



JAHRESBERICHT  
**2012**

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



# JAHRESBERICHT 2012

DEKRA Certification

## ZERTIFIKAT ISO 9001:2008



beschreibt hiermit, dass das Unternehmen



**Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik**

**Berichte:**  
Lieferung und Infrastruktur, FVD- / Nanotechnologie,  
CVD-Dünnschichttechnologie, Thermische Beschichtungen,  
Füge-/Randschichttechnologie, Abtragen und Trennen

**Standort:**  
Winterbergstraße 28 • D-01277 Dresden

ein Qualitätsmanagementsystem entspricht der oben genannten Norm (11/2008) abgelehnt hat  
und dieses selbstem anmerkt. Die Nachweise wurde im Rahmen der Zertifizierungsurteile  
Bericht-Nr. 81257018/5 betrachtet. Dieses Zertifikat ist nur in Verbindung mit der  
unfalschbaren Durchführung der Überwachungsaktivität gültig.

Dieses Zertifikat ist gültig ab:	28.01.2010	Datum der Erneuerung:	2012-1887
Dieses Zertifikat ist gültig bis:	23.01.2013	Zertifikat Registrier-Nr.:	81257018/5
Letzter Ausstieg:	13.01.2011	Ursprung	



DEKRA Certification GmbH • Hans-Winkelstraße 10 • D-70065 Stuttgart • www.dekra-certification.com

INSTITUTSLEITER PROF. DR. RALF ECKHARD BEYER



# VORWORT

*»Wer zu spät an die Kosten denkt, runiniert sein Unternehmen. Wer zu früh an die Kosten denkt, tötet die Kreativität.«*

Philip Rosenthal

Die Wirtschaft in Deutschland hat sich im Jahr 2012 nachhaltig erholt und sie blickt positiv in die Zukunft. Dies wird unter anderem an den steigenden Aufwendungen für Forschung und Entwicklung deutlich. Auch in den Ergebnissen unseres Instituts spiegelt sich diese positive Entwicklung der Wirtschaft wieder. Während wir selbst in den schwierigen Jahren ein Wachstum der Aufträge aus der Industrie verzeichnen konnten, wuchs unser Industrieertrag 2012 um über 30 % - ein Indikator für die positive wirtschaftliche Entwicklung, aber auch für das Vertrauen, welches dem IWS entgegengebracht wird. Dieses ist wiederum auf die Qualität der Arbeit sowie das persönliche Engagement der Mitarbeiter zurückzuführen.

Auch im Jahr 2012 wurden Mitarbeiter des IWS wieder mit bedeutenden Preisen ausgezeichnet. An dieser Stelle seien nur der renommierte Preis der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Lasertechnik e. V. (WLT) sowie der Joseph-von-Fraunhofer-Preis genannt, welcher in den letzten fünfzehn Jahren zum fünften Mal einem IWS-Mitarbeiter verliehen wurde.

»Eine Investition in Wissen bringt immer noch die besten Zinsen.«, sagte Benjamin Franklin. Aus diesem Grund haben wir ein umfangreiches internes Weiterbildungsprogramm ins Leben gerufen. Nach Abschluss der unterschiedlichen Lehrgänge erhalten die Mitarbeiter ein spezielles Zertifikat.

Als IWS-Highlights definieren wir Entwicklungen, die in die Serienfertigung überführt werden konnten. Auch im Jahr 2012 können wir eine Reihe von Highlights aufweisen. Über einige möchten wir in dem vorliegenden Jahresbericht informieren.

Ein Highlight ganz anderer Art war die gemeinsame 20-Jahr-Feier aller Dresdner Fraunhofer-Institute mit fast 2000 Teilnehmern. Weitere große und sehr gut besuchte Veranstaltungen des IWS waren u. a. das Internationale Laser-Symposium Fiber & Disc, das Fügetechnische Symposium »Tailored Joining«, der Workshop »Lithium-Schwefel-Batterien« sowie die Nanofair.

Das DRESDEN-concept ist ein Standortkonzept, in welchem Institute der Fraunhofer-Gesellschaft, der Max-Planck-Gesellschaft und der Leibniz-Gemeinschaft, das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf sowie die Exzellenzuniversität eng zusammenarbeiten. In diesem Rahmen wurde eine Reihe von Verbundprojekten definiert, wovon die ersten bereits Ende letzten Jahres bewilligt wurden, z. B. ein Projekt zur Entwicklung stationärer Batterien, welches vom IWS koordiniert wird. Weitere große Projekte stehen kurz vor der Bewilligung.

Das Netzwerk des IWS konnte 2012 auch außerhalb des DRESDEN-concept ausgebaut werden. So haben die Außenstelle in den USA sowie die Projektgruppen in Dortmund und Wrocław, Polen ebenfalls zum Erfolg des IWS beigetragen. Darüber hinaus wurde 2012 in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Dresden ein Zentrum für »Tailored Joining« gegründet, in welchem nahezu alle Fügeverfahren vertreten sind.

Das Jahr 2012 war für das IWS ein außergewöhnlich erfolgreiches Jahr, dem Jahr 2013 sehen wir sehr optimistisch entgegen. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Projektpartnern für ihr Vertrauen und die sehr gute Zusammenarbeit bedanken.

# INHALT

## DAS FRAUNHOFER IWS

VORWORT	3
INHALT	4
VORSPRUNG DURCH EXZELLENZ	6
HIGHLIGHTS IM JAHR 2012	8
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	36
NEUARTIGE SCHICHTSYSTEME ERWEITERN ANWENDUNGSSPEKTRUM	
RANDSCHICHTTECHNIK	54
GANZZEITLICHER WERKSTOFF-, VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNISCHER ANSATZ	
THERMISCHES BESCHICHTEN	64
SYMBIOSE ZWISCHEN BESCHICHTUNGSTECHNIK UND WERKSTOFF-KNOW-HOW	
FÜGEN	78
NEUE FÜGETECHNOLOGIEN FÜR METALLISCHE UND NICHTMETALLISCHE WERKSTOFFE	

»Ein Telefonbuch ist voller Fakten, aber es enthält nicht eine einzige Idee.«

Mortimer J. Adler



## **ABTRAGEN UND TRENNEN 94**

**DER LASER ALS WERKZEUG ZUM TRENNEN UND MIKROBEARBEITEN**

# ZENTREN, NETZWERKE, EHRUNGEN

## **ZENTREN 110**

BATTERIEZENTRUM IM IWS	111
FÜGETECHNISCHES ZENTRUM	112
ZENTRUM FÜR LASERINTEGRATION	113
DAS NANOTECHNOLOGIE-ZENTRUM	114
ZENTRUM FÜR KOHLENSTOFFTECHNIK	115
DORTMUNDER OBERFLÄCHENZENTRUM (DOC®)	116
PROJECT CENTER WROCŁAW (PCW)	118
CENTER FOR COATINGS AND LASER APPLICATIONS (CCL)	120

## **NETZWERKE 122**

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT	123
FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES	124
EXZELLENTER KOOPERATIONSPARTNER: TU DRESDEN	126
DRESDNER INNOVATIONSZENTRUM ENERGIEEFFIZIENZ	128

## **BESONDERE EREIGNISSE 130**

## **AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN 132**

## **VERÖFFENTLICHUNGEN 134**

## **KONTAKTADRESSEN UND ANFAHRT 141**

## **IMPRESSUM 142**



# VORSPRUNG DURCH EXZELLENZ

## 20 JAHRE FRAUNHOFER IN DRESDEN

Die Fraunhofer-Institute und -Institutsteile am Standort Dresden feierten 2012 ihr 20-jähriges Bestehen und blickten auf eine überaus erfolgreiche Entwicklung zurück. Dresden hat sich zum größten Ballungsgebiet an Fraunhofer-Instituten in Deutschland entwickelt und ist mit über 1300 Mitarbeitern ein bedeutender Arbeitgeber der Region. Die Institute sind stark mit der lokalen Industrie vernetzt und generieren Projekte mit einem Umsatzvolumen von mehr als 130 Mio. Euro pro Jahr.

## VORSPRUNG DURCH EXZELLENZ

Seit 2012 gehört die TU Dresden zu den elf Exzellenz-Universitäten Deutschlands. Sie war mit ihrem Zukunftskonzept, zwei Exzellenzclustern und einer Graduiertenschule erfolgreich. Das Fraunhofer IWS hat die Bewerbung der TU Dresden im Rahmen des DRESDEN-concept aktiv unterstützt und gemeinsam mit der Universität und weiteren außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Museen die Exzellenz der Dresdner Forschung sichtbar gemacht.

Die enge Kooperation mit der Universität ist im Jahr 2012 mit weiteren Bausteinen gefestigt worden. Mit Wirkung zum 2. April 2012 hat die TU Dresden Frau Dr. Martina Zimmermann auf die von der Fraunhofer-Gesellschaft finanzierte Professur für Werkstoffprüfung und -charakterisierung berufen. Gleichzeitig mit der Berufung an die TU Dresden übernahm Frau Prof. Zimmermann die Gruppenleitung der Gruppe Werkstoffcharakterisierung am Fraunhofer IWS Dresden. Mit Wirkung zum 1. Juli 2012 erhielt Herr Dr. Andrés-Fabián Lasagni, Leiter der Arbeitsgruppe Oberflächenfunktionalisierung am IWS Dresden, die Professur für Laserstrukturieren in der Fertigungstechnik an der TU Dresden. Beide Berufungen sind Bestandteil des im Februar 2009 eröffneten Dresdner Innovationszentrums Energieeffizienz DIZE<sup>EFF</sup>. Exzellente Ausbildung an der TU Dresden sichert exzellenten Nachwuchs für das IWS Dresden.

## DRESDNER INNOVATIONSZENTRUM ENERGIEEFFIZIENZ DIZE<sup>EFF</sup>

Im Rahmen des vom Land Sachsen und der Fraunhofer-Gesellschaft geförderten Projektes DIZE<sup>EFF</sup> wurden 2012 eine Vielzahl neuer Forschungsergebnisse und Innovationen erzielt. Für das Fraunhofer IWS sind insbesondere die Arbeiten zu reibungsmindernden Schichten (S. 40/41), zur Herstellung von Reaktivmultischichten und deren Anwendung beim Fügen schwer schweißbarer Bauteile (S. 44/45) sowie die Untersuchungen zum Mikro- und Nanostrukturieren für Anwendungen im Bereich der organischen Photovoltaik von strategischer Bedeutung. Sie bilden die Basis für die zusätzliche Akquisition von Drittmitteln.

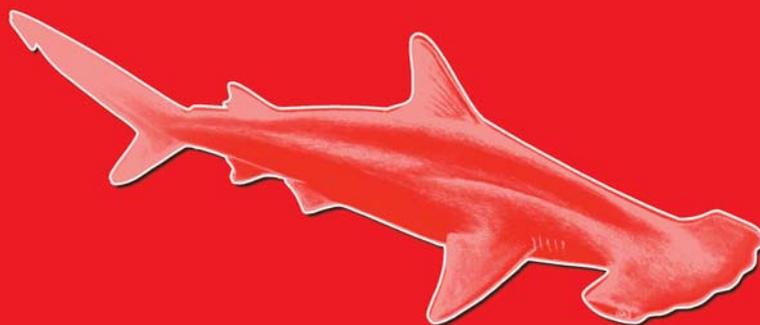
## ENERGIEFORSCHUNG IM IWS

Auch im Jahr 2012 akquirierte das Fraunhofer IWS Dresden wieder einen wesentlichen Anteil seines Ertrages mit der Entwicklung und industriellen Umsetzung von Technologien und Systemen in den Bereichen Energieeffizienz, -wandlung und -speicherung. Zu diesen Themen erhielt das Institut Forschungsaufträge im Wert von etwa 5,9 Mio. Euro direkt aus der Industrie. Öffentliche Zuwendungsgeber bewilligten 2012 Projekte im Gesamtwert von 3,2 Mio. Euro nur zu diesen Themen. Zudem fließen Eigenmittel in Höhe von etwa 2 Mio. Euro in Grundlagen- und Vorlaufforschung in diesen Bereich, im Wesentlichen für weitere Investitionen in der Zellentwicklung und -fertigung. Mit der Fertigstellung eines Erweiterungsbaus und dem Aufbau eines Zentrums für Batterieforschung wird die Entfaltung dieses Forschungsschwerpunktes weiter gestärkt.

## DRESDNER KONFERENZ »ZUKUNFT ENERGIE«

Energieumwandlung, Energiespeicherung und effizienter Energieeinsatz sind auch Themen der nächsten Konferenz »Zukunft Energie«. Sie findet am 28. und 29. Mai 2013 in Dresden statt (siehe [www.zukunftenergie-dresden.de](http://www.zukunftenergie-dresden.de)).

# HIGHLIGHTS IM JAHR 2012



## SPUTTERTECHNOLOGIE ZUR RÖNTGENOPTIK-HERSTELLUNG

Im Jahr 2012 wurden 2 weitere Sputteranlagen für die Großflächenbeschichtung an Industriepartner überführt. Die Anlagen sind mit 6 Beschichtungsquellen ausgerüstet, wodurch eine besonders effektive Abscheidung der Schichten möglich ist. Substrate mit einem Durchmesser von bis zu 680 mm können in der Anlage gehandhabt werden. Die mit der Anlage erzeugten optischen Elemente für Röntgen- oder EUV-Strahlung kommen in Lithographiesystemen in der Mikroelektronik zum Einsatz.

## VERSCHLEISSCHUTZ DURCH LASER-ARC-MODUL

Zur Abscheidung von superharten, amorphen Kohlenstoffschichten (Diamor®) auf Werkzeugen und Bauteilen hat das IWS Dresden ein neuartiges Laser-Arc-Modul (LAM) entwickelt. Im Jahr 2012 wurden zwei LAM 500-Systeme an Industriekunden überführt. Ein System wird zukünftig zur In-house-Beschichtung von Komponenten mit dicken ta-C-Schichten eingesetzt. Das zweite System enthält zusätzlich einen Plasmafilter und kommt in der Lohnbeschichtung für hochwertige Werkzeuge und Komponenten zum Einsatz (siehe S. 40/41 und Abb. 2).



## WEITERE INDUSTRIEÜBERFÜHRUNGEN DER REMOTE-TECHNOLOGIE ZUM AIRBAGSCHNEIDEN

Die vom Fraunhofer IWS zusammen mit der Firma Held Systems entwickelte kompakte Anlagentechnik zum flexiblen Laserstrahlschneiden von Airbagmaterial wurde 2012 an einen weiteren Industriekunden übergeben. Diese Anlage ermöglicht sowohl das Laserschneiden von Flachgewebe als auch den Zugschnitt von »OPW« (one piece woven) - Material durch eine kamerabasierte Geometrieerkennung. Zudem wurde die seit 2007 bei der Firma TRW in Mexiko produzierende Anlage um eine Strahlquelle mit Scanner erweitert.

## SCANNERTECHNIK IM EINSATZ

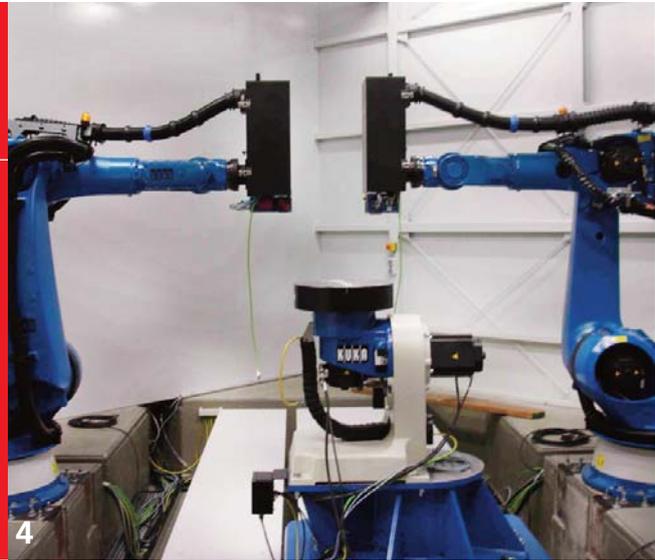
Die von den Partnern Rofin-Sinar, Maschinenfabrik Arnold und Fraunhofer IWS gemeinsam entwickelten Systeme zur Laserbearbeitung sind in der Lage, die Ummagnetisierungsverluste von kornorientiertem Elektroblech um ca. 10 % zu verringern. Die in den Anlagen eingesetzte einzigartige Anordnung mehrerer Galvanometer-Scanner ermöglicht im Zusammenspiel mit schnell ansteuerbaren Lasern exzellenter Strahlqualität bisher nicht erreichte dynamische Eigenschaften. Gleichzeitig garantieren die Systeme höchste Flexibilität und konstante Behandlungsparameter. Weltweit wurden bereits 7 Anlagen des Konsortiums installiert, davon 3 Systeme allein 2012. Weitere Anlagen für bestehende und Neukunden sind für 2013 im Aufbau bzw. vor der Beauftragung.

## LASERAKUSTISCHE MESSSYSTEME FÜR INDUSTRIE UND FORSCHUNG

Zur Bestimmung der Eigenschaften von Schichten im Nanometerbereich sowie zur Charakterisierung von Fertigungseinflüssen bei der Fertigung von Solarwafern wurde das Messsystem LAwave® im Jahr 2012 an je einen Kunden aus der Forschung und der Industrie übergeben (siehe S. 48/49 und Abb. 1).



2



4

## LASERSTRAHLHÄRTE- UND AUFTRAGSCHWEISS-ANLAGE FÜR GROSSWERKZEUGE

Im Jahr 2012 unterstützte das Fraunhofer IWS den Vorrichtungsbau der Volkswagen AG bei der Erstellung einer roboterbasierten Anlage zum Laserstrahlhärten und -auftragschweißen. Die Anlage ist insbesondere auf die Neufertigung von Karosseriewerkzeugen zugeschnitten. Das Fraunhofer IWS lieferte Systemkomponenten für die Strahlformung, Prozessregelung und Pulverzufuhr sowie ein umfangreiches Technologiepaket zum Laserhärten und Auftragschweißen. Das Institut unterstützte zudem bei der Installation und Inbetriebnahme der Laseranlage sowie bei der Schulung der VW-Mitarbeiter. Es ist die zweite Anlage dieser Art im VW-Konzern, die vom IWS Dresden maßgeblich mit überführt wurde (siehe S. 58/59 und Abb. 3).



3

## TECHNOLOGIETRANSFER UND SONDERANLAGENBAU ZUM HÄRTEN VON SICHERHEITSRELEVANTEN FAHRZEUGBAUTEILEN

An die Firma BPW Bergische Achsen KG in Hunsheim wurde eine Sonderanlage zum Härten von Fahrzeugkomponenten übergeben. Für das spezielle Bauteil erfolgte vorher die Entwicklung und Erprobung einer neuen Technologie, das Laserstrahlhärten mit Drehspiegeloptik. Im Hinblick auf eine 100 %ige Qualitätssicherung kommen die im IWS entwickelten Komponenten »E-MAqS« (Temperaturmessung) und »LompocPro« (Regelung) zum Einsatz. Die Prototypanlage wurde mehrere Monate im Fraunhofer IWS getestet. Mitarbeiter des Unternehmens wurden geschult. Ende 2012 wurde die Anlage an den Kunden übergeben und dort in Betrieb genommen.

## HÄRTEN VON DAMPFTURBINENSCHAUFELN MIT KOOPERIERENDEN ROBOTERN

Für den Energiesektor der Siemens AG wurde am Standort Mülheim an der Ruhr ein Lasersystem zum beidseitig-gleichzeitigen Härten von Dampfturbinenschaufeln aufgebaut. Mit Hilfe von zwei Lasern und zwei Robotern wird die optimale Härtezonengeometrie an den Dampfturbinenschaufeln erzeugt. Eine Prototypanlage zum beidseitig-gleichzeitigem Härten wird seit Ende 2006 im Fraunhofer IWS betrieben. Die Siemens AG erhält eine Weiterentwicklung dieser Prototypanlage mit einigen neuen technischen Lösungen (Abb. 4). Bestandteil des Transferprojektes sind auch die im IWS Dresden entwickelten Komponenten »E-MAqS« (Temperaturmessung), »LASSY« (dynamische Strahlformungseinheit) und »LompocPro« (Regelung). Der Technologietransfer wird im Jahr 2013 fortgesetzt. Mit der Anlage will die Siemens AG Fertigungszeiten reduzieren und Härtetechnologien im eigenen Haus betreiben. Die Technologie zum Härten von Dampfturbinenschaufeln wurde im Fraunhofer IWS Dresden patentiert und kontinuierlich weiterentwickelt. Erste lasergehärtete Schaufeln sind bereits seit Mitte der 1980er Jahre im Kraftwerkseinsatz.

## PULVERDÜSEN ZUM GENERIEREN UND REPARIEREN

Wie schon in den Vorjahren konnten auch 2012 zahlreiche Pulverdüsen zum Laserstrahlaufragschweißen in die Industrie überführt werden. Komponentenhersteller wie Laserline, GTV und Maschinenfabrik Arnold orderten mehrere Systeme für unterschiedliche Endkunden. Allein vom neuesten Modell, der CoaxPowerline wurden sechs Systeme bei drei verschiedenen Kunden installiert (Abb. 5).



5

# AUS DEM KURATORIUM



Das Kuratorium berät und unterstützt die Institutsleitung sowie die Organe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 22. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 23. März 2012 im Fraunhofer IWS Dresden statt. Mitglieder des Kuratoriums waren im Berichtszeitraum:

**FRANK JUNKER, DR.**

Vorsitzender des Kuratoriums  
Selbstständiger Berater,  
Radebeul

**DIETER FISCHER**

Geschäftsführer EMAG Leipzig Maschinenfabrik GmbH,  
Leipzig

**WERNER HUFENBACH, PROF. DR.**

Direktor des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik  
der Technischen Universität Dresden

**ULRICH JARONI, DR.**

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

**PETER KÖSSLER**

Werkleiter AUDI AG,  
Ingolstadt

**UWE KRAUSE, DR.**

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

**THOMAS G. KRUG, DR.**

Managing Director Hauzer Techno Coating BV,  
Niederlande

**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

**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



Das Jahr 2012 ist mit seiner Entwicklung weit entfernt von einer wirtschaftlichen Abkühlung. Auch zum Jahresbeginn gibt es wenig Anzeichen, ganz im Gegenteil, die Stimmung in der deutschen Wirtschaft ist gut. Die Konjunktur ist stärker als erwartet im zweiten Halbjahr 2012 angestiegen und zeigt auch 2013 eine positive Gesamtgeschäftsentwicklung. Die Exportaussichten sind weiterhin sehr gut und wirken in vielen Bereichen nachhaltig. Auch aus den USA sind wieder positive Signale für eine gute wirtschaftliche Entwicklung zu erkennen. China, Brasilien und den Schwellenländern in Asien und Lateinamerika werden auch weiterhin sehr gute wirtschaftliche Aussichten eingeräumt. Diese Aussichten werden durch die noch nicht beendete Finanzkrise beeinflusst. Es ist zu hoffen, dass wir auch hier bald sichere Entwicklungen erfahren können.

Im Maschinen- und Anlagenbau ist es viel besser gegangen als erwartet. So stiegen die Umsätze, aber differenziert. Man muss feststellen, dass die Sondermaschinen mit einem besonderen Know-how und Nischenprodukte sich auch bei schlechter Konjunktur immer sehr gut behaupten. Deshalb ist eine Technologieführerschaft von größter Bedeutung. Der noch vor wenigen Jahren diskutierte Abbau von Überkapazitäten im Automobilbau hat sich total gewandelt. Der Wachstumstrend ist in allen Segmenten zu erkennen. Auch hier spielt die globale Aufstellung eine sehr wichtige Rolle.

Sicherheits- und Umweltbewusstsein sind gefragt. Die Bereiche Umwelt- und Energietechnik entwickeln sich sehr dynamisch. Die Chemiebranche hat ihren hervorragenden Platz behauptet. Die Forschungsleistungen wirken auch hier gut als Wachstumsimpuls, leider nicht immer an deutschen Produktionsstätten. Der Elektroindustrie sagt man im Zusammenhang mit der Automatisierungs-, Bauelemente- und der Halbleitertechnik ein differenziertes Wachstum voraus. Die Medizintechnik hat sich, auch auf Grund vieler neuer Technologien, hervorragend entwickelt.

In all diesen Bereichen wirkt die Fraunhofer-Gesellschaft mit hochqualifiziertem Personal und mit Unterstützung des Bundes und der Länder. Einen guten Überblick konnte man sich zum Fraunhofer-Symposium »Netzwerk« im Dezember 2012 in München verschaffen. Die Ergebnisse und die Vernetzung der Fraunhofer-Institute sind überzeugend.

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS folgt mit den Ergebnissen 2012 in überzeugender Weise dem Anspruch an hohe wissenschaftliche Ergebnisse von Produkten, Technologien und Dienstleistungen. Mit den wissenschaftlichen Schwerpunkten in der Oberflächen- und Lasertechnik, in den Bereichen Energie, Mobilität, Werkstoffsysteme und Medizintechnik werden Projekte mit bedeutsamem wissenschaftlichen Anspruch und hohem Anwendernutzen bearbeitet. Mit den Forschungsergebnissen in der Batterietechnik nimmt das IWS eine Spitzenposition ein. Die Einwerbung von Drittmitteln und der Anteil der Industrieforschung haben sich im Jahr 2012 überdurchschnittlich gut entwickelt.

Das Wissenschaftsnetzwerk DRESDEN-concept verbindet die Grundlagenforschung der Technischen Universität Dresden, der Max-Planck-Institute, der Leibniz-Institute und des Helmholtz-Zentrums sehr eng mit den Fraunhofer-Instituten. Damit hat sich Dresden zu einem exzellenten Wissenschaftsstandort entwickelt.

Wir als Kuratoren können uns über die Entwicklung des IWS freuen. Einer spannenden Diskussion sehen wir 2013 entgegen und unterstützen die strategische Ausrichtung des IWS. Das Kuratorium dankt unseren Kunden, den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, der Institutsleitung und allen Partnern für die erreichten Ergebnisse und ihren Einsatz. Wir wünschen Ihnen in der Zukunft viel Gesundheit und Erfolg.

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 Laserstrahl-schweißen und -auftragschweißen
  - Laserinduktionswalzplattieren
- Abtragen, Reinigen und Strukturieren
- prozessspezifische Überwachung und Regelung

### OBERFLÄCHFUNKTIONALISIERUNG UND BESCHICHTUNG

- Plasma-, Lichtbogen- und Flammstrahlverfahren mit Pulver und Suspensionen
- Hochratebeschichtungsverfahren
- Präzisionsbeschichtungsverfahren
- 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, Strahlblenk- 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



## 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



»Nur wer seinen Weg geht, kann von niemandem überholt werden.«

Marlon Brando

## DAS INSTITUT IN ZAHLEN

### MITARBEITER AM IWS

	Anzahl
Stammpersonal	168
Wissenschaftler / Ingenieure (TU, FH)	114
Facharbeiter mit techn. oder kaufmänn. Ausbildung	45
Auszubildende	9
Mitarbeiter TU Dresden (Arbeitsort Fraunhofer IWS)	41
Stipendiaten + externe Mitarbeiter	8
Wissenschaftliche Hilfskräfte	201
<b>GESAMT</b>	<b>418</b>

### PUBLIKATIONEN AM IWS

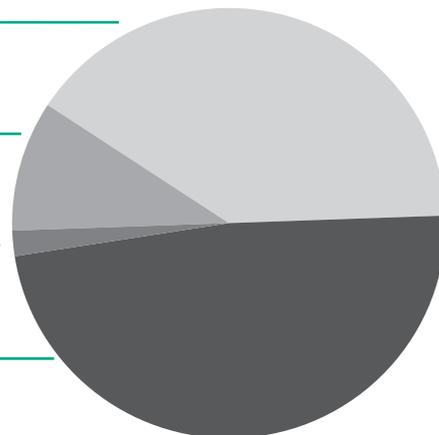
	Anzahl
Promotionen	6
Diplomarbeiten	32
Veröffentlichungen	141
<b>GESAMT</b>	<b>179</b>
Patente (Erstanmeldung)	13

40 % Stammpersonal

10 % TU-Mitarbeiter

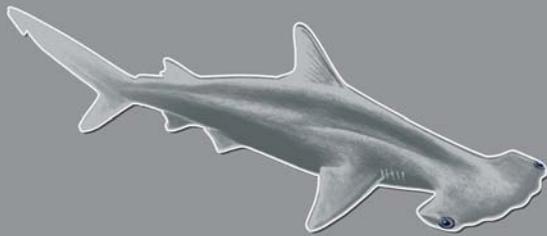
2 % Stipendiaten + externe Mitarbeiter

48 % Wissenschaftliche Hilfskräfte



MITARBEITER AM FRAUNHOFER CCL (USA)

14



Erträge 2012 (Mio. €)*	Betrieb	Investitionen	Gesamt
Projekterträge aus der Industrie	12,8 54 %	0,6 26 %	13,4 52 %
Projekterträge durch Bund, Land und EU	6,1 26 %	0,6 26 %	6,7 26 %
Grundfinanzierung und interne Programme	4,6 20 %	1,1 48 %	5,7 22 %
	<b>23,5</b>	<b>2,3</b>	<b>25,8</b>

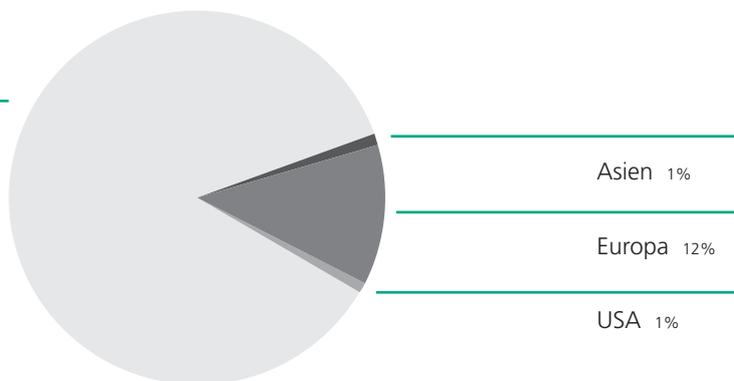
Aufwand 2012 (Mio €)*	
Personalaufwendungen	10,2 40 %
Sachaufwendungen	13,3 51 %
Investitionen	2,3 9 %
	<b>25,8</b>

Fraunhofer Industrie  $\rho_{\text{Ind}} = 57,0 \%$

\*STAND FEBRUAR 2013

### HERKUNFT DER INDUSTRIERTRÄGE

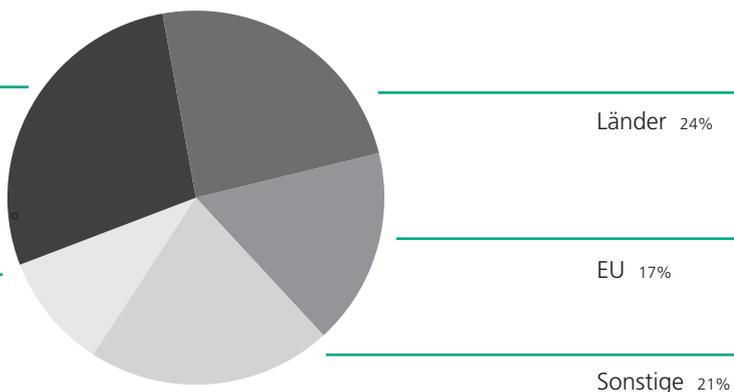
Deutschland 86%

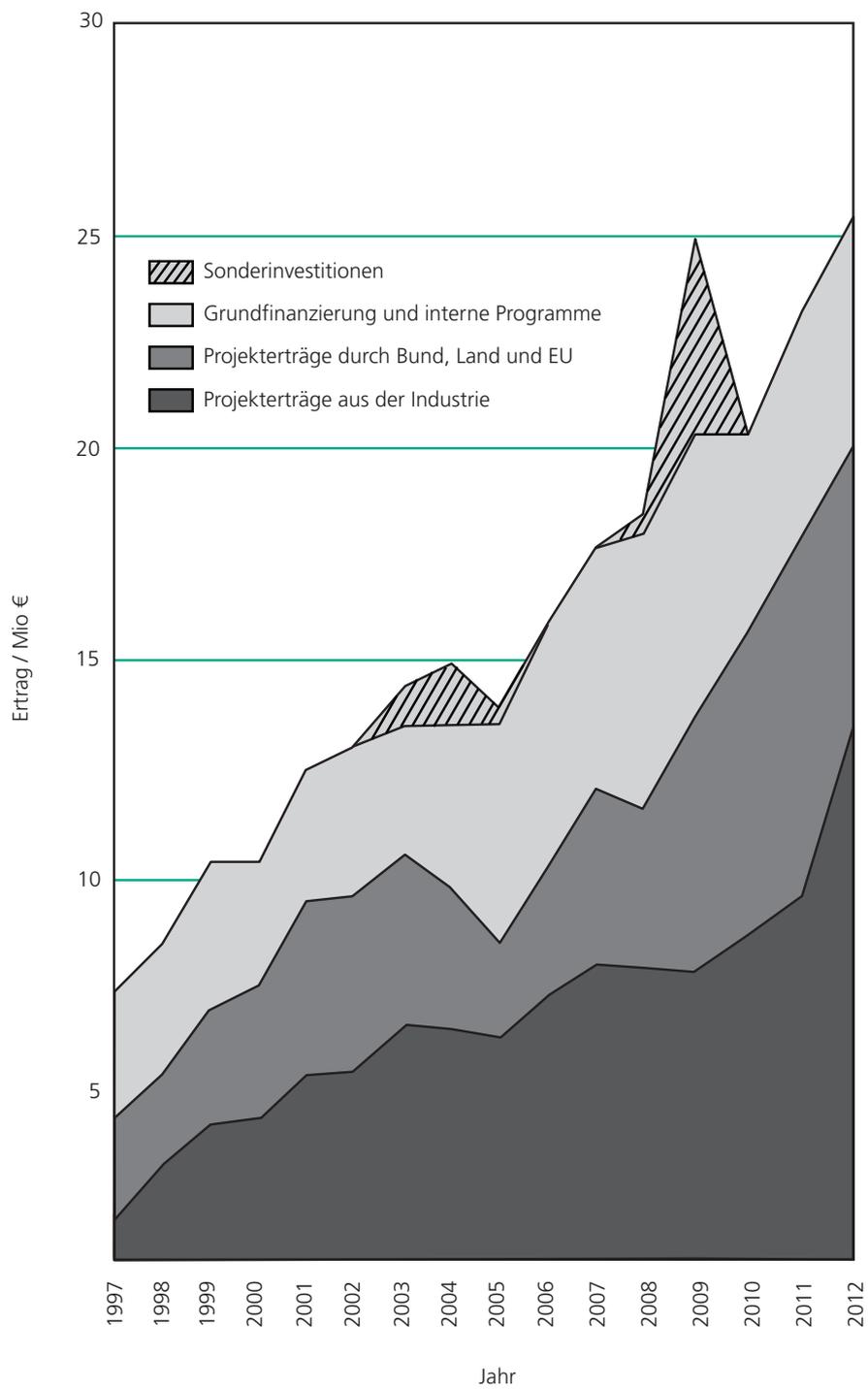


### HERKUNFT DER ÖFFENTLICHEN ERTRÄGE

BMBF 28%

Bund ohne BMBF 10%







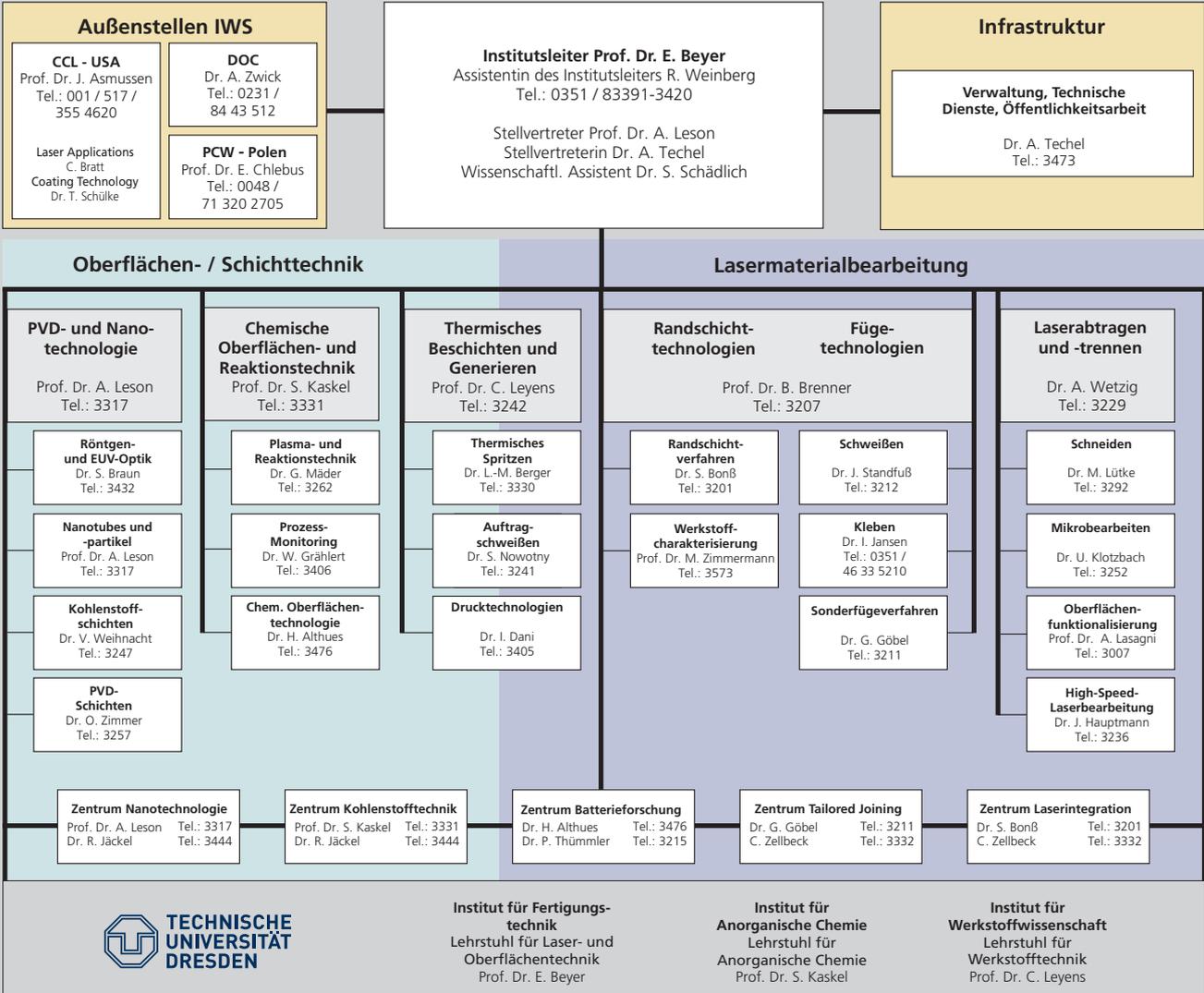
*»Im Grunde sind es immer die Verbindungen  
mit Menschen, die dem Leben seinen Sinn  
geben.«*

Wilhelm v. Humboldt

## DAS LEITUNGSTEAM



# ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. STEFAN KASKEL



»Das einzige Mittel gegen Aberglauben ist Wissenschaft.«  
Henry Thomas Buckle



## GESCHÄFTSFELD CHEMISCHE OBERFLÄCHEN- UND REAKTIONSTECHNIK

**Redaktion:** Prof. Kaskel, kürzlich konnte man in der FAZ lesen, dass Sie eine neue Batterie entwickelt haben, welche insbesondere für den Automobilsektor entscheidende Vorteile bringen könnte.

**Prof. Kaskel:** In der Tat haben wir im letzten Jahr einen Durchbruch im Bereich der neuen Batterien erreicht. So konnten wir erstmals einen neuen Typ von Batterie vorstellen, der auf der Reaktion von Lithium und Schwefel beruht und eine doppelt so hohe Energiedichte hat wie herkömmliche Lithium-Ionenbatterien. Dieser Batterietyp wurde nicht von uns erfunden, es gibt diese Batterien schon länger und sie werden z. B. in Drohnen eingesetzt. Allerdings ist die Zyklenbeständigkeit bis heute bescheiden gewesen, was in militärischen Anwendungen aber offensichtlich nicht gestört hat.

**Redaktion:** Was ist denn nun das Neue?

**Prof. Kaskel:** Wir konnten ein neues Elektrodenmaterial entwickeln, welches eine Zyklenbeständigkeit von mehr als 1000 Zyklen aufweist. Wir sind schon der Meinung, dass das ein echter Durchbruch ist.

**Redaktion:** Und wann kann man diese Batterie kaufen?

**Prof. Kaskel:** Tatsächlich gibt es noch zahlreiche Herausforderungen. Erst mal sind unsere bisherigen Batterien noch recht klein, so dass sie fürs Auto noch nicht eingesetzt werden können. Um dies zu realisieren, werden wir 2013 ein neues Batterielabor im Neubau einrichten, welches auch automatisiertes Produktionsequipment beinhaltet. Wir decken damit die gesamte Produktionskette ab, angefangen von der explo-

rativen Suche nach neuen Materialien über Rolle-zu-Rolle-Elektrodenherstellung bis hin zum Stapeln und Verpacken der Elektrodenstapel. Damit wollen wir auch deutschen Firmen die Möglichkeit geben, innovative Produkte innerhalb der Prozesskette testen zu können. Heute ist es ja so, dass alle Batteriehersteller ihre Materialien in Japan kaufen. Das ist schon traurig, wenn man bedenkt, was deutsche Zulieferer hier verdienen könnten. Damit meine ich nicht nur die Elektrodenmaterialien, sondern auch die Produktionsmaschinen.

Wir bieten damit eine Plattform an, um sowohl Materialien als auch Produktionsequipment unter bauteilrelevanten Bedingungen evaluieren zu können. Natürlich bieten wir auch Prototypen für potentielle Endnutzer an.

**Redaktion:** Arbeiten Sie zur Zeit nur an Batterien?

**Prof. Kaskel:** Nein, nein. CVD-Methoden sind sehr breit einsetzbar, z. B. zur Diamantsynthese. Das machen wir in Kooperation mit dem CCL in den USA. Zudem kann man die Methode auch für Barrierschichten und zur Herstellung von Nanomaterialien einsetzen.



# KOMPETENZEN

## PLASMA- UND REAKTIONSTECHNIK

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

## PROZESS-MONITORING

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

## CHEMISCHE OBERFLÄCHENTECHNOLOGIE

Den Oberflächeneigenschaften vieler Werkstoffe und Materialien kommt für deren Anwendung eine besondere Bedeutung zu. Durch funktionale Dünnschichten lassen sich Oberflächen beispielsweise mit leitfähigen, kratzfesten oder selbstreinigenden Eigenschaften ausstatten. Die Entwicklung nanostrukturierter Materialien mit definierter Oberflächenchemie ist die Voraussetzung, um die Performance von Doppelschichtkondensatoren und Batterien der nächsten Generation entscheidend zu verbessern. In der Arbeitsgruppe Chemische Oberflächentechnologie 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



## BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2012

1. Trockene Elektrodenfertigung und Konfektionierung für Lithium-Ionen-Zellen 24
2. Nanokomposit-Elektroden für Lithium-Schwefel-Batterien 26
3. Nachweisgrenze von Ultrabarrieremessungen um Größenordnungen verbessert 28
4. Größenbestimmung von Nanopartikeln direkt im Herstellungsprozess 30
5. Hochleistungs-Solarsimulator für solarchemische Reaktoren 32
6. CVD-basierte Herstellung von Diamant für optische und elektronische Anwendungen 34

**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



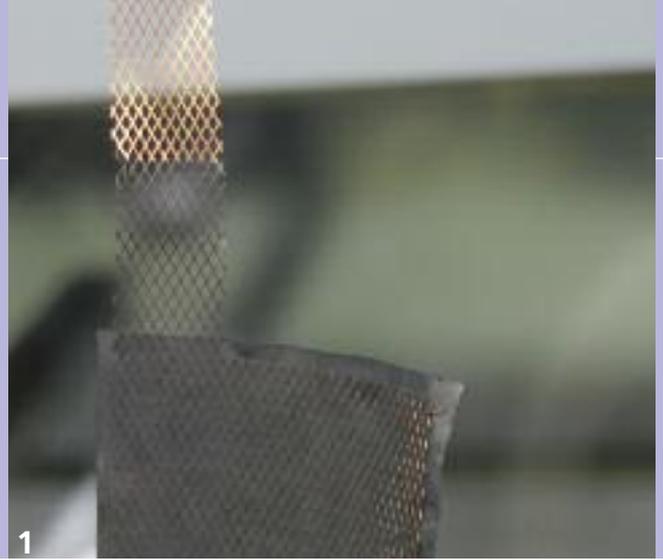
**GRUPPENLEITER**

**CHEM. OBERFLÄCHENTECHNOLOGIE**

**DR. HOLGER ALTHUES**

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





# TROCKENE ELEKTRODENFERTIGUNG UND KONFEKTIONIERUNG FÜR LITHIUM-IONEN-ZELLEN

## DIE AUFGABE

Entsprechend der Prognosen für die E-Mobilität in Deutschland muss in den nächsten Jahren eine drastische Kostenreduktion des Batteriespeichers realisiert werden. Große Kosteneinsparungen können vor allem durch eine Effizienzsteigerung in der Zellherstellung erreicht werden. Lösungsmittelbasierte Beschichtungsprozesse zur Elektrodenfertigung und besondere Umgebungsbedingungen (Trockenraum) für die gesamte Zellfertigungsstrecke sind dabei die größten Kostentreiber.

Zur Entfernung des Lösungsmittels sind aufwendige Trocknerstrecken notwendig und das toxische Lösungsmittel (NMP) ist aufzubereiten. In der Zellherstellung ist durchgängig mindestens eine Luftfeuchtigkeit  $< 2\%$  rF zu gewährleisten (Taupunkt  $< -30\text{ °C}$ ). Neben hohen Kosten verursachen diese Faktoren auch Sicherheits- und Umweltrisiken (toxische Lösungsmittel, Explosionsgefahr) sowie eine erhebliche Belastung der Mitarbeiter durch die Trockenraumbedingungen.

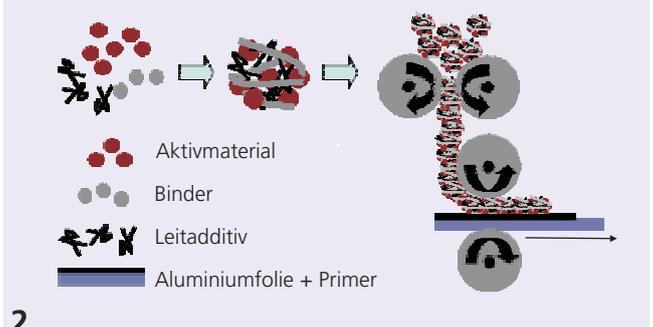
## UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer IWS Dresden wurde bereits im Rahmen des BMBF-Projektes DeLIZ (FKZ: 02PO2640) der Einsatz wasserbasierter Beschichtungsprozesse demonstriert. Damit lassen sich leistungsstarke Elektroden ohne die Verwendung organischer Lösungsmittel herstellen (siehe Jahresbericht 2011 S. 84/85). Zwar birgt der Ersatz der Lösungsmittel durch Wasser bereits ein großes Einsparpotenzial, dennoch ist auch hier ein Trocknungsschritt nötig, um entsprechend den Anforderungen der Zellchemie das Wasser komplett aus den Elektroden zu entfernen.

Im Rahmen des BMBF-Projektes DryLIZ (FKZ: 02PJ2302) wird im IWS Dresden nun an einem vollständig lösungsmittelfreien Prozessieren von Elektroden für Lithium-Ionen-Zellen gearbeitet. Die Basis dafür bildet ein Binder, der durch Scherung Fibrillen ausbildet. Schon bei einem geringen Gewichtsanteil von ca. 5 Gew.-% entfaltet er eine hohe Bindewirkung. Mit Hilfe eines speziellen Mahlprozesses entsteht aus den pulverförmigen Ausgangsmaterialien ein fibrillisiertes, agglomeriertes Pulver. Dieses lässt sich zu freistehenden Filmen mit einer Dicke von 50 - 150  $\mu\text{m}$  verpressen und auf Stromkollektoren (Metallfolien) laminieren (Abb. 1 und 2).

Zusammen mit einem Verbundprojektspartner wird daran gearbeitet, die Elektrodenmaterialien ohne den Einsatz von Lösungsmitteln auf elektrisch leitfähigen Vliesen zu fixieren. Durch dieses Elektroden-Design wird eine deutlich verbesserte Anbindung und elektrische Kontaktierung der Aktivmaterialien erwartet. In Folge können Elektroden mit höherem Leistungsvermögen oder dickere Elektroden für höhere Energiedichten auf Zellebene erreicht werden.

Prinzipbild der lösungsmittelfreien Elektrodenfertigung





2

Ein weiterer Teil des Verbundvorhabens umfasst die Entwicklung von Anlagentechnik zur kosteneffizienteren Prozessierung der Elektrodenfolien. Um bei der Konfektionierung der Elektrodenfolien den Durchsatz zu erhöhen, müssen Trennverfahren entwickelt werden, die auch bei kontinuierlichem Materialvorschub die hohen qualitativen Ansprüche an die Kantengeometrie erfüllen. Im Rahmen des Projektes qualifiziert das Fraunhofer IWS Dresden das Remote-Laserstrahlschneiden »on the fly«. Demgegenüber evaluiert ein Verbundprojektspartner die Chancen zur Reduzierung der Bearbeitungszeit, die sich mit Einsatz eines rotativen Stanzverfahrens ergeben.

Die Elektrodenzuschnitte müssen anschließend bei Fördergeschwindigkeiten von mindestens  $0,25 \text{ m s}^{-1}$  beschädigungsfrei aufgenommen, zur nächsten Arbeitsstation transportiert und dort mit der Genauigkeit von  $0,1 \text{ mm}$  abgelegt werden. Die Konfektionierung und der Elektrodentransport erfolgen in einem kleinen mit Trockenluft versorgten abgeschlossenen Arbeitsraum, der durch einen weiteren Verbundpartner konzipiert wird.

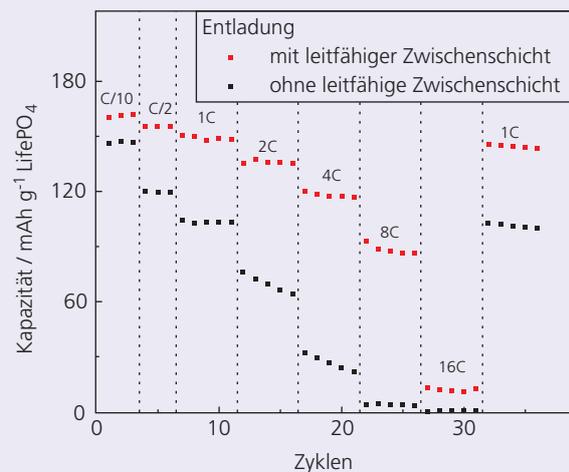
## ERGEBNISSE

In der Elektrodenentwicklung konnte das große Potenzial der neuen Methoden bereits nachgewiesen werden, wie erste Ergebnisse an den trockenprozessierten Elektroden zeigen. Im Labormaßstab ist deren Herstellung bereits deutlich einfacher und schneller als die lösungsmittelbasierten Verfahren. Entscheidend ist aber die Performance der Elektroden. Deshalb wurden freistehende Elektrodenfilme auf Aluminiumfolie gepresst und die elektrochemischen Eigenschaften in einer Halbzelle gegen Lithium gemessen. Ist der freistehende Film in direktem Kontakt mit der Aluminiumfolie, werden zwar hohe Kapazitäten von  $145 \text{ mA h g}^{-1}$  erreicht, die Kapazität nimmt aber mit Erhöhung der Laderate (C-Rate) deutlich ab.

Ein exzellentes Ratenverhalten wird erreicht, wenn eine leitfähige Primerschicht eingesetzt wird, durch die der

Kontaktwiderstand zwischen Stromableiter und Aktivschicht verringert und die Haftung erhöht wird (Abb. 4). Durch den Einsatz leitfähiger Vliese als dreidimensionale Stromableiter, wird diese Anbindung durch Erhöhung der Grenzfläche nochmals verbessert. Der lösungsmittelfreie Prozess bietet zudem ein großes Potenzial für die Herstellung von Elektroden für Batterien zukünftiger Generationen, wie die Lithium-Schwefelbatterie (siehe S. 26/27).

Kapazitäten einer lösungsmittelfrei prozessierten  $\text{LiFePO}_4$ -Elektrode in Abhängigkeit von der Entladerate



3

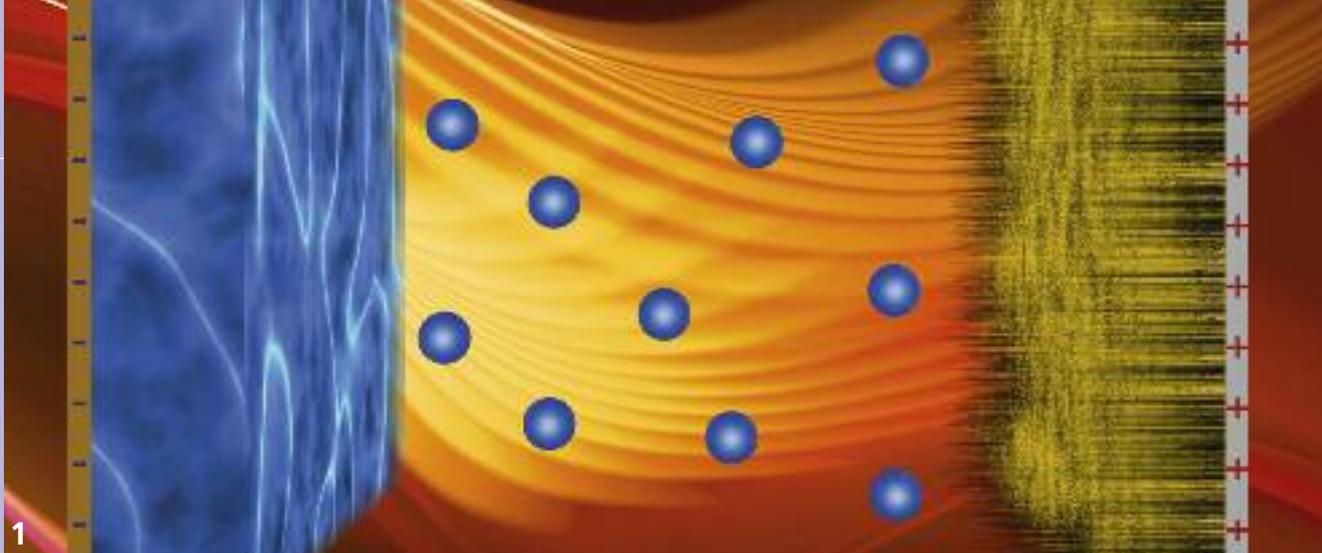
- 1 Bild eines freistehenden Elektrodenfilms mit Streckmetall-Ableiter
- 2 Bild einer trockenprozessierten  $\text{LiFePO}_4$ -Elektrode, auf-laminiert auf Aluminiumfolie + Primerschicht

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Sebastian Tschöcke  
Telefon: +49 351 83391-3297

sebastian.tschoecke@iws.fraunhofer.de





# NANOKOMPOSIT-ELEKTRODEN FÜR LITHIUM-SCHWEFEL-BATTERIEN

## DIE AUFGABE

Lithium-Schwefel-Batterien könnten die nächste Generation von Energiespeichern für mobile Anwendungen darstellen. Besonderes Merkmal ist die hohe gravimetrische Energiedichte von über  $400 \text{ W h kg}^{-1}$ , die sich potentiell mit Lithium-Schwefel-Zellen erreichen lässt. Das entspricht einer Verdopplung gegenüber herkömmlichen Lithium-Ionen-Zellen, die maximal  $200 \text{ W h kg}^{-1}$  aufweisen. Darüber hinaus führt die Substitution von herkömmlichen Kathoden und damit von kostenintensiven Übergangsmetallen wie Kobalt und Nickel mit Schwefelkathoden potentiell zu erheblichen Kosteneinsparungen.

Bisherige Lithium-Schwefel-Zellen haben aber einen entscheidenden Nachteil: Die geringe Lebensdauer von lediglich wenigen 100 Zyklen. Zudem müssen Materialien entwickelt werden, welche die theoretische Leistungsfähigkeit dieses Batterietyps möglichst gut ausschöpfen können. Die Herausforderungen aktueller Forschungen liegen in der Entwicklung angepasster Elektroden- und Elektrolytmaterialien und in der Kontrolle über die komplexen elektrochemischen Prozesse, die beim Zyklieren der Batterie auftreten.

