



Fraunhofer

IWS



Dresden



FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFF- UND STRAHLTECHNIK IWS

JAHRESBERICHT

2015

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





# JAHRESBERICHT 2015



# VORWORT



Das Jahr 2015 war für das IWS ein außerordentlich gutes Jahr. Nochmals deutlich mehr Kunden haben uns ihr Vertrauen geschenkt und mit uns Projekte durchgeführt. Hierdurch konnte unser Ertrag aus der Industrie um ca. 25 Prozent wachsen.

Die große Herausforderung der nächsten Jahre stellt die Speicherung von Energie, insbesondere von elektrischer Energie, dar. Dem IWS ist hier zusammen mit seinen Dresdner Projektpartnern ein gewisser Durchbruch gelungen. Erstmals konnte eine Natrium-Schwefel-Batterie bei Raumtemperatur präsentiert und auf der Dresdner Konferenz »Zukunft Energie« vorgestellt werden. Die Besonderheiten sind u. a. extrem geringe Kosten der Elektrodenmaterialien, nahezu unbegrenztes Vorkommen von Natrium und Schwefel und eine problemlose Recyclebarkeit.

Im Bereich der Energieeffizienz haben Mitarbeiter des IWS den Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2015 erhalten. Ausgezeichnet wurden sie für die Entwicklung und industrielle Überführung von extrem reibungsarmen und verschleißbeständigen diamantähnlichen Schichten.

Das Drucken stellt eine neuartige, zurzeit schnell wachsende Fertigungstechnik dar, welche den Ansprüchen des Themas Industrie 4.0 voll genügt. So kann man ein CAD-konstruiertes Bauteil aus dem Internet herunterladen und auf eine Anlage zum Drucken senden, um wenig später das fertige Bauteil in Empfang zu nehmen. Das IWS hat seine Arbeit auf diesem Gebiet im Rahmen des DRESDEN-concept mit den Arbeiten der TU Dresden in einem Gebäude zusammengeführt.

Dank der Unterstützung der sächsischen Landesregierung (SMWK, SMWA) konnte das IWS 2015 über 12 Mio. € investieren. Hierdurch ist es möglich, für unsere FuE-Projekte neueste Technologien zu nutzen.



»Das Geheimnis des Erfolges ist, den Standpunkt des Anderen zu verstehen.«

Henry Ford

Seit Anfang des Jahres betreibt das IWS zwei Center in den USA – das Center for Coatings and Diamond Technologies (CCD) und das Center for Laser Applications (CLA). Beide Center haben 2015 ein sehr erfolgreiches Technologieaudit durchgeführt.

Das IWS ist u. a. in seinem Center CCD in den USA sehr erfolgreich in der Herstellung von Diamanten mit Hilfe von Plasmaverfahren. Eine Herausforderung der nächsten 2 Jahre ist es diamantbasierte Hochleistungselektronik zu entwickeln.

Angesichts der weltpolitischen Herausforderungen und eines beispiellosen Flüchtlingsstroms bedarf es neuer, koordinierter und standortspezifischer Konzepte der Integration. Vom IWS initiiert wird deshalb am Standort Sachsen ein Pilotprojekt starten, um anerkannten Flüchtlingen durch verschiedene Maßnahmen die Integration in den Arbeitsmarkt zu erleichtern. Der konzeptionelle Gesamtansatz sieht grundsätzlich drei Förderlinien vor: 1. Fit für das Studium, 2. Fit für die Ausbildung und 3. Fit für den Arbeitsmarkt. Ein Patensystem soll helfen, die neuen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erfolgreich innerhalb und außerhalb des Instituts zu integrieren.

Insgesamt war das Jahr 2015 ein außergewöhnlich gutes Jahr für das IWS, so dass wir voller Optimismus in das Jahr 2016 gehen können.

Ich wünsche Ihnen, dass Sie beim Lesen unseres Jahresberichtes viele Anregungen und neue Ideen bekommen, bei deren Umsetzung wir Ihnen gerne behilflich sind.

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. E. Beyer





# INHALT

## DAS FRAUNHOFER IWS

VORWORT	2
INHALT	4
AUS DEM KURATORIUM	6
KERNKOMPETENZEN	8
HIGHLIGHTS IM JAHR 2015	10
DAS INSTITUT IN ZAHLEN	14

## AUS DEN GESCHÄFTSFELDERN

<b>PVD- UND NANOTECHNIK</b>	<b>20</b>
NEUARTIGE SCHICHTSYSTEME ERTWEITERN ANWENDUNGSSPREKTRUM	
<b>MIKROTECHNIK</b>	<b>36</b>
MIKROTECHNIK FÜR MEDIZIN- UND PRODUKTIONSTECHNIK	
<b>THERMISCHE OBERFLÄCHENTECHNIK</b>	<b>50</b>
SYMBIOSE ZWISCHEN BESCHICHTUNGSTECHNIK UND WERKSTOFF-KNOW-HOW	
<b>CHEMISCHE OBERFLÄCHEN- UND REAKTIONSTECHNIK</b>	<b>62</b>
NEUE TECHNOLOGIEN FÜR BATTERIEN UND FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN	
<b>LASERABTRAGEN UND -TRENKEN</b>	<b>78</b>
MIT HOCHGESCHWINDIGKEIT ZU INNOVATIVEN PRODUKTEN	
<b>GENERIEREN UND DRUCKEN</b>	<b>92</b>
ADDITIVE FERTIGUNG ALS SCHLÜSSEL ZUM ERFOLG	
<b>FÜGEN</b>	<b>106</b>
METALLE, NICHTMETALLE UND MISCHVERBINDUNGEN	



# ZENTREN, NETZWERKE, EHRUNGEN

<b>ZENTREN</b>	<b>126</b>
DIE CCL-GROUP IN MICHIGAN, USA	127
CENTER FOR COATINGS AND DIAMOND TECHNOLOGIES (CCD)	128
CENTER FOR LASER APPLICATIONS (CLA)	129
PROJECT CENTER LASER INTEGRATED MANUFACTURING IN WROCLAW (PCW)	130
DORTMUNDER OBERFLÄCHENCENTRUM (DOC®)	132
ANWENDUNGSZENTRUM ZWICKAU	134
GENERATIVE FERTIGUNG	136
ENERGIEEFFIZIENZ	137
BATTERIEFORSCHUNG	138
»TAILORED JOINING«	139
WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG	140
<b>NETZWERKE</b>	<b>142</b>
DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT	143
FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES	144
EXZELLENTER KOOPERATIONSPARTNER: TU DRESDEN	146
<b>DRESDNER LICHTJAHR 2015</b>	<b>148</b>
<b>AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN</b>	<b>150</b>
<b>VERÖFFENTLICHUNGEN</b>	<b>152</b>
<b>KONTAKTADRESSEN UND ANFAHRT</b>	<b>161</b>
<b>IMPRESSUM</b>	<b>162</b>

# AUS DEM KURATORIUM

Das Kuratorium berät und unterstützt die Institutsleitung sowie die Organe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 25. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 20. März 2015 im Fraunhofer IWS Dresden statt. Mitglieder des Kuratoriums waren im Berichtszeitraum:

**FRANK JUNKER, DR.**

Vorsitzender des Kuratoriums  
Dr.-Ing. Frank Junker Consulting,  
Radebeul

**REINHOLD ACHATZ, DR.**

Leiter Corporate Function Technology, Innovation &  
Sustainability, ThyssenKrupp AG,  
Essen

**DIETER FISCHER**

Geschäftsführer EMAG Leipzig Maschinenfabrik GmbH,  
Leipzig

**RALF-MICHAEL FRANKE**

CEO Factory Automation,  
Digital Factory Division, Siemens AG,  
Nürnberg  
(Gast des Kuratoriums)

**JÜRGEN HOHNHAUS, DR.**

CTO Development,  
Bystronic Laser AG,  
Niederörsch/Schweiz  
(Gast des Kuratoriums)

**PETER KÖSSLER**

Vorsitzender der AUDI HUNGARIA MOTOR Kft.  
und Leiter Planung Motoren der AUDI AG,  
Győr/Ungarn

**UWE KRAUSE, DR.**

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

**HANS MÜLLER-STEINHAGEN, PROF. DR.**

Rektor der Technischen Universität Dresden

**PETER G. NOTHNAGEL**

Geschäftsführer Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH,  
Dresden

**MARKUS RALL, DR.**

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

**HERMANN RIEHL, MINR**

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

**CHRISTOPH ULLMANN, DR.**

Geschäftsführer Laserline GmbH,  
Mülheim-Kärlich

**RENÉ UMLAUFT, DR.**

Sprecher des Vorstandes, MAN Diesel & Turbo SE,  
Augsburg (bis 05/2014)

**FRANZ-JOSEF WETZEL, DR.**

BMW Motorrad, UX-EV, München

**PETER WIRTH, DR.**

Ehrengast des Kuratoriums  
Rofin-Sinar Laser GmbH,  
Hamburg

**REINHARD ZIMMERMANN, MINR DR.**

Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst,  
Dresden





Wie stark ist die deutsche Wirtschaft Ende 2015 aufgestellt? Im vierten Quartal des vergangenen Jahres kam die sehr positive Überraschung mit einer insgesamt guten gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Auch der Anfang des Jahres 2015 war durch eine gute Konjunktur gekennzeichnet. Im zweiten Quartal gab es dann nach Angaben des Statistischen Bundesamtes Wiesbaden die leichte Eintrübung. Das dritte und vierte Quartal haben uns am Ende nicht enttäuscht.

Auch Sachsen war im ersten Quartal 2015 sehr erfolgreich. Allerdings sind gerade in Sachsen die Auswirkungen der Ukraine-Russland-Krise im Russlandgeschäft extrem zu spüren. Das betrifft vor allem den Maschinen- und Anlagenbau.

Die Förderung von Wissenschaft sowie der angewandten Forschung und Entwicklung ist und bleibt deshalb ein wichtiges Moment für die Entwicklung der deutschen Wirtschaft. »Der Wissenschaftsstandort Deutschland wird immer attraktiver« sagt eine Studie der German Academic International Network (GAIN). Eine gute Nachricht. Die Chancen, in Deutschland Spitzenforschung zu betreiben, sind enorm gestiegen. Ein Grund, dass verstärkt deutsche Wissenschaftler aus dem Ausland wieder zurückkehren. Eine Studie, die Hoffnungen weckt.

Der Bedarf an anwendungsorientierter Forschung aus der Wirtschaft wächst kontinuierlich. Die Fraunhofer-Institute begleiten dieses erfolgsbestimmte Wachstum im hohen Maße. Auch Dresden leistet hier mit seinen leistungsstarken Instituten und deren Kooperationsverbund einen entscheidenden Beitrag. Die Zusammenarbeit und die Kooperation mit der Technischen Universität Dresden, den Max-Planck-Instituten, den Leibniz-Instituten und dem Helmholtz-Zentrum sowie die Vernetzung mit der Wirtschaft fördern den Wissenschaftsstandort Dresden.

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS stellt auch im Jahr 2015 eine durchgängig überzeugende Bilanz vor und ist damit dem Anspruch von nachhaltigen hohen wissenschaftlichen Leistungen gerecht geworden. Das IWS arbeitet dabei sehr anwendernah, was sich auch in der Bilanz abbildet. Die wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Ergebnisse folgen dem hohen Anspruch an Innovation, Exzellenz und Wirtschaftlichkeit. Mit dieser klaren Orientierung hat sich das IWS auch perspektivisch auf die Zukunft ausgerichtet.

Mit großer Aufmerksamkeit verfolgen die Kuratoren die kontinuierliche positive Entwicklung und unterstützen die Maßnahmen der weiteren strategischen Ausrichtung. Das Kuratorium dankt unseren Kunden für ihr entgegengebrachtes Vertrauen, den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, der Institutsleitung und allen Partnern für die Zusammenarbeit, ihren Einsatz und die erreichten Ergebnisse. Wir wünschen Ihnen für die Zukunft weiterhin viel Erfolg und Gesundheit.

Ihr

Dr.-Ing. 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

- Schneiden und Hochgeschwindigkeitsschneiden von Metallen, Kunststoffen und Faser-Kunststoff-Verbunden
- Schneiden und Veredeln weichmagnetischer Werkstoffe
- Schweißen von schwer schweißbaren Werkstoffe und Mischverbindungen
- Laser-Auftragschweißen und additive Fertigung
- 2-Photonen-Polymerisation
- Laserrandschichthärtungen, Umschmelzen, Legieren und Kurzzeitwärmebehandeln hoch beanspruchter Bauteile
- Mikromaterialbearbeiten (Schneiden, Bohren, Strukturieren)
- Abtragen, Reinigen und Strukturieren, auch von Kunst und Kulturgut
- prozessspezifische Laserhybridtechnologien, wie z. B. Laserinduktionsschweißen, -auftragschweißen und -walzplattieren sowie Plasma-, WIG- oder MIG-unterstütztes Laserstrahlschweißen

### OBERFLÄCHFUNKTIONALISIERUNG UND BESCHICHTUNG

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

### SONDERFÜGEVERFAHREN

- elektromagnetisches Pulsfügen
- 3D-Rührreißschweißen
- Kleben insbesondere mit Laser- und Plasmavorbereitung
- thermisches Direktfügen thermoplastischer Verbundmaterialien

### SYSTEMTECHNIK

- Umsetzung des Verfahrens-Know-hows in Entwicklung, Fertigung und Design von Komponenten, Anlagen und Systemen mit der dazugehörigen Software
- Systemlösungen und Steuerungstechnik für das Schneiden, Schweißen, Abtragen, Auftragen, Randschichtveredeln und Funktionalisieren 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, Wärmebehandlung, Beschichtung und additive Fertigung
  - optische Systeme zum Laserinterferenzstrukturieren und zur 2-Photonen-Polymerisation
- prozessspezifische Überwachung und Regelung
- 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 Oberflächenveredelung

»Qualität ist kein Zufall. Sie ist immer das Ergebnis angestrengten Denkens.«

John Ruskin



- Messsysteme zur Schichtcharakterisierung bzw. zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung mittels laserakustischer und spektroskopischer Methoden sowie Terahertz-Analytik
  - Systeme zur Permeationsmessung und spektroskopischen Überwachung von Gasgemischen
  - anwendungsspezifisches Design, Simulation und Prototypfertigung von fluidischen Mikrosystemen
  - Technologieplattform für integrierte Pumpen und Ventile sowie optische und elektrische Funktionselemente in Mikrosystemen
  - Aufbau- und Verbindungstechnik für die Entwicklung von Mikrosystemen
- Versagens- und Schadensfallanalyse
  - hochauflösende, abbildende und analytische Charakterisierung und Eigenschaftsbewertung von laserbearbeiteten und beschichteten Werkstoffen und Bauteilen
  - optisch-spektroskopische Charakterisierung von Oberflächen und Schichten (nm- bis mm-Bereich)
  - Charakterisierung magnetischer sowie mechanisch-tribologischer Eigenschaften
  - Schichtdicken- und E-Modul-Messungen von nm- bis mm-Schichten mittels Laserakustik
  - Ellipsometrie, Röntgenreflektometrie und -diffraktometrie
  - bildgebende Oberflächenanalyse mittels Hyper-Spectral-Imaging
  - Elektrochemie und Elektrodenchemie
  - Herstellung, Funktionalisierung, Verarbeitung und Charakterisierung von Nanopartikeln und Nanotubes

#### PROZESSSIMULATION

- Entwicklung von Simulationsmodulen zum
  - thermischen Randschichtbehandeln und Laserhärten
  - Auftragschweißen und additiven Fertigen
  - Schneiden und Schweißen
  - Vakuumbogenbeschichten
- 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

#### WERKSTOFFTECHNIK / NANOTECHNIK

- Ermittlung von Werkstoffkennwerten für Werkstoffauswahl, Bauteilauslegung und Qualitätssicherung
- metallographische, elektronenmikroskopische und mikroanalytische Charakterisierung der Realstruktur von Metallen, Keramiken und Schichtverbänden
- Bestimmung mechanischer Kennwerte von Werkstoffen und Werkstoffverbunden (statisch, zyklisch)
- Ermittlung von Kennlinien zur Bewertung der Schwingfestigkeit bis  $N \leq 10^9$  durch zeitverkürzte Ermüdungsprüfung bei hohen Frequenzen





# HIGHLIGHTS IM JAHR 2015



## **FORSCHUNG ZUR VERBESSERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ**

Forschungsarbeiten zu reibungs- und verschleißmindernden Schichten sind seit Jahren ein wesentlicher Schwerpunkt des Fraunhofer IWS im Geschäftsfeld PVD- und Nanotechnik. In enger Kooperation mit mehreren Industriepartnern wurde das Verfahren in den letzten Jahren bis zur Industriereife weiterentwickelt. Im nächsten Entwicklungsschritt ist es nun das Ziel, reibungsmindernde Schichten für die Reduktion des Energieeinsatzes in trocken- und minimal-geschmierten tribologischen Systemen herzustellen. Dafür erhalten das Fraunhofer IWS Dresden sowie acht Industrie- und zwei weitere Forschungspartner ab 2015 für drei Jahre 7,2 Mio. Euro Fördermittel vom BMWi. Kernziel des Vorhabens ist die Optimierung von Gleitsystemen in Getrieben, Lagern und Ketten dahingehend, dass diese Systeme in Zukunft keine Schmierung durch extern zugeführte Schmierstoffe (Öl, Fett etc.) mehr benötigen. Damit würden solche Systeme eine Verbesserung der Energieeffizienz und Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes mit sich bringen.

