klassifizierung der Bearbeitungssysteme ermöglichen.

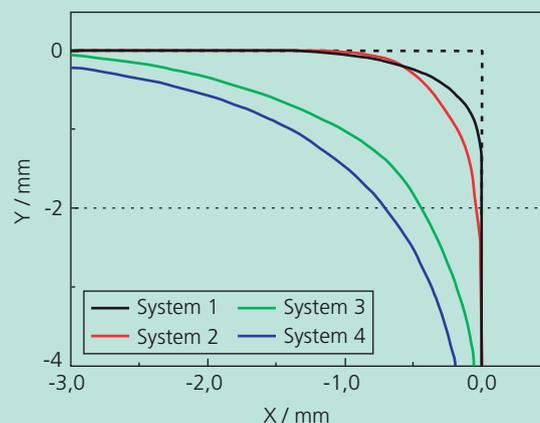
UNSERE LÖSUNG

Die hochdynamischen Achssysteme für die Bearbeitung mit Laserstrahlung im kW-Bereich verfügen über ein unterschiedliches Optikdesign. Man unterscheidet zwischen »pre-objective« und »post-objective« scanning. Der für den Prozess relevante Fokussdurchmesser wird durch die Strahlqualität des Lasers, die Strahlapertur sowie die Brennweite des Optiksystems bestimmt.

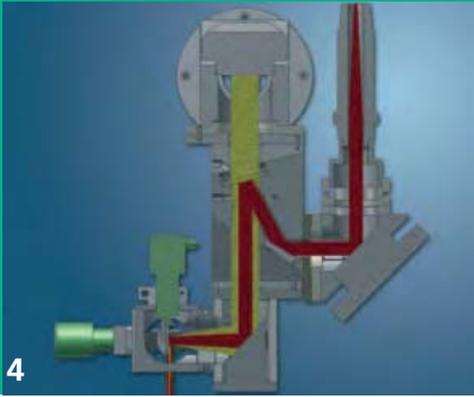
Zu den charakteristischen Kenngrößen zählen außerdem die Arbeitsfeldgröße und der Arbeitsabstand zur Fokusebene. Dieser bestimmt neben der Spiegelmasse maßgeblich die Dynamikeigenschaften des Strahlspots auf dem Bauteil. Zwar können mit am Markt verfügbaren Systemen Bearbeitungsgeschwindigkeiten bis 20 m s^{-1} umgesetzt werden, jedoch ergeben sich auch bei Scannersystemen Limitationen in der maximalen Dynamik.

Beim Vergleich der Bearbeitungssysteme können einerseits die oben genannten technischen Spezifikation herangezogen werden. Aber auch die Art und Flexibilität der Ansteuerung der Achsantriebe entscheidet über die Einsetzbarkeit für die spezifische Anwendung. Für den konkreten Fall des Dynamikvergleiches verschiedener Scannersysteme wurden deshalb Messroutinen entwickelt, die anhand von Referenzkonturen die dynamikabhängige Positionsabweichung quantifizieren können (Abb. 3 u. 6).

X-Y-Plot beim Abfahren einer 90°-Ecke mit Sollgeschwindigkeit $v = 15 \text{ m s}^{-1}$



3



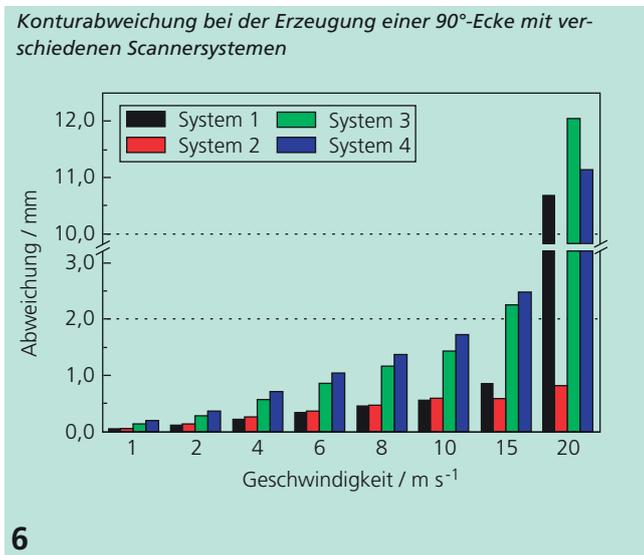
Dabei werden im einfachsten Fall die Soll- und Ist-Positionsdaten verglichen. Sollte das System keine Möglichkeit der externen Positionssignalauswertung besitzen, werden Referenzgravuren mit schnell gepulsten Lasern vermessen. Das Dynamikverhalten bei harmonischer Schwingung wird über die Ermittlung eines Amplituden-Frequenzganges (Bode-Diagramm) charakterisiert. Die Entwicklung einer Familie von Ansteuerungsmodulen, die Strahlablensysteme verschiedener Hersteller ansprechen, war ebenfalls Grundvoraussetzung für den Systemvergleich.

ERGEBNISSE

Basierend auf den Erfahrungen zum Einsatz von Galvanometerscannern für die Lasermakromaterialbearbeitung wurde eine Datenbank konzipiert und umgesetzt. In dieser werden sowohl am Fraunhofer IWS vorhandene, als auch am Markt verfügbare Scansysteme nach den von den Herstellern gelieferten technischen Spezifikationen eingeordnet. Zusatzmodule ermöglichen den Nutzern dann die Berechnung der erzielbaren Spotdurchmesser bzw. -intensitäten bei Verwendung von Lasern unterschiedlicher Strahlqualität.

Sind aufgrund der konkreten Anwendung die geforderten Daten wie Arbeitsfeldgröße, Spotdurchmesser und Dynamik gegeben, so steht dem Nutzer ein Leitfaden zur Auslegung eines »idealen« Scannersystems zur Verfügung. Durch Wichtung der Kriterien können damit die entsprechend auf dem Markt verfügbaren Systeme ausgewählt werden oder es wird der Aufbau eines Spezial-Optikdesigns empfohlen. Hierbei kann die Arbeitsgruppe High-Speed-Laserbearbeitung auf ihre Expertise bei der Entwicklung applikationsangepasster Scannersysteme in zahlreichen erfolgreichen Industrieprojekten zurückgreifen (siehe Abb. 1, 2, 5).

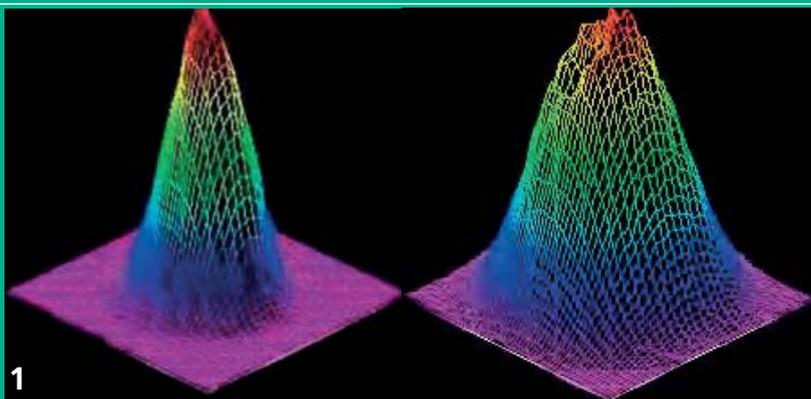
- 1/2 1D-Strahlablensystem mit scannerpositionsabhängiger Laserleistungssteuerung: Umsetzung und Prinzip
- 4/5 Multi-Wavelength-Optik zur Bearbeitung von Composite-Materialien: Prinzip und Umsetzung



KONTAKT

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





ZEITAUFGELÖSTE CHARAKTERISIERUNG VON LASEROPTIKEN

DIE AUFGABE

Der Laser als Werkzeug ist stets als Kombination aus Strahlquelle, Strahlübertragung und Bearbeitungsoptik zu betrachten. Für gute Prozessergebnisse muss die eingesetzte Optik in der Lage sein, die Qualität der Laseremission zu erhalten und den Strahl für den Bearbeitungsprozess zu formen. Angesichts der Verfügbarkeit von beugungsbegrenzten Strahlquellen bis 10 kW, im low-order Bereich sogar bis 100 kW, erreichen transmittierende Optiken die Grenzen einer thermisch stabilen Strahlformung. Das stellt Hersteller von Laseroptiken und Laseranwender gleichermaßen vor neue Herausforderungen und erfordert die genaue Bestimmung des Istzustandes sowie den reproduzierbaren Nachweis der durchgeführten Optimierungen im Bereich der Substratwerkstoffe, Beschichtungen und Formgebung der Elemente.

Die Laserstrahl diagnose ist eine gängige Methode zur Charakterisierung und Beschreibung von Abbildungsparametern der eingesetzten Laserstrahlquellen und Optiken. Mit Hilfe der dreidimensionalen Vermessung der Intensitätsverteilung des Laserstrahles im Arbeitspunkt können Veränderung der Abbildungsparameter ermittelt werden, die aus dem Zusammenwirken von Laser und Optik resultieren.

Für die Entwicklung strahlformender Optiken besteht Bedarf an einem Messverfahren, welches sich auf die Aberrationen des Einzelelementes beschränkt und von zusätzlichen Störgrößen benachbarter optischer Elemente und dem Laserstrahl selbst entkoppelt ist. Dabei ist die zeitaufgelöste Messung der Aberration und deren eindeutige Zuordnung von größter

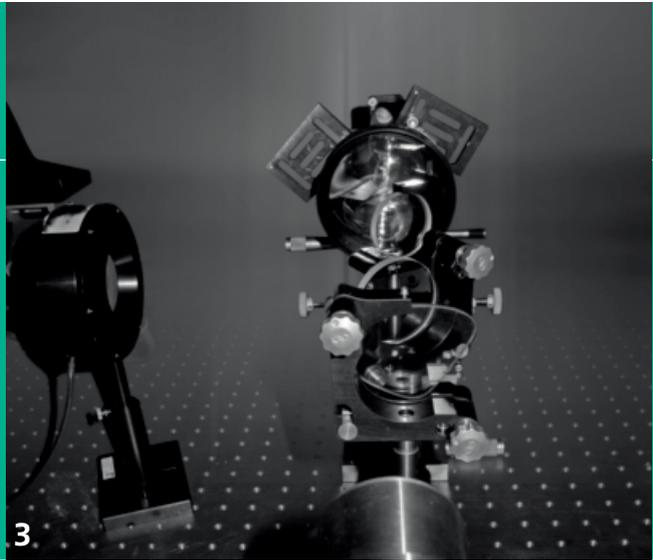
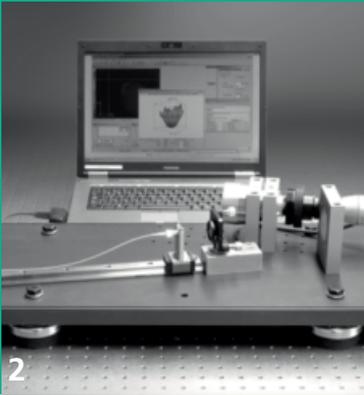
Bedeutung, da die laserinduzierte Änderung der Fokusslage, durch Absorption, Erwärmung und Brechzahländerung hervorgerufen wird. Diese Gradienten zeigen vor allem zu Beginn der Laserstrahleinwirkung ein signifikant instationäres Verhalten, bedingt durch Wärmeleitung und Kühlung.

UNSERE LÖSUNG

Auf Basis eines Wellenfrontsensors nach Hartmann und Shack wurde am Fraunhofer IWS Dresden ein Messaufbau entwickelt, welcher die Änderung der Wellenfrontkrümmung erfasst. Dies ermöglicht die Darstellung verschiedener Abbildungsfehler in zeitlich aufgelöster Form.

Die Hardware, bestehend aus CCD-Kamera und Linsenarray, ist modular aufgebaut und an die Erfordernisse der Messfrequenz anpassbar. Die Generierung der Messwerte erfolgt softwareseitig durch Auswertung der aufgezeichneten Änderung des Messarrays. Da die Belastbarkeit von CCD-Sensoren nur einige Mikrowatt beträgt, wird ein Messstrahl mit differierender Wellenlänge und geringer Laserleistung eingesetzt. In Verbindung mit dichroitischen Strahlteilern und reflektierenden Bandpassfiltern ermöglicht dies die entkoppelte Messung der Bearbeitungsoptiken oder deren Einzelkomponenten.

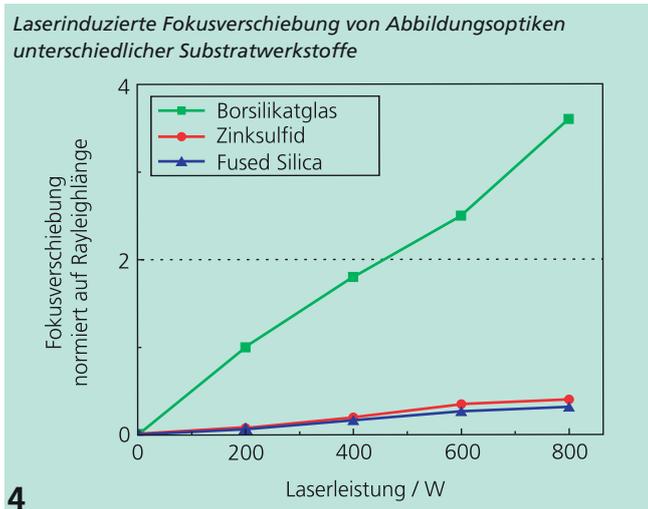
Als Messergebnis werden die zeitliche Änderung von Fokussierbrennweite und sphärischer Aberration, aber auch Abbildungsfehler höherer Ordnung je nach Anforderung extrahiert. Durch einen Umbau des Messaufbaus ist ebenfalls die Messung von Spiegeloptiken möglich.



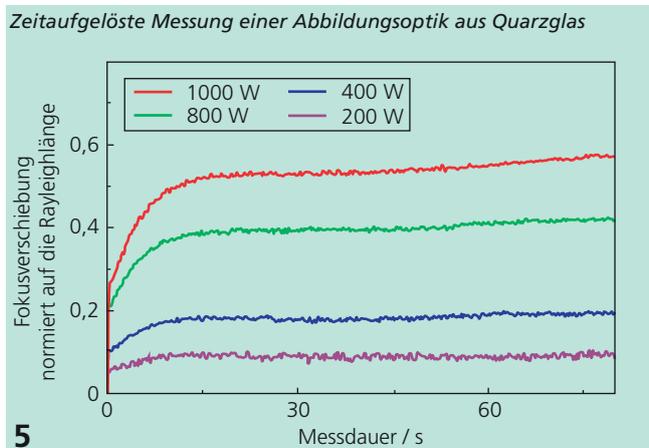
ERGEBNISSE

Alleinstellungsmerkmal der neuen Messmethode ist die Ermittlung des Abbildungsverhaltens in beliebiger zeitlicher Auflösung. Zudem können einzelne optische Komponenten des abbildenden Systems separiert und gesondert betrachtet werden.

Abbildung 4 vergleicht die Fokusverschiebung für Linsensysteme unterschiedlicher Substratwerkstoffe in bisher üblicher Form. Die prozessbezogene Bewertung einer Bearbeitungsoptik (z. B. für das Remote-Schneiden) ist auf dieser Basis nur bedingt möglich. Die zeitlich aufgelöste Messung der Quarzglasoptik in Abbildung 5 lässt hingegen prozessrelevante Erkenntnisse für bestimmte Zeitpunkte des Bearbeitungsprozesses zu.



die Berücksichtigung in der Verfahrensentwicklung und somit eine Erhöhung der Prozessstabilität. Der entwickelte Messplatz zur zeitaufgelösten Messung sowie die Verfügbarkeit eines breiten Spektrums an Lasergeräten für die Materialbearbeitung und neuester Messgeräte für die Strahldiagnose ermöglichen es dem Fraunhofer IWS Dresden, neue Linsensubstrate, Beschichtungen und komplette Bearbeitungsoptiken zu charakterisieren und zu validieren. In Verbindung mit einer umfangreichen Datenbasis an vermessenen, vorwiegend kommerziellen Systemen kann eine umfassende und anbieterunabhängige Beratung garantiert werden.



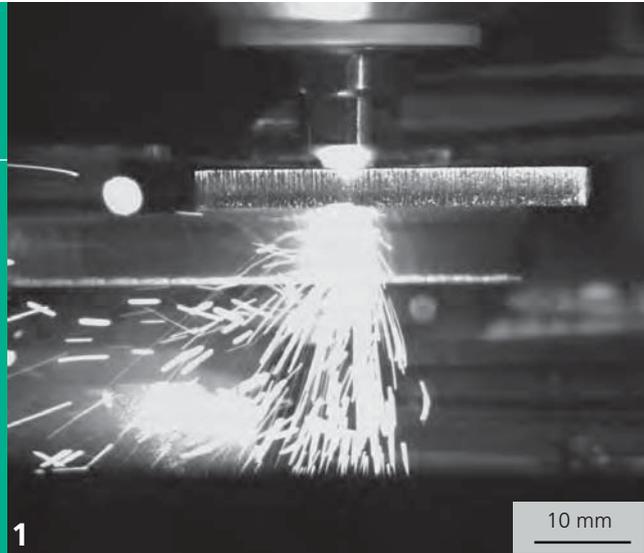
- 1 Intensitätsverteilungen in der Brennebene einer Fokussieroptik
- 2 Wellenfrontsensor-Messplatz zur Vermessung transmittierender Einzelelemente
- 3 Experimentalaufbau Wellenfrontsensor

Ferner besteht die Möglichkeit, komplexe Bearbeitungsregimes zu simulieren und somit die zu erwartende Änderung der optischen Abbildung für die spätere Anwendung abzuschätzen. Die Beschränkung auf einzelne Linsen erlaubt den Vergleich unterschiedlicher Beschichtungen und Werkstoffe und somit die gezielte Optimierung von optischen Systemen. Die Bestimmung der thermischen Zeitkonstanten ermöglicht

KONTAKT

Dipl.-Ing. Patrick Herwig
 Tel.: +49 351 83391-3199
 patrick.herwig@iws.fraunhofer.de





PROZESSCHARAKTERISIERUNG BEIM LASERSTRAHLSCHMELZSCHNEIDEN

DIE AUFGABE

Das Laserstrahlschmelzschneiden ist ein weithin eingesetztes Verfahren zum Trennen u.a. metallischer Materialien. Durch den Einsatz von Festkörperlasern als Strahlquelle verändern sich Prozessabläufe im Vergleich zum CO₂-Laser. Die bisher verfügbaren Sensorsysteme zur Prozessüberwachung sind nicht mehr oder nur noch beschränkt einsetzbar. Für Qualitätsmanagementsysteme in vollautomatischen Produktionsabläufen ergeben sich daraus neue Herausforderungen.

Wünschenswert ist die Erkennung von Ausschussteilen nach verschiedenen Kriterien. So wird z.B. bei einem kompletten Prozessabbriss ein Teil nicht durchgängig geschnitten und für nachfolgende Produktionsschritte unbrauchbar. Aber auch eine partiell verminderte Schnittkantenqualität kann ein Ausschusskriterium sein. Um Ausschussteile automatisch aussortieren zu können, ist eine Überwachung erforderlich, die den Schneidprozess analysieren und die zu erwartende Schnittqualität erkennen kann. Optimalerweise ist die Überwachung mit einer Eingriffsmöglichkeit in den Prozess verbunden, die die Schnittqualität schnell und wirkungsvoll korrigieren kann.

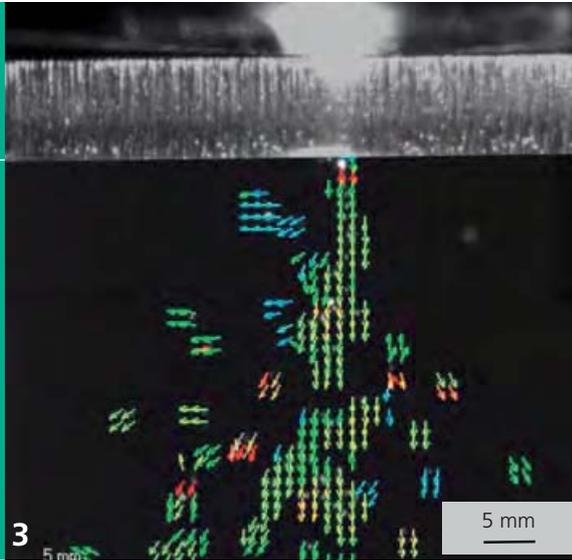
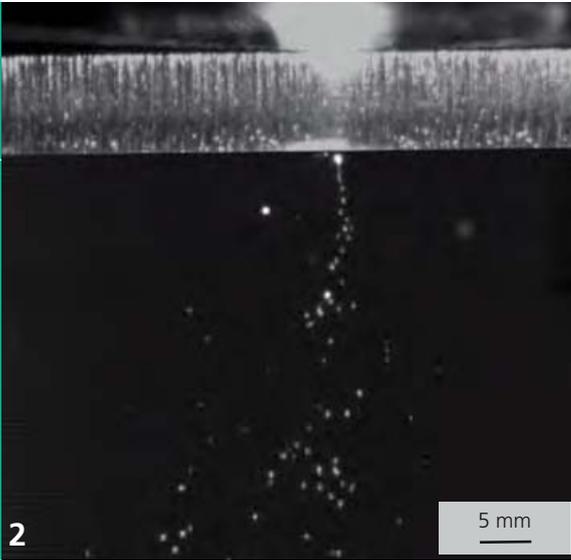
Die Gestaltung solch eines intelligenten Schneidprozesses bedingt ein tiefes Prozessverständnis sowie die Kenntnis sinnvoller Beurteilungskriterien zur Charakterisierung des aktuellen Prozesszustandes. Daher stellt sich die Frage nach geeigneten Methoden, um unterschiedliche Prozesszustände zuverlässig erkennen zu können. Diese Methoden müssen schnell, robust und an die besonderen Randbedingungen beim Laserstrahlschneiden angepasst sein.

UNSERE LÖSUNG

Generell sind unterschiedliche Methoden der Prozessbeobachtung denkbar. Am praktikabelsten erscheinen die Systeme, die koaxial im Strahlengang untergebracht werden können. Dabei sind zum Beispiel Sensoren einsetzbar, die das abgestrahlte Prozesslicht aufzeichnen. Für einige grundlegende Betrachtungen lassen sich aber auch andere Techniken anwenden.

Einen Ansatz stellt dabei die Analyse des Schmelzaustriebes aus der Schnittfuge dar. Abhängig vom Prozesszustand (und damit von der resultierenden Kantenqualität) stellen sich hierbei unterschiedliche Eigenschaften ein. In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Dresden wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Schmelzaustriebes einer PIV-Analyse (Particle Image Velocimetry) unterzogen. Dabei zeigten sich eindeutige Zusammenhänge zwischen der Ausbreitungsrichtung der Schmelze, der Geschwindigkeit, der örtlichen Partikelverteilung und der resultierenden Schnittkantenqualität.

Einen weiteren Ansatz stellt die koaxiale Betrachtung und Analyse des abgestrahlten Prozesslichtes dar. Dabei kann eine spektrale Auswertung Aufschluss darüber geben, inwieweit sich ein instabiler von einem stabilen Schneidprozess unterscheidet. Beim CO₂-Laser wird der Schneidprozess bekanntermaßen durch ein entstehendes Plasma massiv beeinflusst. Ob diese Effekte beim Festkörperlaser ebenfalls eine Rolle spielen, lässt sich durch eine Prozessbetrachtung mittels Spektrometer feststellen.



ERGEBNISSE

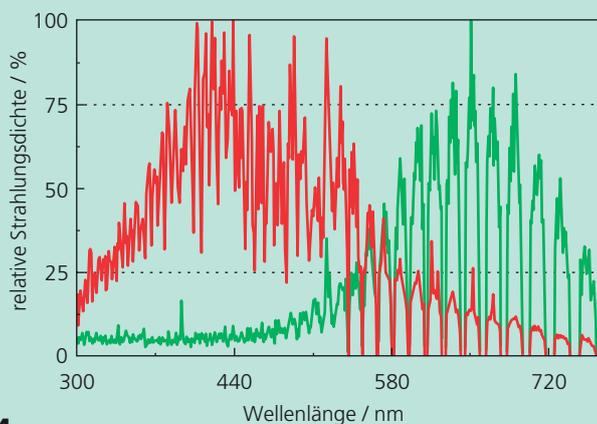
Im Rahmen der Untersuchungen wurden v.a. Schneidprozesse an CrNi-Stählen betrachtet. Dazu wurde ausschließlich kommerziell verfügbare Hardware eingesetzt. Als Strahlquelle diente ein 4 kW-Faserlaser und es wurden Standard-Optiken verwendet, die lediglich um die Möglichkeit zur coaxialen Prozessbeobachtung erweitert wurden. Als Sensor kamen High-Speed Kameras, Spektrometer sowie Photodioden mit unterschiedlichen Detektoren zum Einsatz. Zur Beurteilung der Prozessabläufe wurden die jeweils aufgezeichneten Signale mit der erzielten Schnittqualität korreliert. Durch die Variation relevanter Schneidparameter konnten Zusammenhänge zwischen der Signalcharakteristik und dem Schneidergebnis hergestellt werden.

Diese Ergebnisse lassen sich einerseits für Plausibilitätsprüfungen von Simulationsrechnungen verwenden und bilden andererseits eine Basis für die Umsetzung in industrietaug-

lichen Systemen. Hierfür bieten sich vor allem einfache Photodioden an, eine spektral aufgelöste Betrachtung ist nicht zwingend notwendig. Generell konnten mit den untersuchten Methoden erste Erfolge in Richtung Prozesscharakterisierung erzielt werden. Während die Erkennung eines Prozessabrisse vergleichsweise einfach ist, verlangt eine eindeutige Erkennung der Schnittqualität nach weiteren Untersuchungen. Eine grobe Zuordnung des Prozesses zu einem stabilen oder instabilen Zustand, der i. d. R. mit einer verminderten Schnittqualität einhergeht, ist dabei ein Schritt in die richtige Richtung. Diese Zuordnung ließ sich sowohl über eine Analyse des Prozesslichtes, als auch über die PIV-Analyse realisieren.

Um detailliertere Aussagen zum Prozesszustand zu erhalten, muss sowohl die Detektionsmethode als auch die Auswertung der Signale weiter verfeinert werden. Perspektivisch werden die untersuchten Ansätze aber durchaus zum Aufbau von Prozessregelungen oder zur Qualitätssicherung bei Schneidprozessen genutzt werden. Die Einsatzmöglichkeiten reichen dabei von der Mikrobearbeitung (z. B. Feinschneiden) bis hin zur Makrobearbeitung (z. B. klassisches Schmelzschnitten).

Spektren eines instabilen (rot) und eines stabilen (grün) Schneidprozesses bei Verwendung eines 4 kW Faserlaser (Stahlsubstrat X5CrNi18-10, Dicke 12 mm)

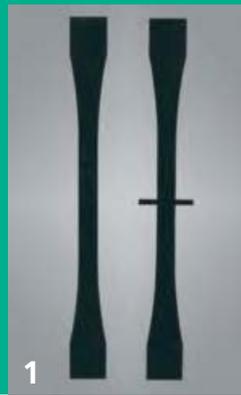


- 1 *Übersichtsaufnahme Schmelzaustrieb*
- 2 *High-Speed-Aufnahme*
- 3 *PIV-Auswertung*

KONTAKT

Dipl.-Ing. Thomas Pinder
 Tel.: +49 351 83391-3202
 thomas.pinder@iws.fraunhofer.de





EIGENSCHAFTSCHARAKTERISIERUNG LASER-BEARBEITETER FASERVERBUNDBAUTEILE

DIE AUFGABE

Eine Steigerung der Anteile von Faserkunststoffverbunden (FKV) wird nicht nur in der Automobil- und Luftfahrtindustrie angestrebt, sondern zunehmend auch im klassischen Maschinenbau. Die spezifischen Eigenschaften von FKV werden hier vor allem ausgenutzt, um hochpräzise und leichte Bauteile bei gleichzeitig hohen spezifischen Steifigkeiten zu erhalten. Auch der geringe thermische Ausdehnungskoeffizient von Kohlenstofffasern (CF) ist häufig von Vorteil.

Die Verbesserung und Optimierung bestehender Produktionsprozesse und -verfahren sind die größten Herausforderungen, die unter anderem durch den Einsatz von Lasertechnik erfüllt werden können. Um die Reproduzierbarkeit der entwickelten Prozesstechnologien zu gewährleisten, ist allerdings ein hohes Maß an Verständnis der Wechselwirkung zwischen Laser und Material unabdingbar. Dies schließt auch die Kenntnis über Materialeigenschaften und deren Veränderung durch die Laserbehandlung ein.