Die wichtigsten Punkte sind dabei:

- Kontaktierung, Stabilisierung und Erhöhung der Nutzbarkeit des Schwefels als nichtleitendes Aktivmaterial
- Stabilisierung der Lithium-Metall-Anode oder Ersatz durch alternative Anoden
- Verhinderung der Migration von Polysulfid-Spezies und deren Nebenreaktionen auf Anodenseite (Shuttle-Mechanismus)

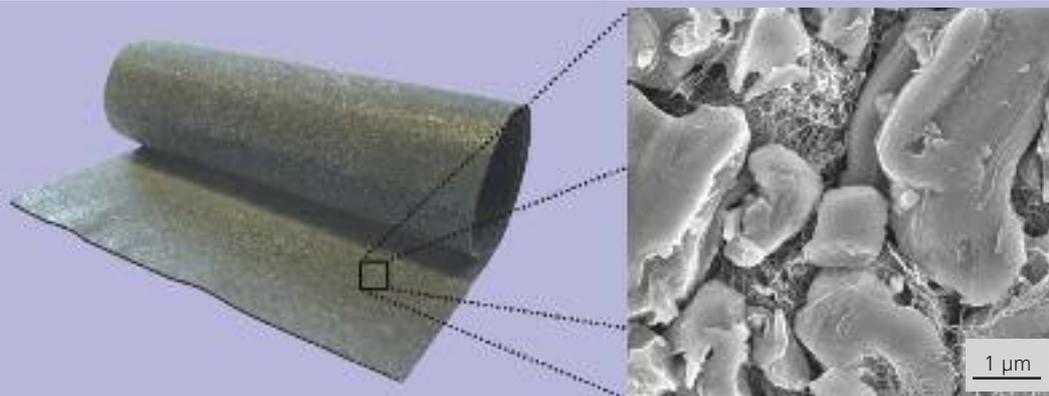
## UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer IWS werden Lösungen für die genannten Herausforderungen im Zusammenspiel von Kathodenmaterialien, Elektrolyten und Anodenmaterialien erforscht. Auf Kathodenseite werden neben Elektroden aus vertikal orientierten Kohlenstoffnanoröhren, in enger Zusammenarbeit mit der TU Dresden, auch poröse Kohlenstoffe als leitfähige Matrix für den Schwefel entwickelt. Durch die Infiltration der Schwefelschmelze in die Kohlenstoffmaterialien mit Porendurchmessern im Nanometerbereich entstehen neuartige Nanokomposite.

Für die Weiterverarbeitung dieser Materialien ist ein eigenes, lösungsmittelfreies Elektroden-Herstellungsverfahren entwickelt worden. Die Ausgangsmaterialien werden dazu in Pulverform mit einem Binder gemahlen und dann zu freistehenden Filmen verpresst. Diese lassen sich auf metallische Stromkollektoren laminieren oder durch den Zusatz hochleitfähiger Kohlenstoffe auch ohne zusätzlichen Stromkollektor betreiben. Gegenüber herkömmlichen, lösungsmittelbasierten Beschichtungsverfahren zur Elektrodenherstellung können durch die trockene Verarbeitung negative Einflüsse vom Lösungsmittel bzw. dem Trocknungsprozess auf das Aktivmaterial ausgeschlossen werden. Für eine spätere Produktion bietet das Verfahren somit durch den Verzicht auf Lösungsmittel und auf den aufwendigen Trocknungs- und Aufbereitungsprozess zudem deutliche Kostenvorteile.

Entscheidend ist aber die verbesserte Leistungsfähigkeit der resultierenden Elektroden.

2



Im Rahmen des Projektes MaLiSu (FKZ: 01MX12009A) wird der Einfluss von Porengeometrie und Oberflächenfunktionalitäten der Kohlenstoffe auf die Performance in der Lithium-Schwefel-Zelle untersucht. Optimierte Materialien werden dann für die Herstellung von Demonstratorzellen bereitgestellt.

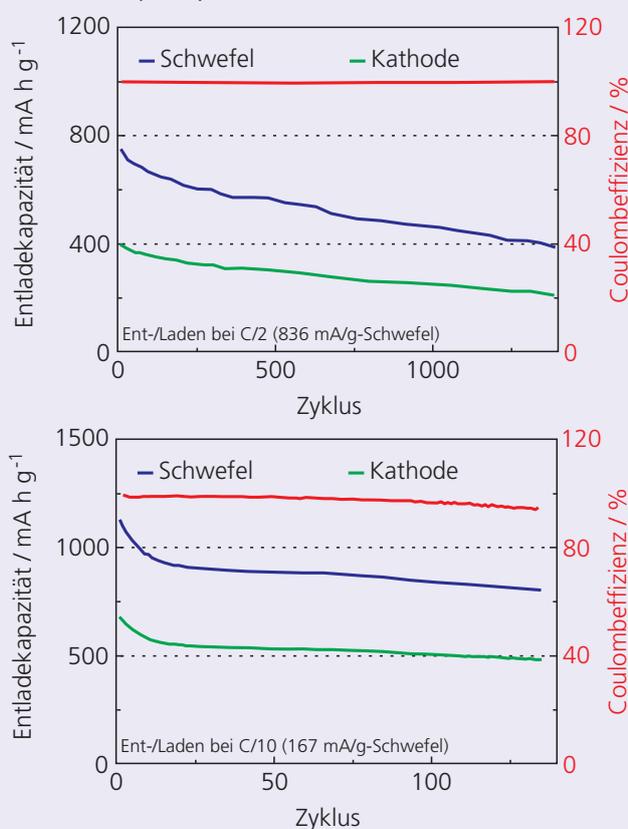
## ERGEBNISSE

Erste Ergebnisse elektrochemischer Untersuchungen an freistehenden Nanokompositkathoden zeigen das enorme Potenzial dieser Methode. Spezifische Kapazitäten von über  $900 \text{ mA h g}^{-1}$  bezogen auf die Masse des eingesetzten Schwefels über 80 Zyklen werden erreicht, ein Vielfaches gegenüber herkömmlichen Kathoden, wie sie in Lithium-Ionen-Zellen eingesetzt werden. Ersetzt man weiterhin die Lithium-Metall-Anode durch lithiierte Silizium-Anoden kann die Langzeitstabilität noch einmal drastisch erhöht werden.

Erstmalig konnte so gezeigt werden, dass eine reversible Kapazität über 1400 Entlade-/Ladezyklen mit einer Coulomb-effizienz von nahezu 100 % und mit einem Kapazitätsverlust von lediglich 0,08 % pro Zyklus erreichbar sind. Diese herausragenden Ergebnisse sind ein deutlicher Hinweis, dass Lithium-Schwefel-Zellen nicht nur hinsichtlich Ihrer Kapazität gegenüber herkömmlichen Lithium-Ionen-Zellen deutlich überlegen sind, sondern dass auch vergleichbare Zyklenstabilitäten erreicht werden können.

Die Arbeiten am Fraunhofer IWS liefern dabei nicht nur einen Beitrag zur Entwicklung verbesserter Materialien, sondern zeigen auch Wege auf, diese durch kostengünstige Verfahren zu verarbeiten. In zukünftigen Arbeiten sollen diese Ansätze weiterentwickelt werden. So wird Anfang 2013 am IWS auf einer Fläche von  $450 \text{ m}^2$  ein Batterie-Entwicklungslabor entstehen und in zusätzlichen Räumen werden Möglichkeiten zur Zellfertigung und zum Test der Zellen gegeben sein.

Kapazitätsmessungen einer Lithium-Schwefel-Zelle mit Silizium/Kohlenstoff-Kompositanode (oben) und mit Lithium-Metallanode (unten)



3

- 1 Schema einer Lithium-Schwefel-Batterie
- 2 Freistehende Elektrode aus porösem Kohlenstoff und Schwefel (Foto und REM-Aufnahme)

## KONTAKT

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





# NACHWEISGRENZE VON ULTRABARRIEREMESSUNGEN UM GRÖSSENORDNUNGEN VERBESSERT

## DIE AUFGABE

Die Gasdurchlässigkeit sogenannter Verkapselungsmaterialien bestimmt entscheidend die Qualität hochwertiger technischer Produkte, wie z. B. organischer Solarzellen, Vakuumisoliationspaneele, Lithium-Ionen-Akkumulatoren und e-Reader. Besonders der allgegenwärtige Wasserdampf wirkt sich nachteilig auf die Haltbarkeit dieser Produkte aus, so dass hierfür Wasserdampfdurchlässigkeiten (WDD) von  $10^{-2}$  bis  $10^{-5} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  gefordert werden. Die derzeit höchsten Anforderungen an die Barriereigenschaften stellen jedoch elektronische und optoelektronische Bauteile wie OLED-Beleuchtungselemente und OLED-Displays mit einer Wasserdampfdurchlässigkeit von höchstens  $10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Neben der Entwicklung flexibler und transparenter Ultrabarrierematerialien auf Grundlage beschichteter Massenkunststoffe wie PE, PET oder PP ist die zuverlässige Bestimmung dieser extrem geringen Wasserdampfdurchlässigkeiten eine gewaltige Herausforderung, die neuer Lösungswege und neuer Messkonzepte bedarf.

## UNSERE LÖSUNG

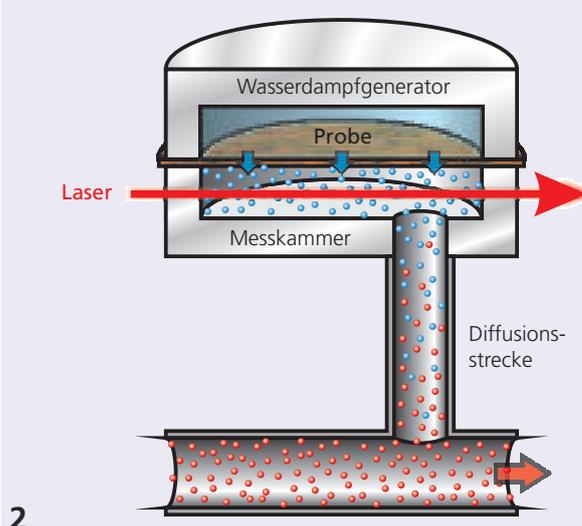
Zur Bestimmung geringster Wasserdampfdurchlässigkeiten wurde am IWS das Permeationsmesssystem HiBarSens<sup>®</sup> entwickelt. Es basiert auf einer hochempfindlichen Laserdiodenspektroskopischen Konzentrationsmessung. Bei Verwendung der Trägergasströmungsmethode, bei der der Permeationsstrom kontinuierlich durch einen Spülgasstrom abtransportiert wird, ermöglicht das HiBarSens<sup>®</sup>-Messsystem aufgrund seiner geringen Nachweisgrenze Messungen der Wasserdampfdurchlässigkeit von Ultrabarrieren bis in den Bereich von  $9 \times 10^{-5} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Eine weitere deutliche Senkung dieser Nachweisgrenze bis in den Bereich von  $10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  wird durch Anwendung eines neu entwickelten

Messverfahrens möglich. Hierbei wird der Permeat statt durch einen Trägergasstrom allein durch Diffusion in der Gasphase abtransportiert.

Dieser diffusionskontrollierte Abtransportstrom ist deutlich geringer, als der durch einen Trägergasstrom realisierbare und kann anhand des 1. Fick'schen Gesetzes beschrieben werden. In Folge dessen ist eine bestimmte Wasserdampfdurchlässigkeit mit einem diffusionskontrollierten Permeatenabtransport bei einer viel höheren Konzentration messbar. Zudem können in einem bestimmten Konzentrationsmessbereich wesentlich geringere Wasserdampfdurchlässigkeiten bestimmt werden.

Voraussetzung für das Messverfahren ist die Verwendung eines Sensors, der die Permeatenkonzentration nicht durch Probenahme oder Verbrauch beeinflusst. Gegenüber akkumulativen Verfahren stellt sich bei diesem Messverfahren ein

Messkammer des Permeationsmesssystems





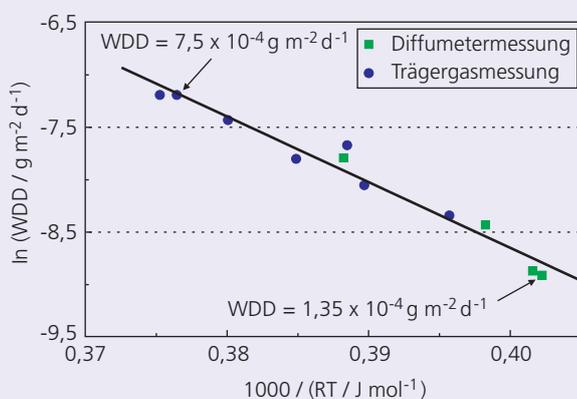
stabiler Wasserdampfpartialdruck auf der Permeatenseite ein, sodass die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit mit Gassensoren nicht zu einer adsorptionsbedingten Unterbestimmung führt.

## ERGEBNISSE

Das diffusionsbasierte Messverfahren (»Diffumeter«) wurde in das HiBarSens®-Permeationsmesssystem integriert und gegenüber der »state of the art« Trägergasmethode bei verschiedenen Temperaturen evaluiert. Die Messpunkte des Diffumeters zeigen im Arrheniusgraphen eine lineare Abhängigkeit und korrelieren somit hervorragend mit den Ergebnissen der Trägergasmessung. Über die gezeigten Messergebnisse hinaus, ist der Anwender mit Hilfe der entwickelten Permeationsmessmethode in der Lage, geringste Wasserdampfdurchlässigkeiten bis  $1 \times 10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sicher zu bestimmen.

Das Diffumeterkonzept entkoppelt die Nachweisgrenze der Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von der unteren Nachweisgrenze des verwendeten Sensors. Dieses hochempfindliche Messverfahren lässt sich auch einfach auf die Durchlässigkeitsprüfung weiterer Permeaten bzw. allgemein zur Leckprüfung übertragen.

Arrheniusgraph der Wasserdampfdurchlässigkeit einer Barrierefolie bei 38 °C, 90 %r.F.



4

- 1 Messkammer des Permeationsmesssystems
- 3 Feuchte im Wasserdampf-generator

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Harald Beese  
 Telefon: +49 351 83391-3356  
[harald.beese@iws.fraunhofer.de](mailto:harald.beese@iws.fraunhofer.de)





# GRÖSSENBESTIMMUNG VON NANOPARTIKELN DIREKT IM HERSTELLUNGSPROZESS

## DIE AUFGABE

Für hocheffiziente Lithium-Ionen-Energiespeicher ist der Zuschlag nanoskaligen Siliziums zum Elektrodenmaterial äußerst vielversprechend, denn im Vergleich zu Graphit kann die Kapazität der Energiespeicher dadurch um bis zu Faktor drei gesteigert werden. Diese und andere Anwendungen sind jedoch maßgeblich von der großtechnischen Verfügbarkeit und somit von sicher funktionierenden Produktionsprozessen abhängig.

Bei der Herstellung sind zwei »trockene« Verfahren von technischer Bedeutung: die Gleichstrombogen-Verdampfung und das induktiv gekoppelte Plasma-Verfahren (Inductively Coupled Plasma, ICP). Bei beiden werden mikroskalige Rohmaterialien in eine Plasmazone eingedüst und verdampft. Durch schnelle Abkühlung des Dampfes, z. B. mittels Zuführen eines kalten Gases, kondensiert das Material nanoskalig, da die schnelle Erstarrung ein ungebremstes Anwachsen verhindert. Derart können Partikel mit ca. 20 bis 200 nm Durchmesser generiert werden.

Neben dem Material entscheidet die Partikelgröße signifikant über die Funktionalität. Bei oft mehreren Stunden Prozessierungsdauer birgt eine nur nachgelagerte Kontrolle die Gefahr des Verwerfens der gesamten Charge. Nur eine direkte Überwachung der Partikelgröße eröffnet die Möglichkeit, prozesssteuernd einzugreifen bzw. das bereits erzeugte Material vor Kontamination mit unerwünschten Partikelgrößen durch rechtzeitiges Abtrennen zu sichern.

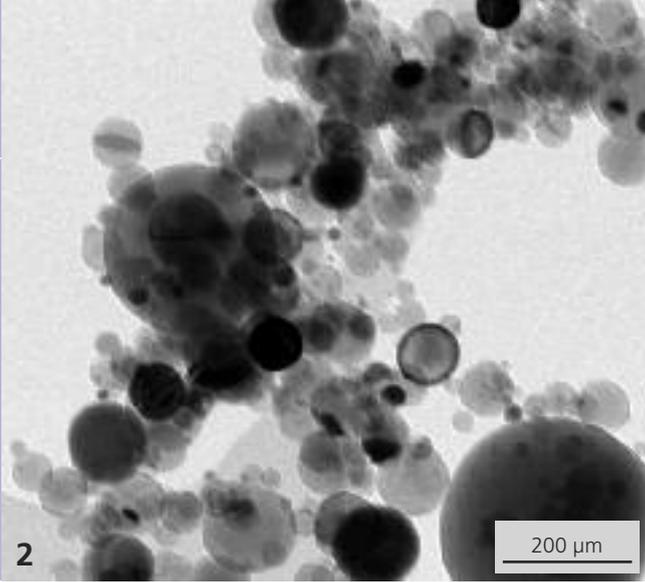
Bei »trockener« Herstellung im Unterdruck und deshalb wesentlich geringeren Konzentrationen als bei Flüssigphasenprozessen sowie bei der Messung in-situ, d.h. direkt im Herstellungsprozess, stößt die Partikelcharakterisierung  $< 1 \mu\text{m}$

derzeit an ihre messtechnischen Grenzen. Während Labormesssysteme für suspendierte Partikel bis hinunter in den einstelligen Nanometerbereich belastbare Ergebnisse erzielen, sind für gasgetragene Nanopartikel keine prozessstauglichen Geräte verfügbar.

## UNSERE LÖSUNG

Die Erfordernis eines in-situ-Messverfahrens ergab sich bei der industriellen ICP-Generierung von Nano-Silizium. Zur Überwachung der Partikelgröße fand das Mehrwellenlängen-Extinktionsverfahren Anwendung. Ausgenutzt wird der physikalische Effekt der Lichtschwächung durch Absorption und Streuung beim Durchgang durch ein Partikelkollektiv. Dieser Effekt ist nicht nur wellenlängen- und konzentrationsabhängig, sondern ebenso eine Funktion des Partikelradius und lässt sich nach Lambert-Beer beschreiben.

Durch die Verwendung von drei sich überlagernden Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlängen lassen sich im Gleichungssystem die Variablen Konzentration  $c$  und Wechselwirkungsstrecke  $L$  eliminieren. Die größen-, wellenlängen- und brechungsindexabhängige Extinktionsfunktion  $Q_{\text{ext}}$  ist berechenbar. So stehen theoretisch berechnete maßgeblich durch die Partikelgröße bestimmte Extinktionskurven den als Messpunkte vorliegenden Abschwächungen  $I/I_0$  gegenüber.



2



3

Für die prozesstaugliche Größenbestimmung von Siliziumpartikeln wurde ein extinktionsspektroskopisches Messsystem konzipiert. Kernstück sind Laserdioden der Wellenlängen 405 nm, 532 nm und 635 nm gekoppelt mit einem integrierten Referenzdetektor. Durch geschickte zeitliche Abfolge wird jeweils nur die Schwächung einer Wellenlänge ermittelt sowie in einem Dunkelzyklus der Einfluss des Umgebungslichtes eliminiert. Bei partikelhaltigen Atmosphären ist die Gewährleistung einer gleichbleibenden Durchlässigkeit des optischen Zugangs zum Prozess zwangsläufige Anforderung. Deshalb wurden unter Berücksichtigung der Druck- und Flussverhältnisse im zu monitorierenden ICP-Prozess innenspülbare Fensterflansche entwickelt, die einen weitestgehend ablagerungsfreien optischen Zugriff auf die Nanopartikel gewährleisten (Abb. 3).

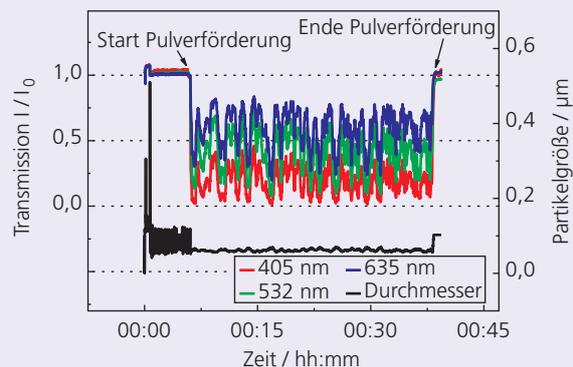
## ERGEBNISSE

Das konzipierte Messsystem wurde mit den entwickelten Fensterflanschen auf Basis standardisierter Schnittstellen in eine industrielle ICP-Anlage zur Herstellung oxidfreier Materialien integriert. Der Einbau der Messstrecke erfolgte nach der Vorabscheidung nicht prozessierter bzw. agglomerierter Partikel und vor dem Auffangbehälter für die generierten Silizium-Nanopartikel. Nachdem zunächst Ereignisse wie die Lecktest-Routine mit Druckstößen zu einer starken Partikelanlagerung auf den Fenstern führten, konnte durch Anpassen des Spülregimes der Fensterflansche ein langzeitstabiler, ablagerungsfreier optischer Zugang gewährleistet werden.

In der Generierungsphase mit Plasmaleistungen von ca. 50 kW und Rohpartikelförderraten bis zu  $8 \text{ g min}^{-1}$  wurde ein stabiles Monitoring des Partikeldurchmessers realisiert. Neben dem Partikeldurchmesser wurde die Nanopartikelkonzentration und damit ein Indikator für die Rohpartikelförderrate im Sekundentakt bestimmt (Abb. 4). Die Verifizierung der Messergebnisse erfolgte nachgelagert mit Transmissionselektronenmikroskopie (Abb. 2).

Mit der Extinktionsspektroskopie konnte erstmals ein langzeitstabiles Messverfahren für die in-situ-Charakterisierung der Partikelgröße im Herstellungsprozess erfolgreich evaluiert werden. Es ist wegen der flexibel einstellbaren Messlänge für die prozessintegrierte Charakterisierung sowohl für partikelarme als auch für dichte Atmosphären und die Anwendung bei Suspensionen geeignet. Partikelgrößen bis hinunter in den Bereich von ca. 30 nm lassen sich damit detektieren.

Zeitlicher Verlauf der Transmission der drei Wellenlängen und die daraus berechnete Silizium-Partikelgröße



4

- 1 Mehrwellenlängen-Extinktionsspektrometer (Ausschnitt des optischen Aufbaus)
- 2 TEM-Aufnahme ICP-generierter nanoskaliger Siliziumpartikel
- 3 Innenspülbarer Fensterflansch mit Standardschnittstelle zur Extinktionsspektroskopie

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Thomas Kuntze  
 Telefon: +49 351 83391-3227  
 thomas.kuntze@iws.fraunhofer.de





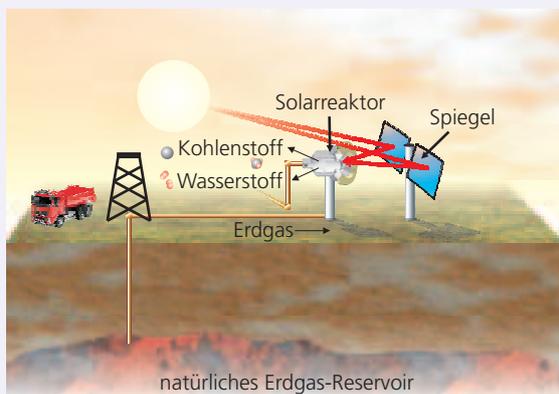
# HOCHLEISTUNGS-SOLARSIMULATOR FÜR SOLARCHEMISCHE REAKTOREN

## DIE AUFGABE

Die Solarthermie wird weltweit als Zukunftstechnologie mit breitgefächertem Anwendungspotenzial eingeordnet. Konzentrierende Systeme zur Fokussierung der Solarstrahlung (CSP) nutzen gebündelte Sonnenenergie als Energiequelle für die Elektroenergieerzeugung oder das Beheizen von chemischen Reaktoren. Neben der Elektroenergieerzeugung werden CSP-Anlagen in zunehmendem Maße auch zum CO<sub>2</sub>-neutralen Erzeugen von chemischen Grundstoffen eingesetzt.

Die solarthermische Wasserstoffgewinnung aus Methan stellt eine Brückentechnologie zwischen der derzeitigen konventionellen kohlenwasserstoffbasierten Energiegewinnung und einer nicht auf fossilen Brennstoffen beruhenden Energiegewinnung dar. Dabei bestimmt der im Prozess entstehende Ruß die Ökonomie des Verfahrens wesentlich mit. Aufgabe des Fraunhofer IWS Dresden ist deshalb, solarthermische Reaktoren für eine effiziente Wasserstoff- und Rußerzeugung zu entwickeln.

*Schematische Darstellung der solarthermischen Erdgaspyrolyse*



2

## UNSERE LÖSUNG

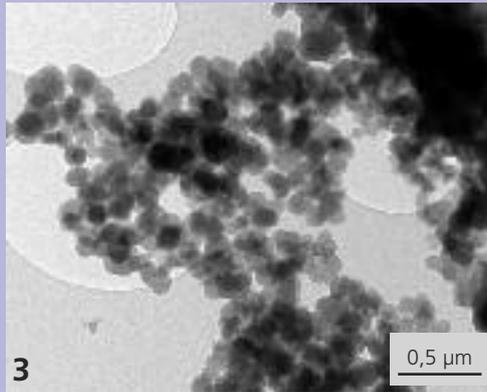
Zur realitätsnahen und wetterunabhängigen Simulation der Verhältnisse an hochkonzentrierenden Solaranlagen (Turmkraftwerke oder Solar-Dish-Systeme) wurde am Fraunhofer IWS ein Hochleistungssolarsimulator aufgebaut (Abb. 1). Diese Testplattform bietet umfassende Möglichkeiten für die berührungslose, sehr schnelle Erzeugung von sehr hohen Temperaturen auf Querschnittflächen bis 200 cm<sup>2</sup>. Infolge dieser Eigenschaften eignet sich der Solarsimulator hervorragend für die Evaluierung von:

- solarthermochemischen Reaktoren
- Test der Wärme oder Strahlungsresistenz von Hochtemperaturmaterialien
- Test der Temperaturwechselbeständigkeit von Keramiken

Die Anlage zeichnet sich durch folgende Leistungsdaten aus:

- 10 Hochdruck-Xe-Kurzbogenlampen mit jeweils 15 kW elektrischer Leistung, umgeben von einem elliptischen Reflektor (Durchmesser 1 m), welcher die Lampenstrahlung auf einen 3 m entfernten Brennpunkt fokussiert
- individuelle Lampenjustage mittels Stellantrieben
- separate Einzelstromquellen zur Leistungssteuerung
- 80 m<sup>2</sup> klimatisierte Laborfläche für reproduzierbare Umgebungsbedingungen
- IR- und TV-Kameras sowie spezielle Pyrometer für Temperaturmessungen
- Daten-Log-System für alle Prozessdaten
- MFC-gesteuerte Gasdosierung für alle Prozessgase

Für die pyrolytische Wasserstoffherzeugung wurde ein Hochtemperatur-Solarumformer entwickelt. Der Reaktor besteht aus einem gekühlten, konisch geformten Reaktorkopf



und einem sich anschließenden Hochtemperaturkeramikkörper. Die konzentrierte Solarstrahlung wird über ein gasgespültes Quarzfenster in den Reaktor geleitet und heizt ihn auf.

Aufgrund einer sogenannten Hohlresonatorgeometrie sind die Rückstrahlungsverluste durch das Einkoppelfenster sehr gering. Dadurch können im Inneren des Reaktors Temperaturen bis 1300 °C erreicht werden. Als wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung des Solar-Reaktors wurde die Unterdrückung von Kohlenstoffablagerungen auf den Reaktorwänden identifiziert. Diese können insbesondere an heißen Oberflächen entstehen, wenn der produzierte Kohlenstoff nicht schnell genug aus dem Reaktor abtransportiert wird. Bei dem vom IWS entwickelten Reaktorkonzept werden Kohlenstoffablagerungen im Reaktor durch eine entsprechende Wandspülung wirkungsvoll unterdrückt.

## ERGEBNISSE

In der Brennebene des Hochleistungs-Solarsimulators kann eine optische Strahlungsleistung von mehr als 50 kW erzeugt werden. Dies entspricht einer maximalen Leistungsdichte von über 10 MW m<sup>-2</sup> bzw. einer maximalen Konzentration gegenüber der normalen Sonnenstrahlung um den Faktor 11000. Auf einer Apertur von 15 cm Durchmesser stehen noch ca. 40 kW an optischer Leistung zur Verfügung. Mit diesen Leistungsdichten können Temperaturen bis 3000 °C bzw. Aufheizraten von 1000 K s<sup>-1</sup> erreicht werden.

Für die solare Wasserstoffherzeugung wurden mehrere thermochemische Solarreaktoren getestet. Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt:

- hoher Methanumsatz (nachgewiesen mittels FTIR-Spektroskopie)
- Wasserstoffausbeute 80 % (Nebenprodukte: Ethylen, Acetylen)
- Rußpartikelgrößen zwischen  $\approx 50$  nm und  $\approx 150$  nm (amorph) (Abb. 3)
- Partikelreinheit 99,7 %

- 1 Hochleistungssolarsimulator am Fraunhofer IWS Dresden
- 3 Thermochemisch aus Methan erzeugte Rußpartikel

## KONTAKT

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



# CVD-BASIERTE HERSTELLUNG VON DIAMANT FÜR OPTISCHE UND ELEKTRONISCHE ANWENDUNGEN

## DIE AUFGABE

Einkristalliner Diamant verfügt über eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit ( $\approx 2000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) und gleichzeitig eine über einen weiten Wellenlängenbereich sehr geringe Absorption. Aufgrund dieser einzigartigen Kombination physikalischer Eigenschaften ist Diamant von großem Interesse für optische, röntgenoptische und elektronische Anwendungen. So können Diamantkristalle zum Beispiel in Halbleiterlasern mit hoher Leistungsdichte genutzt werden, um möglichst direkt am Ort der Laserstrahlerzeugung die entstehende Verlustwärme abzuführen. Auch im röntgenoptischen Bereich als Monochromatoren mit geringem Verzug bei hohen Leistungsdichten oder direkt als Laserkristall bietet sich Einsatzpotenzial. Zudem sind Diamantkristalle für zukünftige Anwendungen in der Nano- (Spin-) und Hochleistungselektronik stark nachgefragt.

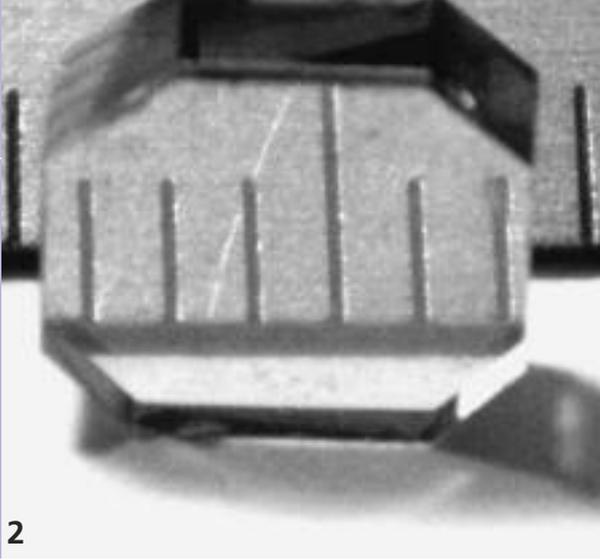
Die für diese Anwendungen erforderlichen einkristallinen Diamantplatten höchster Qualität sind auf dem Markt derzeit nur in begrenzten Mengen verfügbar und maximal  $10 \times 10 \times 0,5 \text{ mm}^3$  groß. Die begrenzte Verfügbarkeit des Materials und der daraus resultierende hohe Preis von ca. 3000 Euro pro Stück behindert die Entwicklung von Produkten und neuen Technologien, die enormen Nutzen aus den Materialeigenschaften von Diamant ziehen könnten oder gar erst durch den Einsatz von Diamant ermöglicht werden. Die kostengünstige Herstellung von großflächigen und hochreinen Diamantkristallen bildet somit die Herausforderung, der sich das Fraunhofer IWS mit seinem Fraunhofer-Center für Coatings and Laser Applications (CCL) in Michigan, USA, stellt.

## UNSERE LÖSUNG

Die Möglichkeit, Diamant synthetisch herzustellen, ist seit langem bekannt. Zwei grundsätzlich unterschiedliche Methoden haben sich etabliert. Zum einen nutzt man einen Prozess, der bei Temperaturen von ca.  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  und einem Druck von ca. 6 GPa den natürlichen Wachstumsvorgang simuliert. Dieser Prozess nutzt große Pressen und ist in der Lage hochqualitative Diamantkristalle herzustellen. Allerdings ergeben sich Limitierung hinsichtlich der effektiv erreichbaren Kristallgröße und Anzahl.

Die zweite, vom Fraunhofer CCL genutzte Methode ist die homoepitaktische chemische Abscheidung von Diamant aus der Dampfphase oder die sogenannte Diamant-CVD (chemical vapor deposition). In diesem Fall wird Diamant mit vergleichsweise hohen Abscheideraten von einigen  $10 \mu\text{m h}^{-1}$  mit einer Mikrowellenplasmaquelle auf bereits hergestellten Diamantsubstraten abgeschieden. Dieser Prozess benötigt relativ simple Vakuumbedingungen ( $\approx 7 - 40 \text{ kPa}$ ) sowie Wasserstoff ( $\approx 90 - 99 \%$ ) und Methan ( $\approx 1 - 10 \%$ ). Die Abscheidetemperaturen liegen im Bereich von  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Theoretisch könnte auf diese Weise qualitativ hochwertiger Diamant auf Flächen bis zu 300 mm Durchmesser abgeschieden werden. Die dafür notwendigen großflächigen einkristallinen Substratkristalle sind derzeit jedoch nur mit Flächen von etwa 1 bis  $100 \text{ mm}^2$  verfügbar. Schon heute ist es allerdings möglich, viele kleine Kristalle gleichzeitig in einem Prozess zu züchten (Abb. 1).



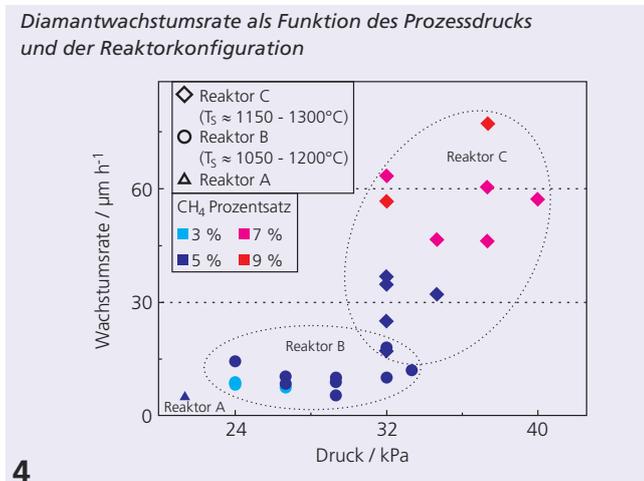
## ERGEBNISSE

Um Diamantplatten und kundenspezifische Produkte zu günstigen Preisen und in größeren Stückzahlen zu fertigen, wurde am Fraunhofer CCL eine Prozesskette installiert, die das effektive Wachstum sowie die kundenspezifische Weiterverarbeitung von hochqualitativen Diamantkristallen erlaubt. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der eingesetzten Reaktoren konnte die Wachstumsrate der Diamanten erheblich gesteigert werden (Abb. 4).

Die Qualitätsanforderungen an die hergestellten Diamanten werden von der Anwendung bestimmt. Neben mikro- und makroskopischen Wachstumsdefekten kann die Anwendbarkeit von CVD-Diamantkristallen auch durch Kristallgitterdefekte, räumlich begrenzte Wachstumssektoren und unkontrollierten Fremdatomeinbau limitiert werden. Akzeptable Fremdatomkonzentrationen pro Kohlenstoffatom liegen bei nicht dotierten (intrinsischen) Diamanten bei  $< 5 \times 10^{-9}$  Stickstoffatomen für elektronische Anwendungen. Im Gegensatz dazu sind für optische Anwendungen oft schon  $10^{-6}$  und für thermische und mechanische Anwendungen  $10^{-3}$  Stickstoffatome pro Kohlenstoffatom ausreichend.

Abb. 2 zeigt eine Diamantplatte optischer Qualität. Diese Platte kann bei entsprechender Dicke in optischen Komponenten weiterverarbeitet werden. Am Fraunhofer CCL kommen Prozessschritte wie Plasmaätzen, Laserschneiden und Polieren zur Anwendung, um spezifische Kristallformen zu erzeugen (Abb. 3). Mittels Laserschneiden können selbst Kristalle in Juwelenform hergestellt werden.

Die weitere Forschungsarbeit fokussiert auf die weitere Verbesserung der Reaktor- und Prozesstechnologien, um die Herstellung dieser Kristalle kostengünstiger zu machen oder mit anderen Worten höhere Abscheideraten und Ausbeuten bei gleichzeitig hoher Kristallqualität zu erzielen.



- 1 Gleichzeitige Herstellung von 70 Diamantkristallen im CVD-Prozess
- 2 Mittels CVD abgeschiedene Diamantplatte für vielfältige Anwendungen
- 3 Nach Kundenwunsch gefertigte und endbearbeitete Diamantkristalle für optische Anwendungen

## KONTAKT

Dr. Thomas Schülke  
 Telefon: +1517 432 8173  
 tschuelke@fraunhofer.org



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. ANDREAS LESON



»Es ist nicht genug zu wissen - man muss auch anwenden.  
Es ist nicht genug zu wollen - man muss auch tun.«

Johann Wolfgang von Goethe



## GESCHÄFTSFELD PVD-VAKUUM-SCHICHTTECHNOLOGIE

**Redaktion:** Die Nachfrage nach Forschungsleistungen in dem Geschäftsfeld PVD-Vakuum-Schichttechnik ist im Jahr 2012 erneut stark angestiegen, das Projektvolumen ist deutlich gewachsen. Was sind die aktuellen Forschungsschwerpunkte, die dieses starke Interesse hervorrufen?

**Prof. Leson:** Ein wachsendes Gebiet, auf dem wir schon seit vielen Jahren aktiv sind, ist beispielsweise das Thema EUV-Optiken. Diese stellen zentrale Schlüsselkomponenten für die nächste Generation von Lithographie-Geräten dar, die mit einer extrem kleinen Wellenlänge von 13,5 Nanometern arbeitet, und mit der sich deutlich kleinere Strukturen in Mikrochips erzeugen lassen, als dies mit herkömmlichen Lithographie-Geräten möglich ist. Da die Markteinführung der EUV-Lithographie in Kürze bevorsteht, gibt es einen großen Bedarf an Verbesserungen und einer technologischen Optimierung der Optiken. Zudem arbeiten wir seit Mitte des Jahres 2012 gemeinsam mit Carl Zeiss sowie anderen Firmen und Forschungseinrichtungen in einem BMBF-Projekt an einer neuen Generation von Optiken, die eine nochmals verbesserte Auflösung von mindestens 14 Nanometer erlauben sollen. Besonders gefreut hat uns zudem, dass im vergangenen Jahr Herr Dr. Braun stellvertretend für unsere Arbeiten auf diesem Gebiet mit dem Joseph-von-Fraunhofer-Preis ausgezeichnet wurde.

**Redaktion:** Multischichten sind ja nicht nur für Optiken im kurzweiligen Bereich interessant, sondern auch für andere Einsatzzwecke. Können Sie uns hier weitere Anwendungsgebiete nennen?

**Prof. Leson:** In der Tat setzen wir unsere Kompetenzen bei der Multischichtabscheidung auch für andere Anwendungen ein. So stellen wir sogenannte Reaktivmultischichten her, die

aus einer Vielzahl nanoskaliger Einzelschichten bestehen und als definierte Wärmequelle fungieren. Die Vorteile, die sich beim Einsatz dieser Reaktivmultischichten beim Fügen ergeben, liegen in der äußerst geringen Temperaturbelastung der Bauteile sowie in der Möglichkeit, völlig unterschiedliche Materialien zu fügen. Zudem weisen die Fügestellen aufgrund des metallischen Charakters exzellente elektrische Eigenschaften auf. All diese vorteilhaften Eigenschaften haben zu großem Interesse und entsprechenden Kundennachfragen geführt, die wir konsequent bearbeiten. Damit erschließen wir das breite Einsatzspektrum für dieses neue Fügeverfahren.

**Redaktion:** Ein besonders starkes Wachstum für das Jahr 2012 kann die Gruppe verzeichnen, die sich in Ihrer Abteilung mit Kohlenstoffschichten befasst. Das Thema ist ja nicht neu. Worin liegen die Gründe für das ungebrochene Interesse und die hohe Nachfrage?

**Prof. Leson:** Das lässt sich direkt aus den herausragenden Eigenschaften der Kohlenstoffschichten ableiten. Vor allem die wasserstofffreien Kohlenstoffschichten, auf die wir uns spezialisiert haben, weisen eine extreme Verschleißbeständigkeit auf. Zudem erreichen sie, insbesondere in Kombination mit angepassten Schmierstoffen, teilweise extrem niedrige Reibwerte. Diese Kombination ist vor allem für die Automobilindustrie interessant, da sich damit die Energieeffizienz steigern und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß minimieren lässt. Die Einsatzmöglichkeiten gehen aber deutlich darüber hinaus. Praktisch überall, wo Reibung und damit Verschleiß auftritt, lassen sich diese Schichten einsetzen. Ich bin mir daher sicher, dass wir auch in den nächsten Jahren eine starke Nachfrage nach diesen Schichten wie auch der dazugehörigen System- und Anlagentechnik erleben 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 bieten wir langjährige Erfahrungen auf den Gebieten der Charakterisierung und Modellierung von Nanometerschichten an.

## NANOTUBES UND -PARTIKEL

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

## KOHLLENSTOFFSCHICHTEN

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

## PVD-SCHICHTEN

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

**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**

**NANOTUBES UND -PARTIKEL**

**PROF. ANDREAS LESON**

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



**GRUPPENLEITER**

**KOHLENSTOFFSCHICHTEN**

**DR. VOLKER WEIHNACHT**

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



**GRUPPENLEITER**

**PVD-SCHICHTEN**

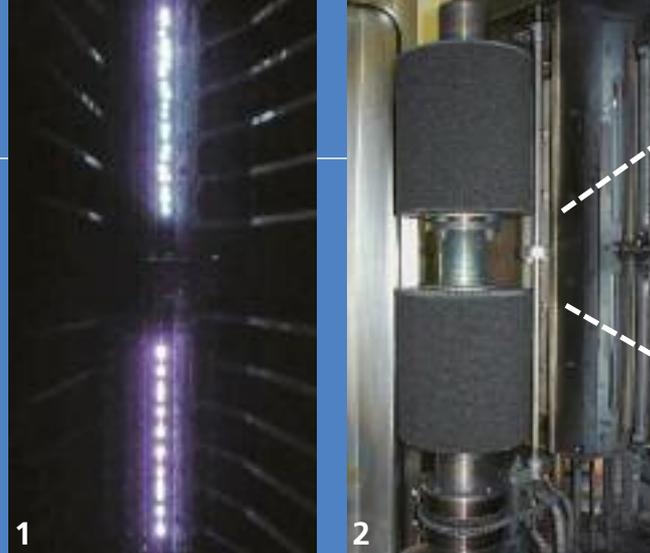
**DR. OTMAR ZIMMER**

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



## BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2012

1. Industrialisierung der Laser-Arc-Technologie zur Schichtabscheidung 40
2. EUV-Reflexionsschichten für Lithografiespiegel der Zukunft 42
3. Nanometer-Reaktivmultischichten zum präzisen und temperaturschonenden Fügen 44
4. Transparente Metallschichten mit hoher elektrischer Leitfähigkeit 46
5. Zerstörungsfreie Schicht- und Oberflächenanalyse mittels LAwave® 48
6. Integration von Carbon-Nanotubes in Silikone zur Herstellung elastomerer Aktoren 50
7. Hochflexible elektrische Leiter für elektronische, aktorische und sensorische Anwendungen 52



## INDUSTRIALISIERUNG DER LASER-ARC-TECHNOLOGIE ZUR SCHICHTABSCHIEDUNG

### DIE AUFGABE

Durch die einzigartige Kombination von niedriger Reibung und hoher Verschleißfestigkeit erlangen die diamantartigen Kohlenstoffschichten (DLC-Schichten) eine stetig wachsende Bedeutung zur Leistungssteigerung von Werkzeugen, Komponenten und Bauteilen. Unter der Vielfalt verschiedener DLC-Schichttypen gewinnt besonders die neue Generation der so genannten tetraedrisch amorphen Kohlenstoffschichten (ta-C) zunehmend an Bedeutung. Die ta-C-Schichten bestehen zu 100 % aus Kohlenstoff und besitzen eine um den Faktor 2 bis 3 höhere Härte als die klassischen, wasserstoffhaltigen DLC-Schichten. Somit eröffnen sich neue Möglichkeiten für eine lebensdauerbeständige Beschichtung von Oberflächen selbst unter extremen Verschleißbedingungen.

Im Gegensatz zu den klassischen DLC-Schichten die aus Kohlenwasserstoffgasen gewonnen werden, stellt die Abscheidung von ta-C-Schichten die Beschichter vor völlig neue Herausforderungen, denn die Abscheidung von ta-C gelingt nur über PVD-Verfahren aus festem Grafit. Das momentan einzige Verfahren zur wirtschaftlichen ta-C-Abscheidung ist das Arc-Verfahren. Die Umsetzung dieser Technologie in einem industriellen Serienprozess ist ein Schwerpunkt aktueller Forschungsarbeiten am Institut.

### UNSERE LÖSUNG

Die bekannten Schwierigkeiten klassischer Arc-Prozesse bei der ta-C-Herstellung wurden am IWS Dresden durch Einführung des lasergesteuerten Vakuumbogens überwunden. Dabei wird eine gepulste Vakuumbogenentladung jeweils durch einen kurzen Laserpuls an einer definierten Stelle des Kathodenzylinders aus Grafit gezündet und somit ein Plasma

aus durchweg ionisierten hochenergetischen Kohlenstoffteilchen erzeugt. Durch Überlagerung der linearen Verschiebung des Laserfokus mit der Kathodenrotation wird sowohl eine homogene Beschichtung über die gesamte Höhe als auch ein gleichmäßiger Abtrag des Grafitzylinders ermöglicht.

Basierend auf den an Laser-Arc-Modulen der ersten Generation gewonnenen Erfahrungen erfolgte nun die Entwicklung einer neuen Generation von Laser-Arc-Modulen. Mit der Skalierung auf 500 mm Beschichtungshöhe wurde die Beschichtungsrate auf ein für industrielle Serienbeschichtung wirtschaftliches Niveau gehoben.

Das Modul kann an den in der PVD-Lohnbeschichtung vielfach verwendeten Batch-Coatern in die Beschichtungsanlage integriert werden. So bleiben alle Grundfunktionen der PVD-Anlage (Vakuumerzeugung, Bauteilbewegung, Plasmareinigung, Standardtechnologien zur Hartstoffbeschichtung) weiterhin nutzbar und werden mit der neuen Möglichkeit zur Abscheidung von ta-C-Schichten kombiniert.

Die neue Generation LAM 500 enthält als Zusatzoption zudem einen Plasmafilter zur Abtrennung von Makropartikeln aus dem Beschichtungsplasma. Dies erlaubt die Abscheidung sehr glatter ta-C-Schichten.

### ERGEBNISSE

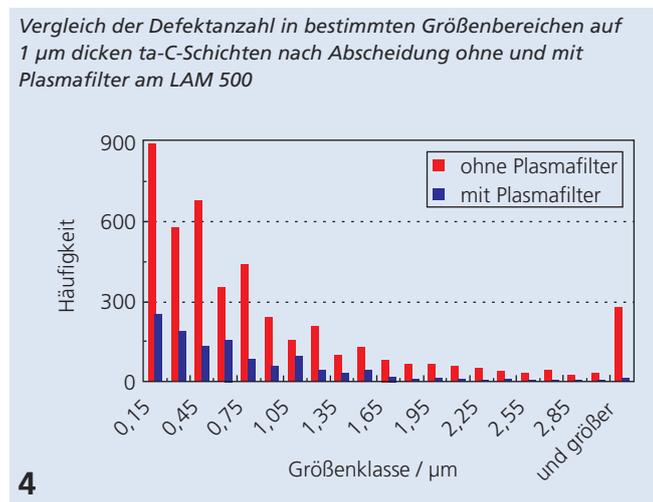
Das Beschichtungsmodul LAM 500 wurde zur intensiven Erprobung zunächst in zwei Beschichtungsanlagen installiert. Das erste System bestand dabei aus einer Variante ohne Plasmafilter zur Hochrateabscheidung, das zweite System wurde mit Plasmafilter zur Abscheidung defektarmer ta-C-Schichten realisiert. Die Erprobung beider Systeme er-



folgte zunächst im Hinblick auf eine dauerstabile Abscheidung sowohl innerhalb eines Prozesses als auch über mehrere Beschichtungszyklen hinweg.

Für das LAM 500-System ohne Filter konnte ein dauerstabiler Betrieb mit hoher Beschichtungsrate demonstriert werden. Eine Beschichtungsrate von 1,0 bis 1,5  $\mu\text{m h}^{-1}$  ermöglicht in einer voll bestückten PVD-Anlage ta-C-Schichten mit höchster Härte. Beschichtungsrate über 2,0  $\mu\text{m h}^{-1}$  sind ebenfalls möglich, bei einer voll bestückten PVD-Anlage jedoch mit etwas geringerer Schichthärte infolge zunehmender Bauteilaufheizung verbunden.

Auch für das LAM 500-System mit Plasmafilter konnte ein dauerstabiler Betrieb der Anlage nachgewiesen werden. Die Filterwirkung hat eine drastische Verbesserung der ta-C-Schichtqualität zur Folge, die Rauheit und Defektdichte sinkt deutlich (Abb. 4). Der absolute Anteil der Defekte an der Gesamtoberfläche wird durch den Plasmafilter um ca. 93 % gesenkt.



Die Transparenz des Filters lag oberhalb von 50 %. Damit kann eine Beschichtungsrate von 1,0  $\mu\text{m h}^{-1}$  bei einer voll bestückten PVD-Anlage erreicht werden.

Das LAM 500-System wurde inzwischen an zwei Industriekunden überführt. Ein System wird zukünftig zur Inhouse-Beschichtung von Komponenten mit dicken ta-C-Schichten eingesetzt. Das zweite System enthält einen Plasmafilter und kommt in der Lohnbeschichtung für hochwertige Werkzeuge und Komponenten zum Einsatz.

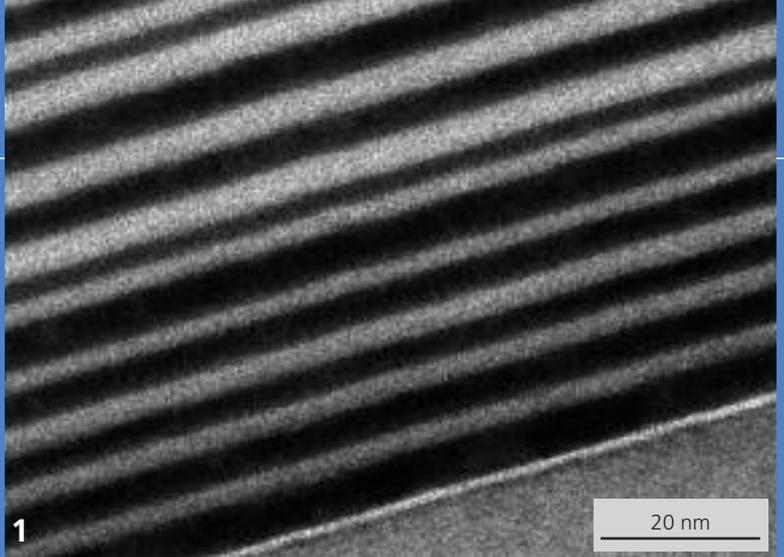
Momentan wird bereits an der nächsten Generation des Laser-Arc-Moduls für die industrielle ta-C-Beschichtung gearbeitet. Dieser Typ ist für eine Beschichtungshöhe von 850 mm vorgesehen und soll ebenfalls mit einem Plasmafilter ausgerüstet werden.

- 1 Plasmaentladung auf den Grafitkathoden
- 2 Grafitzylinder eines LAM 500 nach dem Betrieb
- 3 Gesamtanlage zur ta-C-Beschichtung (PVD-Anlage mit LAM 500 des IWS Dresden)

#### KONTAKT

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





# EUV-REFLEXIONSSCHICHTEN FÜR LITHOGRAFIESPIEGEL DER ZUKUNFT

## DIE AUFGABE

Für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen werden von der Halbleiterindustrie optische Abbildungsverfahren verwendet. Die Auflösungsgrenze und die damit verbundene Feinheit der herstellbaren Strukturen werden durch die für die Belichtung verwendete Wellenlänge und die numerische Apertur des optischen Systems bestimmt. Mit dem Übergang zu EUV-Strahlung mit einer Wellenlänge von 13,5 nm wurde bereits ein wesentlicher Schritt vollzogen, um Strukturen mit Linienbreiten von < 22 nm herstellen zu können.

Eine weitere Verbesserung der Auflösung bis hinab zu Strukturbreiten im Bereich von 14 nm bringt neue Anforderungen an die Spiegel mit sich:

- Erhöhung der numerischen Apertur des optischen Systems
- weitere Verringerung des diffusen Streuuntergrundes

Die Erhöhung der numerischen Apertur hat für einige Spiegel zur Folge, dass die EUV-Strahlung unter einem breit variierenden Einfallswinkelbereich  $\Delta\alpha$  auf die Spiegeloberflächen fällt. Aperiodische Multischichten mit einer höheren Winkelakzeptanz könnten in diesem Fall eine bevorzugte Lösung sein. Eine Verringerung des diffusen Streuuntergrundes erfordert die weitere Reduzierung der Rauheit der Schichten. Der bisherige Stand der Technik, bei dem auf ein ideal glattes Substrat eine Schicht mit erhöhter intrinsischer Rauheit aufgebracht wird, muss verbessert werden. Ein wesentliches Ziel ist es, Beschichtungsverfahren zu entwickeln, bei denen selbstglättende und hochreflektierende EUV-Schichten abgeschieden werden können.

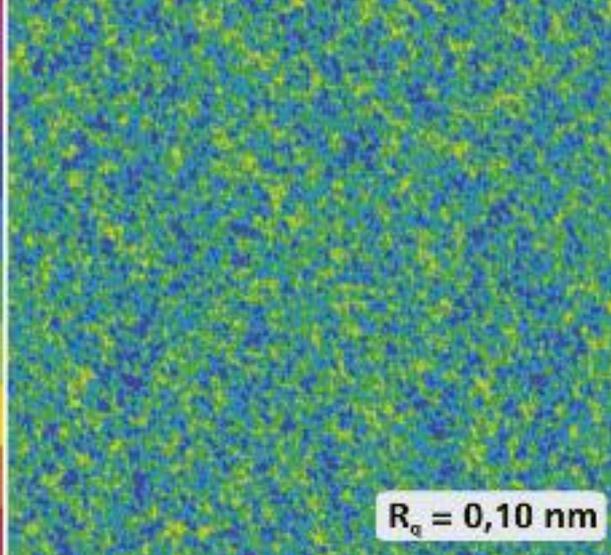
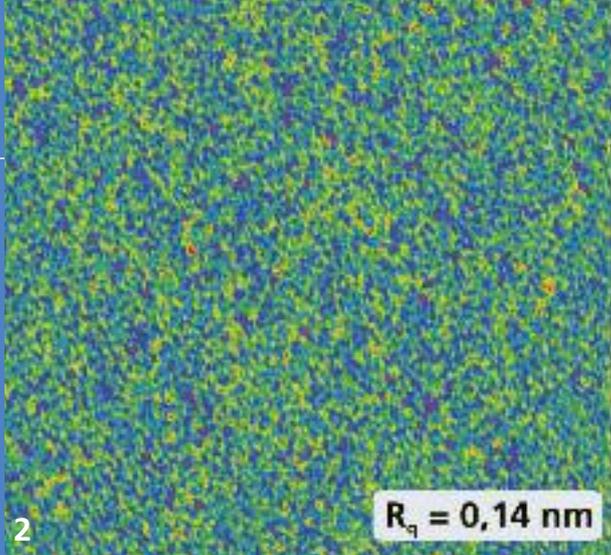
## UNSERE LÖSUNG

Damit EUV-Spiegel in einem vergrößerten Winkelbereich Strahlung reflektieren, kann es hilfreich sein, vom streng periodischen Schichtaufbau zu einer Stapelfolge überzugehen, bei der sich die Schichtdicken in Wachstumsrichtung voneinander unterscheiden (Abb. 1). Typischerweise weist jede Einzelschicht eine andere Dicke auf, wobei diese mit höchster Präzision - das sind hier 2 bis 3 Pikometer - eingestellt werden muss.