## **RESET – DAS ZENTRUM FÜR RESSOURCENSCHONENDE ENERGIETECHNOLOGIEN NUN VOLL ARBEITSFÄHIG**

Im 4. Bauabschnitt der Fraunhofer-Institute IWS und FEP wurde 2015 umfangreiches Equipment installiert und in Betrieb genommen. In einem IWS-Gebäudeteil mit ca. 500 m<sup>2</sup> Laborfläche wurde Anlagentechnik zur Additiven Fertigung mit kontinuierlicher Pulver- oder Drahtzufuhr aufgebaut. Ein zweiter Gebäudeteil des IWS mit etwa gleich großer Laborfläche bündelt Technologien für den konstruktiven und strukturellen Leichtbau, um die Kompetenzen in den Bereichen Polymer-Metall-Verbindungen sowie Faserverbundwerkstoffe zu erweitern. Diverse Geräte zur Probenvor- oder -nachbehandlung sowie Bauteilanalytik ergänzt das Spektrum. Am 3. Juli 2015 standen die neu eingerichteten Labore einer breiten Öffentlichkeit zur Besichtigung offen und wurden von über 1000 Besuchern mit großem Interesse besichtigt.



### STRATEGIEPROJEKT AGENT-3D NIMMT FAHRT AUF

Unter Federführung des Fraunhofer IWS Dresden hat sich ein Konsortium von inzwischen mehr als 90 Partnern zum Ziel gesetzt, additiv-generative Fertigung zur Schlüsseltechnologie in Deutschland zu entwickeln. Nach dem Abschluss des durch das Fraunhofer IWS und weitere Fraunhofer-Institute bearbeiteten Strategieprojektes sind Ende 2015 nun die ersten Technologieprojekte gestartet. Im Rahmen des von Bund und Land Sachsen geförderten Investitionsprojektes EFFI II konnte das IWS zudem seine anlagen- und gerätetechnische Basis im Bereich generierende Fertigung deutlich erweitern. Auch Pulverbett-basierende Verfahren können von den IWS-Forschern nun zur Herstellung komplizierter Bauteile mit speziellen Funktionalitäten genutzt werden. Neueste Ergebnisse und Erkenntnisse werden beim zweiten Internationalen Symposium »Additive Fertigung« ISAM vom 14. bis 16. Juni 2016 in Dresden vorgestellt. [www.iws.fraunhofer.de/isam](http://www.iws.fraunhofer.de/isam)

### MEILENSTEINE IN DER BATTERIEFORSCHUNG

Seit circa fünf Jahren arbeiten die Forscher am Fraunhofer IWS an der Entwicklung geeigneter Elektrodenmaterialien und Produktionsverfahren für eine kostengünstige Hochenergiezelle auf Basis der Lithium-Schwefel-Technologie. Im Rahmen der Konferenz »Zukunft Energie« im November 2015 wurden erstmals Lithium-Schwefel-Pouchzellen mit 4 Ah und spezifischen Energien größer  $300 \text{ Wh kg}^{-1}$  präsentiert. Gegenüber der klassischen Lithium-Ionen-Technologie entspricht das einer Steigerung um etwa 25 Prozent. Im Hinblick auf den steigenden Bedarf an kostengünstigen stationären Energiespeichern forscht das IWS auch an Raumtemperatur-Natrium-Schwefel-Zellen. Durch voneinander abhängige Anpassungen des Elektrolyten, der Anode und der Kathode können diese nun statt bei  $300 \text{ °C}$  bei Raumtemperatur betrieben werden. Sie besitzen Entladekapazitäten von bis zu  $980 \text{ mAh}$  pro Gramm Kathoden-Aktivmaterial,

eine Ladeeffizienz von über 95 Prozent und können  $1000\text{x}$  reversibel geladen und entladen werden. Mit dem EU-Projekt ALISE startete im Juni 2015 ein weiteres Forschungsprojekt am IWS, das diese Entwicklungen adressiert. Im Rahmen des 2015 abgeschlossenen BMBF-Projektes DryLIZ konnten Wege zur Senkung der Prozesskosten und Reduzierung der Bearbeitungszeiten für die Elektrodenkonfektionierung aufgezeigt werden.

### LANGLEBIGE ORGANISCHE PHOTOVOLTAIKZELLEN

Im Januar 2015 ist unter maßgeblicher Beteiligung des Fraunhofer IWS und der Heliatek GmbH das von der EU mit 3,9 Mio. Euro geförderte Projekt ALABO gestartet. Ziel des Projektes ist die kostengünstige Herstellung von großflächigen, leichten und flexiblen Photovoltaik-Folien. Diese sollen über eine deutlich verbesserte Langzeitstabilität verfügen. Erstmals versucht das Forscherteam, eine Laserstrukturierung auf organische PV-Zellen anzuwenden. Gemeinsam mit seinen europäischen und deutschen Partnern wird das Fraunhofer IWS Dresden Forschungsaufgaben im Bereich des Laserprozesses, des optischen Prozessmonitorings sowie der schnellen Bewertung der Barriereleistung bearbeiten. Dabei kommen einerseits die im IWS Dresden entwickelten modular aufgebauten Lasersysteme für die »high-speed«-Laserstrukturierung zum Einsatz, die bei der Mikrostrukturierung einer Polymeroberfläche effektive Strukturierungsgeschwindigkeiten von  $0,9 \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  ermöglichen. Dies stellte 2015 ebenso einen Weltrekord dar wie das im IWS hergestellte Messgerät HiBarSens<sup>®</sup> zur Bestimmung der Permeation von Folien, welches geringste Wasserdampfdurchlässigkeiten bis  $1 \times 10^{-6} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  sicher bestimmt.

# INDUSTRIEÜBERFÜHRUNGEN



## BESCHICHTUNGSANLAGE FÜR HYDRAULIKZYLINDER

Bosch Rexroth in Boxtel, Niederlande, Hersteller sehr großer Hydraulikzylinder, hat eine vorhandene Beschichtungsanlage zum Plasmaschweißen in eine Laserbeschichtungsanlage mit doppelt so großem Arbeitsraum umfunktionalisiert. Ende 2015 wurde die Anlage in Betrieb genommen. Ein 20-kW-Hochleistungsdiodenlaser dient als Energiequelle. Ein spezielles Lasermodul ist so ausgeführt, dass der Prozess zuverlässig ausgeführt werden kann, später aber auch die Nachrüstung einer induktiven Vorwärmeinrichtung möglich ist. Neben der neuesten Generation der Breitstrahl-Pulverdüse »COAX11« kommen angepasste Mess-, Regel- und Beobachtungssysteme zum Einsatz. Das Fraunhofer IWS verantwortet Prozess- und Anlagenfunktionalität sowie Anlagensicherheit.

## INTEGRATION VON LASERSCHWEISSPROZESSEN FÜR ALUMINIUM IN DEN PRODUKTIONSPROZESS

Die Firma Finow Automotive in Eberswalde stellt nach einem im IWS entwickelten Schweißverfahren Kühlwasserrohre für PKW-Motoren her. Durch Einsatz eines Faserlasers und hochdynamischer Strahlableitung gelang es dem IWS, eine bereits vorhandene Laserschweißanlage auf die Anforderungen des Prozesses anzupassen und komplett umzurüsten. Am IWS wurde dafür ein spezielles Lasermodul entworfen und gefertigt. Auch das Sicherheitskonzept der Anlage wurde komplett erneuert.

## DOMÄNENVERFEINERUNG VON ELEKTROBLECH DANK LASER-REMOTETECHNOLOGIE

Die vom Fraunhofer IWS zusammen mit der Rofin Sinar Laser GmbH und der Maschinenfabrik Arnold entwickelte Anlagentechnik zur Domänenverfeinerung von Elektroblech mittels Laser-Remotetechnologie wurde 2015 an einen weiteren Industriekunden übergeben. Die in Asien installierte Anlage ermöglicht die Laserbehandlung von kontinuierlich bewegtem Bandmaterial mit einer Jahreskapazität von bis zu 50.000 t unter Nutzung von 4 Faserlasern und einem einzigartigen Strahlableitungssystem (Abb. 1).

## LASER-INTEGRIERTES KOMPLETTBEARBEITUNGSZENTRUM

Im Auftrag der Firma WFL Millturn Technologies GmbH in Linz wurden die Prozesse des Laserhärtens und -auftragschweißens in ein Dreh-Bohr-Fräszentrum integrierten. Hierdurch können Bauteile, an denen etwa Verschleißschutzschichten aufgebracht oder Verzahnungen gehärtet werden müssen, direkt in einer Aufspannung auf einer Millturn-Maschine hergestellt werden. Das Fraunhofer IWS hat dafür den anwendungsspezifischen Laser-Bearbeitungskopf entwickelt, die erforderlichen Prozessbausteine erarbeitet und den Endanwender bei der Inbetriebnahme der Maschine mit den beteiligten Prozessen und Lasertechnischen Komponenten unterstützt (Abb. 2).

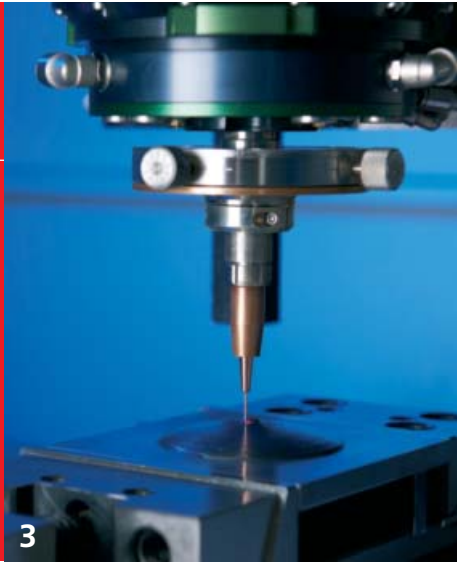
## WEITERE INDUSTRIEÜBERFÜHRUNGEN DER REMOTE-TECHNOLOGIE ZUM SCHNEIDEN VON AIRBAGGEWEBE

Die vom Fraunhofer IWS zusammen mit der Firma Held Systems entwickelte kompakte Anlagentechnik zum flexiblen Laserstrahlschneiden von Airbagmaterial wurde 2015 an zwei weitere Industriekunden übergeben. Die nunmehr 15. und 16. Anlage, installiert in China sowie Mexiko, ermöglichen das Laserschneiden von ein- und mehrlagigem Gewebe mit hoher Produktivität durch den Einsatz der Remotetechnologie.

## ANLAGENERWEITERUNG FÜR DIE ÖLFÖRDERINDUSTRIE

Eine Laserhärte- und -beschichtungsanlage von Precision Machinery in Dubai hat das Fraunhofer IWS für eine prozesssichere, effizientere und ergonomischere Arbeitsweise umgerüstet. Dazu wurden drei spezielle Lasermodule entwickelt und mit den kamerabasierten Temperaturerfassungssystemen »E-MAqS« ausgestattet. Nach Anforderung des Kunden entstand ein Fernbeobachtungssystem zur Prozessüberwachung. Damit wird die Firma zukünftig in der Lage sein, die Anlage in Dubai auch von anderen Produktionsstandorten aus zu überwachen.





### **LASERBEARBEITUNGSZENTRUM ZUM FERTIGEN UND REPARIEREN VON GROSSWERKZEUGEN**

In Zusammenarbeit mit der Maschinenfabrik Arnold in Ravensburg wurde ein 3D-Laserbearbeitungszentrum zum Reparieren, Modifizieren und Oberflächenbehandeln von Karosserie-Großwerkzeugen bei Shanghai Volkswagen in die Fertigung überführt. Das IWS hat hierzu systemtechnische Komponenten sowie Prozessbausteine entwickelt und geliefert und die Inbetriebnahme der Anlage bis zum Produktionsanlauf betreut. Beim Laserstrahlhärten setzt VW nun auch in China auf die dynamische Strahlformungseinheit »LASSY«. Die besondere Herausforderung des defektfreien Laser-Auftragschweißens auf Guss-eisen (GGG70) ist durch eine kundenspezifische Systemtechnik und Prozessentwicklung gelöst worden.

### **FERTIGUNG VON DIAMANTWERKZEUGEN FÜR SEILSÄGEN**

Für die Herstellung von Diamantwerkzeugen für Seilsägen hat die Firma Bekaert in Belgien ein innovatives Laserbeschichungsverfahren entwickelt. Eine wesentliche Komponente für hohe Prozesssicherheit ist das im Fraunhofer IWS entwickelte kamerabasierte Temperaturmesssystem »E-MAqS« in Verbindung mit der schnellen Prozessregelung »LompocPro«. Im Jahr 2015 erhielt Bekaert IWS-Systeme für zwei Fertigungsanlagen.

### **PROZESS UND SYSTEMTECHNIK ZUM KOAXIAL-LASER-DRAHT-AUFTRAGSCHWEISSEN KOMPLEXER BAUTEILE**

Das Laser-Draht-Auftragschweißen gehört zu den Klassikern in der Laser-Materialbearbeitung und wird von der Industrie intensiv und in wachsendem Maße nachgefragt. Grund dafür ist auch die neue, unterdessen eingeführte IWS-Lösung, bestehend aus dem Prozess und dem dazugehörigen Laser-Bearbeitungskopf zum richtungsunabhängigen Auftragschweißen mit koaxialer Drahtzufuhr. Im Laufe des Jahres 2015 sind mehrere dieser Systeme bei Anwendern aus den Bereichen der Turbomaschinen sowie des Formen- und Werkzeugbaus in die Fertigung überführt worden (Abb. 3).

### **PLASMA-QUELLE ZUR GROSSFLÄCHIGEN OBERFLÄCHEN-MODIFIZIERUNG IN DER LUFTFAHRTTECHNIK**

Die Plasmaoberflächenfunktionalisierung bei Atmosphärendruck von Titanlegierungen und Faser-Kunststoff-Verbunden ist ein Schwerpunkt der Arbeitsgruppe Plasmatechnik und Nanomaterialien des Fraunhofer IWS. Die in mehreren europäischen Verbundprojekten bis zur Marktreife entwickelte LARGE- (Long Arc Generator) Plasmaquelle ist seit April 2015 bei der Firma Airbus im Einsatz. Die LARGE-Plasmaquelle mit einer Arbeitsbreite von 150 mm wird zur Haftvermittlerschichtabscheidung auf Titan sowie zur Plasmaaktivierung von CFK eingesetzt. So können diese zwei wichtigen Materialklassen der Luftfahrttechnik erstmalig großflächig mit Plasma vorbehandelt und anschließend geklebt verwendet (Abb. 4).

### **REIBUNGSARME VERSCHLEISSFESTE KOHLENSTOFF-SCHICHTEN**

Mit dem vom IWS entwickelten Verfahren des Laser-Arc lassen sich superharte, ta-C-Kohlenstoffschichten (Diamor®) effizient und wirtschaftlich abscheiden. Aufgrund ihrer überragenden Eigenschaften hinsichtlich Verschleißfestigkeit und Reibungsminimierung stoßen diese auf sehr großes industrielles Interesse. Im Jahr 2015 wurden fünf Laser-Arc-Module zur Beschichtung von Bauteilen und Werkzeugen aufgebaut und gemeinsam mit dem Kooperationspartner Vakuumtechnik Dresden an Industriekunden überführt.

### **SPUTTERTECHNOLOGIE ZUR ABSCHIEDUNG VON NANOMETER-MULTISCHICHTEN**

Gemeinsam mit dem Kooperationspartner scia Systems GmbH wurde im Jahr 2015 eine Sputteranlage zur Großflächenbeschichtung aufgebaut und an einen Industriekunden überführt. Die Anlage ermöglicht eine besonders effektive großflächige Abscheidung von höchstpräzisen Nanometer-Multischichten, die für einen Einsatz als optische Elemente im Röntgen-Bereich verwendet werden.