FKV sind durch eine Vielzahl von Einzelschichten gekennzeichnet, die in ihrer Gesamtheit Einfluss auf das Materialverhalten haben. Durch Laserstrahlung ausgelöste thermische Effekte in der Einzelschicht beeinflussen somit generell auch den Gesamtverbund. Aufgrund der anisotropen Eigenschaften von FKV muss bei der Laserbearbeitung mit dem Eindringen von Wärme in die Bauteile gerechnet werden.

Neben der Zerstörung von Matrixmaterial und dem Freilegen von Einzelfasern sind auch die Überschreitung der Glasübergangstemperatur des Matrixmaterials und die Zerstörung der auf den Fasern befindlichen Schichten unerwünschte Schäden.

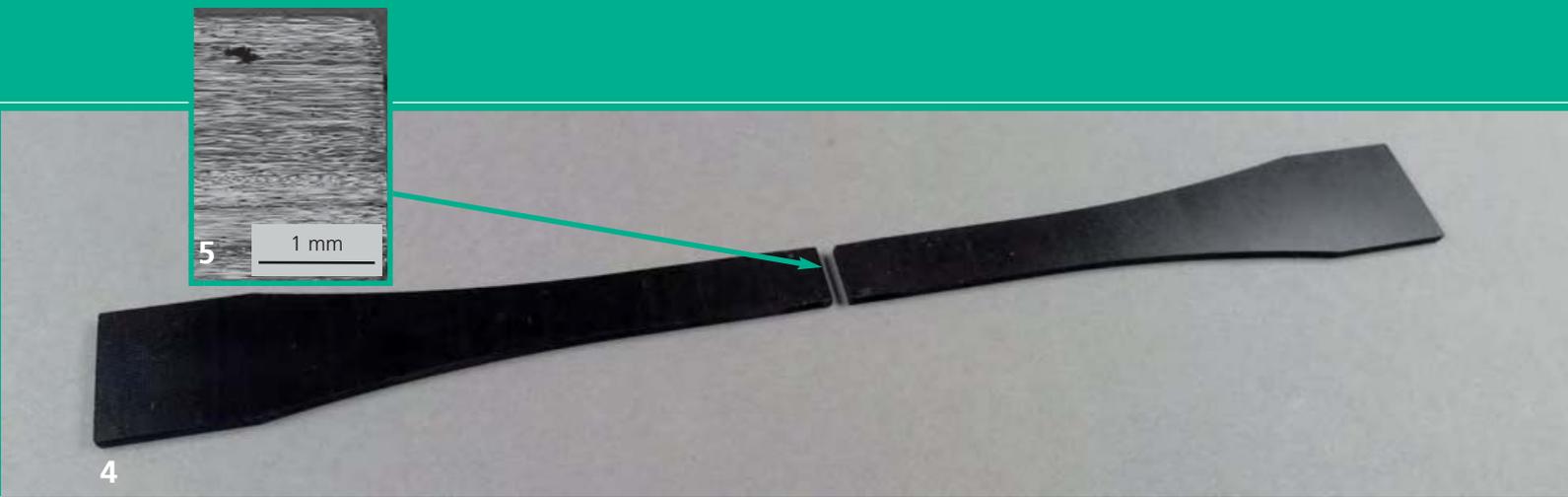
Daraus resultiert meist eine Verringerung der Faser-Matrixhaftung. Als festigkeitsentscheidender Schädigungsmechanismus für FKV wurde der Zwischenfaserbruch, hervorgerufen durch die Veränderung von Faser-Matrixhaftung erkannt. Gesucht wird nun ein Prüfverfahren, welches das Versagen von Probekörpern gezielt darauf reduziert.

UNSERE LÖSUNG

Die Lösung des Fraunhofer IWS Dresden beruht auf einer Zugprüfung mit einem Probekörper, der das Versagen des Materials auf den Zwischenfaserbruch begrenzt.

Die zu verwendenden Proben sind durch einen unidirektionalen Lagenaufbau gekennzeichnet, dessen Faserorientierung quer zur Beanspruchungsrichtung angeordnet ist. Abbildung 1 rechts zeigt einen Probekörper aus kohlenstofffaserverstärktem Epoxydharz mit mittig angeordnetem Opferlaminat, welches mittels Remote-Laserstrahlschneiden abgetrennt wird. Die dabei durch Wärmeleitung in den Probekörper eindringende Wärmemenge führt zu einem Matrixrückzug und zu Veränderungen der Faser-Matrix-Haftung, ohne den Probekörper geometrisch zu verändern. Durch die thermische Beeinflussung ist von einer Verkleinerung des tragfähigen Querschnittes auszugehen, der sich auf die Versagensspannung des Probekörpers auswirkt.

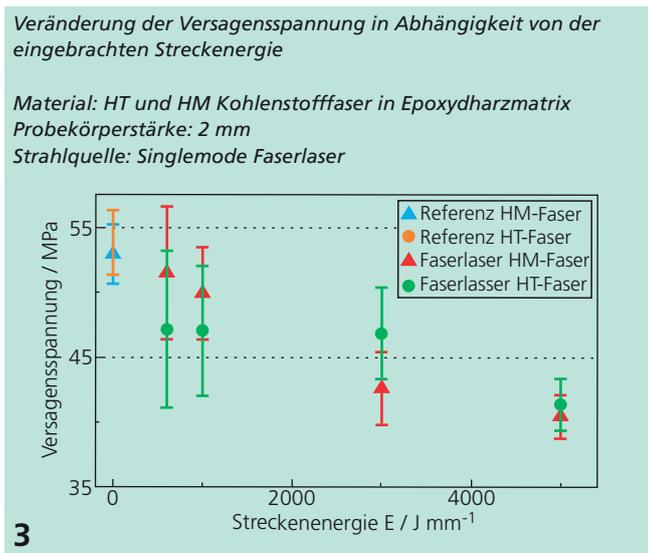
In den bisherigen Untersuchungen diente ein brillanter Hochleistungsfaserlaser mit 5 kW Laserleistung als Strahlquelle zum Abtrennen des Opferlaminats. Parameter wie Intensität und eingebrachte Streckenenergie wurden variiert.



ERGEBNISSE

Mit einer Zugprüfmaschine (Abb. 2) erfolgte die Belastung der Probekörper bis zum Bruch ($F_{\max} = 50 \text{ kN}$). Über die Bestimmung des Anfangsquerschnittes der Probekörper kann auf die Versagensspannung geschlossen werden. In Abbildung 3 ist für Prüfserien mit einer Standardkohlenstofffaser (HT-Faser) und einer hochmoduligen Kohlenstofffaser (HM-Faser) die Versagensspannung in Abhängigkeit von der Streckenenergie der Laserbearbeitung beispielhaft dargestellt.

Die durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass der hier vorgestellte Zugversuch die aus der Laserbearbeitung resultierenden Einflüsse quantitativ nachweisen kann. Dabei geben die Balken den Bereich an, in dem 95 % aller Messwerte zu erwarten sind. Die für das Laserschneiden gefundenen Parameter kommen der Versagensspannung einer ungeschädigten Prüfserie (vollständig wasserstrahl-geschnittene Probenserie = Referenz) bereits sehr nahe.



Insbesondere die hochmoduligen Kohlenstofffasern zeichnen sich neben ihrer hohen Steifigkeit durch eine sehr hohe Wärmeleitung in Faserlängsrichtung aus, was bei der Laserbearbeitung zu einer großen thermisch beeinflussten Zone führen kann. Ziel muss es deshalb sein, die Streckenenergie zu verringern. Dies geht direkt mit der Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit einher.

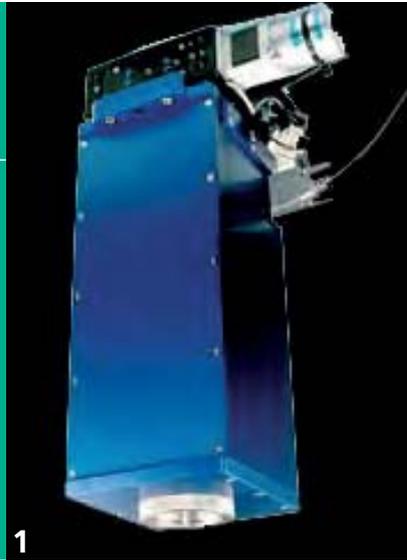
Durch den Einsatz von Galvanometerscannern sind Spotvorschubgeschwindigkeiten von bis zu 10 m s^{-1} möglich, die die Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Material deutlich minimieren, was mit einer Verringerung der in das Material eingebrachten Streckenenergie einhergeht. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass durch optimale Laser-Schneidparameter die thermische Schädigung nahezu keinen Einfluss auf das Festigkeitsverhalten hat, selbst beim Trennen von hochmoduligen Kohlenstofffasern.

- 1 *Prüfkörper aus CFK*
links: wasserstrahlgeschnitten
rechts: Probekörper mit Opferlaminat vor dem Laserstrahlschneiden
- 2 *In Zugprüfmaschine eingespannter Probekörper*
- 4 *Laserbearbeiteter und geprüfter Probekörper*
- 5 *Querschliff der Wärmeeinflusszone*

KONTAKT

Dipl.-Ing. Andreas Fürst
 Tel.: +49 351 83391-3544
 andreas.fuerst@iws.fraunhofer.de





LASERSTRUKTURIEREN ZUR ERZEUGUNG VON INTERFERENZ-FARBEFFEKTEN

DIE AUFGABE

Durch periodische Oberflächenstrukturen können optische Farbeffekte erzeugt werden ohne Farbstoffe benutzen zu müssen. Diese können als attraktiver Produktschutz oder auch als Designelement dienen.

Bisher ist die direkte Herstellung selbst monochromer Farbeffekte auf 2D- oder 3D-Oberflächen sehr aufwendig oder gar unmöglich. Bei lithografischen Techniken wird beispielsweise ein Fotolack auf das Substrat aufgetragen, belichtet und anschließend entwickelt, so dass gewisse Stellen des Substrats freiliegen. Die Strukturgebung erfolgt anschließend durch selektives Ätzen der Oberfläche.

Ein Problem an lithographischen Methoden ist, dass durch die vielen Zwischenschritte die Produktion sehr teuer ist. Außerdem ist diese Technologie nur bedingt auf 3D-Bauteilen anwendbar.

UNSERE LÖSUNG

Eine Lösung für die Herstellung von periodischen Strukturen auf 3D-Bauteilen stellt die direkte Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) dar. Mit Hilfe dieser Methode ist es möglich, hochgradig exakte Strukturen auf verschiedenen Oberflächen ohne Zwischenschritte und ohne Einsatz von Chemikalien zu erzeugen. Die sichtbaren Farbeffekte ergeben sich sowohl aus dem Betrachtungswinkel als auch der erzeugten Periode auf der Oberfläche.

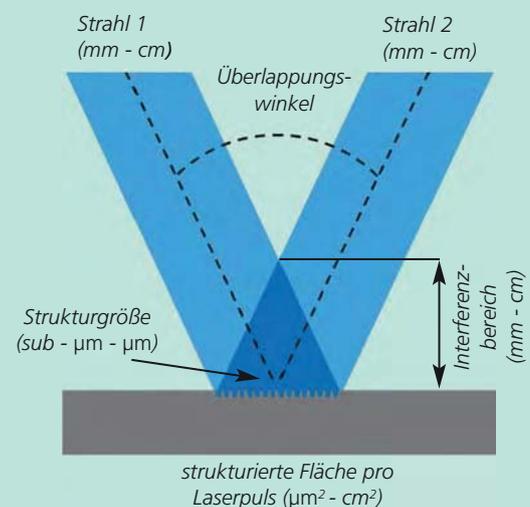
Bei der Laserinterferenzstrukturierung wird ein Laserstrahl mit optischen Bauelementen in mehrere Teilstrahlen aufgeteilt und anschließend unter einem bestimmten Winkel wieder über-

lappt (Abb. 2). Der Überlappwinkel und die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts bestimmen die resultierende Periode der Strukturen. Es lassen sich Strukturen von 75 nm bis 50 μm Größe herstellen.

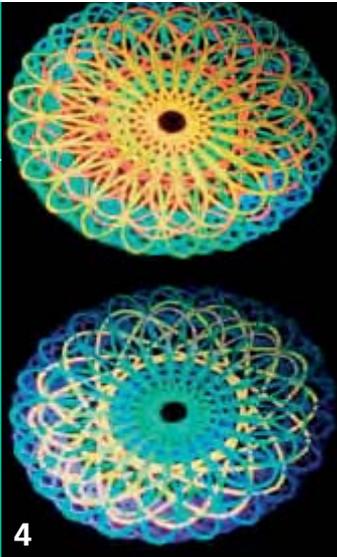
Um effizient und flexibel vielfältige Arten von Motiven erzeugen zu können, wurden am Fraunhofer IWS Dresden neue Optikkonzepte entwickelt. Diese ermöglichen es erstmalig, automatisiert und effizient 2D- und 3D-Bauteilen zu strukturieren (Abb. 1).

Die Optiken können außerdem entsprechend der Kundenwünsche modifiziert werden, um die Submikro- und Mikrostrukturierung unterschiedlicher Materialien zu gewährleisten. Damit ist es möglich, mehrere Perioden in einem Prozessschritt automatisch zu erzeugen.

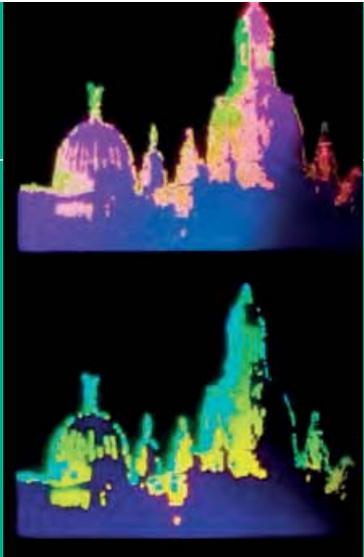
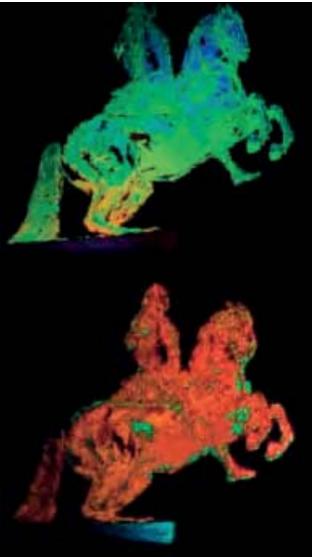
Prinzipdarstellung der direkten Laserinterferenzstrukturierung für zwei Laserstrahlen



2



4



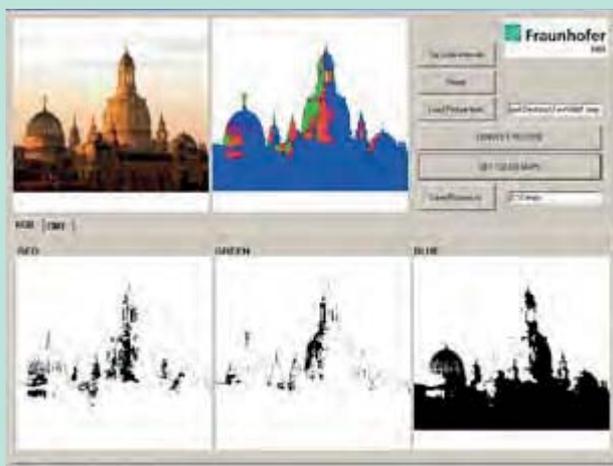
ERGEBNISSE

Die neu entwickelte Interferenzoptik am Fraunhofer IWS Dresden ermöglicht das Generieren von frei wählbaren optischen Motiven. Hierbei kann nicht nur die Strukturperiode sondern auch die Strukturorientierung variiert werden. Dadurch ist eine große Bandbreite von Oberflächenstrukturen mit nur einem optischen System realisierbar.

Dies erhöht die Komplexität und damit die Fälschungssicherheit sowie die Designmöglichkeiten derartiger Motive.

Mit dem Verfahren können Metalle, Polymere, Keramiken oder auch unterschiedliche Beschichtungen bearbeitet werden. Beispiele derart erzeugter Strukturen auf einer Nickelfolie sind in Abb. 4 und auf dem Titelbild dargestellt.

Software-Tool zur Umwandlung von Bitmaps



3

Bei der Umwandlung eines Motives in ein Interferenzbild werden die verschiedenen Farben des Motivs mit Hilfe von Standardsoftware zuerst in Rastergrafiken umgewandelt (Abb. 3). Jedes Pixel der Rastergrafik entspricht hierbei der Strukturierung mit einem Laserpuls. Den unterschiedlichen Farben des ursprünglichen Motivs werden definierte Strukturperioden zugeordnet. Die verschiedenen Perioden in einem Motiv erzeugen unter einem bestimmten Betrachtungswinkel vorgegebene Farben.

- 1 *Bearbeitungskopf für das direkte Laserinterferenzstrukturieren (DLIP)*
- 4 *Beispiele DLIP strukturierter Nickelfolien mit variierenden Motiven*

KONTAKT

Dipl.-Ing. Sebastian Eckhardt
Tel.: +49 351 83391-3521

sebastian.eckhardt@iws.fraunhofer.de





GENERIEREN VON HOHLFASERN FÜR BIO-REAKTORSYSTEME DURCH 2-PHOTONEN-POLYMERISATION

DIE AUFGABE

Jedes Jahr werden weltweit Millionen Tiere für Medikamententests genutzt. Nicht nur aus Gründen des Tierschutzes sind diese Tests umstritten. Im Vergleich zum menschlichen Körper können auch veränderte oder verfälschte Wirkungen auftreten. Weil Wirkstoffe jedoch nicht am Menschen getestet werden können, müssen Alternativen geschaffen werden, um die Anzahl der Tierversuche zu reduzieren.

Eine Möglichkeit zum Testen von Substanzen bieten Multi-Organ-Chips (MOC), wo in mehreren Kammern unterschiedliche lebende Zellen kultiviert werden können. Derzeit sind diese Zellkulturräume untereinander durch kleine Kanäle verbunden. Um in diesem System komplexere Zellkulturen untersuchen zu können, ist jedoch ein Versorgungssystem ähnlich den menschlichen Blutgefäßen notwendig.

Für erste Studien in einem auf dem MOC-System basierenden Perfusion-Mikro-Bioreaktor wurden biokompatible alginatbasierte Hohlfasern eingesetzt. Zur Herstellung dieser Hohlfasern diente ein 3D-Scaffold-Drucker. Um ein menschliches Blutgefäß nachzubilden, kamen Human Dermal Microvascular Endothelial (HDME) Zellen zur Anwendung. Bei diesem Versuch wurde eine unzureichende Biokompatibilität festgestellt. Die HDME-Zellen starben durch die hohe Konzentration des eingesetzten Vernetzermittels Calciumchlorid ab. Um biokompatible Hohlfasern und Hohlfasernetzwerke zu generieren, die dem natürlichen Gefäßnetz des Menschen entsprechen, bedarf es deshalb einer neuen Technologie.

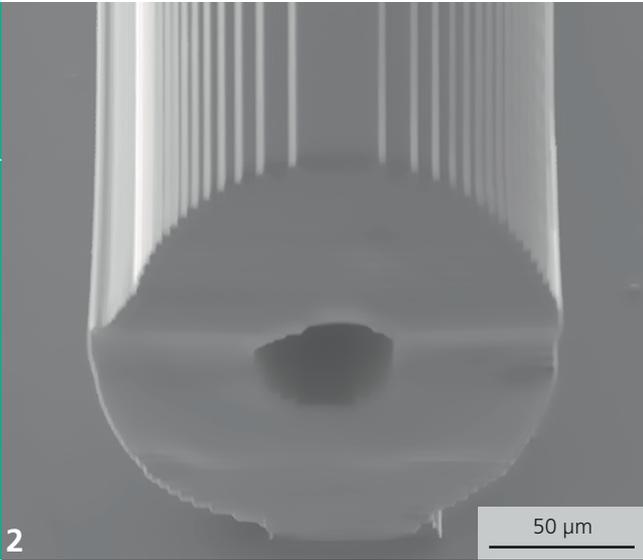
UNSERE LÖSUNG

Der Lösungsansatz am Fraunhofer IWS bietet die Einbettung des Hohlfasernetzwerks in ein Perfusions-Mikro-Bioreaktorsystem über ein biokompatibles Polymer, das mittels 2-Photonen-Polymerisation bei Raumtemperatur vernetzt.

Die 2-Photonen-Polymerisation ist ein laserbasiertes Verfahren zur Erzeugung von echten 3D-Mikrostrukturen mit ultrakurzen Laserpulsen. Die extrem hohen Photonendichten, die der Prozess erfordert, sind durch den Einsatz eines gepulsten Femtosekundenlasers verfügbar. Durch nichtlineare Absorption hochintensiver, fokussierter Laserstrahlung im nah-infraroten Spektralbereich erfolgt die Aushärtung eines flüssigen Precursors unter Ausnutzung des 2-Photoneneffekts und geeigneter Photoinitiatoren. Nicht exponiertes Material wird anschließend ausgewaschen.

Die 2-Photonen-Polymerisation zeichnet sich durch mehrere Vorteile aus:

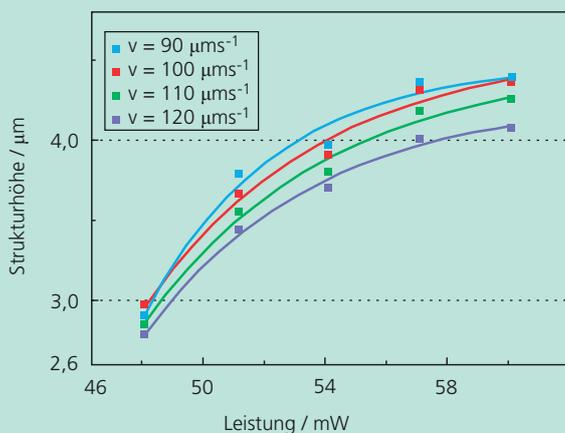
- Für die Herstellung der Strukturen eignen sich viele UV-vernietzbaren Materialien, z. B. SU-8, ORMOCER®e.
- Auflösungen deutlich unterhalb des Beugungslimits können erreicht werden, d. h. Strukturgrößen von 100 nm oder kleiner sind prinzipiell realisierbar.
- Das Verfahren erlaubt eine computergesteuerte Strahlführung auf der Grundlage von 3D-CAD-Modellen, um dreidimensionale Mikro- und Nanostrukturen beliebiger Komplexität zu generieren.



ERGEBNISSE

Zur Herstellung von Hohlfasern mit 150 µm Außendurchmesser, 50 µm Innendurchmesser und einer Länge von ca. 1,4 mm (Abb. 1) wurde der kollimierte Strahl eines Titan:Saphir-Lasers, der extrem kurze Infrarot-Lichtpulse erzeugt, durch ein 20-fach Objektiv in eine flüssige OrmoComp®-Lösung fokussiert. Während der Strukturierung wird der Fokus innerhalb des Photopolymers in x-, y- und z-Richtung computergesteuert auf der Grundlage eines dreidimensionalen CAD-Modells mit einer Geschwindigkeit von 100 µm s⁻¹ bewegt.

Abhängigkeit der Strukturhöhe von Prozessgeschwindigkeit und Laserleistung bei der 2-Photonen-Polymerisation von OrmoComp®



4

Die Strukturparameter wie Breite und Höhe hängen stark von der Pulsenergie und der Schreibgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der chemischen Reaktionen des Polymers ab (Abb. 4). Durch Wahl geeigneter Prozessparameter sind aktuell Strukturbreiten bis 500 nm bei einer Strukturhöhe von etwa 3 µm in OrmoComp® darstellbar.

Erste Durchflusstests an mittels 2-Photonen-Polymerisation hergestellten Hohlfasern zeigen die Ausbildung eines durchgängigen Kanals. Nächste Schritte sind die biokompatible und fluidisch dichte Einbettung der Faser in einen Bioreaktor. Durch die Charakterisierung der mechanischen und fluidischen Eigenschaften des Systems, wie Permeabilität, Durchströmbarkeit und Dichtheit, soll eine weitere Optimierung des Hohlfaser-Herstellungsprozesses erfolgen.

- 1 20-fach Objektiv und Probeaufnahme zur Herstellung von 3D-Mikrostrukturen
- 2 Mit 2-Photonen-Polymerisation generierte Hohlfaser aus OrmoComp® (Länge: 1,4 mm)
- 3 Hohlfaser mit 70 µm Außendurchmesser und 50 µm Innendurchmesser

KONTAKT

Dipl.-Ing. Matthias Bieda
 Tel.: +49 351 83391-3348
 matthias.bieda@iws.fraunhofer.de





PUNKTGENAUE DOSIERUNG UND DETEKTION IN LAB-ON-A-CHIP-SYSTEMEN

DIE AUFGABE

Lab-on-a-Chip-Systeme ermöglichen durch ihren hohen Grad an Integration, Miniaturisierung und Automatisierung die Realisierung komplexer Abläufe mit minimalem technischem und personellem Aufwand. Sie zeichnen sich durch eine sehr kompakte Bauweise und einfaches Handling aus, was bei Bedarf den mobilen Einsatz vor Ort erlaubt. Das Potential von Lab-on-a-Chip-Systemen wächst in vielen Bereichen der Biotechnologie und Medizintechnik.

Aus Tierschutz- und Kostengründen sowie wegen gesetzlicher Vorgaben wie z. B. der REACH-Verordnung werden immer mehr Untersuchungen für Wirkstoffforschung und Substanztestung in Lab-on-a-Chip-Systemen durchgeführt. Analog zum Tierversuch wird die Charakterisierung von Zell- bzw. Gewebereaktionen auf die Substanzen und Wirkstoffe in Mehrfachbestimmung, mit unterschiedlichen Dosierungen und über längere Zeiträume realisiert. Dies erfordert eine große Zahl an Lab-on-a-Chip-Systemen, die über längere Zeiträume parallel versorgt und überwacht werden müssen.

Daraus ergeben sich zwei technische Herausforderungen, einerseits die kontinuierliche Überwachung von Vitalität und Funktionalität der Zellen und Gewebe und andererseits die kontinuierliche, zeitgleiche Versorgung einer Vielzahl derartiger Systeme über Wochen hinweg. Für die Lösung dieser komplexen Aufgabenstellung müssen zwei Grundfunktionalitäten in einer Geräteplattform vereint werden: Das Handling flüssiger Medien (Testsubstanzen, Zellkulturmedien) und die nicht-invasive Online-Überwachung (Vitalitätsbestimmung, Sauerstoffmessung).

UNSERE LÖSUNG

Für das automatisierte Handling einer Farm von Lab-on-a-Chip-Systemen wurde am Fraunhofer IWS Dresden die Konzeption für eine universelle Laborautomationsplattform entwickelt, welche eine kontinuierliche Überwachung und Versorgung von Lab-on-a-Chip-Systemen ermöglicht (Abb. 3). Die Plattform kombiniert eine Zwei-Ebenen-Portal-Robotik-Lösung mit präzisiertem, keimfreiem Fluidhandling mit unterschiedlichen Messsystemen für die nicht-invasive Online-Überwachung. Sie ermöglicht so die vollautomatisierte Abarbeitung komplexer, benutzerdefinierter Abläufe.

Die Lab-on-a-Chip-Systeme befinden sich in einer temperierbaren Aufnahmeplatte, die zwischen den beiden Brücken angeordnet ist. Auf der oberen Brücke sitzt ein frei positionierbarer Dosierkopf, der mit unterschiedlichen Fluidhandlingssystemen (aktive und passive Pipetten) und Werkzeugen (Magnetgreifer, Pinzetten, RFID-Reader) ausgestattet werden kann. Der frei positionierbare Sensorkopf an der unteren Brücke kann mit unterschiedlichen Messsystemen (Kamera, Mikroskop, Fluoreszenzmessung) bestückt werden. So kann jedes Lab-on-a-Chip-System separat mit unterschiedlichen Medien versorgt und nicht-invasiv überwacht werden.