Die Dicke einer Einzelschicht in einer Nanometer-Multischicht wird durch folgende Parameter bestimmt:

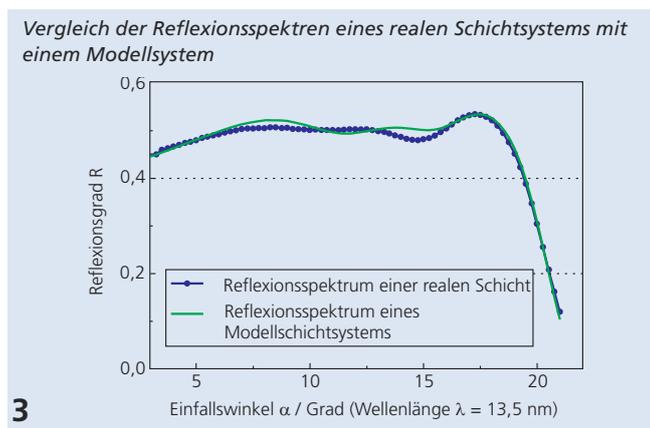
- Beschichtungsrate des Materials
- Kontraktion an den Grenzflächen aufgrund chemischer Reaktionen

Nach Ermittlung der Beschichtungsraten können beliebige Einzelschichtdicken innerhalb einer tiefengradierten Multischicht mit hoher Präzision hergestellt werden. Erste Referenzspiegel wurden so bereits mit EUV-Breitbanddesigns beschichtet.



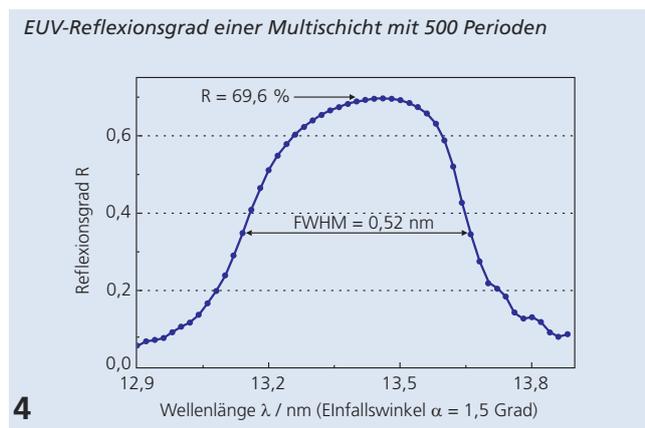
## ERGEBNISSE

Das entscheidende Kriterium für die Bewertung von Breitband-Reflexionsschichten ist die Güte mit der das experimentelle Reflexionsspektrum mit der Vorgabe übereinstimmt. Da der Vorgabe ein Modellschichtsystem zugrunde liegt, lässt sich das theoretische Reflexionsspektrum voraus berechnen. In Abb. 3 ist die bereits gute Übereinstimmung der Reflexionsspektren bei fester Wellenlänge und bei festem Einfallswinkel für ein beispielhaftes Schichtdesign dargestellt.



der Schichtoberfläche während des Wachstums der Schichten wurden die Rauheiten bereits auf rund 0,10 bis 0,12 nm rms gesenkt (Abb. 2).

Demnach wurde ein Aufrauen der Oberfläche durch die Beschichtung vermieden. Infolgedessen lassen sich mit den veränderten Prozessbedingungen auch Multischichten mit mehreren Hundert Perioden mit hohen Reflexionsgraden herstellen. In Abb. 4 ist der Reflexionsgrad einer EUV-Beschichtung mit 500 Perioden dargestellt.



Um nicht nur breitbandige sondern auch streulichtarme Reflexionen der Spiegel zu erreichen, sollte die Rauheit der Schichten weiter verringert werden. Dazu müssen Oberflächendiffusionsprozesse aktiviert werden, die es den Atomen ermöglichen, energetisch günstigere Positionen auf der Oberfläche zu erreichen. Praktisch gelingt diese Aktivierung durch einen moderaten Ionenbeschuss während des Schichtwachstumsprozesses. Wichtig ist dabei, dass der zusätzliche Ionenbeschuss nicht bereits die Volumendiffusion aktiviert, die zu einer Verbreiterung der chemischen Übergänge an den Grenzflächen führt.

Bei bisherigen Standardbeschichtungen wird auf den derzeit besten verfügbaren Oberflächen mit Rauheiten von  $< 0,1$  nm rms eine Schichtrauheit von 0,14 nm rms bis 0,17 nm rms erreicht. Durch einen zusätzlichen Ionenbeschuss

Der mit diesen Spiegeln erreichte Reflexionsgrad von 69,6 % bei 13,5 nm und 1,5 Grad Einfallswinkel liegt nur rund ein halbes Prozent unterhalb des bisherigen Bestwertes.

- 1 TEM-Bildausschnitt einer tiefengradierten Multischicht
- 2 AFM-Aufnahmen zum Nachweis der Rauheitsverringering  
Scanlänge = 3  $\mu\text{m}$ ;  
Höhenskala = 1 nm

## KONTAKT

Dr. Stefan Braun  
Telefon: +49 351 83391-3432  
stefan.braun@iws.fraunhofer.de





# NANOMETER-REAKTIVMULTISCHICHTEN ZUM PRÄZISEN UND TEMPERATURSCHONENDEN FÜGEN

## DIE AUFGABE

Eine immer wiederkehrende Aufgabe ist es, zwei unterschiedliche Teile fest miteinander zu verbinden. Die Idealvorstellung wäre, die beiden Teile aufeinander zu drücken und auf Knopfdruck eine sofortige feste Verbindung herzustellen. In der Realität ist es häufig nicht ganz so einfach: Beim Kleben muss der Kleber aushärten, beim Löten und Schweißen müssen die Bauteile erwärmt werden. Insbesondere für die folgenden drei Einsatzfälle sind neue Verfahren von herausragender Bedeutung, um die bestehenden Limitierungen beim Fügen reduzieren zu können:

- präzises, wärmearmes und zuverlässiges Verbinden von Komponenten der Mikrosystemtechnik
- Fügen von Bauteilen mit extrem unterschiedlichen Materialeigenschaften (z. B. Keramik und Metall)
- kurzzeitiger und definierter Wärmeeintrag beim Fügen von Polymeren

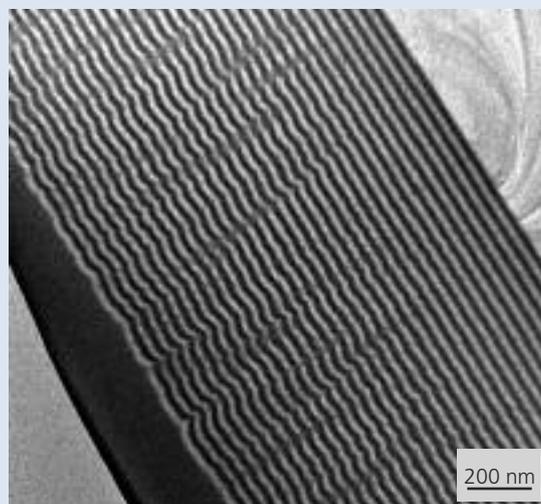
## UNSERE LÖSUNG

Mit einem neuen Ansatz, der seit einiger Zeit am Fraunhofer IWS verfolgt wird, könnte die oben beschriebene Idealvorstellung des Fügens Realität werden. Dazu wird zwischen die beiden zu fügenden Bauteile eine sogenannte Reaktivmultischicht eingelegt. Diese kann z. B. durch einen elektrischen Impuls aktiviert werden, sodass innerhalb von Millisekunden eine Verbindung der Bauteile hergestellt wird, ohne dass sich die Bauteile signifikant erwärmen (Abb. 1).

Die Wirkungsweise der Folie basiert auf einem Effekt, der sich bei geeignet aufgebauten Schichten mit Nanometerdicken

beobachten lässt. Im Ausgangszustand liegen in der Folie viele Einzellagen aus mindestens zwei verschiedenen Materialien vor (Abb. 2). Durch die Aktivierung der atomaren Diffusion in den Multischichten wird eine chemische Reaktion in Gang gesetzt, bei der sehr kurzzeitig und lokal begrenzt auf den Bereich der Folie Energie in Form von Wärme freigesetzt wird. Diese lässt sich nutzen, um ein beidseitig auf der Reaktivmultischicht aufgebrachtes Lot oder auch das Grundmaterial der Bauteile aufzuschmelzen. Nach der Erstarrung von Lot oder Grundmaterial besteht schließlich eine Verbindung der Bauteile. Bemerkenswert ist, dass hinsichtlich der Bauteile nahezu keine Einschränkungen existieren. Metalle, Keramiken, Halbleiter, Diamant und neuerdings sogar Kunststoffe (Polymere) lassen sich mit dieser Methode wirkungsvoll verbinden.

TEM-Bild des Querschnitts einer Nanometer-Reaktivmultischicht (Aufnahme: Dr. Rummeli, IFW Dresden)



2



## ERGEBNISSE

Eine wesentliche Weiterentwicklung der reaktiven Fügetechnik wurde kürzlich dadurch erzielt, dass nicht mehr nur Weichlote mit Schmelztemperaturen im Bereich von 200 bis 300 °C, sondern auch Lote mit höheren Schmelztemperaturen bis knapp oberhalb von 700 °C genutzt werden können. Dies ermöglicht das Fügen von Bauteilen, die im Einsatzfall einer hohen Temperaturbelastung unterliegen.

Darüber hinaus lassen sich mit derartigen Loten auch die Festigkeiten der Verbindungen verbessern. Erreicht wurde dies durch eine Steigerung der von den Reaktivmultischichten bereit gestellten Energiemenge um ca. einen Faktor 2. Ziel kommender Arbeiten ist es, auch Lote mit Schmelztemperaturen oberhalb von 1000 °C nutzbar zu machen. Damit würde insbesondere für das Fügen von Keramiken ein sehr interessanter Temperaturbereich erreicht.

Eine zweite wichtige Entwicklungsrichtung der letzten Monate ist das Fügen von Polymeren (Kunststoffe, Plastik) mit Reaktivmultischichten. Hier konnten innerhalb kürzester Zeit bemerkenswerte Resultate erzielt werden. Beim Fügen von Polymeren kann auf den Einsatz von Loten vollständig verzichtet werden. Vielmehr dient die von den Folien bereit gestellte Energie dazu, die Oberflächen der Polymere direkt aufzuschmelzen, sodass anschließend ein Verschweißen der Polymerbauteile erfolgt.

Besonders vorteilhaft wirkt sich bei diesem Anwendungsfall aus, dass sich die von den Folien gelieferte Wärmemenge präzise durch den Nanoschichtaufbau steuern lässt. So kann einerseits ein Verbrennen der Polymere vermieden und

andererseits eine definierte Flüssigphase erzeugt werden. Die angeführten Beispiele und Weiterentwicklungen zeigen, dass mit den maßgeschneiderten Reaktivfolien des Fraunhofer IWS das Ziel, Verbindungen auf Knopfdruck herzustellen, Realität werden kann.

- 1 *Fügung von Polymeren mit RMS*
- 3 *Belastungstest von Polymerbauteilen, die mittels Reaktivmultischichten gefügt wurden*

### KONTAKT

Dipl.-Phys. Maximilian Rühl  
Telefon: +49 351 83391-3256  
[johann-maximilian.ruehl@iws.fraunhofer.de](mailto:johann-maximilian.ruehl@iws.fraunhofer.de)



### KONTAKT

Dipl.-Ing. Erik Pflug  
Telefon: +49 351 83391-3524  
[erik.pflug@iws.fraunhofer.de](mailto:erik.pflug@iws.fraunhofer.de)





# TRANSPARENTE METALLSCHICHTEN MIT HOHER ELEKTRISCHER LEITFÄHIGKEIT

## DIE AUFGABE

Die technische Realisierung transparenter Elektroden ist eine Schlüsselfrage bei der Entwicklung von Zukunftstechnologien, so z. B. in der Solartechnik, bei der Entwicklung optoelektronischer Bauelemente oder in der Displaytechnik. Für die Herstellung dieser transparenten Elektroden kommen bisher vorwiegend ausgewählte Keramikschichten (TCO: transparent conductive oxides) zum Einsatz. Allerdings haben diese Materialien eine vergleichsweise geringe Leitfähigkeit, für viele Anwendungen ungünstige mechanische Eigenschaften und einen hohen Herstellungsaufwand. Grundlegende Innovationen auf diesem Gebiet könnten vielen Bereichen der High-Tech-Branche neue Impulse geben.

Als alternative Schichtwerkstoffe kommen z. B. dünne Metallschichten in Frage. Prinzipiell sind damit Leitfähigkeiten erreichbar, die um Faktor 10 bis 1000 höher sind als bei den gängigen TCO-Materialien. Die Schichten können also entsprechend dünner und damit transparent abgeschieden werden.

Mit herkömmlichen Beschichtungsverfahren, wie z. B. der Bedampfung oder der Sputtertechnik, wachsen dünne Metallschichten jedoch zunächst inselförmig auf. Erst ab einer bestimmten Mindestschichtdicke, meist deutlich oberhalb von 10 nm, tritt ein Zusammenwachsen der Inseln ein und die Schichten werden elektrisch leitfähig, allerdings nimmt die Transparenz der Schichten hier bereits deutlich ab. Die Schichten sind als transparente Elektroden deshalb nur bedingt geeignet. Verfahren zur homogenen Abscheidung dünnster Schichten sind notwendig.

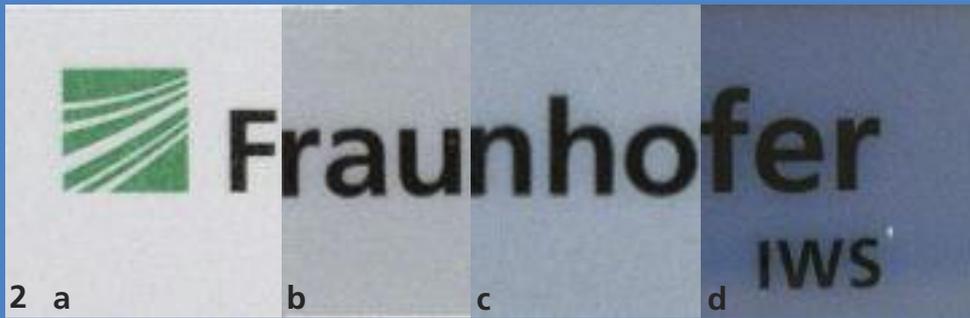
## UNSERE LÖSUNG

Mit dem am Fraunhofer IWS entwickelten gepulsten Hochstrombogenverfahren (High Current pulsed Arc - HCA) können Metallplasmen mit extrem hohen Ionisierungsgraden und Ionenenergien erzeugt werden. Schichten, die mit diesem Verfahren hergestellt werden, wachsen nicht inselförmig auf die Substratoberfläche auf, sondern werden in die Oberfläche subplantiert, wodurch extrem dichte und gleichmäßige Strukturen entstehen. Die HCA-Technologie bietet durch die gepulste Betriebsweise eine sehr große Variationsbreite bzgl. der Plasmaparameter an, die für die Einstellung optimaler Bedingungen für das Schichtwachstum genutzt werden können.

Zur Herstellung transparenter, leitfähiger Schichten wurde mit der HCA-Technologie Silber auf Glassubstrate aufgebracht und bzgl. der elektrischen Leitfähigkeit und der Transparenz vermessen.

Da dünne Metallschichten unter Normalbedingungen nicht stabil sind und Oxide bilden, geht ihre Leitfähigkeit schnell verloren. Um dies zu verhindern, ist eine Versiegelung der Oberflächen notwendig. Dazu können z. B. dünne, transparente keramische Schichten verwendet werden, die ebenfalls mittels HCA-Technologie abgeschieden werden können.

Ein positiver Nebeneffekt dabei ist, dass diese Versiegelung bei sorgfältiger Auswahl gleichzeitig als Entspiegelung der Metallschicht wirken kann. Die Transparenz des Gesamtsystems und die Haltbarkeit werden dadurch verbessert.

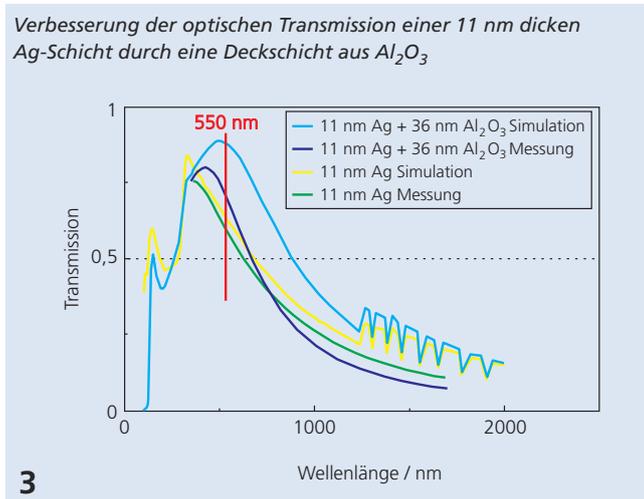


## ERGEBNISSE

Abb. 2 zeigt ein unbeschichtetes Glassubstrat (a) und weitere Substrate mit transparenten Silberbeschichtungen. Der Aufdruck auf dem darunter liegenden bedruckten Papier ist deutlich erkennbar. Die Dicken der Silberschichten betragen 7 nm (b), 11 nm (c) und 17 nm (d).

Einen guten Kompromiss zwischen Leitfähigkeit und Transparenz stellt dabei die Variante mit 11 nm Schichtdicke dar. Bei einem Flächenwiderstand  $R_{\square}$  von ca.  $5 \Omega$  wird im sichtbaren Bereich (550 nm) eine Transparenz von ca. 60 % erreicht. Dagegen benötigt eine Schicht aus Indiumzinnoxid (ITO) für die gleiche Flächenleitfähigkeit eine Schichtdicke von ca. 200 nm. Durch Applikation einer keramischen Deckschicht (in diesem Fall  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kann die Oberfläche gegen Oxidation langzeitstabil geschützt werden. Gleichzeitig werden eine Entspiegelung und damit eine Verbesserung der optischen Transmission erreicht.

Abb. 3 zeigt die gemessenen Verläufe der optischen Transmission der Schichten auf Glas in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge. Dargestellt sind eine einzelne Silberschicht von 11 nm Dicke sowie eine Silberschicht, die mit einer Deckschicht aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Dicke 36 nm) versehen wurde.



Die Transmission steigt von 60% (ohne Deckschicht) auf über 70% an (Messwert bei 550 nm, Mitte des sichtbaren Spektralbereichs). Zum Vergleich sind Ergebnisse von Simulationsrechnungen für diese beiden Schichtvarianten dargestellt. Der berechnete Verlauf für die Variante mit Deckschicht zeigt, dass das Potenzial bzgl. der Transmission längst noch nicht ausgeschöpft ist. Mit einer optimierten Deckschicht sollte eine Transmission von knapp 90 % erreichbar sein.

Eine Anpassung des Schichtsystems an konkrete Zielparameter ist möglich. Beispielsweise ist durch eine Verringerung der Ag-Schichtdicke eine weitere Erhöhung der Transmission bei etwas erhöhtem Flächenwiderstand realisierbar.

Das vorgestellte transparente, leitfähige Schichtsystem auf der Basis einer extrem dünnen Metallisierung stellt für viele Anwendungen eine sinnvolle Ergänzung zu bekannten TCO-Schichtsystemen dar. Der Vorteil ist insbesondere in der geringen Schichtdicke und dem damit verbundenen geringen Materialeinsatz zu sehen.

- 1 Hochstrombogenentladungen verschiedener Pulslängen auf einer Metallkathode.
- 2 Objektträger aus Glas,
  - a: unbeschichtet,
  - b-d: beschichtet,
  - b: 7 nm Ag, c: 11 nm Ag,
  - d: 17 nm Ag

## KONTAKT

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





# ZERSTÖRUNGSFREIE SCHICHT- UND OBERFLÄCHENANALYSE MITTELS LAWAVE®

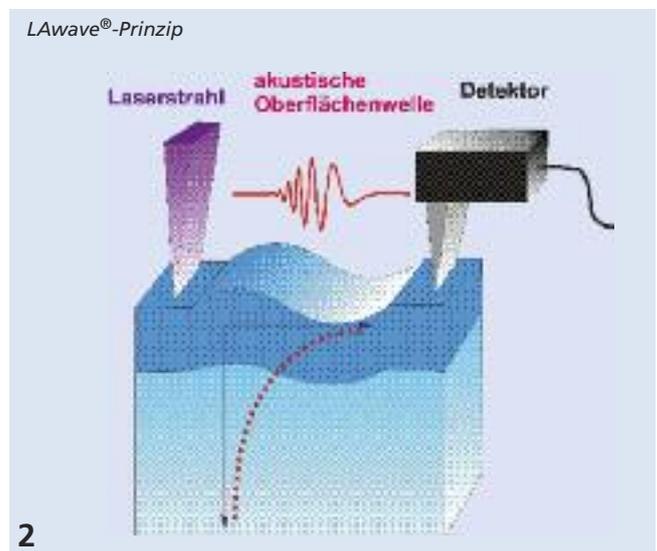
## DIE AUFGABE

Schichten mit Dicken von wenigen Nanometern bis zu mehreren hundert Mikrometern werden für sehr unterschiedliche Anwendungen auf verschiedenartigsten Oberflächen abgeschieden. Sie dienen zum Schutz gegen Korrosion und Verschleiß oder haben bestimmte mechanische, chemische, elektrische, optische oder magnetische Funktionen. Für die Entwicklung neuer Schichten oder die serienmäßige Qualitätsprüfung ist eine Messung bestimmter Schichteigenschaften unumgänglich. Neben speziellen Funktionseigenschaften sind das in den meisten Fällen Schichtdicke, Dichte, Härte, E-Modul und Haftfestigkeit. Während für die Schichtdickenmessung in vielen Fällen magnetische, elektrische und optische Methoden etabliert sind, können die mechanischen Eigenschaften Härte, E-Modul und Haftfestigkeit bisher nur zerstörend und relativ aufwendig gemessen werden. Neben den beschichteten Oberflächen gibt es auch ein zunehmendes Interesse an der sensiblen Oberflächencharakterisierung anderweitig veränderter Oberflächen. Dazu zählen z. B. Silizium-Wafer als Ausgangsmaterial für die Halbleiter- und Photovoltaikindustrie. Bei der Waferherstellung, d. h. Sägen und Polieren wird eine Bearbeitungsrandschicht erzeugt, die genauestens charakterisiert werden muss. Analog zu den Schichten sucht man auch hier nach geeigneten, zerstörungsfreien Charakterisierungsmethoden.

## UNSERE LÖSUNG

Die am IWS entwickelte LAwave®-Methode zur zerstörungsfreien Schicht- und Oberflächenanalyse nutzt die materialabhängige Ausbreitung von Oberflächenwellen. Diese Wellen werden mit kurzen Laserimpulsen angeregt. Jeder Laserpuls erzeugt ein breites Frequenzspektrum. Dabei breiten sich die

hohen Frequenzen an der unmittelbaren Oberfläche und die niedrigen Frequenzen in tieferen Bereichen aus. Bei beschichteten Oberflächen werden daher je nach Frequenz unterschiedliche Materialbereiche erfasst. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen von den Materialeigenschaften (vor allem E-Modul und Dichte) abhängt, breiten sich die Wellen je nach Frequenz unterschiedlich schnell aus. Diese sogenannte Dispersionsrelation dient als Grundlage für das LAwave®-Verfahren und wird bei jeder Messung bestimmt. Die daraus abzuleitenden Werkstoffparameter werden in einer Fitprozedur mittels einer aus einem Modell hergeleiteten theoretischen Dispersionskurve durch nichtlineare Ausgleichsrechnung berechnet. Das folgende Bild zeigt das LAwave®-Prinzip. Die Anregung erfolgt mittels Stickstoffimpuls-Laser. In einem definierten Abstand wird das Schallsignal mit einem akustischen Sensor, der auf die Probenoberfläche aufgesetzt wird, empfangen, anschließend verstärkt und mit einem Oszilloskop aufgezeichnet.



## ERGEBNISSE

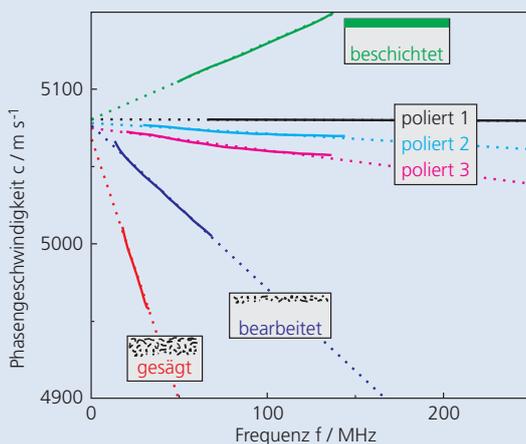
Das am IWS entwickelte laserakustische Prüfsystem LAwave® erlaubt die zerstörungsfreie Charakterisierung verschiedenster Schichten und Oberflächen. Je nach Aufgabenstellung können dabei die elastischen Eigenschaften (E-Modul), die Dichte oder die Schichtdicke ermittelt werden. Da sich oftmals auch technische Eigenschaften wie Porosität, Korngröße oder Kristalldefekte (Mikrorisse und Versetzungen) in einer Beeinflussung der physikalischen Kenngrößen wie dem E-Modul widerspiegeln, ist das LAwave®-Verfahren für eine große Vielfalt von Oberflächencharakterisierungen einsetzbar. Die typischsten Anwendungsbeispiele sind:

- Messung von Elastizitätsmodul und Schichtdicke ultradünner und dünner Schichten
- Bestimmung von Dichte und E-Modul diamantartiger Kohlenstoffschichten (a-C:H, ta-C) sowie kristalliner Diamantschichten
- Bewertung der Porosität und Defektdichte in thermisch gespritzten Schichten
- Störtiefenbestimmung an Halbleiter- und Photovoltaik-Wafern zur Optimierung von Säge-, Schleif- und Polierprozessen

Im Diagramm wird am Beispiel von Silizium-Wafern verdeutlicht, wie stark sich kleinste Oberflächenveränderungen auf die mit LAwave® gemessene Schallwellenausbreitung auswirken. Entsprechend genau können durch die mechanische Bearbeitung verursachte Störschichten charakterisiert bzw. aufgebrauchte dünne Beschichtungen vermessen werden.

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von LAwave®-Geräten für spezielle Aufgabenstellungen aufgebaut und an Kunden für reine Forschungszwecke, für FuE-Anwendungen oder für die Nutzung in der industriellen Produktion überführt. Die Anwendungen reichen dabei von der Entwicklung von Hartstoffschichten über die Charakterisierungen von Implantatbeschichtungen bis hin zur Wafercharakterisierung für die Halbleiter- und Photovoltaikindustrie. Aktuell wird an einem LAwave®-Handgerät gearbeitet, welches mit einem flexiblen Messkopf die Messung an kompakten Bauteilen erlaubt und damit die Einsatzfähigkeit der Methode deutlich erweitert.

Verringerung der Neigung  $S$  der Dispersionskurve der akustischen Oberflächenwelle gesägter Silizium-Wafer bei Bearbeitung der Oberfläche durch Schleifen und Polieren



- 1 Messstisch eines LAwave®-Gerätes speziell für die Charakterisierung von 300 mm Wafern

## KONTAKT

Dr. Dieter Schneider  
 Telefon: +49 351 83391-3451  
[dieter.schneider@iws.fraunhofer.de](mailto:dieter.schneider@iws.fraunhofer.de)

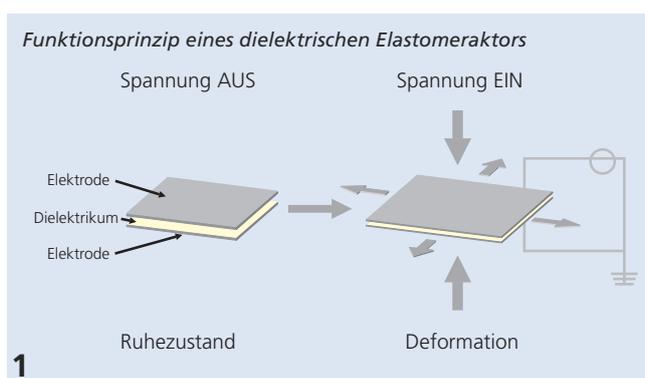




# INTEGRATION VON CARBON-NANOTUBES IN SILIKONE ZUR HERSTELLUNG ELASTOMERER AKTOREN

## DIE AUFGABE

Dielektrische Elastomeraktoren (DEA) sind ein sehr interessantes Materialsystem für industrielle Anwendungen und somit ein wichtiges Arbeitsfeld derzeitiger Forschungsvorhaben. Ein DEA besteht aus mindestens drei Schichten, wobei die dielektrische Schicht, welche resistent gegenüber elektrischen Durchschlägen ist, von zwei elektrisch leitfähigen Schichten, den Elektroden, bedeckt ist. Die Arbeitsweise des DEA basiert auf dem elektrostatischen Druck, welchen die geladenen Elektroden erzeugen und der das System elastisch verformt.



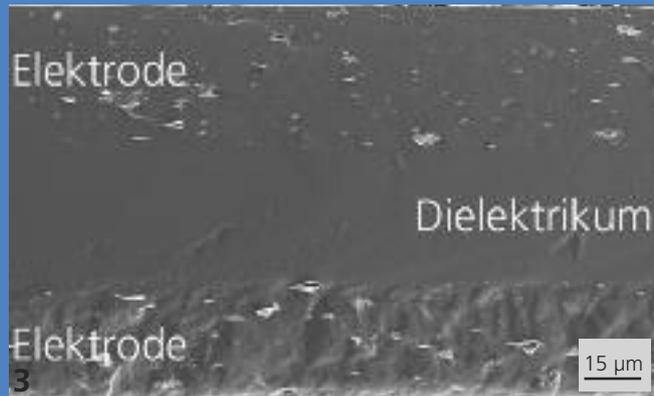
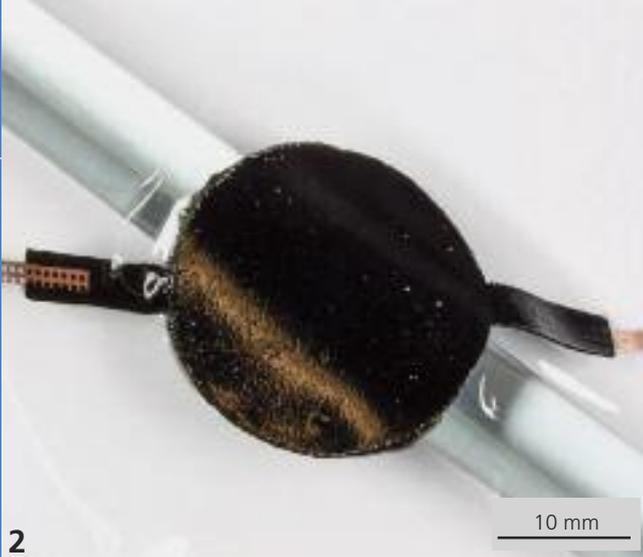
Bei den Elektroden besteht die Möglichkeit, metallische Elektroden einzusetzen, die deutlich steifer als das Dielektrikum sind und dadurch die Dehnung sowie die Lebensdauer der Aktoren reduzieren. Alternativ kann der vollpolymere Ansatz verfolgt werden, wobei ein und dasselbe Elastomer sowohl für die dielektrische als auch für die elektrische Schicht verwendet wird und die genannten Nachteile nicht auftreten. Werden die Schichten eines DEA nach dem vollpolymeren Ansatz genau aufeinander abgestimmt, können die aktorische Wirkung sowie Lebensdauer gesteigert werden.

Je nach gewünschten Schichteigenschaften ist das Elastomer deshalb mit leitfähigen oder nichtleitenden nanoskaligen Füllstoffen zu modifizieren.

## UNSERE LÖSUNG

Als Material für den Aktor wurde ein zweikomponentiges, additiv vernetzendes Silikon ausgewählt. Zur Herstellung des elastomeren Elektrodenmaterials wurden Carbon-Nanotubes (CNT) integriert. Die dielektrischen Eigenschaften konnten durch den Einsatz keramischer Partikel verbessert werden. Die einzelnen Materialien für die Aktorschichten unterliegen dabei einigen Randbedingungen, die bei der Füllstoffintegration berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen beispielsweise das Aufbrechen der Agglomerate und die homogene Verteilung der freigewordenen Partikel sowie die Steuerbarkeit der Eigenschaften der Dispersionen, der vernetzten Schicht und der Schichtverbände.

Dies wurde anhand verschiedener Prozessierungen untersucht, wofür Dispergatoren wie ein Rührwerk, ein SpeedMixer, eine Ultraschallsonotrode, ein Kalandrier und ein Hochdruckdispersergator zur Verfügung standen. Die untersuchten Single-Walled-CNT (SWCNT), welche am Institut hergestellt werden, und die keramischen Partikel bedingen unterschiedliche Herangehensweisen, da die Art der Partikel, deren Agglomerationsgrad sowie deren Füllgrad einen erheblichen Einfluss auf den Prozess aufweisen. Daher wurden für die unterschiedlichen Schichten und deren Partikel sehr unterschiedliche mehrstufige Prozessabfolgen entwickelt und ein Optimum ermittelt. Im Ergebnis wurden langzeitstabile und reproduzierbare Dispersionen geschaffen, die zu Einzelschichten, Schichtverbänden bis hin zu Multischichtaufbauten verarbeitet wurden.



Die genaue Materialkenntnis wurde mit Hilfe zahlreicher Charakterisierungen der Einzelschichten sowie Schichtverbänden gewonnen und der weiteren Optimierung zugeführt. Dabei war die enge Verknüpfung der Dispersionsherstellung und -charakterisierung mit der Entwicklung der Herstellungstechnologie und Schichtoptimierung essentiell für den nachgewiesenen Erfolg.

## ERGEBNISSE

Die Integration der SWCNT in das Silikon zur Erzielung der elektrischen Leitfähigkeit wurde erfolgreich realisiert, wobei der spezifische Widerstand von  $10^{14}$  Ohm cm auf 10 Ohm cm reduziert wurde. Damit ist die modifizierte Schicht als Elektrodenmaterial geeignet. Durch Optimierungen kann der spezifische Widerstand weiter gesenkt werden.

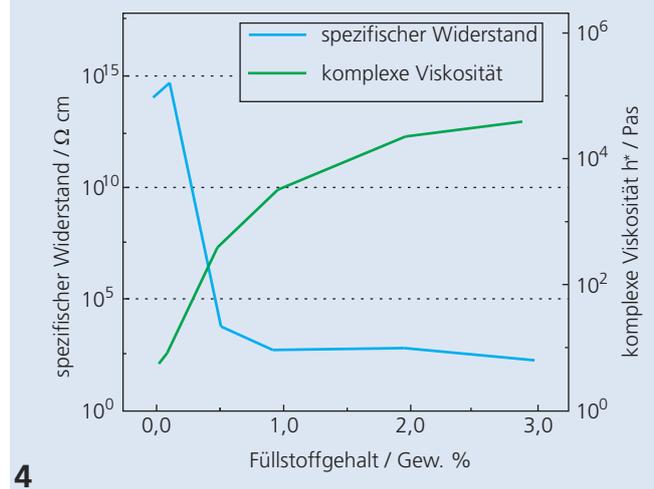
Die Deagglomeration und Homogenisierung der SWCNT führt andererseits zu einer deutlichen Veränderung der Dispersionsviskosität in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts. Dies beeinflusst die Weiterverarbeitbarkeit, da die Viskositäten von 4,7 Pas auf 43,3 kPas ansteigen. Die Herstellungstechnologie für die Schichtverbände konnte so ausgelegt werden, dass die Verarbeitung dieser Dispersionen realisierbar ist und reproduzierbare DEA herstellbar sind.

Der Versteifung der Elektrode durch die SWCNT kann entgegengewirkt werden, um Schichtverbände mit identischen bzw. vergleichbaren Eigenschaften herzustellen. Gravierende Unterschiede der Schichten untereinander, bspw. im Elastizitätsmodul, führen zur Behinderung und Beeinflussung der aktorischen Wirkung.

Die entwickelten DEA aus den mit nanoskaligen Füllstoffen modifizierten Schichten verhalten sich in ihrer aktorischen Wirkung nach den Gesetzen des elektrostatischen Drucks. Dies weist erfolgreich nach, dass vollpolymere Aktoren auf Basis eines Silikons, welches für die Schichten entsprechend modifiziert wird, funktionsfähig sind. Weiterhin weisen sie

eine höhere Langzeitstabilität als konventionelle DEA auf. Die Ergebnisse wurden im BMBF-Verbundprojekt Candela (FKZ :13N10661 und 13N10660) gewonnen.

Abhängigkeit des spezifischen Widerstands und der komplexen Viskosität vom SWCNT-Füllstoffgehalt

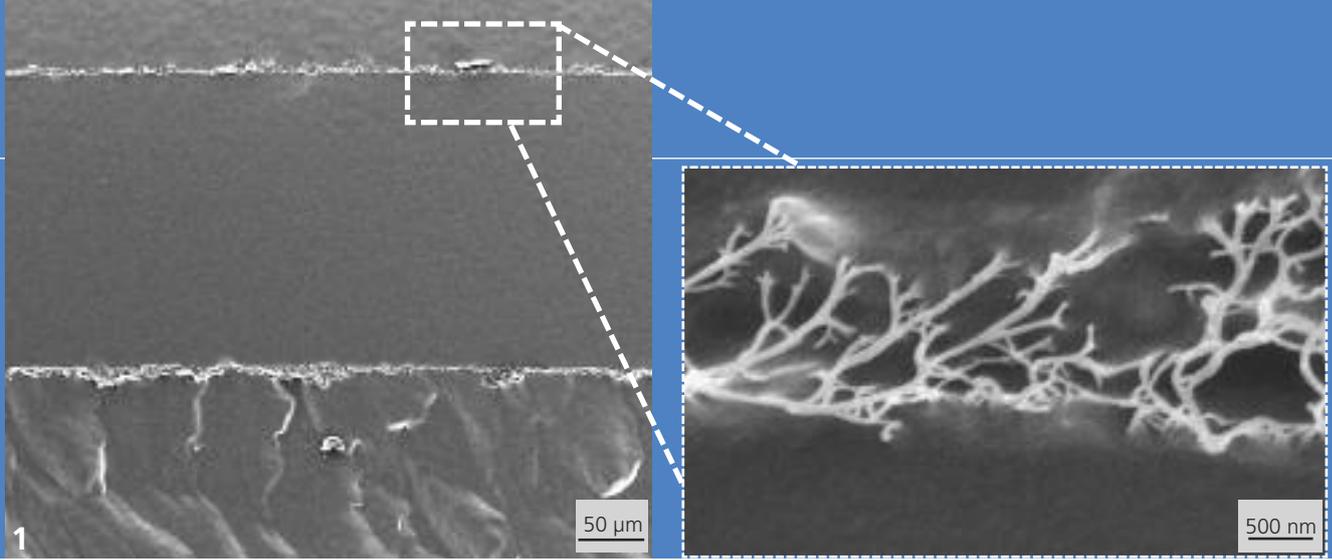


- 2 *Flexibler Dreischichtaktor mit Kreiselektroden*
- 3 *REM-Aufnahme eines Dreischichtaktors nach Kryobruch*

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Tilo Köckritz  
 Telefon: +49 351 463-34052  
 tilo.koeckritz@iws.fraunhofer.de





# HOCHFLEXIBLE ELEKTRISCHE LEITER FÜR ELEKTRONISCHE, AKTORISCHE UND SENSORISCHE ANWENDUNGEN

## DIE AUFGABE

Elektrische Leiter, die eine gute elektrische Leitfähigkeit mit hoher struktureller Flexibilität, chemischer und thermischer Beständigkeit kombinieren sowie außerdem eine hohe Robustheit und Lebensdauer aufweisen, sind eine fertigungstechnische Herausforderung. Bislang gibt es elektrische Leiter mit solchen Eigenschaften nicht.

Die Zahl der potenziellen Anwendungen hochflexibler elektrischer Leiter ist jedoch riesig, vor allem dann, wenn die elektrischen Leiter in Schichtform vorliegen. Das Anwendungsspektrum reicht von der Abschirmung elektromagnetischer Interferenzen (EMI) über resistive und kapazitive Sensoren bis hin zu elektrischen Leiterbahnen. Ein besonderes Highlight ist der Aufbau elektrostatischer Aktoren, die große Dehnungen erlauben, mit flexiblen Leiterschichten. Werden Leitfähigkeit und Flexibilität zusätzlich noch mit Transparenz kombiniert, sind auch Einsatzmöglichkeiten in Bildschirmen denkbar.

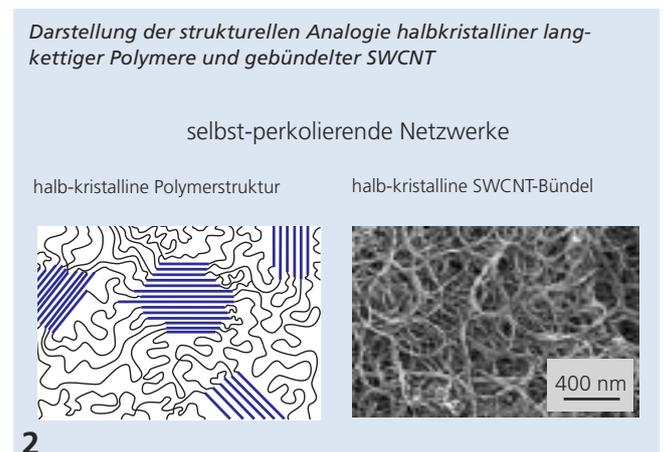
Gemeinsam mit weiteren Dresdner Forschungseinrichtungen entwickelt das Fraunhofer IWS derzeit solche elektrischen Leiter. Ziel der Forscher ist es, diese mit kostengünstigen und industriell etablierten technischen Verfahren in nahezu beliebiger Geometrie und Abmessung herzustellen und zu Halbleitern zu verarbeiten.

## UNSERE LÖSUNG

Das Basismaterial der flexiblen elektrischen Leiter sind langkettige Polymere, denen in geringer Menge geeignete flexible und leitfähige Additive beigemischt werden. Ideal sind halbkristalline langkettige Polymere & Elastomere aus z. B. PE, PP oder Silikon in Kombination mit ebenfalls halbkristallin vorliegenden, langkettigen, leitfähigen Polymeren. Leitfähige Polymere dieses Typs sind z. B. einwandige Kohlenstoffnanoröhren des vom Fraunhofer IWS Dresden in großer Menge herstellbaren und kostengünstigen Typs Single-Wall Carbon Nanotubes (SWCNT).

Abb. 1 zeigt beispielhaft eine dünne, leitfähige und mit Polymer infiltrierte faserige Zwischenschicht zwischen zwei isolierenden Polymerschichten. Diese faserige Zwischenschicht ist ähnlich flexibel wie das Basispolymer. Die flexiblen einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhren organisieren sich dabei analog dem halbkristallinen Basispolymer in halbkristallinen Strukturen, den Bündeln, siehe auch Abb. 2. Dadurch sind beide Komponenten miteinander kompatibel und lassen sich hervorragend miteinander kombinieren. Die leitfähige Komponente verleiht dem Basispolymer und dessen Schichten und Formen dabei die gewünschte Leitfähigkeit und Lebensdauer.

Abb. 2 zeigt beispielhaft die strukturelle Analogie zwischen halbkristallinen langkettigen Polymeren und gebündelten SWCNT. Die Abbildung zeigt zwei Diagramme: links eine schematische Darstellung einer selbst-perkolierenden Netzwerkstruktur aus halbkristallinen Polymeren, rechts ein SEM-Bild eines halbkristallinen SWCNT-Bündels mit einer 400 nm Skala.





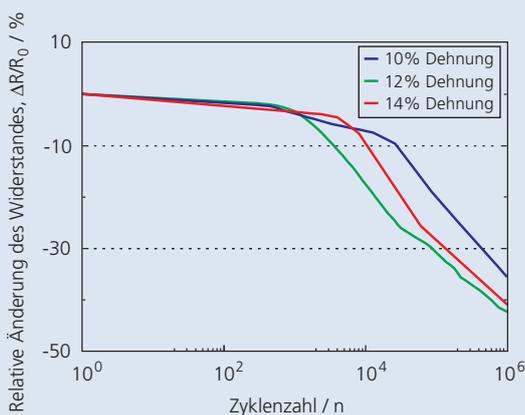
4

## ERGEBNISSE

Die am IWS eingesetzte Sprühtechnik auf der Basis homogener dispergierter einwandiger Kohlenstoff-Nanoröhren erlaubt einen auf den Anwendungsfall optimierten minimalen Materialeinsatz. Für transparente, leitfähige Schichten mit nennenswerten Leitfähigkeiten selbst bei 98 % Transparenz werden lediglich wenige Mikrogramm an einwandigen Kohlenstoffnanoröhren je Quadratmeter benötigt – mit entsprechend niedrigen Materialkosten. Diese Menge steigt bis in den zweistelligen Milligramm-Bereich, wenn die Leitfähigkeit höheren Ansprüchen genügen soll. Diese Schichten sind dann nicht mehr transparent.

Die besondere Kompatibilität der gefundenen Kompositlösung äußert sich in einer interessanten Lebensdauer. Abb. 3 zeigt die elektrische Leitfähigkeit eines Dreischichtaufbaus, bestehend aus einer leitfähigen Schicht in der Mitte und isolierenden Deckschichten oben und unten. Bei Dehnungen bis 15 % war bei uniaxialer Beanspruchung parallel zur Schichtfläche bis zu 10 Millionen Dehnzyklen keinerlei Degradation der elektrischen Leitfähigkeit erkennbar. Im Gegenteil, durch den Abbau von Kontaktwiderständen wird die elektrische Leitfähigkeit mit der Zeit sogar immer weiter verbessert.

Änderung des elektrischen Widerstands einer uniaxial gedehnten leitfähigen Schicht in Abhängigkeit von der Zyklenzahl



3

Dielektrische Elastomeraktoren stellen besonders hohe Anforderungen an die Qualität der Schichtstapel. Sie müssen sowohl eine große Zahl an Dehnzyklen überstehen als auch hohe und hoch bleibende dielektrische Festigkeiten gewährleisten. Gemeinsam mit dem Fraunhofer IKTS und der TU Dresden wurden solche Aktoren entwickelt und gefertigt. Sie bestehen aus den am IWS entwickelten Multischichtstapeln. Abb. 4 zeigt beispielhaft einen als Ringaktor ausgeführten arbeitsfähigen Demonstrator auf dieser Basis.

Die alternierend aufgebrachten leitfähigen und dielektrischen Schichten konnten beim Anlegen einer elektrischen Spannung Dehnungen von bis zu 20 % erzeugen. Sie konnten über mehrere hunderttausend Zyklen aktiv betrieben werden, ohne dass es zum Systemausfall kam. Aufgrund der nennenswerten und einstellbaren Stellkräfte solcher Aktoren können diese auch als »Künstliche Muskeln« bestehen und vielfältig eingesetzt werden, z. B. für die Prothetik, Robotik, Ventile.

- 1 Fünfschichtaufbau aus isolierenden Polymerschichten mit dünnen elektrisch leitfähigen Zwischenschichten aus SWCNT
- 4 Aktor mit einem ringförmig zusammengerollten Multischichtsystem (schwarze Fläche) als aktorisch aktive Struktur

## KONTAKT

Dr. Oliver Jost  
 Telefon: +49 351 83391-3477  
 oliver.jost@iws.fraunhofer.de



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. BERNDT BRENNER



»Sehen, um vor auszusehen, so lautet der Spruch der wahrhaften Wissenschaft.«  
Auguste Comte (1798-1857), frz. Philosoph u. Soziologe



## GESCHÄFTSFELD RANDSCHICHTTECHNIK

**Redaktion:** Das Geschäftsfeld Randschichttechnik entwickelt sich seit Jahren sehr zielstrebig. Welche Ergebnisse aus dem letzten Jahr sind aus Ihrer Sicht besonders hervorhebenswert?

**Prof. Brenner:** Da möchte ich insbesondere die systemtechnischen Entwicklungen erwähnen. Sie haben sich mit einem jährlich erweiterten und weiterentwickelten Produktportfolio einerseits zu einer stabilen Ertragsquelle entwickelt, die einen wichtigen Anteil zum Budget des Geschäftsfeldes beisteuert. Andererseits stellen sie das entscheidende Bindeglied dar, um unsere verfahrenstechnischen Entwicklungen im Interesse unserer Kunden sehr verfahrensspezifisch, möglichst direkt und ohne Serienanlaufschwierigkeiten industriell zu überführen. Die enge Kopplung zwischen Technologieentwicklung und verfahrensspezifischer Systemtechnik hat sich sehr bewährt. Sie ermöglicht uns, auf Kundenwünsche direkter und schneller zu reagieren, die Serieneignung neuer Verfahrensvarianten und neu entwickelter Komponenten ausreichend zu prüfen und vor der Industrieüberführung sicher zu stellen.

**Redaktion:** Können Sie dafür ein Beispiel nennen?

**Prof. Brenner:** Ja, ich greife beispielsweise die Innenflächenhärtung von Bremskomponenten heraus – eine Aufgabe, für die es auf dem Markt keine Lösung gab. Die Verfahrensentwicklung und Prozessüberführung erfolgte in drei Stufen.

### 1. Verfahrensentwicklung zur Problemlösung

»Anlasszonenfreies Randschicht härten von Innenflächen von Halbkugeln mit Hilfe eines provisorischen Laboraufbaus und rotierendem Bauteil«

2. Konzipierung, Bau und Erprobung einer geeigneten Strahlformungseinheit mit geformtem, ausreichend schnell taumelnd rotierendem Laserstrahl und Nachweis der Verfahrenseignung anhand von Einsatztests der Bauteile

3. Konzipierung, Bau und Erprobung, Serienfähigkeitsnachweis und Überführung einer Schalttelleranlage zum teilautomatisierten, temperaturkontrollierten Laserstrahlhärten von Bremskomponenten.

**Redaktion:** Wie konnten Sie Ihr verfahrenstechnisches Standbein stärken?

**Prof. Brenner:** Bei randschichtveredelten (und auch bei geschweißten) Bauteilen ist bei zyklischer Belastung auch mit Veränderungen der Eigenspannungsverteilung und resultierenden (fast) reversiblen lokalen plastischen Reaktionen bei sehr hohen Zykluszahlen zu rechnen. Wir sind deshalb sehr froh, jetzt beginnen zu können, unsere Expertise um den Bereich der hoch- und höchstzyklischen Ermüdung zu erweitern. Dazu konnten wir in diesem Jahr entsprechende Prüfkonzepte erarbeiten.

Wir hoffen, im nächsten Jahresbericht nach Erwerb der entsprechenden Prüftechnik erste Erkenntnisse dazu vorstellen zu können.



# KOMPETENZEN

## **TECHNOLOGIEN ZUM BEANSPRUCHUNGSGERECHTEN HÄRTEN VON STÄHLEN MITTELS LASER UND INDUKTION**

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

- Entwicklung von Randschichthärtetechnologien mit Hochleistungs-Diodenlasern, CO<sub>2</sub>-Lasern, Nd:YAG-Lasern oder Induktion bzw. beidem,
- Randschichtveredelung von Entwicklungs- und Prototypmustern.

## **KOMPLEXE WERKSTOFF- UND BAUTEILCHARAKTERISIERUNG**

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

- metallographische, elektronenmikroskopische (REM, TEM) und mikroanalytische (EDX) Charakterisierung der Realstruktur von Metallen, Keramiken und Werkstoffverbunden,
- Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die Bauteilauslegung und Qualitätssicherung,
- Verhalten von randschichtveredelten oder geschweißten Werkstoffen und Bauteilen unter zyklischer und hoch zyklischer Belastung,
- Eigenschaftsbewertung von randschichtbehandelten und geschweißten Bauteilen,
- Strategien zur werkstoff- und beanspruchungsgerechten Bauteilgestaltung,
- Aufklärung von Schadensfällen,
- anwendungsnahe Schulungen unter anderem im Bereich Metallographie.

**ABTEILUNGSLEITER**

**PROF. BERNDT BRENNER**

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



## BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2012

- |   |    |
|---|----|
| 1. Laserstrahlhärten für Werkzeuge im Karosseriebau                         | 58 |
| 2. Präzise Temperaturkalibrierung für industrielle Wärmebehandlungsprozesse | 60 |
| 3. Eigenschaftsoptimierung lasergasnitrierter Randschichten                 | 62 |

**GRUPPENLEITER**

**RANDSCHICHTVERFAHREN**

**DR. STEFFEN BONSS**

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



**GRUPPENLEITER**

**WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG**

**PROF. MARTINA ZIMMERMANN**

Telefon +49 351 83391-3573  
martina.zimmermann@iws.fraunhofer.de





# LASERSTRAHLHÄRTEN FÜR WERKZEUGE IM KAROSSERIEBAU

## DIE AUFGABE

Zur Herstellung einer PKW-Karosserie werden ca. 350 Blechteile benötigt. Und jedes Blechteil benötigt einen bis zu fünfstufigen Werkzeugsatz. Wegen der Verwendung höherfester Blechqualitäten erhöht sich die lokale Belastung von Beschnitt- und Umformwerkzeugen im Karosseriebau. Schneidkanten der aus hochlegierten Werkzeugstählen bestehenden Beschnittwerkzeuge werden stärker belastet, die Flächenpressung an Ziehradien der meist aus Graugusswerkstoffen bestehenden Umformwerkzeuge erreichen für den Werkstoff unerträglich hohe Werte.

Andererseits führen kürzere Produktwechselzeiten und eine zunehmende Variantenvielfalt zu steigenden Werkzeugkosten. Diese und die Fertigungszeiten müssen aber reduziert werden. Daraus ergibt sich einerseits die Notwendigkeit nach einer hochqualitativen, lokal wirksamen Verschleißschutzmethode. Andererseits sollte diese vorzugsweise direkt im Werkzeugbau eingesetzt werden, um aufwändige Transporte zu Dienstleistern sowie Zeit einsparen zu können.

## UNSERE LÖSUNG

Das Laserstrahlhärten hat sich in den letzten Jahren gegenüber den vorher im Großwerkzeugbau eingesetzten Technologien Flamm- und Induktionshärten technologisch durchgesetzt. Die Vorteile liegen in der höheren geometrischen Präzision sowie in der reproduzierbareren Prozessführung durch den Einsatz von Mess- und Regelsystemen. Laserstrahlhärten wird an Atmosphäre ohne Einsatz von gasförmigen oder flüssigen Zusatzstoffen durchgeführt. Damit kann es problemlos in die spanende Fertigung des Werkzeugbaus integriert werden. In einem von 2002 bis 2006 laufenden und vom BMBF

geförderten Verbundprojekt wurden die Grundlagen dafür gelegt, dass sich heute sowohl die Werkzeugbauabteilungen der Automobilhersteller als auch andere Großwerkzeughersteller für den Einsatz einer eigenen Laserhärteanlage entscheiden. Bevorzugtes Maschinenkonzept ist ein Knickarmroboter auf oder an einer Linearachse. Dadurch lassen sich die großen Arbeitsräume realisieren, die meist durch die Größe des größten zu erwartenden PKW Seitenrahmenwerkzeuges definiert werden. Andererseits bieten die Robotersteuerungen ideale Voraussetzungen für das sechsachsige Bewegen nicht-rotationssymmetrischer Werkzeuge, wie der häufig verwendete rechteckige Laserstrahl eines ist.

Das Fraunhofer IWS entwickelte eine dynamische Strahlformungseinheit »LASSY«, mit der durch einen Schwingspiegel quasistatische Laserstrahlen mit variabler Intensitätsverteilung erzeugt werden können. Diese benötigt man, um bei unterschiedlichen lokalen Wärmeableitungsbedingungen durch Anpassung der Intensität eine gleichmäßige Härtetiefe realisieren zu können. Weiterhin wird das kamerabasierte Temperaturerfassungssystem »E-MAqS« eingesetzt, um die Oberflächentemperatur des Bauteils im Laserstrahl messen und deren Verteilung abschätzen zu können.