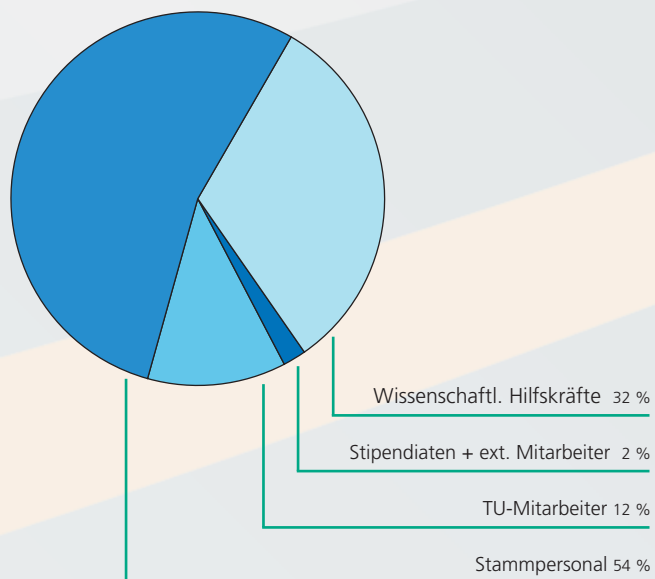
# DAS INSTITUT IN ZAHLEN



## IWS UND DEUTSCHE AUSSENSTELLEN

### MITARBEITER

	Anzahl
<b>Stammpersonal</b>	<b>214</b>
- Wissenschaftler / Ingenieure (TU, FH)	151
- Facharbeiter mit techn. oder kaufmänn. Ausbildung	55
- Auszubildende	8
<b>Mitarbeiter TU Dresden (Arbeitsort Fraunhofer IWS)</b>	<b>49</b>
Stipendiaten + externe Mitarbeiter	8
<b>Wissenschaftliche Hilfskräfte</b>	<b>126</b>
<b>GESAMT</b>	<b>397</b>



»Wissen ist wie ein Baum: Je größer und je verzweigter er ist,  
umso ausgeprägter ist sein Kontakt mit dem Unbekannten.«

Blasse Pascal

#### VERWALTUNGSLEITERIN

**DR. ANJA TECHEL**

☎ +49 351 83391-3473

✉ [anja.techel@iws.fraunhofer.de](mailto:anja.techel@iws.fraunhofer.de)

#### PUBLIKATIONEN AM IWS

	Anzahl
Promotionen	6
Diplomarbeiten	14
Masterarbeiten	6
Veröffentlichungen	136

**GESAMT** 162

**PATENTE** (Erstanmeldung) 27



Stand Januar 2016



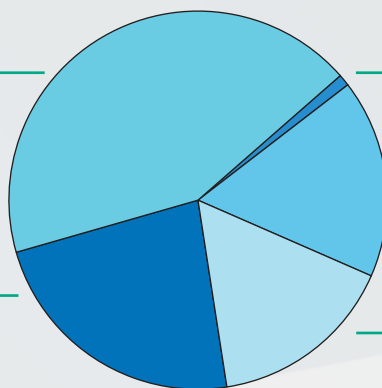
Erträge IWS und deutsche Aussenstellen 2015 (Mio. €)	Betrieb	Investitionen	Gesamt
Projekterträge aus der Industrie	13,1	0,1	13,2
Projekterträge durch Bund, Land und EU	8,2	0,1	8,3
Grundfinanzierung und interne Programme	5,5	3,3	8,8
Sonderinvestitionen durch Bund, Land und EU		7,1	7,1
	26,8	10,6	37,4

Fraunhofer Industrie  $\rho_{\text{Ind}} = 48,8 \%$

#### HERKUNFT DER ÖFFENTLICHEN ERTRÄGE

BMBF 43 %

BMWi 23 %



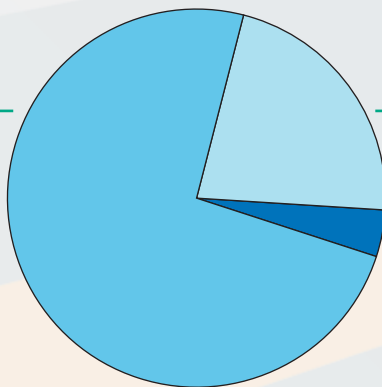
Land Sachsen 1 %

EU 17 %

Sonstige 16 %

#### HERKUNFT DER INDUSTRIERTRÄGE

Deutschland 74 %



Europa 22 %

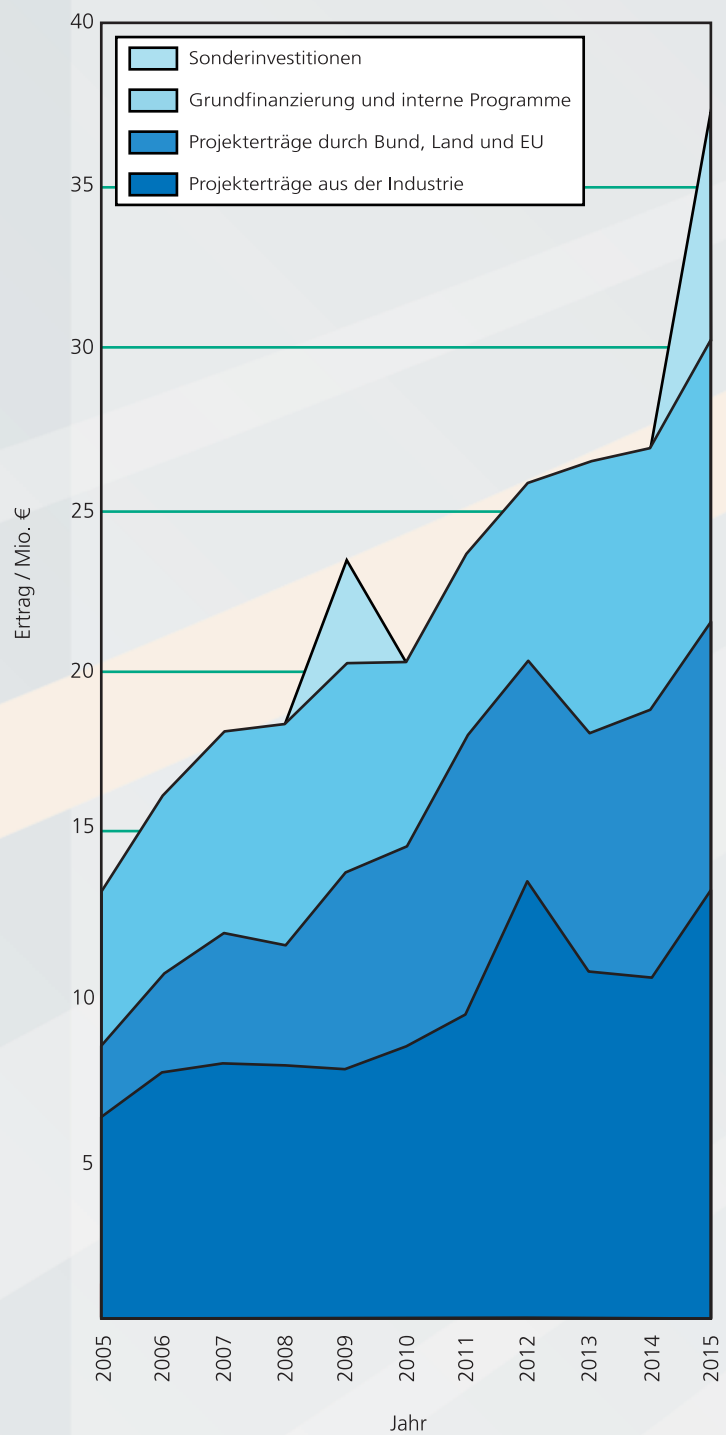
Asien 4 %

Stand Januar 2016

**Aufwand 2015 (Mio. €)**

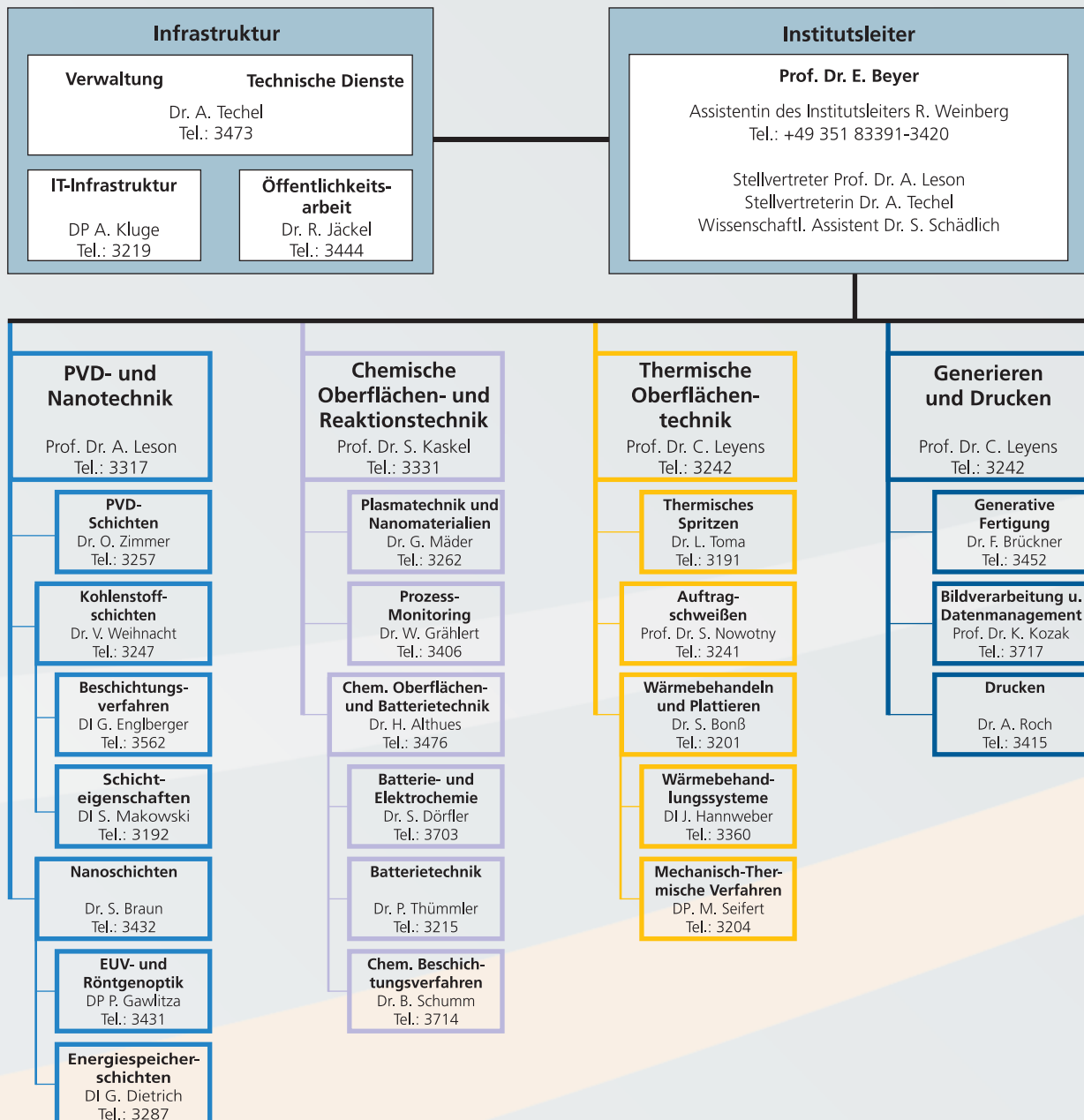
Personalaufwendungen	13,4
Sachaufwendungen	13,4
Investitionen	3,5
Sonderinvestitionen durch Bund, Land und EU	7,1
<b>Gesamt</b>	<b>37,4</b>

Laborfläche 6800 m<sup>2</sup>  
 Bürofläche 3200 m<sup>2</sup>





# ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER



»Das Geheimnis des Könnens liegt im Wollen.«  
Giuseppe Mazzini

**Außenstellen IWS**

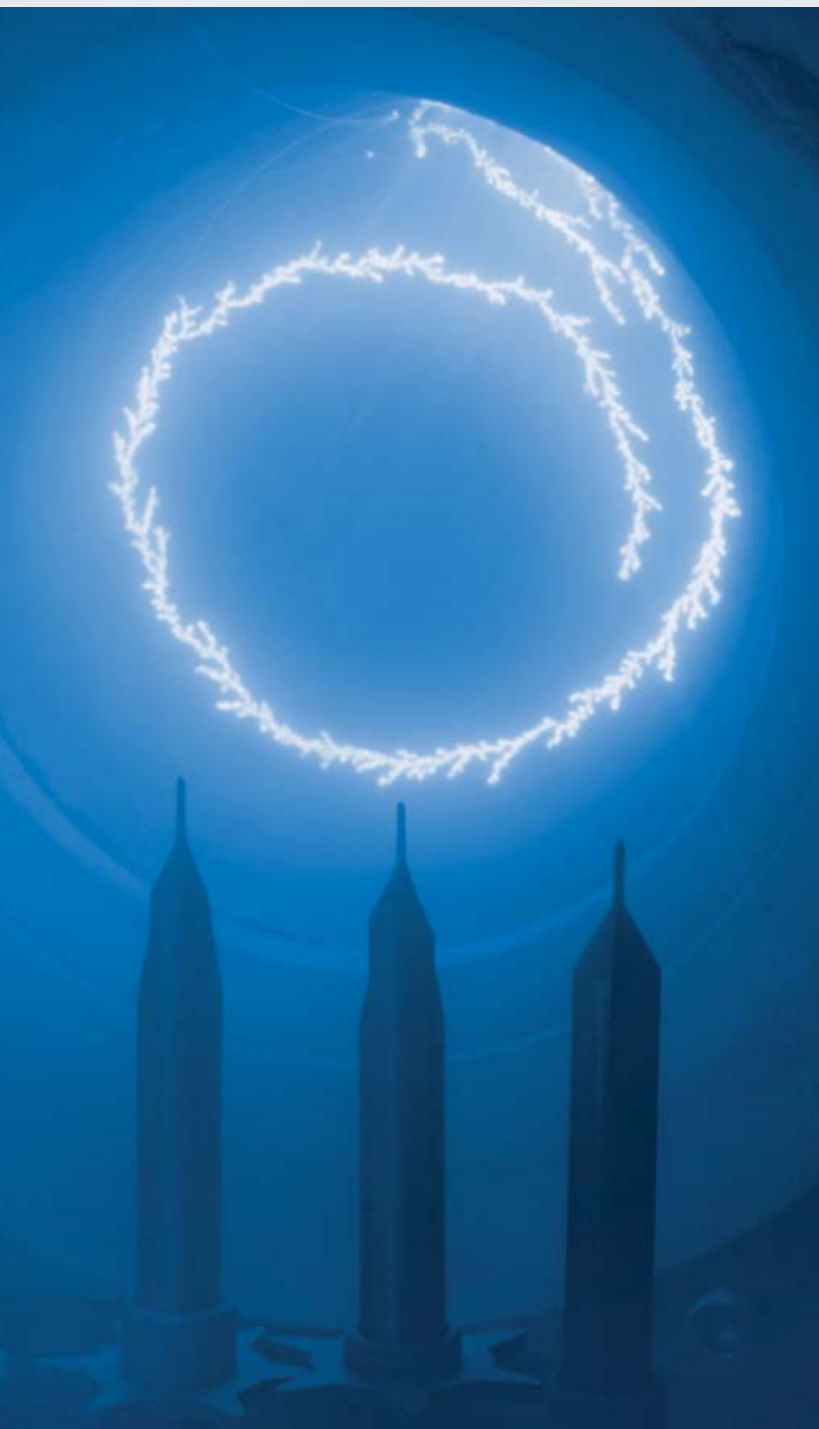
<p><b>AZOM - Zwickau</b> Prof. Dr. P. Hartmann Tel.: +49 375 536 1538</p> <p>Optische Messtechnik DI T. Baselt Beschichtungstechnologien DI C. Taudt</p>	<p><b>DOC - Dortmund</b> Dr. A. Zwick Tel.: +49 231 84 43 512</p> <p>Laseranwendungen DI R. Imhoff Beschichtungen Dr. T. Stucky</p>	<p><b>PC Wroclaw - Polen</b> Prof. Dr. E. Chlebus Tel.: +48 71 320 2705</p> <p>Laser Integrated Manufacturing Prof. Dr. K. Kozak Tel.: 3717</p>	<p><b>CCL-Group - USA</b> Dr. A. Techel Tel.: +49 351 83391 3473</p> <p>Laser Applications C. Bratt Coatings and Diamond Technologies Prof. Dr. T. Schülke</p>
--	---	---	--