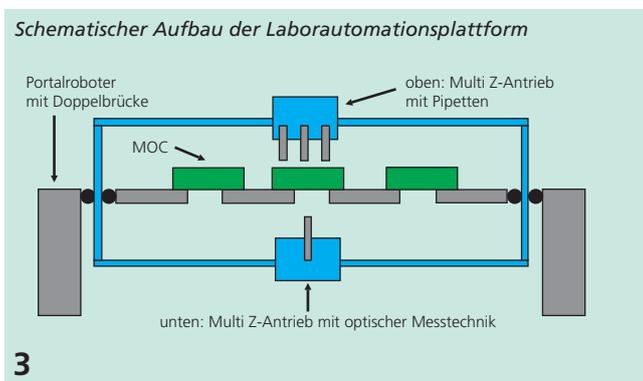


ERGEBNISSE

Gemeinsam mit einem Industriepartner wurde die konzipierte Laborautomationsplattform prototypisch umgesetzt (Abb. 1). Der Dosierkopf erhielt eine passive Pipetiervorrichtung, der Sensorkopf wurde mit einem Mikroskop und einem Fluoreszenzmesssystem ausgestattet. Die Arbeitsplatte bietet Platz für zehn Lab-on-a-Chip-Systeme, mehrere Mikrotiterplatten und ein Spitzenwechselsystem, welches aus einem Magazin für Einwegspitzen, einem Vermessungs- und einem Abwurfsystem besteht.

Mit dem ersten Prototyp der entwickelten Laborautomationsplattform wurden in Vorversuchen zehn Lab-on-a-Chip-Systeme über einen Zeitraum von 28 Tagen kontinuierlich mit unterschiedlichen Medien versorgt und überwacht.

Darauf aufbauend folgte der erfolgreiche Einsatz im Bereich



der Substanztestung. Über einen Zeitraum von 14 Tagen wurden wiederholt menschliche Zellen in Lab-on-a-Chip-Systemen vollautomatisch mit Medium versorgt. Es wurden zu testende Substanzen dosiert, Proben genommen, Mikroskopbilder aufgenommen und Fluoreszenzwerte bestimmt.

Im Ergebnis der Versuche kann festgestellt werden, dass die entwickelte Laborautomationsplattform die punktgenaue Dosierung und Detektion in Lab-on-a-Chip-Systemen ermöglicht.

- 1 *Prototyp der Laborautomationsplattform ausgestattet mit passiver Pipetiervorrichtung, Mikroskop und einem Fluoreszenzmesssystem*
- 2 *Lab-on-a-Chip-System in Laborautomationsplattform, Medienwechsel abgeschlossen, Fluoreszenz wird gemessen (blaues Licht)*

KONTAKT

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



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. BERNDT BRENNER



»Die Zukunft gehört denen, die Möglichkeiten erkennen, bevor sie offensichtlich werden.«

John Sulley



GESCHÄFTSFELD RANDSCHICHTTECHNIK

Redaktion: Ein wesentliches Standbein des Geschäftsfeldes Randschichttechnik besteht in der Entwicklung industrietauglicher Systemtechnik. Über welche Fortschritte können Sie berichten?

Prof. Brenner: Ein langjährig aufgebautes Know-how des Geschäftsfeldes besteht in der Entwicklung und Industrieüberführung von Technologien zur Lebensdauererlängerung von Tropfenschlagverschleiß-belasteten Turbinenschaufeln mittels einer beanspruchungsgerecht ausgeführten Laserstrahlhärtung. Dazu entwickelten wir als Weltneuheit eine Anlage zum beidseitig gleichzeitigen temperaturkontrollierten Laserstrahlhärten mit einer integrierten flexiblen Strahlformung für kompliziert geformte 3D-Bauteile mittels zweier kooperierend arbeitender Roboter. Als Krönung dieser Entwicklung konnten wir im vergangenen Jahr bei einem Weltmarktführer für den Bau von Großkraftwerken eine weiterentwickelte und auf die speziellen Bedürfnisse des Kunden zugeschnittene Anlage erfolgreich in die Produktion überführen. Im Zentrum standen im letzten Jahr insbesondere die Aktivitäten zum Technologietransfer und zur Ausbildung der Kundenmitarbeiter.

Redaktion: Haben damit Ihre Aktivitäten zur Entwicklung der Systemtechnik für das Laserstrahlhärten einen Endpunkt erreicht?

Prof. Brenner: Nein, im Gegenteil. Die erfolgreiche Realisierung dieser komplexen Aufgabe hat einen regelrechten Nachfrageschub ausgelöst, der wichtige Potenziale zur Weiterentwicklung bietet.

Redaktion: Was meinen Sie damit?

Prof. Brenner: Das meine ich quantitativ und vor allem qualitativ. Wir bemerken, dass unser Bestreben, einen modularen Systembaukasten aus aufeinander abgestimmten Einzelkomponenten für die industriellen Anwendungen von Laserrandschichttechnologien zu entwickeln und mit kundenspezifischen Bewegungssystemen zu koppeln, sehr erfolgreich ist und eine Reihe neuer Anwendungen möglich macht. Andererseits sind die spezifischen Kundeninteressen auch die Triebkraft, um neue Komponenten zu entwickeln.

Redaktion: Können Sie das näher ausführen?

Prof. Brenner: Ja, gerne. Mit der zunehmenden Einsatzbreite von industriellen Laserstrahlhärteanlagen und der Randschichtveredlung von hochwertigen und hochbeanspruchten Bauteilen und Sicherheitskomponenten steigt der Bedarf an einer 100 %-igen Qualitätskontrolle. Hinderlich wirkte sich dabei das Fehlen eines mobilen Temperaturnormals aus, mit dem der Kunde seine Anlage kalibrieren und damit ein Wegdriften des Temperatursignals, z. B. durch die Verschmutzung der Laseroptik erkennen und vermeiden kann. Im Rahmen eines EU-Projektes ist es gelungen, in Zusammenarbeit mit der PTB Berlin ein mobiles rückfahrbares Temperaturnormal für Kurzzeit-Hochtemperaturprozesse zu entwickeln, das an die Kundenanlagen angebaut werden kann. Alternativ können wir auch selbst Kundenanlagen ausmessen. Wir gehen davon aus, dass dieses Gerät bzw. prozessspezifische Weiterentwicklungen auch für die Temperaturkalibrierung anderer industrieller Hochtemperaturprozesse, wie z. B. das Reibschweißen, das Laserauftrag- und -umschmelzen, das Induktionshärten und andere geeignet ist.



KOMPETENZEN

BEANSPRUCHUNGSGERECHTES HÄRTEN VON STÄHLEN MITTELS LASER UND INDUKTION

Bei Bauteilgeometrien, Verschleißfällen und Werkstoffen, bei denen konventionelle Härtetechnologien versagen, bietet das Laserstrahlhärten 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. Die Arbeitsgruppe bietet an:

- Entwicklung von Randschichthärtetechnologien mit Lasern oder Induktion bzw. beidem,
- Randschichtveredelung von Entwicklungs- und Prototypmustern,
- Entwicklung von Systemtechnik zur Prozessüberwachung und -regelung.

KOMPLEXE WERKSTOFF- UND BAUTEILCHARAKTERISIERUNG

Die Beherrschung moderner Füge- u. Randschichtverfahren erfordert Kenntnisse von den strukturellen Änderungen bis zu den resultierenden Bauteileigenschaften. Eine moderne Geräteausstattung im Bereich der Strukturanalyse (Metallographie, REM mit EDX/WDX, HRTEM) und der mechanischen Prüfung (u.a. Hochfrequenz- und multiaxiale Ermüdung) und unsere langjährige Erfahrung zur Thematik der Struktur- und Bauteilzuverlässigkeit macht die Arbeitsgruppe zum kompetenten Partner bei der Eigenschaftsbewertung, Aufklärung von Schadensfällen und anwendungsnahen Schulungen.



ABTEILUNGSLEITER

PROF. BERNDT BRENNER

Telefon +49 351 83391-3207

berndt.brenner@iws.fraunhofer.de



GRUPPENLEITER

RANDSCHICHTVERFAHREN

DR. STEFFEN BONSS

Telefon +49 351 83391-3201

steffen.bonss@iws.fraunhofer.de



BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2013

1. Laserdotieren von Halbleitermaterialien mit Ultrakurzpuls laser 108
2. Rückführbare Temperaturmessung bei Hochtemperatur-Laserprozessen 110
3. Laserhärten und Auftragschweißen - zwei Technologien, ein Bearbeitungskopf 112
4. Schwingfestigkeitsprüfung jenseits der klassischen Auslegungsgrenzen 114

GRUPPENLEITER

WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG

PROF. MARTINA ZIMMERMANN

Telefon +49 351 83391-3573

martina.zimmermann@iws.fraunhofer.de



LASERDOTIEREN VON HALBLEITER- MATERIALIEN MIT ULTRAKURZPULSLASER

DIE AUFGABE

Halbleitermaterialien werden durch ihre Materialeigenschaften und die Möglichkeit, diese durch den Einbau von Fremdatomen gezielt anzupassen, in vielfältigen Bereichen eingesetzt. Silizium zum Beispiel findet Anwendung im Bereich der Photovoltaik, Sensorik, Elektronik u.v.a.

Mit dem Einbau von Fremdatomen, dem sogenannten Dotieren, kann die Art des Ladungsträgertransports (Elektronen- oder Lochleiter) sowie die Leitfähigkeit von Halbleitermaterialien gezielt beeinflusst werden. Zur Herstellung definierter Dotierprofile im industriellen Maßstab sind derzeit zwei Technologien im Einsatz. Das thermische Dotieren über Diffusionsprozesse und die Ionenimplantation über elektrische Felder. Beide Prozesse zeichnen sich durch eine starke thermische Belastung des Substrates aus. Für einen aktiven Einbau der Fremdatome in das Atomgitter muss das Halbleitersubstrat über 200 °C für mehrere Minuten erhitzt werden.

Bestimmten Applikationen, wie beispielsweise die Herstellung von »Heterojunction Solarzellen«, erfordern Prozessschritte, die unterhalb dieser Temperatur verbleiben. Die genannten etablierten Verfahren können somit keine Anwendung finden und es gilt, neue Lösungen für den industriellen Einsatz zu qualifizieren.

UNSERE LÖSUNG

Mit der Technologie des Laserdotierens ist es möglich, das Halbleitermaterial lokal begrenzt aufzuschmelzen und Fremdatome gezielt einzubringen.

Der Einsatz hochdynamischer Scannertechnik ermöglicht es, individuelle Layouts, wie z. B. definierte Strompfade oder komplexe Dotierflächen auf den Halbleitermaterialien umzusetzen.

Die Bereitstellung des Dotiermaterials am Prozessort erfolgt per Rotationsbeschichten oder Dispenserdrucken. Das Dotiermaterial wird entweder in flüssiger Form bereitgestellt oder der Dotand wird an ein Hydrogel angebunden.

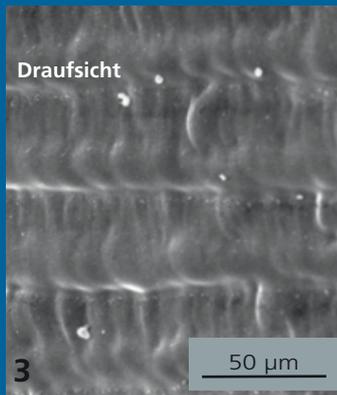
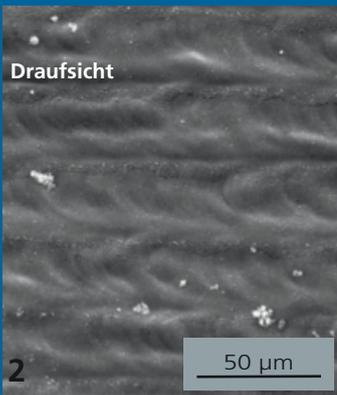
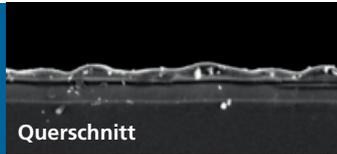
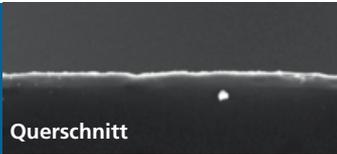
ERGEBNISSE

Abhängig vom gewünschten Dotierprofil und der maximal zulässigen thermischen Belastung wurden am Fraunhofer IWS Dresden verschiedene Lasertypen und Laserwellenlängen getestet.

Kontinuierlich strahlende Lasersysteme ermöglichen ein gleichmäßiges Aufschmelzen des Materials und einen hohen Tiefeneintrag des Dotanden. Gepulste Systeme, wie zum Beispiel Ultrakurzpuls-Laser, zeichnen sich durch einen kurzzeitigen Energieeintrag aus. Die Schmelzbildung erfolgt hier oberflächennah.

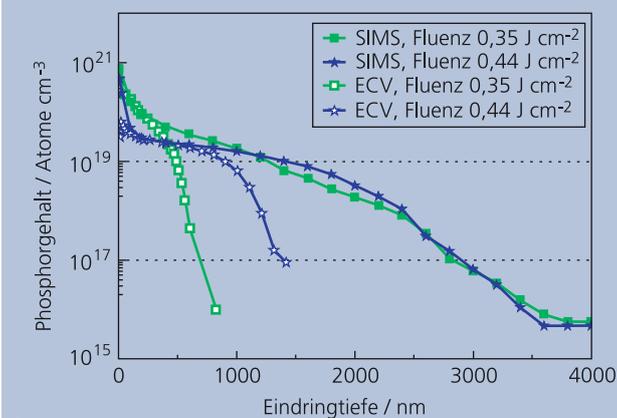
Der Grad des Tiefeneintrages ist abhängig von der eingesetzten Laserwellenlänge und deren Absorption im Material. So hat z. B. Silizium für die Wellenlänge von 1064 nm eine optische Eindringtiefe von 100 µm und bei 532 nm von 1 µm.

Während des Abkühlens der Schmelze wird abhängig von den Prozessparametern ein Teil des eingebrachten Dotanden in das Halbleitergitter eingebaut. Die Erstarrung des flüssigen Materials erfolgt epitaktisch, so dass die Gitterstruktur des Grundmaterials erhalten bleibt.



Durch Variation der Parameter ist es beim Dotieren von Silizium mit einer Laserwellenlänge von 1064 nm möglich, einen annähernd gleichbleibenden Tiefeneintrag von Phosphor ins Material bei unterschiedlichen Aktivierungsgraden zu erreichen (Abb. 1).

Gegenüberstellung von thermisch eingebrachtem Phosphor, ermittelt durch SIMS Messung, zu aktiv eingebautem Phosphor, bestimmt mit ECV-Messung



1

Durch den Umschmelzprozess des Halbleitermaterials kann die Oberfläche der dotierten Bereiche gezielt beeinflusst werden. Texturierte Oberflächen, wie z. B. eine Pyramidenoberfläche auf Silizium, kann für eine verbesserte elektrische Kontaktierung eingeebnet oder mit einer welligen Oberflächentopographie versehen werden (siehe Abb. 2 und 3).

Auf Grund der lokal herrschenden Temperaturen ist es durch Einsatz von Prozessgas, wie Sauerstoff oder Stickstoff, möglich elektrisch passivierende Schichten an der Oberfläche zu generieren. Der Prozess des Laserdotierens repräsentiert somit eine Synergie mehrerer Einzelprozesse aus der Halbleitertechnik.

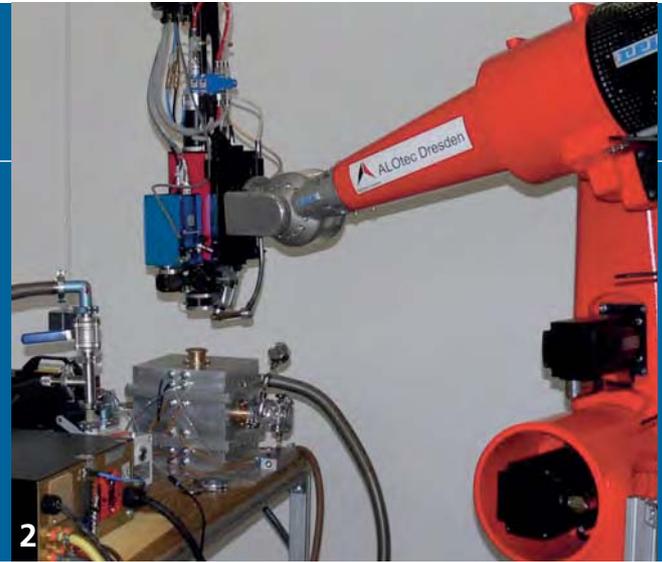
Die Arbeiten erfolgten in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Namlab GmbH, Roth und Rau GmbH, ULT AG, ILK Dresden, Rehm und dem Fraunhofer IKTS im Rahmen des Projektes MWT (FKZ 03SF0420B).

- 2/3 Oberflächentopographie beim Laserdotieren in Draufsicht und im Querschliff
- 2 Fluenz = $0,35 \text{ J cm}^{-2}$
- 3 Fluenz = $0,44 \text{ J cm}^{-2}$

KONTAKT

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





RÜCKFÜHRBARE TEMPERATURMESSUNG BEI HOCHTEMPERATUR-LASERPROZESSEN

DIE AUFGABE

Um den hohen Anforderungen an die Qualitätssicherung gerecht zu werden wird bei industriellen Laserprozessen, wie z. B. dem Laserstrahlhärten, zunehmend die berührungslose Temperaturmessung mit Pyrometern und Wärmebildkameras eingesetzt. Oft sind absolute Messgenauigkeiten bis zu 5 Kelvin erforderlich, um geregelte Laserprozesse bei sehr hohen Temperaturen stabil zu halten und das Prozessergebnis innerhalb des zulässigen Toleranzfensters einzustellen. Neben den typischen gerätespezifischen Messunsicherheiten stellen die Veränderungen der Gerätekennlinien aufgrund der Verunreinigung von Komponenten sowie die ungenaue Emissionsgradkorrektur bei Messung realer Bauteiloberflächen die Hauptfehlerquellen bei der industriellen Temperaturmessung oberhalb 1000 °C dar.

Anwender von Pyrometern und Wärmebildkameras benötigen für die Qualitätssicherung zertifizierte Kalibriergeräte, die nicht nur die bisher üblichen Genauigkeiten deutlich übertreffen, sondern auch mobil einsetzbar und sicher in der Handhabung sind. Die Messzyklenzeit sollte möglichst kurz sein, damit die zur Überprüfung notwendigen Stillstandzeiten von Serienanlagen minimiert werden. Auch die verfügbare Datenbasis für eine anwendungsbezogene Emissionsgradkorrektur der Messgeräte erfüllt nicht mehr die gestiegenen Genauigkeitsanforderungen. Hier sind weitergehende systematische Messungen mit aktueller Messtechnik notwendig.

UNSERE LÖSUNG

In Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Berlin wurde ein Kalibriergerät auf Basis von induktiv geheizten Hochtemperatur-Fixpunkten entwickelt (Abb. 1).

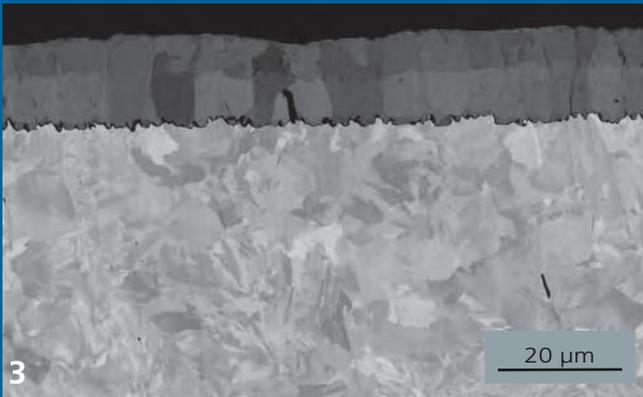
Das Kalibrierprinzip beruht auf der Stabilisierung der Fixpunkttemperaturen bei gleichzeitigem Vorhandensein von schmelzflüssiger und fester Phase eines Reinstmetalls bzw. einer hochreinen eutektischen Metalllegierung. Das Gerät ist für den Einsatzbereich von 1000 °C bis 1500 °C optimiert.

Am Fraunhofer IWS Dresden wurde der Prototyp erfolgreich in der Anwendung getestet. Zur Anwendung kamen Kupferfixpunkte (Kalibriertemperatur $T_{\text{cal}} = 1085 \text{ °C}$), Eisen-Kohlenstoff-Fixpunkte ($T_{\text{cal}} = 1153 \text{ °C}$) und Kobalt-Kohlenstoff-Fixpunkte ($T_{\text{cal}} = 1323 \text{ °C}$). Die Reproduzierbarkeit der Fixpunkttemperaturen beträgt ca. 1 Kelvin, so dass sich mit dem Kalibriergerät schon kleinste Messgenauigkeiten sicher detektieren und korrigieren lassen.

Der Emissionsgrad von Stählen und Gusseisen wurde an ausgewählten Proben systematisch vermessen. Dazu wurden Messaufbauten am ZAE Bayern sowie an der PTB Berlin genutzt. Als Einflussfaktoren wurden neben dem Legierungsgehalt die Rauigkeit der Oberflächen, der Oxidationsgrad, die Messwellenlänge sowie die Temperaturabhängigkeit selbst untersucht. Die Probenzustände wurden so ausgewählt, dass die Messergebnisse einen möglichst breiten Anwendungsbereich abdecken.

ERGEBNISSE

Das Fixpunkt-Kalibriergerät wurde an zwei industriell genutzten Anlagen für das Laserstrahlhärten erprobt. Dabei wurden Temperaturabweichungen von bis zu mehreren 10 Kelvin festgestellt. Sie werden hauptsächlich verursacht durch Verunreinigungen von optischen Komponenten im Strahlengang des Temperaturmessgerätes. Insbesondere die kontinuierlich voranschreitende Kontamination von

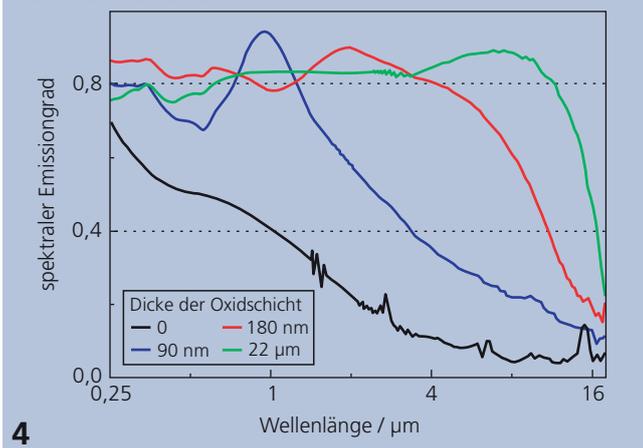


Schutzgläsern durch Prozessdämpfe ist ein ernst zu nehmender Faktor. Sowohl die Dämpfung des Temperatursignals und die damit verbundenen Messfehler als auch die Absorption und Streuung von Laserstrahlung wird oft unterschätzt.

Ein Kalibriergerät auf Basis des neu entwickelten Gerätekonzeptes bietet hier den Vorteil, dass direkt vor Ort an der Anlage das Messsystem überprüft werden kann. Bei Laserprozessen, bei denen die Optiken einem besonders hohen Verschleiß ausgesetzt sind, kann auch die Anwendung eines Kalibriersystems in-situ zwischen Einzelprozessen sinnvoll sein, um die ordnungsgemäße Funktion des Systems vor jedem Prozess sicherzustellen.

Für mehrere härtbare Stähle und Gusseisen wurde die Abhängigkeit des spektralen Emissionsgrades von verschiedenen Einflussfaktoren vermessen und steht jetzt den Anwendern für die Emissionsgradkorrektur zur Verfügung. Im polierten Zustand der Oberfläche konnte ein geringer Einfluss der Legierungselemente festgestellt werden, der zudem mit zunehmender Rauigkeit kleiner wird. Mit Erhöhung der Rauigkeit verschiebt sich der Emissionsgrad zu deutlich höheren Werten. Insbesondere bei hohen Messwellenlängen im Mikrometerbereich kann diese Erhöhung mehrere 100 % betragen, was erhebliche Auswirkungen auf die Temperaturmessung hat.

Spektraler Emissionsgrad des Stahls 42CrMo4 in Abhängigkeit von der Oxidschichtdicke



Im Falle der Oxidation der Oberflächen bei hoher Temperatur treten Interferenzeffekte an den Oxidschichten auf, die zu starken Schwankungen des Emissionsgrades und damit einer Verfälschung des Temperaturmesswertes führen. Bei Messwellenlängen kleiner 1 µm wurde schon bei geringen Oxidschichtdicken eine Sättigung des Emissionsgrades bei Werten um 0,8 beobachtet (Abb. 4).

Eine präzise Temperaturmessung an Stahl- und Gusseisenoberflächen bei Temperaturen größer 1000 °C ist grundsätzlich möglich, wenn zusätzlich zur präzisen Kalibrierung die optimale Messwellenlänge anwendungsbezogen ausgewählt und die zugehörige Emissionsgradkorrektur am Messgerät eingestellt wird. Die Arbeiten wurden im Rahmen des EMRP-Projektes »HiTeMS« (EMRP A169, JRP IND01) durchgeführt. Das europäische Metrologie-Forschungsprogramm EMRP wird gemeinsam durch die Europäische Union und die EURAMET-Partnerländer gefördert.

- 1 *Fixpunktzelle in Induktions-
spule*
- 2 *Prototyp des induktiv beheiz-
ten Fixpunkt-Kalibriergerätes
zur Vermessung einer indu-
striellen Anlage zum Laser-
strahlhärten*
- 3 *REM-Aufnahme einer laserge-
härteten Probe aus Kohlen-
stoffstahl C45 mit ausgepräg-
ter Oxidschicht an der Ober-
fläche*

KONTAKT

Dipl.-Phys. Marko Seifert
Telefon: +49 351 83391-3204
marko.seifert@iws.fraunhofer.de





LASERHÄRTEN UND AUFTRAGSCHWEISSEN - ZWEI TECHNOLOGIEN, EIN BEARBEITUNGSKOPF

DIE AUFGABE

Laserhärten und Laserauftragschweißen sind etablierte Verfahren, die in den vergangenen 20 Jahren kontinuierlich für industrielle Anwendungen weiter entwickelt wurden. Die Technologien werden für viele verschiedene Bauteile verwendet, vorzugsweise aber bei äußeren Oberflächen und leicht zugänglichen Bereichen eingesetzt. Um zum Beispiel den Schutz vor Korrosion und Verschleiß von Bohrausrüstungen der Erdölindustrie zu verbessern, hat sich das Laserauftragschweißen und Härten sehr erfolgreich bewährt.

Was sich auf der Außenseite von Rohren bewährt hat, sollte nunmehr auch auf den schwer zugänglichen Innenbereich von Zylindern und Rohren übertragen werden, da bisherige Bearbeitungsverfahren keine befriedigenden Ergebnisse zeigen konnten. Deshalb begann die CCL's Laser Division, eine Außenstelle des Fraunhofer IWS mit Sitz in Plymouth, Michigan, USA, für die amerikanische Erdölindustrie einen neuen Bearbeitungskopf und die Prozesstechnologie für das Innenbeschichten von Rohren zu entwickeln. Unter dem Namen ID1 und ID2 (ID = internal diameter) fand der Bearbeitungskopf Eingang in zahlreiche Fertigungslinien.

Seitdem bekunden zahlreiche Industriekunden ihr Interesse an dem Bearbeitungskopf, um schwer zugängliche Bereiche von Bauteilen laserhärten zu können. Dieses Interesse erforderte eine Weiterentwicklung und Anpassung der bestehenden Lösung, insbesondere der Bearbeitungsoptik.

UNSERE LÖSUNG

Die Brennfleckgröße für den ID Laserauftragschweißprozess ist ca. 6 mm im Durchmesser. Dies ist ideal für den Beschichtungsvorgang, für das Laserhärten aber ungeeignet. Aus diesem Grund wurde ein völlig neuer Strahlengang für den Bearbeitungsarm konstruiert. Hier sind Bearbeitungsoptiken integriert, die eine homogene Energiedichte über einen größeren Brennfleck erzeugen.