Der Regler »LompocPro« stellt die Laserleistung so nach, dass die Oberflächentemperatur während des Prozesses bis auf wenige Kelvin konstant gehalten wird. Die Prozessdaten inklusive der Temperaturverteilungsinformationen des Systems »E-MAqS« werden mitgeschrieben und gespeichert. Sie können für Qualitätssicherungsmaßnahmen anderen Systemen übergeben werden.



Bei den zum Härten der Großwerkzeuge vergleichsweise geringen Prozessgeschwindigkeiten kann der Bearbeiter noch während des laufenden Prozesses eine Fein Anpassung der Spiegelschwingfunktion an das zu bearbeitende Teil vornehmen. Dazu erfolgt ein Abgleich der Einstellungen des dynamischen Strahlformungssystems mit dem Falschfarbenbild der Temperaturmessung. Für den Einsatz am Roboter hat sich ein über eine Wechselkupplung angedocktes Lasermodul bewährt. Dieses enthält die Laseroptik, die Strahlformungseinheit mit integriertem Temperaturmesssystem sowie dazu nötige Elektronik- und Steuerungskomponenten. Die Laserfaser sowie alle zum Modul geführten Kabel und Leitungen werden ebenfalls gefasst. Eine Abdeckung schützt die Komponenten vor Verschmutzung. Das Lasermodul wird über ein in zwei Stellungen fixierbares Gelenk an der Roboterhand angebracht. Dadurch ist es möglich, den Laserstrahl entweder 90° oder 45° zur sechsten Roboterachse austreten zu lassen. Das schafft erweiterte Möglichkeiten bezüglich der Zugänglichkeit zum Bauteil. Die Wechselkupplung wird deshalb verwendet, damit man weitere Lasermodule, zum Beispiel zum Vermessen oder Auftragschweißen, wahlweise an den Roboter andocken kann. Insbesondere die Kombination Härten und Auftragschweißen ist im Großwerkzeugbau von Interesse.

## ERGEBNISSE

Bereits 2010 hat die Audi AG am Standort Ingolstadt eine solche Härte- und Auftragschweißanlage mit Lasermodul und den entsprechenden Prozesskomponenten des IWS Dresden in Betrieb genommen. Basis ist ein an einer deckenmontierten Linearachse hängender Roboter. Die Anlage ist so konzipiert und positioniert, dass die Standardpaletten, auf die Werkzeuge bei der mechanischen Bearbeitung in den Fräsmaschinen gespannt werden, automatisch über das vorhandene Palettenwechselsystem in den Arbeitsraum zur Laserbearbeitung eingefahren werden können.

Als Laserquelle wird ein fasergekoppelter Hochleistungsdiodenlaser mit 6 kW Leistung verwendet. Damit ist es möglich, bis zu 60 mm breite Härtespuren zu erzeugen. Diese werden zum Beispiel an Einlaufradien von Tiefziehwerkzeugen appliziert. Ein zweiter Faserausgang wird für das Auftragschweißmodul verwendet. Das Fraunhofer IWS Dresden unterstützte die Audi AG bei der Inbetriebnahme der Steuerung und lieferte Technologie-Know-How.

Die Volkswagen AG nahm 2012 in Wolfsburg eine vergleichbare Anlage in Betrieb. Mit dieser können Werkzeuge mit bis zu 2,5 x 6 m<sup>2</sup> Grundfläche und 25 Tonnen Masse bearbeitet werden. Auch hier stellte das IWS Dresden die notwendigen Prozesskomponenten bereit und unterstützte die gesamte Inbetriebnahme sowie die Ausbildung der Bediener durch Schulungen, die unmittelbar an und mit der Anlage erfolgten. Durch das Härten im eigenen Haus können bei der Volkswagen AG Fertigungszeiten im Werkzeugbau deutlich reduziert werden.

- 1 *Laserhärtemodul am Roboter, Anlage der Audi AG Ingolstadt*
- 2 *Härteprozess an Großwerkzeugen der Audi AG Ingolstadt*
- 3 *Testhärtung auf Werkstoff 1.2379, 60 mm breit, ca. 1,5 mm tief*

## KONTAKT

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



# PRÄZISE TEMPERATURKALIBRIERUNG FÜR INDUSTRIELLE WÄRMEBEHANDLUNGSPROZESSE

## DIE AUFGABE

Eine Kernkomponente von Laserhärteanlagen ist die Temperaturregelung. Sie ist für die Generierung stabiler Prozesse entscheidend und wird zunehmend für die Qualitätssicherung eingesetzt. Insbesondere bei hochlegierten Stahlwerkstoffen oder Gusseisen muss die Temperatur im Bereich von wenigen Kelvin stabil gehalten werden, um die geforderten Härteeigenschaften (Randhärte, Restaustenitgehalt, Einhärtetiefe) prozesssicher umzusetzen.

Als Temperaturmessgeräte werden beim Laserhärten Pyrometer oder kamerabasierte Systeme eingesetzt. Diese sind oft mechanisch, optisch und elektrisch voll in komplexe Fertigungsanlagen integriert, so dass die endgültige Kalibrierung vor Ort beim Endanwender erfolgen muss. Ein Problem dabei ist die meist unbekannte Dämpfung des NIR-Temperatursignals durch Schutzgläser, Linsen und andere optische Baugruppen, die sich zudem im Laufe des Einsatzes durch Verunreinigungen oftmals wesentlich verändert. Für die Qualitätssicherung wird deshalb ein schnelles und präzises Verfahren zur Überprüfung und ggf. Nachkalibrierung der Temperaturmessgeräte am Standort der Härteanlage benötigt.

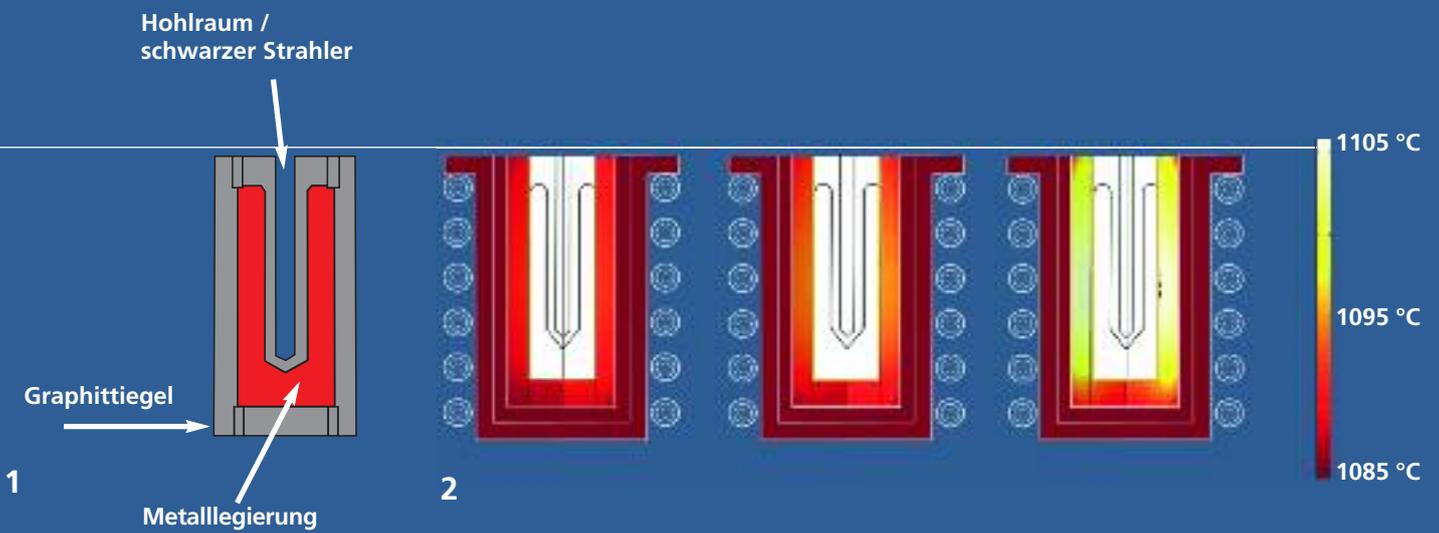
## UNSERE LÖSUNG

Um die gewachsenen Ansprüche an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Temperaturmessverfahren beim industriellen Laserstrahlhärten zu erfüllen, wird gemeinsam mit anderen europäischen Forschungs- bzw. Prüfinstituten im Rahmen des EMRP-Projektes »HiTeMS« ein geeignetes Kalibrierverfahren für den Hochtemperaturbereich von 1000 bis 1500 °C entwickelt.

Die derzeit genauesten Kalibrierverfahren für berührungslose Temperaturmessgeräte verwenden sogenannte Fixpunktzellen (Abb. 1). Für den Hochtemperaturbereich sind das in der Regel Graphitzylinder, welche mit hochreinen Metalllegierungen bekannter Schmelztemperaturen befüllt sind. Diese Fixpunktzellen sind als Hohlraumstrahler ausgeführt und damit für einen breiten Messwellenlängenbereich einsetzbar. Wenn diese Fixpunktzellen in Öfen auf Temperaturen nahe der Schmelztemperatur der Metalllegierung geheizt werden, können aus den sich ausbildenden Temperaturplateaus während der Schmelz- bzw. Erstarrungsphase präzise Kalibrierpunkte bestimmt werden (Abb. 3).

Mit Fixpunktzellen lassen sich prinzipiell extrem hohe Genauigkeiten erreichen, die Kalibrierunsicherheit liegt in der Regel bei wenigen 10 bis 100 mK. Durch den Einsatz einer kompakten induktiven Wärmequelle können auch die Nachteile der konventionellen Fixpunktgeräte, wie die begrenzte Flexibilität und Mobilität sowie die langen Zykluszeiten bei der Aufheizung und Abkühlung, überwunden werden.

Begleitend zur Optimierung des Fixpunktzellen- und Geräte- designs für die induktive Erwärmung wurden im HiTeMS-Projekt Simulationen mit FEM und FDM durchgeführt. Damit konnten die optimalen Materialien und Abmessungen von Fixpunktzellen, Induktionsspule sowie Halterungen und Gehäuse ermittelt werden. Zielstellungen waren dabei die Erzeugung eines möglichst homogenen Temperaturfeldes innerhalb der Fixpunktzelle, ein gleichmäßiges Aufschmelzen der Metalllegierung sowie die thermische Langzeitstabilität des Gesamtsystems.



## ERGEBNISSE

Basierend auf den Ergebnissen zur FEM- und FDM-Simulation des Fraunhofer IWS Dresden wurde in Zusammenarbeit mit der PTB Berlin ein mobiles induktiv geheiztes Fixpunktgerät zur Kalibrierung von Pyrometern und Wärmebildkameras entworfen, gefertigt und getestet. Damit kann die Erwärmung einer Fixpunktzelle bis zu 1500 °C innerhalb von wenigen Minuten erfolgen. Im Verlauf einer Stunde sind mehrere Messzyklen zur Aufnahme von Kalibrierpunkten möglich.

Um die thermische Stabilität der Graphitkomponenten zu gewährleisten, wird die Erwärmung in einem geschlossenen Gehäuse in Schutzgasatmosphäre durchgeführt. Dieses ist wassergekühlt, ein Langzeitbetrieb auch bei maximaler Prozesstemperatur uneingeschränkt möglich. Mehrere Schnittstellen zum Anschluss von Induktionsspule, Vakuumpumpe, Schutzgasein- und -auslass und die Messung der Temperatur von verschiedenen Seiten sind vorhanden.

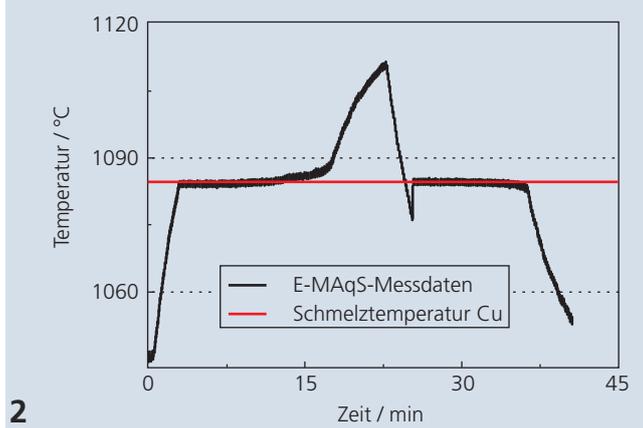
Die Kalibrierung des Temperaturmesssystems erfolgt durch Aufnahme von ein oder mehreren Kalibrierpunkten, bei denen die Signalstärke des Messgerätes für eine exakt bekannte Temperatur und einen Emissionsgrad von 0,999x bestimmt wird. Aus diesen Kalibrierwerten kann sehr schnell die kom-

plette Kennlinie des Messgerätes mit geringer Messunsicherheit ermittelt werden.

Das neue Kalibrierverfahren mit induktiv beheizten Fixpunkten wurde am Beispiel des derzeit sehr häufig für Laserhärteanwendungen eingesetzten kamerabasierten Messsystems E-MAqS erfolgreich getestet (Abb. 3). Dabei wurde eine 1-Punkt-Kalibrierung mit FeC-Fixpunkt durchgeführt und die Messgenauigkeit mit einem Cu-Fixpunkt geprüft.

Für die Messung der absoluten Prozesstemperatur ist die Einstellung des exakten Emissionsgrades der Oberfläche unverzichtbar. Deshalb werden im Rahmen des Projektes HiTeMS derzeit die wellenlängen- und temperaturabhängigen Emissionsgrade für verschiedene Oberflächenzustände von typischerweise mit Laser härtbaren Stählen und Gusseisenwerkstoffen vermessen. Auf Basis dieses Datenmaterials soll dem Anwender eine gezielte Emissionsgradkorrektur möglich sein. Die absolute Genauigkeit der Temperaturmessung im Vergleich zu den bisher angewendeten Methoden wird dadurch wesentlich verbessert. Das EMRP-Projekt HiTeMS wird gefördert durch die Europäische Union und EURAMET-Partnerländer (<http://projects.npl.co.uk/hitems/>).

Schmelz- und Erstarrungsplateau eines induktiv geheizten Kupfer-Fixpunktes, aufgenommen mit E-MAqS-Kamerasystem



- 1 Typischer Aufbau einer Fixpunktzelle für die Kalibrierung im Hochtemperaturbereich
- 2 FEM-Simulation der Temperaturverteilung einer induktiv geheizten Fixpunktzelle in Abhängigkeit von der Induktionsfrequenz (125, 250, 1000 kHz)

## KONTAKT

Dipl.-Phys. Marko Seifert  
 Telefon: +49 351 83391-3204  
[marko.seifert@iws.fraunhofer.de](mailto:marko.seifert@iws.fraunhofer.de)





## EIGENSCHAFTSOPTIMIERUNG LASERGAS-NITRIERTER RANDSCHICHTEN

### DIE AUFGABE

Hochfeste Titanlegierungen eignen sich auf Grund ihrer hohen spezifischen Festigkeit, guten Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität für hochbeanspruchte Bauteile in der Luft- und Raumfahrt, in der Energietechnik, im Off-Shore-Bereich und in der Medizintechnik. Das Verfahren des Lasergasnitrierens bietet die Möglichkeit, die im Allgemeinen unzureichende Beständigkeit dieser Legierungen gegen abrasiven, erosiven oder kavitativen Verschleiß zu erhöhen. Der industrielle Einsatz dieses Verfahrens wird jedoch erschwert oder sogar verhindert, weil es infolge des Lasergasnitrierens zur Rissbildung kommen kann und die statische und zyklische Belastbarkeit beeinträchtigt wird.

Durch Aufklärung der Struktur-/Eigenschaftsbeziehungen und Identifizierung der wesentlichen eigenschaftsdegradierenden Strukturelemente sollten deshalb Prozessfenster gefunden werden, die es zulassen, die Verschleißbeständigkeit der Titanlegierungen deutlich zu verbessern und gleichzeitig die im Betrieb geforderte Festigkeit zu gewährleisten.

### UNSERE LÖSUNG

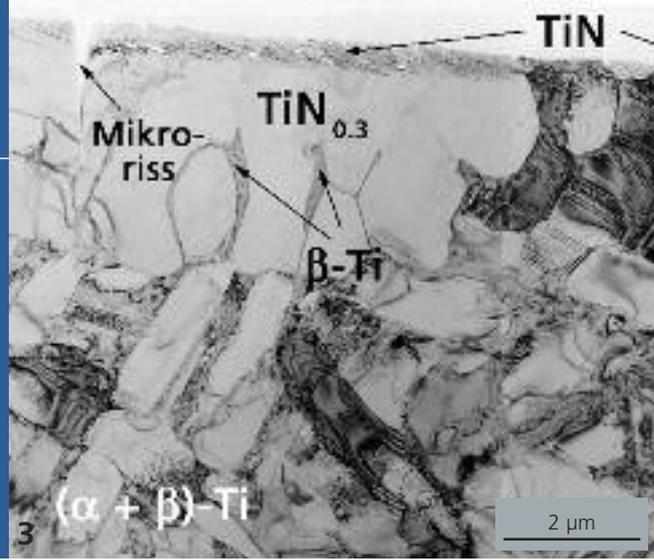
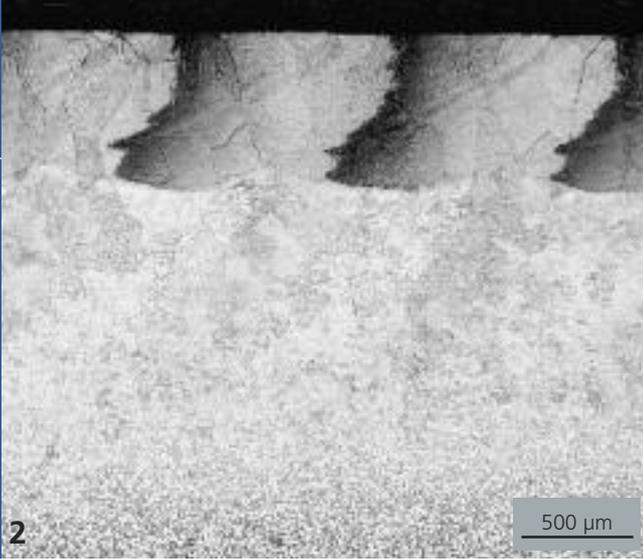
Zur Sicherstellung einer ausreichenden Flexibilität und Produktivität sowie einer hohen Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit des Bearbeitungsprozesses wurde am Fraunhofer IWS eine für industrielle Anwendungen taugliche Systemtechnik zum Lasergasnitrieren von 3D-Bauteilen aufgebaut und eingesetzt. Diese besteht aus einer Prozesskammer, einem schwenkbaren Joch mit integrierter Spannvorrichtung und einer aufsetzbaren Gasglocke, über die das Prozessgas und die Laserstrahlung bereitgestellt werden (Abb. 1). Durch Variation des Stickstoffangebotes, der Laserleistung, des Spurversatzes

und der Vorschubgeschwindigkeit wurden verschiedene Titanlegierungen flächenhaft lasergasnitriert. Die sich beim Lasergasnitrieren ausbildenden Gefüge und Mikrostrukturen wurden mittels licht- und elektronenmikroskopischer Methoden detailliert charakterisiert und die mechanischen Eigenschaften und die Verschleißbeständigkeit der unterschiedlich behandelten Proben ermittelt.

### ERGEBNISSE

Durch Variation der Prozessparameter ist es möglich, harte und verschleißfeste Randschichten auf Titanlegierungen mit einstellbaren Dicken im Bereich zwischen 0,1 mm und 1,0 mm und Härten zwischen 400 und 1500 HV zu erzeugen (Abb. 2). Jedoch wird durch konventionelles Lasergasnitrieren die üblicherweise sehr hohe mechanische Belastbarkeit der Titanlegierungen stark herabgesetzt. Als maßgebliche eigenschaftsdegradierende Elemente, die für die Zunahme der Rissempfindlichkeit bei statischer Biegebelastung und den deutlichen Abfall der Schwingfestigkeit mit steigendem Stickstoffanteil verantwortlich sind, wurden aus der Schmelze erstarrte, grobe Titanitridphasen ( $\text{TiN}_{0,3}$ , TiN) und dünne Deckschichten identifiziert (Abb. 3). Die Deckschichten, die sich bei der Abkühlung durch weitere Stickstoffaufnahme und anschließende Festphasendiffusion bilden, sind aus Titanitridphasen und größeren  $\alpha$ -Ti-Körnern (» $\alpha$ -case«) aufgebaut und enthalten feine Poren und Risse.

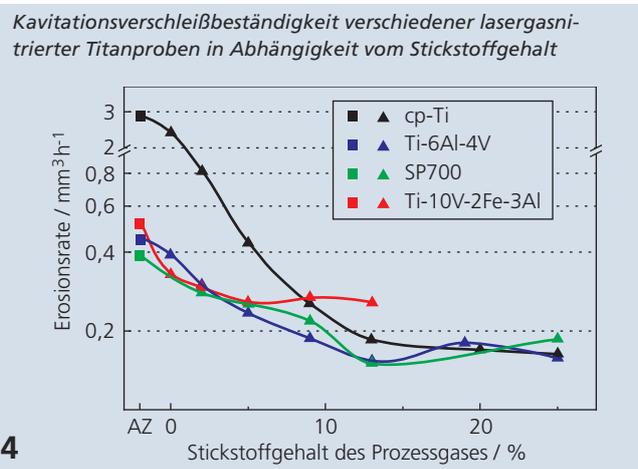
Wird durch Begrenzung des Stickstoffangebotes beim Lasergasnitrieren die Bildung grober und spröder Titanitride in der Schicht vermieden und außerdem die defektbehafteten Deckschichten durch sorgfältiges Abtragen von der Oberfläche entfernt, wird die Schwingfestigkeit von lasergasnitriertem Ti-6Al-4V auf ein bisher unerreichtes Niveau angehoben.



Sogar die sehr hohe Schwingfestigkeit des Anlieferungszustandes mit Luftfahrtspezifizierung wird übertroffen.

Es wurde erreicht, dass beim Lasergasnitrieren bereits geringe Stickstoffangebote genügen, um die Härte und die Kavitationsverschleißbeständigkeit der unterschiedlichen Titanlegierungen beträchtlich zu steigern (Abb. 4). Die Kavitationsverschleißbeständigkeit wird in allen Legierungen hauptsächlich durch die Mischkristallhärtung des im hexagonalen Titangitter gelösten Stickstoffs bewirkt. Da das cp-Ti am meisten Stickstoff interstitiell lösen kann und außerdem aufgrund seiner geringen Härte im Anlieferungszustand die geringste Kavitationsverschleißbeständigkeit aufweist, ist bei dieser Legierung das Steigerungspotenzial am größten.

Nach bisheriger Expertenmeinung war das Lasergasnitrieren von Titanwerkstoffen nicht auf zyklisch beanspruchte Bauteile anwendbar, weil die mit dem Verfahren angestrebte Erhöhung der Härte zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit mit einem drastischen Verlust an zyklischer Festigkeit einherging. Im Gegensatz dazu konnten im Rahmen des laufenden Projektes erstmals Strategien erarbeitet werden, die diese Einsatzgrenze überwinden und Prozessparameter aufzeigen, mit denen neben einer erhöhten Verschleißbeständigkeit auch hohe statische und zyklische Festigkeiten realisierbar sind. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten, das Lasergasnitrieren in Zukunft auch für zyklisch hochbelastete Bauteile aus Titanwerkstoffen einzusetzen.



- 1 Systemtechnik zum Lasergasnitrieren
- 2 Querschnitt durch lasergasnitriertes Ti-6Al-4V
- 3 TEM-Querschnitt im oberflächennahen Bereich einer lasergasnitrierten Schicht mit Deckschichten, feinen Poren und Rissen

#### KONTAKT

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



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. CHRISTOPH LEYENS



»Die Technik von heute ist das Brot von morgen -  
die Wissenschaft von heute ist die Technik von morgen.«  
Richard von Weizsäcker (\*1920)



## GESCHÄFTSFELD THERMISCHES BESCHICHTEN

**Redaktion:** Das Beschichten ist ein seit Langem etablierter Prozess zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von Werkstücken. Nun scheint es, dass die generative Fertigung, also die 3D-Herstellung von Bauteilen, zunehmend auf Interesse im industriellen Umfeld stößt. Welchen Beitrag leistet hier das IWS?

**Prof. Leyens:** In der Tat ist das Thema der additiv generativen Fertigung, wie wir diese Möglichkeit der Bauteilherstellung auch nennen, auf dem Vormarsch. Am IWS erzeugen wir mittels pulver- oder drahtbasierter Verfahren Schichten und 3D-Bauteile mit geringem zusätzlichem Zerspanungsaufwand. Besonders für Anwendungsfelder, in denen hohe Zerspanungsgrade bei der Bauteilherstellung erforderlich sind, ersetzen wir die abtragende Fertigung durch Generieren und liefern damit den richtigen Werkstoff an die richtige Stelle. Der Kunde profitiert hierbei von erheblichen Zeit- und Kosteneinsparungen.

**Redaktion:** Welche weiteren Vorteile ergeben sich durch diesen innovativen Fertigungsprozess?

**Prof. Leyens:** Bauteilreparaturen sind einfach und schnell durch Einlesen des CAD-Datensatzes und nachfolgendes Generieren möglich. Damit wird eine aufwändige Neuteilfertigung überflüssig. Darüber hinaus kann kostenintensive Lagerhaltung durch »On-demand«-Fertigung ersetzt werden, was insbesondere bei Produkten mit langen Lebenszyklen oder schnellen Modellwechseln vorteilhaft ist. Und schließlich ermöglichen die additiv generativen Fertigungsverfahren die Darstellung neuartiger, anwendungsgerecht spezifizierter Eigenschaftsprofile auf der Basis von innovativen Multi-Material-Konzepten.

**Redaktion:** Werden damit die konventionellen Fertigungsverfahren wie Umformen und Gießen überflüssig?

**Prof. Leyens:** Ganz sicher nicht! Aber das IWS entwickelt Lösungen, die die klassischen Fertigungsverfahren sinnvoll ergänzen. Durch den gerade erfolgten Aufbau der Drucktechnologie sind wir nun zusammen mit den am IWS etablierten Verfahren in der Lage, Bauteile im Mikrometermaßstab bis hin zu großen Volumina zu generieren: nach Kundenwunsch und mit hoher Präzision und beeindruckender Wirtschaftlichkeit.

**Redaktion:** Das Drucken von Strukturen zählt zu den neuen Kompetenzen des Geschäftsfeldes. Welche Anwendungsfelder sehen Sie hier?

**Prof. Leyens:** Die Anwendungsmöglichkeiten sind sehr vielfältig. Momentan konzentrieren wir uns auf funktionale Anwendungen wie gedruckte Batterien, Sensoren und thermoelektrische Generatoren zur Wandlung von Abwärme in elektrische Energie.

**Redaktion:** Gibt es hierzu nicht auch Aktivitäten auf dem Gebiet des Thermischen Spritzens?

**Prof. Leyens:** Ja, im Rahmen eines öffentlich geförderten Vorlaufforschungsprojektes arbeiten wir gerade an einem Funktionsmodell eines thermoelektrischen Generators, dessen wesentliche Komponenten durch Thermisches Spritzen hergestellt werden. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die thermoelektrisch aktiven Elemente dar; hier muss noch viel materialwissenschaftliche Grundlagenforschung betrieben werden, um spritzbare Systeme mit entsprechendem Wirkungsgrad zu entwickeln.



## KOMPETENZEN

### THERMISCHES SPRITZEN

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

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

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

### AUFTRAGSCHWEISSEN

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

Für diese Anwendungsfelder bieten wir an:

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

### DRUCKTECHNOLOGIEN

Durch Drucken lassen sich 2D- und 3D-Strukturen auf Oberflächen mit hoher Präzision und Reproduzierbarkeit zu vergleichsweise geringen Kosten aufbringen. Mit dem Aufbau von Kompetenzen im Bereich der Drucktechnologien trägt das IWS der steigenden Nachfrage nach großflächiger und strukturierter Abscheidung von Schichten und generativ erzeugten Mikrokomponenten Rechnung. Die verarbeitbaren Materialien schließen unter anderem Metalle, leitfähige Oxide, Barrierschichten, Thermoelektrika und CNT ein.

**ABTEILUNGSLEITER**

**PROF. CHRISTOPH LEYENS**

Telefon +49 351 83391-3242  
christoph.leyens@iws.fraunhofer.de



**BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2012**

1. Generatives Laser-Draht-Auftragschweißen	68
2. Oberflächenfunktionalisierung durch lasergenerierte Metallstrukturen	70
3. Feinste Strukturen für die gedruckte Elektronik	72
4. Thermisch gespritzte thermoelektrische Generatoren	74
5. Funktionalisierung keramischer Substrate durch thermisches Spritzen	76

**GRUPPENLEITER**

**THERMISCHES SPRITZEN**

**DR. LUTZ-MICHAEL BERGER**

Telefon +49 351 83391-3330  
lutz-michael.berger@iws.fraunhofer.de



**GRUPPENLEITER**

**AUFTRAGSCHWEISSEN**

**DR. STEFFEN NOWOTNY**

Telefon +49 351 83391-3241  
steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de



**GRUPPENLEITERIN**

**DRUCKTECHNOLOGIEN**

**DR. INES DANI**

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





# GENERATIVES LASER-DRAHT-AUFTRAGSCHWEISSEN

## DIE AUFGABE

Die Verwendung von Drähten alternativ zu Pulvern bietet beim formgebenden Laser-Auftragschweißen als generativer Fertigungstechnologie eine Reihe wichtiger Vorteile. So beträgt unabhängig von der Bauteilgeometrie der Werkstoffnutzungsgrad stets 100 %, die Materialzufuhr ist schwerkraftunabhängig und der saubere Schweißprozess verursacht in weitaus geringerem Maße Gefährdungen von Bedienpersonal und Maschine. Zudem ist bei Drähten die Gefahr unerwünschter Reaktionen mit der umgebenden Atmosphäre auf Grund der kleineren spezifischen Oberfläche geringer, woraus vorteilhafte Verarbeitungsmöglichkeiten reaktionskritischer Materialien wie Titan oder Aluminium auch unter normalen Atmosphärenbedingungen resultieren. Da jedoch die von der Schweißrichtung unabhängige Drahtzufuhr systemtechnisch aufwändig ist, bleibt die Erzeugung komplexerer, dreidimensionaler Metallstrukturen, etwa in Reparaturanwendungen, bislang den etablierten Laser-Hand-Geräten vorbehalten. Diese sind zwar effizient und flexibel einsetzbar, unterliegen jedoch vor allem hinsichtlich des subjektiven Einflusses des Bedieners, der Auftragraten und der Bauteilgröße signifikanten Limitierungen.

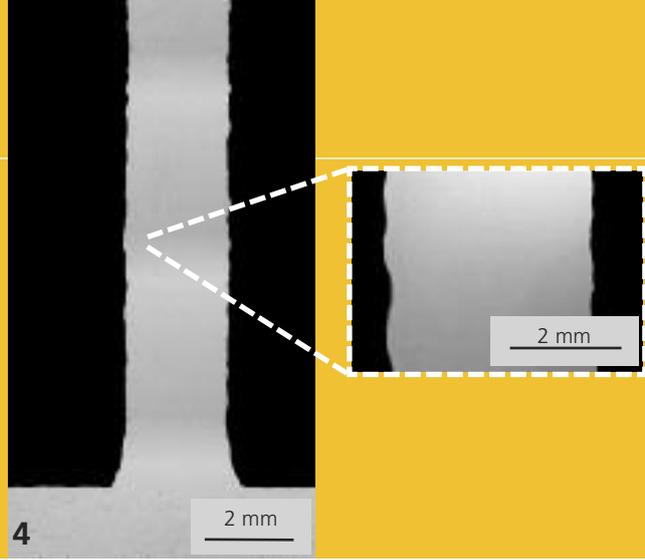
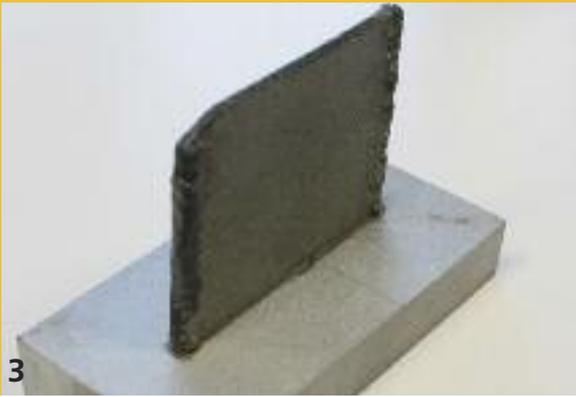
Vor diesem Hintergrund ist eine wachsende Nachfrage industrieller Anwender der Lasertechnologie nach drahtbasierten generativen Prozessen in automatisierten Fertigungssystemen unter Nutzung einer geschlossenen Prozesskette zu erkennen. Eine grundlegende Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit praxistauglicher Lösungen für eine stabile, maschinengeführte und richtungsunabhängige Schweißdrahtzufuhr sowie von Schweißstrategien und Prozessparametern zum defektfreien Strukturaufbau aus den branchentypisch relevanten metallischen Konstruktionswerkstoffen.

## UNSERE LÖSUNG

Ausgehend von den Erprobungsergebnissen vorausgehender Prototypen von Mehrstrahloptiken wurde ein neues optisches System für Festkörperlaser (Stab, Scheibe, Faser) im Leistungsbereich bis 4 kW auf der Basis reflexiver optischer Elemente entwickelt (Abb. 1). Dieses gestattet die exakt mittige Zuführung des Drahtes in der Laserstrahlachse. Hierdurch wird eine vollständige Richtungsunabhängigkeit gewährleistet, die auch in stark von der Wannenebene abweichenden Schweißpositionen erhalten bleibt. Abb. 2 zeigt einen typischen Schweißvorgang beim generativen Aufbau einer massiven Struktur. Es können Drähte im Durchmesserbereich von 0,8 bis 1,2 mm verarbeitet werden, wobei grundsätzlich auch feinere Drähte bis etwa 300 µm Durchmesser mit der neuen Technologie handhabbar sind.

Zur Steigerung der Auftrag-/Aufbauraten ist neben der herkömmlichen Kaltdraht- auch eine Heißdraht-Technologievariante in den Bearbeitungskopf integrierbar.

Im Sinne der generativen Darstellbarkeit maßhaltiger Bauteile mit der geforderten Oberflächenqualität besteht die angewandte Bastrategie aus den drei Komponenten lasergenerativer Metallauftrag, optisches Vermessen der Ist-Kontur und spanende Endbearbeitung.



## ERGEBNISSE

Mittels der Methode der zentrischen Drahtzufuhr sind formgebende Multilagen-Auftragschweißungen zum generativen Aufbau von dreidimensionalen metallischen Strukturen ohne Zwischenbearbeitung möglich. Die minimal erzielbare Strukturgröße im Sinne lateraler Auflösung beträgt 1,8 mm, wobei die Oberflächenrauheit  $R_z$  quer zu den Schweißraupen im Rohzustand vergleichsweise geringe Werte von weniger als 100  $\mu\text{m}$  erreichen kann. Mit 3 kW Laserleistung betragen die Auftragraten für Inconel625 1,3  $\text{kg h}^{-1}$  für die Kaltdraht- und 1,9  $\text{kg h}^{-1}$  für die Heißdraht-Variante. Die volumenbezogene Baurate beträgt dementsprechend 150 bis 225  $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$ . Die auf die Energiezufuhr normierte Auftragrate ergibt im Vergleich zum Auftragschweißen mit Pulver mit 0,43  $\text{kg kW}^{-1} \text{h}^{-1}$  (Kaltdraht) und 0,47  $\text{kg kW}^{-1} \text{h}^{-1}$  (Pulver) vergleichbare Werte beider Formen des Schweißgutes. Mit 0,63  $\text{kg kW}^{-1} \text{h}^{-1}$  übertrifft das Laser-Heißdraht-Auftragschweißen erwartungsgemäß deutlich das herkömmliche Laser-Pulver-Auftragschweißen.

Ein erstes Beispiel ist die in Abb. 3 dargestellte Mustergeometrie aus der schlecht schweißbaren Nickel-Legierung Inconel718. Durch eine optimierte Laser-Draht-Technologie werden rissfreie Körper mit einer geringen Oberflächenrauheit von nur  $R_z = 67 \mu\text{m}$  quer zu den Auftragraupen erzeugt. Das Gefüge (Abb. 4) ist defektfrei und durch eine feinkristalline, von Lage zu Lage epitaktisch gewachsene Mikrostruktur gekennzeichnet. Neben den genannten Nickelbasis-Legierungen sind zum jetzigen Zeitpunkt weiterhin Drähte aus Stahl (z. B. Werkzeugstahl 1.2343), Titan-, Aluminium- und Kupferlegierungen verarbeitbar. Darüber hinaus lassen sich auch Fülldrähte mit karbidischen Hartstoffen oder Hartlegierungen auf Kobalt-Basis verarbeiten.

- 1 Kompakter Laser-Draht-Auftragschweißkopf
- 2 Prozess einer Laser-Draht-Konturschweißung
- 3 Mustergeometrie aus Inconel718
- 4 Querschliff der in Abb. 3 gezeigten generativ erzeugten Struktur

## KONTAKT

Dr. Steffen Nowotny  
 Telefon: +49 351 83391-3241  
[steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de](mailto:steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de)





# OBERFLÄCHENFUNKTIONALISIERUNG DURCH LASERGENERIERTE METALLSTRUKTUREN

## DIE AUFGABE

Das Laser-Auftragschweißen hat sich in den vergangenen Jahren als ein Verfahren für schweißtechnische Beschichtungsaufgaben mit hoher Präzision und ausgezeichneter Qualität etabliert. Derartige Beschichtungen überzeugen durch geringe Aufmischung in Verbindung mit fester schmelzmetallurgischer Anbindung, fast vollständige Vermeidung von Porositäten, maßgeschneiderte mechanische Eigenschaften sowie die Möglichkeit, eine große Bandbreite überwiegend metallischer Werkstoffe zu verarbeiten.

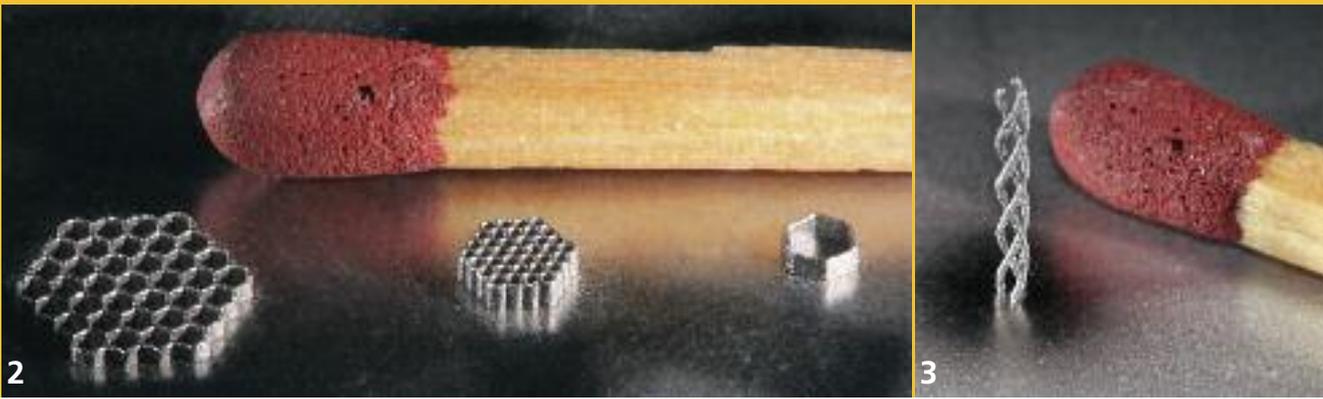
Wurden bisher vorwiegend Anwendungen mit Schweißraupendimensionen oberhalb eines Millimeters realisiert, fordern immer weitergehende Anforderungen der Industrie nun auch eine Herstellung kundenspezifischer Komponenten bis zu einer Detailauflösung im zweistelligen Mikrometerbereich. Sowohl das Generieren von miniaturisierten Bauteilen als auch die Funktionalisierung von Oberflächen im Submillimeterbereich war jedoch mit den verfügbaren Anlagen- und Systemtechnikkomponenten bisher nur eingeschränkt bzw. mit unzureichender Qualität möglich.

Insbesondere das Zusammenspiel aus den vergleichsweise engen Prozess-Parameterfenstern und den geometrischen Dimensionen machten den Prozess schwer kontrollierbar und empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen. Die Verwendung üblicher Auftragschweißsysteme zur Erzeugung kleinster Strukturen mündete deshalb zuvor in hohem Justageaufwand, mangelnder Ressourceneffizienz und inakzeptabler Reproduzierbarkeit.

## UNSERE LÖSUNG

Um den Forderungen nach höchster Präzision gerecht zu werden, sind die Pulverdüsen sowie Anlagenkomponenten des Laser-Auftragschweißens geeignet angepasst und weiterentwickelt worden. Dazu zählt die exakte Justage der Düsen-systeme genauso wie die Möglichkeit, feinste Pulver in geringen Mengen zu fördern. Darüber hinaus wird die erreichbare Präzision wesentlich durch die Integration moderner Faser- oder Scheibenlaser hoher Brillanz begünstigt. Bearbeitungsstrategien wurden speziell für die Strukturen im Submillimeterbereich angepasst, da nur auf diesem Weg ein optimaler Werkstoffauftrag realisiert werden kann. Die Lösung beinhaltet somit die Einbeziehung aller für das Verfahren relevanter Komponenten und Strategien, da sich neben der Präzision nur auf diesem Weg auch die von der Industrie geforderte Robustheit und Reproduzierbarkeit erfüllen lässt.

Bei zahlreichen zu funktionalisierenden Bauteilen ist die geforderte hohe Präzision zusätzlich mit einer erschwerten Zugänglichkeit verbunden. Daher wurden am Fraunhofer IWS Dresden sehr schlank ausgeführte Pulverdüsensysteme (Abb. 1) realisiert. Auf einer Länge von zirka 100 mm betragen die Abmessungen des Düsenkopfes durchgehend nur 15 mm. In Kombination mit Lasern mit brillanter Strahlgeometrie werden so nur wenige Mikrometer große Schmelzbäder erzeugt, mit denen sich Schweißraupenbreiten von nur 30 µm ermöglichen lassen. Durch Variation der Parameter lassen sich darüber hinaus auch Strukturgrößen im Millimeterbereich erzeugen, woraus sich neue Anwendungsfelder ergeben.



## ERGEBNISSE

Mit Hilfe der Komponenten- und Strategiemodifizierung können nun komplexe Bauteilgeometrien mit feinsten Strukturen (Abb. 2) hergestellt und vorteilhafte Verfahrenseigenschaften, wie endkonturnaher Materialauftrag und geringe Vermischung von Schicht- und Substratmaterial eingestellt werden. Infolge dieser Weiterentwicklung sind bereits Anwendungen in der Luftfahrt, der Werkzeugindustrie sowie der Medizintechnik realisiert worden. Diese industriellen Beispiele erforderten die freie dreidimensionale Strukturierung und damit verbundene Funktionalisierung von Freiformflächen durch präzisen metallischen Materialauftrag.

Darüber hinaus ist auch die Herstellung komplexer Mikrovolumen bzw. -geometrien unter Nutzung kommerziell verfügbarer Anlagentechnik möglich (Abb. 3). Trotz des Skalierens des Verfahrens auf kleinste Strukturgeometrie kann der Volumenaufbau nahezu porenfrei sowie endkonturnah mit einem Übermaß von nur wenigen Mikrometern realisiert werden. Der geringe Energieeintrag ins Bauteil erlaubt zudem eine Minimierung der Schädigung des zu beschichtenden Bauteils unter Beibehaltung der typischen festen Substratanhaftung.

Wurden am Fraunhofer IWS zuvor bereits systemtechnische Komponenten für das Laser-Auftragschweißen mit hohen Auftragsraten bis zirka 15 kg Metallpulver pro Stunde entwickelt, so runden die neuen hochpräzisen Systeme zusätzlich das Feld in den Bereich sehr kleiner Dimensionen ab.

Zwischen der kleinsten Schweißraupenbreite (ca. 30 µm) und der größten (> 20 mm) ergibt sich damit ein Faktor von nahezu drei Zehnerpotenzen. Der derart breite Arbeitsbereich beim Laser-Auftragschweißen ist derzeit Alleinstellungsmerkmal des Fraunhofer IWS Dresden.

Teile der hier vorgestellten Arbeiten werden vom BMBF im Rahmen des Förderkonzepts MABRILAS (FKZ:13N10063) gefördert.

- 1 *COAX16 – miniaturisiertes Düsensystem höchster Zugänglichkeit*
- 2 *Funktionalisierung von Oberflächen durch lasergenerierte Strukturen*
- 3 *Helixstruktur, generiert mittels Hochpräzisions-Laser-Auftragschweißen*

## KONTAKT

Dr. Frank Brückner  
 Telefon: +49 351 83391-3452  
[frank.brueckner@iws.fraunhofer.de](mailto:frank.brueckner@iws.fraunhofer.de)





## FEINSTE STRUKTUREN FÜR DIE GEDRUCKTE ELEKTRONIK

### DIE AUFGABE

Mittels Druckverfahren hergestellte elektronische Bauelemente, Baugruppen und Anwendungen werden häufig als gedruckte Elektronik bezeichnet. »Druckfarben« sind dabei elektronische Funktionsmaterialien. Durch reduzierte Herstellungskosten, die Möglichkeit des Druckens auf flexiblen Substraten und neuartige Funktionalitäten können mit gedruckter Elektronik Anwendungsfelder erschlossen werden, die der konventionellen Elektronik bisher nur eingeschränkt zugänglich waren. Bereits heute werden unter anderem organische Solarzellen, RFID-Etiketten (Radio Frequency Identification) oder Sensoren durch Druckverfahren hergestellt.

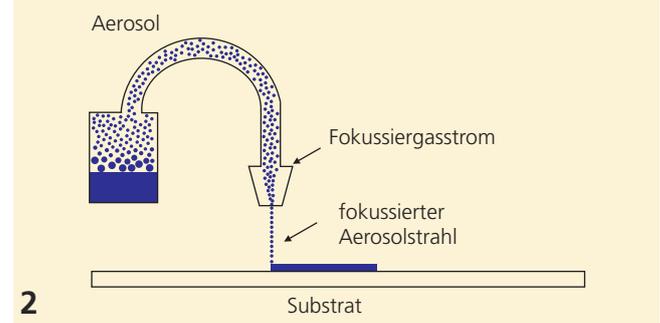
Das direkte maskenlose Drucken von funktionellen Strukturen wie z. B. elektrischen Kontaktierungen und Leiterbahnen, Elektroden, Antennen oder Sensoren auf verschiedenste Substrate stellt ein wachsendes Anwendungsfeld dar. Herausforderungen ergeben sich aus steigenden Anforderungen an die räumliche Auflösung der gedruckten Struktur, der Flexibilität hinsichtlich des Tintenmaterials sowie des Substrats. Die aufeinander abgestimmte anwendungsoptimierte Entwicklung der Druckverfahren, der verdruckten Materialien sowie substratschonender Sinterprozesse stellt somit eine zentrale Aufgabe in der Entwicklung der gedruckten Elektronik dar.

### UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer IWS Dresden werden funktionale Tinten sowie Druck- und Sinterprozesse für das hochaufgelöste Drucken von Strukturen entwickelt. Auf Basis der Aerosol-Jet®-Technologie können eine Vielzahl an Materialien wie Metalle, Halbleiter, Polymere oder Ätzflüssigkeiten verdruckt werden.

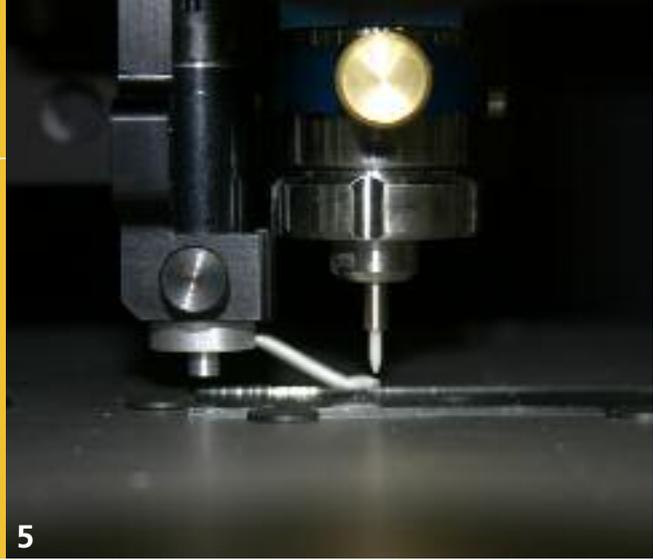
Für optimale Druckergebnisse stehen verschiedene substratschonende plasma- oder lasergestützte Reinigungs- und Vorbehandlungsmethoden zur Aktivierung und Funktionalisierung der Oberflächen zur Verfügung. Kommerzielle sowie eigenentwickelte Tinten werden der Anwendung entsprechend angepasst und verdruckt. Gedruckte Strukturen werden anschließend einer Wärmebehandlung unterzogen. Wärmeempfindliche Substrate werden dabei z. B. in einem RTA-Ofen (rapid thermal annealing) oder mit Hilfe von Lasern gesintert, um die thermische Belastung so gering wie möglich zu halten.

Schematische Darstellung der Aerosol-Jet®-Technologie



### ERGEBNISSE

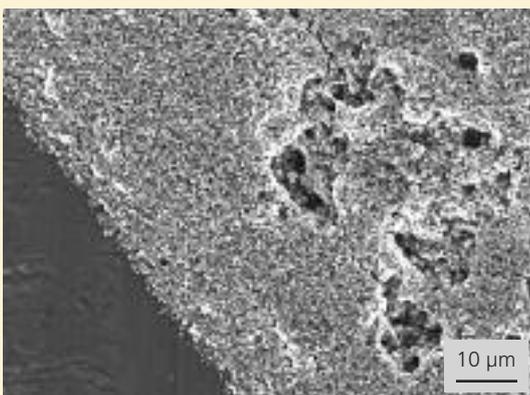
Das Aerosol-Jet®-Verfahren erlaubt das kontaktlose Drucken von feinen Strukturen mit minimalen Linienbreiten von ca. 10 µm unter Nutzung einer Vielzahl an Tinten (reine Flüssigkeiten, disperse Systeme wie leitfähige nanopartikelhaltige Tinten, kohlenstoffnanoröhrchen-basierte Tinten, Ätzmittel, Polymere). Es ist durch einen äußerst sparsamen Tintenverbrauch sowie eine hohe Materialausnutzung gekennzeichnet.



Die zu druckende Tinte mit einem breiten Viskositätsbereich von 1 mPa s bis 1000 mPa s wird pneumatisch verdüst oder per Ultraschall vernebelt, so dass ein dichtes Aerosol entsteht. Über ein inertes Trägergas wird das Aerosol zum Beschichtungskopf weitergeleitet. Ein umhüllendes Mantelgas fokussiert das Aerosol zu einem Strahl. Dabei besteht kein direkter Kontakt zwischen Düse und Tinte, wodurch ein Verstopfen der Düse nahezu ausgeschlossen werden kann. Der Abstand zwischen Beschichtungskopf und Substrat kann zwischen 1 mm und 5 mm variiert werden, was auch das Bedrucken von strukturierten Oberflächen ermöglicht. Ausgewählte Anwendungsbeispiele sind im Folgenden dargestellt.

Für den Aerosoldruckprozess beim Drucken von Elektrodenmaterial für Li-Ionen-Batterien wurden entsprechende Tinten entwickelt.  $\text{LiFePO}_4$  wurde auf Aluminiumfolie aufgedruckt und anschließend gesintert. Die Struktur zeigt eine sehr gute Kantenschärfe (Abb. 4). Durch die hohe Auflösung des Druckmusters können Sekundärbatterien direkt in elektronische Bauteile integriert werden.

Detail einer gedruckten  $\text{LiFePO}_4$ -Elektrodenstruktur



4

Zur Herstellung von elektrischen Leiterbahnen wurden erfolgreich Tintenmaterialien entwickelt und auf das Druckverfahren angepasst. Verschiedene elektrisch leitfähige Tinten basierend auf Silbernanopartikeln, dotierten Metalloxiden sowie Dispersionen aus einwandigen Kohlenstoffnanoröhren mit unterschiedlicher Viskosität wurden evaluiert. Die gedruckten Leiterbahnen können beispielsweise als RFID-Antennen oder Heizelemente eingesetzt werden (Abb. 3).

Zur Kantenisolation von Siliziumwafern für die Photovoltaik wurden Ätztinten auf KOH-Basis sowie ein angepasster Ätzprozess für den Aerosoldruck entwickelt. Das Verfahren zeichnet sich durch einen minimalen Einsatz von Ätzmittel aus. Der auf 200 °C vorgeheizte Siliziumwafer wird mit Ätzmittel bedruckt und dadurch der Ätzvorgang direkt eingeleitet. Eine Ätzbreite von unter 200 µm konnte realisiert werden.

- 1 Gedruckte SWCNT-Tinte
- 3 Gedrucktes Heizelement auf Glas
- 5 Druckkopf mit Shuttervorrichtung

#### KONTAKT

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





# THERMISCH GESPRITZTE THERMOELEKTRISCHE GENERATOREN

## DIE AUFGABE

Der effiziente Umgang mit natürlichen Ressourcen erfordert neue technische Lösungen, darunter zur Nutzung von Abwärme. Eine direkte Wandlung von Abwärme in elektrische Energie kann mit Hilfe thermoelektrischer Generatoren (TEG) erfolgen.

Ein TEG besteht aus mindestens vier Bestandteilen – den halbleitenden thermoelektrisch aktiven p- und n-Komponenten, den elektrischen Leitern zu deren Verbindung und den elektrischen Isolatoren. Optional werden noch weitere Komponenten, wie Füllwerkstoffe benötigt. Bei Existenz eines Temperaturgradienten wird durch den Wärmestrom eine elektrische Spannung erzeugt.

Für die breite Nutzung industrieller Abwärme durch TEG sind zu deren Fertigung sowohl neue Werkstofflösungen als auch Technologien zu entwickeln. Neben den technologischen Herausforderungen muss dabei insbesondere das prozessspezifische Werkstoffverhalten berücksichtigt werden.

## UNSERE LÖSUNG

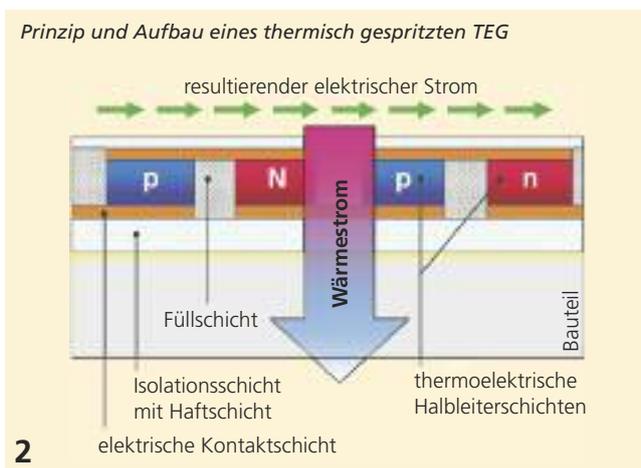
Thermisches Spritzen kann als Oberflächentechnologie auch zur Herstellung funktionaler Mehrlagenschichtsysteme, z. B. von Schichtheizelementen, eingesetzt werden. Die spritztechnische Herstellung von TEG stellt einen weiteren Entwicklungsschritt dar. Die Vorteile eines thermisch gespritzten Mehrlagenschichtsystems liegen in einem direkten Kontakt der einzelnen Bestandteile und der Freiheit bei der Wahl der Geometrie. Auf Verbindungstechniken kann innerhalb des TEG verzichtet werden. Die einzelnen Bestandteile werden mit den jeweils optimalen Spritzverfahren hergestellt.