<p><b>Fügen</b> Dr. J. Standfuß Tel.: 3212</p> <p><b>Kleben und Faser- verbundtechnik</b> DI A. Klotzbach Tel.: 3235</p> <p><b>Sonderfüge- verfahren</b> DI S. Schulze Tel.: 3565</p> <p><b>Laserstrahl- fügen</b> Dr. A. Jahn Tel.: 3237</p> <p><b>Laserstrahl- schweißen</b> Dr. D. Dittrich Tel.: 3228</p> <p><b>Bauteil- auslegung</b> Dr. A. Jahn Tel.: 3237</p>	<p><b>Laserabtragen und -trennen</b> Dr. A. Wetzig Tel.: 3229</p> <p><b>Laserschneiden</b> Dr. P. Herwig Tel.: 3199</p> <p><b>Prozessauslegung und -analyse</b> Dr. A. Mahrle Tel.: 3407</p> <p><b>High-Speed- Laserbearbeitung</b> Dr. J. Hauptmann Tel.: 3236</p> <p><b>Laserschneiden Nichtmetalle</b> Dr. J. Hauptmann Tel.: 3236</p> <p><b>Lasersystem- technik</b> DI P. Rauscher Tel.: 3012</p>	<p><b>Mikrotechnik</b> Dr. U. Klotzbach Tel.: 3252</p> <p><b>Mikromaterial- bearbeiten</b> DI V. Franke Tel.: 3254</p> <p><b>Mikro- und Bio- systemtechnik</b> Dr. F. Sonntag Tel.: 3259</p> <p><b>Oberflächen- funktionalisierung</b> Prof. Dr. A. Lasagni Tel.: 3007</p>	<p><b>IWS Zentren</b></p> <p><b>Zentrum Batterieforschung</b> Dr. H. Althues      Tel.: 3476 Dr. P. Thümmler    Tel.: 3215</p> <p><b>Zentrum Tailored Joining</b> Dr. J. Standfuß    Tel.: 3212 DI C. Zellbeck      Tel.: 3332</p> <p><b>Zentrum Energieeffizienz</b> Prof. Dr. E. Beyer    Tel.: 3420 Dr. R. Jäckel        Tel.: 3444</p> <p><b>Zentrum Generative Fertigung</b> Prof. Dr. C. Leyens    Tel.: 3242 Dr. F. Brückner      Tel.: 3452</p>			
<p><b>Kompetenzfeld Werkstoffcharakterisierung und -prüfung</b></p> <table border="1"> <tr> <td data-bbox="762 1832 957 1921"> <p><b>Werkstoff- und Schadensanalytik</b> Dr. J. Kaspar Tel.: 3216</p> </td> <td data-bbox="970 1832 1165 1877"> <p>Prof. Dr. M. Zimmermann Tel.: 3573</p> </td> <td data-bbox="1184 1832 1378 1921"> <p><b>Werkstoff- und Bauteilzuverlässigkeit</b> Prof. Dr. M. Zimmermann Tel.: 3573</p> </td> </tr> </table>				<p><b>Werkstoff- und Schadensanalytik</b> Dr. J. Kaspar Tel.: 3216</p>	<p>Prof. Dr. M. Zimmermann Tel.: 3573</p>	<p><b>Werkstoff- und Bauteilzuverlässigkeit</b> Prof. Dr. M. Zimmermann Tel.: 3573</p>
<p><b>Werkstoff- und Schadensanalytik</b> Dr. J. Kaspar Tel.: 3216</p>	<p>Prof. Dr. M. Zimmermann Tel.: 3573</p>	<p><b>Werkstoff- und Bauteilzuverlässigkeit</b> Prof. Dr. M. Zimmermann Tel.: 3573</p>				

Stand Januar 2016



## PVD- UND NANOTECHNIK



**Redaktion:** Herr Prof. Leson, PVD-Beschichtungen werden in großem Maßstab bei der spanenden Bearbeitung sowie in der Umform- und Kunststofftechnik eingesetzt. Gibt es auf diesem Gebiet neue Entwicklungen, die die Einsatzmöglichkeiten von Hartstoffschichten noch erweitern?

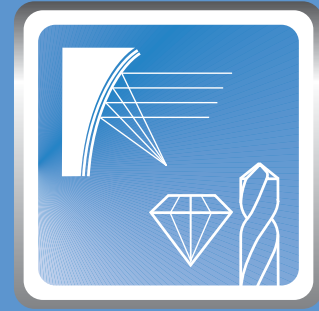
**Prof. Leson:** In der Tat haben sich verschleißmindernde PVD-Schichten in breitem Umfang bei der Beschichtung von Werkzeugen durchgesetzt. Dabei sind zumeist Schichtdicken von 3 – 5  $\mu\text{m}$  ausreichend. Für hochbelastete Oberflächen, wie sie beispielsweise bei der Massivumformung auftreten, ist dies jedoch nicht ausreichend. Hier sind deutlich dickere Schichten gefordert. Wir haben daher für diese extremen Anforderungen dicke Hartstoffschichten entwickelt, die sich aufgrund ihres nanoskaligen Designs bis in den Bereich von 100  $\mu\text{m}$  und mehr prozesssicher und wirtschaftlich herstellen lassen. Die exzellenten Eigenschaften dieser Schichten, wie etwa ihre hohe Härte und Abrasionsbeständigkeit bei hohen Flächenpressungen, sind auf großes Interesse bei Werkzeugherstellern und deren Anwendern gestoßen, das wir jetzt gemeinsam mit unseren Partnern erschließen wollen.

**Redaktion:** Besonders stark innerhalb Ihres Geschäftsfeldes ist die Abteilung gewachsen, die sich mit der Herstellung und den Eigenschaften von Kohlenstoffschichten befasst. Was sind die Ursachen für diese große Nachfrage?

**Prof. Leson:** Wir haben uns bei den diamantähnlichen Kohlenstoffschichten auf wasserstofffreie sogenannte ta-C-Schichten fokussiert. Gegenüber den üblichen DLC-Schichten, die aufgrund ihrer Vorteile bereits vielfältig in der Industrie zum Einsatz kommen, sind unsere Schichten nochmals deutlich härter und weisen zudem wesentlich verbesserte Reibeigenschaften auf. Da Reibung und Verschleiß nahezu überall

»Es ist nicht genug zu wissen, man muss es auch anwenden;  
es ist nicht genug zu wollen, man muss es auch tun«

Johann Wolfgang von Goethe



#### GESCHÄFTSFELDLEITER

**PROF. ANDREAS LESON**

☎ +49 351 83391-3317

✉ andreas.leson@iws.fraunhofer.de

auftreten, ist das Interesse an unseren ta-C-Schichten, die man als DLC-Schichten der zweiten Generation bezeichnen kann, enorm. Gemeinsam mit der Automobilindustrie und ihren Zulieferern arbeiten wir intensiv an der Einführung unserer ta-C-Schichten, um dadurch die Energieeffizienz zu steigern und damit die CO<sub>2</sub>-Emission zu reduzieren. Aber auch bei der Zerspanung von abrasiven Werkstoffen wie etwa CFK und GFK ermöglichen unsere ta-C-Schichten drastisch verbesserte Standzeiten der Werkzeuge und stoßen damit auf großes Interesse. Mit unserer Laser-Arc-Technologie verfügen wir über ein einzigartiges industrietaugliches einsatzreifes Verfahren, das die wirtschaftliche Herstellung dieser Schichten ermöglicht und bereits mehrfach in die Industrie überführt wurde. Besonders gefreut hat uns die Tatsache, dass diese Entwicklung, an der viele Mitarbeiter beteiligt sind, im Jahr 2015 mit der Verleihung des Joseph-von-Fraunhofer-Preises gewürdigt wurde.

**Redaktion:** Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal Ihres Geschäftsfeldes sind die hochpräzisen Nanometer-Multischichten. Gibt es neben den Anwendungen in der EUV-Lithographie weitere Einsatzgebiete?

**Prof. Leson:** Wir nutzen unser Know-how und unsere Erfahrungen bei der Abscheidung von Nanometer-Multischichten neben den Anwendungen für die EUV-Lithographie vor allem für die Entwicklung anspruchsvoller Optiken im Röntgenbereich. So haben wir beispielsweise für die Universität Münster ein komplexes röntgenoptisches System gebaut, das an dem europäischen freien Röntgen-Laser (XFEL), der sich im Aufbau befindet, für Experimente mit Femtosekunden-Auflösung zum Einsatz kommen soll. Darüber hinaus stehen die Untersuchung und Entwicklung von Multischicht-Laue-Linsen, die bei der höchstauflösenden Röntgenanalytik zum Einsatz kommen, im Mittelpunkt.



## KOMPETENZEN UND ANSPRECHPARTNER



*Dr. Otmar Zimmer, Gruppenleiter PVD-Schichten*

☎ +49 351 83391-3257 / ✉ [otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de](mailto:otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de)

» Verfahren der physikalischen Dampfphasenabscheidung (PVD = Physical Vapor Deposition) erlauben die Abscheidung hochwertiger tribologischer und funktioneller Schichten im Dickenbereich von wenigen Nanometern bis zu einigen hundert Mikrometern. Dafür stehen Verfahren von der Hochrate-Bedampfung bis hin zu hochaktivierten Plasmaverfahren zur Verfügung. Schwerpunkt ist u. a. die Herstellung sehr dicker PVD-Schichten für verschiedene Anwendungen. «



*Dr. Stefan Braun, Abteilungsleiter Nanoschichten*

☎ +49 351 83391-3432 / ✉ [stefan.braun@iws.fraunhofer.de](mailto:stefan.braun@iws.fraunhofer.de)

» Präzisionsschichten mit Dicken im Nanometerbereich werden bereits seit mehreren Jahren in der Industrie genutzt. Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte sind Einzel- und Multischichten für optische und fūgetechnische Anwendungen. Im Bereich der Optik umfasst dies sowohl Reflexions-schichten für EUV- und Röntgenspiegel als auch Multischicht-Laue-Linsen für die Fokussierung von Röntgenstrahlung. Für fūgetechnische Anwendungen werden Reaktivmultischichten als zeitlich und räumlich präzise einstellbare Wärmequelle auf der Basis von selbsterhaltenden exothermen Reaktionen erforscht. «



*Dipl.-Phys. Peter Gawlitza, Gruppenleiter EUV- und Röntgenoptik*

☎ +49 351 83391-3431 / ✉ [peter.gawlitza@iws.fraunhofer.de](mailto:peter.gawlitza@iws.fraunhofer.de)

» Zur Abscheidung von Nanometer-Einzel- und -Multischichten für EUV- und Röntgenoptiken setzen wir hauptsächlich die Verfahren der Magnetron- und Ionenstrahl-Sputterdeposition ein. Die Schichtsysteme genügen höchsten Ansprüchen hinsichtlich Dickengenauigkeit, Rauheit, chemischer Reinheit, lateraler Homogenität und Reproduzierbarkeit. Desweiteren beschäftigen wir uns mit Ionenstrahlverfahren zur Konturierung und Politur röntgenoptischer Substrate. «



*Dipl.-Ing. Georg Dietrich, Gruppenleiter Energiespeicherschichten*

☎ +49 351 83391-3287 / ✉ [georg.dietrich@iws.fraunhofer.de](mailto:georg.dietrich@iws.fraunhofer.de)

» Durch den Einsatz von Reaktiv-Multischicht-Systemen (RMS) lassen sich Metalle, Keramiken, Halbleiter und Polymere materialschonend, spannungsarm und schnell verbinden. Dazu wird eine direkt an den Fūgeprozess angepasste RMS zwischen die beiden zu fūgenden Bauteile eingelegt und aktiviert. Es kommt zu einer chemischen Reaktion, infolge derer kurzzeitig und lokal eng begrenzt Wärmeenergie zum Fūgen der Bauteile bereitgestellt wird. «



*Dr. Volker Weihnacht, Abteilungsleiter Kohlenstoffschichten*  
☎ +49 351 83391-3247 / ✉ volker.weihnacht@iws.fraunhofer.de



» Die in der Abteilung entwickelten superharten ta-C-Kohlenstoffschichten (Diamor®) eignen sich hervorragend als reibungsmindernde Schutzschichten für geschmierte und ungeschmierte Anwendungen. Sie können auf Werkzeuge, Komponenten und Bauteile mit sehr guter Haftung in einem weiten Schichtdickenbereich abgeschieden werden. Die Beschichtung erfolgt mit der speziell für ta-C-Schichten entwickelten Laser-Arc-Technologie. Für die industrielle Einführung der Diamor®-Schichten liefert das IWS zusammen mit Partnerunternehmen neben der Technologie auch die erforderlichen Beschichtungsquellen. «

*Dipl.-Ing. Gregor Englberger, Gruppenleiter Beschichtungsverfahren*  
☎ +49 351 83391-3562 / ✉ gregor.englberger@iws.fraunhofer.de



» Die Kernkompetenz der Gruppe liegt in der Herstellung von superharten Kohlenstoffschichten. Ein sehr gutes Prozessverständnis erlaubt die gezielte Anpassung der ta-C-Schichten auf unterschiedliche Kundenanforderungen. Mit der am IWS entwickelten Laser-Arc-Technologie wird eine effektive Plasmaquelle zur Abscheidung von wasserstofffreien Kohlenstoffschichten zur Verfügung gestellt, die bereits für den industriellen Einsatz optimiert wurde. «

*Dipl.-Ing. Stefan Makowski, Gruppenleiter Schichteigenschaften*  
☎ +49 351 83391-3192 / ✉ stefan.makowski@iws.fraunhofer.de

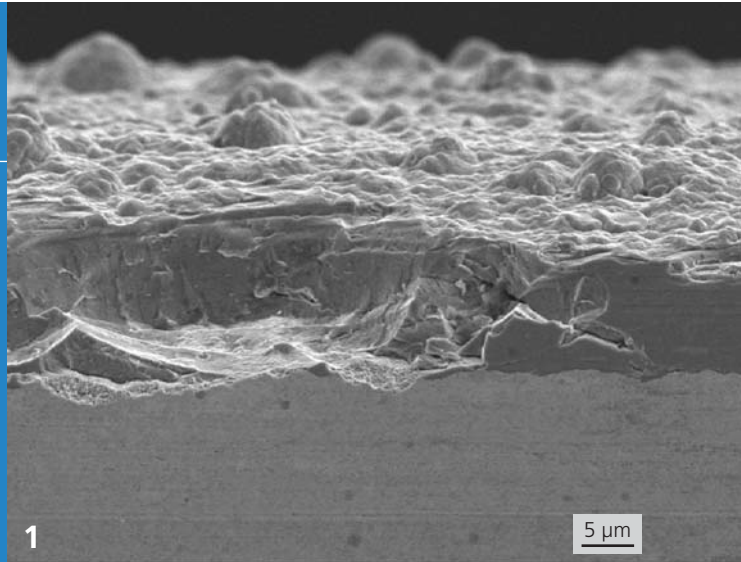


» Anwendungsrelevante Schichteigenschaften werden durch Prüfung mechanischer und struktureller Kenngrößen gewährleistet. Neben verbreiteten Verfahren wie Nanoindentation und tribologischer Prüfung werden auch methodische Arbeiten mit Schwerpunkt Laserakustik (LAwave®) und Haftfestigkeitsprüfung durchgeführt. «

#### BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2015

1. Hoch belastbare Hartstoffschichten mit hoher Oberflächengüte	24
2. ta-C beschichtete Zerspanungswerkzeuge für CFK- und GFK-Verbundwerkstoffe	26
3. Reibungsreduzierung in Einzylindermotoren durch Diamor®-Beschichtung	28
4. Multischicht-Laue-Linsen für hoch aufgelöste Materialuntersuchungen	30
5. Hochpräzise Multischichtoptiken für den freien Röntgenlaser (XFEL)	32
6. Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit metallischer Bipolarplatten	34





1

5 µm

## HOCH BELASTBARE HARTSTOFFSCHICHTEN MIT HOHER OBERFLÄCHENGÜTE

### DIE AUFGABE

Dünne Verschleißschutzbeschichtungen für Werkzeuge und Bauteile auf der Basis nitridischer Hartstoffe (z. B. TiN, AlTiN, CrN) werden häufig industriell eingesetzt. Typische Verfahren für die Herstellung solcher Beschichtungen bis ca. 10 µm Dicke sind PVD-Verfahren oder CVD-Verfahren.