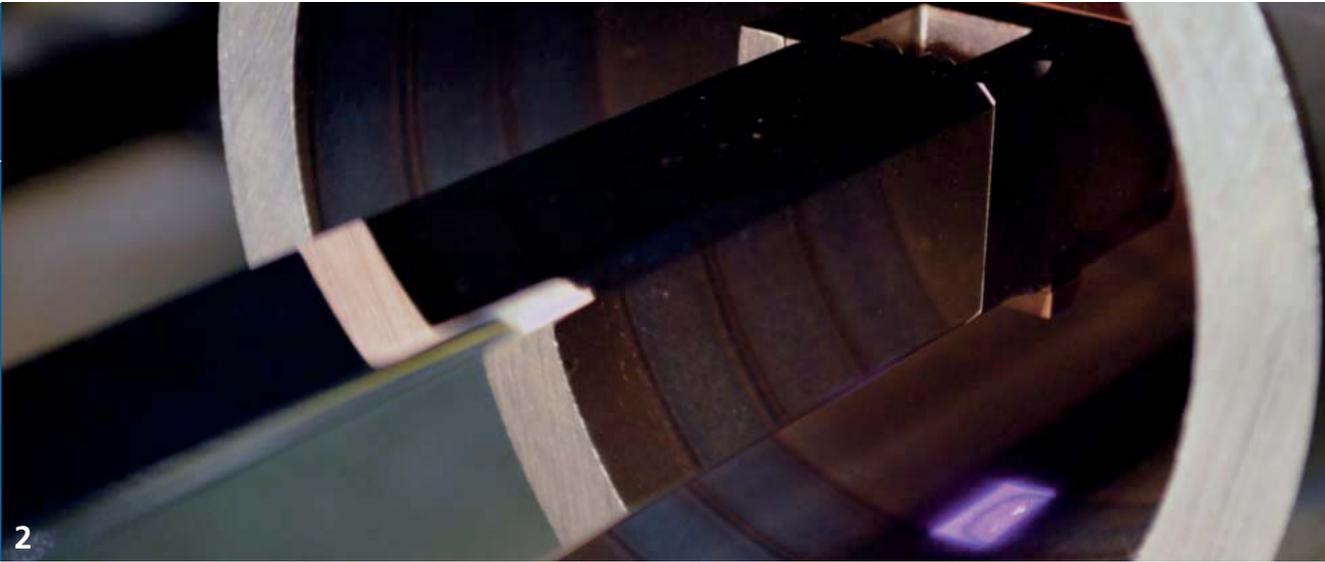
Derzeit hat der Brennfleck eine Größe von 20 x 8 mm². Wenn andere optische Komponenten eingesetzt werden, sind ohne weiteres andere quadratische oder rechteckige Spotgrößen bis 25 x 25 mm² möglich.

Die gesamte Roboterarmkonstruktion gleicht dem Design des ID-Bearbeitungskopfes. Wasserkühlung und Strahlführung sind integriert. Der Bearbeitungskopf arbeitet bis zu 3 kW Laserleistung und wurde sowohl am Faser- wie auch am Scheibenlaser getestet.

Spezifikation der Systemtechnik für Laser ID-Härten und Auftragschweißen

Technologie	Laserhärten innen	Auftragschweißen innen
Bearbeitungskopf	ID-H	ID2
minimaler Rohrdurchmesser	76 mm (~ 3")	89 mm (~ 3,5")
maximale Eintauchtiefe	1000 mm (39,4")	
maximale Laserleistung	3 kW	
kompatible Laser	Faser, Scheibe, Nd:YAG	

3

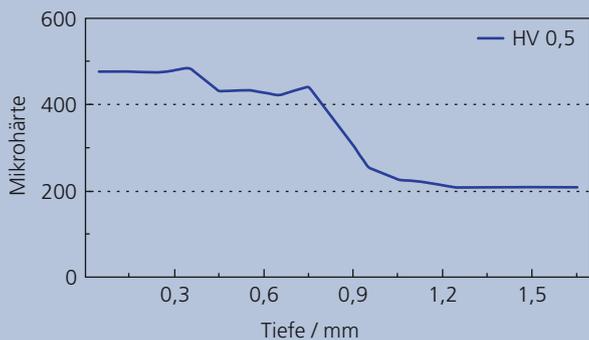
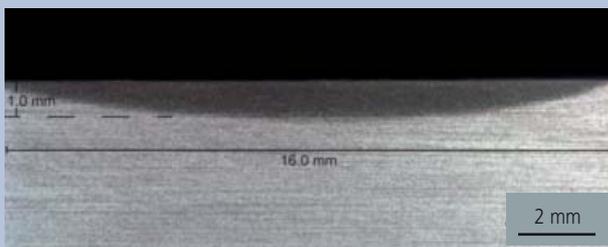


ERGEBNISSE

Mit dem ID-H Bearbeitungskopf ist es möglich, besonders beengte Bereiche von Bauteilen aus härtbaren Stählen und Gusseisen zu härten. Prädestiniert ist der Kopf für die Innenflächen von rotierenden Zylindern oder Rohren.

Erste Testergebnisse des ID-H Beschichtungskopfes sind sehr vielversprechend. Entlang einer Spurbreite von ca. 16 mm konnte an einem Bauteil aus 42 CrMo4 (4140) bis zu einer effektiven Härtetiefe von ca. 1 mm ein signifikanter Härtezuwachs erreicht werden (Abb. 4). Der Bearbeitungskopf ist bis zu einem Innendurchmesser von 76 mm und Eintauchtiefen von 1000 mm einsetzbar.

Querschnitt eines gehärteten Stahlbauteils aus 42CrMo4 (Fokusspot 20 x 8 mm²) und Härte-Tiefen-Kurve



Die Bearbeitungsköpfe ID1 und ID2 ermöglichen die Innenbeschichtung von Bohrungen bis zu 1000 mm Tiefe und einem minimalen Innendurchmesser von nur 89 mm. Der Bearbeitungskopf beinhaltet Wasserkühlung, Schutzgas, Metallpulver und die Laserstrahlführung. Somit ist er extrem kompakt und arbeitet zuverlässig, sogar an schwer zugänglichen Stellen.

Seit der ersten Entwicklung konnten schon mehrere Bearbeitungsköpfe zum Innenbeschichten erfolgreich in die industrielle Anwendung überführt werden, vornehmlich in der nordamerikanischen Ölindustrie.

- 1 ID-Auftragschweißen einer Zylinderbohrung
- 2 ID-Laserhärten einer Zylinderbohrung

KONTAKT

Craig Bratt
 Telefon: +1 734 738-0550
 cbratt@fraunhofer.org





SCHWINGFESTIGKEITSPRÜFUNG JENSEITS DER KLASSISCHEN AUSLEGUNGSGRENZEN

DIE AUFGABE

Die Verbesserung des Verformungs- und Versagensverhaltens eines Werkstoffs bzw. eines Bauteils unter zyklischer mechanischer Belastung stellt in vielen Anwendungsbereichen eine wesentliche Zielgröße eigenschaftsoptimierender Maßnahmen dar. Sicherheitsrelevante Komponenten, u. a. im Bereich der Luftfahrt- und der Automobilindustrie, des Schienenfahrzeugbaus sowie im Turbinen- und Kraftwerksanlagenbau erfahren zunehmend Beanspruchungszyklen jenseits der klassischen Auslegungsgrenzen. Belastungsszenarien mit hohen Frequenzen (z. B. 2000 Hz) oder sehr langen Laufzeiten (über dreißig Jahre) führen zu Lastzyklenzahlen oberhalb 10^9 . Um auch für diesen Bereich Lebensdauer-Vorhersagekonzepte höchster Genauigkeit entwickeln zu können, bedarf es eines experimentell abgesicherten Verständnisses für die wirksamen Schädigungs- und Versagensmechanismen.

Die bisher eher grundlagenorientierten Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet »Very High Cycle Fatigue« (VHCF) haben gezeigt, dass viele Werkstoffe (hochfeste Stähle, Aluminium-, Nickelbasislegierungen etc.) auch unterhalb der klassischen Dauerfestigkeit noch versagen. Zudem verdeutlichen die Ergebnisse für diese Werkstoffklassen, dass die Schädigungsentwicklung vornehmlich von strukturellen Ungängen, wie z. B. nichtmetallischen Einschlüssen, groben Ausscheidungen, Phasengrenzen, ungünstig orientierten Körnern oder auch fertigungsbedingten Mikrokerben, ausgeht. Erweitert man nun den Fokus auf das VHCF-Verhalten komplexer Strukturbauteile und den damit einhergehenden zunehmenden Fertigungseinfluss, steht man bisher noch am Anfang in der Entwicklung neuer, statistisch abgesicherter Lebensdauer-Vorhersagekonzepte für den VHCF-Bereich.

UNSERE LÖSUNG

Ausgehend von einem global wachsenden Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsleistungen im VHCF-Bereich wurde am Fraunhofer IWS im Jahr 2013 ein hochmodernes Hochfrequenz-Ermüdungsprüflabor aufgebaut. Man setzt im Wesentlichen auf zwei Prüfsysteme – einen Resonanzpulsationsprüfstand, mit dem sich Prüffrequenzen um 100 - 150 Hz bei max. Kräften von ± 50 kN realisieren lassen und einen Ultraschall-Ermüdungsprüfstand (Abb. 1), welcher bei ca. 20.000 Hz einen Lastspielzahlbereich bis 10^{10} in einem zeitlich vertretbaren Rahmen abzudecken vermag.

Der Resonanzpulsler ermöglicht durch eine umfangreiche, zusätzliche Ausrüstung ein breites Prüfspektrum, von Zug-Druck-Versuchen mit oder ohne überlagerte Mittellast, über 3- und 4-Punkt-Biegeversuche und Risswachstumsuntersuchungen bis hin zu isothermen Versuchen bis 900 °C. Es können sowohl Werkstoff- als auch bauteilähnliche Proben bei mittleren Prüffrequenzen getestet werden. Außerdem ermöglicht dieses Prüfsystem in Kombination mit dem Ultraschall-Ermüdungsprüfstand auch Untersuchungen zum direkten und indirekten Frequenzeinfluss auf das Ermüdungsverhalten.

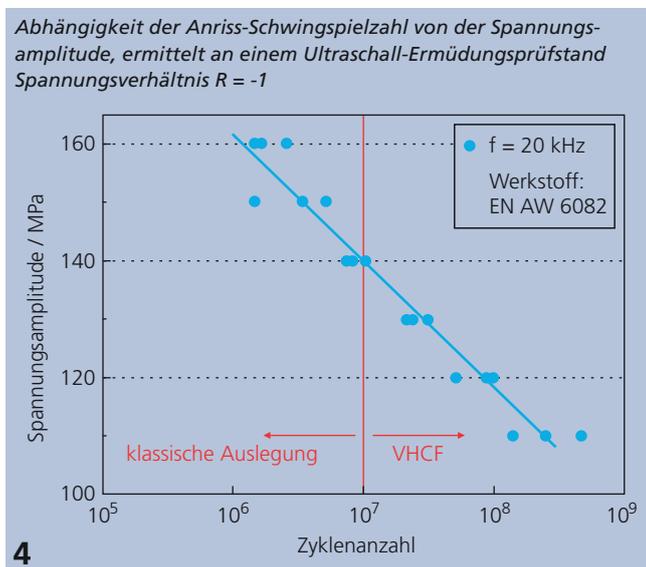
Die Ultraschall-Ermüdung hat sich seit einiger Zeit als anerkannte experimentelle Methodik im Bereich der VHCF-Forschung etabliert. Bei dem System wird durch Anregung mittels piezokeramischer Aktuatoren eine Probe in Eigenresonanz gebracht (Abb. 2). Das sinusförmige Signal in Form einer sich über der Probenlängsachse longitudinal ausbreitenden mechanischen Welle durchläuft den Probenkörper. Die Einstellung der Beanspruchungshorizonte erfolgt durch die Applikation von Dehnungsmessstreifen an der Außenfläche



des höchstbeanspruchten Probenquerschnitts. Die Kontrolle und Regelung der Schwingungsanregung ermöglicht eine konstante Belastung während des gesamten Versuchs auch im Fall einer Mikrorissbildung. Als Abschaltkriterium dient eine definierte Änderung der Resonanzfrequenz.

Einer unerwünschten Probenerwärmung infolge der sehr hohen Prüffrequenzen wird durch eine aktive Kühlung und ein Prüfen in einem speziell auf das Dämpfungsverhalten des jeweiligen Werkstoffs abgestimmten Puls-Pause-Betrieb (Abb. 2) entgegen gewirkt.

Die Anlage ist auch zur Durchführung von Versuchen mit Vorlast einsetzbar. Durch eine externe Sollwertvorgabe und Messdatenerfassung können Versuche durchgeführt werden, bei welchen die Lastamplitude aufeinander folgender Pulse variiert. Die Lastfolge wird mit einer Computersteuerung vorgegeben, welche auch zur Messung und Klassierung aller Lastamplituden dient. Die kontinuierliche Aufzeichnung der Resonanzfrequenz und der höheren harmonischen Schwingungen erlaubt eine frühzeitige Schädigungsdetektion auch im Fall einer im VHCF-Bereich häufig zu beobachtenden Rissinitiierung im Probeninneren (Abb. 3).



ERGEBNISSE

In Versuchen für umfangreiche Untersuchungen zur Charakterisierung des Einflusses einzelner Prozessparameter auf das Ermüdungsverhalten laserstrahlgeschweißter Verbindungen wurde der Grundwerkstoff im Anlieferungszustand getestet. Erwartungsgemäß zeigte die Aluminiumlegierung EN AW 6082 T651 einen deutlichen Abfall der Schwingfestigkeit auch jenseits der klassischen Auslegungsgrenze von 10^7 Lastzyklen (Abb. 4).

Im Vergleich zu bereits publizierten Versuchsergebnissen anderer Arbeitsgruppen fällt die Schwingfestigkeit jedoch geringfügig höher aus. Das hebt den großen Chargeneinfluss und damit die Bedeutung einer Vor- und / oder Nachbehandlung hervor. Referenzversuche bei konventionellen Prüffrequenzen zeigen außerdem einen Einfluss der Versuchsführung auf die Schwingfestigkeit. Inwieweit hier tatsächlich ein unmittelbarer Frequenzeinfluss vorliegt, oder weitere Versuchsparameter (z. B. Probenkalibrierung, Abschaltkriterium, Umgebungsbedingungen) einen Einfluss haben, gilt es noch weiter zu untersuchen. Zukünftig wird durch eine simulationsgestützte Optimierung der Probengeometrie das Ultraschall-Prüfkonzept für die gezielte separate Prüfung der verschiedenen Fügezonen einer Schweißverbindung erweitert.

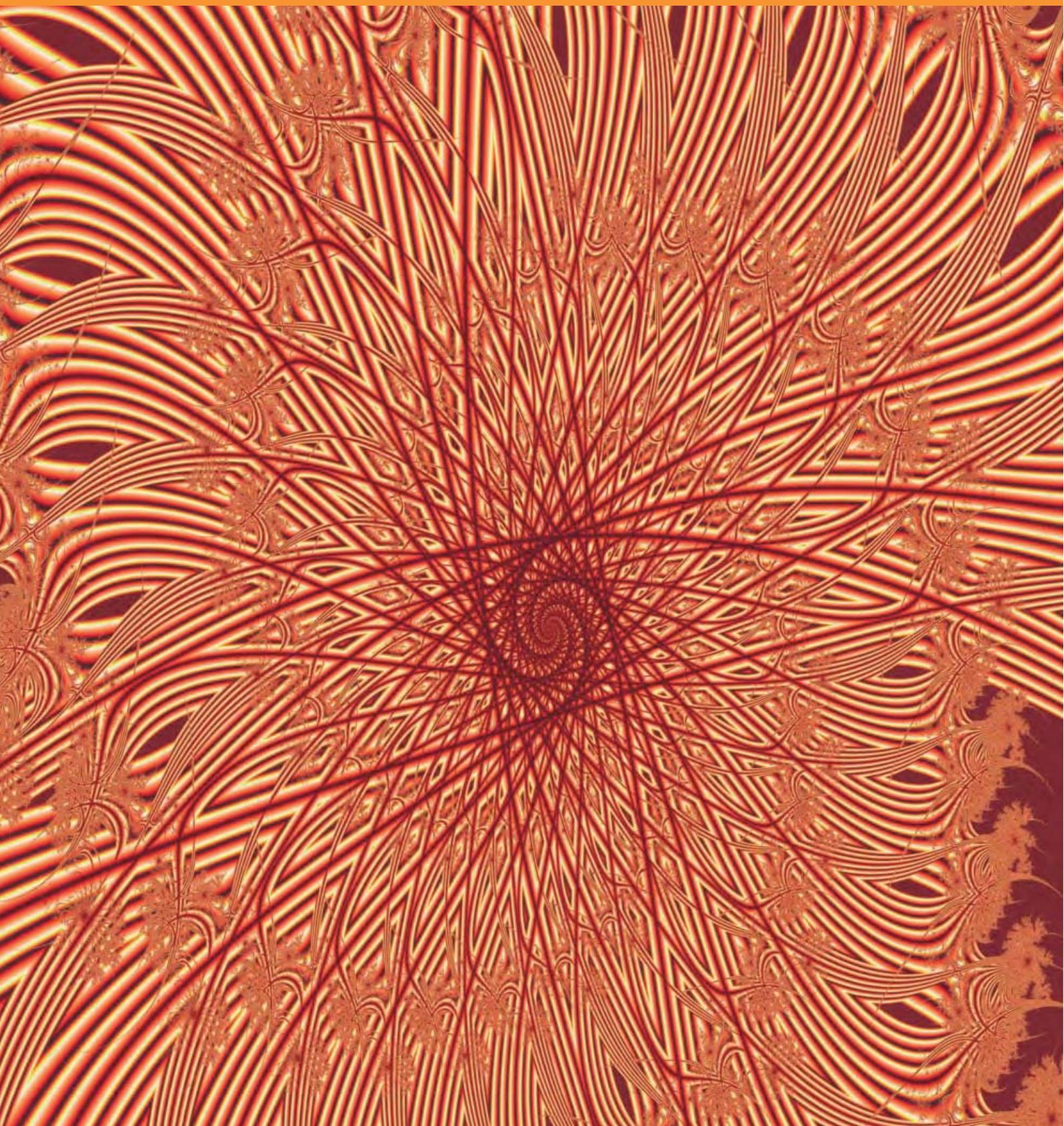
- 1 Einrichtung des Hochfrequenz-Ermüdungsprüfstandes
- 2 Einseitige Einspannung einer Ultraschall-Ermüdungsprobe
- 3a Rissinitiierung an einem Einschluss
- 3b Vergrößerung des Rissinitiierungsbereiches

KONTAKT

Prof. Martina Zimmermann
Telefon: +49 351 83391-3573
martina.zimmermann@iws.fraunhofer.de



ZENTREN





ZENTRUM FÜR BATTERIEFORSCHUNG – TECHNOLOGIEN FÜR NEUE ENERGIESPEICHER

Forschung für die Elektromobilität aber auch für stationäre Energiespeicher ist ein zentrales Thema für das Fraunhofer IWS Dresden. Mit seinem Know-how und der Vielzahl der beforschten Fertigungstechnologien kann das Fraunhofer IWS an vielen Stellen der Prozesskette zur Batteriefertigung essenzielle Beiträge leisten und Innovationen tätigen. Um Unternehmen heute und in der Zukunft Lösungen anbieten zu können, ist der Aufbau eines Zentrums für Batterieforschung am Fraunhofer IWS kurz vor dem Abschluss. Die EU und das Land Sachsen förderten das Projekt mit 4 Mio. Euro. Eigenmittel des Fraunhofer IWS und der Fraunhofer-Gesellschaft in Höhe von weiteren 3 Mio. Euro sowie BMBF-Projektmittel in Höhe von 1 Mio. Euro flossen in die Ausstattung der Technika mit neuestem Equipment. In den kommenden Jahren können Batteriezellen nach Vorgaben von Industriepartnern konfiguriert und gefertigt werden. Die Weiterentwicklung von Materialien und Technologien erfolgt in öffentlich geförderten Projekten.

Nachfolgend ein Auszug:

AlKaSuSi (BMBF: FZJ 03X4618A)

Materialkonzepte für Alkali-Metall-Schwefel-Batterien

Laufzeit: 05/2011 – 04/2014

DryLIZ (BMBF: KIT 02PJ2302)

Trockene Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen

Laufzeit: 01/2012 – 12/2014

MaLiSu (EraNET/BMWi: DLR 01MX12009A)

Nanomaterials for Future Generation Li-S-batteries

Laufzeit: 01/2012 – 12/2014

CryPhysConcept (BMW/BMU/BMBF: FZJ 03EK3029B)

Mit Kristallphysik zum Zukunftskonzept elektrochemischer Energiespeicher

Laufzeit: 10/2012 – 12/2015

KOORDINATION

MATERIALENTWICKLUNG

DR. HOLGER ALTHUES

Telefon +49 351 83391-3476

holger.althues@iws.fraunhofer.de



FERTIGUNGSTECHNIK

DR. PHILIPP THÜMMLER

Telefon +49 351 83391-3215

philipp.thuemmler@iws.fraunhofer.de



www.iws.fraunhofer.de/batterieforschung

BaSta (BMU: FZJ 0325563A)

Batterie – Stationär in Sachsen

Laufzeit: 11/2012 – 10/2015

BatCon (BMW: DLR 01MX12055C)

Funktionsintegrierte Hochstromverbinder für Batteriemodule

Laufzeit: 01/2013 – 12/2015

PLIANT (EU: FP7-NMP-2012-LARGE-6)

Process Line Implementation for Applied Surface Nanotechnologies, Laufzeit: 01/2013 - 01/2017

BamoSa (BMBF: FZJ 03X4637A-H)

Batterie – mobil in Sachsen

Laufzeit: 06/2013 – 05/2016

Zum 3. Workshop »Lithium-Schwefel-Batterien« am 12. bis 13. November 2014 in Dresden präsentieren und diskutieren renommierte Experten aus Industrie und Wissenschaft neueste Entwicklungstrends.



ZENTRUM »TAILORED JOINING« – FÜGETECHNISCHE KOMPETENZEN IN DRESDEN

Fügen ist eine zentrale Herausforderung der Produktion und oft ein signifikanter Kostenfaktor. Aktuelle fügetechnische Entwicklungen können in vielen Fällen wichtige Verbesserungen und Impulse liefern. Daher wurde vom Fraunhofer IWS in Kooperation mit der TU Dresden und weiteren Partnern das Fügetechnische Zentrum »Tailored Joining« ins Leben gerufen. Es soll Anwendern einen Überblick über Möglichkeiten und Grenzen diverser Fügeverfahren geben, deren direkten und unvoreingenommenen Vergleich ermöglichen, Neuentwicklungen kompakt darstellen und industriebezogene Lösungen aufzeigen. Basis des Zentrums ist die nicht nur deutschlandweit sondern auch international außergewöhnlich große Bandbreite an Fügeverfahren, die in Dresden intensiv untersucht und weiterentwickelt werden. Am Fraunhofer IWS betrifft das folgende Verfahren:

- Laserstrahlschweißen
- Laserhybridschweißen (Plasma, Arc, Induktion)
- Lötten mit Laser und Reaktivmultischichten
- Magnetschweißen (Umformen + Schweißen)
- Rührreibschweißen
- Diffusionsschweißen (Laser-Induktions-Walzplattieren)
- Kleben

Der Partner TU Dresden forscht unter anderem an folgenden Fügetechnologien:

- klassische Lichtbogenverfahren
- Lötverfahren
- Reibschweißverfahren
- mechanisches Fügen

Wir freuen uns sehr, dass ab 2014 die Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) in Dresden ebenfalls dem Zentrum beitreten und ihr Know-how zum Elektronenstrahlschweißen einbringen wird.

KOORDINATION

DR. GUNTHER GÖBEL

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



ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

CLAUDIA ZELLBECK

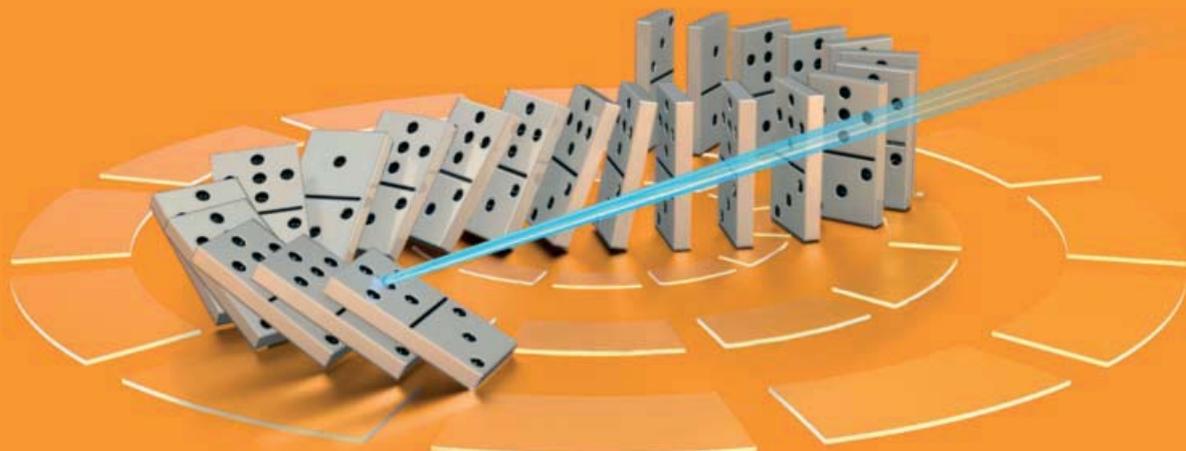
Telefon +49 351 83391-3332
claudia.zellbeck@iws.fraunhofer.de



www.iws.fraunhofer.de/fuegetechnik

Besonderes Augenmerk wird von allen Partnern auf eine wertungsfreie Gegenüberstellung der verschiedenen Lösungen gelegt, so dass Anwender direkt Entscheidungshilfen für ihr jeweiliges Anliegen erhalten können.

Aufgrund des großen Erfolgs der Auftaktveranstaltung findet vom 27. bis 28. Februar 2014 das 2. Fügetechnische Symposium »Tailored Joining« im Internationalen Congress Center Dresden statt. Wie schon bei der ersten Veranstaltung dieser Reihe wird eine große Bandbreite an modernen Fügeverfahren und ihre aktuellen Entwicklungen vorgestellt. Neu ist die Möglichkeit, Grundlagenkurse für einige Verfahren (beispielsweise das Rührreibschweißen, Pulsfügen oder mechanische Fügeverfahren) zu buchen, bei denen in den jeweiligen Laboren der Partner auch praktische Vorführungen stattfinden. Damit können sich auch Neueinsteiger sehr schnell mit einer Technologie vertraut machen und deren Möglichkeiten und Grenzen evaluieren. Mehr unter www.fuegesymposium.de



ZENTRUM FÜR LASERINTEGRATION IN DIE FERTIGUNGSTECHNIK

Deutschlands Potenzial im Maschinen- und Anlagenbau wird durch die Lasertechnik nachhaltig und flächendeckend erweitert und die Wettbewerbsfähigkeit gesichert. Das Fraunhofer IWS Dresden leistet dazu seit Jahren einen signifikanten Beitrag. Eine Vielzahl innovativer Technologien und Systeme konnten die Dresdner Forscher bereits in die industrielle Praxis überführen. Eine Auswahl realisierter Industrieüberführungen wurde zum 20-jährigen Bestehen des Institutes in einer Broschüre zusammengefasst.

Forschung für die industrielle Praxis, branchen- und themenübergreifend, ist ein wesentlicher Antrieb für die Aktivitäten des Institutes. Im Zentrum für Laserintegration in die Fertigungstechnik bündelt das Fraunhofer IWS deshalb seine Netzwerkaktivitäten und Kooperationen mit Forschungseinrichtungen und Unternehmen. Dadurch kann es seinen Kunden komplette Lösungen aus einer Hand anbieten.

Die Vorteile für die Maschinen- und Anlagenbauer sowie Fertiger liegen auf der Hand:

- Kosteneinsparung durch Verkürzung der Prozessketten
- höhere Effizienz der Fertigungsverfahren und Produkte
- höhere Qualität und Marktfähigkeit der Produkte
- Alleinstellungsmerkmale technischen Höchststands

Aktuelle Technologieüberführungen der letzten Jahre waren eine Laserstrahlhärteanlage zum Simultanhärten von Dampfturbinenschaufeln mit zwei Lasern und eine Anlage zum Laserstrahlhärten von Dampfturbinenschaufeln mit einem Laser. Weiterhin wurde das Laserstrahlhärten von Bremshebeln für LKW-Anhängerachsen eingeführt. Weitere Technologie- und Anlagenüberführungen des Jahres 2013 sind auf den Seiten 6 und 7 dargestellt.

KOORDINATION

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.iws.fraunhofer.de/laserintegration

Öffentlichkeitsarbeit und Wissensvermittlung sind wichtige Bestandteile des Technologietransfers. Deshalb stellte das Fraunhofer IWS im Jahr 2013 z. B. auf der Hannovermesse Industrie, der EMO, der Messe Schweißen und Schneiden, dem Härterei-Kongress und der Euromold aus. Ergänzend dazu beteiligte sich das Institut an verschiedenen Fachmessen im europäischen Ausland. Vor allem die Beziehungen mit den Nachbarländern Deutschlands werden kontinuierlich ausgebaut.