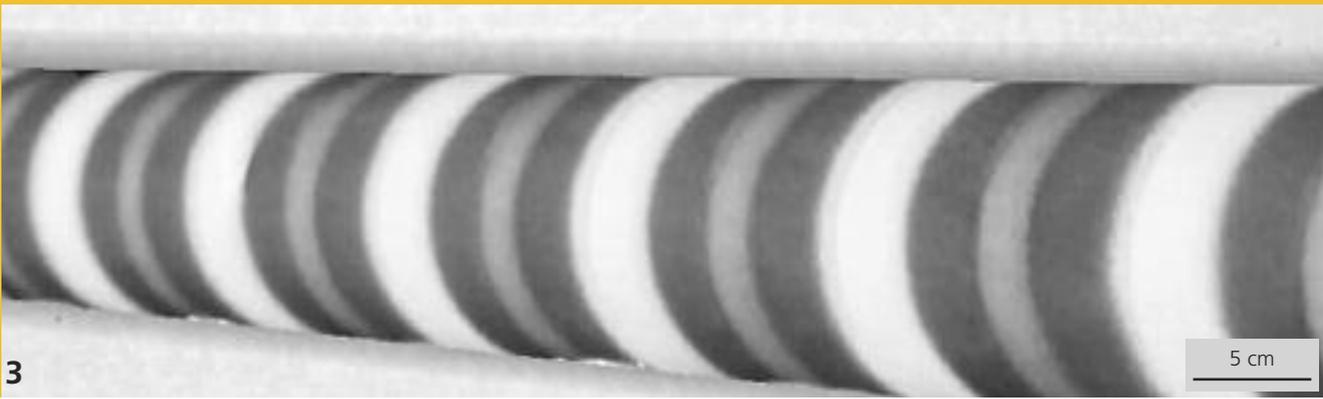
## ERGEBNISSE

Abb. 1 zeigt den Ausschnitt eines TEG-Aufbaus im planaren Design und verdeutlicht die technologische Machbarkeit der spritztechnischen Herstellung entsprechender Mehrlagenschichtsysteme. Auf ein entsprechendes Stahlsubstrat wurden zunächst jeweils Haftvermittler- und elektrische Isolationsschichten aufgespritzt. Darauf folgten die elektrischen Leiter und die halbleitenden Schichten und wieder elektrische Leiter im entsprechenden Design. Zur Regulierung des Wärmestroms und zur elektrischen Isolation zwischen den halbleitenden Elementen wird noch eine zusätzliche Isolationsschicht benötigt.

Abb. 4 zeigt Strukturen thermisch gespritzter TEG in planarer Form, bestehend aus p- und n-Halbleitermaterial (links) und elektrischer Kontaktschicht (rechts). Auch in Rohrform können die TEG hergestellt werden (Abb. 3).

Für die Funktionalität der gespritzten Aufbauten als TEG kommt den thermoelektrisch aktiven Werkstoffen die Schlüsselrolle zu. Diese sind durch die gegensätzlichen Anforderun-





gen von niedriger Wärmeleitfähigkeit, hoher elektrischer Leitfähigkeit und hohem Seebeck-Koeffizienten gekennzeichnet, um einen hohen ZT-Wert als Maß für die thermoelektrische Aktivität zu erreichen. Diese Anforderungen werden gegenwärtig von Werkstoffen wie  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{PbTe}$  und  $\text{SiGe}$  am besten erfüllt.

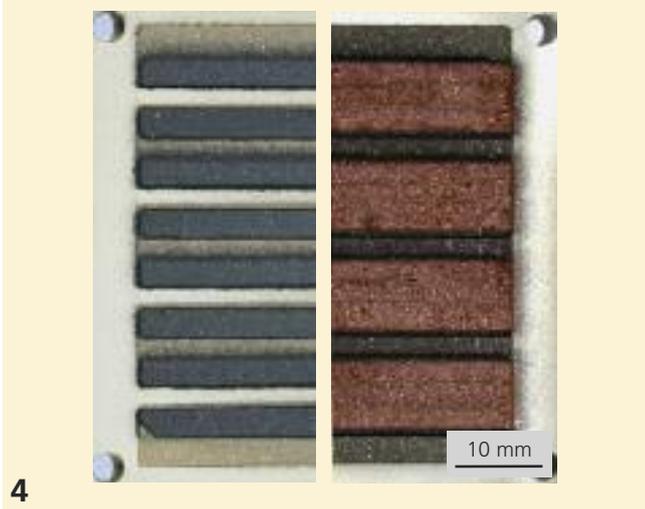
Für das thermische Spritzen müssen aber noch zusätzliche Randbedingungen erfüllt werden. Dies sind vor allem die Spritzbarkeit, die allgemeine Verfügbarkeit der enthaltenen Elemente, der Preis, das Vorliegen in einer spritztechnisch verarbeitbaren Form und die Anforderungen an den Gesundheits- und Umweltschutz. Die genannten Werkstoffe und viele gegenwärtig aktuelle Neuentwicklungen erfüllen diese Anforderungen jedoch nicht. Dies schränkt die Werkstoffauswahl gegenwärtig sehr stark ein. Aus diesem Grund wurden für die in den (Abb. 1, 3 und 4) gezeigten Schichtaufbauten oxidische

Werkstoffe verwendet, obwohl diese durch geringe ZT-Werte gekennzeichnet sind. Oxidische Werkstoffe bieten zusätzlich das Potenzial für einen Einsatz im Hochtemperaturbereich.

Mit dem Projekt »Thermisches Spritzen zur industriellen Herstellung von TEG-Modulen« (FKZ 03X3554G) werden die aktuellen Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWS im Rahmen des BMBF-Programmes Thermopower gefördert. Ziel der Arbeiten ist die Erprobung von verbesserten TEG-Schichtstrukturen bei der Nutzung von Industrieabwärme in der Keramikindustrie.

Neben den technologischen Entwicklungen ist für eine zukünftige großtechnische Realisierung die Herstellung verbesserter spritzbarer und wirtschaftlich günstiger thermoelektrischer Werkstoffe entscheidend. Diese sind vorrangig in der Werkstoffgruppe der Oxide zu suchen.

*Thermisch gespritzter TEG-Aufbau im planaren Design bestehend aus p- und n-Halbleitermaterial (links) und elektrischer Kontaktschicht (rechts) (entwickelt im BMBF-Projekt)*



- 1 *Querschnitt eines thermisch gespritzten TEG-Aufbaus im planaren Design: Ausschnitt mit Halbleiterschichten und thermischer Isolationsschicht (Füllmaterial)*
- 3 *Thermisch gespritzter TEG-Aufbau im Rohrdesign*

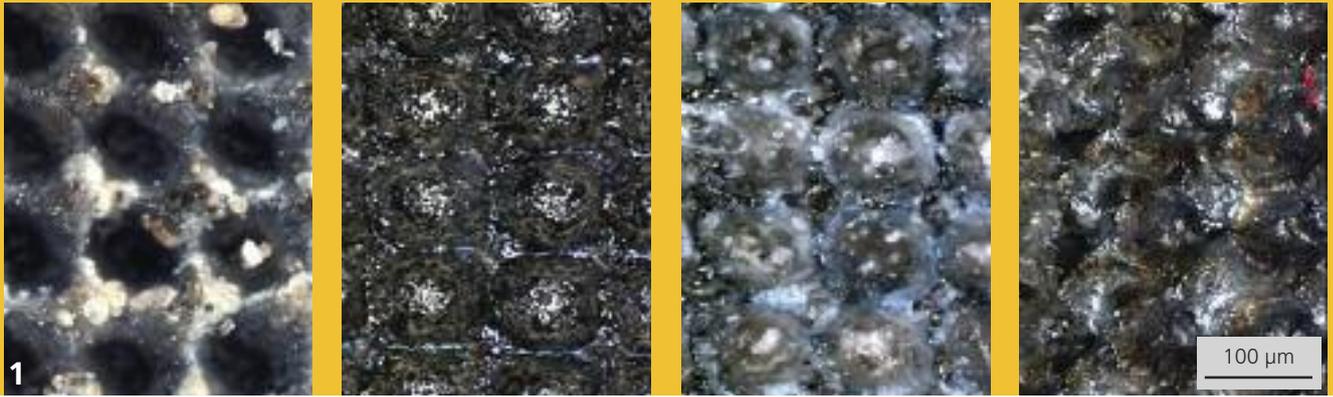
#### KONTAKT

Dr. Lutz-Michael Berger

Telefon: +49 351 83391-3330

[lutz-michael.berger@iws.fraunhofer.de](mailto:lutz-michael.berger@iws.fraunhofer.de)





# FUNKTIONALISIERUNG KERAMISCHER SUBSTRATE DURCH THERMISCHES SPRITZEN

## DIE AUFGABE

Thermisches Spritzen ist eine bedeutende und sich rasch entwickelnde Verfahrensgruppe unter den Oberflächentechnologien. Es wird angestrebt, die Funktionalität eines bestimmten Werkstoffes auf einem zumeist günstigeren Substrat zu realisieren. Dies sind in der überwiegenden Mehrheit metallische Substrate.

Die Beschichtung auf keramischen Substraten erfolgt bisher nur selten, hierin liegt ein bis jetzt ungenutztes Anwendungspotenzial. Möglichkeiten der Funktionalisierung von Oberflächen keramischer Bauteile sind elektrische Beheizung, Hoch-Temperatur-Oxidationsschutz von Nichtoxidkeramik, elektrische Isolation von wärmeleitfähigen Keramiken oder selbstreinigende Oberflächen.

Da bei thermisch gespritzten Schichten die Haftung hauptsächlich durch mechanische Verankerung zum Bauteilsubstrat erfolgt, muss die Bauteiloberfläche entsprechende Voraussetzungen erfüllen. Neben der Beseitigung von Verschmutzungen, wie Staub und Fett, muss eine geeignete Oberflächenrauheit vorhanden sein. Die Oberflächenrauheit metallischer Substrate wird hauptsächlich durch Sandstrahlen eingestellt. Bei porösen Keramiken kann unter bestimmten Voraussetzungen auf eine aufrauende Oberflächenvorbereitung verzichtet werden.

Bei sehr dichten und glatten Keramiken, wie z. B. technischer Keramik, sind die Möglichkeiten der Vorbehandlung stark begrenzt. Aufgrund ihrer hohen Sinterdichte und der daraus resultierenden hohen Festigkeit bewirkt das Sandstrahlen nahezu keine Veränderung der Oberflächenrauheit. Allerdings treten sowohl bei dichter Keramik als auch bei poröser Stein-

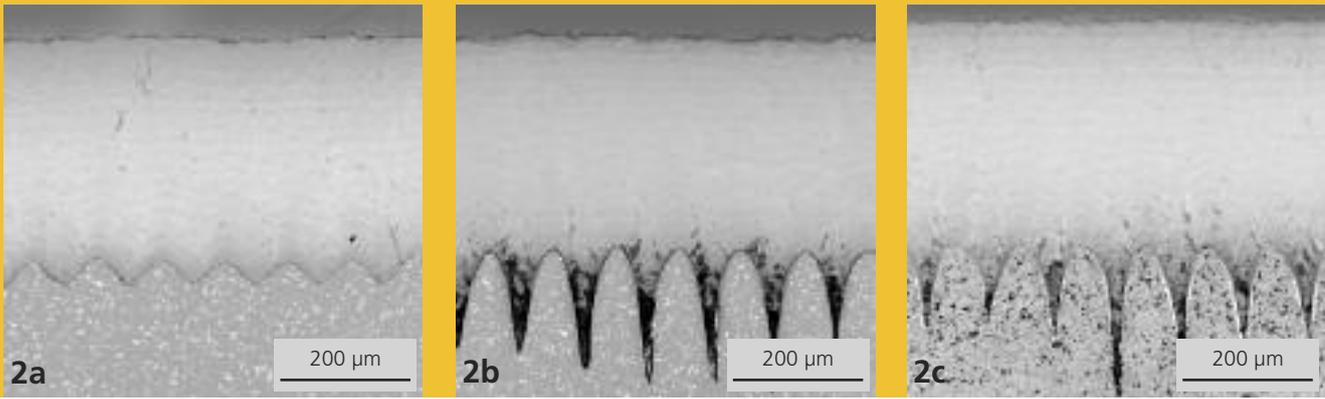
zeugkeramik beim Sandstrahlen mikroskopische und makroskopische Oberflächendefekte auf, die die Festigkeit des Materials beeinträchtigen. Um diesen Nachteil auszuschließen, besteht die Notwendigkeit geeignete Verfahren zur Oberflächenvorbereitung zu finden.

## UNSERE LÖSUNG

Als Alternative zum Sandstrahlen wurde zur Vorbehandlung von Keramikoberflächen eine Strukturierung durch Laserablation getestet. Zum Einsatz kam ein gepulster Festkörperlaser mit einer Laserwellenlänge von 1064 nm. Durch die lokale Verdampfung wurden definierte Lochmatrizen auf Keramikoberflächen erzeugt. Die Arbeiten wurden im Rahmen des AiF-Projektes »Cerasan – Funktionalisierung von Keramikoberflächen durch thermisch gespritzte Schichten« (IGF-Nr. 17371 BR / DVS-Nr. 02.064) gefördert.

## ERGEBNISSE

In Abhängigkeit von den Prozessparametern bei der Laserablation konnten Lochmuster unterschiedlicher Form, Größe und Tiefe erzeugt werden. Die durch einen gepulsten Laserstrahl erzeugten Lochmuster können mittels Laser-scanning-Mikroskop dargestellt werden. Abb. 1 zeigt verschiedene Lochmuster auf der Oberfläche einer dicht gesinterten  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramik. Laserleistung und Pulsanzahl pro Loch wurden variiert.



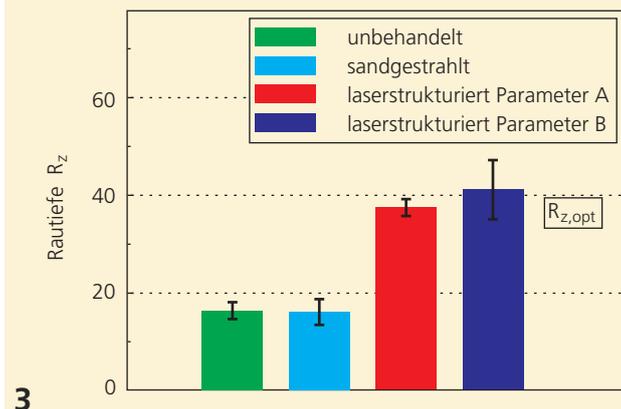
Durch die Laserstrukturierung wurde im Vergleich zu den un-  
behandelten dichten  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramiken eine signifikante Ver-  
besserung der Haftung thermisch gespritzter  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schichten  
erzielt. Im Auflichtmikroskop betrachtete Querschliffe an laser-  
strukturierten und beschichteten Proben zeigen eine für die  
Schichtanbindung vorteilhafte Lochstruktur und optimale  
Oberflächenrauheit im Bereich von  $R_z = 40 \mu\text{m}$  (Abb. 2a).

Bei Lochtiefen  $> 100 \mu\text{m}$  ist die Verbindung der Spritzpartikel  
zum Substrat nicht fehlerfrei (Abb. 2b). Die Löcher werden  
nicht vollständig ausgefüllt und stellen so Schwachstellen im  
Verbund dar.

Verwendet man bei gleicher Laserstrukturierung Suspensi-  
onen statt konventioneller Pulver als Spritzwerkstoff, können  
die Löcher weitgehend ausgefüllt werden. Die feineren Pulver-  
partikel ermöglichen eine gute Anbindung zwischen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -  
Schicht und dem Substrat, wie das Beispiel der suspensions-  
gespritzten HVOF-Schicht in Abb. 2c zeigt.

Die Strukturierung durch Laserablation hat sich als ein geeig-  
netes Verfahren erwiesen, um thermisch gespritzte Schichten  
auf keramischen Bauteilen zu erzeugen. Dadurch wird sowohl  
der Anwendungsbereich des thermischen Spritzens als auch  
der Einsatzbereich keramischer Bauteile erweitert.

Steigerung der Oberflächenrauheit durch Laserstrukturierung am  
Beispiel einer  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramik im Vergleich zum konventionellen  
Sandstrahlen



- 1 Gesinterte  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Keramik mit  
laserstrukturierten Loch-  
mustern
- 2 Laserstrukturierte  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Kera-  
mik mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
(a, b) HVOF gespritzt mit  
Pulver  
(c) HVOF gespritzt mit  
Suspension

#### KONTAKT

Dr. Filofteia-Laura Toma

Telefon: +49 351 83391-3191

filofteia-laura.toma@iws.fraunhofer.de



ABTEILUNGSLEITER PROF. DR. BERNDT BRENNER



»Wir wissen nicht einmal ein millionstel Prozent der Dinge.«  
Thomas Alva Edison (1847-1931), amerik. Erfinder



## GESCHÄFTSFELD FÜGEN

**Redaktion:** Sie betonten in der Vergangenheit die Verbesserung der Schweißbarkeit von Mischverbindungen als eine wichtige Aufgabe der fügetechnischen Entwicklung im IWS. Über welche Fortschritte können Sie auf diesem Gebiet berichten?

**Prof. Brenner:** Ja, wir sehen in der Tat in der qualitativen Erweiterung des Spektrums der schweiß- bzw. fügbaren Werkstoffpalette und hier insbesondere der konventionell nicht schmelzschweißbaren Werkstoffkombinationen eine der zentralen Herausforderungen zukünftiger schweißtechnologischer Entwicklungen. Damit wollen wir den steigenden Anforderungen nach einem beanspruchungsgerechten Leichtbau, effizienteren fügetechnischen Fertigungsverfahren und energieeffizienten Prozessketten gerecht werden. So nehmen wir z. B. einen großen industriellen Bedarf wahr, Werkstoffkombinationen wie Stahl/Aluminium, Aluminium/Titan, Stahl/Kupfer, Aluminium/Kupfer o. ä. mit einem hocheffizienten Fügeverfahren linienhaft fügen zu können. Sobald die Festigkeit einer punktförmigen Fügeverbindung nicht ausreicht, können verschiedene mechanische Fügeverfahren nicht mehr vorteilhaft eingesetzt werden. Das ist z. B. bei höchst- und ultrahochfesten Stahlfeinblechen in Kombination mit Al-Legierungen der Fall, insbesondere wenn auch nur eine einseitige Zugänglichkeit der Fügestelle gewährleistet ist. Zur Lösung des Problems haben wir vier verschiedene Ansätze entwickelt: Das Kleben mit vorhergehender lasergestützter Klebflächenvorbehandlung, das Laserstrahlschweißen von neu entwickelten Steg-Schlitz-Konfigurationen, das Magnet-Puls-Fügen und das Erzeugen von hochbelasteten Al-Stahl-Transition-Joints mittels Laserinduktionswalzplattieren, die nachfolgend als Halbzeug jeweils artgleich schweißtechnisch einfach (z. B. mittels Laser, Elektronenstrahl oder konventionellen Schutzgasschweißverfahren) gefügt werden können.

**Redaktion:** Da muss ich nachfragen: Beschäftigen Sie sich

jetzt auch mit dem Schutzgasschweißen?

**Prof. Brenner:** Nein, aber in enger Kooperation mit der Professur für Fügetechnik der TU Dresden haben wir die Tatsache genutzt, dass die Bandbreite der von Dresdner Forschungsinstituten entwickelten Fügeverfahren nicht nur national, sondern auch international außergewöhnlich groß ist, um das Fügetechnische Zentrum »Tailored Joining« zu gründen (siehe S. 112). Mittels dieser gebündelten Kompetenz erwarten wir eine Reihe von Synergieeffekten und Impulsen für die zukünftigen fügetechnischen Entwicklungen im Interesse unserer Kunden. Durch das komplementäre schweißtechnische und schweißtechnologisches Portfolio erwarten wir darüber hinaus neue Anregungen und bessere Randbedingungen für die Entwicklung neuer hybrider Fügeverfahren.

**Redaktion:** Auf welche Anwendung zielen Sie mit dem Laser-Engstspaltschweißen?

**Prof. Brenner:** Das sich derzeit in Entwicklung befindliche Laser-Engstspaltschweißen adressiert mehrere Anwendungsbereiche, in denen die bisherigen konventionellen als auch Strahlschweißverfahren an ihre Grenze stoßen. Während gegenüber den konventionellen Schweißverfahren insbesondere die Verringerung des Verzuges, die Verringerung des Verbrauches an Schweißzusatzwerkstoffen und die drastische Verringerung der Schweißzeit im Vordergrund stehen, liegen die Vorteile gegenüber dem konventionellen Laserstrahlschweißen in der viel größeren Schweißtiefe. Sowohl gegenüber dem Laserstrahlschweißen als auch dem Elektronenstrahlschweißen erwarten wir bei größeren Schweißtiefen eine entscheidend größere Homogenität der Aufmischung des Schweißgutes über die Schweißnahttiefe. Das verspricht verbesserte Eigenschaften und eine Heißbrissvermeidung bei heißbrissanfälligen Legierungen.



## KOMPETENZEN

### SCHWEISSEN SCHWER SCHWEISSBARER WERKSTOFFE

Das Laserstrahlschweißen ist ein modernes Schweißverfahren, das einen breitgefächerten industriellen Einsatz insbesondere in der Massenfertigung gefunden hat. 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, Heißriss anfälligen Legierungen sowie Bauteilen mit hoher Steifigkeit. Auf der Basis eines umfangreichen metallphysikalischen und anlagentechnischen Hintergrundwissens bieten wir Ihnen 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 Fügeiloberflächen vor dem Kleben häufig vorbehandelt. Dafür werden am IWS vor allem Plasma- und Lasertechniken verwendet. Die Charakterisierung der vorbehandelten Oberflächen sowie der geklebten Verbunde erfolgt mittels Kontaktwinkel-, Rauheits- und Schichtdickenmessungen, Lichtmikroskopie, REM / EDX und spektroskopischer Methoden. Eine neue Zielrichtung besteht in der Integration von Carbon-Nanotubes in Klebstoffe, wodurch die Klebfestigkeiten erhöht oder / und elektrisch leitfähige Verbunde hergestellt werden können. Wir bieten Fügeiloberflächenbehandlungen 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 mittels Standard-schmelzschweißverfahren fügen, bei Metallen betrifft dies beispielweise viele hochfeste Aluminiumlegierungen. Wird eine Verbindung verschiedener Metalle gewünscht, etwa Aluminium und Kupfer, verschärft sich das Problem noch: In der Regel entstehen aus der Schmelze stark festigkeitsmindernde, intermetallische Phasen. Am Fraunhofer IWS werden daher gezielt Fügeverfahren weiterentwickelt, die eine Schmelze vermeiden und so diese Probleme umgehen. Unser primärer Fokus liegt dabei auf den Verfahren Rührreibschweißen, Laserstrahllöten, Laserinduktionswalzfügen sowie dem elektromagnetischen Pulsfügen, für die wir Prozessentwicklungen, Prototypschweißungen und systemtechnische Weiterentwicklungen anbieten.

**ABTEILUNGSLEITER**

**PROF. BERNDT BRENNER**

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



**BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2012**

- |  |    |
|--|----|
| 1. Lasergeschweißte Leichtbauprofile in Integral-Mischbauweise                             | 82 |
| 2. Flexible Anlagenkonzepte für das Fügen im Behälterbau                                   | 84 |
| 3. Verbesserte Prozessstabilität durch hochfrequente Strahloszillation                     | 86 |
| 4. Aushärtbare Aluminiumbleche großer Dicke qualitätsgerecht schweißen                     | 88 |
| 5. Verbesserung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter torsionsbelasteter Bauteile  | 90 |
| 6. Organophile struktuierte Metalloberflächen für reproduzierbare und langlebige Klebungen | 92 |

**GRUPPENLEITER SCHWEISSEN**

**DR. JENS STANDFUSS**

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



**GRUPPENLEITERIN KLEBEN**

**DR. IRENE JANSEN**

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



**GRUPPENLEITER**

**SONDERFÜGEVERFAHREN**

**DR. GUNTHER GÖBEL**

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





# LASERGESCHWEISSTE LEICHTBAUPROFILE IN INTEGRAL-MISCHBAUWEISE

## DIE AUFGABE

Um die Vorgaben zur CO<sub>2</sub>-Ausstoß-Reduzierung in der Fahrzeugentwicklung künftig erfüllen zu können, sind unter anderem verstärkte Maßnahmen zum Karosserie-Leichtbau erforderlich. Für crashrelevante Bauteile kommen heute entweder Stahlsorten mit höchster Festigkeit und hohem Energieaufnahmevermögen oder Leichtmetalllegierungen mit niedrigem spezifischem Gewicht zum Einsatz. Mit der derzeit üblichen differenziellen Monomaterialbauweise ist das Potenzial für weitere Gewichtsreduzierungen bei gleicher Bauteilbelastbarkeit aber beschränkt.

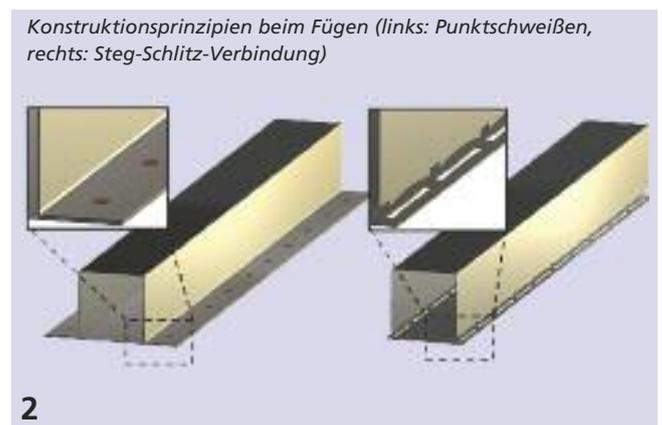
Die Verwendung innovativer Laserstrahlschweißtechnologien gestattet die Umsetzung neuartiger Konstruktionsprinzipien, welche eine weitere signifikante Gewichtseinsparung ohne Beeinträchtigung der Bauteilbelastbarkeit ermöglichen und zudem eine hohe Wirtschaftlichkeit in der Fertigung sichern. Ansatzpunkt war die Entwicklung einer neuen belastungsangepassten Crashprofil-Hybridbauweise, durch die Kombination von lasergerechter Integralbauweise und Metallmischbauweise. Zur effektiven Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials ist dabei eine rechnerische Auslegung der Bauteil- und Fügegeometrien mit Hilfe der FE-Crashsimulation unerlässlich.

Bei der Entwicklung wurden folgende Ziele verfolgt:

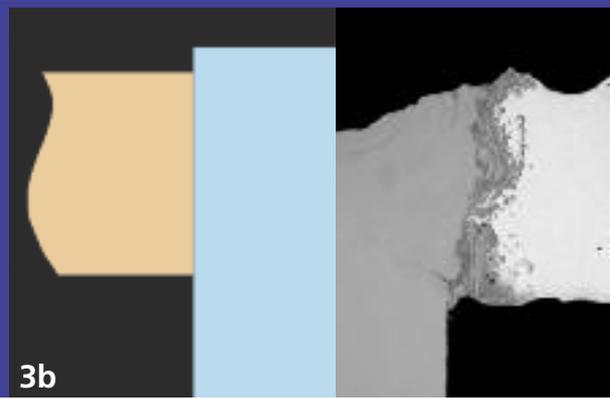
- Reduzierung des Bauteilgewichts im Vergleich zu konventionell geschweißten Crashstrukturen
- Erhaltung bzw. Steigerung der Crashbelastbarkeit
- optimierte Gestaltung der Crashbauteile mit Hilfe der FE-Crashsimulation

## UNSERE LÖSUNG

Die konventionelle Differenzialbauweise mit Widerstandspunktschweißungen erfordert relativ breite Fügeflansche mit Überlappstoß, auf welche unter Umständen bereits bis zu 20 % der gesamten Bauteilmasse entfallen können. Durch Nutzung des Laserstrahlschweißens kann eine neuartige integrale Steckbauweise realisiert werden (Abb. 2). Mit Hilfe der FE-Simulation werden, abhängig von der Bauteilbelastung, geeignete Werkstoffe für die Einzelkomponenten ausgewählt sowie die Geometrien der Halbzeuge und der Fügestelle ausgelegt.



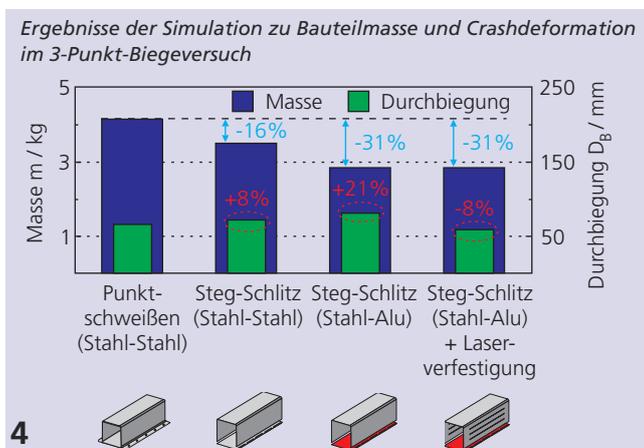
Zum Verschweißen der Steg-Schlitz-Verbindungen kommt das Laserstrahl-Remoteschweißen zum Einsatz. Über die laterale Strahlauslenkung wird die Breite der Schmelzzone eingestellt. Damit ist, in Abstimmung mit den übrigen Prozessparametern, sowohl ein Vollanschluss für Monomaterialbauweise (z. B. Stahl-Stahl, Abb. 3a) als auch ein selektives Aufschmelzen des Stegmaterials für Mischverbindungen (Stahl-Aluminium, Abb. 3b) realisierbar.



## ERGEBNISSE

Mit Hilfe der FE-Crashsimulation (PAM CRASH, Schalenmodell) erfolgte für ein Demonstratorerteil (Abb. 1 und 2) eine Optimierung der Bauteilkonstruktion mit der Zielstellung eines minimalen Bauteilgewichts bei maximaler Belastbarkeit. Mit Hilfe der integralen Steckbauweise konnte dabei durch die Eliminierung der Fügeflansche eine Gewichtseinsparung von 16 % im Vergleich zur punktgeschweißten Referenzbaugruppe erreicht werden. Über die zusätzliche Substitution des Stahl-Deckbleches durch ein Aluminiumblech könnte die Bauteilmasse sogar um 31 % verringert werden.

Die Abb. 4 zeigt dazu die Ergebnisse der Crashsimulation einer 3-Punkt-Biegebelastung für verschiedene Bauweisen. Die Steg-Schlitz-Profile in Stahl-Stahl-Ausführung zeigen demnach eine vergleichbare Durchbiegung in Relation zum punktgeschweißten Referenz-Profil. Die verminderte Struktursteifigkeit der Stahl-Aluminium-Konstruktion (Steg-Schlitz/Stahl-Alu) kann über die zusätzliche Einbringung lokaler Verfestigungsstrukturen in die Stegbleche des Stahl-U-Profils kompensiert werden (Steg-Schlitz/Stahl-Alu + Laserverfestigung).



Beim Laserfestigen wird über ein Laserumschmelzhärten die Werkstofffestigkeit in der plastischen Deformationszone lokal angehoben (siehe Fraunhofer IWS »Lokale Laserverfestigung« im Jahresbericht 2009 auf Seite 38/39).

Mit der lasergeschweißten integralen Mischbauweise werden vielfältige Einsparungspotenziale erschlossen. Durch die Eliminierung der Fügeflansche wird neben der signifikanten Gewichtsabnahme auch eine erhebliche Reduzierung des Bauraumes erreicht. Infolge der Realisierung von Linearverbindungen wird dabei eine deutliche Steigerung der spezifischen Bauteilsteifigkeit im Vergleich zur punktgeschweißten Konstruktion erzielt. Zudem ermöglicht die Verwendung des Laserstrahlschweißens (einseitige Zugänglichkeit ausreichend) eine sehr kompakte Bauteilkonstruktion und garantiert eine hohe Wirtschaftlichkeit in der Fertigung.

- 1 Lasergeschweißtes Leichtbauprofil in Integral-Mischbauweise
- 3 Schliffbild und Prinzipskizze von Steg-Schlitz-Verbindungen
  - a) Stahl-Stahl
  - b) Aluminium-Stahl

## KONTAKT

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





# FLEXIBLE ANLAGENKONZEPTE FÜR DAS FÜGEN IM BEHÄLTERBAU

## DIE AUFGABE

Ein wesentlicher Produktionsschritt bei der Herstellung von Wärmetauschern ist das Fügen von Rohren in Wände oder Böden. Für typische Größen fallen in Industriewärmetauschern oft mehrere tausend derartiger Schweißnähte an, so dass die verwendete Fügetechnik einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten der Herstellung hat. Gerade für kundenspezifische Kleinserien herrscht hier jedoch noch ein hohes Maß an manuellen Arbeitsschritten vor, was auf häufig wechselnde Schweißgeometrien, schwer erfassbare Lagetoleranzen und Materialkombinationen zurückzuführen ist. Somit besteht hier ein großes Potenzial, Produktionskosten durch Automatisierung zu senken. Für Großserien existieren zwar Spezialanlagen, diese weisen jedoch nur einen sehr eingeschränkten Anwendungsbereich auf. Zielführend gerade für kleine und mittelständische Unternehmen wäre daher ein Anlagenkonzept, das sowohl die erforderlichen Schritte zum automatisierten Orbitalschweißen von Wärmetauscher-Rohren kostengünstig umsetzen kann, das aber auch für weitere Aufgaben wie Fräs-, Roll- und Schweißarbeiten einsetzbar ist.

## UNSERE LÖSUNG

Als Basis wurde eine parallelkinematische Pentapod-Bewegungsmaschine ausgewählt, die als CNC- und Rührschweißanlage am Markt verfügbar ist, Abb. 1. Zusätzlich wurde eine handelsübliche Orbitalschweißpistole so modifiziert, dass diese von der Anlage aufgenommen werden kann.

Weiterhin wurde ein Bilderkennungssystem integriert, welches selbstständig das Maschinenkoordinatensystem auf die reale Lage eines Wärmetauscher-Rohrbodens ausrichten kann. Ein aufwändiges Positionieren der meist massereichen Wärme-

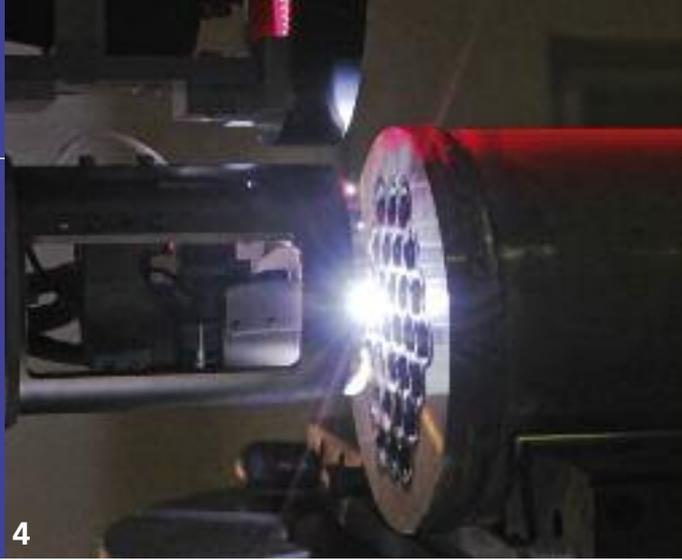
tauscher entfällt, die Anpassung der Koordinatensysteme kann dank der 3D-Fähigkeit der Pentapod-Anlage sehr einfach realisiert werden. Geschweißt wird nun auf Basis von vorhandenen CAD-Daten – die ungefähre Lage aller Rohr-Rohrbodenverbindungen ist damit bekannt.

Verzüge oder Lageabweichungen werden zusätzlich über die Bilderkennung erfasst und die Werkzeugposition automatisch vor jedem beginnenden Schweißprozess auf eine Genauigkeit von  $\pm 0,03$  mm korrigiert, so dass jedes Rohr mit optimalen Bedingungen gefügt werden kann.

Ein positiver Nebeneffekt der bildbasierten Bauteilerkennung und -ausrichtung ist das vereinfachte Qualitätsmanagement: Jede Schweißnaht kann automatisch per Foto dokumentiert und mittels geeignetem Auswertalgorithmus auf optisch erkennbare Nahtimperfectionen (Bindefehler usw.) kontrolliert werden.

## ERGEBNISSE

Das am Fraunhofer IWS entwickelte Erweiterungskonzept der Pentapod-Anlage wurde an Wärmetauschermodellen von Industriekunden experimentell geprüft, Abb. 2 bis 4. Dabei konnte die 3D-Fähigkeit der Maschine und ein Bilderkennungssystem erfolgreich genutzt werden, um ein aufwändiges manuelles Positionieren der Bauteile im Vorfeld zu vermeiden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhebliche Vereinfachung der Fügeaufgabe durch Automatisierung des Positionier- und Schweißprozesses erreicht werden konnte. Ebenso konnte nachgewiesen werden, dass das System auch geeignet ist, die hergestellten Rohr-Rohrboden-Schweißverbindungen zu dokumentieren und auf optisch erkennbare Schweißnahtfehler zu kontrollieren.



Bei der Entwicklung wurde darauf geachtet, dass die Erstellung des Maschinenarbeitsprogramms aus CAD-Daten getrennt von der späteren Schweißaufgabe realisiert werden kann. Die Rüstzeiten für derartige Schweißaufgaben konnten so gegenüber dem bisherigen Stand der Technik extrem reduziert werden.

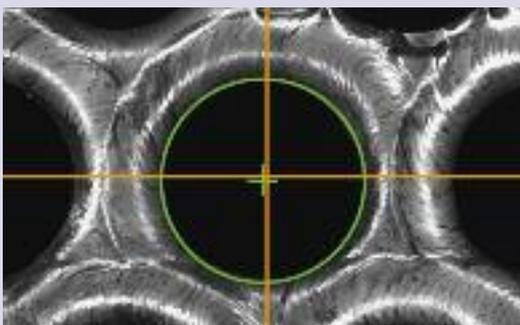
Ein weiterer Vorteil der Lösung ist ihre große Flexibilität: Ein Anwender wird in die Lage versetzt, in der gleichen Aufspannung mechanische Vor- oder Nacharbeiten an den Bauteilen direkt mit dem System auszuführen, was weitere Anlagentechnik, Rüstkosten und Platz spart. Dazu muss lediglich ein simpler Werkzeugwechsel vom Orbitalschweißkopf auf einen Fräser erfolgen, was ebenfalls automatisiert durchgeführt werden kann. Die leichte Erweiterbarkeit des Pentapod-Systems und seine Fähigkeit, auch kraftgeregelte Prozesse durchzuführen, erlaubt zudem auch eine Nutzung für Prozesse wie Rührreibschweißen oder Festwalzen.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Investkosten besteht somit gerade für kleine und mittelständische Unternehmen eine Möglichkeit, mehrere Anwendungsfelder mit nur einem Basissystem abzudecken.

Ein Teil der Arbeiten wurde finanziert aus Mitteln der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen.

- 1 *Pentapod-Parallelkinematik mit Laborsystem*
- 2 *Neuartiges Schweißsystem für Rohr-Bodenverbindungen aus kombinierten Sensor- und Schweißkopf*
- 4 *Prozessbild Schweißvorgang am Wärmetauscher*

Softwareseitig erkannte Bauteilgeometrie



3

#### KONTAKT

Dr. Gunther Göbel  
 Telefon: +49 351 83391-3211  
[gunther.goebel@iws.fraunhofer.de](mailto:gunther.goebel@iws.fraunhofer.de)





# VERBESSERTE PROZESSSTABILITÄT DURCH HOCHFREQUENTE STRAHLOSZILLATION

## DIE AUFGABE

Festkörperlaser haben wegen ihrer einfachen Integrierbarkeit in die industrielle Fertigung entscheidende Vorteile gegenüber konventionellen Schweißlasern. Insbesondere die Einführung der hochbrillanten Festkörperlaser vor einigen Jahren hat seither den Markt deutlich beeinflusst. Infolge von Leistungssteigerung verfügbarer Quellen konnten unter Ausnutzung der brillanten Strahlqualität völlig neue Prozesse entwickelt werden. Die wesentliche Aufgabenstellung bestand darin, die Nachteile in der Prozessstabilität, wie stark variierende Einschweißtiefen (Spiking) und vermehrtes Spritzen, hervorgerufen durch die hohe Strahlqualität, zu beseitigen. Eine verbesserte Prozessstabilität beim Laserschweißen mit brillanten Festkörperlasern würde eine Reihe bedeutender Anwendungsfelder eröffnen und die Effizienz in der industriellen Fertigung steigern.

## UNSERE LÖSUNG

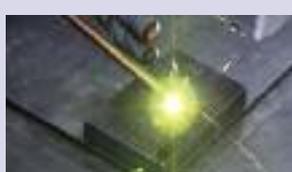
Die hohe Leistungsdichte der brillanten Festkörperlaser ermöglicht sehr schlanke und tiefe Nähte, verursacht aber auch weitaus höhere Verdampfungstemperaturen in der Dampfkapillare als beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Laser. Daraus resultiert wiederum ein deutlich erhöhter Dampfdruck innerhalb der

Kapillare. Da sich eine extrem steile und schlanke Dampfkapillare ausbildet, trifft die Laserstrahlung unter einem großen Einfallswinkel auf die Kapillarfront auf und führt so zu instabilen Verhältnissen. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei Schweißgeschwindigkeiten im Bereich von 1 bis 4 m min<sup>-1</sup> zeigen für Aluminium als auch für Stahl eine starke Bewegung der Position der Kapillaröffnung, wodurch unterschiedliche Schmelzflussraten auftreten und sich immer wieder Spritzer ablösen können.

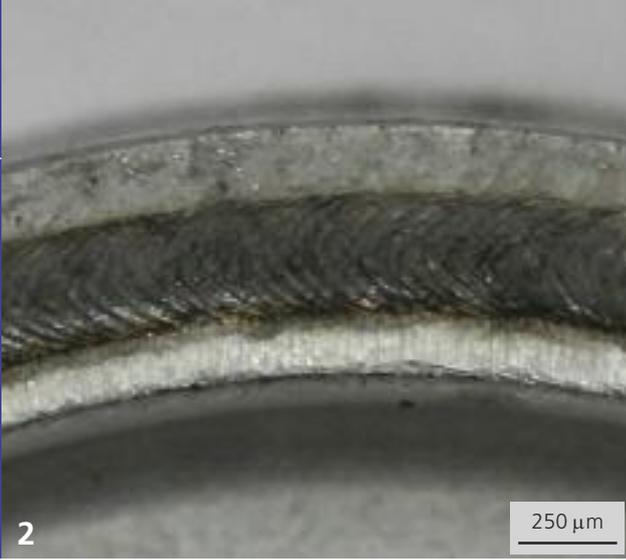
Die zu beobachtende Schmelzbadbewegung ist eine weitere Ursache für vermehrtes Spritzen. Unregelmäßig ausströmender Metaldampf wird hochdynamisch in alle Richtungen entlang der Laserachse abgelenkt. Zudem rufen starke Wechselwirkungen zwischen Metaldampf und Laserstrahlung zeitlich und räumlich inhomogene Einkoppelbedingungen hervor. Dies erklärt die stark variierenden Einschweißtiefen.

Eine deutliche Verbesserung der Prozessstabilität beim Laserschweißen mit brillanten Festkörperlasern konnte das Fraunhofer IWS durch den Einsatz der hochfrequenten Strahloszillation erzielen (Abb. 3). Bei dieser Technologie wird der Laserstrahl über schnell verkippbare Spiegel abgelenkt und auf das Bauteil projiziert.

*Vergleich der Prozessstabilität und Spritzerneigung für Stahl und Aluminium beim Laserschweißen mit brillanten Festkörperlasern ohne (jeweils links) und mit (jeweils rechts) hochfrequenter Strahloszillation ( $v_s = 1 \text{ m/min}$ ;  $P_L = 1800 \text{ W}$ ; Kreis =  $200 \mu\text{m}$ ;  $f = 4 \text{ kHz}$ )*



3



## ERGEBNISSE

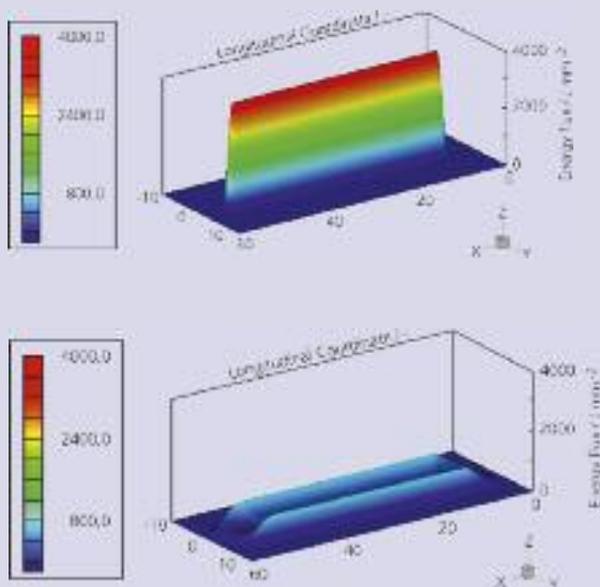
Ein im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts WELDIMA entwickelter 2D-Scanner erreicht für ein hochdynamisches Arbeitsfeld von 1 mm<sup>2</sup> maximale Oszillationsfrequenzen von 4 kHz. Angesteuert wird der Scanner von einer eigens entwickelten 2D-Ansteuersoftware mit automatischer Amplitudenkorrektur. Eine derartige Amplitudenkorrektur ist gerade bei hochfrequentem Betrieb unabdingbar, da jeder Scanner aufgrund von Massenträgheit einer frequenzabhängigen Amplitudendämpfung unterliegt. Ohne Korrektur würde sich mit zunehmender Oszillationsfrequenz die tatsächliche Auslenkung des Laserstrahls gegenüber der eingestellten Ist-Amplitude verringern.

Zur Verbesserung der Prozessstabilität beim Laserschweißen mit brillanten Festkörperlasern hat sich die zweidimensionale

hochfrequente Strahloszillation in Form von Lissajous-Figuren als äußerst günstig erwiesen. Mit Auslenkamplituden von 200 bis 400 μm und Oszillationsfrequenzen von 3 bis 4 kHz konnten für Schweißgeschwindigkeiten von 1 bis 4 m min<sup>-1</sup> nahezu spritzerfreie Schweißprozesse beobachtet werden. Die Nahtqualität hinsichtlich Nahtaussehen und Porosität konnte zudem gegenüber nicht gependelten Schweißungen signifikant gesteigert werden.

Die Prozessberuhigung durch hochfrequentes Strahloszillieren kann durch zwei Effekte erklärt werden. Zum einen reduziert sich die eingebrachte Energie pro Fläche auf Grund verringerter Wechselwirkungszeit mit dem Material und lässt dadurch die Verdampfungstemperaturen absenken (Abb. 4). Zum anderen führt die Aufweitung der Dampfkapillare zu einem reduzierten Dampfdruck innerhalb der Kapillare, so dass eine deutliche Beruhigung der Schmelzbaddynamik erreicht werden kann.

*Berechneter Energieeintrag beim Laserschweißen mit brillanten Festkörperlasern (oben) ohne (unten) mit hochfrequenter Strahloszillation  
( $v_s = 1 \text{ m/min}$ ;  $P_L = 1800 \text{ W}$ ; Kreis =  $200 \text{ μm}$ ;  $f = 4 \text{ kHz}$ )*



4

*1/2 Äußeres Nahtaussehen von Aluminium-Schweißungen ohne (1) und mit (2) hochfrequenter Strahloszillation*

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Mathias Krätzsch  
Tel.: +49 351 83391-3435  
[mathias.kraetzsch@iws.fraunhofer.de](mailto:mathias.kraetzsch@iws.fraunhofer.de)



# AUSHÄRTBARE ALUMINIUMBLECHE GROSSER DICKE QUALITÄTSGERECHT SCHWEISSEN

## DIE AUFGABE

Für Leichtbauanwendungen sind ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierungen mit hoher spezifischer Festigkeit sehr gefragt. Dabei sind Schweißanforderungen für Blechdicken bis ca. 8 mm durch Strahlschweißverfahren, z. B. das Laserstrahlschweißen, verfahrenstechnisch abbildbar. Beim Schweißen größerer Schweißtiefen stoßen Strahlschweißverfahren jedoch auf bisher unüberwindliche Anwendungsgrenzen wie z. B.

- fehlende technische Lösungsmöglichkeit,
- unzureichende Prozesssicherheit durch Heißrissbildung,
- hohe Investitionskosten.

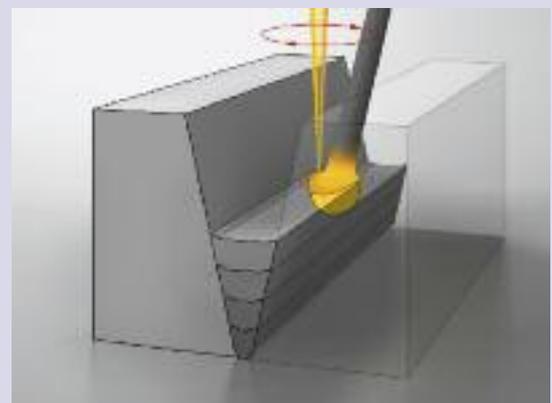
Aus Sicht der Schweißmetallurgie und Prozesssicherheit muss Schweißzusatzwerkstoff (SZW) verwendet werden, um das Auftreten von Heißrissen zu vermeiden und den Festigkeitsunterschied zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut zu verringern. Bisher gelang es jedoch nur bis zu einer Blechstärke von 5 mm, genügend Schweißzusatzwerkstoff auch bis in die Schweißnahtwurzel zu transportieren. Zudem sind die zum Schweißen hoher Wandstärken erforderlichen Laser oder Elektronenstrahlquellen sehr kostenintensiv. Am Fraunhofer IWS wurde deshalb ein Mehrlagen-Engstspalt-Schweißprozess (MES) entwickelt, der diese Nachteile überwindet und sich damit als neuer Lösungsansatz für das Schweißen größerer Wandstärken anbietet.

## UNSERE LÖSUNG

Für das Verfahren wird ein Single-Mode-Faserlaser mit brillanter Strahlqualität (SPP: 0,4 mm mrad) und vergleichsweise geringer Laserleistung ( $P_L \leq 5 \text{ kW}$ ) eingesetzt. Der sehr gut fokussierbare Strahl kann vollständig bis zum Fugengrund in

eine Engspaltfuge mit sehr großem Aspektverhältnis eingeleitet werden. Die homogene Einnischung der Legierungselemente erfolgt in Kombination mit einer Strahloszillation, die ein gezieltes Querschlagen des Strahls mit hoher Scanfrequenz innerhalb der Fuge erlaubt (Abb. 1).

Verfahrensprinzip des Laserstrahlschweißens mit Strahloszillation



## ERGEBNISSE

Durch die extrem gute Fokussierbarkeit der verwendeten Laserstrahlung ist es gelungen, im Mehrlagenverfahren sehr schmale Schweißnähte (bis 3 mm) mit einem sehr hohen Aspektverhältnis (Tiefen derzeit bis 30 mm) zu erzeugen (Abb. 2). Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Prozessstabilität aus. Auch bei einer großen Anzahl von Einzellagen kann eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleistet werden. Die Gefahr der Heißrissbildung oder des Auftretens von Bindefehlern ist gering.

Als sehr vorteilhaft erweist sich die moderate Energieeinbringung durch die geringe Laserleistung (kleiner 5 kW) im Ver-



3

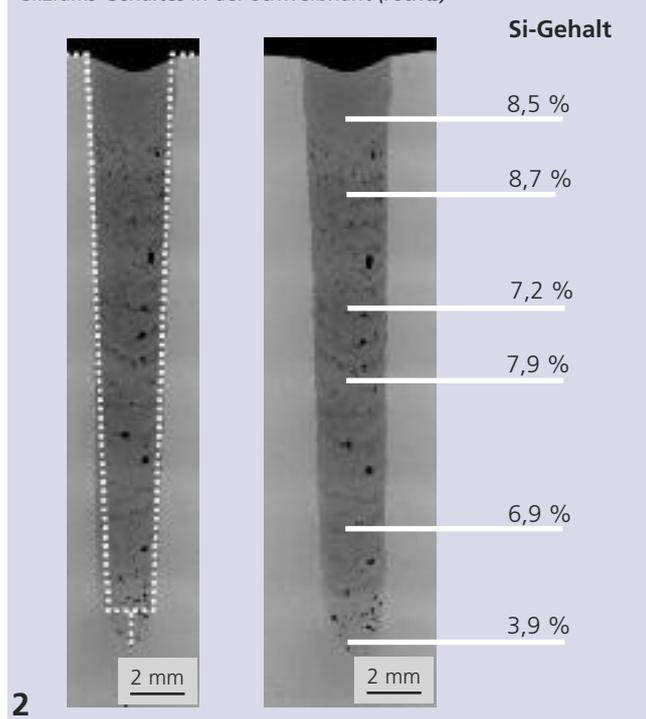
gleich zu konventionell geschweißten Dickblechverbindungen (Abb. 3). Die physikalisch bedingten Besonderheiten des Werkstoffs Aluminium wie hohe Wärmeleitfähigkeit, große Wärmekapazität und der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient minimieren zwar im Vergleich zu anderen Werkstoffen die Größe des möglichen Prozessfensters, sind jedoch aufgrund des in seiner Größe durch den oszillierenden Laserstrahl steuerbaren Schmelzbades im Mehrlagenprozess weniger wirksam als für klassische Tiefschweißungen.

Insbesondere der in den Spalt eingebrachte Schweißzusatzwerkstoff führt zu einer chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes, die über die gesamte Schweißtiefe eine Heißrissbildung ausschließt. Die Silizium-Elementverteilung ist dabei von der Schweißnahtoberseite bis zur Schweißnahtwurzel sehr gleichmäßig (Abb. 2).

Im Mittel beträgt die Silizium-Konzentration ca. 7 % über die Tiefe der Schweißnaht und liegt damit um ein Vielfaches höher als bei konventionellen Stumpfstoßschweißungen. Die sehr dünnflüssige Schmelze ermöglicht ein besseres Entgasen, wodurch die für Aluminium typische Porosität reduziert wird. Große Prozessporen, die bei Tiefschweißprozessen mit sehr hoher Laserleistung entstehen, können nahezu vollständig vermieden werden. Es entsteht eine Fügeverbindung, die eine sehr hohe Schweißnahtqualität aufweist und einen geringen Bauteilverzug sicherstellt.

Die Forschungsarbeiten werden von der AiF im Rahmen des Forschungsvorhabens »Laser Message« (17404 BR) gefördert. Zukünftige Entwicklungsanstrengungen sind auf die weitere Porenverringern, noch größere Schweißtiefen und die Erweiterung der Werkstoffpalette ausgerichtet. Mit dem erfolgreichen Abschluss des Projektes werden die wesentlichen Anwendungsgrenzen für das Dickblechschweißen von ausscheidungshärtbaren Aluminium-Legierungen überwunden.

*Mehrlagenschweißnaht am Beispiel einer Aluminium Legierung (links, weiß gepunktet die Nahtvorbereitung); Verteilung des Siliziums-Gehaltes in der Schweißnaht (rechts)*



3 *MES-Prozess an einer 30 mm dicken Aluminiumplatte*

#### KONTAKT

Dr. Dirk Dittrich  
 Telefon: +49 351 83391-3228  
[dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de](mailto:dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de)





1

## VERBESSERUNG DER SCHWINGFESTIGKEIT LASERSTRAHLGESCHWEISSTER TORSIONS- BELASTETER BAUTEILE

### DIE AUFGABE

Die Umsetzung aktueller Leichtbaustrategien, insbesondere bei stoffschlüssigen Verbindungen im Antriebsstrang, erfordert genaue Kenntnisse über die Beanspruchbarkeit der gefügten Strukturen. Häufig handelt es sich dabei um Welle-Nabe-Verbindungen, bei denen Radial- oder Axial-Rundnähte mittels Laserstrahlschweißen hergestellt werden. Die Herausforderungen sowohl bei der konstruktiven Gestaltung als auch bei der Verfahrensentwicklung bestehen darin, einerseits prozesssichere Schweißtechnologien einzusetzen, mit denen die Festigkeits- und Zähigkeitsanforderungen an die Schweißnaht bestmöglich erfüllt werden, und andererseits über die Werkstoffauswahl sowie die Minimierung der Nahtlänge und der Einschweißtiefe einen möglichst geringen Materialeinsatz zu erreichen. Die derzeit maßgeblichen Regelwerke sehen bisher keinen rechnerischen Nachweis der Schwingfestigkeit für den Fall torsionsbelasteter Rundnähte vor, so dass die Bewertung ausschließlich auf der Basis von Schwingversuchen erfolgen kann. Zur Reduzierung des Kosten- und Zeitaufwands für Tests an kompletten Baugruppen, z. B. auf Getriebeprüfständen oder im Testbetrieb von Fahrzeugen, sind Versuche im Labormaßstab gefordert, bei denen ausschließlich die Schweißnaht auf Schwingfestigkeit geprüft wird. Damit wird in einem möglichst frühen Entwicklungsstadium bereits eine Optimierung der Schweißtechnologie unter Berücksichtigung möglichst betriebslastennaher Beanspruchungssituationen erreicht.