Bei der Herstellung dickerer Schichten ( $\gg 10 \mu\text{m}$ ) stellt die zunehmende Schichtrauheit ein Problem dar. Beim Arc-PVD-Verfahren z. B. entsteht diese an mikroskopisch kleinen Partikeln, die als Ausgangspunkt wachsender Defektstrukturen wirken. Des Weiteren treten bei fast allen Dünnschichtverfahren spontan Störungen in der aufwachsenden Kristallstruktur auf, die ebenfalls mit zunehmender Beschichtungsdauer zu ausgedehnten Fehlerstrukturen führen (siehe Abb. 1). Die Beschichtung kann dann ihre verschleißmindernde Funktion nicht mehr erfüllen.

Das Fraunhofer IWS Dresden hat sich deshalb die Entwicklung einer Beschichtungstechnologie zur Aufgabe gestellt, die:

- eine möglichst geringe Oberflächenrauheit auch bei Schichtdicken  $\gg 10 \mu\text{m}$  gestattet und
- eine hohe Produktivität im Beschichtungsprozess gewährleistet, damit auch dickere Schichten in vertretbarer Zeit hergestellt werden können.

### UNSERE LÖSUNG

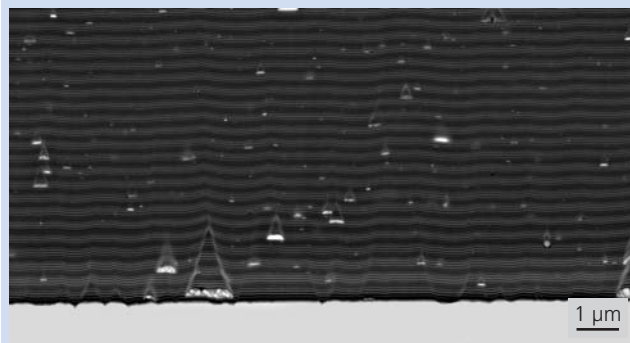
Eine wichtige Voraussetzung zur Herstellung dicker Schichten mit ausreichend glatter Oberfläche ist die Unterdrückung des Defektstrukturwachstums. Dies kann auf diverse Arten erfolgen, die einzeln oder in Kombination angewendet werden.

Eine Möglichkeit ist das Abscheiden vieler Schichten mit Einzelschichtdicken im Nanometerbereich. Bei passender Werkstoffkombination wird das Wachstum von Defektstrukturen an den Grenzflächen der Einzellagen unterbrochen. Vorhandene Defekte werden dadurch in die gewünschte Schichtstruktur eingebettet und stören deren Funktion nicht (siehe Abb. 2).

Ein weiterer Ansatz zur Defektunterdrückung ist die Nutzung hoch ionisierter Plasmen. Die hochenergetischen Teilchen werden im Beschichtungsprozess zum Abtrag unmittelbar entstandener, unerwünschter Rauspitzen genutzt. Beim Arc-Verfahren z. B. kann durch geeignete Parameterwahl die Plasmaanregung erhöht werden.

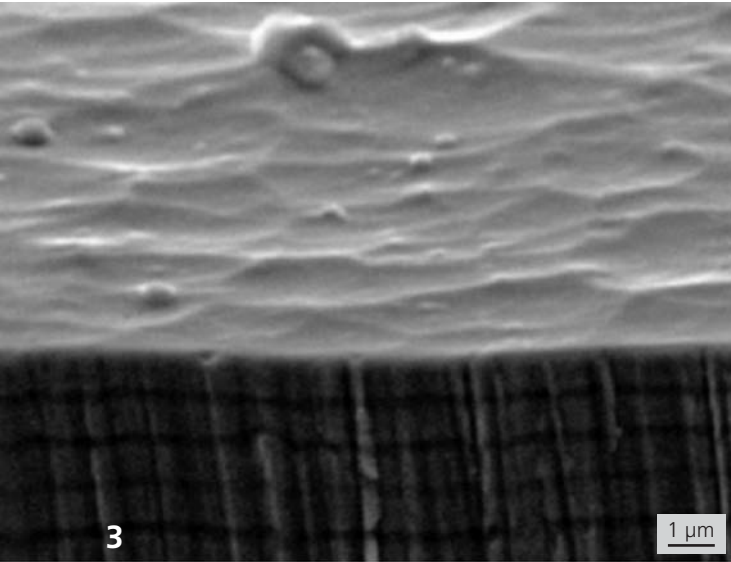
Für den Vakuum-Arc-Beschichtungsprozess wurden bei verschiedenen Entladungsströmen die optischen Emissionsspektren aufgenommen. Im Standardprozess einer AlCrN-Beschichtung sind einfach und zweifach geladene Al- und Cr-Ionen nachweisbar. Im höher angeregten Prozess ist die Anzahl der Ionen wesentlich gestiegen und ein Trend zu mehrfach geladenen Ionen erkennbar.

Querschnitt einer Mehrlagen-Hartstoffschicht mit neutralisierten Defektstrukturen



2

1 µm



3

## ERGEBNISSE

Abbildung 2 zeigt den Querschnitt einer Hartstoffschicht, die mit einer Kombination aus mehrlagiger Beschichtung bei erhöhter Plasmaanregung hergestellt wurde. Deutlich sichtbar sind Inhomogenitäten im Schichtvolumen, die auf die Ablagerung von mikroskopisch kleinen Partikeln während des Beschichtungsprozesses zurückzuführen sind. Diese werden im Verlauf des Schichtwachstums abgedeckt und abgeflacht, bis schließlich wieder eine ebene Oberfläche entsteht.

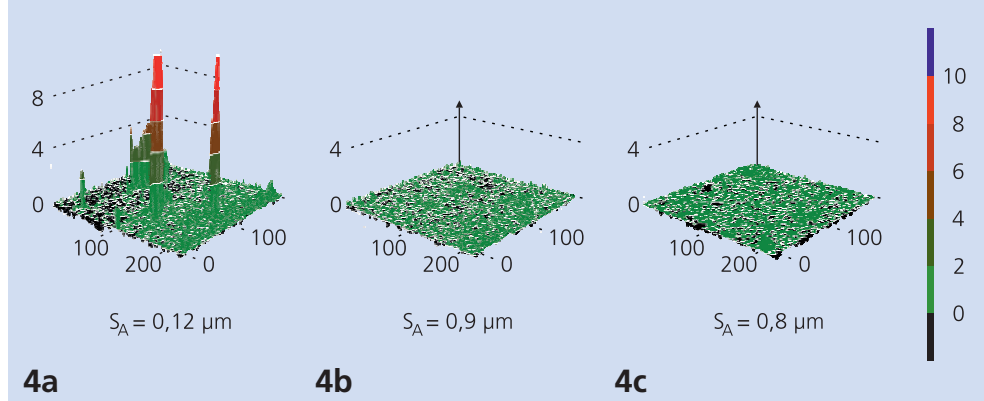
REM-Aufnahmen (Abb. 3) und Topografieuntersuchungen (Abb. 4) an beschichteten Oberflächen zeigen, dass mit der Kombination aus Viellagigkeit und hoher Ionisierung Schichtoberflächen herstellbar sind, die bei Nutzung des Standardprozesses nur durch nachträgliche Politur erreicht werden können.

*Schmiedewerkzeug mit glatter Hartstoffbeschichtung*



5

*Topografievergleich: Standardprozess (a), Standardprozess mit mechanischer Glättung (b) sowie Prozess mit erhöhter Plasmaanregung und in situ-Glättung (c) in µm*



Dies ist meist nur durch Beschichtung mit aufwändiger Nachbearbeitung zu erreichen. Das vorgestellte Verfahren kann zu einer wesentlichen Aufwandsminimierung bei der Beschichtung solcher Werkzeuge beitragen.

- 1 Defektfreie Beschichtung, hergestellt mit dem Arc-Verfahren
- 3 Defektarme mehrlagige Beschichtung, hergestellt im hochionisierten Plasma

Für die Beschichtung von Werkzeugen für Ur- und Umformprozesse, beispielsweise die in Abbildung 5 dargestellten, stellt dieser Technologieansatz eine sinnvolle Perspektive dar. Bei extremer Belastbarkeit müssen die Beschichtungen höchste Ansprüche bezüglich der Oberflächengüte erfüllen.

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Frank Kaulfuß

+49 351 83391-3414

frank.kaulfuss@iws.fraunhofer.de





# ta-C BESCHICHTETE ZERSpanungSWERKZEUGE FÜR CFK- UND GFK-VERBUNDWERKSTOFFE

## DIE AUFGABE

Durch die rasche technologische Entwicklung und den Einfluss des internationalen Wettbewerbs ist im Bereich der spanenden Werkstoffbearbeitung eine immer kostengünstigere Produktion bei immer anspruchsvolleren Werkstoffen zu beobachten. So werden insbesondere auf dem Gebiet der Leichtbauwerkstoffe und Kunststoffe zunehmend schwerer zu bearbeitende Materialien wie z. B. Glas- und Kohlefaser-Verbundwerkstoffe (GFK bzw. CFK) entwickelt. Eine besondere Herausforderung stellt die Bearbeitung von Laminaten, bestehend z. B. aus GFK, CFK und Pappe bzw. Metall dar, bei denen das Werkzeug sehr wechselhaften Beanspruchungsbedingungen ausgesetzt ist.

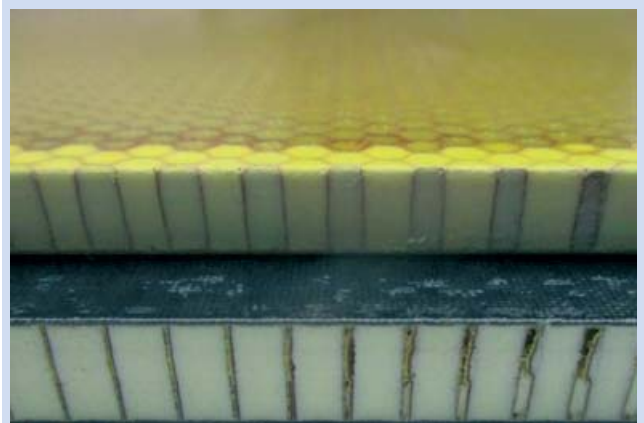
Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die Bearbeitungswerkzeuge immer weiter verbessert werden. Der Schlüssel dafür liegt in einer geeigneten Oberflächenfunktionalisierung der Werkzeuge, beispielsweise durch eine PVD-Beschichtung. Unter den PVD-Schichten haben die klassischen TiN- und die neueren TiAlN- und TiCN- Schichten eine relativ große Verbreitung.

Für Anwendungen, bei denen eine starke abrasive Abnutzung der Werkzeugschneiden im Vordergrund steht, werden zunehmend kristalline bzw. nanokristalline CVD-Diamantschichten eingesetzt. Neben den im Vergleich zu PVD-Beschichtungen hohen Kosten stellen die hohen Beschichtungstemperaturen im CVD-Prozess und die häufig beobachteten Kobalt-Auswaschungen aus dem Hartmetall Nachteile dieser Beschichtung dar, die es zu eliminieren gilt.

## UNSERE LÖSUNG

Eine günstige Alternative zu den Diamantbeschichtungen stellen die superharten tetraedrischen amorphen Kohlenstoffschichten (ta-C) dar. Deren Herstellung gelingt mit dem Laser-Arc-Verfahren bei Temperaturen unter 150 °C und ist daher nicht nur für Hartmetallwerkzeuge problemlos geeignet. Mit Härten von bis zu 70 GPa reichen die ta-C-Schichten nahe an die Härte von nanokristallinen Diamantschichten heran. Daraus resultiert eine außerordentlich hohe Beständigkeit gegen Abrasivverschleiß, vor allem beim Zerspanen anspruchsvoller Kompositwerkstoffe. Gleichzeitig vermindert die Kohlenstoffoberfläche ein Ankleben von Material und ermöglicht eine sehr niedrige Reibung zwischen Werkzeugeschneide und Span. Die Kombination dieser Eigenschaften verleiht der ta-C-Schicht einen besonderen Vorteil bei der Bearbeitung von Kompositwerkstoffen.

*Fräsbearbeitete Sandwichplatte mit Wabenkern bestehend aus einem Honeycomb-Stützkern mit GFK- bzw. CFK-Deckhäuten*



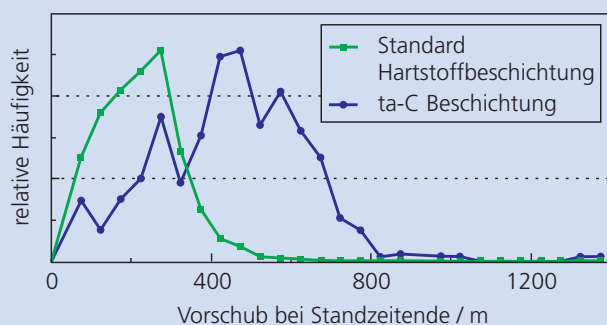
3



## ERGEBNISSE

Für Zerspanungsversuche im realen Produktionsumfeld des Auftraggebers wurden 340 Hartmetall-Vielzahnfräser, Durchmesser 6 mm, mit einer ca. 1,2 µm dicken ta-C Beschichtung versehen (Abb. 3). Die Beschichtung erfolgte mit der am Fraunhofer IWS entwickelten gefilterten Laser-Arc-Technologie. Als Haftvermittlerschicht diente eine 0,1 µm dicke Chromschicht. Die Härte der ta-C-Schicht betrug ca. 67 GPa. Die zu bearbeitenden Sandwichplatten bestanden aus einem Honeycomb-Wabenkern mit GFK- bzw. CFK-Deckhäuten (siehe Abb. 2). Die Ergebnisse des Großversuches werden als Auftragung der erreichten Vorschubmeter bis zum nötigen Werkzeugwechsel in Abbildung 4 zusammengefasst.

Ergebnisse des Zerspan-Großversuches mit Hartstoffschicht und ta-C Beschichtung im Vergleich



4

Die sehr heterogenen Bearbeitungsaufgaben (unterschiedliche Plattensorten, unterschiedliche Fräsaufgaben und -menüs, ...) führen zu sehr unterschiedlichen Standzeiten. Klare Effekte zum Einfluss der Werkzeugbeschichtung kommen deshalb erst nach einer größeren Anzahl von Versuchen zum Vorschein. Während bereits 2430 Werkzeuge mit Hartstoffbeschichtung

getestet wurden, beinhaltet das Diagramm in Abbildung 4 erst 340 ta-C-beschichtete Werkzeuge, weshalb die Ergebnisse noch einer gewissen Streuung unterliegen. Trotzdem ist eindeutig eine deutliche Verlängerung der durchschnittlichen Standzeit erkennbar. Der Mittelwert des erreichten Vorschubs vergrößert sich von 177 m (Standard) auf 412 m mit ta-C beschichteten Werkzeugen. Dies entspricht einer Verbesserung um 132 Prozent.

Ermutigt durch diese positiven Ergebnisse wurde daraufhin ein weiterer Großversuch, eine komplette Monatsproduktion, ausschließlich mit ta-C beschichteten Werkzeugen durchgeführt. Bei diesem Versuch mit ca. 1000 Werkzeugen ergab sich eine Standzeiterhöhung um den Faktor 2,4. Daraufhin wurde eine komplette Umstellung der Produktion auf ta-C-beschichtete Werkzeuge beschlossen.

- 1 PVD-Anlage mit Laser-Arc-Modul zur ta-C-Beschichtung von Werkzeugen
- 2 Hartmetall-Vielzahnfräser, mit ta-C beschichtet

## KONTAKT

Dr. Volker Weihnacht

+49 351 83391-3247

volker.weihnacht@iws.fraunhofer.de







# REIBUNGSREDUZIERUNG IN EINZYLINDER-MOTOREN DURCH DIAMOR®-BESCHICHTUNG

## DIE AUFGABE

In mit Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen fallen etwa 50 Prozent der Reibungsverluste im Antriebsstrang an. Reibungsmindernde Verschleißschutzschichten bieten hier ein exzellentes Potenzial, die Effizienz und Lebensdauer dieser Systeme substantial zu erhöhen sowie Schadstoffemissionen zu verringern.

Zur Entwicklung und Evaluierung moderner Verschleißschutzschichten verwenden Wissenschaftler im Labor üblicherweise tribologische Testapparaturen, um quantitative Aussagen über Reibungskoeffizienten und Verschleißraten zu bestimmen. Am anderen Ende der Technologiekette entwickeln Ingenieure Motoren, deren Charakteristiken wie Leistung und Drehmoment als Funktion der Drehzahl mit Motorentestständen ermittelt werden. Und schließlich werden mit dem assemblierten Fahrzeug Verbrauchsdaten, Beschleunigungsraten und andere Daten unter tatsächlicher Fahrbedingung bestimmt.