Zum Internationalen Laser- und Fügesymposium, welches vom 27. bis 28. Februar 2014 im Internationalen Congress Center in Dresden stattfindet, werden die bisherigen Veranstaltungen »Industrielle Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern«, Fügetechnisches Symposium »Tailored Joining« und »Internationales Lasersymposium Fiber & Disc (FiSC)« zusammengeführt. Ein umfangreiches Tagungsprogramm, eine Fachausstellung im Congress Center sowie ein Besuchstag am IWS machen die Veranstaltung vor allem für Besucher aus der Wirtschaft interessant. Mehr unter www.lasersymposium.de



NANO IM FOKUS – DAS NANOTECHNOLOGIE-ZENTRUM

Die Nanotechnologie bietet vielfältige Ansatzpunkte für Innovationen und liefert wichtige Beiträge zur Verbesserung von Energie- und Ressourceneffizienz. Damit die Forschungsergebnisse dieser branchenübergreifenden Querschnittstechnologie schneller und besser in Anwendungen umgesetzt werden, ist eine enge Kooperation von Wissenschaft und Unternehmen erforderlich. Diesem Anspruch stellt sich das Fraunhofer IWS Dresden seit Jahren mit eigenen Forschungsarbeiten sowie mit der Koordination und Mitarbeit einer Vielzahl von Initiativen.

Die Forschungsarbeiten des IWS widmen sich unter anderem:

- von Mikro bis Nano: Kontrollierte Oberflächen-Strukturierung von Silizium-Solarwafern (siehe S. 36/37)
- Multilayer-Lauellinsen für höchstauflösende Röntgenoptik (siehe S. 50/51).

Diese Arbeiten finden zunehmend Interessenten und Anwendungen in der Industrie.

Derzeit bereitet das Fraunhofer IWS Dresden gemeinsam mit der Landeshauptstadt Dresden die 10. »Nanofair – Internationales Nanotechnologie-Symposium« vor, welches vom 1. bis 3. Juli 2014 in Dresden stattfindet. Das Programm wird über 40 Vorträge von Referentinnen und Referenten umfassen. Die Themen reichen von Nanowerkstoffen für Leichtbau, Elektronik, Optik und Energieanwendungen über die Nanoanalytik bis hin zu speziellen Prozessaspekten. Erstmals wird das »Dresden Nanoanalysis Symposium« mit Themen rund um die Nanoanalytik in das Tagungsprogramm eingebunden.

Das Fraunhofer IWS engagiert sich zudem aktiv für den Transfer der Forschung in die Fertigung. So ist der Besuch der Messe »nano tech« in Tokio, Japan seit Jahren fester Bestandteil im Messeplan des Institutes. Auch die Messeauftritte auf den Fraunhofer-Gemeinschaftsständen Oberflächentechnik

KOORDINATION

PROF. ANDREAS LESON

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



ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

DR. RALF JÄCKEL

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



www.iws.fraunhofer.de/nanotechnologie

der Hannovermesse Industrie und der EMO widmeten sich diesem Thema.

Die Initiative »Nano in Germany« wählte am 12. Dezember 2013 Herrn Prof. Dr. Andreas Leson, stellvertretender Instituts- und Abteilungsleiter am IWS Dresden, für weitere zwei Jahre zu ihrem Sprecher. Die Initiative will die Nanotechnologie noch sichtbarer machen und deren Marktpotenzial herausstellen.

In dem vom IWS Dresden koordinierten Nanotechnologie-Kompetenzzentrum »Ultradünne funktionale Schichten« (Nano-CC-UFS) haben sich 51 Unternehmen, 10 Hochschulinstitute, 22 Forschungseinrichtungen und 5 Verbände zusammengeschlossen und kooperieren im Bereich Öffentlichkeitsarbeit und Technologietransfer. Das IWS ist zudem Mitglied in der Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie, im Dresdner Cluster Nanoanalytik sowie im Netzwerk Organic Electronics Saxony.



ZENTRUM FÜR KOHLENSTOFFTECHNIK – EINZIGARTIGE VIELFALT IM FRAUNHOFER IWS

Kohlenstoff ist ein besonderes Element mit außergewöhnlicher Vielseitigkeit. Verschiedene Modifikationen und Verbindungen ermöglichen ein breites Eigenschafts- und Anwendungsspektrum. In den Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWS Dresden spielt Kohlenstoff seit Jahren eine zentrale Rolle. Nachfolgend einige Beispiele:

Diamantähnliche Schichten (ta-C) zur Minderung von Reibung und Verschleiß sind ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt im Geschäftsfeld PVD- und Nanotechnik. Viele Jahre wurde der Zusammenhang zwischen Prozess- und Schichteigenschaften untersucht. Nun hat die im Fraunhofer IWS Dresden entwickelte Anlagentechnik zur Abscheidung von ta-C-Schichten ihren Weg in die Industrie gefunden. Zwei Industrieüberführungen wurde in diesem Jahr realisiert (siehe S. 44/45).

Graphitähnlicher Kohlenstoff (GLC: graphite like carbon), in dem die graphitische Bindung überwiegt und der daher eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt, kann am Fraunhofer IWS mit einer modifizierten Abscheidetechnologie erzeugt werden. Sie zeichnen sich durch geringe Kontaktwiderstände und hohe chemische Korrosionsfestigkeit aus. Ein spezieller Laserstrukturierprozess erlaubt es, diamantartige Kohlenstoffschichten lokal zu graphitisieren.

Carbon nanotubes (CNT) zeichnen sich durch hohe elektrische Leitfähigkeit aus. Vertikal orientierte Kohlenstoffnanoröhren dienen beispielsweise als leitfähige und binderfreie Matrix für die Kontaktierung des Schwefels in Lithium-Schwefel-Batterien. Die im IWS Dresden in der Gasphase kontinuierlich hergestellten einwandigen CNT finden zunehmend Eingang in unterschiedliche Applikationen im Bereich Sensorik. Dünne CNT-Schichten ermöglichen die Herstellung

KOORDINATION

PROF. STEFAN KASKEL

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



ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

DR. RALF JÄCKEL

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

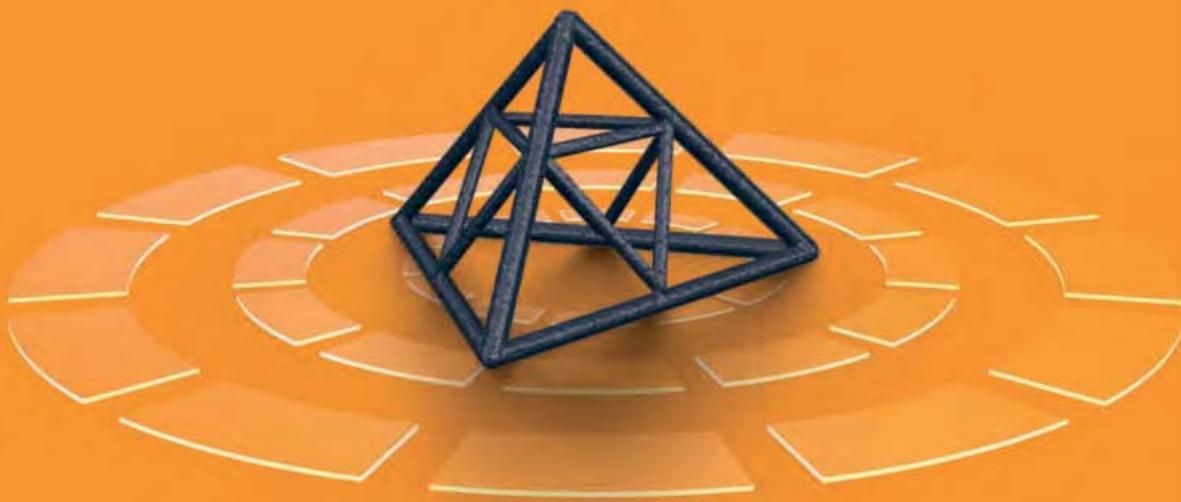


www.iws.fraunhofer.de/kohlenstofftechnik

transparenter leitfähiger Folien mit hoher Flexibilität und Aktivität. Durch die Einlagerung von CNT in Polymeroberflächen konnte das IWS Dresden deren Antistatistik verbessern.

Kohlenstofffasern sind ein weiteres Thema mit hoher Aktualität. Das IWS forscht sowohl an der Beschichtung von Kohlenstofffasern im Hinblick auf die Integration in Polymermatrizes als auch an der trenn- und fügetechnischen Verarbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen.

Mono- und polykristalliner Diamant ist von großem Interesse für optische, röntgenoptische und elektronische Anwendungen. In seiner Außenstelle, dem Fraunhofer CCL, in Lansing, MI, USA erzeugt das Fraunhofer IWS Diamant aus der Dampfphase durch homoepitaktische chemische Abscheidung (siehe S. 38/39).



ZENTRUM FÜR FASERVERBUNDTECHNIK – TECHNOLOGIEN FÜR MODERNEN LEICHTBAU

Leichtbaustrukturen, bestehend aus hochfesten Faserverbundmaterialien in Kombination mit speziell ausgelegten Bauteilgeometrien, können die weltweiten Anforderungen in Richtung energieeinsparender Produkte erfüllen. Um die Kosten für diese Strukturen zu senken, arbeitet das Fraunhofer IWS in Kooperation mit der TU Dresden an einer Vielzahl von Themenschwerpunkten der Fertigungs-Prozesskette. Hierzu gehören unter anderem:

- dosierter Wärmeeintrag durch Minimierung der Wechselwirkungszeiten bei gleichzeitig hohen Abtragsraten durch den Einsatz von UltrakurzpulsLasern
- endkonturnahe Bearbeitung von konsolidiertem und unkonsolidiertem Material mittels Laser-Remote-Technologie (remocut®FRP)
- Schaffung von stoff- und formschlüssigen Verbindungen durch Einsatz generierender oder abtragender Laserverfahren
- strukturelles Kleben von Kompositbauteilen
- Optimierung der Materialanbindung bei Hybridbauteilen durch gezielte Bearbeitung der Kontaktflächen mittels Laser- oder Plasmavorbehandlung
- Herstellung von reaktiven Nanometer-Multischichten zum Hochgeschwindigkeitsfügen von thermoplastischen Polymeren
- Entwicklung eines innovativen Prozesses zur Herstellung von Kohlenstofffasern, der sich durch hohe Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit auszeichnet

KOORDINATION

ANNETT KLOTZBACH

Telefon +49 351 83391-3235
annett.klotzbach@iws.fraunhofer.de

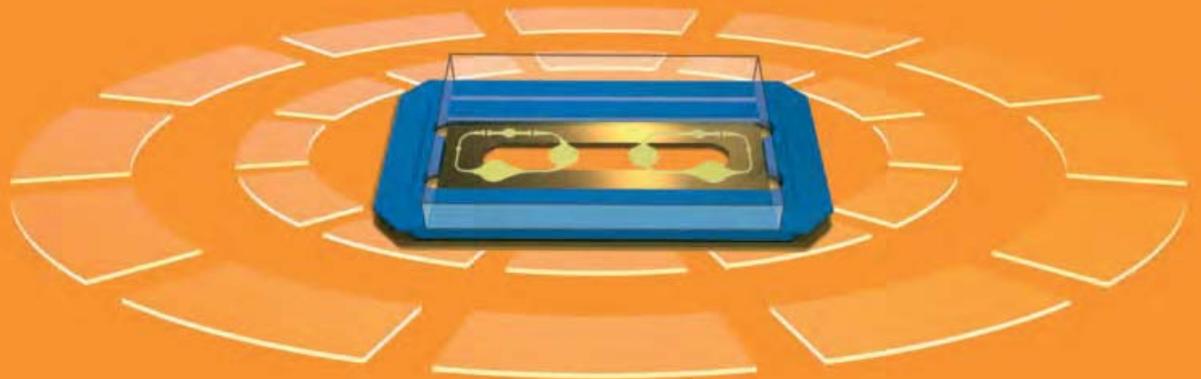


www.iws.fraunhofer.de/faserverbundtechnik

Durch die Mitgliedschaft im Verein »Carbon Composite e.V.« erfolgt ein reger Erfahrungsaustausch zwischen den Unternehmen in der Region sowie weiteren Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Composite-Technologie.

Die Forschungsergebnisse der verschiedenen Abteilungen wurden bereits auf zwei internationalen Composite-Messen, der »JEC« in Paris sowie der »Composites Europe« in Stuttgart, erfolgreich der Öffentlichkeit präsentiert.





SMART-SYSTEMS IM ZENTRUM MEDIZIN- UND BIOSYSTEMTECHNIK

Im Bereich der Medizin- und Biosystemtechnik sind Laser fest etabliert und angesichts ständig neuer Laserentwicklungen stetig auf dem Vormarsch. Das Fraunhofer IWS will Anwendern aus diesem Bereich einen Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen der in Verbindung mit Lasertechnologien herstellbaren technischen Systeme geben, angefangen von der Biotechnologie über Umwelt-Biosensorik bis hin zur Zellkulturtechnik. Die Aktivitäten sind darauf ausgerichtet, Neuentwicklungen kompakt darzustellen und industriebezogene Lösungen aufzeigen.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Fraunhofer IWS umfassen ein breites Spektrum, z. B.:

- Mikrostrukturieren, -schneiden, -bohren und -fügen mit verschiedenen Kurzpuls- und UltrakurzpulsLasern
- Design, Simulation und Rapid Prototyping von mikrofluidischen Strukturen und Mikroreaktoren
- Ansteuerungen von Mikroreaktortechnik
- Generieren biofunktionaler / biokompatibler Bauteile (z. B. Scaffolds, Tissue Engineering by Organic Printing)
- Nano-Imprint-Lithografie
- Entwicklung von universellen Lab-on-a-Chip-Plattformen sowie 2PP-Multi-Micro-Organ-Chips

Gemeinsam mit ihren Partnern haben die Dresdner Forscher verschiedene Produkte auf den Markt gebracht. Sie basieren auf den im IWS seit Jahrzehnten etablierten Mikrostrukturtechnologien und systemtechnischen Ansätze. Ein Beispiel ist die gemeinsam mit dem Fraunhofer IOF entwickelte SPR-Plattform, zur Detektion spezifischer Marker (DNA, RNA, Antikörper,...). Die für die Messung verwendeten mikrofluidischen Strukturen wurden im Fraunhofer IWS designed, simuliert und mittels verschiedener Herstellungstechnologien produziert.

KOORDINATION

DR. UDO KLOTZBACH

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



KOORDINATION

DR. FRANK SONNTAG

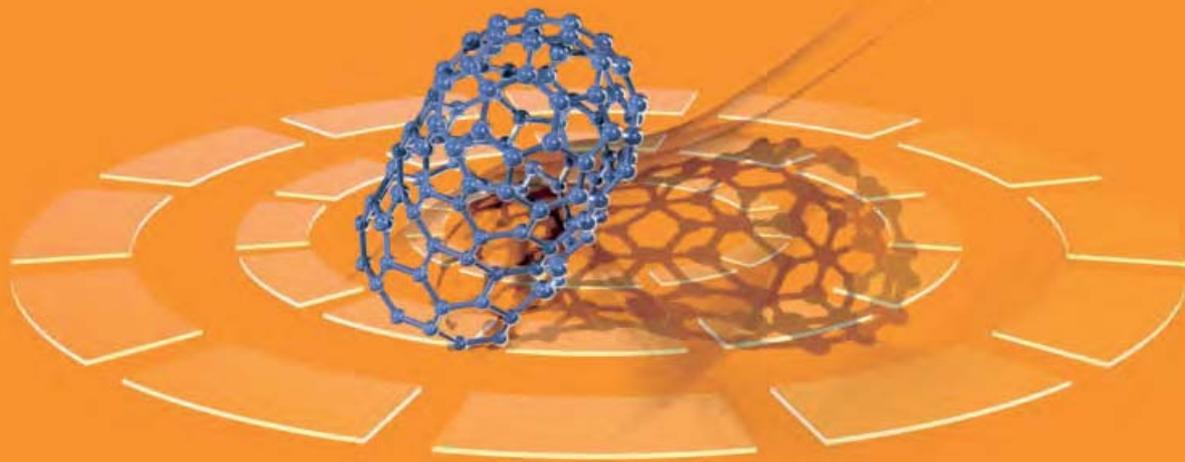
Telefon +49 351 83391-3259
frank.sonntag@iws.fraunhofer.de



www.iws.fraunhofer.de/biosystemtechnik

Basierend auf den Anforderungen der Pharma- und Kosmetikforschung bietet das Fraunhofer IWS eine Technologieplattform an, die es erlaubt, in einem Lab-on-a-Chip-System mit integrierten Mikropumpen komplexe Zellkulturexperimente für medizinische Diagnostik und Substanztestung durchzuführen. Sogenannte Multi-Organ-Chips (MOC) sind gut geeignet, die im lebendigen Organismus ablaufenden Prozesse nachzubilden. Im Jahr 2012 wurden die Arbeiten zur Entwicklung einer MOC-Plattform, die Tierversuche in Zukunft ersetzen soll, mit dem Dorothy Hegarty Award ausgezeichnet.

Neben den Lab-on-a-Chip-Systemen umfasst die Technologieplattform zahlreiche Zusatzsysteme für die automatisierte Handhabung und die nicht-invasive online Überwachung der Zellkulturexperimente. Diese reichen von der Ansteuerung der integrierten Mikropumpen über Fluoreszenz- und optische Sauerstoffmessung bis hin zu einer Laborautomationsplattform zur punktgenauen Dosierung und Überwachung.



ZENTRUM NANOTUBES UND -PARTIKEL – KLEINE TEILCHEN MIT GROSSER WIRKUNG

Auf Grund der großen Oberfläche zeigen Nanopartikel ein anderes physikalisches und chemisches Verhalten als Werkstoffe mit makroskopischen Strukturen. Durch die gezielte Einbettung der Nanopartikel in entsprechende Matrixmaterialien können demzufolge die Eigenschaften des Verbundmaterials wesentlich gesteigert werden. Das Fraunhofer IWS hat sich auf die Herstellung bzw. die Anwendung von kohlenstoffhaltigen Nanopartikeln spezialisiert. Hierzu gehören unter anderem:

Herstellung von einwandigen Kohlenstoffnanoröhren (SWCNT):

- Entwicklung eines weltweit einmaligen Verfahrens zur skalierbaren, kostengünstigen Gasphasen-Synthese von SWCNT
- Aufbau einer Pilotlinie am Fraunhofer IWS zur Herstellung großer Mengen SWCNT (kg / Tag) zur Herstellung halbleitender bzw. metallischer SWCNT mit bis zu 90 % Reinheit
- Online-Monitoring der SWCNT-Gasphasensynthese
- Entwicklung eines Verfahrens zur Abscheidung von vertikal orientierten CNT auf Oberflächen (in Kooperation mit der TU Dresden)

Aufbereitung der SWCNT:

- Reinigung der SWCNT (Entfernung des amorphen Kohlenstoffs und der Katalysatorpartikel)
- Funktionalisierung (Dotierung) der SWCNT
- Dispergierung der SWCNT in wässrigen Tensidlösungen oder organischen Lösungsmitteln zum direkten Versprühen auf Oberflächen

KOORDINATION

DR. GERRIT MÄDER

Telefon +49 351 83391-3262
gerrit.maeder@iws.fraunhofer.de



www.iws.fraunhofer.de/nanopartikel

Herstellung von nanoskaligen Rußpartikeln:

- Entwicklung von solarthermischen Verfahren (keine CO₂-Emission) zur Erzeugung von Ruß mit einer definierten Größenstruktur als Nebenprodukt der Wasserstoffherzeugung

Anwendungsgebiete der CNT sind beispielsweise:

- transparente leitfähige Schichten
- flexible leitfähige Schichten
- antistatische Oberflächen
- flexible leitfähige Polymere
- optische Absorberschichten

Das Fraunhofer IWS ist integriert in die Innovationsallianz Inno.CNT an der rund 90 namhafte Partner aus Wissenschaft und Industrie beteiligt sind. Auf diese Weise kann das Potential speziell der SWCNT optimal ausgenutzt und in industrielle Anwendungen überführt werden.



ZENTRUM FÜR PROZESSÜBERWACHUNG UND SENSORIK – DER QUALITÄT VERPFLICHTET

Industrielle Produktionsprozesse zu überwachen sowie deren Produkte während bzw. nach der Fertigung zu charakterisieren, ist eine allgegenwärtige Aufgabenstellung in modernen Produktionsprozessen. Somit geht die Entwicklung neuer Fertigungstechnologie immer stärker einher mit der Entwicklung adäquater prozessanalytischer Sensoren, Messmethoden und -geräten.

Das Zentrum Prozessüberwachung und Sensorik am Fraunhofer IWS konzentriert sich diesbezüglich auf die Entwicklung optischer, optisch-spektroskopischer Sensorik und deren Implementierung im Bereich der Laser- und Oberflächentechnologie.

Mit Hilfe der für bestimmte Einsatzgebiete entwickelten Monitoringtechnologien können z. B. relevante Informationen über Laserprozesse (Temperatur, Strahlanalyse), Produkteigenschaften (Oberflächen, Schichten, Zusammensetzung, Porosität etc.), Prozessatmosphären (Gaszusammensetzung) berührungslos und hochempfindlich bestimmt werden. Die dabei erhaltenen Ergebnisse werden zur automatisierten Überwachung, Steuerung und Optimierung der Prozesse eingesetzt. Neben der Anpassung vorhandener Technologien für Prozess-Monitoring-Aufgaben werden auch neuartige Sensortechnologien bis zur Marktreife entwickelt. Basierend auf langjährigen Erfahrungen kann auf ein großes Expertenwissen zurückgegriffen werden.

Entwicklungsschwerpunkte für das Monitoring von Laserprozessen sind z. B.:

- High-Speed Temperaturüberwachung beim Laserstrahlhärten und Auftragschweißen (E-MAqS / E-FAqS)
- Mess- und Regelsystem für Temperaturüberwachung (LompocPro)
- Laserstrahlanalyse zur Qualitätskontrolle von Optiken und Laserquellen (LasMon)
- Plasmaspektroskopie für das Laserstrahlschweißen

KOORDINATION

DR. WULF GRÄHLERT

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



KOORDINATION

DR. STEFFEN BONSS

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



www.iws.fraunhofer.de/prozesskontrolle

Darüber hinaus werden optisch-spektroskopische Verfahren genutzt, um sowohl Einzelpunktmessungen zu realisieren als auch 100 %-Kontrollen. Insbesondere Verfahren wie die IR-, RAMAN-, UV/VIS- und Laserdiodenspektroskopie eignen sich hervorragend für vielfältige Aufgaben im Prozess-Monitoring. Für ein 100 %-Monitoring kommen modernste »Hyperspectral Imaging« Systeme zum Einsatz.

Entwicklungsschwerpunkte der optisch-spektroskopisch basierten Messtechnologien sind z. B.:

- optische Kalorimetrie zur Charakterisierung poröser Materialien (InfraSORP®)
- Bestimmung der Wasserdampfpermeation von Ultrabariere-materialien (HiBarSens®)
- Bildanalyse-Tools (Hard- und Software) zum Hyperspectral Imaging
- Infrarot-basierte in-situ Multigasanalytik (ISPROM®)
- Laserdiodenspektroskopische Spurengasanalytik (TraceScout)



DORTMUNDER OBERFLÄCHENCENTRUM (DOC®)

Die Oberflächentechnik nimmt bei Produkten und Flachzeugen aus Stahl einen herausragenden Stellenwert ein. Die ThyssenKrupp Steel Europe AG (TKSE) hat ihre Forschung und Entwicklung im Bereich der Oberflächentechnik in Dortmund konzentriert. Unter der Bezeichnung Dortmunder OberflächenCentrum (DOC®) befindet sich hier eine der weltweit führenden Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Oberflächentechnik für Stahl. Hier werden maßgeschneiderte Beschichtungen entwickelt, die in kontinuierlichen Prozessen auf Stahlband applizierbar sind. Kundenorientierte Entwicklungsziele sind neuartige Oberflächenkonzepte mit überlegenen Eigenschaften, wie z. B. gesteigerter Korrosionsbeständigkeit, Kratzfestigkeit, elektrischer Leitfähigkeit, Umformeignung oder Reinigungseigenschaften. Aber auch Stahl Flachzeuge mit ganz neuen funktionellen Eigenschaften und einer damit verbundenen erhöhten Wertschöpfung, wie z. B. solarthermischen oder photovoltaischen Eigenschaften, und neuartige Leichtmaterialien (LITECOR®) werden aktuell entwickelt.



Blick in die Technikumshalle des Dortmunder Oberflächencentrums

KOORDINATION

DR. AXEL ZWICK

Telefon +49 231 844 3512

axel.zwick@iws.fraunhofer.de



FRAUNHOFER-PROJEKTGRUPPE AM DORTMUNDER OBER- FLÄCHEN-CENTRUM DOC®

Eberhardstraße 12

44145 Dortmund

www.iws.fraunhofer.de/dortmund

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.

Aktuelle Schwerpunkte Dünnschichttechnik:

- Entwicklung leitfähiger Kohlenstoffschichtsysteme (GLC: Graphite Like Carbon) für die Elektromobilität, z. B. für Stahl-Bipolarplatten für Brennstoffzellen sowie Al- und Cu-Elektroden für Batterien und Superkondensatoren (z. B. Leitfähigkeit vgl. Gold ohne Degradation im Brennstoffzellen-Stracktest)
- Diamor®-Schichtsysteme (ta-C: tetraedisch amorpher Kohlenstoff) für den Verschleißschutz auf Basis des short pulsed Arc (spArc®)-Verfahrens (zzt. Serieneinführung von selbstschärfenden Kochmessern)
- neuartige PVD-Hochleistungsverfahren im Druckbereich > 30 mbar für die Bandveredelung und die Entwicklung von Korrosionsschutzsystemen auf Basis von Zinklegierungsüberzügen, z. B. für hochkorrosionsfeste metallische Überzüge (z. B. ZnMg) und metallische Überzüge für die Warmumformung (z. B. ZnFe)



Aktuelle Schwerpunkte der Lasermaterialbearbeitung und Spritztechnik:

- Entwicklung von Fügeverfahren auf der Basis des Laser-MSG-Hybridschweißens für den Leichtbau, z. B. für das Schweißen von Mobilkrankomponenten aus hochfesten Feinkornbaustählen (19 m lange Hybridschweißanlage zum Längsnahtschweißen von Teleskopkrankomponenten wurde beim Industriekunden in Betrieb genommen)
- spritzerarmes Hochgeschwindigkeits-Laserstrahlschweißen mit Festkörperlasern hoher Strahlqualität
- Lichtbogendrahtspritzen
- Kombinationsverfahren Fügen/Lichtbogendrahtspritzen, z. B. bei der Nachverzinkung von Schweißnähten
- Entwicklung von Prototypenschweißverfahren mit dem Festkörperlaser

Darüber hinaus bietet die Fraunhofer-Projektgruppe auf einer Fläche von 1100 m² eine Reihe sich ergänzender Verfahren zur Oberflächenveredelung an. Mit modernster Anlagentechnik werden Spritzschichten mit dem preisgünstigen Lichtbogendrahtspritzverfahren auch unter sauerstofffreien Bedingungen (Vakuumkammer) und in Kombination mit Festkörperlasern hergestellt. Zudem können hoch beanspruchte Bereiche von Bauteilen und Werkzeugen mit dem Laserauftragschweißen gezielt mit millimeterdicken Verschleißschutzschichten gepanzert werden. Aber auch im Vakuum lassen sich metergroße und tonnenschwere Teile mit nano- bis mikrometerdicken Höchstleistungsschichten versehen, z. B. mit Diamor[®]-Schichtsystemen mit dem kostengünstigen und robusten spArc[®]-Verfahren. Diese Schichten zeichnen sich durch eine überragende Härte und exzellente Gleiteigenschaften aus und können bei Temperaturen unter 150 °C mit hohen Raten abgeschieden werden. Schichtsysteme mit zusätzlichen Korrosionsschutzfunktionalitäten sind in der Entwicklung.