### UNSERE LÖSUNG

Um die bestehende Lücke zwischen material- und kostenintensiven Baugruppenprüfungen und Laborversuchen an reinen Materialproben zu schließen, wurde am IWS ein

Torsions-Axial-Prüfsystem konzipiert und aufgebaut. Mit dieser Maschine können Drehmomente bis zu  $\pm 8 \text{ kN m}$  und Kräfte bis  $\pm 40 \text{ kN}$  mit Frequenzen bis zu  $50 \text{ Hz}$  aufgebracht werden, womit sich überlagerte Beanspruchungsfälle, wie sie häufig im Antriebsstrang auftreten, unter Laborbedingungen umsetzen lassen. Die aktuelle Forschungsarbeit ist darauf ausgerichtet, Strategien zur Bewertung der Schwingfestigkeit torsionsbelasteter Schweißverbindungen zu erarbeiten und damit eine zuverlässige Basis für die Bewertung der Ausfallsicherheit gefügter Strukturen zu schaffen. Da bei realen Bauteilen, z. B. Wellen mit aufgeschweißten Zahnrädern, eine direkte Lasteinleitung, wie sie im Betrieb auftritt, im Prüfsystem oft nur eingeschränkt möglich ist, empfiehlt es sich, bauteilähnliche Prüfkörper zu entwickeln (Abb. 1).

Bei diesen werden die Schweißnaht und deren Umgebung hinsichtlich Geometrie, Steifigkeit und Wärmeableitungsbedingungen möglichst genau dem Realbauteil nachgebildet und die Einspannung in das Prüfsystem wird so realisiert, dass die Kraft- und Momenteinleitung in die Probe der realen Beanspruchungssituation im gefügten Bereich möglichst genau entspricht. Weiterhin wird festgelegt, wie der im Allgemeinen mehrachsige Spannungszustand in der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone durch ein Prüfprogramm optimal abgebildet werden kann. Mithilfe von Finite-Elemente-Analysen findet ein Abgleich der Beanspruchungssituation im Bauteil unter Einsatzbedingungen mit dem Prüfkörper unter der Belastung im Prüfstand statt. Das Prüfprogramm (z. B. wirkende Kräfte und Momente, Phasenlage, Spannungsverhältnisse) wird auf Grundlage dieser Rechnungen so gewählt, dass die lokalen Beanspruchungsmaxima im Prüfkörper den Werten an der am höchsten beanspruchten Stelle des Bauteils entsprechen. Die am IWS im Einsatz befind-



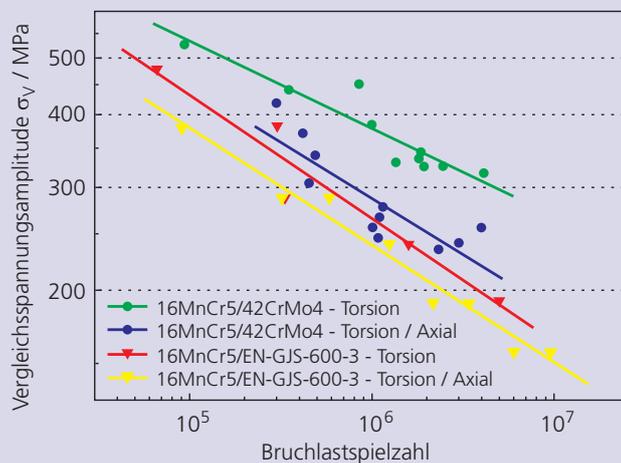
liche Anlage (Abb. 2) erlaubt die Durchführung von Betriebsfestigkeitsversuchen mittels gestufter Lastkollektive oder Einstufenversuchen bei überlagerten Zug- und Druck-Mittellasten. Als zeit- und kosteneffektive Variante für vergleichende Bewertungen der Schwingfestigkeit von Rund-Schweißnähten im Sinne einer Prozessparameter-Studie hat sich der Einsatz von Sonderverfahren (Treppenstufenverfahren oder Abgrenzungsverfahren) bewährt.

## ERGEBNISSE

In einer Serie von Torsionsversuchen mit speziellen Welle-Scheibe-Prüfkörpern (Abb. 1) wurde der Einfluss des Wellenwerkstoffs sowie die Wirkung einer zusätzlich zur Torsion wirkenden Axialkraft, die in der Schweißnaht eine Biegebeanspruchung bewirkt, auf die Schwingfestigkeit untersucht. Für zwei Werkstoffpaarungen – Vergütungsstahl/Einsatzstahl sowie Guss mit Kugelgraphit/Einsatzstahl – wurden mittels Laserstrahlschweißen Axial-Rundnähte gleicher Geometrie hergestellt, wobei jeweils ein Schweißzusatzwerkstoff Verwendung fand. Anhand der Wöhlerkurven im Zeitfestigkeitsbereich (Abb. 3) lässt sich erkennen, dass für die

schwer schweißbare Verbindung des Gusswerkstoffs EN-GJ-600-3 mit dem Einsatzstahl 16MnCr5 relativ hohe Schwingfestigkeiten erreicht werden, die nicht wesentlich unter denen für Schweißnähte mit dem Vergütungsstahl 42CrMo4 als Wellenwerkstoff liegen. Selbst mit einem zusätzlich wirkenden Biegeanteil auf die Schweißnaht konnte durch eine gezielte Optimierung der Schweißparameter eine Schwingfestigkeit erreicht werden, bei der die Gussvariante noch den Forderungen an die Betriebsfestigkeit entspricht. Durch die enge Verzahnung von Schweißprozessentwicklung und betriebslastennaher Prüfung können den Kunden werkstoff- und beanspruchungsgerechte Lösungen angeboten werden.

Abhängigkeit der Bruch-Schwingspielzahl von der Vergleichsspannungsamplitude (Wöhler-Kurve im Zeitfestigkeitsbereich) für Torsions- und Torsions-Axial-Versuche an Prüfkörpern mit Axial-Rundnähten aus 16MnCr5/42CrMo4 und 16MnCr5/EN-GJS-600-3



- 1 Prüfkörper mit Axial-Rundnaht
- 2 Torsions-Axial-Prüfmaschine (Detail)

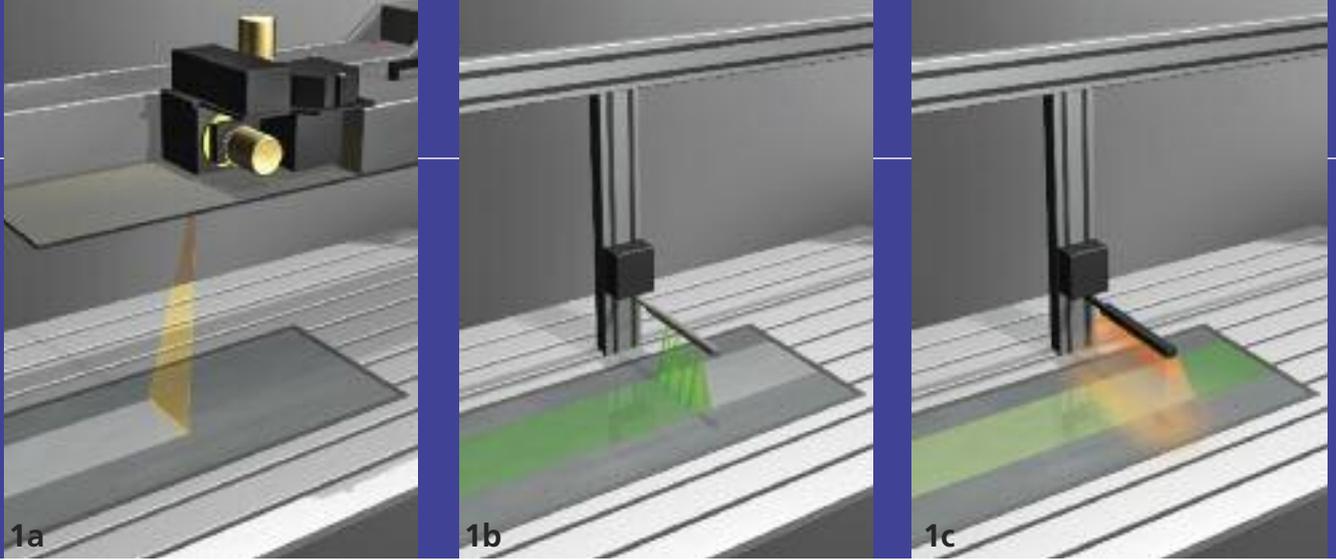
## KONTAKT

Dr. Jörg Bretschneider

Tel.: +49 351 83391-3217

joerg.bretschneider@iws.fraunhofer.de





# ORGANOPHILE STRUKTURIERTE METALLOBERFLÄCHEN FÜR REPRODUZIERBARE UND LANGLEBIGE KLEBUNGEN

## DIE AUFGABE

Leichtbau, Energieeffizienz und umweltfreundliche Prozesse sind in vielen Branchen angestrebte Ziele. Leichtbaukonzepte im Bereich der Automobil- sowie Luft- und Raumfahrtindustrie verlangen verstärkt den Einsatz von Metallen, wie Aluminium- und Titanlegierungen. Beim Einsatz der Klebtechnik kommt es darauf an, neben einer hohen Anfangsfestigkeit vor allem langzeitstabile Verbindungen zu erzielen. Für reproduzierbare Klebungen muss die Oberfläche besonders beim Einsatz kalthärtender Klebsysteme vorbehandelt werden.

Neben den konventionellen, oftmals nasschemischen Vorbehandlungen der Leichtmetalle, setzten sich Plasma- und in der letzten Zeit auch Laserbehandlungen in der Industrie mehr und mehr durch. Die Laserbehandlung ist lokal und kann für nahezu alle Fügmaterialien eingesetzt und gut skaliert werden. So können gewünschte Oberflächentopographien bzw. Rauheiten erreicht werden. Das trockene Verfahren kann mit hohen Geschwindigkeiten in automatisierten Prozessschritten betrieben werden. Anders als bei vergleichbaren Verfahren sind keine zusätzlichen Reinigungsschritte der Oberflächen vor und nach der Laserbehandlung notwendig.

Teilweise liegt zwischen der Vorbehandlung und dem Klebprozess eine längere Zeitspanne, bedingt durch Transportvorgänge, Auslagerung von Fertigungsprozessen oder Lagerung der Bauteile. In dieser Zeit interagiert die frische und von Kontaminationen gereinigte Metalloberfläche mit den Verunreinigungen der Umgebung und der erzielte Reinigungs- und Strukturierungseffekt geht zum Teil verloren. Hier besteht Handlungsbedarf.

## UNSERE LÖSUNG

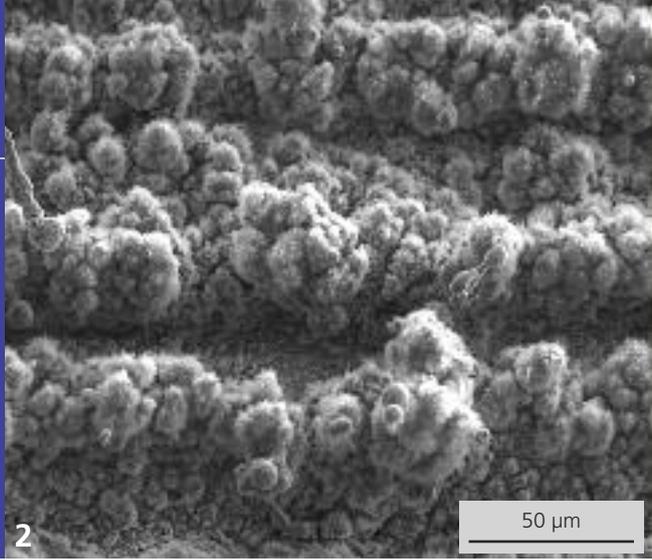
Zur Konservierung der mittels Lasertechnik gereinigten und strukturierten Oberflächen wird nach der Laserbehandlung eine Polymerschicht auf der Oberfläche abgeschieden. Durch die Laserbehandlung haftet die Polymerschicht aufgrund der mechanischen Verzahnung aber auch durch Wechselwirkung der funktionellen Gruppen des Polymers mit dem Metalloxid gut auf der Oberfläche.

Die reaktiven Metalloberflächen werden mittels Tauch- bzw. Sprühauftrag mit wasserlöslichen Polyelektrolytlösungen, bestehend aus Polyaminen, -iminen oder -carbonsäuren, beschichtet. Nach relativ schneller Trocknung der Beschichtung ist die Metalloberfläche gegen atmosphärische Einflüsse geschützt. Durch die funktionellen Gruppen des Polymers ist ein späteres Kleben sehr gut möglich.

Der Gesamtprozess ist sowohl in einer Serienfertigung als auch für vielfältige Einzelstücke ideal einsetzbar.

## ERGEBNISSE

Die Versuche wurden mit verschiedenen Aluminiumlegierungen durchgeführt. Dazu wurde unter anderem eine der typischen Knetlegierungen, AW 5457 (AlMg3), als Versuchswerkstoff herangezogen. Als Klebstoffsysteme kamen sowohl energiesparende 2K-Epoxidsysteme als auch heißhärtende 1K-Epoxide und Epoxidklebfolien zum Einsatz.

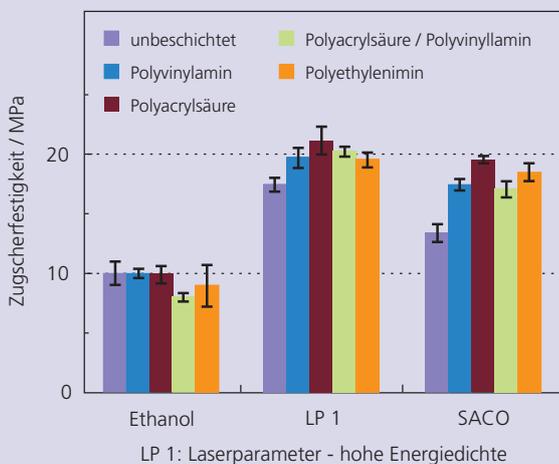


2

Unter Verwendung eines Yb-dotierten Faserlasers mit einem 2D-Scansystem und F-Theta-Optiken ließen sich definierte Rauheiten auf den Aluminiumoberflächen einstellen (Abb. 2). Durch die Strukturierung wird die wirksame Kleboberfläche vergrößert und es bildet sich eine frische, dickere und strukturierte Oxidschicht aus, die für den direkten Klebeinsatz ideal ist.

Direkt nach der Laserbehandlung erfolgt die Beschichtung. Hergestellte Klebungen zeigten eine Festigkeitssteigerung um teilweise bis zu 20 % im Vergleich zu nur laserbehandelten Proben (Abb. 3).

Abhängigkeit der Zugscherfestigkeiten von den Vorbehandlungen und Beschichtungen



3

Besonders deutlich wird die Wirkung der Kombination Laserbehandlung und Beschichtung nach verschiedenen 1000-stündigen Alterungstests. Hierbei konnte ein geringerer Festigkeitsabfall der beschichteten Proben im Vergleich zu nur laservorbehandelten Proben festgestellt werden. Zudem zeigen die beschichteten Proben im Bruchbild einen höheren kohäsiven Anteil, was einerseits auf der chemischen Wechselwirkung der Beschichtung mit den funktionellen Gruppen typischer Klebstoffsysteme und andererseits auf der mechanischen Verankerung der Beschichtung mit den makroskopischen Oberflächenrauheiten und mikroskopischen Oxid-

strukturen der Metalloberflächen basiert. Zur Simulation eines Lagerungsprozesses wurden beschichtete Proben ein halbes Jahr unter dafür typischen Bedingungen gealtert. Anschließend erfolgte deren Klebung. Die beschichteten Proben wiesen gegenüber ungealterten beschichteten Proben sogar noch einen Festigkeitsanstieg auf.

Um mögliche Reaktionen der Amingruppen mit dem Kohlendioxid der Luft abzuklären, wurden beschichtete Proben längere Zeit unter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre gelagert. Dabei konnte kein Festigkeitsverlust der Klebung festgestellt werden.

Mit dieser zweistufigen Vorbehandlungsmethode ist ein Verfahren entwickelt worden, das umweltfreundlich, energieeffizient und gesundheitlich unbedenklich Leichtmetalle und andere Werkstoffe für den Fügeprozess Kleben zeitunabhängig vorbereitet und dabei die Werkstoffe für das Kleben aktiv bleiben sowie vor Umwelteinflüssen geschützt werden.

Die Arbeiten wurden in einem AiF-Projekt (FKZ: 16532 BR), zusammen mit dem IPF Dresden (Dr. Simon) durchgeführt.

- 1 Prozessablaufschemata des entwickelten Verfahrens (Laseroberflächenvorbehandlung, Polyelektrolytauftrag und Trocknung)
- 2 REM-Aufnahme einer mittels Faserlaser strukturierten AlMg<sub>3</sub>-Oberfläche

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Tom Schiefer  
 Telefon: +49 351 463-32242  
 tom.schiefer@iws.fraunhofer.de

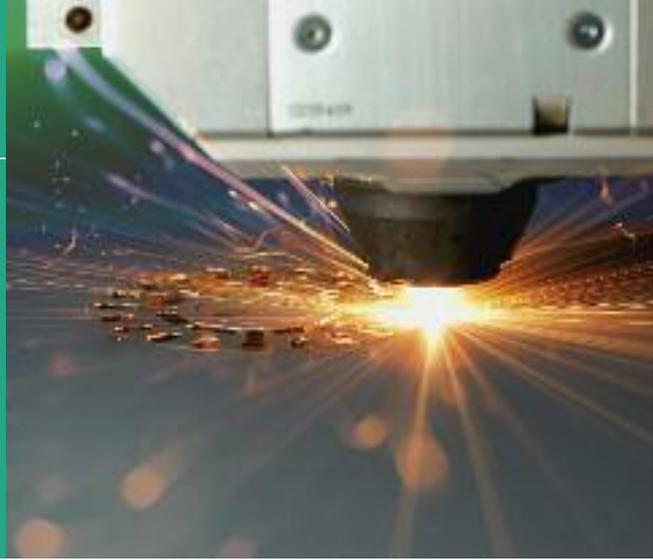


ABTEILUNGSLEITER DR. ANDREAS WETZIG



»Alles Gelingen hat sein Geheimnis, alles Mißlingen seine Gründe.«

Joachim Kaiser (\*1928), dt. Kritiker



## GESCHÄFTSFELD ABTRAGEN UND TRENNEN

**Redaktion:** Laserabtragen und -trennen ist ein sehr weit gefasstes Anwendungsgebiet innerhalb der Lasermaterialbearbeitung, weil es vom klassischen Laserschneiden bis zur Mikrobearbeitung mit Ultrakurzpulslasern reicht. Gibt es aus Ihrer Sicht Trends für neue Entwicklungen, die das gesamte Arbeitsgebiet bzw. die Lasermaterialbearbeitung als Ganzes betreffen?

**Dr. Wetzig:** Aus meiner Sicht besteht ein sehr großer Forschungsbedarf bei der »prozessketten-übergreifenden« Qualitätskontrolle. Stand der Technik ist hier, dass im Allgemeinen nach der Lasermaterialbearbeitung und in vielen Fällen erst am Ende der gesamten Prozesskette eine Qualitätskontrolle erfolgt, im schlimmsten Fall sogar indem das Bauteil zerstört werden muss. Es sind neuartige Ansätze notwendig, die unmittelbar während der Laserbearbeitung (in-situ) eine umfassende Qualitätskontrolle erlauben. Zu denken ist an die Bestimmung der Schnittbreite, der Maßhaltigkeit, der Kantenrauheit, der Gratbildung oder auch an die Bestimmung der Einschweißtiefe oder des Gefügestands. Damit wäre es möglich, eine tatsächliche Prozessreglung aufzubauen, die weit über den Stand der Technik hinausgeht. Zusammen mit den Kollegen des Geschäftsfeldes Fügen haben wir in der Vergangenheit erste industrietaugliche Regelungen von Laserschweißprozessen entwickelt. Im Augenblick sind wir dabei, diese Erfahrungen auf die Prozessreglung von Laserschneidprozessen zu übertragen, um zum Beispiel Prozessabrisse oder grobe Schneidfehler zu detektieren. Aber wir haben noch viel mehr vor, das Stichwort heißt hier »selbstlernendes« Laserbearbeitungssystem.

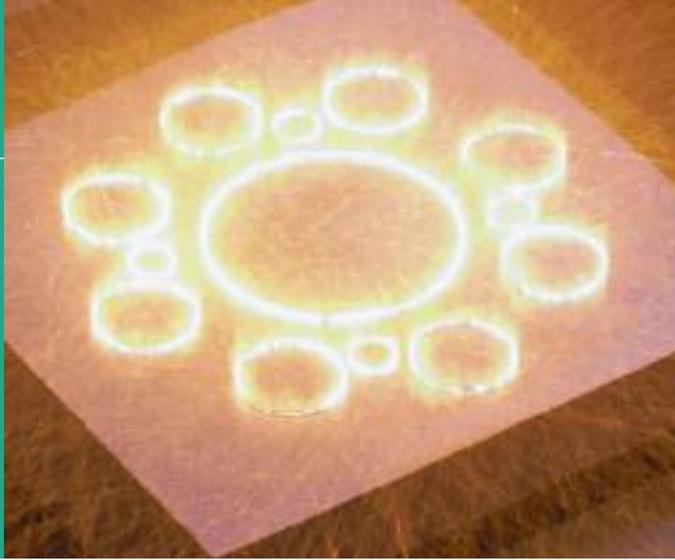
**Redaktion:** Gibt es noch weitere Trends, denen Sie innerhalb Ihres Geschäftsfeldes nachgehen werden?

**Dr. Wetzig:** Ein weiterer Trend ist die Notwendigkeit, Strahlformungswerkzeuge so weiter zu entwickeln, dass sie den ge-

stiegenen Anforderungen der Anwendungen entsprechen und den neuen Möglichkeiten moderner Laserstrahlquellen gerecht werden. Schon jetzt setzen wir erfolgreich Strahlformungssysteme ein, die auf herkömmlichen Galvanometerscannern beruhen. Zusammen mit zwei weiteren Fraunhofer-Instituten wurde uns in diesem Jahr ein fraunhoferinternes Projekt bewilligt, das es uns ermöglicht, einen völlig neuen Ansatz zu verfolgen. Im Kern geht es darum, mikrospiegelbasierte Lichtmodulatoren und vakuumgekapselte MEMS-Scanner für Anwendungen der Lasermaterialbearbeitung zu ertüchtigen. Am Ende des Projekts werden uns Strahlformungsmodule zur Verfügung stehen, die nicht nur bei der Mikrobearbeitung und beim Laserschneiden, sondern auch beim Laserschweißen und Oberflächenveredeln neue Möglichkeiten eröffnen werden.

**Redaktion:** Wie wir alle wissen hat es in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung bei hochbrillanten Festkörperlasern gegeben. Wird sich diese Entwicklung in Ihren Augen fortsetzen oder sehen Sie sogar schon neue Typen von Laserstrahlquellen am Horizont, die für die Materialbearbeitung relevant sein werden?

**Dr. Wetzig:** Bei der Entwicklung klassischer hochbrillanter cw-Festkörperlaser wird sicherlich irgendwann in technischer Hinsicht ein Endpunkt erreicht sein. Wir stellen jedoch fest, dass es immer mehr Akteure am Markt gibt, die cw-Faserlaser anbieten. Dies wird für den Endanwender auf jeden Fall von Vorteil sein, gerade wenn es um Preis, Zuverlässigkeit und Performance der Laser geht. Bei Ultrakurzpulslasern dagegen ist die Entwicklung sicherlich noch nicht abgeschlossen. Wir gehen davon aus, dass es in den nächsten Jahren Ultrakurzpulslaser mit mittleren Leistungen im kW-Bereich geben wird. Und dann sind wir als Institut wieder gefragt, vor allem wenn es darum geht, Prozess-Know-how und systemtechnische Lösungen zu entwickeln. Als Resümee bleibt mir nur noch zu sagen: Es bleibt spannend!



# KOMPETENZEN

## HIGH-SPEED-LASERBEARBEITUNG

Forschungsschwerpunkte sind verfahrens- und systemtechnische Entwicklungen für Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Dabei bildet das Prozessverständnis die Basis für die erfolgreiche Umsetzung verschiedenster Aufgabenstellungen der Technologie- und Systementwicklung in die industrielle Anwendung. Höchste Prozessgeschwindigkeiten kennzeichnen die angebotenen Verfahren und Lösungen. Das Leistungsspektrum umfasst neben der Technologieentwicklung von Remote-Prozessen zum Schweißen, Schneiden und Oberflächenbehandeln von Metallen und Nichtmetallen 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

Forschungsschwerpunkte sind Verfahrensentwicklungen auf dem Gebiet des Laserschmelzschneidens. So geht es z. B. um die Verbesserung der Schneidqualität beim Trennen mit Festkörperlasern oder um 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 Laser 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. Beispiele sind die Erzeugung von 3D-Strukturen im Sub-mm-Bereich und Flächenstrukturen an Polymeren, Metallen, Keramiken oder quarzischen und biokompatiblen Werkstoffen sowie das Reinigen mittels Lasertechnik.

## OBERFLÄCHFUNKTIONALISIERUNG

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

**ABTEILUNGSLEITER**

**DR. ANDREAS WETZIG**

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



**GRUPPENLEITER HIGH-SPEED-LASERBEARBEITUNG**

**DR. JAN HAUPTMANN**

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



**GRUPPENLEITER SCHNEIDEN**

**DR. MATTHIAS LÜTKE**

Telefon +49 351 83391-3292  
matthias.luetke@iws.fraunhofer.de



**GRUPPENLEITER**

**MIKROBEARBEITEN**

**DR. UDO KLOTZBACH**

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



**GRUPPENLEITER**

**OBERFLÄCHFUNKTIONALISIERUNG**

**PROF. ANDRÉS-FABIÁN LASAGNI**

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



## BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2012

- |   |     |
|---|-----|
| 1. Effiziente Herstellung von holografischen Prägestempeln  | 98  |
| 2. Antibakterielle Oberflächen durch Laserinterferenzstrukturierung                               | 100 |
| 3. Verlustarme elektrische Antriebe durch Laserstrahlschneiden von Elektrolech                    | 102 |
| 4. Hochflexibles Laser-Rillen und -Stanzen von digital gedruckten Umverpackungen                  | 104 |
| 5. Preiswerte Lab-on-a-chip-Systeme durch Multilagenaufbauten aus lasermikrostrukturierten Folien | 106 |
| 6. Laserinduziertes Texturieren von Kunststoff-Monofilien   | 108 |



## EFFIZIENTE HERSTELLUNG VON HOLOGRAFISCHEN PRÄGESTEMPELN

### DIE AUFGABE

Die großflächige Mikrostrukturierung von Werkstoffoberflächen stellt momentan eine der größten technologischen Herausforderungen an die Oberflächentechnik dar. Die Anwendungsfelder für derartig bearbeitete Werkstoffe sind äußerst vielfältig. Besonders gefragt sind z. B. Möglichkeiten des Produktschutzes mittels kinografischer bzw. holografischer Prägetechniken, wie sie beispielsweise für den Kopierschutz von Banknoten oder Kreditkarten verwendet werden. Eine stetig wachsende Anzahl von Herstellern hochwertiger Produkte sieht sich aufgrund von Fälschungen oder Repliken aus Billiglohnländern genötigt, die Echtheit ihrer Produkte für den Kunden gut sichtbar zu verifizieren. Eine der dafür kostengünstigsten und flexibelsten Varianten besteht in der Aufprägung eines Produktlogos in holografischer Mikrostrukturtechnik. Die damit verbundenen Lichtbeugungseffekte sind besonders augenfällig und für den Verbraucher ansprechend. Zudem ist die zugrunde liegende Technologie bei Weitem zu komplex, um mit einfachen Mitteln kopiert zu werden.

Damit ein ausreichender und kostengünstiger Schutz für Massenprodukte gewährleistet werden kann, bedarf es jedoch eines speziellen Verfahrens, das in der Lage ist, große Materialmengen bzw. Oberflächen in entsprechend kurzer Zeit ohne bedeutenden Aufwand und in gleichbleibender Qualität zu strukturieren. Eine solche Technologie könnte darüber hinaus in vielen weiteren Produktionsfeldern, wie z. B. der Optik oder Photovoltaik, Anwendung finden. Die im Moment existierenden Möglichkeiten zur großflächigen Strukturierung von Produktoberflächen beschränken sich im Wesentlichen auf Präge- und Stempelverfahren. Dabei wird das Muster von einer Stempelmatrix mittels Druck und/oder Rotation dem gewünschten Werkstück aufgeprägt.

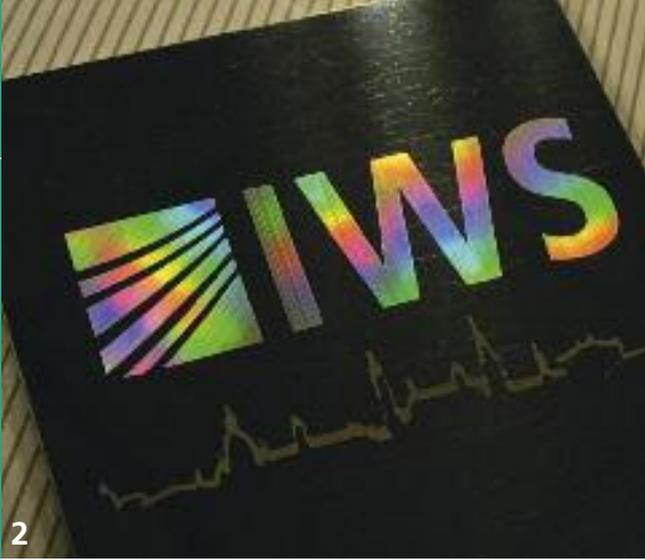
Eines der größten Probleme dieser Methode besteht in dem hohen Aufwand und den hohen Kosten, die mit der Stempelherstellung einhergehen. Hinzu kommt die damit verbundene geringe Flexibilität des Verfahrens. Aufwändige Lithographietechniken bedingen darüber hinaus die Verwendung von Matrixblechen, wodurch es im Rolle-zu-Rolle-Verfahren wegen der Verbindungsnaht zu Unterbrechungen in der Musterkontinuität kommt.

### UNSERE LÖSUNG

Mit Hilfe der Direkten Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) ist es möglich, großflächig periodische Mikrostrukturen zwischen 200 nm und 50 µm ohne Zwischenschritte oder Matrizen direkt in die Stempelfläche zu gravieren. Durch die Verwendung der CAD-Technologie können jegliche digitalisierten grafischen Vorlagen auf die Werkstoffoberfläche übertragen werden.

Bei der DLIP wird ein Laserstrahl durch optische Bauelemente in mehrere Teilstrahlen gespalten und anschließend durch Umlenksysteme wieder zusammengeführt werden. Innerhalb der Überlagerungszone entsteht ein Interferenzmuster der Laserenergieverteilung, das sich auf die bestrahlte Oberfläche überträgt. Die Strukturperiode hängt dabei vom Überlagerungswinkel der Teilstrahlen und von der Wellenlänge des Laserlichts ab.

Zusätzlich bietet die Direkte Laserinterferenzstrukturierung die Möglichkeit, eine Fläche von mehreren Quadratzentimetern pro Sekunde auf verschiedenen technologisch relevanten Materialien zu bearbeiten.



2



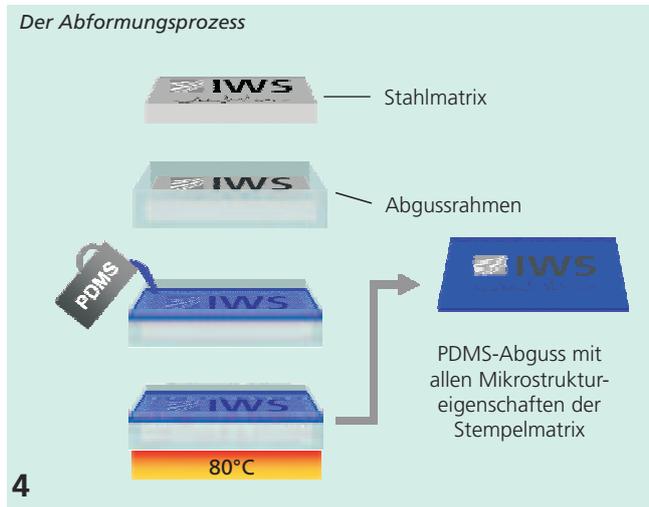
3

## ERGEBNISSE

Es wurden mehrere Prägestempel mit unterschiedlichen Motiven auf Polymeren (Abb. 1) und polierten Edelstahlblechen (Abb. 2) hergestellt. Dabei kam ein gepulster Nd:YAG-Laser zum Einsatz. Zur Strukturierung von Polyimid und zahlreichen anderen Polymeren wird eine Laserwellenlänge von 355 nm eingesetzt. Bei Metall wurden die besten Resultate mit 532 nm bzw. 1064 nm erzielt.

Zur Demonstration wurde ein Stahlstempel mit dem mikrostrukturierten IWS-Logo in einen Abgussrahmen gefasst und anschließend mit PDMS ausgegossen. Danach folgte eine Wärmebehandlung bei 80 °C, wobei sich das PDMS verfestigt. Im letzten Schritt kann der Abguss vom Stempel getrennt werden. Das dem Stempel eingeprägte Muster einschließlich der Mikrostruktur wird vom PDMS im flüssigen Zustand angenommen und kann so vollständig reproduziert werden.

Durch den Einsatz der Direkten Laserinterferenzstrukturierung können die Produktionskosten von holografischen Prägestempeln mit Submikrometerauflösung wesentlich gesenkt werden. Darüber hinaus erhöht sich deutlich die Flexibilität der Technologie. So ist es beispielsweise möglich, mit ein und derselben Methode sowohl flache Stempel als auch Prägewalzen zu bearbeiten.



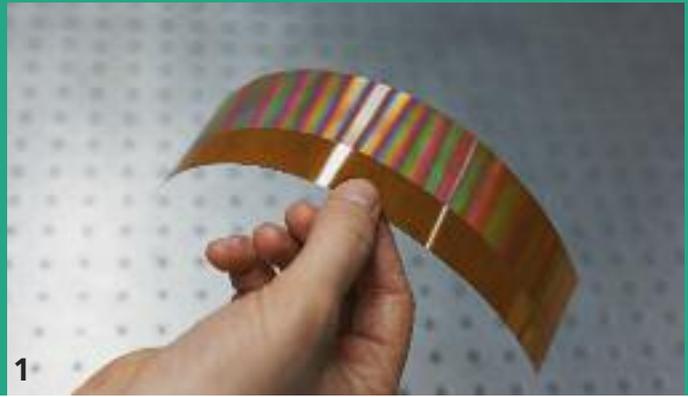
4

- 1 Stempelmatrix auf Polyimid-Folie, Folienstärke 125 µm
- 2 Stempelmatrix auf poliertem Edelstahl
- 3 PDMS-Abguss

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Sebastian Eckhardt  
 Tel.: +49 351 83391-3521  
 sebastian.eckhardt@iws.fraunhofer.de





# ANTIBAKTERIELLE OBERFLÄCHEN DURCH LASERINTERFERENZSTRUKTURIERUNG

## DIE AUFGABE

Die Eigenschaften und Leistungsfähigkeit vieler technischer Produkte werden längst nicht mehr nur durch das eingesetzte Material sondern auch durch die Charakteristik seiner Oberfläche beeinflusst. Durch das Ausstatten von Oberflächen mit definierten Topografien sind sie längst nicht mehr nur Begrenzungsflächen, sondern verwandeln sich in funktionale Elemente.

Aktuelle FuE-Vorhaben beschäftigen sich unter anderem mit der Herstellung antibakterieller Oberflächen, die für den Einsatz in der Medizintechnik (z. B. Implantate), im Krankenhausbetrieb oder der Lebensmittel- bzw. lebensmittelnahen Industrie (z. B. Verpackungen, Küchenoberflächen) bestimmt sind. Es wurde bereits eine Reihe unterschiedlicher periodischer und aperiodischer Strukturen auf verschiedenen Materialien hinsichtlich ihrer Antihafteigenschaften untersucht. Zur Herstellung dieser Topografien wurden zahlreiche Technologien aus der Fertigungstechnik, so z. B. Abgusstechniken, E-Beam-Lithografie und optische Lithografie, eingesetzt.

Obwohl sich diese Fertigungsmethoden für die exakte Strukturierung im  $\mu\text{m}$ - und Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich eignen, sind sie aufgrund ihres sequenziellen Ablaufs (z. B. Belichtungs- und Ätzschritt) bzw. durch ihren hohen gerätetechnischen Aufwand (z. B. Masken) sehr zeit- und kostenintensiv.

## UNSERE LÖSUNG

Eine schnelle und kostengünstige Alternative zur Erzeugung periodischer Strukturen bietet das Fraunhofer IWS mit der Laserinterferenzlithografie (LIL). Dabei wird eine kleine Anzahl ( $N \leq 4$ ) kohärenter Laserstrahlen auf der Substratoberfläche

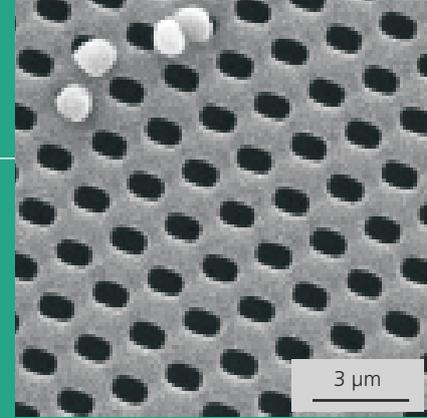
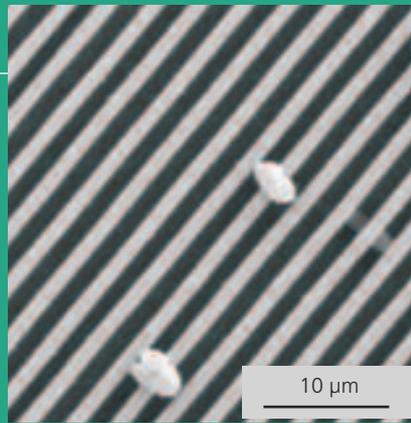
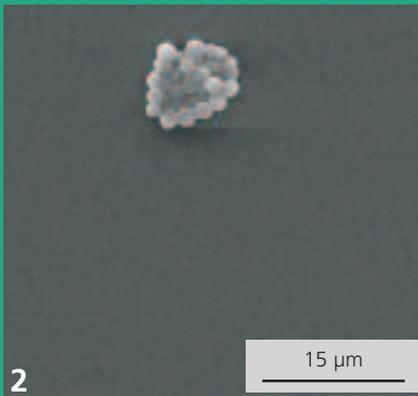
zur Interferenz gebracht. Die so entstandene Intensitätsverteilung wird in eine lichtempfindliche Schicht, die auf einem festen Substrat aufgebracht wurde, übertragen und löst dort thermisch oder chemisch induzierte Umwandlungsprozesse aus. Wie bei der konventionellen optischen Lithografie werden positive und negative Fotolacke als lichtempfindliche Materialien eingesetzt. Werden Hochleistungslaser verwendet, so bietet die Laserinterferenz auch die Möglichkeit, Materialien wie Metalle, Keramiken und Polymere (Abb. 1) direkt über ablativ Prozesse zu bearbeiten.

Bei der Laserinterferenz sind die Dimensionalität sowie die Periodizitäten der Struktur lediglich von der Anzahl der verwendeten Laserstrahlen, der Laserwellenlänge sowie vom Winkel zwischen den interferierenden Strahlen abhängig. Auf die Verwendung von Strukturierungsmasken oder -master wird verzichtet. Mit einem Laserpuls (ns) können Flächen bis zu einigen  $\text{cm}^2$  belichtet werden. Somit bieten die am Fraunhofer IWS angewandten und weiterentwickelten Technologien ein hohes Maß an Flexibilität und Fertigungsgeschwindigkeit.

## ERGEBNISSE

In enger Zusammenarbeit mit dem IPF und dem MBC für Biomaterialien in Dresden wurde der Einfluss laserstrukturierter Polymeroberflächen auf das Verhalten von Bakterien untersucht.

Dazu wurden linien-, loch- und säulenähnliche Strukturen mit Periodizitäten zwischen 500 nm und 5  $\mu\text{m}$  in dem kommerziell verfügbaren Fotolack SU 8, welcher auf Silizium-Einkristallsubstraten aufgebracht war, erzeugt (siehe Abb. 2). Für die Linien und Säulen wurden zwei bzw. drei Laserstrahlen zur Interferenz gebracht. Die Löcher wurden ebenfalls mit der



Zweistrahlskonfiguration, aber mit zwei Belichtungsschritten erzeugt, wobei das Substrat zwischen den Belichtungen um einen bestimmten Winkel gedreht wurde. Im Anschluss daran erfolgte die Besiedelung dieser Substrate mit dem Bakterienstamm *Staphylococcus epidermidis*, eine Mikrobenart, die auf der menschlichen Haut und Schleimhaut vorkommt und Ursache schwerer Infektionen bei medizinischen Eingriffen, wie Transplantationen oder dem Einsatz von Implantaten, sein kann.

Die Proben wurden tropfenweise mit einer Lösung kontaminiert, die den Bakterienstamm enthielt. Die Anzahl der auf der Oberfläche verbliebenen, fixierten und gefärbten Bakterien wurde mittels Fluoreszenzmikroskopie aufgezählt.

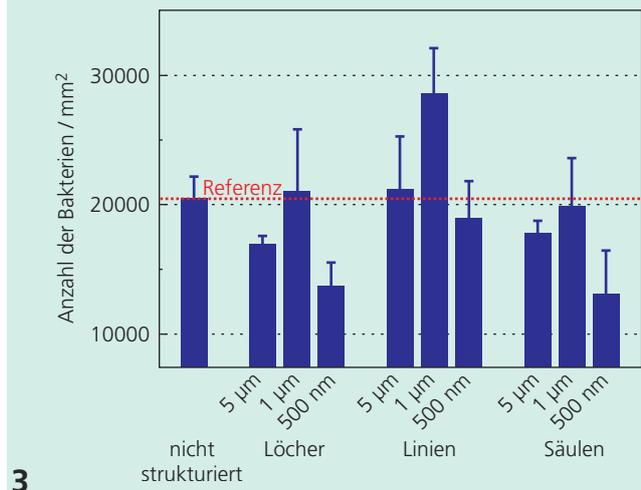
Die Abb. 3 zeigt den Trend der Bakterienbesiedelung in Abhängigkeit von der Strukturperiode sowie der -geometrie und im Vergleich mit der Referenzprobe (nicht-strukturiertes SU 8). Es wird deutlich, dass sich eine glatte Oberfläche sowie eine Linienstruktur positiv auf das Besiedlungsverhalten von *S. epidermidis* auswirken.

Auf den loch- und säulenähnlichen Strukturen mit 5 µm sowie 500 nm Periode konnte die Initialhaftung des Stamms reduziert werden, wobei mit ca. 13000 Bakterien pro mm<sup>2</sup> (Löcher) bzw. 12000 Bakterien pro mm<sup>2</sup> (Säulen) die wenigsten Bakterien auf 500 nm Strukturperiode gezählt wurden.

Hauptgrund für die Reduzierung der Initialhaftung ist die Größenordnung der Periode. Vor allem im Sub-µm-Bereich ist die Kontaktfläche zwischen Bakterien und Substrat stark minimiert, so dass die Zellen weniger Anhaftungspunkte finden und sich dadurch kein starkes Netzwerk ausbilden kann.

Anhand der hier dargestellten Ergebnisse wird deutlich, dass sich die LIL für die Herstellung antibakterieller Strukturen auf größeren Flächen eignet. Diese Oberflächen könnten Anwendung in z. B. Krankenhäusern, Fitnessstudios oder Küchen finden, wo die Infektionsgefahr besonders hoch ist.

Anzahl der Bakterien *S. epidermidis* pro mm<sup>2</sup> auf strukturiertem Fotolack SU 8 in Abhängigkeit von der Strukturperiode und -geometrie.



- 1 DLIP strukturierte Polyimidfolie
- 2 Rasterelektronenmikroskop-aufnahmen von nicht-strukturiertem und strukturiertem Fotolack nach Besiedlung mit *S. epidermidis*

#### KONTAKT

Dr. Denise Langheinrich  
 Tel.: +49 351 83391-3521  
 denise.langheinrich@iws.fraunhofer.de



# VERLUSTARME ELEKTRISCHE ANTRIEBE DURCH LASERSTRAHLSCHNEIDEN VON ELEKTROBLECH

## DIE AUFGABE

Die während der gesamten Nutzungsdauer von Elektromotoren und Generatoren anfallenden Energiekosten übersteigen die Anschaffungskosten der elektrischen Maschinen heute um ein Vielfaches. Gelingt es in Zukunft, diese Verluste zu reduzieren, könnte angesichts der enormen Anzahl von Elektromotoren und Generatoren ein erheblicher Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz geleistet werden.

Sowohl in Generatoren als auch in Elektromotoren ist eine möglichst verlustarme Wandlung der elektrischen in kinetische Energie und umgekehrt gefordert. Neben der Optimierung der Auslegung und der Fertigung von Generatoren und Motoren stellt der Einsatz gezielt optimierter Ausgangswerkstoffe eine bedeutende Möglichkeit zur Minderung dieser Verluste dar. Die Optimierung der in elektrischen Systemen zur Energieerzeugung und -wandlung häufig eingesetzten nicht-kornorientierten Elektrobleche bildet deshalb einen wichtigen Forschungsschwerpunkt, unter anderem auch am Fraunhofer IWS. Die Etablierung des Laserschneidens im industriellen Sektor anstelle des Stanzens ermöglicht eine Wirkungsgradverbesserung der elektrischen Antriebe und kommt gleichzeitig einer anwendungsorientierten, variantenreichen Fertigung bei flexiblen Stückzahlgrößen zu Gute.

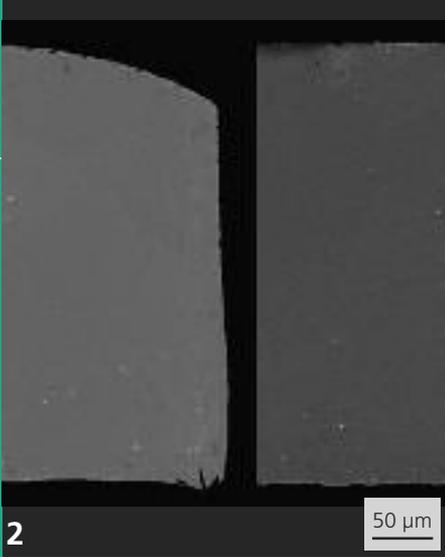
## UNSERE LÖSUNG

Bei der konventionellen mechanischen Verarbeitung nicht-kornorientierter Elektrobleche mittels Stanzen werden aufgrund der Natur des Verfahrens Eigenspannungen im Material eingebracht (Abb. 2). Sie beeinflussen die magnetischen Ei-

genschaften negativ. Dies gilt vor allem bei der signifikanten Verwendung von höherwertigerem Elektroblechmaterial, welches beim Stanzen äußerst empfindlich auf die mechanische Degradierung der Randbereiche reagiert. Es kommt zur Erhöhung der Eisen- und Kupferverluste und letztendlich zur Reduzierung des Wirkungsgrades der elektrischen Maschine. Diese Beeinträchtigungen können nur in einigen Fällen durch eine zusätzliche Wärmebehandlung nach dem Prozess des Stanzens korrigiert werden, wobei dies der Forderung der energieeffizienten Fertigung widerspricht.

Dagegen ist das Laserstrahlschmelzschnitten unter mechanischen Gesichtspunkten ein schädigungsfreies Fertigungsverfahren. Einer eventuellen thermischen Bauteilschädigung kann bei entsprechender Prozessauslegung entgegengewirkt werden. Hierfür werden am Fraunhofer IWS Dresden verschiedene Prozesseinstellungen thermografisch analysiert und so die optimale Strahlquelle sowie ihre optische Konfiguration ermittelt. Auf dieser Grundlage erfolgt die weitere Prozessauslegung anhand der Charakterisierung des zu bearbeitenden weichmagnetischen Materials auf der Basis eines genormten induktiven Messverfahrens. Hierbei wird in der Regel die Hysteresekurve entsprechend der ausgewählten Messstrategie durchlaufen und das Probenmaterial analysiert (Abb. 4). Verschiedene Probenbreiten ermöglichen eine repräsentative Abbildung von Bauteilkonturen, die beispielsweise in dem Stator der elektrischen Maschine vorkommen.

Je nach späterer Anwendung lassen sich verschiedene magnetische Flussdichten und Feldfrequenzen simulieren, um Erkenntnisse zu fertigungsbedingter Bauteilschädigung zu gewinnen. Diese wirkt verschiedener Maßen in Abhängigkeit



2

50  $\mu\text{m}$



3

der gewählten Strahlquelle und Prozessauslegung auf die magnetischen Mechanismen ein. Auf Grundlage der gewonnenen Messdaten lassen sich Simulationsrechnungen zur Bauteilschädigung durchführen, die den Produktentwicklungsprozess verbessert und bei der Auswahl geeigneter Materialien unterstützt.

## ERGEBNISSE

Bei zunehmender Variantenvielfalt und damit gleichzeitig sinkender Losgröße ermöglicht der alternative Einsatz des Laserstrahlschneidens, neben neuen gestalterischen Möglichkeiten, die direkte lokale Beeinflussung der magnetischen Eigenschaften des Bleches, welche wiederum zu einer Verbesserung des Gesamtverhaltens führt.

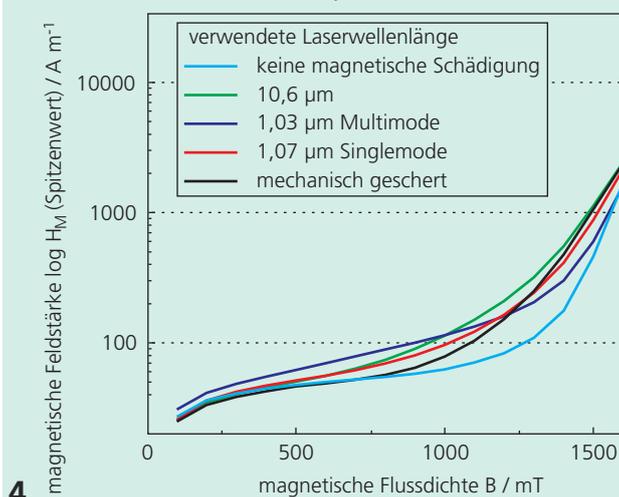
Mittels einer geeigneten Parameterauswahl kann die thermische Bauteilschädigung während des Laserschneidprozesses minimiert werden, um eine höhere magnetische Effektivität im späteren Bauteil einzustellen. Unter Berücksichtigung von definierten Effizianzorderungen erfolgt zudem eine kostenorientierte Prozessauslegung. Diese orientiert sich in der Regel

an den zu bearbeitenden Materialgütern, an Designparametern und an den magnetischen Anforderungen des späteren Nennbetriebspunktes der elektrischen Maschine.

Als mögliche Werkzeuge stehen verschiedene Strahlquellen zur Verfügung, die neben der Bearbeitung von konventionellem Elektrolech auch die Konfektionierung von hochsiliciden Materialgütern sowie Legierungen ermöglichen. Das Laserstrahlschneiden ist somit das ideale Verfahren zur Prototypenentwicklung und Fertigung kleinerer und mittlerer Serien, wenn hohe magnetische Anforderungen im Betrieb der elektrischen Maschine im Fokus stehen.

- 1 Applikation Laserstrahlschmelzschnitten von Elektrolech
- 2 REM-Aufnahme einer mechanisch getrennten Probe (links – Schädigung der Isolationschicht und Gratabbildung) und einer schadungsfreien lasergetrennten Probe (rechts)  
Material: Elektrolech der Dicke 0,35 mm
- 3 Generatorapplikation: Laserstrahlschmelzschnitten einer beispielhaften Kontur

Exemplarisch untersuchte elektrische Maschine: Auswahl der Laserstrahlquelle entsprechend des geringsten Feldstärkebedarf in Abhängigkeit einer definierten magnetischen Flussdichte, Material: Elektrolech der Dicke 0,35 mm



4

## KONTAKT

Dipl.-Ing. René Siebert  
Tel.: +49 351 83391-3066  
[rene.siebert@iws.fraunhofer.de](mailto:rene.siebert@iws.fraunhofer.de)





# HOCHFLEXIBLES LASER-RILLEN UND -STANZEN VON DIGITAL GEDRUCKTEN UMPERPACKUNGEN

## DIE AUFGABE

Insbesondere für geringe Auflagen kleinformatiger Verpackungen stellt der Digitaldruck eine wirtschaftliche Alternative zu den konventionellen Druckverfahren dar. Da beim Digitaldruck die Herstellung von Druckformen entfällt, lassen sich sogar Einzel Exemplare zu akzeptablen Preisen schnell und ohne großen Aufwand herstellen. Gerade für den Zukunftsmarkt der personalisierten Verpackungen ist diese Möglichkeit besonders attraktiv.

Bei der Herstellung von Umverpackungen werden die Bögen einem Stanzautomaten zugeführt, der das Rillen, Prägen und Stanzen übernimmt. Die bisher eingesetzten werkzeuggebundenen mechanischen Verfahren zeigen deutliche Defizite hinsichtlich Flexibilität und Produktivität bei geringen Fertigungstückzahlen. Der Einsatz der Lasertechnik eröffnet neue Möglichkeiten, das mechanische Rillen und Stanzen zu substituieren, sofern die Technologie wirtschaftlich darstellbar ist.

## UNSERE LÖSUNG

Beim konventionellen Rillen von Karton wird im Bereich der Faltlinie das Material delaminiert. Zusätzlich zur Formgebung der Rilllinie wird somit eine Zone geschaffen, die das anschließende Stauchen und Dehnen ermöglicht.

Das am Fraunhofer IWS Dresden entwickelte lasergestützte Rillen basiert auf der Schwächung des Materials und der Reduzierung der Dicke durch Abtragen. Der fokussierte Laser wird dabei vom Karton absorbiert und verdampft diesen lokal begrenzt.

Da der Abtragsprozess mit dem Laser sehr gut steuerbar ist, lässt sich die Abtragtiefe reproduzierbar einstellen. Dadurch können die theoretisch ermittelten Geometrien der Rilllinien konturgenau umgesetzt werden. Sowohl die experimentellen als auch analytischen Untersuchungen führten zu einer optimierten Geometrie und Anordnung einzelner Abtragslinien.

*Faltergebnis mit optimierter Rillgeometrie*



Das Aneinanderreihen mehrerer v-förmiger Linien gestattet einen minimalen Materialabtrag, welcher direkten Einfluss auf die Festigkeit und Stabilität der Verpackung hat. Die dadurch beeinflussbare Dehnung der Materialoberseite stellt sicher, dass die Oberseite nicht geschädigt wird (z. B. Reißen des Druckbildes).

Das Verfahrensprinzip des lasergestützten Stanzens beruht ebenfalls auf dem Abtragen des Materials durch Verdampfen. Durch Anpassung der Bearbeitungsparameter Laserleistung und Verfahrensgeschwindigkeit kann direkt im Anschluss an das Rillen die Verpackung unter Nutzung der gleichen Systemtechnik zugeschnitten werden.



3



4

## ERGEBNISSE

Da der Sublimationsprozess kein Schneidgas erfordert und bereits mit einigen hundert Watt Laserleistung Rill- und Schneidgeschwindigkeiten von einigen Meter pro Sekunde realisiert werden, bietet sich für den industriellen Einsatz die Remotebearbeitung an. Der Laserstrahl wird dabei über schnell abgelenkte Spiegel auf das Material projiziert. Die Strahlbewegung ist wegen der geringen bewegten Massen hochdynamisch und äußerst präzise.

Die Demonstration des lasergestützten Rillens und Stanzens erfolgte in einem on-the-fly-Prozess. Der Kartonbogen wird dabei kontinuierlich bewegt. In Überlagerung zum Materialvorschub erzeugt der über einen Scanner abgelenkte Laserstrahl zunächst die Rilllinien und anschließend den Konturschnitt. Zum Nachweis der Technologietauglichkeit wurde für eine zukünftige industrielle Nutzung exemplarisch ein Demonstrator aufgebaut (Abb. 4). Die Auslegung der Anlage bezüglich Wahl der Strahlquelle und des 3 Achs-Scanners beruht auf den Ergebnissen der durchgeführten Konzeptbetrachtungen. Die notwendigen Zusammenhänge zwischen optischer Abbildung (Fokussierung), Laserleistung und Bearbeitungsgeschwindigkeit wurden sowohl für das Abtragen als auch für das Schneiden erarbeitet und berücksichtigt.

Unter Zugrundelegung höchstmöglicher Flexibilität, kleiner Losgrößen und einer großen Zahl verschiedener Aufträge konnte nachgewiesen werden, dass der laserbasierte Rill- und Stanzprozess gegenüber einer konventionellen Stanze wirtschaftlich darstellbar ist. Im Gegensatz zum konventionellen Prozess werden die Verpackungsböden auf der Innenseite bearbeitet. Das charakteristische Bild der Rilllinien ist somit erst

beim Öffnen der Verpackung sichtbar und beeinträchtigt die grafische Gestaltung nicht. Die Weiterverarbeitbarkeit in Falt- und Klebmaschinen weist keine Unterschiede zu konventionellen Zuschnitten auf.