Die im Labor gemessenen Schichteigenschaften mit den tatsächlichen erreichbaren Vorteilen im Einsatz der Schichten zu korrelieren, ist eine große Herausforderung. Um diesem Problem einen Schritt näher zu kommen, bestand die Aufgabe darin, den Vorteil von Diamor® Schichten in tatsächlichen Verbrennungsmotoren zu demonstrieren.

## UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer Center for Coatings and Diamond Technologies CCD (siehe auch S. 128) wurde in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner der Vorteil von Diamor®- Schichten für kommerziell erhältliche Einzylinder-Motoren getestet. Die Motorentests wurden am Center for Automotive Research (CAR) der

Ohio State University in Columbus, Ohio, USA durchgeführt. Im ersten Versuch wurde zunächst ein bereits benutzter etwa 10 PS starker Go-Kart Motor auf dem Teststand mit klassischem Motorentest (Leistung und Drehmoment gegen Drehzahl) vermessen. Danach wurde der Motor zerlegt und einige für die Reibung kritische Komponenten wurden gereinigt und mit Diamor® beschichtet (Abb. 1). In diesem beschichteten Zustand wurde der Motorentest wiederholt. In einem weiteren Experiment wurde ein 7 PS starker Einzylinder Motor (Kohler Command Pro CH-270) getestet.

Typische Anwendungen für diesen Motor sind Gartenmaschinen, Notstromgeneratoren und Pumpsysteme. Ein fabrikneuer Motor wurde zunächst mit konventionellem Penzoil 10W-30 Öl gefüllt und eingefahren (3 x 30 Minuten Laufzeit bis das Öl sauber blieb). Dies war notwendig, um den Reibungsvorteil der Diamor®-Schichten möglichst direkt nachzuweisen.

In den Versuchen wurde ein 3 PS starker Elektromotor verwendet, um den Kohler Motor bei verschiedenen Drehzahlen anzutreiben. Dabei wurden die Ventile des Motors offengelassen, so dass nur die mechanische Reibung überwunden werden musste. Das dazu notwendige Drehmoment wurde gemessen. Unbeschichtete und beschichtete Konfiguration wurden mit konventionellen und synthetischen (Mobil 1) Ölen getestet.

Die Tests wurden bei Raumtemperatur, Standardlauftemperatur (der Motor wurde 35 Minuten betrieben bis Öltemperatur den gewünschten Wert hatte) und unter Kälte (in Trockeneis) wiederholt.

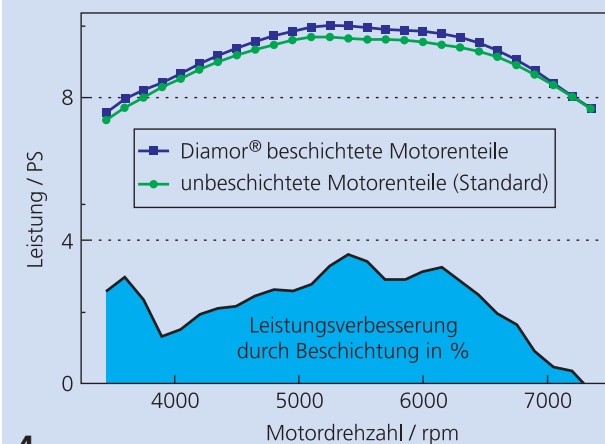


## ERGEBNISSE

Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Leistung des Go-Kart Motors als Funktion der Motorendrehzahl im unbeschichteten und beschichteten Zustand. Die blau hinterlegte Kurve stellt die Differenz der Leistung in Prozent dar. Die Daten belegen, dass die Diamor®-Beschichtung insbesondere im Bereich der Spitzenleistung über 3 Prozent Leistungs Zunahme gewährt. Für Rennmotoren ist diese Leistungs Zunahme erheblich.

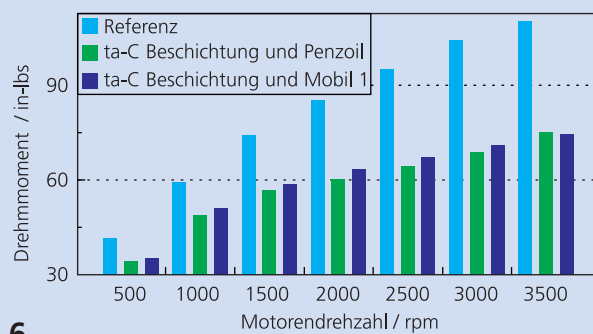
Das wichtigere Resultat ist aber, dass der Motor mit beschichteten Komponenten eine um 350 Umdrehungen pro Minute niedrigere Drehzahl benötigt, um einen zum unbeschichteten Motor vergleichbaren Leistungswert zu erreichen. Mit anderen Worten, der beschichtete Motor dreht niedriger bei gleicher Zugkraft und verbraucht demzufolge weniger Kraftstoff und, infolge geringerer Reibung und niedrigerer Drehzahlen, verschleißt weniger. Abbildung 6 zeigt die Daten für den Motorlauf unter kalten Temperaturen. Das zum Antrieb des Kohler Motors benötigte Drehmoment ist gegen die Drehzahl aufgetragen. Die Reduzierung des erforderlichen Drehmoments und damit der Reibung übersteigt 30 Prozent bei 3000 Umdrehungen pro Minute. Bei kalten Temperaturen zeigte sich der größte Vorteil. Abbildung 7 zeigt die über alle Drehzahlen

Vergleich der Motorenleistung eines Go-Kart Motors mit und ohne Diamor® Beschichtungen.



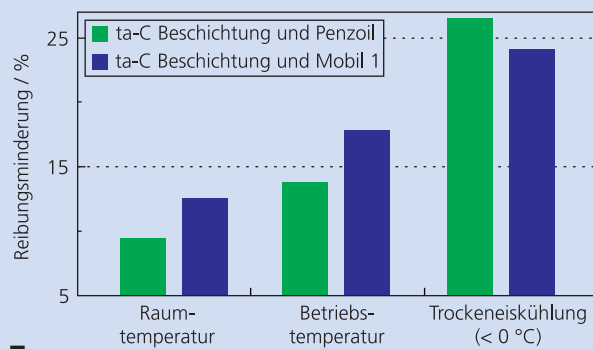
4

Drehmoment im Kohler Motor in Abhängigkeit von Drehzahl, Öl und Beschichtung bei Temperaturen unter 0 °C



6

Mittlere Reibungsreduzierung des Kohler Motors mit beschichteten Komponenten für verschiedene Betriebstemperaturen und in verschiedenen Ölen.



7

gemittelte Reibungsreduzierung bei verschiedenen Temperaturen. Im Ergebnis gewähren die Diamor®-Schichten in diesem Experiment einen Reibungsvorteil von 10 - 30 Prozent je nach Lauftemperatur.

1-3/5 Mit Diamor® beschichtete  
Komponenten im Einzylinder-  
Testmotor

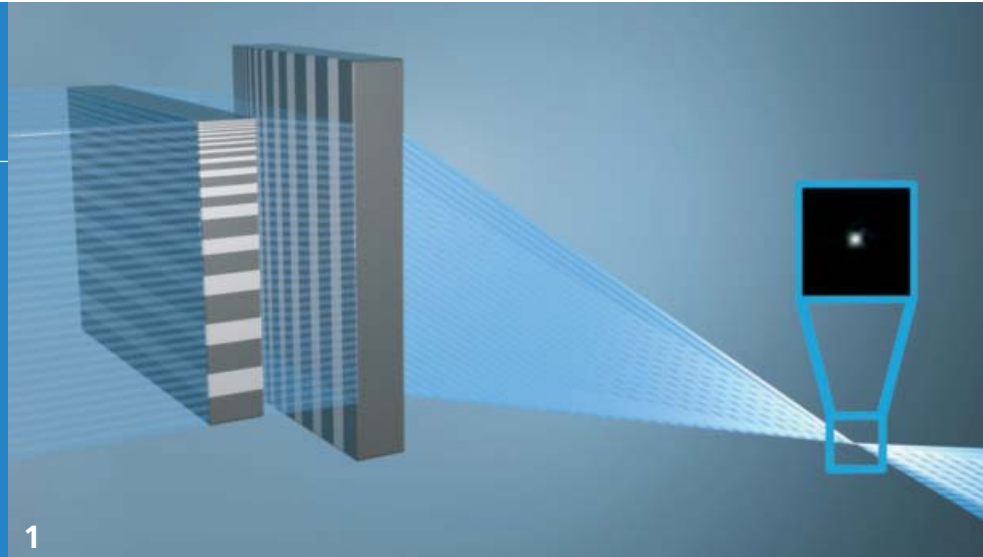
## KONTAKT

Dipl.-Ing. Lars Haubold

+1 517 432 8167

lhaubold@fraunhofer.org





# MULTISCHICHT-LAUE-LINSEN FÜR HOCH AUFGELÖSTE MATERIALUNTERSUCHUNGEN

## DIE AUFGABE

Materialuntersuchungen mit harter Röntgenstrahlung versprechen höchste Ortsauflösungen bei gleichzeitig hohem Durchdringungsvermögen. Hinsichtlich Kohärenz, Parallelität und Intensität der Röntgenstrahlung bieten Synchrotronstrahlquellen exzellente Bedingungen. Das räumliche Auflösungsvermögen an diesen Quellen wird vor allem durch die verfügbaren Optiken begrenzt. Durch den Einsatz von zwei Multischicht-Laue-Linsen (MLL) gemäß der schematischen Darstellung in Abbildung 1 wurde bereits eine Punktfokussierung im Bereich von 10 nm realisiert.

Zielstellung laufender Forschungsarbeiten am Fraunhofer IWS ist es, MLL für den Einsatz in Laboranwendungen zu qualifizieren und damit das laterale Auflösungsvermögen von Diffraktometrie, Fluoreszenzanalysen und Reflektometrie von derzeit etwa 20  $\mu\text{m}$  bis in den sub- $\mu\text{m}$ -Bereich zu verbessern. Die Strahlungseigenschaften von Synchrotronstrahlquellen und Laborgeräten unterscheiden sich deutlich, was bereits beim Design eines Laboraufbaus mit MLL berücksichtigt werden muss und dazu führt, dass Strahlgrößen im Bereich von 1  $\mu\text{m}$  realistisch erscheinen.

## UNSERE LÖSUNG

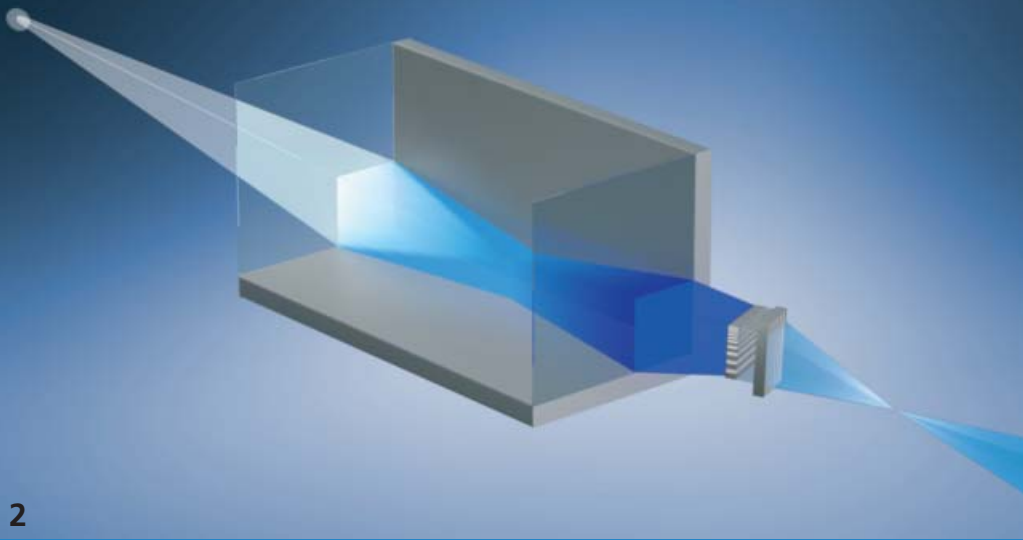
Um einen möglichst großen Anteil der Strahlung einzufangen, ist die Herstellung von Linsen mit einer großen Apertur notwendig. Sie wird bei MLL durch große Beschichtungsdicken erreicht. Große Schichtdicken können infolge von Eigenspannungen der verwendeten Materialien zu einer starken Verbiegung und ggf. zu einer Zerstörung der Schicht bereits im Herstellungsprozess führen.

Um die Auswirkungen der von Synchrotronstrahlquellen abweichenden Strahleigenschaften auf die Fokussierung der Optik zu ermitteln, wurde am Fraunhofer IWS ein Programm, basierend auf der sogenannten »Beam Propagation Method« entwickelt. Die Modellrechnungen zeigen, dass in Abhängigkeit vom realen Strahlengang und vom MLL-Design die wesentlichen Einflussfaktoren auf die zu erwartende Fokussierungsgrößerung bestimmt werden können. Abbildung 2 stellt den für die Modellrechnung angenommenen Aufbau schematisch dar. Eine Spiegeloptik sorgt dabei für eine Vorfokussierung der von der Quelle kommenden Strahlung auf die MLL.

Am Fraunhofer IWS Dresden werden die Eigenspannungen der MLL durch ein spezielles Multischichtsystem aus vier einzelnen Schichten pro Periode reduziert. Zusätzlich zu je einem Absorber- und Spacermaterial mit gegenläufigen Eigenspannungen wird zwischen den Grenzflächen eine trennende Barrierschicht eingebracht (Abb. 3). Bei geeigneten Dickenverhältnissen der drei beteiligten Materialien ist dieses Materialsystem spannungsfrei und erlaubt damit die Herstellung von Schichtsystemen mit etwa 100  $\mu\text{m}$  Dicke.

## ERGEBNISSE

In ersten Versuchen konnte das in Abbildung 3 dargestellte Materialsystem mit einer Dicke von etwa 65  $\mu\text{m}$  hergestellt werden. Für den vorgeschlagenen Aufbau haben Berechnungen gezeigt, dass ein vorkussierender Spiegel mit kurzer Brennweite und damit stark gekrümmter Wellenfront von Nachteil für die geometrische Trennung der Ordnungen hinter der MLL ist. Als sinnvoll nutzbar erscheinen die Ergebnisse einer Konfiguration mit einem Spiegel einer moderaten Brennweite von 28 cm, wenn die MLL etwa 3,5 cm vom Fokus entfernt platziert wird. Dieser Aufbau ergibt, bei idealen



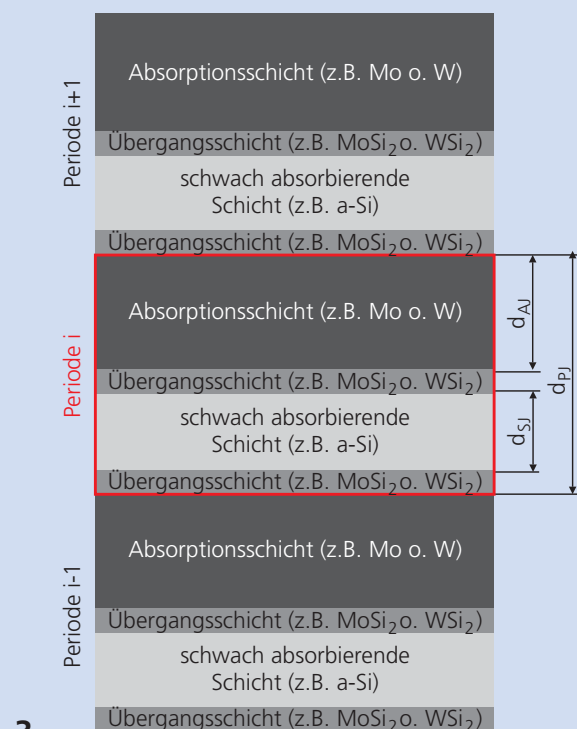
Strahleigenschaften für eine beispielhafte Linsenkonfiguration, eine Fokusgröße von etwa 40 nm. Bei einer Kupferröntgenröhre mit einem Ni-Absorber beherrschen die Spektrallinien  $K_{\alpha 1}$  und  $K_{\alpha 2}$  die Wellenlängenverteilung. Wenn diese beiden Linien berücksichtigt werden, ergeben die Berechnungen im Wesentlichen zwei getrennte Fokusse, deren Abstand etwa 25  $\mu\text{m}$  in Ausbreitungsrichtung und 150 nm senkrecht dazu beträgt.