Die wichtigste Anlagentechnik in der Fraunhofer-Projektgruppe im DOC[®] ist:

- modulare spArc[®]-Verdampfertechnik in einer industriellen PVD-Großkammeranlage mit einem Nutzdurchmesser und einer Nutzhöhe von jeweils 1,2 m (Teilegewicht bis 2 t),
- selbst entwickelte Hochleistungs-PVD-Technik für die Bandveredelung im Grobvakuum,
- modernste Lichtbogendrahtspritztechnik mit Spritzkabine, Vakuumkammer und Möglichkeiten der Kombination mit dem Laser,
- 3D-taugliche Laser- und Laser-MSG-Hybridschweißanlagen (Kragarmportalanlage, Roboteranlagen) mit einem mobilen 8 kW Faserlaser und einem mobilen 4 kW Nd:YAG-Laser.

Daneben können in gemeinsamen Projekten Anlagen des Fraunhofer IST und der TKSE genutzt werden. So wird z. B. gemeinsam mit TKSE und IST in der modular ausgelegten, über 80 m langen Bandpilotanlage von TKSE im DOC[®] der Einsatz von Verfahren der Vakuumdeposition für die kontinuierliche Veredelung von Feinblech erforscht.

Die breite Palette dieser Verfahren, die sich teilweise untereinander kombinieren lassen, stellen zusammen mit dem Know-how des Fraunhofer IWS sicher, dass TKSE, TKSE-Kunden und andere industrielle Kunden technisch und wirtschaftlich optimale Problemlösungen bekommen. Mit Hilfe neuartiger, kompakter und mobiler Festkörperlaser hoher Strahlqualität bis 8 kW Laserleistung ist es möglich, sowohl Verfahrensentwicklungen als auch »Trouble shooting« direkt beim Industriekunden zu realisieren und kurzfristig produktionsnah umzusetzen.



PROJECT CENTER LASER INTEGRATED MANUFACTURING IN WROCLAW (PCW)

Die Kompetenz des 2008 eröffneten Fraunhofer Projektzentrums beruht auf den Kernkompetenzen der laserbasierten Geschäftsfelder des Fraunhofer IWS Dresden:

- Abtragen und Trennen
- Fügen (Schweißen)
- Thermisches Beschichten
- Randschichttechnik

und auf den grundlegenden Bereichen des CAMT (Centre for Advanced Manufacturing Technologies) der Technischen Universität Wrocław:

- Herstellungstechnologien, einschl. generativer Technologien
- Produktionsmanagement
- Produktionsautomatisierung und Steuerung
- Qualitätsprüfsystem

Das Fraunhofer Project Center ist in den Räumlichkeiten des Institute of Production Engineering and Automation der Technischen Universität Wrocław angesiedelt.

Im Jahr 2013 vertiefte das Center die Aktivitäten zur Etablierung des Fraunhofer Modells auf dem polnischen Forschungsmarkt. Insbesondere die Zusammenarbeit mit den bestehenden Kunden konnte intensiviert werden.

Die im Jahr 2012 installierten Systeme zum Schneiden von Airbag-Gewebebahnen, zum Schweißen von Plattenwärmetauschern und zum Pulverauftragschweißen wurden 2013 in die bestehenden Fertigungsprozesse integriert. Die gemeinsamen Arbeiten konzentrierten sich neben der Einweisung und Schulung des Bedienpersonals auf die Technologieüberführung und -optimierung in der Produktion.

INSTITUTSDIREKTOR

PROF. EDWARD CHLEBUS

TU Wrocław

Telefon +48 71 320 2705

edward.chlebus@pwr.wroc.pl



PROJECT CENTER LASER

INTEGRATED MANUFACTURING

Wrocław University of Technology

ul. Łukasiewicza 5

50-371 Wrocław, Poland

KOORDINATION

DR. JAN HAUPTMANN

Fraunhofer IWS

Telefon +49 351 83391-3236

jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de



www.iws.fraunhofer.de/polen

Die bestehenden Softwarelösungen wurden an neue Anforderungen seitens der Endkunden angepasst bzw. erweitert. Insbesondere beim Schneiden von »One Piece Woven«-Airbags ergibt sich diesbezüglich ein ständiger Bedarf, da mit neuen Fahrzeugmodellen häufig neue Airbagdesigns verbunden sind. Die ständige Weiterentwicklung in diesem Bereich hat direkten Einfluss auf die Webtechnik und die entsprechenden Stoffe.

Den veränderten Ausgangsbedingungen wird mit Anpassungen und Erweiterungen der Software entsprochen. Die Remot-cut-Schneidtechnologie bietet die dazu notwendige Flexibilität.



Die Zusammenarbeit zwischen den beiden Partnereinrichtungen wurde mit dem Austausch von Personal ebenfalls weiter ausgebaut. Die Festigung persönlicher Kontakte führt zu einer engeren Kooperation beider Partner.

Insbesondere das Zusammenführen der verteilten Kompetenzen in gemeinsamen Unternehmungen hat zu einer neuen Qualität der Projektergebnisse geführt. So werden beispielsweise die Ergebnisse des Projektes RemCoVis, in dem es um die Entwicklung von Visualisierungs- und Überwachungslösungen für Remotebearbeitungsprozesse ging, täglich in Fraunhofer IWS-Laboren für experimentelle Aufgaben genutzt.

Die gemeinsam erarbeiteten Lösungen wurden durch die permanente Verwendung im Labor kontinuierlich verbessert und optimiert. Die Anwendungen der RemCoVis-Ergebnisse in Industrieprojekten überzeugte die Mitarbeiter und Partner. Die Ergebnispräsentationen vor Kunden stießen häufig auf großes Interesse. Vielversprechende Gespräche zu konkreten Umsetzungen haben begonnen.

Das Vorhaben »LasTech - Laser Technologies for Manufacturing Functional 3D and Surface Structures« befasst sich mit der Identifizierung der bestimmenden Parameter für die Mikrometallurgie lasergenerierter Bauteile. Im Laufe der Projektbearbeitung konnte die Bauteilporosität erfolgreich auf 0,04 % Porenanteil reduziert werden.

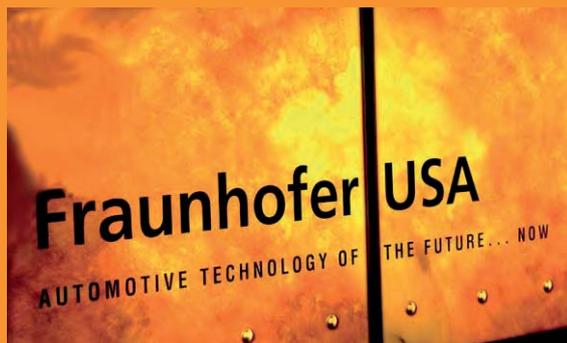
Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf die Minimierung der Strukturgrößen, die Reduzierung des Nachbearbeitungsaufwandes und die Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurden in »ready to use«-Musterbauteilen aus den Bereichen Gerätebau und Medizintechnik umgesetzt.

Höhepunkt des Jahres war die Verleihung der Ehrendoktorwürde der Technischen Universität Wrocław an Herrn Prof. Eckhard Beyer am 15. November 2013. Die Zeremonie war eingebettet in die jährlichen Feierlichkeiten zur Gründung der Technischen Universität Wrocław am 15. November 1945, deren Wurzeln auf die Lemberger Polytechnika und die Technische Hochschule Breslau zurückgehen.

In der Laudatio zur Verleihung der Ehrendoktorwürde stellte Herr Prof. Chlebus die besonderen Verdienste Herrn Prof. Beyers im Bereich der Lasermaterialbearbeitung und der Internationalisierung des Fraunhofer-Modells heraus. Mit der Aufnahme Herrn Prof. Beyers in die Reihen der besonders ausgezeichneten Doktoren der Technischen Universität Wrocław wird die erfolgreiche Zusammenarbeit weiter gestärkt.



Prof. Dr.-Ing. habil. Tadeusz Wieckowski (links) überreicht Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer (rechts) die Urkunde der Ehrendoktorwürde, Prof. Dr. Edward Chlebus (Mitte)



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 1994 im »Fraunhofer-Center for Coatings and Laser Applications CCL«. Das Center spiegelt die Hauptaktivitäten des IWS, die Laser- und die Schichttechnologie, wieder. Mit einem Jahresumsatz von 5 Mio. US-\$ ist das Center eines der umsatzstärksten Fraunhofer-Center in den USA.

Das CCL hat zwei Divisions, die »Coating Technology Division« an der Michigan State University in East Lansing und die »Laser Applications Division« in Plymouth, Michigan. Die Zusammenarbeit mit der Michigan State University startete im Jahr 2003. Prof. Jes Asmussen, ein international anerkannter Experte auf dem Gebiet der Plasmatechnologie, Diamantbeschichtung und -herstellung übernahm die Leitung des CCL. Seine wissenschaftliche Expertise an der MSU ergänzt in idealer Weise das Know-how des IWS auf dem Gebiet der Diamor®-Beschichtungen.



Dr. Georg Rosenfeld, Präsident der Fraunhofer USA, Inc., mit Prof. Eckhard Beyer, Institutsleiter des Fraunhofer IWS Dresden und Dr. William Hartman, Geschäftsleiter Fraunhofer USA (v.l.n.r.)

CENTER DIRECTOR CCL / USA

PROF. JES ASMUSSEN

Telefon +1 517 355 4620
 jasmussen@fraunhofer.org
 www.ccl.fraunhofer.org



DIRECTOR COATING TECHNOLOGY DIVISION

DR. THOMAS SCHÜLKE

Telefon +1 517 432 8173
 tschuelke@fraunhofer.org
 East Lansing, Michigan
 48824-1226, USA
 www.ccl-laser.fraunhofer.org



DIRECTOR LASER APPLICATIONS DIVISION

CRAIG BRATT

Telefon +1 734 738 0550
 cbratt@fraunhofer.org
 Plymouth, Michigan 48170-6080, USA
 www.ccl-coatings.fraunhofer.org



Mit einer Festveranstaltung begingen MSU und CCL im September 2013 das 10-jährige Jubiläum der Zusammenarbeit. Mit Stolz blicken die Partner auf eine Vielzahl wissenschaftlicher und technischer Spitzenleistungen zurück. Aufträge im Wert von 3 Mio US-\$ konnten 2013 direkt von der Industrie akquiriert werden, ein Zeichen für die hohe Qualität der Entwicklungsarbeiten am CCL.



Laser Applications Division

CCL's Coatings Technology Division arbeitet in Lansing gemeinsam mit Fakultätsmitgliedern und Studenten der Michigan State University an neuen Lösungen zur Herstellung von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten, polykristallinen Diamantschichten und Diamantkristallen mittels PVD- und CVD-Verfahren.

Für die Reduktion des CO₂-Ausstoßes und die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bietet das CCL die komplette Prozesskette und Systemtechnik zur Beschichtung von Motor-, Antriebs- und Bremsenkomponenten mit Diamor® an. Die reibungsmindernde diamantähnliche Kohlenstoffschicht wird sehr effizient und mit hoher Qualität mit dem im IWS Dresden entwickelten Laser-Arc-Verfahren hergestellt.

Fraunhofer CCL bietet seinen Kunden Design und Herstellung von kunden- und anforderungsspezifischen Bor-dotierten Diamantelektroden an. Diese Elektroden sind in ihrer Herstellung wesentlich kostengünstiger als Platinelektroden, da sie mittels CVD als dünne Schicht abgeschieden werden können. Gleichzeitig ermöglichen sie ein breiteres elektrochemisches Potentialfenster und damit neue Anwendungen.

CCL's Coating Technology Division ist zudem bekannt für die Herstellung von qualitativ hochwertigen Diamantplatten und Einkristallen im Labormaßstab. Heute können die Diamantprodukte bereits in größerer Stückzahl produziert und kundenspezifisch nachbearbeitet werden.



Coating Technology Division

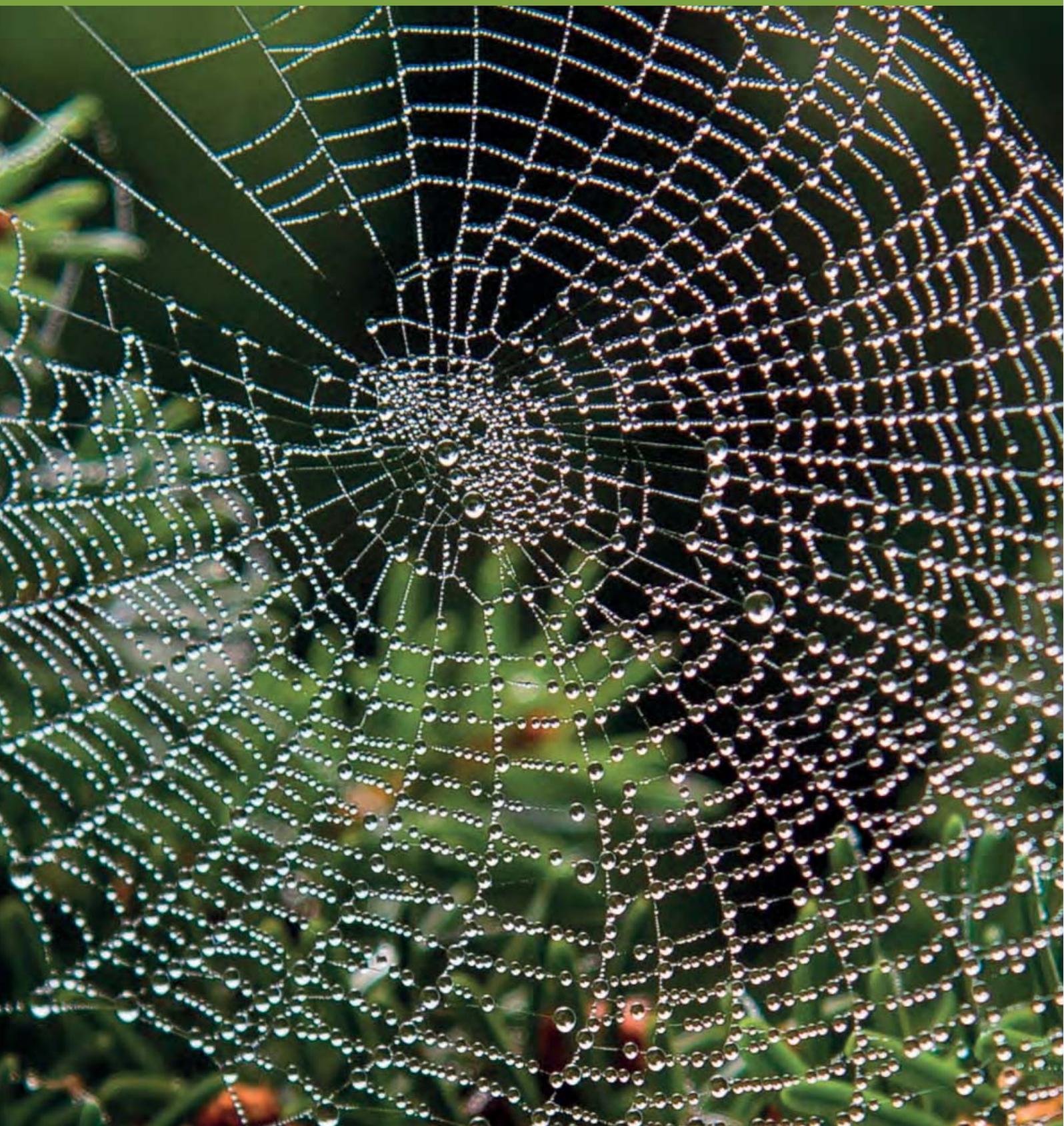
CCL's Laser Applications Division ist in Plymouth (Michigan) in unmittelbarer räumlicher Nähe zur amerikanischen Autoindustrie von Detroit angesiedelt. Die Lasergruppe besitzt umfangreiches Know-how auf dem Gebiet der Materialbearbeitung mit Hochleistungslasern. Im Mittelpunkt der Aktivitäten steht die Entwicklung von Technologien wie Laserstrahlschweißen und -auftragschweißen sowie die additive Fertigung für eine Vielzahl industrieller Kunden aus verschiedenen Branchen.

2013 wurden zahlreiche neue Laseranwendungen entwickelt und in die Fertigung überführt, beispielsweise eine Prototypanlage zum Reparieren und Generieren von Antriebskomponenten durch 3D-Laserauftragschweißen. Auch das im Fraunhofer IWS Dresden entwickelte und patentierte Verfahren des induktiv unterstützten Laserstrahlschweißens fand mit Unterstützung des CCL Eingang in die amerikanische Automobilindustrie.

Die Lithium-Ionen-Batterie-Technologie hat sich in den letzten fünf Jahren zur Kernkompetenz des CCL entwickelt. Die Lasergruppe arbeitet intensiv an der Entwicklung von Laserstrahl-Schweißtechnologien für verschiedene industrielle Kunden in diesem Bereich und kann auch hier auf mehrere erfolgreiche Überführungen in die industrielle Praxis verweisen.

CCL's Qualitätsmanagementsystem ist zertifiziert nach DIN ISO9001: 2008 und garantiert seinen Kunden eine effiziente, dokumentierte und nachvollziehbare Projektbearbeitung.

NETZWERKE





Joseph von Fraunhofer

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 67 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 23 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2 Milliarden Euro. Davon fallen rund 1,7 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

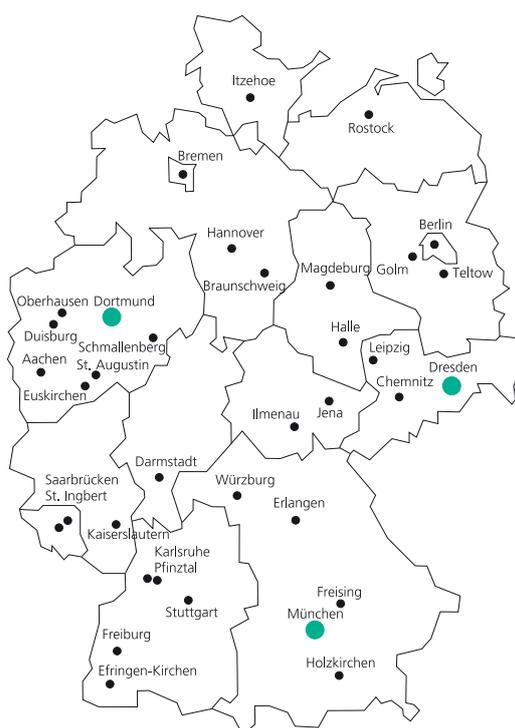
Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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

sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

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

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





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

- Beschichtung & Oberflächenfunktionalisierung
- Laserbasierte Fertigungsverfahren
- Laserentwicklung & Nichtlineare Optik
- Materialien der Optik & Photonik
- Mikromontage & Systemintegration
- Mikro- & Nanotechnologien
- Kohlenstofftechnologie
- Messverfahren & Charakterisierung
- Ultrapräzisionsbearbeitung
- Werkstofftechnologien
- Plasma- & Elektronenstrahlquellen

KONTAKT

Verbundvorsitzender
Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Verbundassistentin
Susan Oxfart
Telefon +49 3641 807-207

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ELEKTRONENSTRAHL- UND PLASMATECHNIK FEP, DRESDEN

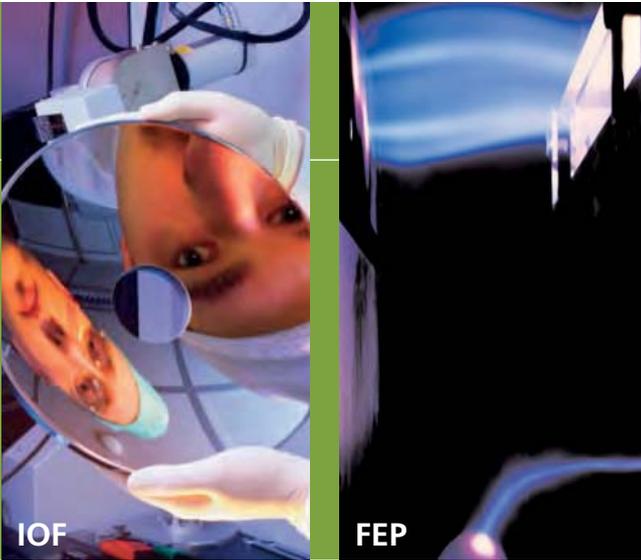
Die Kernkompetenzen des Fraunhofer FEP sind die Elektronenstrahltechnologie, die plasmaaktivierte Hochratebedampfung und die Hochrate-PECVD. Die Arbeitsgebiete umfassen die Vakuumbeschichtung sowie die Oberflächenbearbeitung und -behandlung mit Elektronen und Plasmen. Neben der Entwicklung von Schichtsystemen, Produkten und Technologien ist ein wichtiger Schwerpunkt die Aufskalierung der Technologien für die Beschichtung und Behandlung großer Flächen mit hoher Produktivität.

www.fep.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR LASERTECHNIK ILT, AACHEN

Seit 1985 ist das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT ein gefragter FuE-Partner der Industrie für die Entwicklung innovativer Laserstrahlquellen, Laserverfahren und Lasersysteme. 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, Schichtanwendung, 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 STRAHLTECHNIK IWS, DRESDEN

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS steht für Innovationen in den Geschäftsfeldern Fügen, Trennen sowie Oberflächentechnik und Beschichtung. Die Besonderheit des Fraunhofer IWS liegt in der Kombination eines umfangreichen werkstofftechnischen Know-hows mit weitreichenden Erfahrungen in der Entwicklung von Technologien und Systemtechnik. Zahlreiche Lösungen im Bereich der Lasermaterialbearbeitung und Schichttechnik finden jedes Jahr Eingang in die industrielle Fertigung.

www.iws.fraunhofer.de



EXZELLENTER KOOPERATIONSPARTNER TU DRESDEN

Seit dem Beginn der Kooperation mit der TU Dresden im Jahr 1997 hat das Fraunhofer IWS die Zusammenarbeit mit den verschiedenen Lehrstühlen kontinuierlich ausgebaut. Diese ermöglicht die Vereinigung des breiten Grundlagenwissens der Universität mit der anwendungsorientierten Entwicklung am IWS. Professoren und Mitarbeiter der TU Dresden sind eng in die Forschungsprojekte des IWS eingebunden und partizipieren an der technischen Ausstattung und Infrastruktur des Institutes. IWS-Führungskräfte und -Mitarbeiter unterstützen die Universität in der Ausbildung von Studenten und Doktoranden und generieren daraus ihre Nachwuchswissenschaftler. Im Folgenden die personellen Kooperationen im Einzelnen:

FAKULTÄT MATHEMATIK UND NATURWISSENSCHAFTEN FACHRICHTUNG CHEMIE UND LEBENSMITTELCHEMIE

PROFESSUR FÜR ANORGANISCHE CHEMIE
PROF. DR. RER. NAT. HABIL.
STEFAN KASKEL



Themen:

- Synthese, Charakterisierung und Verwendung poröser Materialien
- anorganische Nanopartikel
- Nanokomposite und Hybridmaterialien

FAKULTÄT MASCHINENWESEN INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK

**PROFESSUR FÜR LASER- UND
OBERFLÄCHENTECHNIK**
PROF. DR.-ING. HABIL. DR. H. C.
ECKHARD BEYER



Themen:

- Lasersystemtechnik
- Laserbearbeitungsverfahren
- Plasmen in der Fertigungstechnik
- Oberflächentechnik
- Fertigungstechnik
- Laserrobotik

FAKULTÄT MASCHINENWESEN INSTITUT FÜR WERKSTOFFWISSENSCHAFT

PROFESSUR FÜR WERKSTOFFTECHNIK
PROF. DR.-ING.
CHRISTOPH LEYENS



Themen:

- metallische und intermetallische Hochtemperaturwerkstoffe
- Eisen- und Nichteisenwerkstoffe
- Oberflächen- und Beschichtungstechnik
- Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen metallischer Werkstoffe

»Also lautet der Beschluß, dass der Mensch was lernen muss.«

Wilhelm Busch



**FAKULTÄT MASCHINENWESEN
INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK**

**PROFESSUR FÜR LASERSTRUKTURIEREN
IN DER FERTIGUNGSTECHNIK
PROF. DR.-ING.
ANDRÉS-FABIÁN LASAGNI**



Themen:

- großflächige Herstellung von 2D- und 3D-Mikro- und Nanostrukturen
- Oberflächenfunktionalisierung
- Laserstrukturieren
- Zwei-Photonen-Polymerisation

**FAKULTÄT MASCHINENWESEN
INSTITUT FÜR WERKSTOFFWISSENSCHAFT**

**PROFESSUR FÜR WERKSTOFFPRÜFUNG
UND -CHARAKTERISIERUNG
PROF. DR.-ING.
MARTINA ZIMMERMANN**



Themen:

- mechanische Eigenschaften und Mikrostruktur
- Materialermüdung (spez.: Hochfrequenzprüftechnik)
- Schadensanalyse und Schadensprävention
- Struktur- und Bauteilzuverlässigkeit

**FAKULTÄT MASCHINENWESEN
INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK**

**PROFESSUR FÜR NANO- UND SCHICHT-
TECHNOLOGIE
PROF. DR. RER. NAT.
ANDREAS LESON**



Themen:

- Nanotechnik
- Dünnschichttechnologie

**FAKULTÄT MASCHINENWESEN
INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK**

**PROFESSUR FÜR PRODUKTIONSTECHNIK
STEINBEISHOCHSCHULE
PROF. DR.-ING.
ULRICH GÜNTHER**



Themen:

- spanende Oberflächenbearbeitung
- Produktionsgestaltung



»DRESDNER INNOVATIONSZENTRUM ENERGIEEFFIZIENZ DIZE^{EFF}«

Die TU Dresden und die Fraunhofer-Gesellschaft gründeten im Jahr 2009 das Dresdner Innovationszentrum Energieeffizienz DIZE^{EFF} als Teil des Netzwerks DRESDEN-concept.

Ziele des Innovationszentrums sind:

- der Ausbau der Region Dresden für das Zukunftsthema Energieeffizienz über die bestehenden institutionellen Grenzen hinaus,
- die Beschleunigung von Innovationen für die ansässige Wirtschaft,
- die Nachwuchsförderung durch Schwerpunktbildung in der universitären Ausbildung und damit eine größere Attraktivität der Region für Studenten.

9 Einrichtungen der TU Dresden bearbeiteten gemeinsam mit 4 Dresdner Fraunhofer-Instituten in 23 wissenschaftlichen Projekten die Komplexe:

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

SPRECHER

PROF. ECKHARD BEYER

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



KOORDINATION

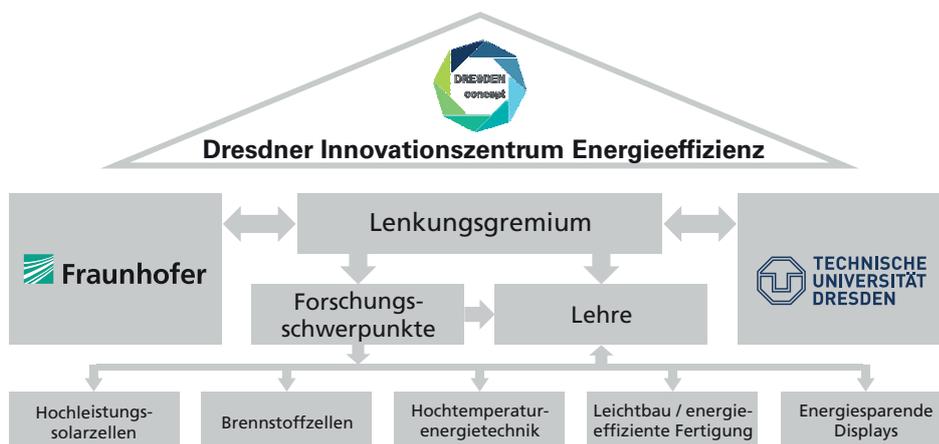
DR. STEFAN SCHÄDLICH

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



www.innovation-energieeffizienz.de

Zur Finanzierung der ersten vierjährigen Projektphase steuerte Fraunhofer sechs Millionen Euro bei, weitere vier Millionen kamen vom Freistaat Sachsen und vom »Europäischen Fonds für regionale Entwicklung« (EFRE). Die Ergebnisse der Projekte sind jetzt in einer Broschüre zusammengefasst.





Nach nunmehr vierjähriger Laufzeit kann man feststellen: das DIZE^{EFF} war wissenschaftlich und wirtschaftlich ein voller Erfolg. DIZE^{EFF}-Wissenschaftler waren beispielsweise an den Forschungen zur organischen Elektronik beteiligt. Für die projektübergreifenden Forschungsarbeiten zur schnellen und großflächigen Fertigung von Nanostrukturen für hocheffiziente Solarzellen wurde Prof. Dr. Lasagni sowie Dr. Müller-Meskamp und ihren Forschergruppen die Auszeichnung German High Tech Champions auf dem Gebiet Solar/PV verliehen.