Damit kann ein entscheidender technischer Fortschritt im Bereich Digitaldruck erreicht werden, der zu einer deutlichen Erhöhung der Akzeptanz dieses Druckverfahrens führt. Kleine Auflagen bis hin zu Einzelprodukten können hinsichtlich Material-, Energieeinsatz und Kosten wesentlich effektiver hergestellt werden.

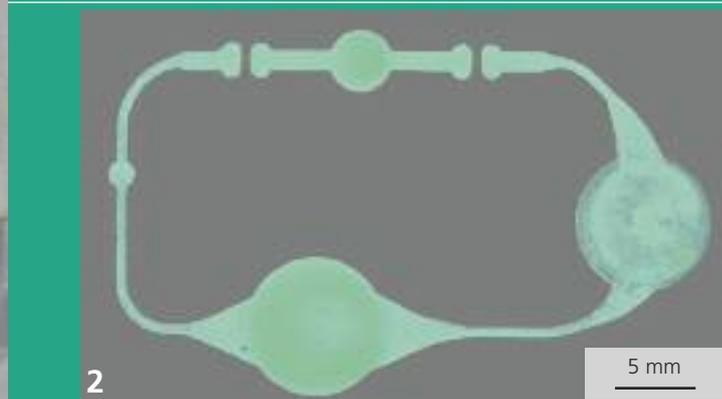
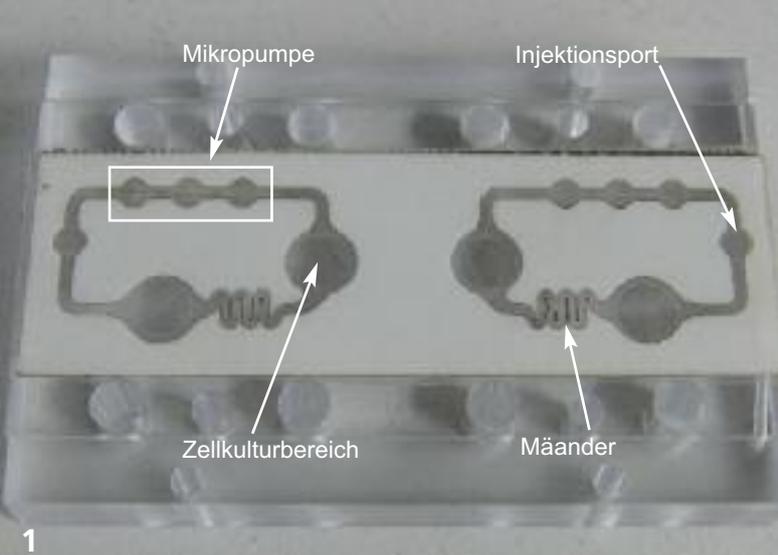
Das hier vorgestellte Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln der Europäischen Union finanziert und von der Sächsischen Aufbaubank betreut.

- 1 *Laserbasierter Rill- und Stanzprozess*
- 3 *Verpackungszuschnitt*
- 4 *Demonstratoranlage*

## KONTAKT

Dr. Jan Hauptmann  
 Tel.: +49 351 83391-3236  
[jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de](mailto:jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de)





# PREISWERTE LAB-ON-A-CHIP-SYSTEME DURCH MULTILAGENAUFBAUTEN AUS LASERMIKROSTRUKTURIERTEN FOLIEN

## DIE AUFGABE

Miniaturisierung, schnelle Prototypenfertigung und Automatisierung spielen im Bereich Lab-on-a-Chip eine zunehmend wichtigere Rolle. Sie werden neben der medizinischen Diagnostik bisher vor allem als Ersatz für Tierversuche in der pharmazeutischen und kosmetischen Substanztestung angewandt. Sogenannte Multi-Organ-Chips (MOC) sind gut geeignet, die im lebendigen Organismus ablaufenden Prozesse nachzubilden.

Die Substanztestung im Chipformat setzt die Realisierung eines geschlossenen Kreislaufsystems, bestehend aus mehreren Zellkultursegmenten, Vorratskammern sowie einer Mikropumpe, auf einem Chip voraus. Die Umsetzung erfolgt bisher durch Angießen einer Silikonflusszelle an eine Anschlussplatte. Dieser Prozess ist aufwendig, teuer und schwer zu automatisieren. Zudem können die mikrofluidischen Strukturen nur in einer Ebene aufgebaut werden.

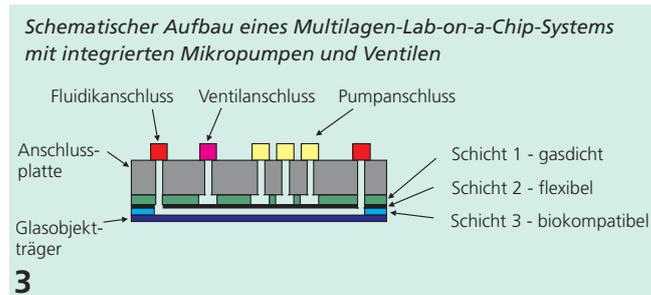
## UNSERE LÖSUNG

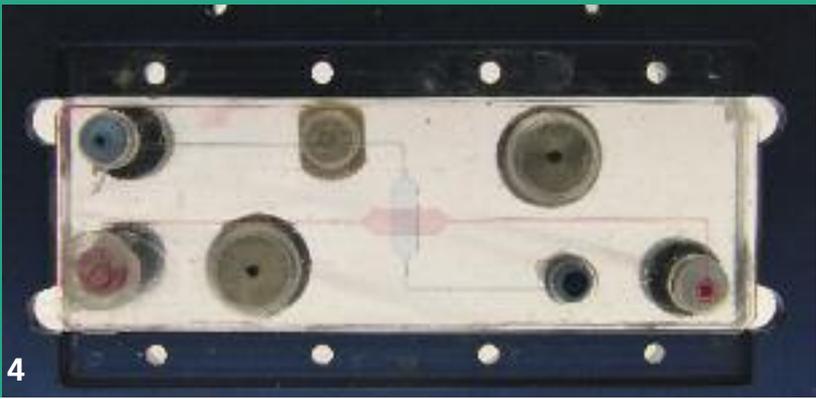
Das Fraunhofer IWS Dresden konzentriert sich auf die Entwicklung einer geschlossenen Technologiekette zur preiswerten und automatisierbaren Herstellung solcher Chips. Das neue System basiert auf einem Multilagenaufbau aus lasermikrostrukturierten Folien.

Im ersten Schritt wird das zu fertigende Mikrofluidiksystem konstruktiv in einzelne Lagen zerlegt, die später jeweils durch

eine separate Folie gebildet werden. Im zweiten Schritt wird ausgehend von den funktionellen Randbedingungen für jede Lage eine Folie mit den gewünschten Eigenschaften (hydrophil, hydrophob, transparent, ...) ausgewählt. Im dritten Schritt werden die Folien mittels Lasermikromaterialbearbeitung beidseitig strukturiert und funktionalisiert. Im abschließenden vierten Schritt werden die einzelnen Folien zu einem Mehrlagensystem zusammen laminiert. Dies erfolgt durch miteinander verkleben oder mittels Plasmabonden.

Die Multilagentechnologie ermöglicht auch die Fertigung von pneumatisch angetriebenen Pumpen und Ventilen. Die zugehörige Peristaltikpumpe ist eine Verdrängungspumpe, die als Membranpumpe arbeitet. Mittels Verschaltung der Pumpkammern in Reihe und geeignete Ansteuerung kann eine gerichtete Förderung der Flüssigkeit realisiert werden. Durch Anlegen von Überdruck an eine dünne Polymer-Membran wölbt sich diese und verdrängt die Flüssigkeit in der Kammer darunter.





Wird hingegen Unterdruck angelegt, zieht sich die Membran zurück und vergrößert so das Volumen der Kammer. Für die Realisierung von Ventilen werden die Membranen mit zusätzlichen Dichtlippen ausgestattet.

Die Abb. 3 zeigt eine schematische Darstellung der etablierten Mikrofluidikplattform. Sie besteht aus einer Anschlussplatte mit fluidischen und pneumatischen Anschlüssen, der Multilagen-Flusszelle mit integrierter Mikropumpe und einem Glasabdeckplättchen. Letzteres dichtet den Chip auf der Unterseite fluidisch ab und gewährt einen optischen Zugang.

## ERGEBNISSE

Im IWS Dresden wurde eine geschlossene Technologiekette zur preiswerten und automatisierbaren Herstellung von Lab-on-a-Chip-Systemen durch Multilagenaufbauten aus laser-mikrostrukturierten Folien entwickelt. Mit dieser lassen sich unterschiedliche Lab-on-a-Chip-Systeme erfolgreich industriell umsetzen.

Für ein konkretes System wurden Folien aus Polycarbonat und Teflon nacheinander mit Hilfe eines ps-Lasersystems mit einer Wellenlänge von 532 nm bzw. 355 nm strukturiert, funktionalisiert und im Anschluss in einer speziellen Haltevorrichtung übereinander laminiert. Abb. 1 zeigt den Prototypen eines

Fluidiksystems mit zwei geschlossenen Kreisläufen, zwei Zellkulturbereichen, einem Injektionsport und einer 3-Punkt-Peristaltikpumpe sowie einem Mäander als Dämpfungselement. Abb. 4 zeigt einen Prototypen mit sich kreuzenden Kanälen, die in verschiedenen Ebenen verlaufen. Der Chip wurde mit zwei verschiedenfarbigen Indikatorlösungen gefüllt, um die fluidische Trennung der beiden Kanäle zu verdeutlichen.

Durch den Multilagenansatz können die mikrofluidischen Strukturen auf mehrere Ebenen verteilt werden. Daraus resultiert mehr Funktionalität pro Chipfläche. Durch den Einsatz von Folien mit unterschiedlichen Eigenschaften (hydrophil, hydrophob, funktionalisiert) können die Benetzung gezielt gesteuert und Funktionen wie Kapillar-Stopp-Ventile oder eine gezielte Zellbesiedlung realisiert werden. Weiterhin lassen sich auch Folien mit aufgetragenen Dünnschichtelektroden integrieren.

- 1 Prototyp mit 2 Kreisläufen
- 2 Kreislauf mit Farbstoff gefüllt
- 4 Prototyp mit gekreuzten Kanälen

## KONTAKT

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





# LASERINDUZIERTES TEXTURIEREN VON KUNSTSTOFF-MONOFILN

## DIE AUFGABE

Zur Veredelung textiler Materialien wird eine Vielzahl von Texturierungstechnologien eingesetzt. Diese bewirken eine Kräuselung des glatten Filamentes, meist unter Ausnutzung des thermoplastischen Verhaltens. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Änderung des textilen Charakters. Eigenschaften wie Haptik, Wärmerückhaltevermögen sowie eine höhere Wasseradsorption und Elastizität können dadurch gezielt beeinflusst werden.

Die meisten bisherigen Texturierverfahren erzeugen eine geometrisch unbestimmte Kräuselung verbunden mit der mechanischen Schädigung der Monofiloberfläche. Die Anforderung der Industrie war deshalb, einen Texturierungsprozess zu entwickeln, der geometrisch bestimmte Kräuselungen energieeffizient für unterschiedliche Monofil-Materialien erzeugt.

## UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer IWS Dresden wurde für diese Aufgabe eine Technologie erarbeitet, welche eine Kurzzeitwärmebehandlung von bewegten Kunststoff-Monofiln ermöglicht. Durch die Erwärmung des Materials kurz unterhalb der Schmelztemperatur und gleichzeitiger Formung des Fadens werden Änderungen in der Polymerstruktur und -orientierung hervorgerufen. Diese Änderungen werden durch eine schnelle Abkühlung »eingefroren«, so dass die eingebrachte Kräuselgeometrie erhalten bleibt.

Hierbei wurden die Vorteile des Lasers, seine schnelle Steuerbarkeit sowie die Möglichkeiten einer lokalen Wärmeerbringung genutzt, um mehrere Filamente gleichzeitig zu texturieren. Der Einsatz einer schnellen Strahlableitung durch die Verwendung von Galvanometer-Scannersystemen mit definiert verkippten Umlenkspiegeln führte zur Realisierung der »Multispot«-Bearbeitung. Dabei konnte die Herausforderung der unabhängigen Einstellung und Stabilisierung der Temperaturen jedes einzelnen Monofil durch den Einsatz schneller Strahlungspyrometer sowie eines schnell steuerbaren CO<sub>2</sub>-Slab-Lasers erfolgreich erfüllt werden.

Der im Labor des IWS aufgebaute Versuchsträger besteht aus folgenden Komponenten:

- Monofilabwicklung für bis zu 8 Einzelfilamente
- 400 W CO<sub>2</sub>-Laser
- Galvanometerscanner zur schnellen Strahlpositionierung
- Fadenformungseinheit mit einer Transportgeschwindigkeit bis zu 60 m min<sup>-1</sup>
- Kreuzwickler zum Aufspulen der Monofilchar
- Strahlungspyrometer zur Regelung der Monofiltemperaturen an den Bearbeitungsstellen
- Fadenspannungssensoren
- Maschinensteuerung mit integrierter Lasersteuer- und Regelsoftware



2

### Beurteilungskriterien von Texturiervarianten

	Stauchkammerkräuseln	Knit de Knit - Verfahren	Lasertexturierung
Form der Textur	unbestimmt	Omega - Geometrie	bestimmt, variabel
Einkräuselung	begrenzt	hoch	hoch, variabel
Anlagenfläche	gering (direkt nach Spinnprozess)	hoch (integrierter Strickprozess)	gering (separate Aufstellung)
Ausstoßmenge	hoch	gering	gering (Ein - Laserbetrieb)
Energiebedarf	hoch	sehr hoch	gering

3

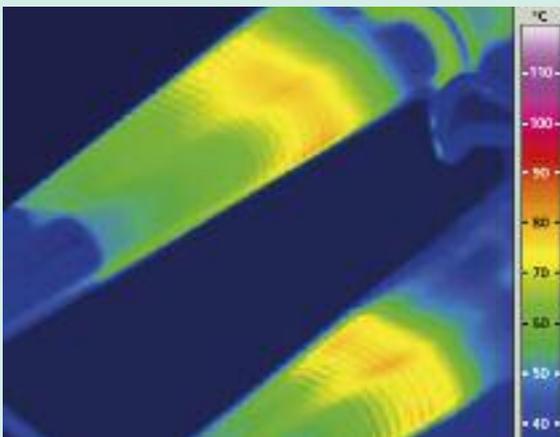
## ERGEBNISSE

Im Rahmen der Prozessentwicklung wurden verschiedene thermoplastische Monofile erfolgreich texturiert. Durch Variation von Temperatur und Abzugskraft konnten die textilphysikalischen Kenndaten wie Restschumpf, Einkräuselung und Zugfestigkeit reproduzierbar beeinflusst werden, ohne eine mechanische Schädigung oder Anschmelzung hervorzurufen.

Die Technologie ermöglicht es, geometrisch definierte Kräuselungen (z. B. Spiralgeometrie) im Durchlaufverfahren zu erzeugen. Hierbei können je nach Vorschubgeschwindigkeit bis zu 8 Einzelmonofile bearbeitet werden. Der Einsatz der »Mutisport«-Bestrahlung mit Online-Temperaturregelung eröffnet auch für weitere Anwendungen neue Möglichkeiten. Hierzu gehören Einsatzgebiete wie die Kunststoffrasenherstellung, Dämpfungsstrukturen und Medizintextilien.

Das hier vorgestellte Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln der Europäischen Union finanziert und von der Sächsischen Aufbaubank betreut.

Thermografie-Aufnahme von zwei Fadenform-Einheiten mit »Doppelspot«-Laserbestrahlung und kontinuierlich bewegten Monofilen



4

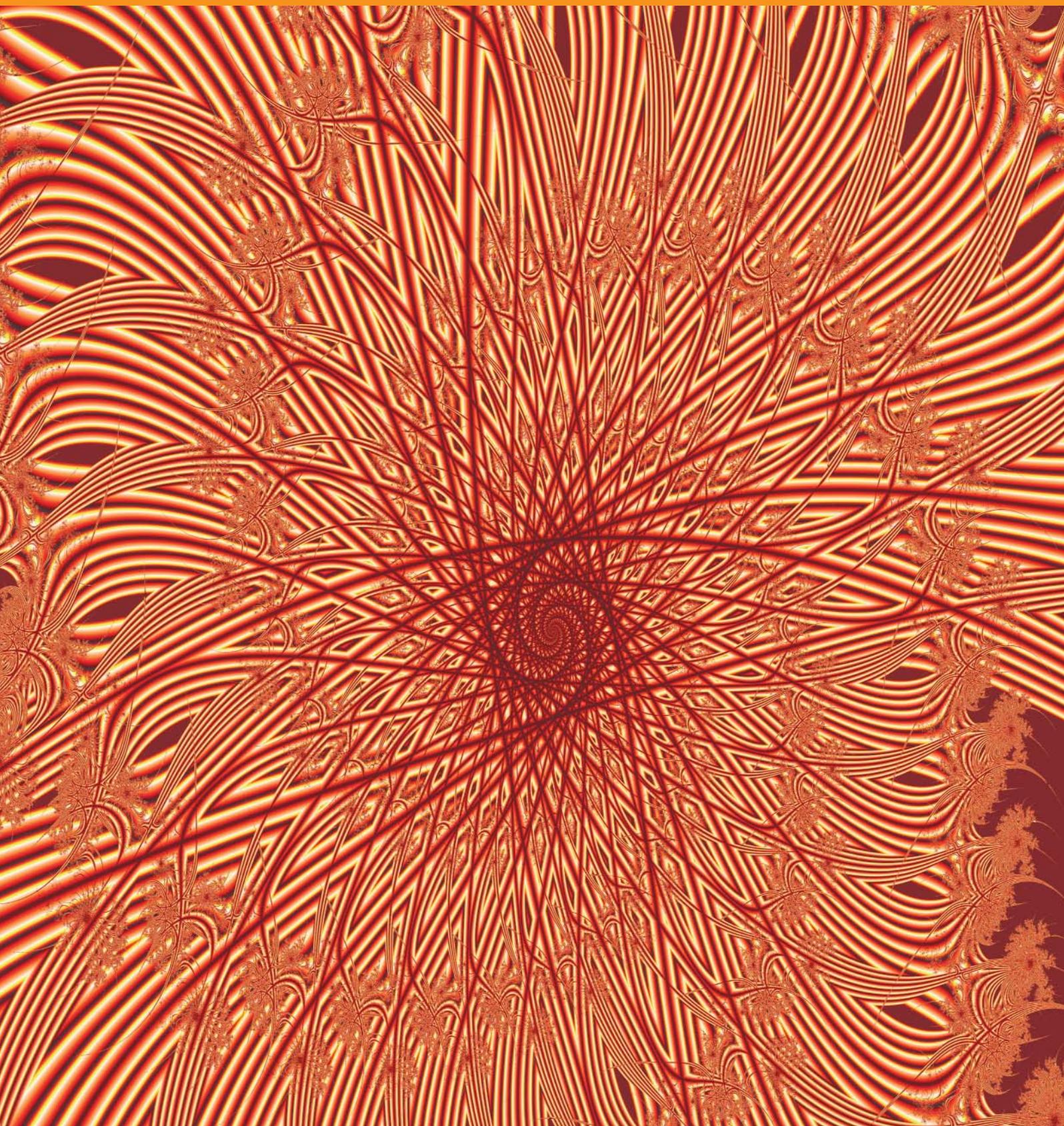
- 1 Versuchsträger zur laserinduzierten Texturierung von Kunststoff-Monofilen
- 2 Gekräuselte Kunststoff-Monofile

## KONTAKT

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



# ZENTREN





## BATTERIEZENTRUM IM IWS TECHNOLOGIEN FÜR NEUE ENERGIESPEICHER

Forschung für die Elektromobilität aber auch für stationäre Energiespeicher ist ein zentrales Thema für das IWS Dresden. Mit seinem Know-how und der Vielzahl der beforschten Fertigungstechnologien kann das 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, wurde der Aufbau eines Zentrums für Batterieforschung am IWS vorangetrieben. Die EU und das Land Sachsen förderten das Projekt mit 4 Mio. Euro. Eigenmittel des 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. Das bietet beste Voraussetzungen für die Bearbeitung der zahlreichen öffentlichen Industrieprojekte. Nachfolgend ein Auszug:

N2P (EU: CP-IP 214134-2)  
Nano To Production  
Laufzeit: 06/2008 – 11/2012

DeLIZ (BMBF: KIT 02PO2640)  
Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen  
Laufzeit: 05/2010 – 06/2011

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

### 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



CryPhysConcept (BMW/BMU/BMBF: FZJ 03EK3029B)  
Mit Kristallphysik zum Zukunftskonzept elektrochemischer Energiespeicher  
Laufzeit: 10/2012 – 12/2015

BaSta (BMU: FZJ 0325563A)  
Batterie – Stationär in Sachsen  
Laufzeit: 11/2011 – 10/2015

BatCon (BMW: DLR 01MX12055C)  
Funktionsintegrierte Hochstromverbinder für Batteriemodule  
Laufzeit: 1/2013 – 12/2015

Höhepunkt des Jahres 2012 war der vom Fraunhofer IWS Dresden organisierte Workshop »Lithium-Schwefel-Batterien«. Renommierte Experten aus Industrie und Wissenschaft präsentierten und diskutierten neueste Entwicklungstrends der Li-S-Batterien. Am 6. und 7. November 2013 wird dieser Austausch in einem weiteren Workshop fortgesetzt.

[www.iws.fraunhofer.de/de/veranstaltungen.html](http://www.iws.fraunhofer.de/de/veranstaltungen.html)



# FÜGETECHNISCHES ZENTRUM GEBÜNDELTE KOMPETENZ 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 Füge-technische 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 vom IWS intensiv untersucht werden. Dazu gehören:

- Laserstrahlschweißen
- Laserhybridverfahren (Plasma, Arc, Induktion)
- Laserlöten (Hybrid)
- Magnetpulsfügen (Umformen + Schweißen)
- Rührreißschweißen
- Pressschweißen (Laser, Induktions-Walzplattieren)
- Kleben
- Verfahrenskombinationen

Weitere Fügeverfahren sind Forschungsgegenstand an der TU Dresden.

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

## 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



Ein erstes Beispiel für die Aktivitäten des Füge-technischen Zentrums war das vom Fraunhofer IWS Dresden organisierte Symposium »Tailored Joining« im Oktober 2012. Entwicklungen zum Laserstrahl- und Lichtbogenschweißen waren Schwerpunkte der Konferenz, aber auch das Rührreißschweißen, Magnetpulsschweißen, mechanische Fügen und Kleben wurden thematisiert. Der große Erfolg der neu geschaffenen Veranstaltung mit über 200 Teilnehmern zeigt die Relevanz der Thematik.

Daneben übernahm das IWS die fachliche Organisation des »Welding and Joining« Workshop in Schaumburg, Illinois, USA. Der Fokus der zweitägigen Veranstaltung lag auf den Laserstrahlverfahren, weshalb sich die Verknüpfung mit der LME (Laser manufacturing event) anbot. Weitere Veranstaltungen zum Thema »Tailored Joining« sind bereits in Planung.

## ZENTRUM FÜR LASERINTEGRATION IN DIE FERTIGUNGSTECHNIK

Deutschlands Potenzial im Maschinen- und Anlagenbau durch die Lasertechnik nachhaltig und flächendeckend erweitern und Wettbewerbsfähigkeit sichern, diesem Anspruch stellt sich



das Fraunhofer IWS seit Jahren mit großem Erfolg. 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 nach wie vor 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, um seinen Kunden komplette Lösungen aus einer Hand anbieten zu können.

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.

Öffentlichkeitsarbeit und Wissensvermittlung sind wichtige Bestandteile des Technologietransfers. Deshalb stellt das Fraunhofer IWS aktuelle Forschungsergebnisse jedes Jahr auf einer Vielzahl von Fachmessen aus. So war das Institut im Jahr 2012 beispielsweise auf der Hannovermesse, der Euroblech, dem Härtereikongress und der Euromold präsent.

### KOORDINATION

#### DR. STEFFEN BONSS

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



### ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

#### CLAUDIA ZELLBECK

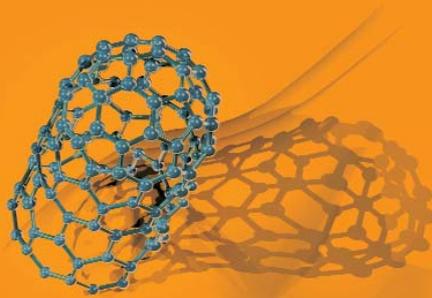
Telefon +49 351 83391-3332  
claudia.zellbeck@iws.fraunhofer.de



Der 2012 bereits zum 9. Mal ausgetragene Workshop »Industrielle Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern« und das gemeinsam mit der Technischen Akademie Wuppertal organisierte Symposium »Thermisches Beschichten mit laserbasierten Fertigungsverfahren« sind feste Bestandteile im Veranstaltungsplan der Lasercommunity. Großer Beliebtheit erfreut sich auch das Internationale Laser-Symposium Fiber & Disc (FiSC), welches 2012 mit dem Fügetechnischen Symposium »Tailored Joining« und einem Innovationsabend für mitteldeutsche Unternehmen gekoppelt wurde. Ein voller Erfolg!

Übrigens, zum 8. Internationalen Lasersymposium, 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 Laser-Symposium Fiber & Disc (FiSC)« zusammengeführt.

[www.lasersymposium.de](http://www.lasersymposium.de)



## nano for production

# 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 in einer Vielzahl von Initiativen.

Die Forschungsarbeiten des IWS widmen sich vor allem:

- der Herstellung und Verarbeitung von Nanopartikeln und Nanotubes (siehe S. 50/51 und 52/53),
- der Abscheidung dünnster Schichten (siehe S. 40/41),
- der Erzeugung von Nanostrukturen auf Oberflächen (siehe S. 100/101).

Diese Arbeiten finden zunehmend Interessenten und Anwendungen in der Industrie.

Am 12. und 13. Juni 2012 fand das vom Fraunhofer IWS Dresden gemeinsam mit der Landeshauptstadt Dresden organisierte 9. Internationale Nanotechnologie-Symposium »Nanofair - Neue Ideen für die Industrie« in Dresden statt. Über 40 Vorträge und Präsentationen von Referentinnen und Referenten aus 23 Ländern standen auf dem Programm. Die Themen reichten von Nanowerkstoffen für Leichtbau, Elektronik, Optik und Energieanwendungen über die Nanoanalytik bis hin zu speziellen Prozessaspekten. Im Rahmen der Nanofair 2012 wurde zum 4. Mal der VDI-Nachwuchspreis Nanotechnik verliehen. Dipl.-Physiker Andreas Tittl von der Universität Stuttgart erhielt die Auszeichnung für seine Arbeit zur Entwicklung neuartiger Wasserstoff-Sensoren.

### 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



Das Fraunhofer IWS engagiert sich aktiv für den Transfer der Forschung in die Fertigung. So ist der Besuch der Messe »nano tech« in Tokyo, Japan seit Jahren fester Bestandteil im Messeplan des Institutes. Auch der Messeauftritt zur PSE in Garmisch-Partenkirchen widmete sich dem Thema.

Die Initiative »Nano in Germany« wählte am 4. Dezember 2012 Herrn Professor Dr. Andreas Leson, stellvertretender Instituts- und Abteilungsleiter am IWS Dresden, zu ihrem neuen Sprecher.

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 sowie im Dresdner Cluster Nanoanalytik.



## 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.

**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. Ein spezieller Laserstrukturierprozess erlaubt es, diamantartige Kohlenstoffschichten lokal zu graphitisieren.

**Poröse Kohlenstoffe** als Schicht auf Metallfolien dienen beispielsweise als Elektrode für Doppelschichtkondensatoren. Die spezifische Oberfläche und die Porengeometrie des eingesetzten Kohlenstoffs bestimmen maßgeblich deren Leistungsparameter (siehe S. 26/27).

**Carbon nanotubes (CNT)** sind ein weiterer Forschungsschwerpunkt des Institutes. Vertikal orientierte Kohlenstoffnanoröhren dienen beispielsweise als leitfähige und binderfreie Matrix für die Kontaktierung des Schwefels in Lithium-Schwefel-Batterien. Die im IWS Dresden hergestellten einwandigen CNT finden zunehmend Eingang in unterschiedliche Applikationen im Bereich Sensorik und Aktorik (siehe S. 50/51).

### KOORDINATION

#### PROF. STEFAN KASKEL

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



### ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

#### DR. RALF JÄCKEL

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



**Ruß** ist ein Nebenprodukt bei der solarthermischen Wasserdampfherstellung aus Methan (siehe S. 32/33). Die im IWS erzeugten amorphen Rußpartikel sind ca. 50 bis 150 nm groß und von hoher Reinheit. Sie können als Leitruß oder Füllstoff in der Gummi- oder Farbenindustrie eingesetzt werden.

**Kohlenstofffasern** sind ein weiteres Thema mit hoher Aktualität. Das IWS forscht sowohl an der Modifizierung von Kohlefasern im Hinblick auf eine kostengünstige Fertigung 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. 34/35).



## 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, Umform- eignung oder Reinigungseigenschaften. Aber auch Stahl- flachzeuge mit ganz neuen funktionellen Eigenschaften und einer damit verbundenen erhöhten Wertschöpfung wie z. B. solar- thermischen oder photovoltaischen Eigenschaften sind aktuell Forschungsgegenstand.

Das Fraunhofer IWS ist als Kooperationspartner direkt am DOC® mit einer Projektgruppe vertreten. Schwerpunkte der Entwicklungstätigkeiten dieser Gruppe liegen in der Beschich- tung von Oberflächen mittels PVD, PACVD sowie Spritzver- fahren 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
- Diamor®-Schichtsysteme (ta-C: tetraedisch amorpher Kohlenstoff) für den Verschleißschutz auf Basis des short pulsed Arc (spArc®)-Verfahrens

### LEITER DER PROJEKTGRUPPE AM DOC® IN DORTMUND

**DR. AXEL ZWICK**

Telefon +49 231 844 3512

axel.zwick@iws.fraunhofer.de



[www.iws.fraunhofer.de/de/standorte/dortmund.html](http://www.iws.fraunhofer.de/de/standorte/dortmund.html)

- neuartige PVD-Hochleistungsverfahren für die Bandveredelung und die Entwicklung von Korrosionsschutzsystemen auf Basis von Zinklegierungsüberzügen, z. B. für hochkorrosionsfeste metallische Überzüge und metallische Überzüge für die Warmumformung

Aktuelle Schwerpunkte 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
- spritzerarmes Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen 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 m<sup>2</sup> eine Reihe sich ergänzender Verfahren zur Oberflächenveredelung an. Mit modernster Anlagentechnik werden Spritzschichten mit dem preisgünstigen Lichtbogen-drahtspritzverfahren 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<sup>®</sup>-Schichtsystemen mit dem kostengünstigen und robusten spArc<sup>®</sup>-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<sup>®</sup> ist:

- modulare spArc<sup>®</sup>-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<sup>®</sup> 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)

Das 2008 eröffnete Fraunhofer Project Center arbeitet aktiv an der Etablierung des Fraunhofer Modells auf dem polnischen Forschungsmarkt und konnte im Jahr 2012 weitere Erfolge verzeichnen. Das erst im Jahr 2011 bei der System S.A. Katowice eingeführte System zum Laserauftragschweißen wurde 2012 um mehrere Pulverdüsen des Fraunhofer IWS Dresden erweitert. Die im Vorjahr ausgelieferte Technik hat sich im Praxiseinsatz bewährt, neue Applikationen machten die Erweiterung der systemtechnischen Basis erforderlich.

Auch die vom Fraunhofer IWS gemeinsam mit einem mittelständischen deutschen Unternehmen entwickelte Technologie und Systemtechnik zum Laserschneiden von Airbaggewebe hat einen polnischen Käufer gefunden. Verfahren und Systemtechnik werden 2013 in die Fertigung überführt. Das IWS unterstützt das Unternehmen bei der Auslegung der Systemtechnik, der Einführung der Technologie und der Schulung der Mitarbeiter vor Ort.

Das Jahr 2012 wurde zudem bestimmt durch die intensive Arbeit an verschiedenen Forschungsprojekten aus den Bereichen:

- Laser-Materialbearbeitung,
- generative Fertigungstechnik,
- Biotechnologie,
- industrielle Bildverarbeitung und Konturerfassung.

Das Projekt »RemCoVis«, welches die Entwicklung von Lösungen für die Beobachtung und Visualisierung von Remote-Prozessen zum Ziel hat, befindet sich in der Anwendungsphase. Die Grundlagen für die optische Auslegung der Beobachtungseinheit und die Algorithmen für die softwaretechnische Umsetzung wurden bereits in den vorangegangenen Projektab-

### INSTITUTSDIREKTOR

#### PROF. EDWARD CHLEBUS

TU Wrocław

Telefon +48 71 320 2705

edward.chlebus@pwr.wroc.pl



### PROJEKTKOORDINATION

#### DR. JAN HAUPTMANN

Fraunhofer IWS

Telefon +49 351 83391-3236

jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de



schnitten geschaffen. Im Jahr 2012 wurden die Einzelkomponenten zusammengefügt und an konkreten Aufgabenstellungen der Lasermaterialbearbeitung getestet.

Sowohl die angestrebte Ausrichtung einer programmierten Geometrie anhand der realen Bauteillage als auch die Generierung von Bewegungsbahnen entsprechend der Bauteilkontur konnte realisiert werden. Der Test und die Anwendung der gemeinsam entwickelten Lösung erfolgten am IWS in Dresden unter Mitwirkung der polnischen Kollegen des Project Centers.

Mit der gemeinsamen Arbeit an der Umsetzung der Lösung, die zur beiderseitigen Weiterentwicklung und Know-How-Generierung beigetragen hat, konnte die interdisziplinäre und länderübergreifende Zusammenarbeit auf eine neue Stufe gehoben werden.

[www.iws.fraunhofer.de/de/standorte/wroclaw\\_polen.html](http://www.iws.fraunhofer.de/de/standorte/wroclaw_polen.html)

Zielstellung des Projektes »Bioreactor« ist die Entwicklung von dynamischen Mikro-Bioreaktorsystemen mit integrierten künstlichen Versorgungsgefäßen, mit denen ein biokompatibles, komplexes 3D-Mikromilieu geschaffen werden kann. Eine Möglichkeit zur Realisierung biofunktionaler Gefäßsysteme besteht in der Verwendung von Hohlfasern. Diese müssen mittels Rapid Prototyping gefertigt und anschließend mit der Mikrofluidik gekoppelt werden, um die Versorgung der künstlichen Gewebe mit Sauerstoff und Nährstoffen zu gewährleisten. Eine der Herausforderungen besteht in der biokompatiblen und fluidisch dichten Verbindung beider Komponenten. Bei der Charakterisierung der fluidischen Eigenschaften konzentriert sich das Projekt auf die Particle Image Velocimetry während die Permeabilität mittels Fluoreszenz- und radiologischen Kontrastmitteluntersuchungen bestimmt wird. In diesem Projekt werden die Kompetenzen des Fraunhofer IWS im Bereich der Mikrofluidik und die der polnischen Kollegen im Rapid Prototyping gebündelt und auf neue Anwendungsgebiete appliziert.

Im Projekt »Bioimplants for Regeneration of Bone Tissue in Oncological Patients« stand die Entwicklung einer Therapie für Patienten nach einer Tumorentnahme im Kieferbereich im Vordergrund. Die entwickelte Lösung integriert neuartige Implantate und ermöglicht somit die Wiederherstellung der Gesichtsknochen. Die Implantate weisen eine Scaffold-Struktur auf, die mit Stammzellen besetzt und zudem mit bioaktiven Substanzen und Antibiotika versehen werden können. Diese Maßnahmen erlauben ein Einwachsen des Implantats und die Wieder-



herstellung der normalen Funktionalität des erkrankten Bereiches. Ausgehend von Daten der Computer-Tomographie werden die geometrischen Abmessungen des zu generierenden Bauteils erstellt. Die Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich auf die Verfahrensent-

wicklung des Selective Laser Meltings von Titanlegierungen und nachgelagerter Prozesse zur Herstellung anforderungsgerechter Bauteile.

Das Vorhaben »LasTech – Laser Technologies for Manufacturing Functional 3D and Surface Structures« befasste sich mit der Identifizierung der bestimmenden Parameter für die Mikrometallurgie lasergenerierter Bauteile. Im Laufe der Projektbearbeitung konnte die Bauteilporosität erfolgreich reduziert werden (von 1,53 % auf 0,04 % Porenanteil). Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf die Minimierung der Strukturgrößen, die Reduzierung des Nachbearbeitungsaufwandes und die Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit. Für Leichtbauanwendungen konnten Grundlagen für die Bauteilgestaltung hinsichtlich Festigkeit und angestrebter Porosität geschaffen werden. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse konnten in »ready to use« Musterbauteilen aus den Bereichen Gerätebau und Medizintechnik umgesetzt werden.

Die Kompetenzen des Centers im Bereich des industriellen Bildverarbeitung und Spektroskopie wurden im Projekt »2D Spectral Methods for Technical Documents Investigation« weiterentwickelt. Durch die Anwendung verschiedener spektroskopischer Methoden und die Entwicklung von angepassten Auswertalgorithmen ist es gelungen, ein Werkzeug für forensische Aufgabenstellungen bereitzustellen. Im konkreten Anwendungsfall handelte es sich dabei um die Bestimmung der zeitlichen Reihenfolge von Signaturen auf Dokumenten.

Neben der untersuchten Beispielanwendung ist die Methodik auf eine Vielzahl weiterer Anwendungen, wie beispielsweise die Detektion verschiedener Werkstoffe für eine anschließende Selektion oder die Identifizierung von unerwünschten Zusätzen in Lebensmitteln, übertragbar.



## 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 Fraunhofer-Center for Coatings and Laser Applications CCL 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. Seit 2003 wird das CCL von Dr. Jes Asmussen, Professor an der Michigan State University, geleitet. Seine bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet der Diamantbeschichtung und -herstellung ergänzen in idealer Weise das Know-how des IWS auf dem Gebiet der Diamor®-Beschichtungen.

Das CCL hat zwei Divisions, die »Coating Technology Division« an der Michigan State University in East Lansing und die »Laser Applications Division« in Plymouth, Michigan.

[www.ccl.fraunhofer.org](http://www.ccl.fraunhofer.org)  
[www.ccl-laser.fraunhofer.org](http://www.ccl-laser.fraunhofer.org)  
[www.ccl-coatings.fraunhofer.org](http://www.ccl-coatings.fraunhofer.org)

### CENTER DIRECTOR CCL / USA

#### PROF. JES ASMUSSEN

Telefon +1 517 355 4620  
[jasmussen@fraunhofer.org](mailto:jasmussen@fraunhofer.org)



### DIRECTOR

#### COATING TECHNOLOGY DIVISION

#### DR. THOMAS SCHÜLKE

Telefon +1 517 432 8173  
[tschuelke@fraunhofer.org](mailto:tschuelke@fraunhofer.org)



### DIRECTOR

#### LASER APPLICATIONS DIVISION

#### CRAIG BRATT

Telefon +1 734 738 0550  
[cbratt@fraunhofer.org](mailto:cbratt@fraunhofer.org)





### Laser Applications Division

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

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

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

### Coating Technology Division

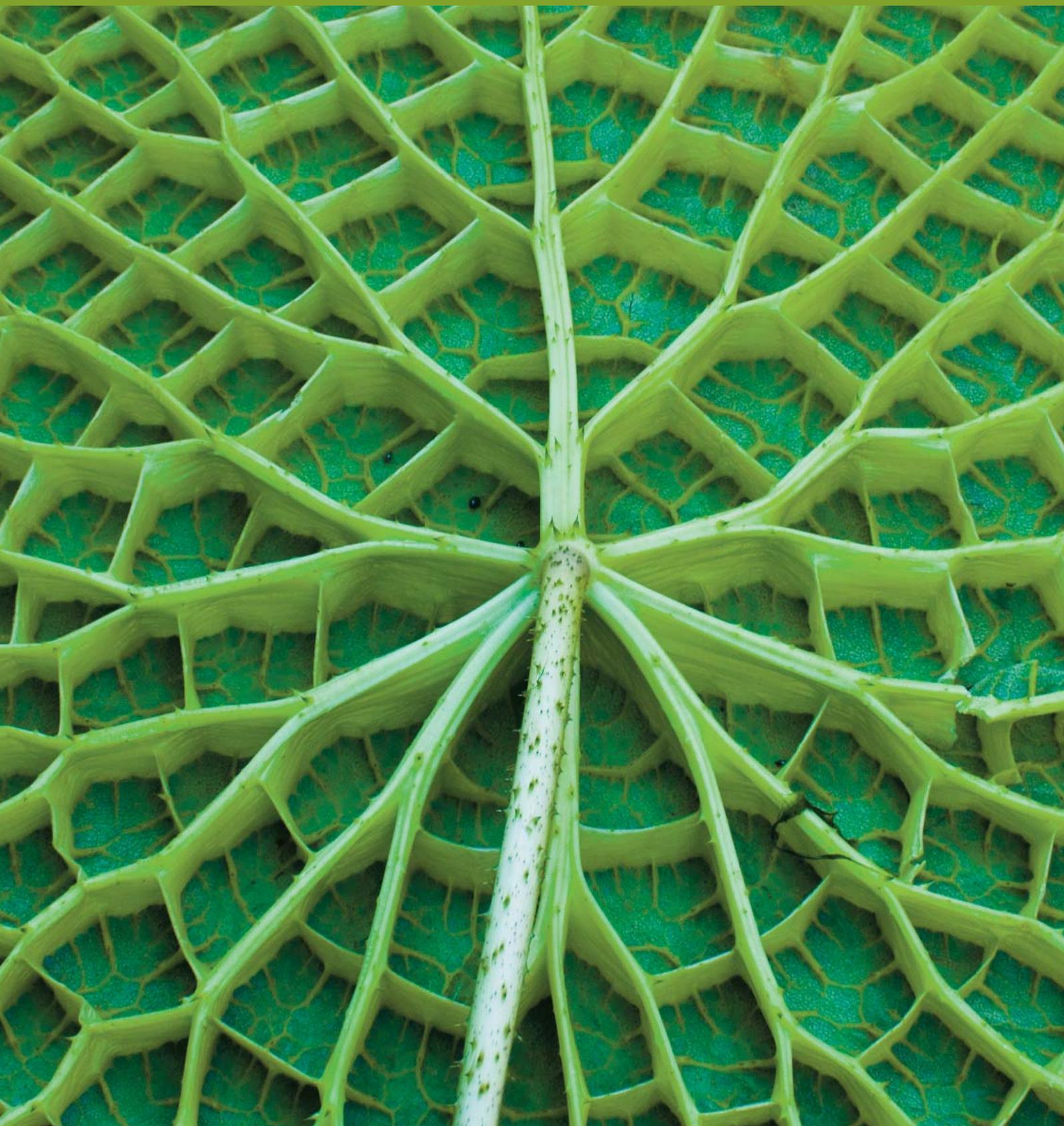
Unter Leitung von Prof. Jes Asmussen und Dr. Thomas Schülke arbeiten in Lansing erfahrene Fraunhofer-Forscher und deutsche Studenten gemeinsam mit Fakultätsmitgliedern und Studenten der Michigan State University an neuen Lösungen auf folgenden Forschungsgebieten:

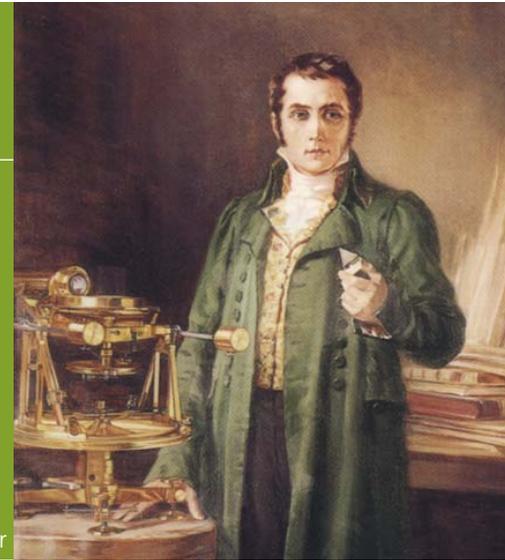
- diamantähnliche Kohlenstoffschichten,
- chemische Gasphasenabscheidung von polykristallinen Diamantschichten,
- chemische Gasphasenabscheidung von Diamantkristallen,
- Entwicklung von dotierten Diamanthalbleitern.

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

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

# 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 66 Institute und selbstständige Forschungseinrichtungen. Rund 22 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,9 Milliarden Euro. Davon fallen 1,6 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.

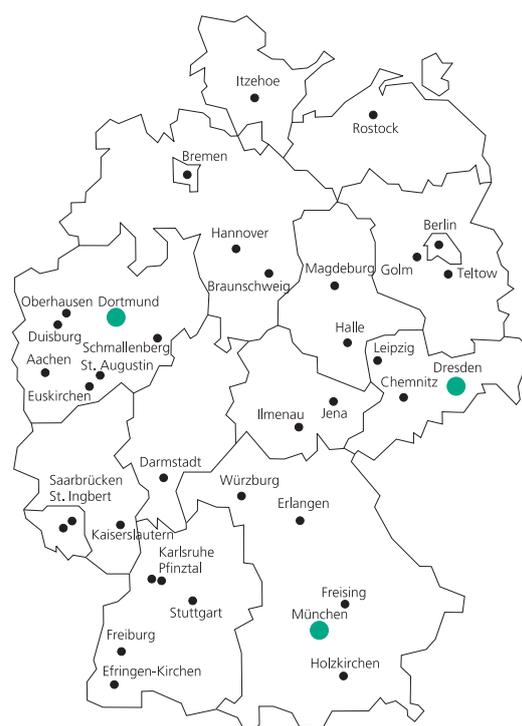
Internationale Niederlassungen sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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

fähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

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

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





IWS

IPM

ILT

IST

## 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

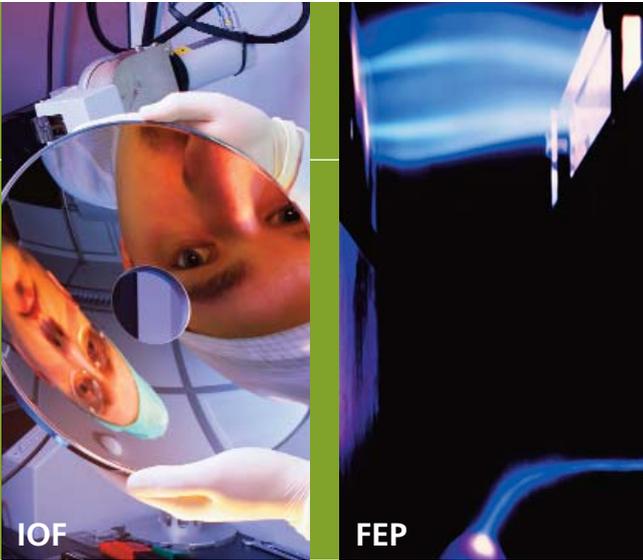
Die Kernkompetenzen des Fraunhofer FEP sind die Elektronenstrahltechnologie, die plasmaaktivierte Hochratebedampfung und die Hochrate-PECVD. Die Arbeitsgebiete umfassen die Vakuumbeschichtung sowie die Oberflächenbearbeitung und -behandlung mit Elektronen und Plasmen. Neben der Entwicklung von Schichtsystemen, 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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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](http://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 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

## FAKULTÄT MASCHINENWESEN INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK

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



### Themen:

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

## 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



»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**



Die Forschungsschwerpunkte der Professur liegen in der Entwicklung von neuen Methoden zur großflächigen Herstellung von 2- und 3-dimensionalen Mikro- und Nanostrukturen auf ebenen und gekrümmten Oberflächen. In Abhängigkeit von der erzielten Strukturgröße und Geometrie können die elektrischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften von Oberflächen unterschiedlicher Materialien periodisch variiert werden. Einsatzmöglichkeiten derart strukturierter Oberflächen bieten sich unter anderem in der Biotechnologie, in der Photonik und in zahlreichen tribologischen Systemen.

**FAKULTÄT MASCHINENWESEN  
INSTITUT FÜR WERKSTOFFWISSENSCHAFT**

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



Ihre Expertise im Bereich Hochfrequenz-Ermüdungsprüftechnik und den dazu gehörigen peripheren Messtechnologien sowie umfangreiche Erfahrungen mit hochauflösenden Analysemethoden bilden die Basis für Forschungsarbeiten auf höchstem wissenschaftlichem Niveau. Neben ihrem Schwerpunkt in der Grundlagenforschung hat Frau Prof. Zimmermann aber auch die Charakterisierung und Prävention der Schädigungsentwicklung für industrienahen Anwendungen unter Einsatz der Hochfrequenzprüftechnik im Sinne einer »Kurzzeitdiagnostik« im Blick.

**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<sup>EFF</sup>«

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

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

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

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

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

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

### SPRECHER

**PROF. ECKHARD BEYER**

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



### PROJEKTKOORDINATION

**DR. STEFAN SCHÄDLICH**

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



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

Von der Fraunhofer-Gesellschaft wird das Innovationszentrum mit sechs Millionen Euro gefördert, der Freistaat Sachsen stellt weitere vier Millionen Euro bereit. Damit werden in den Jahren 2009 bis 2013 zahlreiche hochqualifizierte Arbeitsplätze im Wissenschaftsbereich finanziert.



Das DIZE<sup>EFF</sup> ist wissenschaftlich und wirtschaftlich ein voller Erfolg: DIZE<sup>EFF</sup>-Wissenschaftler waren beispielsweise an den Forschungen zur organischen Elektronik beteiligt, die 2011 mit dem Deutschen Zukunftspreis ausgezeichnet wurde. 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 Zielgröße des DIZE<sup>EFF</sup> sind die eingeworbenen Drittmittelerträge. Schon nach 3 Jahren Laufzeit wurden bereits mehr als 10 Mio. Euro Drittmittel zusätzlich akquiriert. Diese zusätzlichen finanziellen Mittel ermöglichen die Schaffung und Sicherung von weiteren Wissenschaftlerstellen in den Folgejahren.

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<sup>EFF</sup>-Professoren sind involviert. Zudem sind Mitarbeiter der Fraunhofer-Institute verstärkt mit Lehraufgaben an der TU Dresden beauftragt.

Die Dresdner Konferenz »Zukunft Energie«, die 2013 zum 2. Mal stattfindet, ist ein weiteres Ergebnis der erfolgreichen Kooperation am Forschungsstandort Dresden.

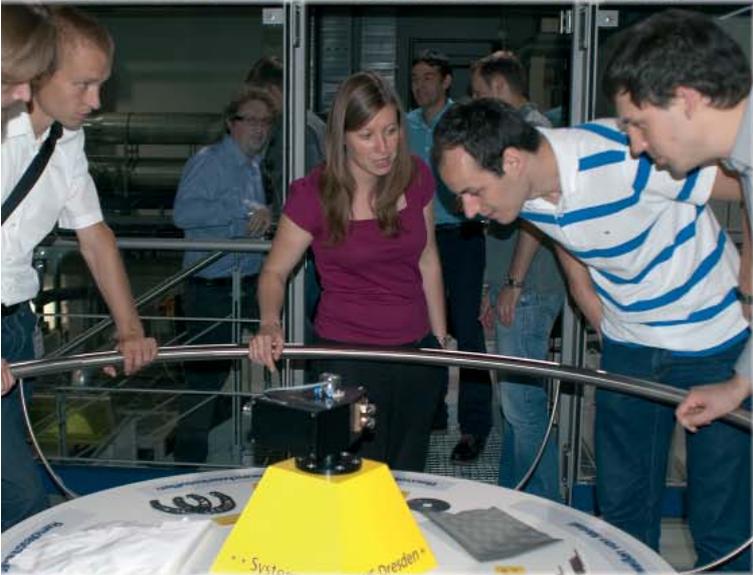
Weitere Informationen zum DIZE<sup>EFF</sup>  
[www.innovation-energieeffizienz.de](http://www.innovation-energieeffizienz.de)



### TU - Einrichtungen

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

*9 Einrichtungen der TU Dresden arbeiten gemeinsam mit 4 Dresdner Fraunhofer-Instituten in 23 wissenschaftlichen Projekten an 6 Themenkomplexen zur Energieeffizienz.*



# BESONDERE EREIGNISSE

## **02. MÄRZ 2012**

20 Jahre Fraunhofer in Dresden, Ballnacht im Flughafen Dresden (Mitorganisator: Fraunhofer IWS Dresden)

## **14.-15. MÄRZ 2012**

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

## **27.-28. MÄRZ 2012**

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

## **26. APRIL 2012**

Beteiligung des Fraunhofer-Institutszentrums am bundesweiten »Girls Day«

## **11. JUNI 2012**

»5. Nanofair Nachwuchsforum« - Veranstaltung im Rahmen der »Nanofair 2012« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

## **12.-13. JUNI 2012**

9. Internationales Nanotechnologie-Symposium »Nanofair - Neue Ideen für die Industrie« im International Congress Center Dresden (Organisatoren: Fraunhofer IWS Dresden und Landeshauptstadt Dresden)

## **14. JUNI 2012**

Workshop »Nanokomposite für industrielle Anwendungen« - Veranstaltung im Rahmen der »Nanofair 2012« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

## **06. JULI 2012**

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

## **23. AUGUST 2012**

Besuch von Frau Prof. Sabine von Schorlemer, Staatsministerin für Wissenschaft und Kunst, im Fraunhofer IWS

## **27.-31. AUGUST 2012**

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

## **16.-17. OKTOBER 2012**

»FiSC 2012 - Internationales Laser-Symposium Fiber & Disc« im International Congress Centrum Dresden (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

## **17. OKTOBER 2012**

»Industrie @ Fraunhofer IWS - Innovationsabend für mitteldeutsche Unternehmen« (Organisator: Fraunhofer IWS Dresden)

## **17.-18. OKTOBER 2012**

»Tailored Joining 2012 - Fügetechnisches Symposium« im International Congress Center Dresden (Organisatoren: Fraunhofer IWS Dresden und TU Dresden)

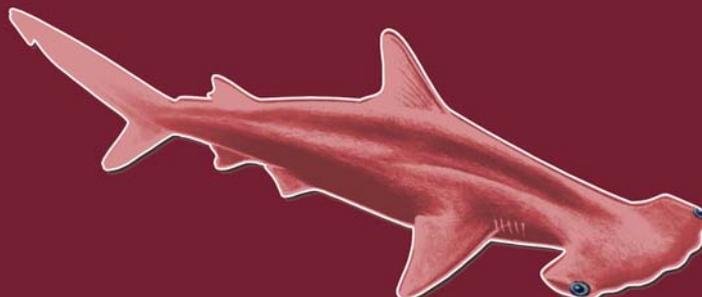
## **09. NOVEMBER 2012**

Thementag »Werkzeug- und Formenbau« (Organisator: Carbon Composites e.V., Mitorganisator: Fraunhofer IWS Dresden)

## **15. NOVEMBER 2012**

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

# AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN



## 20 Jahre Fraunhofer in Dresden

Die Dresdner Fraunhofer-Institute und -Institutsteile feierten in diesem Jahr den 20. Jahrestag ihres Bestehens. Die Institute generieren derzeit ein Umsatzvolumen von mehr als 130 Mio. Euro pro Jahr. Mit über 1300 Mitarbeitern ist Dresden einer der bedeutendsten Standorte der Fraunhofer-Gesellschaft.

Im Rahmen der Feierlichkeiten »20 Jahre Fraunhofer in Dresden« wurde **Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer** von der Fraunhofer-Gesellschaft mit der Fraunhofer-Medaille ausgezeichnet. Prof. Bullinger würdigte in seiner Laudatio vor allem sein intensives Engagement beim Aufbau des IWS und der erfolgreichen Etablierung des Instituts in der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Community. Ebenso hob Prof. Bullinger die enge und fruchtbare Zusammenarbeit mit der TU Dresden und Prof. Beyers unermüdliches Wirken für die enge Vernetzung mit den außeruniversitären Forschungseinrichtungen hervor.



Der Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2012 ging an **Dr. Stefan Braun** (Fraunhofer IWS Dresden) sowie an Dr. Klaus Bergmann (Fraunhofer ILT Aachen) und Dr. Torsten Feigl (Fraunhofer IOF Jena) für ihre strategische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der EUV-Technologie. Gemeinsam schufen sie wesentliche Elemente für die im Bereich EUV-Lithografie tätige Industrie in Deutschland.