Bei Kohärenzlängen, die kleiner sind als die Apertur der Linse, trägt jeweils nur der entsprechende Teil der Linse zur Bildung des Fokus bei, der dadurch vergrößert wird; sie führen jedoch zu keiner nennenswerten Reduktion des Flusses im Fokus. So ergibt sich bei einer Linsengröße von 100  $\mu\text{m}$  und einer Kohärenzlänge von 10  $\mu\text{m}$ , entsprechend dem vorgenannten Beispiel, eine Fokusgröße von 400 nm, während eine Kohärenzlänge von 1  $\mu\text{m}$  in einer Fokusgröße von etwa 4  $\mu\text{m}$  resultiert.

Berechnungen zur Abschätzung des Einflusses der Divergenz des einfallenden Strahls zeigen für einen typischen Wert von  $0,02^\circ$  eine Verschiebung des Fokus von bis zu 5  $\mu\text{m}$  senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Daraus resultiert eine entsprechende Vergrößerung des Fokus der MLL. Eine geringere Winkeldivergenz am Eingang der Linse wird erreicht, wenn ein schmalbandiger Spiegel genutzt wird. Weitere Verbesserungen können zudem erreicht werden, wenn MLL mit stärkerer Winkelselektivität, d. h. angepasster Lamellendicke, hergestellt werden.

Insgesamt zeigen die Modellierungsergebnisse, dass sich durch den Einsatz von MLL auch an Laborquellen Fokusgrößen von 1  $\mu\text{m}$  erreichen lassen, wenn entsprechend angepasste und optimierte Optiken eingesetzt werden. Das laterale Auflösungsvermögen von Diffraktometrie, Fluoreszenzanalysen und Reflektometrie lässt sich somit extrem verbessern.

Multischichtsystem aus vier einzelnen Schichten pro Periode



- 1 *Gekreuzte MLL für die Punkt-fokussierung*
- 2 *Schematische Darstellung des für Modellrechnungen angenommenen Aufbaus von Laboranwendungen mit MLL*

#### KONTAKT

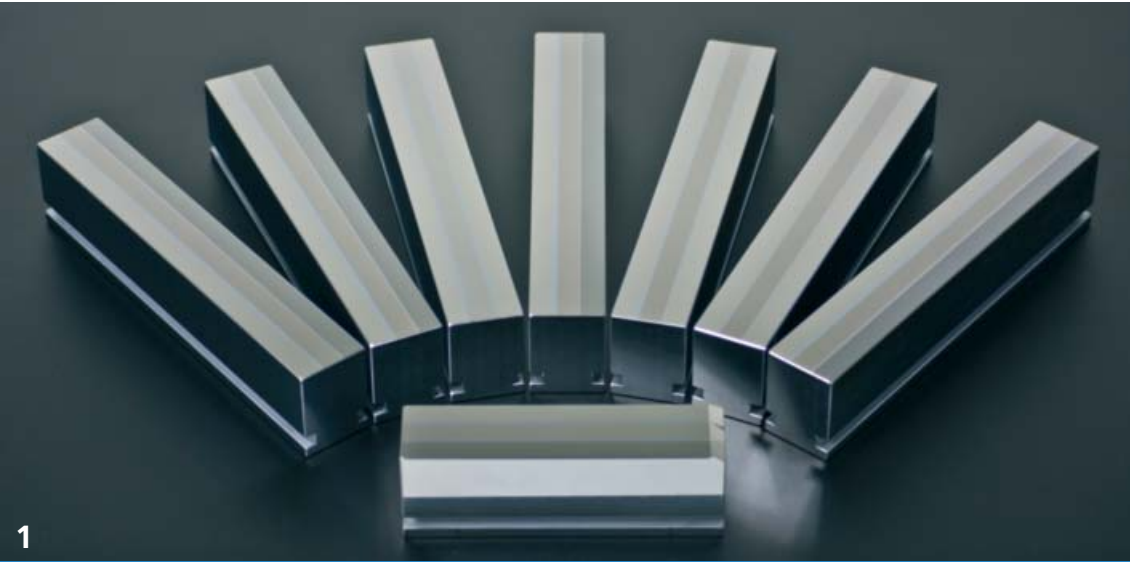
Dipl.-Phys. Adam Kubec

+49 351 83391-3572

adam.kubec@iws.fraunhofer.de







# HOCHPRÄZISE MULTISCHICHTOPTIKEN FÜR DEN FREIEN RÖNTGENLASER (XFEL)

## DIE AUFGABE

Für Experimente mit Femtosekunden-Zeitauflösung am derzeit im Aufbau befindlichen Europäischen Freien Röntgenlaser in Hamburg (European XFEL) werden Spiegeloptiken höchster Präzision und thermischer Stabilität gebraucht. Eine für diese Experimente verwendete Strahlteiler- und Verzögerungseinheit (engl.: Split and Delay Unit – SDU) besteht aus acht Ebenen Einzelspiegeln, die die extrem leistungsstarke Röntgenstrahlung des XFEL in zwei Strahlwege variabler Länge teilt und die beiden Teilstrahlen dadurch zeitversetzt überlagert zum Experiment abbildet (Abb. 2).

Die Herausforderung bei einer SDU für Röntgenstrahlung ( $E_{\text{photon}} > 5 \text{ keV}$ ) besteht darin, dass die Reflexionswinkel der Spiegel sehr klein sind und damit für ausreichend große Laufzeitunterschiede die geometrische Längsausdehnung der SDU auf einige Meter anwächst [1]. Die für Reflexionswinkel im Bereich von  $1 \dots 5^\circ$  notwendigen Multischichtoptiken haben nun die Besonderheit, dass für jede Photonenenergie ein bestimmter Reflexionswinkel präzise eingestellt werden muss und innerhalb des hier interessierenden Energiebereichs

( $5 \dots 20 \text{ keV}$ ) auch verschiedene Schichtmaterialien die jeweils besten Reflexionsvermögen aufweisen. Das bedeutet, dass die Beschichtungen der einzelnen Spiegel perfekt zueinander passen müssen, um identische, für den Strahlteiler- »BS« bzw. den Rekombinierspiegel »RC« exakt die doppelten Ablenkwinkel zu gewährleisten.

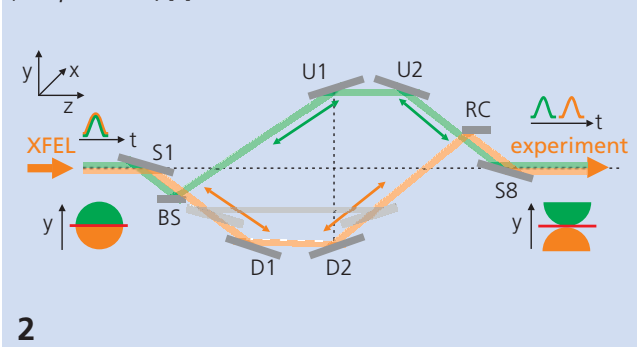
Neben der durch die intensive XFEL-Strahlung geforderten hohen thermischen Stabilität ergeben sich damit Präzisionsanforderungen der Schichtabscheidung im Bereich  $> 99,9$  Prozent (das entspricht einem erlaubten Dickenfehler einer Einzelperiode von  $2 \dots 5 \text{ pm}$ ). Außerdem müssen mehrere Materialkombinationen als Multilayer nebeneinander auf die Spiegelträger aufgebracht werden.

## UNSERE LÖSUNG

Alle SDU-Spiegel des XFEL sind in drei Oberflächenbereiche untergliedert, auf denen jeweils für einen bestimmten Energiebereich die Materialsysteme  $\text{Mo/B}_4\text{C}$ ,  $\text{Ni/B}_4\text{C}$  und  $\text{W/B}_4\text{C}$  mit verschiedenen Einzelschichtdicken und Periodenzahlen aufgebracht werden.

Eine dieser 3 Zonen weist zudem eine Besonderheit auf: hier sind sogenannte »Zweifarbexperimente« geplant, d. h., es sollen auf den beiden Strahlwegen verschiedene Photonenenergien getrennt und zeitversetzt überlagert werden (Grundenergie und die 3. harmonische Oberwelle). Die Spiegel S1 und S8 tragen daher spezielle Multilayerstapel, die die gleichzeitige Reflexion beider Energien bei einem festen Einfallswinkel ermöglichen [2].

Schematische Abbildung der Strahlteiler- und Verzögerungseinheit (Split and Delay Unit - SDU) am europäischen Röntgenlaser (European XFEL) [1]



[1] Roling, S. et al.: Proc. of SPIE Vol. 9210, 92100B (2014)

[2] Roling, S. et al.: Opt. Lett. 39, 2782 (2014)



3

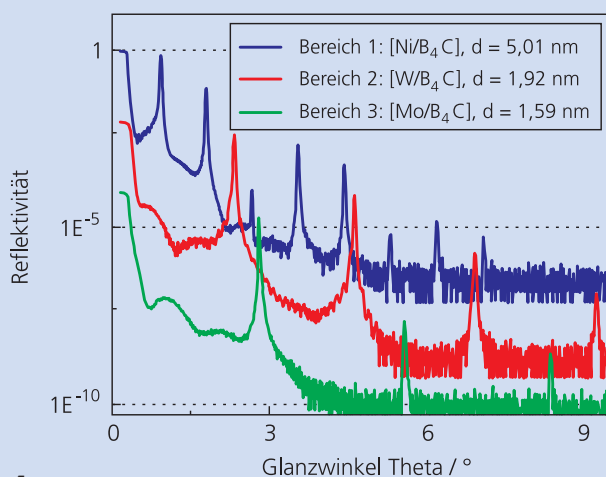
## ERGEBNISSE

Die in Abbildung 1 dargestellten Spiegel der SDU haben eine Länge von 190 mm bei einer Breite von jeweils 30 mm. Der im Vordergrund abgebildete Strahlteilerspiegel ist 120 mm lang und besitzt eine angeschliffene »Teilerkante« (rechts im Bild). Sie wird direkt in der Mitte des XFEL-Strahlengangs angeordnet.

Mit Abschattungsmasken wurden auf jeden der SDU-Spiegel mittels Ionenstrahl- oder Magnetronsputtertechniken nacheinander jeweils 3 Multischichtstapel aufgebracht. Die Periodendicken der einzelnen Stapel lagen dabei im Bereich von 1,6 bis 5,0 nm. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Reflektogramme der Beschichtungen des Strahlteilerspiegels. Die Halbwertsbreiten der Reflexionspeaks erster Ordnung liegen hier im Bereich von nur 0,02...0,03 °, was gleichzeitig die Homogenitätsanforderung der Periodendicke in Längs- und Querrichtung jeder Beschichtungszone, aber auch der 8 Spiegel untereinander definiert (Dickenabweichung ca. ± 0,1...0,2 Prozent).

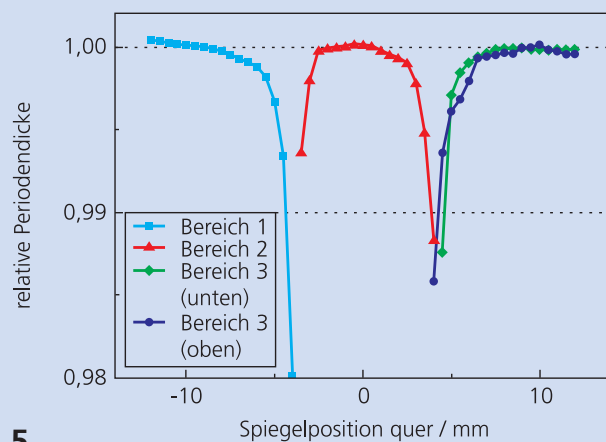
In Abbildung 5 sind die Homogenitätsprofile der Periodendicken der drei Beschichtungszone eines SDU-Spiegels in

Reflektogramme der drei Beschichtungszone des Strahlteilers (XRR-Messungen mit Cu-K $\alpha$ -Strahlung)



4

Homogenitätsvermessung der Periodendicken der drei Beschichtungszone eines SDU-Spiegels in Querrichtung



5

Querrichtung dargestellt (jeweils normiert auf die mittlere Periodendicke der Zone). Man erkennt, dass die Arbeitsbereiche etwa über 5...8 mm die geforderte Homogenität aufweisen und dazwischen Bereiche von ca. 3...4 mm Breite existieren, die ungenutzt bleiben müssen. Die gemessenen Abweichungen der Reflexionspeaklagen der acht SDU-Spiegel untereinander betragen maximal 0,005 °, was damit den gleichzeitigen Einsatz in der Verzögerungsanordnung gemäß Abbildung 2 garantiert.

- 1 Acht SDU-Spiegel für den European XFEL
- 3 Detailansicht der Strahlteilerkante des Spiegels »BS«

## KONTAKT

Dipl.-Phys. Peter Gawlitza

+49 351 83391-3431

peter.gawlitza@iws.fraunhofer.de





1

# VERBESSERUNG DER ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT METALLISCHER BIPOLARPLATTEN

## DIE AUFGABE

Mobilität ist eine der großen Herausforderungen unserer Zeit. Die Zukunft der Mobilität ist vermutlich elektrisch. Darum hat das IWS einerseits ein Zentrum für Batterieforschung gegründet (siehe Seite 138), arbeitet andererseits aber auch an der Weiterentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen. Diese bieten im Hinblick auf die Reichweite deutliche Vorteile.

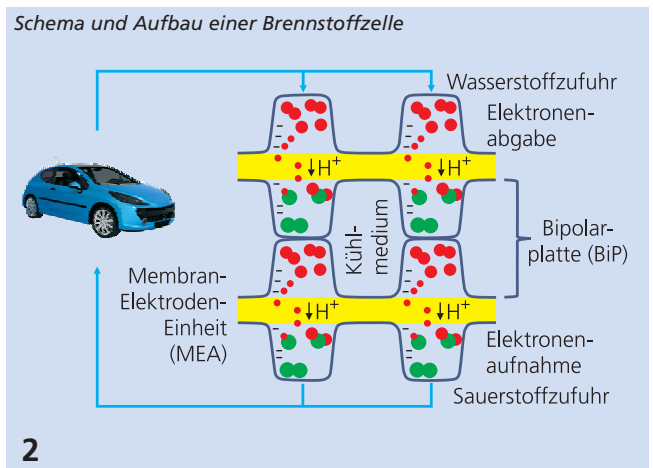
In der Brennstoffzelle wird Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser umgesetzt und die entstehende elektrische Energie für den Antrieb genutzt (siehe Abb. 2). Die Bipolarplatte (BiP), eine Komponente der Brennstoffzelle, muss dabei eine Reihe von Aufgaben erfüllen, wie z. B. Zufuhr von Wasserstoff und Sauerstoff, Abfuhr von Wasser und Wärme. Zudem nimmt die BiP auf der Wasserstoffseite die abgegebenen Elektronen auf und führt sie, nachdem sie im Antrieb Arbeit verrichtet haben, auf der Sauerstoffseite wieder zu. Daher muss das Material der BiP eine hervorragende elektrische Leitfähigkeit besitzen, die sich auch unter den korrosiven Belastungen in der Brennstoffzelle nicht signifikant verringert.

Bei Anwendungen, bei denen ausreichend Bauraum zur Verfügung steht, kann man Graphit verwenden. Er ist sowohl ein guter Stromleiter als auch beständig gegen die als Elektrolyt verwendete Schwefelsäure. Ist der Bauraum begrenzt, verwendet man dünne, tiefgezogene Edelstahlbleche. Diese haben den Nachteil, dass die aus Chromoxid bestehende Passivschicht des Edelstahls den Strom nur schlecht leitet. BiP aus Edelstahl werden deshalb bisher standardmäßig mit Gold beschichtet – eine Lösung, die für Massenmärkte jedoch zu teuer ist. Die Aufgabe besteht also darin, den guten Durchgangswiderstand von Gold auf Edelstahl durch kostengünstigere Materialien zu realisieren.

## UNSERE LÖSUNG

Im Rahmen des vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 03ET045A geförderten Projektes miniBiP wurden zwei Lösungsansätze verfolgt: Zum einen wurden die guten Bulk-Eigenschaften des Edelstahls mit den guten Oberflächeneigenschaften des Graphits durch eine Beschichtung der Blechoberfläche mit graphitischem Kohlenstoff verbunden. Ausgangspunkt hierfür war eine am Fraunhofer IWS für den Verschleißschutz entwickelte amorphe Kohlenstoffschicht. Die Abscheidebedingungen wurden so verändert, dass sich mehrheitlich  $sp^2$ -hybridisierte, also graphitische Bindungen herausbildeten, so dass die Schicht (GLC: Graphite Like Carbon) eine möglichst hohe Leitfähigkeit aufwies.