Eine wesentliche Evaluierungsgröße des DIZE^{EFF} stellen die eingeworbenen Drittmittelerträge dar. Sie betragen zum Ende der Projektlaufzeit immerhin ca. 130 Prozent der Fördersumme. Diese zusätzlichen finanziellen Mittel ermöglichten die Schaffung und Sicherung von weiteren Wissenschaftlerstellen in Dresden.

Auch in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses kann das Konsortium Ergebnisse vorweisen. So bietet die TU Dresden seit dem Wintersemester 2011 das Studienfach »Regenerative Energiesysteme« an, mehrere DIZE^{EFF}-Professuren sind involviert. So erhalten die Studierenden einen umfassenden Einblick in aktuelle Forschungsprojekte, wie zum Beispiel Produktionstechnik von kostengünstigen Solarzellen, energiesparende Displays und neue Materialien für Brennstoffzellen. Zudem sind zahlreiche Mitarbeiter der Fraunhofer-Institute mit Lehraufgaben an der TU Dresden beauftragt.

Die vom Fraunhofer IWS Dresden gemeinsam mit den Partnern des DRESDEN-concept organisierte Dresdner Konferenz »Zukunft Energie«, die 2013 zum zweiten Mal stattfand, ist ein wichtiges Ergebnis der erfolgreichen Kooperation am Forschungsstandort Dresden. 30 Redner aus dem In- und Ausland sowie zahlreiche Aussteller stellten ihre Neuigkeiten und Visionen aus den Themenfeldern Thermoelktrik, Solarthermie, Photovoltaik, Energiespeicher, Mobilität, Brennstoffzelle und

Energieeffizienz einem interessierten Publikum vor. Die 3. Dresdner Konferenz »Zukunft Energie« ist bereits in Planung und wird am 5. - 6. Mai 2015 im Internationalen Congress Center Dresden stattfinden. Mehr finden Sie unter www.zukunftenergie-dresden.de

Auch der gemeinsame Messeauftritt auf Hannover Messe Industrie (siehe Abb. oben) trug zu einer Verbesserung der Sichtbarkeit der Dresdner Forschungsaktivitäten bei.



TU - Einrichtungen

	Fraunhofer - Institute	Werkstoff- und Strahltechnik	Elektronenstrahl- und Plasmatechnik	Keramische Technologien und Systeme	Photonische Mikrosysteme
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"/>	

Vernetzung der Fraunhofer-Institute mit den Einrichtungen der TU Dresden



BESONDERE EREIGNISSE

23.-24. JANUAR 2013

Modulare Seminarreihe »Starke Produkte durch dünne Schichten« Innovationen mit Schichttechnologien im Bereich Thermisches Spritzen in Dresden (Organisator: OTTI Ostbayerische Technologie-Transfer-Institut e.V. Regensburg)

5.-6. FEBRUAR 2013

2. Leichtbautagung »Lasertechnik im Leichtbau« in Dresden (Organisator: Fraunhofer-Allianz Leichtbau)

13.-14. MÄRZ 2013

Modulare Seminarreihe »Starke Produkte durch dünne Schichten« Innovationen mit Schichttechnologien im Bereich Arc-Verfahren und Aufdampfen in Dresden (Organisator: OTTI Ostbayerische Technologie-Transfer-Institut e.V. Regensburg)

10.-11. APRIL 2013

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

25. APRIL 2013

Beteiligung des Fraunhofer-Institutszentrums am bundesweiten »Girls Day«

28.-29. MAI 2013

2. Dresdner Konferenz »Zukunft Energie« im Internationalen Congress Center Dresden (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

5. JULI 2013

Beteiligung des Fraunhofer IWS Dresden an der »Langen Nacht der Wissenschaften« der Landeshauptstadt Dresden

26.-30. AUGUST 2013

2. International Summer School »Trends und neue Entwicklungen in der Lasertechnologie« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

16. SEPTEMBER 2013

Festveranstaltung zum 10-jährigen Bestehen der Kooperation zwischen dem Fraunhofer CCL (Außenstelle des Fraunhofer IWS) und der Michigan State University in Lansing (Organisator: Fraunhofer CCL)

8.-9. OKTOBER 2013

Tutorial »Amorphe Kohlenstoffschichten« im Fraunhofer IWS Dresden (Organisator: EFDS Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V.)

6.-7. NOVEMBER 2013

2. Workshop »Lithium-Schwefel-Batterien« im Fraunhofer IWS Dresden (Organisatoren: Fraunhofer IWS Dresden, Institut für Anorganische Chemie der TU Dresden)

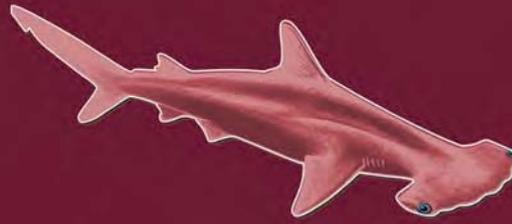
11. NOVEMBER 2013

Green Day »Schulen checken grüne Berufe« (Organisator: Zeitbild Stiftung)

28. NOVEMBER 2013

»Alberta-Germany Collaboration Fund« Symposium (Organisator: Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH)

AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN



Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer, Leiter des Dresdner Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik IWS und Direktor des Institutes für Fertigungstechnik der TU Dresden wurde am 15. November 2013 von der Technischen Universität

Wroclaw mit der Ehrendoktorwürde geehrt. Gewürdigt wurden damit seine glänzenden wissenschaftlichen Leistungen auf dem Gebiet der Lasertechnik und sein herausragendes Engagement bei der Bildung eines gemeinsamen Ausbildungs- und Forschungszentrums mit der Technischen Universität Wroclaw.



Für ihre Forschungsarbeiten zum Laserbearbeiten von Faserverbundwerkstoffen mittels Remotebearbeitung wurde Frau **Annett Klotzbach** (2.v.l.) und ihren Teamkollegen **Andreas Fürst** (1.v.l.), **Frank Kretz-**

schmar (2.v.r.) und **Karsten Zenger** (1.v.r.) von der Fraunhofer-Gesellschaft der Titel »German High Tech Champion (GHTC®)« in der Kategorie »Lightweight Design« verliehen. Die von Frau Klotzbach und ihrem Team entwickelte Technologie ist ein wichtiger Puzzlestein auf dem Weg zur effizienten Gewichtsreduzierung von Fahrzeugen und Konsumgütern durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen. Dank brillanter Laserstrahlquellen, neuartiger Softwaremodule und moderner Bildverarbeitungssysteme können mit dem Laser verschiedenste Textilien und Verbundbauteile strukturiert, geschnitten, aktiviert oder repariert werden. Der GHTC®-Award ist Teil des vom BMBF geförderten Verbundprojektes »Internationales Forschungsmarketing«, das die Werbung für den Forschungsstandort Deutschland im In- und Ausland und Schärfung seines Profils im globalen Wissenschaftsmarkt zum Ziel hat.



Prof. Dr. Andrés Fabián Lasagni, Professor für Laserstrukturieren in der Fertigungstechnik an der TU Dresden und Leiter der Forschungsgruppe Oberflächenfunktionalisierung am Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik

IWS in Dresden (im Bild rechts) erhielt für seine Erfolge bei der Anwendung der Lasertechnik in der Werkstoffwissenschaft den Masing-Gedächtnispreis der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM). Seine Forschungsarbeiten fokussieren sich auf die Weiterentwicklung von Laserstrukturierungstechnologien, die die Herstellung komplexer Mikro- und Nanostrukturen auf großen Oberflächen ermöglichen. Mit dem Masing-Gedächtnispreis werden selbständige wissenschaftliche materialkundliche Forschungsarbeiten von DGM-Mitgliedern ausgezeichnet.

Der Dorothy Hegarty Award 2012 wurde im Jahr 2013 an **Dr. Frank Sonntag** (Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Mikrostrukturieren des Fraunhofer IWS), **Dr. Udo Klotzbach** (Gruppenleiter selbiger Arbeitsgruppe) sowie ein Team aus Biologen und Medizinern verliehen. Gewürdigt wurden damit die Arbeiten auf dem Gebiet der Biosystemtechnik zur Reduktion bzw. zum Ersatz von Tierversuchen. Der Dorothy Hegarty Award wird jährlich für herausragende Beiträge im internationalen peer-reviewed Wissenschaftsjournal »Alternatives to Laboratory Animals (ATLA)« verliehen.

Herr **Sebastian Eckhardt** erzielte mit seiner Diplomarbeit zum Thema »Direkte Laserinterferenzstrukturierung von ZnO- und PET-Substraten zur Steigerung der Effizienz« den 3. Platz beim »Green Photonics Nachwuchspreis«. Mit der Technologie konnte an organischen Solarzellen eine Effizienzsteigerung von gut 20 % erreicht werden. Der Nachwuchspreis Green Photonics geht an junge Wissenschaftler, die Fragestellungen zum Thema Licht, Optik, Photonik für Umwelt-, Klimaschutz und Ressourcenschonung bearbeiten.



Am 19. Dezember wurden die IWS-Preisträger des Jahres 2013 gekürt.

Für die Entwicklung und industrielle Überführung eines Messsystems zur zuverlässigen Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Barrierematerialien wurden **Dr. Harald Beese** und **Oliver Throl** mit dem Preis für die beste wissenschaftlich-technische Leistung ausgezeichnet. Mit Hilfe der Laserdiodenabsorptionspektroskopie verbesserten die Forscher die Nachweisgrenze für die Wasserdampfdurchlässigkeit um zwei Größenordnungen auf nunmehr $10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Damit ist das Verfahren auch für die Charakterisierung von Ultrabarrierematerialien für organische Elektronik geeignet. Erste Geräte haben sich im industriellen Einsatz bewährt.

Die Forschungsarbeiten von Frau **Juliane Fichtner** zur »Herstellung und Charakterisierung einer druckbaren Kohlenstoff-Nanoröhren-Polymerpaste« wurden als herausragende studentische Leistung geehrt. Ihre Forschungsarbeiten konzentrierten sich auf die Pastenherstellung sowie auf rheologische Untersuchungen unter Simulation der mechanischen Beanspruchungen beim Dispenserdruck. Sie sind Basis für zahlreiche Projekte im Bereich 3D-Druck. Auch die Arbeiten von Herrn **Dimitri Benke** wurden als herausragende studentische Leistung ausgezeichnet. Herr Benke entwickelte einen Laserinterferenz-Bearbeitungskopf zur direkten holographischen Strukturierung. Hohe Komplexität und Fälschungssicherheit sowie zahlreiche Designmöglichkeiten der erzeugten Motive machen das Verfahren und den Bearbeitungskopf für die industrielle Anwendung interessant (siehe S. 98/99).

Herr **Adam Kubec** erhielt den Preis für die beste wissenschaftliche Leistung eines Nachwuchswissenschaftlers. Er lieferte einen bedeutenden Beitrag zur Fokussierung harter Röntgenstrahlung mit Multischicht-Laue-Linsen. Sein Verdienst liegt insbesondere in der Simulation des Beschichtungsprozesses in Verbindung mit der Charakterisierung der optischen Eigen-

schaften der erzeugten Multischicht-Laue-Linsen. Bereits nach wenigen Optimierungen bei der Herstellung konnte bei Experimenten mit zwei gekreuzten Multischicht-Laue-Linsen bei 20 keV Röntgenenergie ein Punktfokus mit einer Größe von $39 \times 49 \text{ nm}^2$ und eine Beugungseffizienz von etwa 12 % erzielt werden (siehe S. 50/51).

Der Preis für die beste innovative Produktidee zur Eröffnung eines neuen Geschäftsfeldes ging an Herrn **René Siebert**. Er suchte nach Möglichkeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Elektromotoren und etablierte dafür ein Laserverfahren. Die in Elektromotoren zum Einsatz kommenden nicht kornorientierten Elektrobleche erfahren damit eine lokale Wärmebeeinflussung und Eigenspannungsänderung. Die Oberflächenbehandlung ermöglicht eine anwendungsspezifische Beeinflussung des magnetischen Flusses an Bauteilen aus weichmagnetischen Werkstoffen und führt so zu einer signifikant höheren magnetischen Effektivität im späteren Bauteil.

Der Sonderpreis des Institutes ging an die Auszubildenden im Beruf Werkstoffprüfer **Nadine Böhme, Clemens Grahl, Sten Kühne** und **Enrico Rehn** für ihr außergewöhnliches Engagement bei der mikrostrukturellen und mechanischen Werkstoffprüfung.



Anja Techel, Rene Siebert, Andreas Leson, Dimitri Benke, Eckhard Beyer, Adam Kubec, Juliane Fichtner, Harald Beese, Nadine Böhme, Sten Kühne, Andrea Ostwald, Clemens Grahl, Enrico Rehn (v.l.n.r.)

VERÖFFENTLICHUNGEN

RV = Rezensierte Veröffentlichung

[L1]

D. Acevedo, H. Salavagione, A.-F. Lasagni, E. Morallón, F. Mücklich, C. Barbero

»SERS Active Surface in Two Steps, Patterning and Metallization«

Advanced Engineering Materials 15 (2013), Nr. 5, S. 325-329
DOI: 10.1002/adem.201200240

[L2]

M. Andrich

»Characterisation of the Friction and Wear Behaviour of Textile Reinforced Polymer Composites in Contact with Diamond-Like Carbon Layers«

Tribology International 62 (2013), S. 29-36

[L3]

L.-M. Berger, M. Barbosa, H.-P. Martin, R. Puschmann, S. Scheitz, S. Thiele, C. Leyens, E. Beyer, A. Michaelis

»Potential of Thermal Spray Technologies for the Manufacture of TEG«

Thermoelectrics goes Automotive, 21.-23.11.2012, Berlin, Tagungsband, 2013, S. 260-272
ISBN: 978-3-8169-3169-0

[L4]

E. Beyer, A. Mahrle

»High-Power Laser Materials Processing«

LIA Today 21 (2013), Nr. 5, S. 12-15

[L5]

M. Bieda, C. Schmädicke, A. Wetzig, A. Lasagni

»Direct Laser Interference Patterning of Planar and Non-Planar Steels and their Microstructural Characterization«

Metals and Materials International 19 (2013), Nr. 1, S. 81-86
DOI: 10.1007/s12540-013-1013-6

[L6]

S. Bonß, B. Brenner, F. Tietz, E. Beyer

»Laser Heat Treatment Technologies for Wear Protection of Steam Turbine Blades«

6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 23.-26.07.2013, Niigata, Japan, Tagungsband, #13-109

[L7]

J. Bretschneider, G. Kirchhoff, M. Zimmermann, U. Stamm, J. Standfuß, B. Brenner

»Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Rundnähte unter mehrachsiger Belastung«

Werkstoffprüfung 2013, 28.-29.11.2013, Neu-Ulm, Tagungsband

[L8]

F. Brückner, D. Lepski, S. Nowotny, C. Leyens, E. Beyer

»Simulation of Stress and Strain of Multi-Track Formations in (Induction-Assisted) Laser Cladding«

Laser Applications in Industry, 19.-20.03.2013, Pilsen, Tschechien, Tagungsband

[L9]

F. Brückner, M. Riede, S. Nowotny, F. Kubisch, C. Leyens, E. Beyer

»Surface Functionalization by High-precision Laser Cladding: Process Equipment and Manufacturing Strategies for Miniaturized and Customized Components«

Laser Technik Journal, 10 (2013), Nr. 1, S. 29-31
ISSN: 1613-7728

[L10]

F. Brückner, M. Riede, T. Finaske, S. Nowotny, C. Leyens, E. Beyer

»Laser-Based Generation of Precise Functional Structures and Components«

32nd International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics, 6.-10.10.2013, Miami, USA, Tagungsband, Paper 1202, S. 312-317
ISBN: 978-0-912035-98-7

[L11]

F. Brückner, T. Finaske, M. Riede, S. Nowotny, C. Leyens

»Laser Additive Manufacturing and Repair of Jet Engine Components«

Turbine Forum 2013, Effective Repair & Life Extension of Turbine Components, 24.-26.04.2013, Nice - Port St. Laurent, France, Tagungsband

[L12]

J. Brückner, S. Thieme, F. Böttger-Hiller, I. Bauer, H. Tamara Grossmann, P. Strubel, H. Althues, S. Spange, S. Kaskel

»Carbon-Based Anodes for Lithium Sulfur Full Cells with High Cycle Stability«

Advanced Functional Materials (2013)
DOI: 10.1002/adfm.201302169

[L13]

M. Busek, M. Nötzel, C. Polk, F. Sonntag

»Characterization and Simulation of Peristaltic Micropumps«

Journal of Sensors and Sensor Systems 2 (2013), S. 165-169
DOI: 10.5194/jsss-2-165-2013

[L14]

M. Cremer, M. Zimmermann, H.-J. Christ

»High-Frequency Cyclic Testing of Welded Aluminium Alloy Joints in the Region of Very High Cycle Fatigue (VHCF)«

International Journal of Fatigue 57 (2012), S. 120-130
ISSN: 0142-1123

[L15]

M. Cremer, M. Zimmermann, H.-J. Christ

»Hochfrequente Ermüdungsprüfung geschweißter Aluminiumproben bis in den Bereich sehr hoher Lastspielzahlen«

Werkstoffprüfung 2013, 28.-29.11.2013, Neu-Ulm, Tagungsband

[L16]

I. Dani, A. Roch, L. Stepien, C. Leyens, M. Greifzu, M. v. Lukowicz

»Energy Turnaround: Printing of Thermoelectric Generators«

Digital Product and Process Development Systems, IFIP TC 5 International Conference, NEW PROLAMAT 2013, Dresden, 10.-11.10.2013, Tagungsband, S. 181-184
ISBN: 978-3-642-41328-5, 978-3-642-41329-2
DOI: 10.1007/978-3-642-41329-2_19

- [L17]**
I. Dani, A. Roch, L. Stepien, C. Leyens, M. Greifzu, M. v. Lukowicz
»Energy Turnaround: Printing of Thermoelectric Generators«
G.L. Kovács and D. Kochan (Eds.): NEW PROLAMAT 2013, IFIP AICT 411, pp. 181–184, 2013. © IFIP International Federation for Information Processing 2013
- [L18]**
I. Dirnstorfer, F. Brenner, D. Simon, T. Mikolajick, N. Schilling, U. Klotzbach
»Feasibility Study for Silicon Heterojunction Metal Wrap through (SHJ-MWT) Solar Cells«
28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 30.09.-04.10.2013 Paris, Frankreich, Tagungsband, S. 1108-1112 ISBN: 3-936338-33-7
DOI: 10.4229/28thEUPVSEC2013-2BV.1.20
- [L19]**
D. Dittrich, B. Brenner, J. Standfuß
»Development of Light Weight - High Strength Alloy Fuselage Panels for Laser Beam Welding«
3rd EASN Association International Workshop on aerostructures, 09.-11.10.2013, Milan, Italien, Tagungsband
- [L20]**
D. Dittrich, B. Brenner, R. Schedewy, E. Beyer
»Laser-Multi-Pass-Narrow-Gap-Welding of 50 mm Thick Steel or Aluminum Plates«
6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 23.-26.07.2013, Niigata, Japan, Tagungsband, # 13-104
- [L21]**
D. Dittrich, B. Brenner, R. Schedewy, E. Beyer
»Laser-Multi-Pass-Narrow-Gap-Welding of Hot Crack Sensitive Thick Al-Plates«
Lasers in Manufacturing, 13.-16.05.2013, München, Physics Procedia 41 (2013), S. 225-233 ISSN: 1875-3892
- [L22]**
D. Dittrich, B. Brenner, R. Schedewy, J. Standfuß
»Laser-Mehrlagen-Engstspalt-schweißen zum heißrisssfreien Fügen von Aluminium-Legierungen im Dickblechbereich«
9. Internationale Konferenz »Strahlentechnik«, 24.-25.04.2013, Halle (Saale), Tagungsband, S. 71-77
- [L23]**
T. Druwe, M. Milbrandt, O. Zimmer, F. Kaulfuß
»Beschichtungen für Umformwerkzeuge - Reibungs- und Verschleißuntersuchungen«
V2013 Industrieausstellung & Workshop-Woche Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 14.-17.10.13, Dresden, Tagungsband, S. 71
- [L24]**
S. Eckhardt, C. Sachse, A.-F. Lasagni
»Light Management in Transparent Conducting Oxides by Direct Fabrication of Periodic Surface Arrays«
Lasers in Manufacturing, 13.-16.05.2013, München, Physics Procedia 41 (2013), S. 545-550
DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.115
- [L25]**
S. Eckhardt, J. Berger, S. Schubert, A. Lasagni
»Production of Functionally Patterned Transparent Thin Film for Advanced Electrodes«
Euromat 2013, 8.-13.09.13, Seville, Spanien, Tagungsband
- [L26]**
S. Eckhardt, T. Roch, C. Sachse, A. Lasagni
»Light Management of Aluminum Doped Zinc Oxide Thin Films by Fabricating Periodic Surface Textures Using Direct Laser Interference Patterning«
Advanced Engineering Materials 15 (2013), Nr. 10
DOI: 10.1002/adem.201300007
- [L27]**
M. Falz
»The LAM Family – Tools for Production of ta-C Coatings with Excellent Properties«
40th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, 29.04.-03.05.2013, San Diego, California
ISSN: 0257-8972
- [L28]**
M. Falz, M. Holzherr, H.-J. Scheibe, A. Leson, F. Geißler, M. Schulze
»Diamantharte Schichten - erfolgreich realisiert von Dresdner Kooperationspartnern«
V2013 Industrieausstellung & Workshop-Woche Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 14.-17.10.13, Dresden, Tagungsband, S. 57
- [L29]**
R. Frenzel, I. Jansen, T. Schiefer, A. Calvimontes, F. Simon
»Polyelektrolyte als Haftvermittler auf Laser strukturierten Aluminiumoberflächen«
9. Thementage Grenz- und Oberflächentechnik und 9. Thüringer Biomaterial-Kolloquium 2013, Zeulenroda 03.-05.09 2013, S. 61-65, Tagungsband
ISBN: 978-3-00-042609-4
- [L30]**
R. Frenzel, T. Schiefer, I. Jansen, A. Calvimontes, F. Simon
»Laser trifft Polyelektrolytadsorption«
Adhäsion KLEBEN & DICHTEN 57 (2013), Nr. 12, S. 40– 46
- [L31]**
C. Fuchs, T. Schwab, T. Roch, S. Eckhardt, A.-F. Lasagni, S. Hofmann, B. Lüsse, L. Müller-Meskamp, K. Leo, M. C. Gather, R. Scholz
»Quantitative Allocation of Bragg Scattering Effects in Highly Efficient OLEDs Fabricated on Periodically Corrugated Substrates«
Optics Express 21 (2013), Nr. 14, S. 16319-16330
DOI: 10.1364/OE.21.016319
- [L32]**
A. Fürst, A. Klotzbach, A. Lasagni, J. Hauptmann, E. Beyer
»Laser Processing of Polymers and Reinforced Plastic Materials«
10th International Conference Advance in Plastics Technology APT' 13, 8.-10.10.2013, Sosnowiec, Polen, Paper 34
- [L33]**
A. Fürst, A. Klotzbach, R. Zocher, T. Blum, F. Kretzschmar, K. Zenger
»Investigations on the Influence of Laser Irradiation to Crimping- and Shrinkage-Effects of Thermoplastic Monofilaments«
13th AUTEX World Textile Conference, 22.-24.05.2013, Dresden, Tagungsband
- [L34]**
A. Fürst, A. Klotzbach, S. Hühne, J. Hauptmann, E. Beyer
»Remote Laser Processing of Composite Materials with Different Opto-Thermic Properties«
WLT-Konferenz Lasers in Manufacturing LiM 2013, Physics Procedia 41 (2013), S. 382-391
DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.093
- [L35]**
G. Göbel, A. Grimm, S. Schulze, E. Beyer
»Tailored Joining - Das Rührreibschweißen im Kontext moderner Fügevverfahren«
6. FSW Workshop »Rührreibschweißen und verwandte Verfahren«, 07.-08.02.2013, Geestacht, Tagungsband, S. 66-79
- [L36]**
S. Günther, R. Siebert, E. Beyer, W. Hofmann
»Einfluss der Bearbeitung von Elektrotroblechen auf die Verluste elektrischer Fahrmotoren«
Elektromobilitätsausstellung und Fachtagung zum Thema Elektromobilität, 21.-22.09.2012, Nürnberg, Tagungsband (ETG-FB 135) und Tagungs-CD
ISBN 978-3-8007-3497-9
- [L37]**
J. Hauptmann, A. Klotzbach, K. Zenger, T. Schwarz, P. Rauscher, F. Klenke
»Generative Manufacturing and Repair of Metal Parts through Direct Laser Deposition Using Wire Material«
Digital Product and Process Development Systems, IFIP TC 5 International Conference, NEW PROLAMAT 2013, Dresden, 10.-11.10.2013, Tagungsband, S. 185–189
ISBN: 978-3-642-41328-5, 978-3-642-41329-2
DOI: 10.1007/978-3-642-41329-2_20
- [L38]**
J. Hauptmann, A. Klotzbach, K. Zenger, T. Schwarz, P. Rauscher, F. Klenke
»Generative Manufacturing and Repair of Metal Parts through Direct Laser Deposition Using Wire Material«
G.L. Kovács and D. Kochan (Eds.): Digital Product and Process Development Systems, IFIP AICT 411, S. 185-189, SPRINGER-Verlag
ISBN: 978-3-642-41328-5

[L39]

P. Herwig, J. Hauptmann

»Aberrations Induced by High Brightness Lasers«

The 14th Nordic Laser Materials Processing Conference, 26.-28.08.2013, Gothenburg, Schweden, Tagungsband, S. 359-368
 ISBN: 978-91-7439-688-1, 978-91-7439-689-8

[L40]

P.-M. Hilgendorff, A. Grigorescu, M. Zimmermann, C.-P. Fritzen, H.-J. Christ

»Simulation of Irreversible Damage Accumulation in the Very High Cycle Fatigue (VHCF) Regime Using the Boundary Element Method«

Materials Science and Engineering: A, 575 (2013), S. 169-176
 ISSN: 0921-5093

[L41]

P.-M. Hilgendorff, A. Grigorescu, M. Zimmermann, C.-P. Fritzen, H.-J. Christ

»The Effect of Damage Accumulation in Slip Bands on the Resonant Behavior in the Very High Cycle Fatigue (VHCF) Regime«

13th International Conference on Fracture, 16.-21.05.2013, Beijing, China, Tagungsband und Tagungs-CD

[L42]

A. Jahn, J. Standfuß

»Restverformungsvermögen umgeformter und anschließend geschweißter Karosseriestähle«

Automotive Circle »International Materials in Car Body Engineering«, 07.-08.05.2013, Bad Nauheim, Tagungsband, S. 95-109

[L43]

A. Jahn, M. Wagner, J. Standfuß, J. Liebscher, R. Schedewy

»Laserstrahlgeweihte Integralstrukturen für den Schienenfahrzeugbau«

10. Fachtagung »Fügen und Konstruieren im Schienenfahrzeugbau«, 14.-15.05.2013, Halle, Tagungsband, S. 91-96

[L44]

J. Kaspar, J. Bretschneider, S. Bonß, B. Brenner

»Laser Gas Assisted Nitriding of Titanium Alloys«

LightMat 2013, 03.- 05.09.2103, Bremen, Tagungsband

[L45]

F. Kaulfuß, O. Zimmer

»Preparation of Sharp Cutting Edges by Coating Processes in Nanostructured AlCrN Based Films«

40th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, 29.04.-03.05.2013, San Diego, Californien, USA
 ISSN: 0257-8972

[L46]

F. Klenke, J. Hauptmann

»Application of High Dynamic Processing Heads for Laser Cutting«

The 14th Nordic Laser Materials Processing Conference, 26.-28.08.2013, Gothenburg, Schweden, Tagungsband, S. 339-346
 ISBN: 978-91-7439-688-1, 978-91-7439-689-8

[L47]

A. Klotzbach, A. Fürst

»Remote Laser Cutting of Near-Net-Shape & Fibre-Reinforced Part«

Industrial Laser Solutions, Juli/August 2013, S. 26-28

[L48]

A. Klotzbach, A. Fürst, F. Kretzschmar, K. Zenger, J. Hauptmann, E. Beyer

»Investigations of Multi-Wavelengths Treatment at Composite Materials«

32nd International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics, 6.-10.10.2013, Miami, USA, Tagungsband, Paper 1906, S. 566 – 570
 ISBN: 978-0-912035-98-7

[L49]