Dr. Stefan Braun und sein Team erarbeiten die optimale Reflektionsbeschichtung für Beleuchtungs- und Projektionsspiegel, die für die Belichtung von Mikrochips benötigt werden. Das dafür entwickelte Magnetron-Sputtern ermöglicht höchste Genauigkeit bei den Schichten ohne zusätzliche Poliervorgänge oder Kontrollmessungen. Ein Anlagentyp zur großflächigen Präzisionsbeschichtung ist bereits im industriellen Einsatz.



**Dr. Matthias Lütke** vom Fraunhofer IWS Dresden erhielt den diesjährigen Preis der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Lasertechnik e. V. (WLT). Ausgezeichnet wurde Herr Dr. Lütke für die Entwicklung des Remote-Laserstrahlschneidens. Seine Arbeiten hatten weltweit für Aufsehen und Anerkennung gesorgt. Das Remote-Laserstrahlschneiden stellt eine Alternative für das Trennen von Bauteilen dar, die bisher vor allem durch Stanzen gefertigt wurden, beispielsweise Dichtungen für Motor-komponenten oder Elektroden für Lithium-Ionen-Zellen. Zudem ermöglicht das Verfahren die Verwendung von höherfesten Stählen bei Stanz- und Biegeteilen und mehr Freiheitsgrade bei der konstruktiven Gestaltung der Bauteile. Der WLT-Preis wird jährlich für herausragende Leistungen auf dem Gebiet der angewandten Laserforschung verliehen.





Für ihren Beitrag zum Laserstrahl-schweißen von Luftfahrtstrukturen wurden Herr **Dr. Jens Standfuß** und Herr **Dr. Dirk Dittrich** im Rahmen der Second International Conference and Exhibition »Aluminium 2D Welding and Brazing« in Moskau mit dem Sponsorenpreis der ALCOA Russia geehrt.

Am 14. Dezember wurden die IWS-Preisträger des Jahres 2012 gekürt.

Für die Entwicklung einer neuartigen Hochleistungsbeschichtungsquelle wurden **Dr. Slavcho Topalski, Dr. Axel Zwick und Klaus Kratzenberg** mit dem Preis für die beste wissenschaftlich-technische Leistung ausgezeichnet. Die Forscher entwickelten ein wirtschaftlich und technologisch an eine Bandbeschichtungsanlage anschlussfähiges Verfahren zur Abscheidung von Korrosionsschutzschichten. Das Verfahren zeichnet sich durch sehr hohe Abscheideraten aus und eignet sich besonders für kathodischen Korrosionsschutz auf höchstfesten Stählen.

Die Forschungsarbeiten von Herrn **Moritz Greifzu** zur »Untersuchung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen basierten dünnen Filmen für Raumfahrtanwendungen« wurden als herausragende studentische Leistung geehrt. Seine Forschungsarbeiten widmeten sich der Bestimmung des elektrischen Widerstands von CNT in Abhängigkeit von der chemischen Umgebung und der Testung von CNT basierten Polymerfolien auf ihre Abschirmfähigkeit gegen elektromagnetische Strahlung.

Auch die Arbeiten von Frau **Vicky Tröger** wurden als herausragende studentische Leistung ausgezeichnet. Frau Tröger entwickelte eine Methode zum Nanoploten von Proteinen auf Oberflächenplasmonenresonanz-Chips. Damit sind Biochips für klinische Labore erstmals automatisiert herstellbar, mindestens 4 Wochen lagerbar und sogar regenerierbar.

Herr **Teja Roch** erhielt den Preis für die beste wissenschaftliche Leistung eines Nachwuchswissenschaftlers. Er lieferte einen bedeutenden Beitrag zur Nano- und Mikrostrukturierung amorpher Kohlenstoffschichten. Mittels direkter Laserinterferenzstrukturierung von amorphen Kohlenstoffschichten verringert sich deren Reibwert um bis zu 30 %. Die Flächengeschwindigkeit liegt bei ca.  $60 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Der Preis für die beste innovative Produktidee zur Eröffnung eines neuen Geschäftsfeldes ging an Herrn **Dr. Axel Jahn** und Herrn **Markus Wagner**. Gemeinsam untersuchten sie die Einsatzmöglichkeit des Laserstrahlhärtens zur Erhöhung des Crashwiderstandes von Blechteilen (siehe S. 82/83). Durch die lokale Laserverfestigung in hoch belasteten Bereichen können kostengünstige niedrigfeste Stahlbleche mit minimierter Wandstärke eingesetzt werden, bei gleicher Crashfestigkeit. Durch belastungsangepasste Anordnung der Verfestigungs-zonen, die vorher simuliert werden, kann das Versagensverhalten von Crash-Strukturen wie z. B. Träger, Säulen, Schweller, Sitzkomponenten gezielt gesteuert werden. Für seine Masterarbeit im Studiengang Fahrzeugbau: Werkstoffe und Komponenten, die sich diesem Thema widmet, wurde **Markus Wagner** auch vom Verein der Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg (VFF) mit dem Bernhard-von-Cotta-Preis für herausragende Abschlussarbeiten ausgezeichnet.

Der Sonderpreis des Institutes ging an Frau **Antje König** für ihr außergewöhnliches Engagement bei der Beantragung und der administrativen Abwicklung von EU-Projekten.



Dr. Axel Jahn, Dr. Anja Techel, Teja Roch, Vicky Tröger, Markus Wagner, Dr. Axel Zwick, Prof. Andreas Leson, Klaus Kratzenberg, Prof. Eckhard Beyer, Moritz Greifzu, Dr. Slavcho Topalski (v.l.n.r.)

# VERÖFFENTLICHUNGEN

**RV** = Rezensierte Veröffentlichung

## [L01]

L.-M. Berger

»Metallurgische Vorgänge beim thermischen Spritzen von Hartmetallen und deren Auswirkungen auf die Schichteigenschaften«

Tagungsband zum 15. Werkstofftechnischen Kolloquium in Chemnitz, 20.-21. September 2012, Schriftenreihe »Werkstoffe und Werkstofftechnische Anwendungen«, Band 47, S. 16-28  
Herausgeber: B. Wielage  
ISBN: 978-3-00-039358-7,  
ISSN: 1439-1597

## [L02] RV

L.-M. Berger, D. Schneider, M. Barbosa, R. Puschmann

»Laser Acoustic Surface Waves for the Non-Destructive Characterisation of Thermally Sprayed Coatings«

Thermal Spray Bulletin 5 (2012), No. 1, P. 56-64  
ISSN 1866-6248

## [L03]

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 II (Thermoelectrics III), Proc. Conf., 21.-23. November, 2012, Berlin, Germany, D. Jänsch (ed.).  
Renningen: expert Verlag, 2013, S. 260-272  
ISBN 978-3-8169-3169-0

## [L04]

L.-M. Berger, J. Spatzier, C. Hochmuth, R. Georgi

»Milling of Thermally Sprayed Hard-metal Coatings«

Thermal Spray Bulletin 5 (2012), No.1, p. 33-37  
ISSN 1866-6248

## [L05]

E. Beyer, A. Mahrle, M. Lütke, J. Standfuß, F. Brückner

»Innovation in High Power Fiber Laser Applications«

Proc. Of SPIE, Vol. 8237, 823717 (2012)

## [L06]

E. Beyer, P. Herwig, S. Hunze, A. Lasagni, M. Lütke, A. Mahrle, S. Nowotny, J. Standfuß, S. Thieme

»High-Power Laser Materials Processing«

31th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (ICALEO), 23.-27. September 2012, Anaheim, CA (USA), paper OP2 (2012), S. 1-10, Tagungs-CD, ISBN 978-0-912035-96-3

## [L07]

S. Bonß

»Systemkomponenten sorgen für zuverlässige Prozesse«

9. Workshop »Industrielle Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern«, 27.-28. März 2012, Fraunhofer IWS Dresden, Tagungs-CD

## [L08]

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

»Laser Heat Treatment with Latest System Components«

SPIE Photonics West 2012, 21.-26. Januar 2012, San Francisco, California, USA, Tagungs-CD

## [L09]

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

»Laser Heat Treatment with Latest System Components«

31th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (ICALEO), 23.-27. September 2012, Anaheim, CA (USA), Tagungs-CD  
ISBN 978-0-912035-96-3

## [L10]

L. Borchardt, M. Oschatz, M. Lohe, V. Presser, Y. Gogotsi, S. Kaskel

»Ordered Mesoporous Carbide-derived Carbons Prepared by Soft Templating«

Carbon 50 (2012), Nr. 11, S. 3987-3994

## [L11]

S. Braun, A. Kubec, M. Menzel, S. Niese, P. Krüger, F. Seiboth, J. Patommel, C. Schroer

»Multilayer Laue Lenses with Focal Length of 10 mm«

SRI 2012  
Journal of Physics: Conference Series (in Druck)

## [L12]

B. Brenner, V. Fux, J. Standfuß, J. Kaspar, G. Göbel

»New Laser-Assisted Joining Technologies for Meeting the Demands of Electric Vehicles«

EALA 2012 - European Automotive Laser Applications, Bad Nauheim, 7.-8. Februar 2012, Tagungs-CD

## [L13]

B. Brenner, G. Göbel, J. Standfuß, D. Dittrich, V. Fux, A. Grimm

»Neue Verfahren für das Fügen nicht oder schwer schweißbarer Werkstoffe und Mischverbindungen für luftfahrttypische Anwendungen«

Tagung »Schweißen im Luft- und Raumfahrzeugbau«, 11.-12. September 2012, Berlin, DVS-Berichte Band 287

## [L14]

P. Bringmann, M. Kolb, D. Raps, I. Jansen

»APP-CVD as Pre-Treatment for Structural Bonding in Aircraft Industry – a Potential Alternative to Anodising or Silane Treatments?«

Euradh 2012, 9th European Adhesion Conference, 16.-20. September, 2012, Friedrichshafen/Germany, S. 64 und Tagungs-CD

## [L15]

F. Brückner

»Modellrechnungen zum Einfluss der Prozessführung beim induktiv unterstützten Laser-Pulver-Auftragschweißen auf die Entstehung von thermischen Spannungen, Rissen und Verzug«

Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2012  
Zugl.: Dresden, TU, Diss., 2011  
ISBN 978-3-8396-0451-9

## [L16]

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

»Herstellung hochpräziser metallischer 3D-Strukturen durch Auftragschweißen mit brillanten Strahlquellen«

5. TAW-Symposium »Thermisches Beschichten mit laserbasierten Fertigungsverfahren«  
14.-15. März 2011, Dresden, Tagungsband

- [L17]**  
F. Brückner, S. Nowotny, M. Riede, H. Hillig, C. Leyens, E. Beyer  
»Generative Manufacturing by Use of High Brightness Lasers«  
FiSC 2012 - Proceedings of the International Laser Symposium Fiber & Disc, 16.-17. Oktober 2012, Dresden, Germany
- [L18]**  
F. Brückner, D. Lepski, S. Nowotny, C. Leyens, E. Beyer  
»Calculating the Stress of Multi-track Formations in Induction-assisted Laser Cladding«  
31th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (ICALEO), 23.-27. September 2012, Anaheim, CA (USA), S. 176-182
- [L19]**  
W. Bundschuh, S. Volk, A. Wetzig, M. Lütke  
»Laser Remote Punch: Inline High Speed Laser-Cutting of Punching-Bending «  
FiSC 2012 - Proceedings of the International Laser Symposium Fiber & Disc, 16.-17. Oktober 2012, Dresden, Germany
- [L20]**  
L. R. X. Cortella, D. Langheinrich, E. F de Sá, H. T. Oyama, I. A. Cestari, A. Lasagni, I. N. Cestari  
»STEM Cell Adhesion and Proliferation on Polyurethane Treated with Direct Laser Interference Patterning«  
Proceedings XXIII Congresso Brasileiro em Engenharia Biomédica, P. 1-7
- [L21] RV**  
L. Daniele Scintilla, L. Tricarico, A. Mahrle, A. Wetzig, E. Beyer  
»A Comparative Study of Cut Front Profiles and Absorptivity Behavior for Disk and CO<sub>2</sub> Laser Beam Inert Gas Fusion Cutting«  
Journal of Laser Applications 24 (2012), Nr. 5  
Doi: 10.2351/1.4755980
- [L22] RV**  
C. Demuth, M. Bieda, A. Lasagni, A. Mahrle, A. Wetzig, E. Beyer  
»Thermal Simulation of Pulsed Direct Laser Interference Patterning of Metallic Substrates Using the Smoothed Particle Hydrodynamics Approach«  
Journal of Materials Processing Technology, 212 (2012), 689-699  
Doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.10.023
- [L23]**  
G. Dietrich, M. Rühl, S. Braun, A. Leson  
»Hochpräzise Fügungen mittels Reaktiven Nanometermultischichten: Entwicklung einer kontrollierbaren, lokalen und kurzzeitig wirkenden Wärmequelle zum Fügen von wärmeempfindlichen Bauteilen«  
Vakuum in Forschung und Praxis 24 (2012), Nr. 1, S. 9-15
- [L24]**  
D. Dittrich  
»Verbesserung der Belastbarkeit von Haut-Haut-Schweißverbindungen für metallische Integralrumpf-Strukturen«  
Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2012  
Zugl.: Dresden, TU, Diss., 2011  
ISBN 3-8396-0375-7  
ISBN 978-3-8396-0375-8
- [L25]**  
S. Dörfler, M. Hagen, H. Althues, J. Tübke, S. Kaskel, M.J. Hoffmann  
»High Capacity Vertical Aligned Carbon Nanotube/Sulfur Composite Cathodes for Lithium-Sulfur Batteries«  
Chemical communications 48 (2012), Nr. 34, S. 4097-4099
- [L26]**  
S. Dörfler, I. Felhösi, I. Kék, T. Marek, H. Althues, S. Kaskel, L. Nyikos  
»Tailoring Structural and Electrochemical Properties of Vertical Aligned Carbon Nanotubes on Metal Foil Using Scalable Wet-Chemical Catalyst Deposition«  
Journal of power sources 208 (2012), S. 426-433
- [L27]**  
B. Dresler, D. Köhler, G. Mäder, S. Kaskel, E. Beyer, L. Clochard, E. Duffy, M. Hofmann, J. Rentsch  
»Novel Industrial Single Sided Dry Etching and Texturing Process for Silicon Solar Cell Improvement«  
PVSEC, 9. Februar 2012, Frankfurt, Tagungsband
- [L28]**  
V. Franke, J. Latokartano  
»Application Potentials of New Pulsed Fiber Lasers of the LIFT Project«  
FiSC 2012 - Proceedings of the International Laser Symposium Fiber & Disc, 16.-17. Oktober 2012, Dresden, Germany
- [L29]**  
R. Frenzel, I. Jansen, T. Schiefer, F. Simon  
»Organophile strukturierte Metalloberflächen für reproduzierbare und langlebige Klebungen«  
12. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 28.-29. Februar 2012, Frankfurt/Main, S. 26
- [L30]**  
R. Frenzel, I. Jansen, T. Schiefer, F. Simon  
»Polyelektrolyte für das Kleben laserstrukturierter Aluminiumfügeteile«  
Tagungsband 20. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium »Beschichtung, Modifizierung, und Charakterisierung von Polymeroberflächen NDVaK«, G. Blasek (Herausgeber), Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., 25.-26. Oktober 2012, S. 54-57  
ISBN 978-3-98125-504-1
- [L31]**  
R. Frenzel, I. Jansen, T. Schiefer, F. Simon  
»Adhesion Promotion by Polyelectrolyte Coatings at Laser Structured Aluminum Surfaces«  
Euradh 2012, 9<sup>th</sup> European Adhesion Conference, Friedrichshafen/Germany, 16.-20. September 2012, S. 27 und Tagungs-CD
- [L32]**  
A. Fürst, A. Klotzbach, R. Zocher, T. Blum, F. Kretzschmar, K. Zenger  
»Laser Induced Heat Setting of Thermoplastic Monofilaments«  
6. Aachen-Dresden International Textil Conference 29.-30. November 2012, Dresden, Tagungs-CD (2012)
- [L33]**  
G. Göbel, E. Beyer  
»Bearbeitung größerer Bauteile mit dem Laser – Schweißen, Schneiden und Beschichten«  
LASYS 2012 Stuttgart, 12.-13. Juni 2012
- [L34]**  
G. Göbel, J. Standfuß, E. Beyer  
»Welding of Mixed Materials Using High Brightness Lasers«  
Welding and Joining Workshop, October 23-24, 2012, Schaumburg, Illinois, USA
- [L35]**  
G. Göbel, B. Brenner  
»Fügen mit Feldern – Hintergründe und Entwicklungen«  
Fügetechnisches Symposium »Tailored Joining«, Dresden, 17.-18. Oktober 2012
- [L36] RV**  
G. Göbel, J. Kaspar, B. Brenner, E. Beyer  
»Dissimilar Metal Joining: Macro and Microscopic Effects«  
5th International Conference on High Speed Forming, Dortmund, 24.-26. April 2012
- [L37]**  
M. Graudenz, M. Heitmanek  
»Laser Tools in the Manufacturing Process: Joining Technology Trends in Body Manufacturing at Audi«  
Laser-Technik-Journal 9 (2012), Nr. 4, S. 24-27
- [L38]**  
A. Grimm, G. Göbel, B. Brenner, E. Beyer  
»Friction Stir Welding of 3D-Structures and Flexible Components«  
9<sup>th</sup> International Friction Stir Welding Symposium, 15.-17. Mai, 2012, Huntsville, Alabama, USA
- [L39]**  
S. Günther, R. Siebert, E. Beyer, W. Hofmann  
»Einfluss der Bearbeitung von Elektrolechen auf die Verluste elektrischer Fahrmotoren«  
EMA-Nürnberg 2012 Elektromobilitätsausstellung und Fachtagung
- [L40]**  
Y. Gu, J. Lu, T. Grotjohm, T. Schuelke, J. Asmussen  
»Microwave Plasma Reactor Design for High Pressure and High Power Density Diamond Synthesis«  
Diamond and Related Materials 24 (2012), S.210-214
- [L41]**  
M. Hagen, S. Dörfler, H. Althues, J. Tübke, M.J. Hoffmann, S. Kaskel, K. Pinkwart  
»Lithium-Sulphur Batteries - Binder Free Carbon Nanotubes Electrode Examined with Various Electrolytes«  
Journal of power sources 213 (2012), S.239-248

**[L42]**

J. Hauptmann, A. Klotzbach,  
J. Sykora, S. Pieper

»Hochflexibles Laser-Rillen und -Stanzen bei der Herstellung von digital gedruckten Umverpackungen«

Tagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik 2012. Praxis trifft Wissenschaft! Tagungsband, S. 461-470, 22./23. März 2012 Dresden

**[L43]**

J. Hauptmann, A. Klotzbach,  
K. Zenger, T. Schwarz, P. Rauscher,  
F. Klenke

»High Speed Processing - Applications and Systems«

FiSC 2012 - Proceedings of the International Laser Symposium Fiber & Disc, 16.-17. Oktober 2012, Dresden, Germany

**[L44]**

A. Jahn, M. Wagner

»Steigerung des Leichtbaupotenzials von Crashprofilen durch den Einsatz lasergeschweißter Mischbaustrukturen«

3. Freiburger Crashworkshop, 28. September, 2012

**[L45]**

I. Jansen

»Innovations in Adhesive Bonding Technology«

Fügetechnisches Symposium »Tailored Joining«, Dresden, 17.-18. Oktober 2012, S. 28

**[L46]**

I. Jansen, T. Schiefer, F. Simon,  
R. Frenzel

»Herstellung organophiler klebbarer Metalloberflächen durch Laserbehandlung und Beschichtung«

6. MATERIALICA Surface Kongress, 24. Oktober 2012, München

**[L47]**

F. Kaulfuß, O. Zimmer

»Wie Nanostrukturierung die Grenzen der Hartstoffbeschichtung erweitert: Dicke Hartstoffschichten, hergestellt mit einer PVD-Dünnschichttechnik«

Jahrbuch Oberflächentechnik 2012

**[L48]**

A. Klausch, H. Althues,  
T. Freudenberg, S. Kaskel

»Wet Chemical Preparation of YVO<sub>4</sub>:Eu Thin Films as Red-Emitting Phosphor Layers for Fully Transparent Flat Dielectric Discharge Lamp«

Thin solid films 520 (2012), Nr. 13, S. 4297-4301

**[L49]**

A. Klotzbach, A. Fürst,  
J. Hauptmann, E. Beyer

»Remote Processing of Tailored Fiber Reinforced Lightweight Structures«

31<sup>th</sup> International Congress on Applications of Laser and Electro Optics (ICALEO) 23.-27. September 2012, Anaheim (CA), USA, paper 401 (2012)

**[L50]**

A. Klotzbach, J. Hauptmann,  
U. Klotzbach, A. Mahrle, A. Wetzig,  
E. Beyer

»Remote Processing of Carbon Fiber Composite Materials with Brilliant cw-Laser«

International Symposium on Laser Processing of CFRP and Composites (LPCC), 26.-27. April 2012, Yokohama, USA, Tagungs-CD (2012)

**[L51]**

A. Klotzbach, J. Sykora, M. Boden,  
J. Hauptmann

»Scannersysteme für die Laser-Makromaterialbearbeitung: Klassifizierung und Systemvergleich«

8. Jenaer Lasertagung, 15.-16. November 2012, Jena, Deutschland (2012)

**[L52]**

A. Klotzbach, A. Zinke, T. Schwarz,  
A. Fürst

»Automated Cutting of Non-Crimp and Woven Fabrics Using the Laser Remote Technology«

6. Aachen-Dresden International Textil Conference 29.-30. November 2012, Dresden, Tagungs-CD (2012)

**[L53]**

U. Klotzbach

»Status and Progress of European FP7 Project of LIFT – Leadership in Fibre Laser Technology«

FiSC 2012 - Proceedings of the International Laser Symposium Fiber & Disc, 16.-17. Oktober 2012, Dresden, Germany

**[L54]**

U. Klotzbach, M. Panzner,  
G. Wiedemann

»Verfahrensgrundlagen und Gerätetechnik für die Laserreinigung von Kunst und Kulturgut«

Patitz, G.: Natursteinsanierung 2012 : Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele; 16. März 2011, 18. Fachtagung Natursteinsanierung Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2012, S.37-49

**[L55]**

T. Köckritz, E. Roch Talens,  
R. Luther, G. Paschew, U. Keitel,  
I. Jansen, O. Jost, A. Leson

»Dielectric Elastomer Actuators Based on Single Walled Carbon Nanotubes«

9<sup>th</sup> International Nanotechnology Symposium »New Ideas for Industry« Nanofair 2012, 12.-13. Juni, 2012, Dresden

**[L56]**

T. Köckritz, I. Jansen, R. Luther,  
A. Richter

»Material Platform for Dielectric Elastomer Actuators - Important Properties of the Investigated Material and Long-Term Stability Characteristics of the Actuator Layers«

Euradh 2012, 9th European Adhesion Conference, Friedrichshafen/Germany, 16.-20. September, 2012, S. 120 und Tagungs-CD

**[L57] RV**

J. Körner, G. Göbel, B. Brenner,  
E. Beyer

»Numerical Simulation of Magnetic Pulse Welding: Insights and Useful Simplifications«

5<sup>th</sup> International Conference on High Speed Forming, Dortmund, 24.-26. April 2012

**[L58]**

L. Kotte, G. Mäder, J. Roch,  
B. Leupolt, S. Kaskel, J. Wielant,  
T. Mertens, F. Gammel

»Großflächige Plasmavorbereitung und PECVD bei Atmosphärendruck mittels LARGE-Plasmaquelle«

Jahrbuch Oberflächentechnik 2012, Band 68  
ISBN 978-3-87480-274-1

**[L59]**

M. Langer, R. Rechner, M. Thieme,  
I. Jansen, E. Beyer

»Surface Analytical Characterisation of Nd:YAG-Laser Pre-Treated AlMg3 as a Preparation for Bonding«

Solid State Sci. 14 (2012)7, S. 926-935

**[L60]**

D. Langheinrich, S. Eckhardt,  
A. Lasagni

»Direct Fabrication of Periodic Patterns on Polymers Using Laser Interference«

Plastic Research Online,  
10.1002/spepro.004281

**[L61]**

D. Langheinrich, S. Doerfler,  
H. Althues, S. Kaskel, A. Lasagni

»Rapid and Scalable Method for Direct and Indirect Microstructuring of Vertically Aligned Carbon Nanotubes«

Surface and Coating Technology,  
206, Nr. 23, S. 4808-4813

**[L62]**

D. Langheinrich, E. Yslas,  
M. Broglia, V. Rivarola, D. Acevedo,  
A. Lasagni

»Control of Cell Growth Direction by Direct Fabrication of Periodic Micro and Submicrometer Arrays on Polymers«

Journal of Polymer Science, 50,  
Nr. 6, S. 415-422

**[L63]**

A. Lasagni, D. Langheinrich

»Direkte Fabrikation periodischer Muster auf Polymeren mit Hilfe von UV-Laserinterferenzstrukturierung«

Blasek, G., Leibniz-Institut für Polymerforschung -IPF- Beschichtung, Modifizierung, und Charakterisierung von Polymeroberflächen, 20. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium 2012, Tagungsband, 25.-26. Oktober 2012, Dresden, S. 73-78

**[L64]**

A. Lasagni, T. Roch,  
D. Langheinrich, M. Bieda,  
H. Perez, A. Wetzig, E. Beyer

»Large Area Direct Fabrication of Periodic Arrays Using Interference Patterning«

Laser-based Micro- and Nanopackaging and Assembly VI, 24. Januar 2012 San Francisco, California, USA Proc. SPIE 8244, 82440F (2012); DOI: 10.1117/12.906758

- [L65]**  
A. Lasagni, D. Langheinrich, T. Roch  
»Fabrication of Circular Periodic Structures on Polymers Using High Pulse Energy Coherent Radiation and an Axicon«  
Advanced engineering Materials, 14, 107-111
- [L66]**  
B. Lehmann  
»SWCNT des Fraunhofer IWS und ihre Weiterverarbeitung zu Nanosensoren wie z. B. piezoresistive Sensoren«  
14. Chemnitzer Seminar für Nanotechnologie, Nanomaterials and Nanoreliability, September 2012, Chemnitz
- [L67]**  
B. Lehmann, E. Roch Talens, A. Roch, O. Jost, A. Leson  
»Nano- and Microfibers From Single-Walled Carbon Nanotubes«  
9<sup>th</sup> International Nanotechnology Symposium »New Ideas for Industry« Nanofair 2012, 12.-13. Juni, 2012, Dresden, Tagungsband, S. 32
- [L68]**  
B. Lehmann, T. Endmann, A. Augustow, A. Roch, E. Roch Talens, O. Jost, A. Leson  
»Piezoresistive Sensors Based on SWCNTs Produced by Unique Pulsed Arc Discharge«  
Paper-no. 1569543555. SSD12/SCI 2012: Session SC18. März 2012, Chemnitz
- [L69]**  
B. Lehmann, O. Jost  
»Elektrospinnen – eine textilorien- tierte Technologie zur Mikro-/Nano- faserherstellung auf Basis von CNTs. Modernste Carbon-Nano-Technologie - Anwendungsbereit für Smarte Textilien.«  
Workshop des SmartTex Netzwerkes. Mai 2012, Weimar
- [L70]**  
C. Leyens, S. Nowotny, F. Brückner  
»Innovations in Laser Cladding and Direct Metal Deposition«  
SPIE Photonics West 2012, 21.-26. Januar 2012, San Francisco, California, USA
- [L71]**  
C. Leyens, F. Brückner, S. Nowotny  
»Latest Development Work on Induction Assisted Laser Cladding Processes«  
Proceedings of the Laser Additive Manufacturing Workshop, LAM, 29. Februar - 1. März 2012, Houston, TX (USA)
- [L72]**  
Y. Luo, A. Lode, A.R. Akkineni, F. Sonntag, B. Nies, M. Gelinsky  
»Well-Ordered Calcium Phosphate/alginate Biphasic Scaffolds Containing Designed Hollow Fibers for Bone Tissue Engineering and Regeneration«  
Journal of tissue engineering and regenerative medicine 6 (2012), Supplement 1, Abstract 61.P20, S. 372
- [L73]**  
R. Luther, M. Tietze, G. Paschew, T. Köckritz, I. Jansen, E. Roch Talens, O. Jost, F. Schlenkrich, L. Seffner, U. Keitel, A. Schönecker, A. Richter  
»Full Polymer Dielectric Elastomer Actuators (DEA) Functionalized with CNTs and High-k Ceramics«  
CIMTEC International Conference »Smart Materials, Structures and Systems«, 10.-14. Juni, 2012, Montecatini Terme, Italy, S. 88, C:P13
- [L74] RV**  
M. Lütke, J. Hauptmann, A. Wetzig  
»Energetic Efficiency of Remote Cutting in Comparison to Conventional Fusion Cutting«  
Journal of Laser Applications 24 (2012), Nr. 2, 022007-1 - 022007-7
- [L75]**  
M. Lütke, F. Bartels, J. Hauptmann, A. Wetzig, E. Beyer  
»Relative Efficiency of Remote Laser Cutting.«  
The Laser User (66)
- [L76]**  
M. Lütke, A. Wagner, A. Wetzig, E. Beyer  
»Identification and Characterization of Analogies of Remote Fusion Cutting Processes Using Different Beam Sources«  
31th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (ICALEO), 23.-27. September 2012, Anaheim, CA (USA)
- [L77]**  
A. Mahrle, S. Rose, M. Schnick, T. Pinder, E. Beyer, U. Füssel  
»Prozesscharakteristik des Laserstrahl-Plasmaschweißens von Stahl und Aluminium«  
Tagungsband Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2012, TU Dresden
- [L78]**  
A. Mahrle, M. Schnick, S. Rose, T. Pinder, E. Beyer, U. Füssel  
»Development and Experimental Analysis of Laser-Assisted Plasma Arc Welding«  
31th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (ICALEO), 23.-27. September 2012, Anaheim, CA (USA), paper 1302, p. 435-444
- [L79]**  
A. Mahrle, S. Rose, M. Schnick, T. Pinder, E. Beyer, U. Füssel  
»Improvements of the Welding Performance of Plasma Arcs by a Superimposed Fiber Laser Beam«  
Photonics West, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications 24.-26. Januar 2012, San Francisco, California, USA  
Vol. 8239 82390D  
ISBN: 978-0-8194-8882-4
- [L80]**  
S. Makowski, V. Weihnacht, F. Schaller, A. Leson  
»Diesel Lubricated Ta-C-Coatings«  
18<sup>th</sup> International Colloquium Tribology, Technische Akademie Esslingen, Tagungsband S. 95, 10.-12. Januar 2012,  
ISBN 3-924813-97-3
- [L81]**  
D. Mari, L.-M. Berger, S. Stahr  
»Analysis of Microstructural Changes with Temperature of Thermally Sprayed WC-Co Coatings by Mechanical Spectroscopy«  
Internal Friction and Mechanical Spectroscopy, 16th International Conference on Internal Friction and Mechanical Spectroscopy (ICIFMS-16), 3.-8. Juli, 2011, Lausanne, Switzerland,  
Eds.: R. Schaller, D. Mari  
Solid State Phenomena, Vol. 184, 2012, p. 313-318  
(ISSN 978-3-03785-338-2)
- [L82]**  
T. Mertens, F.J. Gammel, M. Kolb, O. Rohr, L. Kotte, S. Tschöcke, S. Kaskel, U. Krupp  
»Investigation of Surface Pre-Treatments for the Structural Bonding of Titanium«  
International journal of adhesion and adhesives 34 (2012), S. 46-54
- [L83]**  
L. Müller-Meskamp, Y.-H. Kim, T. Roch, S. Hofmann, R. Scholz, S. Eckardt, K. Leo, A. Lasagni  
»Efficiency Enhancement of Organic Solar Cells by Fabricating Periodic Surface Textures Using Direct Laser Interference Patterning«  
Advanced Materials, 24, S. 906-910
- [L84]**  
J. Musil, M. Lütke, M. Schweier, J. Hatwig, A. Wetzig, E. Beyer, M. F. Zaeh  
»Combining Remote Ablation Cutting and Remote Welding: Opportunities and Application Areas«  
Photonics West, High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications 24.-26. Januar 2012, San Francisco, California, USA  
Vol. 8239 8239 0Q  
ISBN: 978-0-8194-8882-4
- [L85]**  
S. Norman, A. Appleyard, A. Hassey, A. Wetzig, E. Beyer  
»Application and Performance of KW-Class Single-Mode Fibre Lasers in the Cutting of Non-Oriented Electrical Steel«  
FiSC 2012 - Proceedings of the International Laser Symposium Fiber & Disc, 16.-17. Oktober 2012, Dresden, Germany
- [L86]**  
S. Nowotny  
»Hochproduktives Laser-Auftragschweißen mit Pulver und Draht«  
Fraunhofer Verlag 2012, ISBN: 978-3-8396-0493-9
- [L87]**  
S. Nowotny  
»Oberflächenbeschichten und generativer Strukturaufbau durch Laser-Auftragschweißen«  
5. TAW-Symposium »Thermisches Beschichten mit laserbasierten Fertigungsverfahren«  
14.-15. März 2011, Dresden, Tagungsband, S.1-7

**[L88]**

S. Nowotny, F. Brückner, H. Hillig, C. Leyens, E. Beyer

»Hochleistungs-Auftragschweißen mit Laserstrahlung«

Wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 102 (2012) H.6, S. 368-369

**[L89] RV**

S. Nowotny, J. Ortner, S. Scharek, J. Spatzier, E. Beyer

»Repair of Erosion Defects in Gun Barrels by Direct Laser Deposition«

Journal of Thermal Spray Technology 21, 2012, S. 1173-1183  
DOI 10.1007/s11666-012-9817-3 (online-first publication)

**[L90]**

S. Nowotny, F. Brückner, H. Hillig, C. Leyens, F. Beck

»Hochproduktives Laser-Auftragschweißen durch Energiequellenkombination«

Schriftenreihe »Thermisches Spritzen«, Band 5, 2012, ISSN 1610-0530, Seiten 77-84

**[L91]**

M. Oschatz, L. Borchartd, M. Thommes, K.A. Cychosz, I. Senkovska, N. Klein, R. Frind, M. Leistner, V. Presser, Y. Gogotsi, S. Kaskel

»Carbide-Derived Carbon Monoliths with Hierarchical Pore Architectures«

Angewandte Chemie. International edition 51 (2012), Nr. 30, S. 7577-7580

**[L92]**

H. Pajukoski, J. Näkki, S. Thieme, J. Tuominen, S. Nowotny, P. Vuoristo

»Laser Cladding with Coaxial Wire Feeding«

31th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (ICALEO), 23.-27. September 2012, Anaheim, CA (USA), paper 124 (2012), P. 169-178, Tagungs-CD, ISBN 978-0-912035-96-3

**[L93]**

J.-S. Pap, I. Jansen

»The Effect of Material Properties on the Strength of Adhesively Bonded Thermoplastic Composites«

Euradh 2012, 9th European Adhesion Conference, Friedrichshafen/Germany, 16.-20. September, 2012, S. 114 und Tagungs-CD

**[L94]**

H. Perez-Hernandez, A. Lasagni

»Fast and Efficient Manufacturing Method of 1D and 2D Polyethylene Terephthalate Transmission Diffraction Gratings by Direct Laser Interference Patterning«

Polymer Engineering and Science 52, 2012, Nr. 9, S. 1903-1908

**[L95]**

H. Perez-Hernandez, T. Paumer, T. Pompe, C. Werner, A. Lasagni

»Contactless Laser-Assisted Patterning of Surfaces for Bio-Adhesive Microarrays«

Biointerfaces, Online journal 7 (2012), Nr. 1-4, Art. 35, S.1-9

**[L96]**

R. Rechner

»Laseroberflächenvorbehandlung von Aluminium zur Optimierung der Oxidschichteigenschaften für das strukturelle Kleben«

Dissertation TU Dresden 2011 Verlag Dr. Hut, München, 2012 ISBN 978-3-8439-0306-6, ISBN 3-8439-0306-9

**[L97]**

R. Rechner, I. Jansen, E. Beyer

»Laseroberflächenvorbehandlung von Aluminium zur Optimierung der Oxidschichteigenschaften für das strukturelle Kleben«

DVS-Berichte 292 (2012), S.1-6 ISBN 978-3-87155-599-2

**[L98]**

R. Rechner, I. Jansen, E. Beyer

»Optimization of the Aluminum Oxide Properties for Adhesive Bonding by Laser Surface Pre-Treatment«

Journal of Laser Applications 24 (2012), Nr. 3, 032002-1 bis 032002-9

**[L99]**

D.K. Reinhard, D.T. Tran, T. Schuelke, M.F. Becker, T.A. Grotjohn, J. Asmussen

»SiO<sub>2</sub> Antireflection Layers for Single-Crystal Diamond«

Diamond and Related Materials 25 (2012), S. 84-86

**[L100]**

A. Roch

»Herstellung von defektarmen einwandigen Kohlenstoffnanoröhren in großen Mengen«

Laser Magazin - Neue Werkstoffe Ausgabe 2 (2012), S. 57

**[L101]**

T. Roch

»Großflächige Herstellung von Nanostrukturen für effizientere organische Solarzellen«

Photonik 44 (2012), Nr. 3, S. 14

**[L102]**

T. Roch, V. Weihnacht, H.-J. Scheibe, A. Roch, A. Lasagni

»Nano- and Micro-Patterning of Diamond-Like Carbon for Tribological Application«

9<sup>th</sup> International Nanotechnology Symposium »New Ideas for Industry« Nanofair 2012, 12.-13. Juni, 2012, Dresden, Tagungsband

**[L103]**

E. Roch Talens, T. Endmann, A. Roch, M. Greifzu, T. Köckritz, B. Lehmann, O. Jost, I. Jansen, E. Beyer, A. Leson

»Highly Elastic Transparent SWCNT-Polymer Electrodes with Excellent Robustness and Long-Term Stability«

9<sup>th</sup> International Nanotechnology Symposium »New Ideas for Industry« Nanofair 2012, 12.-13. Juni, 2012, Dresden

**[L104]**

S. Rose, M. Schnick, A. Mahrle, T. Pinder, E. Beyer, U. Füssel

»Plasma Welding with a Superimposed Fiber Laser Beam«

Int. Institute of Welding, Study Group 212 »Physics of Welding« (2012), Doc.XII-2055-12 / 212-1213-12 / IV-1106-12

**[L105]**

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

»Heat and Mass Transfer in Reactive Multilayer Systems (RMS)«

Comsol Europe Proceedings of the 2012 Comsol Conference (in Druck)

**[L106]**

S. Scheitz, F.-L. Toma, L.-M. Berger, T. Hoffmann, U. Klotzbach, M. Fries, S. Thiele

»Entwicklung thermisch gespritzter Beschichtungslösungen für keramische Substrate«

Tagungsband zum 15. Werkstofftechnischen Kolloquium in Chemnitz, 20.-21. September 2012, Schriftenreihe »Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen«, Band 47, p. 74-83 Herausgeber: B. Wielage ISBN: 978-3-00-039358-7, ISSN: 1439-1597

**[L107]**

T. Schiefer, I. Jansen, R. Frenzel, F. Simon

»Laser Structuring of Aluminum Surfaces and Subsequent Organophilic Coating for Structural Bonding«

Euradh 2012, 9th European Adhesion Conference, Friedrichshafen/Germany, 16.-20. September, 2012, S. 115 und Tagungs-CD

**[L108]**

N. Schilling, M. Paschke, U. Klotzbach, S. T. Hendow

»Formation of Tribological Structures by Laser Ablation«

Hennig, G. ; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-Bellingham/Wash.: Laser applications in microelectronic and optoelectronic manufacturing, LAMOM XVII (2012), San Francisco, California, United States; Part of SPIE Photonics West Bellingham, WA : SPIE, 2012, Paper 82430X (Proceedings of SPIE 8243)

**[L109]**

F. Schmidt, H. Klemm, K. Schönfeld, A. Gerdts, W. Hungerbach, C.J. van Lookeren Campagne, S. Kaskel

»Novel Composite Spherical Granulates with Catalytic Outer Layer and Improved Conversion Efficiency and Selectivity«

Chemical Engineering and Technology 35 (2012), Nr. 4, S. 769-775

**[L110]**

F. Schmidt, S. Paasch, E. Brunner, S. Kaskel

»Carbon Templated SAPO-34 with Improved Adsorption Kinetics and Catalytic Performance in the MTO-Reaction«

Microporous and mesoporous materials 164 (2012), S. 214-221

**[L111]**

D. Schneider, A. Leson, L. M. Berger

»Laserakustik für Schicht- und Oberflächenprüfung: Methoden für die zerstörungsfreie Prüfung von Schichten und Werkstoffoberflächen«

Vakuum in Forschung und Praxis 24 (2012), Nr. 4, S. 17-23

**[L112]**

D. Schneider, R. Hofmann,  
T. Schwarz, T. Grosser, E. Hensel

»Evaluating Surface Hardened  
Steels by Laser-Acoustics«

Surface and coatings technology  
206 (2012), Nr. 8-9, S. 2079-2088

**[L113]**

M. Schneider, M. Weiser, S. Dörfler,  
H. Althues, S. Kaskel, A. Michaelis

»Electrodeposition of Copper on  
Aligned Multi-Walled Carbon Nano-  
tubes«

Surface engineering 28 (2012),  
Nr. 6, S. 435-441

**[L114] RV**

M. Schnick, S. Rose, U. Füssel,  
A. Mahrle, C. Demuth, E. Beyer

»Experimental and Numerical Inve-  
stigations of the Interaction  
Between a Plasma Arc and a Laser«

Welding in the World, Vol. 56,  
No. 03/04 (2012)

**[L115]**

B. Schuhmacher, S. Puls, J. Schauer-  
Paß, M. Strack, K. Nikolov,  
H. Paschke, T. Stucky

»Plasma Technology for Energy  
Conversion and Storage: Chances  
and Challenges for Flat Steel Sheet  
Products«

13<sup>th</sup> International Conference on  
Plasma Surface Engineering, Gar-  
misch-Partenkirchen,  
10.-14. September 2012

**[L116]**

S. Schulze, G. Göbel, U. Füssel,  
E. Beyer

»Optimization of FSW Clamping Sy-  
stems by Utilizing Numerical and  
Experimental Approaches«

9<sup>th</sup> International Friction Stir Wel-  
ding Symposium, 15.-17. Mai  
2012, Huntsville, Alabama, USA

**[L117]**

L. D. Scintilla, L. Tricarico,  
A. Wetzig, E. Beyer

»Energy Balance in Disk and CO<sub>2</sub>  
Laser Beam Inert Gas Fusion Cut-  
ting«

Photonics West, High-Power Laser  
Materials Processing: Lasers, Beam  
Delivery, Diagnostics, and Applicati-  
ons 24.-26. Januar 2012, San Fran-  
cisco, California, USA  
Vol. 8239 82390N  
ISBN: 978-0-8194-8882-4

**[L118]**

M. Seifert

»Die Vielfalt der Verfahrensvarianten  
bei der Laserwärmebehandlung  
mit präziser Temperaturregelung«

9. Workshop »Industrielle Anwen-  
dungen von Hochleistungsdioden-  
lasern«, 27.-28. März 2012,  
Fraunhofer IWS Dresden,  
Tagungs-CD

**[L119]**

R. Siebert, H. Thonig, A. Wetzig,  
E. Beyer

»Applicability of Various Beam  
Sources for High Power Laser Cut-  
ting of Non-Oriented Electrical  
Steel«

Photonics West, High-Power Laser  
Materials Processing: Lasers, Beam  
Delivery, Diagnostics, and Applicati-  
ons  
24.-26. Januar 2012, San Francisco,  
California, USA  
Vol. 8239 8239 00  
ISBN: 978-0-8194-8882-4

**[L120]**

R. Siebert, M. Lütke, A. Wetzig,  
H. Thonig, E. Beyer

»Experimental Findings on High  
Power Laser Cutting of Non-Ori-  
ented Electrical Steel«

5<sup>th</sup> International Conference Ma-  
gnetism and Metallurgy WMM'12,  
Ghent, Belgien  
Tagungsband S. 262-271

**[L121]**

A. Sinibaldi, N. Danz, E. Descrovi,  
P. Munzert, U. Schulz, F. Sonntag,  
L. Dominici, F. Michelotti

»Direct Comparison of the Perfor-  
mance of Bloch Surface Wave and  
Surface Plasmon Polariton Sensors«

Sensors and Actuators. B 174  
(2012), S. 292-298

**[L122]**

W.A. Soer, M.M.J.W. van Herpen,  
M.J.J. Jak, P. Gawlitza, S. Braun,  
N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo,  
V.Y. Banine

»Atomic-Hydrogen Cleaning of Sn  
From Mo/Si and DLC/Si Extreme Ul-  
traviolet Multilayer Mirrors«

Journal of micro/nanolithography,  
MEMS and MOEMS 11 (2012),  
Nr. 2, Art.021118

**[L123]**

J. Standfuß, E. Beyer

»Innovationen beim Laserstrahl-  
schweißen mit hochbrillanten  
Strahlquellen«

Fügetechnisches Symposium »Tailo-  
red Joining« Dresden, 17.-18. Ok-  
tober 2012

**[L124]**

J. Standfuß, D. Dittrich, B. Brenner,  
B. Winderlich, G. Kirchhoff,  
J. Liebscher, G. Goebel, A. Grimm

»Laser Beam Welding of High  
Strength Aluminium Alloys«

The 2<sup>nd</sup> International Conference  
and Exhibition »Aluminium-  
21/WELDING AND BRAZING«, Saint  
Petersburg, Russland, 20.-22. No-  
vember 2012, Tagungsband

**[L125]**

F. Takali, A. Njeh, D. Schneider,  
M.H. Ben Ghazlen

»Surface Acoustic Waves Propaga-  
tion in Epitaxial ZnO/alpha-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Thin Film«

Acta acustica united with Acustica  
98 (2012), Nr. 2, S. 223-231

**[L126]**

G. Theiler, T. Gradt, W. Österle,  
A. Brückner, V. Weihnacht

»Friction and Endurance of  
MoS<sub>2</sub>/ta-C Coatings Produced by  
Laser-Arc Deposition«

Wear 297 (2013) S. 791-801

**[L127]**

S. Thieme, R. Kager, S. Nowotny

»Neuentwicklungen zum Laser-  
Heißdraht-Auftragschweißen«

Schriftenreihe »Thermisches Sprit-  
zen«, Band 5, 2012  
ISSN 1610-0530, S. 85-92

**[L128] RV**

F.-L. Toma, L.-M. Berger, S. Scheitz,  
S. Langner, C. Rödel, A. Potthoff,  
V. Sauchuk, M. Kusnezoff

»Comparison of the Microstructural  
Characteristics and Electrical Pro-  
perties of Thermally Sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Coatings from Aqueous Suspensi-  
ons and Feedstock Powders«

Journal of Thermal Spray Techno-  
logy, 2012, Vol. 21, No. 3-4,  
p. 480-488

**[L129]**

A. Voronov, P. Gawlitza, R. Cambie,  
S. Dhuey, E. M. Gullikson,  
T. Warwick, S. Braun, W. Yashchuk,  
H.A. Padmore

»Conformal Growth of Mo/Si Multi-  
layers on Grating Substrates Using  
Collimated Ion Beam Sputtering«

Journal of Applied Physics 111  
(2012), Nr. 9, 093521, 9

**[L130]**

M. Wagner

»Belastungsangepasstes Bauteilde-  
sign mithilfe lokaler Laserfestig-  
ung«

2. Freiburger Crashworkshop,  
03. Februar, 2012

**[L131]**

F. Wehnert, I. Jansen, J. Heinrich

»Multifunctional Adhesives by Inte-  
gration of Carbon Nanotubes«

Euradh 2012, 9<sup>th</sup> European Adhe-  
sion Conference, Friedrichsha-  
fen/Germany, 16.-20. September,  
2012, S. 116 und Tagungs-CD

**[L132]**

F. Wehnert, I. Jansen, E. Beyer

»Nanopartikel-basierte Klebstoffsy-  
steme«

DVS-Berichte 292 (2012), S. 65-72  
ISBN 978-3-87155-599-2

**[L133]**

V. Weihnacht

»Industrielle Herstellungstechnolo-  
gie für superharte ta-C Schichten  
und Anwendungsbeispiele«

GFE-Workshop »Kohlenstoffschich-  
ten - Potenziale und Anwendun-  
gen« Tagungsband

**[L134]**

V. Weihnacht

»Reibungs- und Verschleißminde-  
rung durch Beschichtung«

22. Dresdner Verpackungstage

**[L135]**

V. Weihnacht, A. Brückner,  
G. Theiler, T. Gradt

»MoS<sub>2</sub>/ta-C-Kombinationsschich-  
ten hergestellt durch Laser-Arc-  
Technologie: Hochwertige Umge-  
bungen«

Vakuum in Forschung und Praxis 24  
(2012), Nr. 5, S. 17-23

**[L136]**

V. Weihnacht, S. Makowski,  
G. Englberger, F. Schaller, A. Leson

»From Graphite-Like a-C to Dia-  
mond-Like ta-C: Friction and Wear  
Behaviour with Specific Lubricants«

18<sup>th</sup> TAE Colloquium Tribology,  
Tagungsband

**[L137]**

S. E. Wenzel, M. Fischer,  
F. Hoffmann, M. Fröba

»A New Series of Isoreticular Copper-Based Metal-Organic Frameworks Containing Non-Linear Linkers with Different Group 14 Central Atoms«

Journal of Materials Chemistry 22 (2012), Nr. 20, S. 10294-10302

**[L138]**

A. Wetzig, E. Beyer, B. Brenner,  
J. Hauptmann, M. Lütke

»Vom Feinschneiden bis zum Engspaltschweißen - Stand der Technik bei der Materialbearbeitung mit Faserlasern«

Lasermaterialbearbeitung, Innovationen und Trends, Vorträge und Posterbeiträge der 8. Jenaer Lasertagung, 22. und 23. November 2012, Jena ISBN: 978-3-87155-59

**[L139]**

P. Wollmann, M. Leistner,  
W. Grähler, O. Throl, F. Dreisbach,  
S. Kaskel

»Infrarorb: Optical Detection of the Heat of Adsorption for High Throughput Adsorption Screening of Porous Solids«

Microporous and mesoporous materials 149 (2012), Nr. 1, S. 86-94

**[L140]**

X.Y. Yang, L. Haubold, G. DeVivo,  
G.M. Swain

»Electroanalytical Performance of Nitrogen-Containing Tetrahedral Amorphous Carbon Thin-Film Electrodes«

Analytical chemistry 84 (2012), Nr. 14, S. 6240-6248

**[L141]**

D. Yuan, A. Lasagni, J.L. Hendricks,  
D.C. Martin, S. Das

»Patterning of Periodic Nano-Cavities on PEDOT-PSS Using Nanosphere-Assisted Near-Field Optical Enhancement and Laser Interference Lithography«

Nanotechnology 23 (2012), Nr. 1, Art. 015304, 9

**[L142]**

O. Zimmer

»V2011 Workshop Beschichtungen für Werkzeuge und Bauteile«

Vakuum in Forschung und Praxis 24 (2012), Nr. 1, S. 38-40

**[L143]**

O. Zimmer, F. Kaulfuß

»Neue Möglichkeiten der Werkzeugbeschichtung durch dicke Hartstoffschichten, hergestellt mit dem Arc-Verfahren«

Kompodium spanende Fertigung 2012

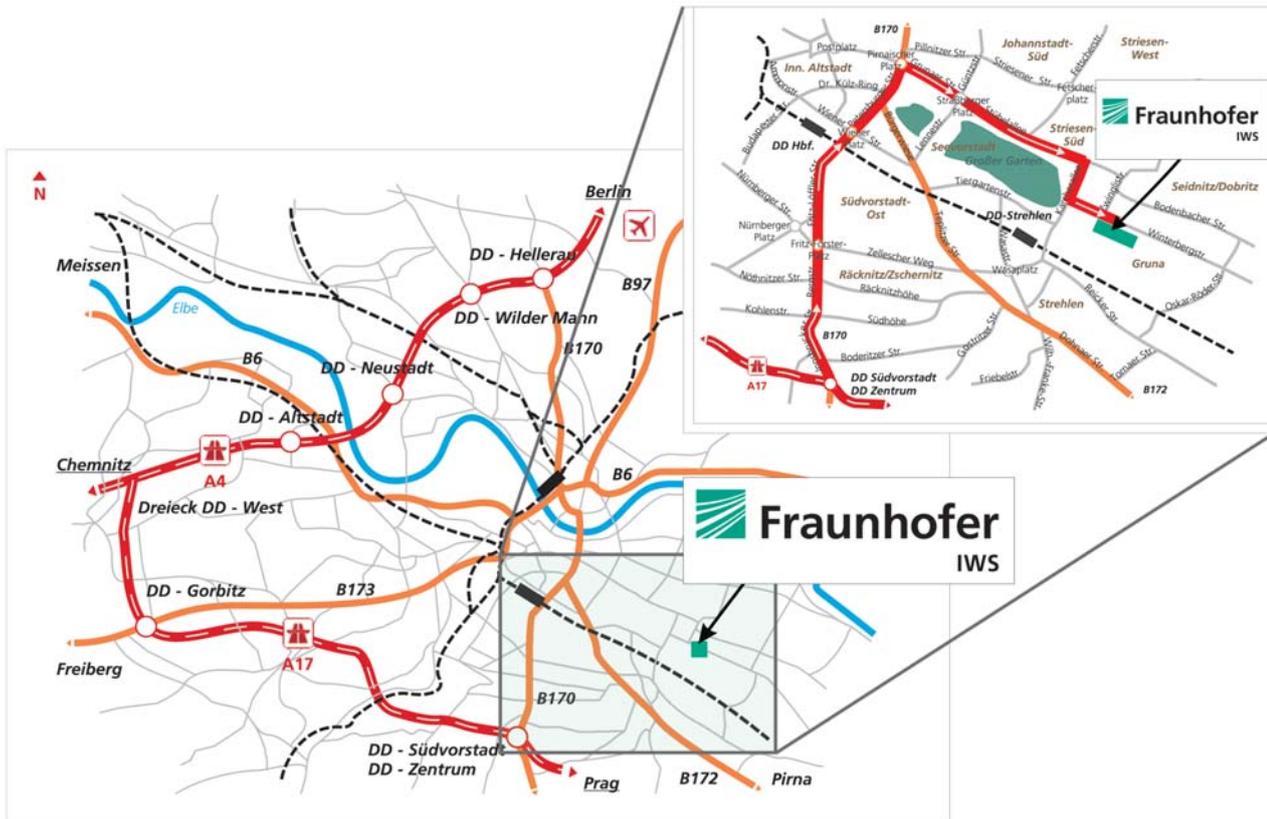
**[L144]**

O. Zimmer, E. Schmalz

»PVD-coating – A New Solution for Antistatic Finishing of Filter Media«

Journal of Textiles and Light Industrial Science and Technology (TLIST)

# 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 »Gruna / VW-Manufaktur«,
- geradeaus, am Ende des »Großen Gartens« rechts in die Karcherallee,
- an der folgenden Ampel links in die Winterbergstraße.

## Post-Adresse:

Fraunhofer-Institut für Werkstoff-  
und Strahltechnik IWS Dresden  
Winterbergstr. 28  
01277 Dresden

## Mit der Straßenbahn (ab Dresden-Hauptbahnhof):

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

## Internet-Adresse:

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

## Mit dem Flugzeug:

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

Telefon +49 351 83391-0

Fax +49 351 83391-3300

E-mail: [info@iws.fraunhofer.de](mailto:info@iws.fraunhofer.de)

# IMPRESSUM

Redaktion / Koordination / Gestaltung:

B.Eng. Sophie Pianski  
Dr. Anja Techel  
Dr. Ralf Jäckel

Bildnachweis:

S. Titel, 13, 18, 37, 38, 55, 80, 90, 112, 113, 130	Frank Höhler
S. 2, 14, 20, 36, 54, 55, 64, 78, 94	Fraunhofer IWS / Frank Höhler
S. 6	Fotolia
S. 11	Dr. F. Junker (privat)
S. 21, 22, 65, 66, 79, 80, 96, 100, 102, 108	Jürgen Jeibmann
S. 111	Marco Becker (fotolia)
S. 118	TU Wrocław
S. 120 / 121	Fraunhofer IPM, ILT, IST, IOF, FEP
S. 122	Secret Side (fotolia)
S. 126 (oben)	TU Dresden, Ulrich van Stipriaan
S. 127 (o. li.)	TU Dresden, Liebert
S. 129	Fraunhofer IWS / Bolko Kosel
S. 130, 132 (li.)	Michael Schmidt
S. 132 (o. re.)	Dirk Mahler
alle anderen Abbildungen	Fraunhofer IWS

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2013

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.