A. Klotzbach, A. Fürst, J. Hauptmann, E. Beyer

»Remote Laser Processing Fibre-Reinforced Structures«

The Laser User Issue 70, Summer 2013, S. 26-27

[L50]

A. Klotzbach, A. Fürst, M. Kempe, J. Hauptmann, E. Beyer

»Investigations on Laser Remote Cutting of Tailored Fiber Reinforced Structures«

2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), 23.-25.04.2013, Yokohama, Japan, Tagungsband

[L51]

T. Köckritz, I. Jansen, A. Richter

»Application of Carbon Nanotubes in the Field of Electroactive Polymers and their Usability for Actuators and Sensors«

6th International Conference on Carbon NanoParticle Based Composites, 22.-25.09.2013, Dresden, Tagungsband, S.49
 ISBN: 978-3-9816007-0-4

[L52]

T. Köckritz, T. Schiefer, I. Jansen, E. Beyer

»Improving the Bond Strength at Hybrid-Yarn Textile Thermoplastic Composites for High-Technology Applications by Laser Radiation«

International Journal of Adhesion and Adhesives 46 (2013), S. 85–94
 ISSN: 0143-7496

[L53]

A. Kolyshkin, M. Zimmermann, E. Kaufmann, H.-J. Christ

»Untersuchung der Rissinitiierung und -ausbreitung mittels des Fernfeldmikroskops im VHCF-Bereich«

Werkstoffprüfung 2013, 28.-29.11.2013, Neu-Ulm, Tagungsband

[L54]

A. Kolyshkin, M. Zimmermann, E. Kaufmann, H.-J. Christ

»Development of a Fatigue Life Prediction Concept in the Very High Cycle Fatigue Range based on Microstructural Features«

13th International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics, 13.-15.11. 2013, Jacksonville, USA, Tagungsband

[L55]

L. Kotte

»Oberflächenmodifizierung zur Haftvermittlung - Plasmabehandlung bei Atmosphärendruck«

Galvanotechnik (2013) 104. Band, S. 2361-2364
 ISSN: 0016-4232

[L56]

L. Kotte, G. Mäder, J. Roch, B. Leupolt, S. Kaskel, J. Wielant, T. Mertens, F. J. Gammel

»Großflächige Plasmavorbehandlung und PECVD bei Atmosphärendruck mittels LARGE-Plasmaquelle«

Galvanotechnik (2013) 104. Band, S. 1742-1753

[L57]

L. Kotte, H. Althues, G. Mäder, J. Roch, S. Kaskel, I. Dani, T. Mertens, F. J. Gammel

»Atmospheric pressure PECVD based on a linearly extended DC arc for adhesion promotion applications«

Surface & Coatings Technology (2013),
<http://dx.doi.org/10.1016/j.surf-coat.2013.06.070>

[L58]

S. Kuehn, S. Bonß, J. Hannweber, U. Karsunke, D. Poegen, B. Brenner, E. Beyer

»Laser Technologies in Car Body Tool Manufacturing«

6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 23.-26.07.2013, Niigata, Japan, Tagungsband #13-110

[L59]

D. Langheinrich, L.R.X. Cortella, E.F. de Sá, H.T. Oyama, I.A. Cestari, I.N. Cestari, A. Lasagni

»Stem Cell Adhesion and Orientation on Laser Treated Polyurethane for Ventricular Assist devices«

Euromat 2013, 08.-13.09.13, Seville, Spanien, Tagungsband

[L60]

D. Langheinrich, R. Helbig, C. Werner, A. Lasagni

»Initial Bacterial Adhesion on Structured Polymer Surfaces Inspired by Collembolan Skin«

Euromat 2013, 08.-13.09.13, Seville, Spanien, Tagungsband

[L61]

A. Lasagni

»Direkte Laserinterferenz-Strukturierung zur effizienten Herstellung holografischer Prägestempel«

Photonik 2/2013, S.8

[L62]

A. Lasagni, S. Eckhardt, J. Berger, D. Benke

»Direct Laser Interference Patterning, a New Tool for Large Area Surface Functionalization of Flexible Materials«

Pro-Flex 2013, 24.-25.09 2013, Dresden

- [L63]**
A. Lasagni, S. Eckhardt, Y. Hyun Kim, C. Sachse, S. Hofmann, R. Scholz, L. Müller-Meskamp, K. Leo
»Lichtmanagement durch direkte Laserinterferenzstrukturierung von ZnO- und PET-Oberflächen«
OLED & Organische Elektronik, 04.-05.09.13, Dresden, Tagungsband
- [L64]**
A. Lasagni, T. Roch, M. Bieda, S. Eckhardt, D. Langheinrich, J. Berger, H. Perez, D. Benke, A. Wetzig, E. Beyer
»Pimp my Surface: Using Direct Laser Interference for High Speed Surface Functionalization«
Euromat 2013, 8.-13.09.13, Seville, Spanien, Tagungsband
- [L65]**
J. T. Lee, Y. Zhao, S. Thieme, H. Kim, M. Oschatz, L. Borchardt, A. Magasinski, W. I. Cho, S. Kaskel, and G. Yushin
»Sulfur-Infused Micro- and Mesoporous Silicon Carbide-Derived Carbon Cathode for High-Performance Lithium Sulfur Batteries«
Advanced Materials (2013)
DOI: 10.1002/adma.201301579
- [L66]**
A. Leson
»Initiative »Nano in Germany««
BMBF-Broschüre nano.DE-Report, 2013
- [L67]**
C. Leyens, F. Brückner, T. Finaske, S. Thieme, S. Nowotny, E. Beyer
»Laser-Based Fabrication with Ti- and Ni-Base Superalloys«
32nd International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics, 6.-10.10.2013, Miami, USA, Tagungsband, Paper 1201, S. 307 – 311
ISBN: 978-0-912035-98-7
- [L68]**
M. Lütke, A. Wagner, A. Wetzig
»Identification and Characterization of Analogies of Remote Fusion Cutting Processes Using Different Beam Sources«
Tagungsband 6. TAW-Syposium »Thermisches Beschichten«, 10.-11.04.2013, Dresden
- [L69]**
Y. Mabuchi, T. Higuchi, V. Weinhacht
»Effect of sp^2/sp^3 Bonding Ratio and Nitrogen Content on Friction Properties of Hydrogen-Free DLC Coatings«
Tribology International 62 (2013), S. 29-36, S.130-140
- [L70] RV**
A. Mahrle, S. Rose, E. Beyer, U. Füssel
»The Crucial Role of Beam Spot Position in Laser-Assisted Plasma Arc Welding«
Science and Technology of Welding and Joining, 2013
ISBN: 1743-2936
DOI:10.1179/1362171813Y.0000000173
- [L71] RV**
A. Mahrle, S. Rose, M. Schnick, E. Beyer, U. Füssel
»Laser-Assisted Plasma Arc Welding of Stainless Steel«
Journal of Laser Applications 25 (2013), Nr. 3, Art. 032006
ISSN: 1042-346X
DOI: 10.2351/1.4798338
- [L72] RV**
A. Mahrle, S. Rose, M. Schnick, E. Beyer, U. Füssel
»Stabilisation of Plasma Welding Arcs by Low Power Laser Beams«
Science and Technology of Welding and Joining 18 (2013), Nr. 4, S. 323-328
ISSN: 1362-1718
DOI:10.1179/1362171813Y.0000000109
- [L73]**
A. Majumder, M. Khazaei, J. Opitz, E. Beyer, L. Baraban, G. Cuniberti
»Bio-Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes«
Physical Chemistry Chemical Physics 15 (2013), Nr. 40, S. 17158-17164
DOI: 10.1039/C3CP51844B
- [L74]**
S. Makowski, V. Weihnacht, A. Leson
»Diesel-Lubricated ta-C Coatings«
Lubrication science 25 (2013), Nr. 4, S. 269-274
DOI: 10.1002/ls.1212
- [L75]**
M. Neuner
»Besser schmieren«
weiter.vorn Das Fraunhofer-Magazin Nr. 2/13, S. 46-47
- [L76] RV**
S. Nowotny, F. Brückner, S. Thieme, C. Leyens, E. Beyer
»High Performance Laser Cladding with Combined Energy Sources«
Journal of Laser Applications 25 (2013), Nr. 5
- [L77]**
S. Nowotny, S. Thieme, D. Albert, F. Kubisch, R. Kager, C. Leyens
»Additive Manufacturing: Generieren, Reparieren und Oberflächenbeschichten mit dem Strahlwerkzeug Laser«
Tagungsband 6. TAW-Syposium »Thermisches Beschichten« Dresden, 10.-11. April 2013
- [L78]**
M. Oschatz, S. Thieme, Lars Borchardt, M. R. Lohe, T. Biemelt, J. Brückner, H. Althues, S. Kaskel
»A new route for the preparation of mesoporous carbon materials with high performance in lithium-sulphur battery cathodes«
CHEMICAL COMMUNICATIONS, 49 (2013) Nr. 52, S. 5832-5834
DOI: 10.1039/c3cc42841a
- [L79]**
J.-S. Pap, M. Kästner, S. Müller, I. Jansen
»Experimental Characterization and Simulation of the Mechanical Behavior of an Epoxy Adhesive for Bonding Textile-Reinforced Thermoplastic Composites«
Procedia Materials Science 2 (2013), S. 234-242
ISSN: 2211-8128
- [L80]**
T. Roch, A. Lasagni
»Direct Laser Interference Patterning of Tetrahedral Amorphous Carbon Thin Films«
Euromat 2013, 8.-13.09.13, Seville, Spanien, Tagungsband
- [L81]**
T. Roch, S. Eckhardt, H. Perez, D. Benke, J. Berger, A. Lasagni
»Direct Laser Interference Patterning (DLIP) für großflächige Mikrostrukturierung«
Bayerisches Lasersymposium 2013, Tagungsband
- [L82]**
T. Roch, V. Weihnacht, H.-J. Scheibe, A. Roch, A.-F. Lasagni
»Direct Laser Interfering Patterning of Tetrahedral Amorphous Carbon Films for Tribological Applications«
Diamond and Related Materials 33 (2013), S. 20-26
ISSN: 0925-9635
- [L83]**
S. Roling, S. Braun, P. Gawlitza, L. Samoylova, B. Siemer, H. Sinn, F. Siewert, F. Wahlert, M. Wöstmann, H. Zacharias
»A Split- and Delay-Unit for the European XFEL«
Konferenz »Advances in X-Ray Free-Electron Lasers - Instrumentation«, in: Tschentscher, T.: »Advances in x-ray free-electron lasers: Instrumentation: 17-18 April 2013«, Prague, Czech Republic. Bellingham, (Proceedings of SPIE 8778), Paper 87781G
- [L84]**
S. Rose, A. Mahrle, M. Schnick, E. Beyer, U. Füssel
»Laserunterstützter Plasmalichtbogenprozess in koaxialer Anordnung – eine kombinierte Verfahrensvariante zum effizienten, schnellen und kostengünstigen Fügen«
9th International Conference Beam Technology, 24-25.04.2013, Halle (Saale), Tagungsband
- [L85] RV**
S. Rose, A. Mahrle, M. Schnick, T. Pinder, E. Beyer, U. Füssel
»Plasma Welding with a Superimposed Coaxial Fiber Laser Beam«
Welding in the World, 57 (2013), Nr. 6, S. 857-865
ISSN: 0043-2288
DOI: 10.1007/s40194-013-0079-6
- [L86]**
M. Rühl, E. Pflug, S. Braun, A. Leson
»Cold Joining with Reactive Nanometer Multilayers (RMS)«
Geburtstagsschrift anlässlich 60. Geburtstag Prof. Gessner Fraunhofer ENAS

[L87]

R. Schedewy, B. Brenner, D. Dittrich, E. Beyer

»Multi-Pass-Narrow-Gap-Laser-Beam-Welding of Hot Crack Sensitive Aluminium Plates«

32nd International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics, 6.-10.10.2013, Miami, USA, Tagungsband, Paper 1506
ISBN: 978-0-912035-98-7

[L88]

R. Schedewy, D. Dittrich, B. Brenner, E. Beyer

»Multi-Pass-Narrow-Gap-Laser-Beam-Welding of Hot Crack Sensitive Aluminium Plates«

6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, 23.-26.07.2013, Niigata, Japan, Tagungsband, #13-104

[L89]

N. Schilling, A.-F. Lasagni, U. Klotzbach

»Energy Dependent Processing of Fiber Reinforced Plastics with Ultra Short Laser Pulses«

Euromat 2013, 08.-13.09.13, Seville, Spanien, Tagungsband

[L90]

N. Schilling, A.-F. Lasagni, U. Klotzbach

»Energy Dependent Processing of Fibre Reinforced Plastics with Ultra Short Laser Pulses«

Lasers in Manufacturing Conference 2013, Physics Procedia 41 (2013), S. 414-420
DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.097
ISSN 1875-3892

[L91]

K. Schimek, M. Busek, S. Brickner, B. Groth, S. Hoffmann, R. Lauster, G. Lindner, A. Lorenz, U. Menzel, F. Sonntag, H. Walles, U. Marx, R. Horland

»Integrating Biological Vasculature into a Multi-Organ-Chip Microsystem«

Lab on a Chip 13 (2013) Nr.18, S. 3588-3598
DOI: 10.1039/C3LC50217A

[L92]

V. Schubert, A. Ostwaldt, M. Zimmermann, C. Leyens

»Phasenidentifizierung an hochlegierten Stählen - Farbätzmittel im Vergleich«

Metallographie-Tagung, 18.-20.09.2013, Friedrichshafen, Tagungsband: Praktische Metallographie, Sonderband 45 (2013), S. 67-74
ISBN: 978-3-883553-98-6

[L93]

S. Schulze, G. Göbel, V. Richter-Trummer, U. Füssel, E. Beyer

»The Influence of Gaps and Misalignment on Friction Stir Welded Butt Joints of Medium-Sized Parts«

Thermec 2013, 02.-06.12.2013, Las Vegas, USA, Tagungsband

[L94]

B. Schumm, S. Kaskel

Buchkapitel: »Nanoimprint Lithography for Photovoltaic Applications«

in: A. Tiwari, R. Boukherroub, M. Sharon, »Solar Cell Nanotechnology« (2013)
ISBN: 978-1-118-68625-6

[L95] RV

L. D. Scintilla, L. Tricarico, A. Wetzig, E. Beyer

»Investigation on Disk and CO₂ Laser Beam Fusion Cutting Differences Based on Power Balance Equation«

International Journal of Machine Tools and Manufacture 69 (2013), S. 30-37
ISSN: 0890-6955

[L96]

M. Seifert, K. Anhalt, C. Baltruschat, S. Bonß, B. Brenner

»Precise Temperature Calibration for Laser Heat Treatment«

SENSOR 2013, Nürnberg, 14.-16.05.2013, Tagungsband, S. 302-307
ISBN: 978-3-9813484-3-9

[L97]

M. Seifert, K. Anhalt, C. Baltruschat, S. Bonß, B. Brenner

»Qualitätsgesichertes Laserstrahlhärten durch mobile Temperaturkalibrierung (Quality assured laser heat treatment by mobile temperature)«

TEMPERATURE 2013, 05.-06.06.2013, Berlin, Tagungsband
ISBN: 3-9810021-8-0

[L98]

M. Sidorowicz, K. Sas, A. Klotzbach, J. Hauptmann, J. Reiner

»Machine Vision Aided Design for Remote Laser Processing«

14th Nordic Laser Materials Processing Conference, 26.-28.08.2013, Gothenburg, Sweden, Tagungsband, S. 347-358
ISBN 978-91-7439-688-1
ISBN 978-91-7439-689-8

[L99]

R. Siebert, E. Beyer

»Localized Neutron Grating Interferometry Investigation of Magnetic Bulk Property Deterioration of Electrical Steel«

3rd International Electric Drives Production Conference, 29.-30.10.2013, Nürnberg, Tagungsband

[L100]

J. Standfuß, U. Stamm, J. Bretschneider, G. Kirchhoff

»Laser Welded Cast Iron to Steel Joints for Differentials«

23rd Global Powertrain Congress, 29.-30.10.2013, Troy (MI), USA, Tagungs-CD

[L101]

S. Stelzer, A. Mahrle, A. Wetzig, E. Beyer

»Experimental Investigations on Fusion Cutting Stainless Steel with Fibre and CO₂ Laser Beams«

WLT-Konferenz Lasers in Manufacturing LiM 2013, 13.-16.05.2013 München, Tagungsband

[L102]

S. Stelzer, A. Mahrle, A. Wetzig, E. Beyer

»Experimental Investigations on Fusion Cutting Stainless Steel with Fibre and CO₂ Laser Beams«

Physics Procedia 41 (2013), S. 392-397
ISSN: 1875-3892
DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.083

[L103]

G. Theiler, T. Gradt, W. Österle, A. Brückner, V. Weihnacht

»Friction and Endurance of MoS₂/ta-C Coatings Produced by Laser Arc Deposition«

Wear 297 (2013), Nr.1-2, S.791-801
ISSN: 0043-1648

[L104]

S. Thieme, J.Brückner, I. Bauer, M. Oschatz, L. Borchardt, H. Althues, S. Kaskel

»High capacity micro-mesoporous carbon-sulfuranocomposite cathodes with enhanced cycling stability prepared by a solvent-free procedure«

Journal of Materials Chemistry A, 1 (2013) Nr. 32, S. 9225-9234
DOI: 10.1039/c3ta10641a

[L105]

F.-L. Toma, S. Scheitz, L.-M. Berger, S. Thiele, T. Kuntze, U. Klotzbach, G. Kirchhoff

»Beschichtbarkeit keramischer Substrate durch thermisches Spritzen«

16. Werkstofftechnischen Kolloquium 2013, 26.-27.09.13, Chemnitz, Tagungsband

[L106]

A. Wagner, M. Lütke, A. Wetzig, L. M. Eng

»Laser Remote-Fusion Cutting with Solid State Lasers«

Journal of Laser Applications 25 (2013), Nr. 5
DOI: 10.2351711.4816651

[L107]

I. Wagner, E.-M. Materne, S. Brickner, U. Süßbier, C. Frädrieh, M. Busek, F. Sonntag, D. A. Sakharov, E. V. Tushkin, A. G. Tonevitsky, R. Lauster, U. Marx

»A Dynamic Multi-Organ-Chip for Long-Term Cultivation and Substance Testing Proven by 3D Human Liver and Skin Tissue Co-Culture«

Lab Chip 13 (2013), Nr. 18, S. 3538-3547
ISSN: 1473-0197
DOI: 10.1039/c3lc50234a

[L108]

K. Wagner, S. Friedrich, C. Stang, T. Bley, N. Schilling, M. Bieda, A. Lasagni, E. Boschke

»Initial Phases of Microbial Biofilm Formation on Opaque, Innovative Anti-Adhesive Surfaces Using a Modular Microfluidic System«

Engineering in Life Sciences 2013, Early View
ISSN: 1618-2863
DOI: 10.1002/elsc.201200035

[L109]

M. Wagner

»Autos - leicht und crashtsicher«

Forschung Kompakt, 08/2013, Thema 5

[L110]

M. Wagner

»Autos - leicht und crashtsicher«

Laser Magazin, Ausgabe 4, September 2013, S. 55-56

[L111]

M. Wagner

»Kopplung thermischer und mechanischer Lasten in PAM-CRASH«

ESI DACH Forum, 5.-6.11.2013, Wiesbaden, Tagungsband

[L112]

M. Wagner

»Laser Welded Light Weight Profiles in Integral Multi-Material Constructions«

Automotive Engineering Congress, 5.6.2013, Nürnberg, Tagungsband

[L113]

M. Wagner

»Laserverfestigte Fahrzeug-crashstrukturen«

wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 103, (2013) H.6, S. 485-487

[L114]

M. Wagner

»Lokale Verfestigung von Stahlblechen als Leichtbautechnik«

Maschinenmarkt 40 (2013), S. 34-35

ISSN: 03415775

[L115]

M. Wagner

»Simulation des Verformungsverhaltens laserverfestigter Karosseriestrukturen«

Zeitschrift für Freunde und Förderer der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 20. Jahrgang 2013

[L116]

A. Wank, F. Beck, T. Schlaefer, S. Nowotny, F. Brueckner, H. Hillig, M. Pfennig, S. Thieme

»Capability of Combined Thermal Spray & Laser Coating Centers to Improve Production Efficiency«

Thermal Spray Bulletin 6 (2013), Nr. 1, S. 22-29

[L117]

V. Weihnacht

»Tribology of Hard Carbon Coatings under Ultra- and Super-Low Friction Conditions«

40th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, 29.04.-03.05.2013, San Diego, California
ISSN: 0257-8972**[L118]**

V. Weihnacht, S. Makowski, A. Leson

»Fundamental Aspects in Friction and Wear Mechanisms of Hard Amorphous Carbon Coatings«

World Tribology Congress 2013, 8-13.09.2013, Turin, Italien, Tagungsband

[L119]

A. Wetzig

»Development in Beam Scanning (Remote) Technologies and Smart Beam Processing«

in: »Handbook of laser welding technologies«, S. Katayama, 2013, S. 422-433
ISBN: 978-0-85709-264-9
DOI:10.1533/9780857098771.3.422**[L120]**

A. Wetzig

»Remote-Laserstrahlschneiden«

DVS-Congress, 07.09.2013, Essen, Beitrag 3583

[L121]

C. Winkelmann, Y. Luo, A. Lode, M. Gelinsky, U. Marx, M. Busek, F. Schmieder, F. Sonntag

»Charakterisierung von in Lab-on-a-Chip System eingebetteten Hohlfasern«

tm - Technisches Messen; Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik, Band 80 (2013), Nr. 5, S. 147-154
ISSN: 0171-8096
DOI: 10.1524/teme.2013.0024**[L122]**

O. Zimmer

»Verschleißschutz für extreme Belastungen«

WirtschaftsJournal - Das mitteldeutsche WirtschaftsMagazin, Nr. 8/2013, S.3
ISSN: 1617-6669**[L123]**

O. Zimmer, F. Kaulfuß

»Dicke Hartstoffschichten für extrem belastete Oberflächen«

V2013 Industrieausstellung & Workshop-Woche Vakuumbeschichtung und Plasmaoberflächentechnik, 14.-17.10.13, Dresden, Tagungsband, S. 70

[L124]

M. Zimmermann, A. Grigorescu, C. Müller-Bollenhagen, H.-J. Christ

»Influence of Deformation-Induced Alpha Prime Martensite on the Crack Initiation Mechanism in a Metastable Austenitic Steel in the HCF and VHCF Regime«

13th International Conference on Fracture, Beijing, China, 16.-21. Juni 2013, Tagungsband und Tagungs-CD

[L125]

M. Zimmermann, A. Kolyshkin, C. Stöcker, J. W. Jones, H.-J. Christ

»Damage Evolution and Crack Growth in Nickel-Based Alloys during Ultrasonic Fatigue«

Thermec 2013, 02.-06.12. 2013, Las Vegas, USA, Tagungsband

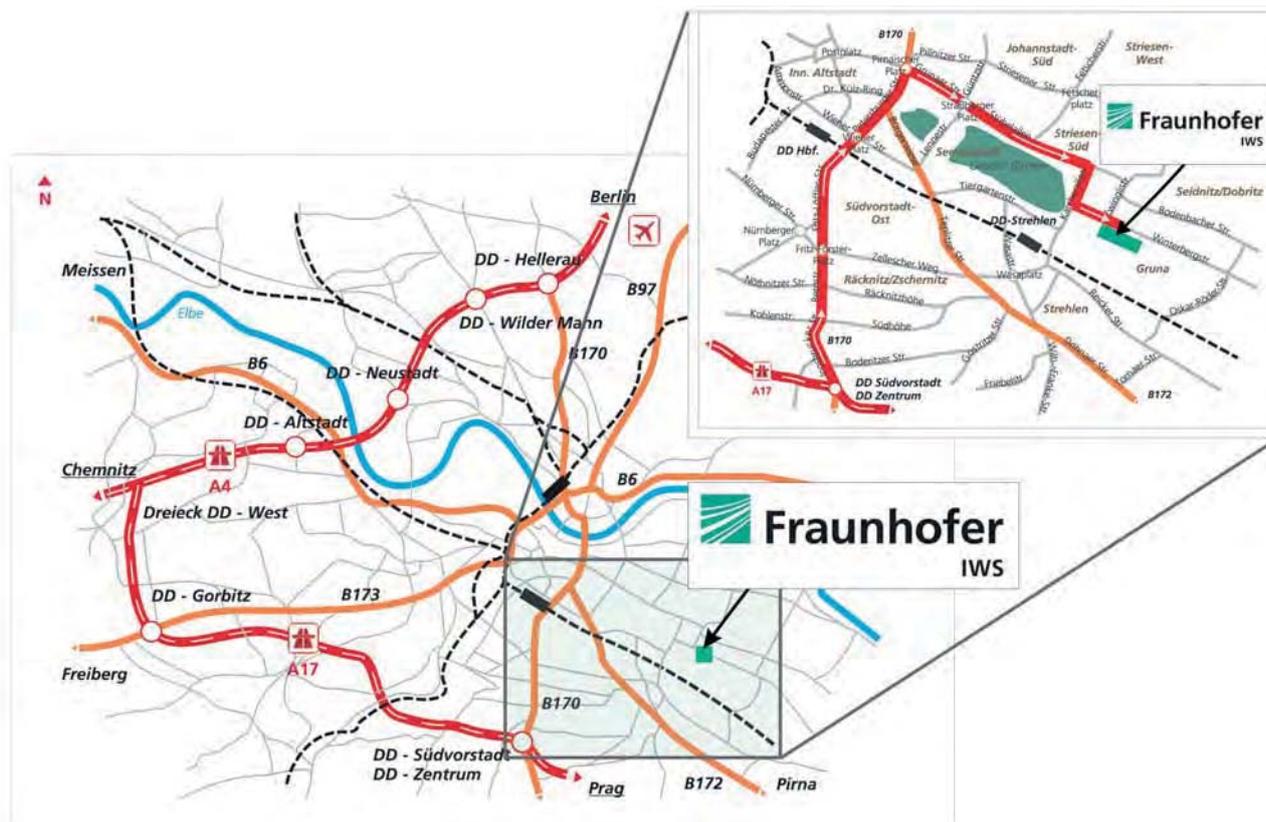
[L126]

M. Zimmermann, A. Kolyshkin, C. Stöcker, M. Cremer, H.-J. Christ

»Ermüdungsverhalten teilchengehärteter Legierungen im Bereich niedriger und sehr hoher Lastspielzahlen«

Werkstoffprüfung 2013, 28.-29.11.2013, Neu-Ulm, Tagungsband

KONTAKTADRESSEN UND ANFAHRT



Mit dem Auto (ab Autobahn):

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

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 Grünaer Weg).

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 mit der Straßenbahn (siehe oben)

Post-Adresse:

Fraunhofer-Institut für Werkstoff-
und Strahltechnik IWS Dresden
Winterbergstr. 28
01277 Dresden

Internet-Adresse:

www.iws.fraunhofer.de

Telefon +49 351 83391-0

Fax +49 351 83391-3300

E-Mail info@iws.fraunhofer.de

Redaktion / Koordination / Gestaltung:

B.Eng. Sophie Pianski
Dr. Anja Techel
Dr. Ralf Jäckel

Bildnachweis:

S. 2, 14, 86	Shutterstock.com / Frank Höhler
S. 5, 9, 13, 29, 33, 42, 100, 103, 114, 140, 142 (u.)	Frank Höhler
S. 6	Joachim Blobel
S. 8 (o. li.)	Sempa Systems GmbH
S. 8 (o. re.)	Rubotherm GmbH
S. 11	Dr. F. Junker (privat)
S. 18	DDpix.de, Marcel Quietzsch / Frank Höhler
S. 20, 40, 54, 55, 68, 104	Fraunhofer IWS / Frank Höhler
S. 22, 56, 70, 88, 106	Jürgen Jeibmann
S. 25	Jonas & Redmann
S. 44 (Abb. 2)	Federal-Mogul Burscheid GmbH
S. 49	Fraunhofer IWU
S. 62, 63	TU Dresden
S. 64, 65 (Abb. 2)	TU Chemnitz
S. 74	Alstom
S. 76	Wikipedia Commons
S. 128, 129	TU Wrocław
S. 132	Reiner Sprengel
S. 134, 135	Fraunhofer IPM, ILT, IST, IOF, FEP
S. 136 (o.)	TU Dresden, Ulrich van Stipriaan
S. 142 (o. re.)	Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (DGM)
alle anderen Abbildungen	Fraunhofer IWS

© Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2014

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.