Zum anderen wurde, basierend auf dem bekannten Plasmanitrieren, ein Verfahren entwickelt, bei dem die Oberfläche des Stahls durch eine Plasmadiffusionsbehandlung im Unterdruck mit Stickstoff angereichert wurde. Anschließend erfolgte die Anreicherung der Randschicht mit Kohlenstoff (sequenzielles Plasmanitrocarburieren).



2



## ERGEBNISSE

Mit den beiden beschriebenen Verfahren wurden zunächst Glattbleche aus Edelstählen oberflächenmodifiziert. Die Prozesse wurden so lange optimiert, bis die Durchgangswiderstände denen goldbeschichteter Bleche entsprachen.

Die besten Ergebnisse hinsichtlich des Durchgangswiderstandes zeigten weniger als 100 nm dicke GLC-Schichten. Diese wurden mit dem gepulsten Vakuumbogen in einer Minute in Zweifachrotation abgeschieden. Vergleichbare Werte konnten auch durch ca. 5 µm dicke, mit Stickstoff und Kohlenstoff angereicherte Randzonen erzielt werden, die in 15 Minuten durch sequentielles Plasmanitrocarburieren erzeugt wurden. Im Anschluss daran wurden reale BiP behandelt und in drei- bis fünfzelligigen Brennstoffzellenstapeln (Stacks) erfolgreich Stresstests unterzogen.

Im nächsten Schritt wurden unter jeweils identischen Bedingungen 10 BiPs PNC-behandelt und 11 BiPs mit GLC

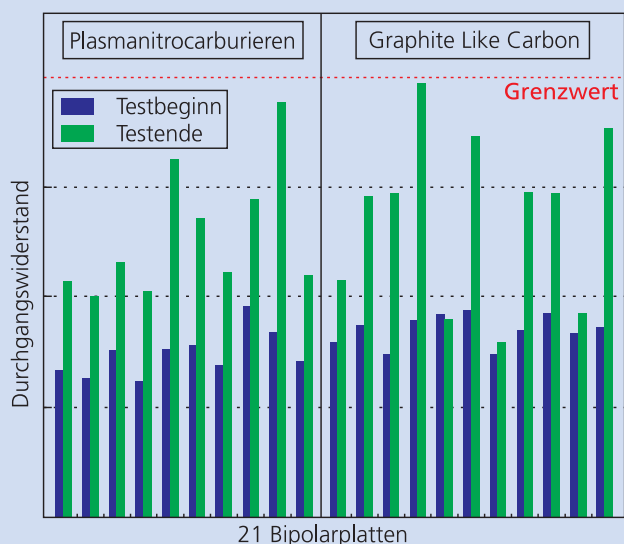
beschichtet und die Durchgangswiderstände aller BiPs einzeln gemessen (blaue Säulen im Diagramm). Aus diesen BiPs wurde ein Mosaik-Stack mit 20 Zellen gebaut und einem Dauertest von 1000 Stunden unterzogen. Danach wurde der Stack demontiert und die Durchgangswiderstände der einzelnen BiP wurden erneut gemessen (grüne Säulen im Diagramm).

Wie das Diagramm zeigt, die Durchgangswiderstände nach dem Test bei jeder einzelnen BiP unter dem vom Kunden für diesen Test geforderten Grenzwert. Mit dem erfolgreichen Abschluss dieses Tests kann nun ein Demonstrator mit 50 Zellen gebaut werden.

Eine erhebliche Effektivitätssteigerung bei der Brennstoffzellenfertigung könnte erreicht werden, wenn Glattblech im Banddurchlauf beschichtet, danach ausgeschnitten und umgeformt würde. Da beide Veredlungsverfahren prinzipiell bandtauglich sind, werden im weiteren Projektverlauf Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Bandveredelung angestellt.

In Vorbereitung dieser Untersuchungen wurden bereits GLC-beschichtete und PNC-behandelte Glattbleche zu Musterbauteilen (siehe Abb. 3) umgeformt. Nach der Umformung sind keine Ausbrüche an den GLC-Schichten oder Beschädigungen der randzonenmodifizierten Bleche feststellbar.

Durchgangswiderstände PNC-behandelter und GLC-beschichteter Bipolarplatten vor und nach 1.000 h Dauertest in einem Mosaik-stack mit 20 Zellen



- 1 Brennstoffzelle puscht Mobilität
- 3 Musterbauteil mit Umformelementen einer metallischen Bipolarplatte

## KONTAKT

Dr. Thomas Stucky

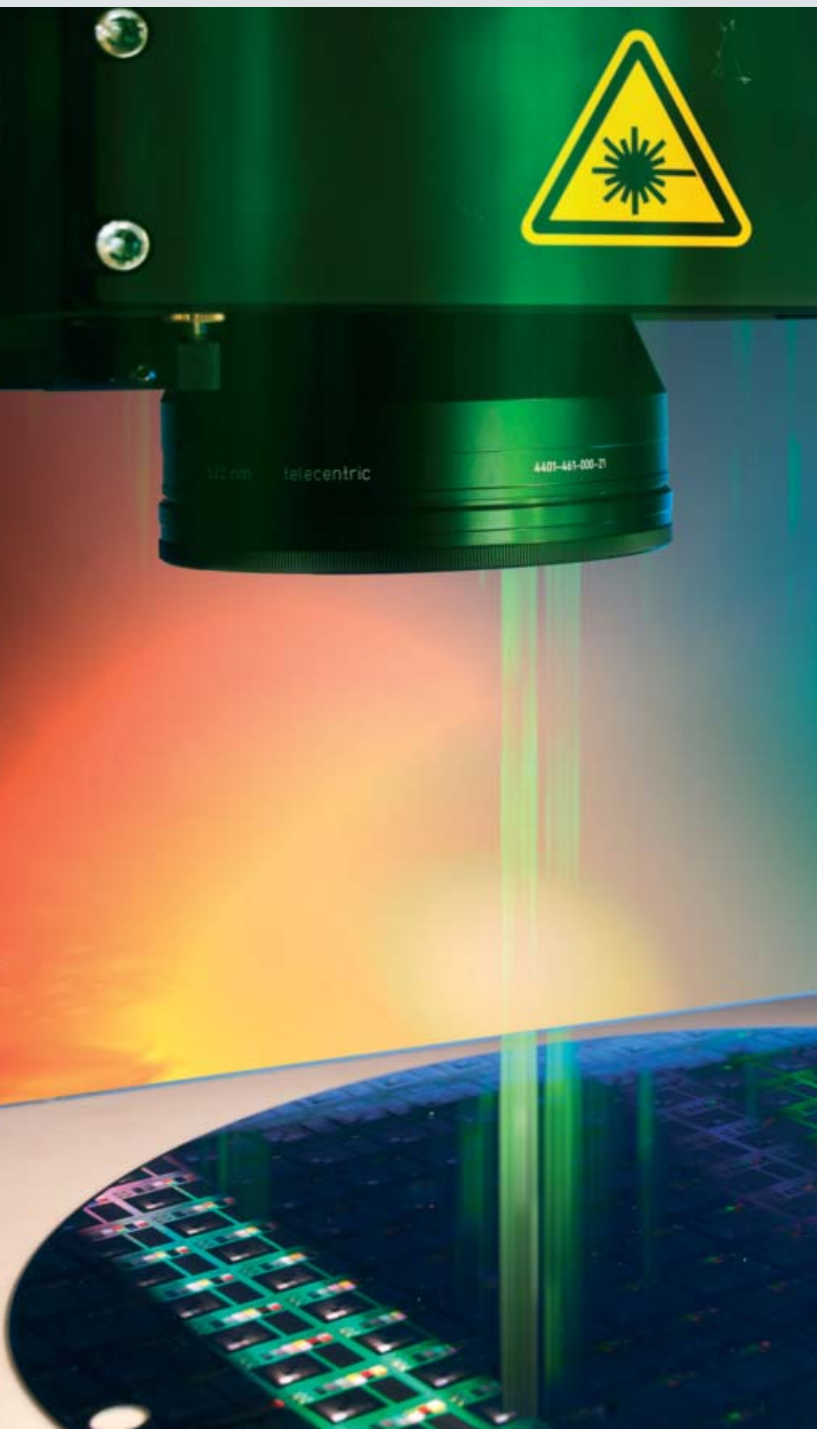
+49 231 844-3888

thomas.stucky@ivs.fraunhofer.de





## MIKROTECHNIK



**Redaktion:** Herr Dr. Klotzbach, wie sehen Sie die Trends und Perspektiven in der Mikrotechnik?

**Dr. Klotzbach:** Die angewandte Forschung zur Mikro- und Feinbearbeitung mit Laserstrahlen besitzt vielfältiges Potenzial in den verschiedensten Branchen wie z. B. im Maschinen-, Fahrzeug und Gerätebau. Die Medizintechnik und Biotechnologie können von den mikrotechnischen Konzepten profitieren und neue Märkte erschließen. Die Umsetzung von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen in diesen Bereichen in vermarktete Produkte ist eine Aufgabe, der wir uns in den nächsten Jahren vermehrt stellen müssen. Es ist abzusehen, dass in den kommenden Jahren die Trends für Produkte des Maschinenbaus, der Bio-Medizintechnik, Photonik und Elektrotechnik durch Innovationen der Mikro- und Mikrosystemtechnik weiter verstärkt werden. Im Bereich der Lasertechnik ergibt sich daraus ein großes Potenzial für den Einsatz von UltrakurzpulsLasern und hochdynamischen Strahlablenksysteme für unterschiedlichste Anwendungen. Hervorzuheben sind hier innovative Möglichkeiten des Bearbeitens von faserverstärkten Kunststoffen und des Strukturierens von Dünnschichtsystemen wie flexiblen organischen Photovoltaikzellen und organischer Elektronik.

**Redaktion:** Die europäischen »Mikrotechnik«-Unternehmen fokussieren sich zunehmend auf den Bereich der Biomedizintechnik. Der Gesundheitssektor ist für viele Unternehmen Zielmarkt Nummer Eins. Welches Potenzial sehen Sie für Ihr Institut?

**Dr. Klotzbach:** Der Trend zur immer weiter voranschreitenden Miniaturisierung wird weiter anhalten, und die technischen Möglichkeiten zur Umsetzung der Ideen sind noch lange nicht ausgeschöpft. In vielen Bereichen der Biotechnologie ist es

»Die Glühbirne ist nicht durch eine stetige Verbesserung der Kerze entstanden«

unbekannt



#### GESCHÄFTSFELDLEITER

**DR. UDO KLOTZBACH**

☎ +49 351 83391-3252

✉ [udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de](mailto:udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de)

vorteilhaft, Prozesse zu miniaturisieren. Lösungen hierfür bietet u. a. die Mikrofluidik, die es ermöglicht, Flüssigkeitsmengen im Pikoliterbereich zu transportieren oder zu dosieren. Das Anwendungspotenzial solcher mikrofluidischer Reaktoren mit pneumatischen Pumpen, Sensoren und Aktoren ist enorm. Aufzählen möchte ich hier die klassischen passiven Lab-On-Chip-Systeme sowie die zellbasierten und die hochflexiblen Mehrlagen-Multi-Organ-Chip-Systeme. Hierfür haben wir eine Technologieplattform entwickelt, welche mit dem Design und der Simulation beginnt und in dem Fertigen des Chips endet. Darüber hinaus bieten wir für jedes Lab-On-Chip- oder Multi-Organ-Chip-System eine Automatisierungsplattform mit Ansteuerung und Auswertung an. Anwendung finden diese in der klassischen Analytik, der individualisierten Medizin, Pharma- und Kosmetikentwicklung.

**Redaktion:** Kleinste Mikrostrukturen, teilweise im Sub-Mikrometerbereich auf großen Flächen, ist dies nicht ein Widerspruch?

**Dr. Klotzbach:** Hätten Sie mich dies vor fünf Jahren gefragt, wäre die Antwort »Ja« gewesen. In den letzten Jahren wurden von unserer Arbeitsgruppe Oberflächenfunktionalisierung zu diesem Thema enorme Fortschritte erzielt. Die klassische Laserinterferenzstrukturierung ist seit vielen Jahren bekannt. Unsere Entwicklungen von optischen Systemen für die Laserinterferenzstrukturierung erlaubt es derzeit, bis zu 0,9 m<sup>2</sup> pro Minute zu bearbeiten. Perspektivisch wollen wir 3 m<sup>2</sup> pro Minute strukturieren. Bis dahin liegt noch ein arbeitsreicher Weg vor uns. Der Schwerpunkt für das Jahr 2016 wird die Überführung der systemtechnischen Laserinterferenzbearbeitungsköpfe aus dem Status der einzelnen Optikvarianten in ein industriell gefertigtes und am Markt erfolgreich etabliertes Produkt sein.



## KOMPETENZEN UND ANSPRECHPARTNER



*Dipl.-Ing. Volker Franke, Gruppenleiter Mikromaterialbearbeiten*

☎ +49 351 83391-3254 / ✉ [volker.franke@iws.fraunhofer.de](mailto:volker.franke@iws.fraunhofer.de)

» 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. In gleichem Maße wie die Strukturierung ist die Diagnostik entscheidend für das Verständnis von Prozessen und Prozessergebnissen. Deshalb hat sich die Arbeitsgruppe auf die optische Laserprozesscharakterisierung mittels Hochgeschwindigkeitskameratechnik sowie auf die schädigungsfreie Stoffanalyse mit Terahertzstrahlung spezialisiert. «



*Dr. Frank Sonntag, Gruppenleiter Mikro- und Biosystemtechnik*

☎ +49 351 83391-3259 / ✉ [frank.sonntag@iws.fraunhofer.de](mailto:frank.sonntag@iws.fraunhofer.de)

» Die Aktivitäten im Bereich der Mikro- und Biosystemtechnik umfassen Design, Simulation, Rapid Manufacturing und Optimierung von mikrofluidischen Strukturen, Mikroreaktoren und komplexen Lab-on-a-Chip-Systemen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten basieren auf Know-how zur Realisierung

integrierter Funktionselemente wie pneumatisch und elektrisch angetriebenen Mikropumpen oder optischen und elektrischen Sensoren. Die Systeme werden mit Automatisierungskonzepten und Peripheriesystemen für Labore der Bio-Medizintechnik, bestehend aus Hard- und Software, ergänzt. Zusätzliches Know-how aus den Bereichen biokompatible Aufbau- und Verbindungstechnik, additive Herstellung von 3D-Trägerstrukturen (Scaffold) und Mikroperfusionssysteme bildet die Basis für die Entwicklung maßgeschneiderter Plattformen für Diagnostik, tierversuchsfreie Substanztestung und Tissue Engineering. «



*Prof. Andrés-Fabián Lasagni, Gruppenleiter Oberflächenfunktionalisierung*  
☎ +49 351 83391-3007 / ✉ [andres-fabian.lasagni@iws.fraunhofer.de](mailto:andres-fabian.lasagni@iws.fraunhofer.de)



» Infolge von Evolutionsprozessen existieren heutzutage Strukturen auf Pflanzen- und Tieroberflächen, welche einzigartige Eigenschaften wie geringe Reibung oder antibakterielle Wirkungen bereitstellen. In Anlehnung an die biologisch gebildeten Strukturen können diese Merkmale auch auf technischen Oberflächen umgesetzt werden. Mit neuen Methoden zur Herstellung von zwei- und dreidimensionalen Mikro- und Nanostrukturen auf Polymeren, Metallen, Keramiken und Beschichtungen gelingt es, strukturierte Oberflächen zu erzeugen, welche über makroskopische Bereiche hinweg optimierte Merkmale aufweisen. Die technologische Veränderung der chemischen, optischen sowie mechanischen Eigenschaften eines Materials ermöglicht dadurch eine signifikante Weiterentwicklung von Produkten im Bereich der Biotechnologie, Photonik und Tribologie. «

#### BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2015

1. Weltrekord für Höchstgeschwindigkeit beim direkten Laser-Mikrostrukturieren	40
2. Vollständige sortenreine Aufbereitung von Photovoltaikmodulen	42
3. Bearbeiten Glasfaserverstärkter Kunststoffe mit gepulsten Lasersystemen	44
4. Universelle Lab-On-Chip-Plattform für gedruckte, komplexe 3D-Gewebe	46
5. BigData: Datenmanagement und Datenanalyse in Medizin und Produktion	48





2

# WELTREKORD FÜR HÖCHSTGESCHWINDIGKEIT BEIM DIREKTEN LASER-MIKROSTRUKTURIEREN

## DIE AUFGABE

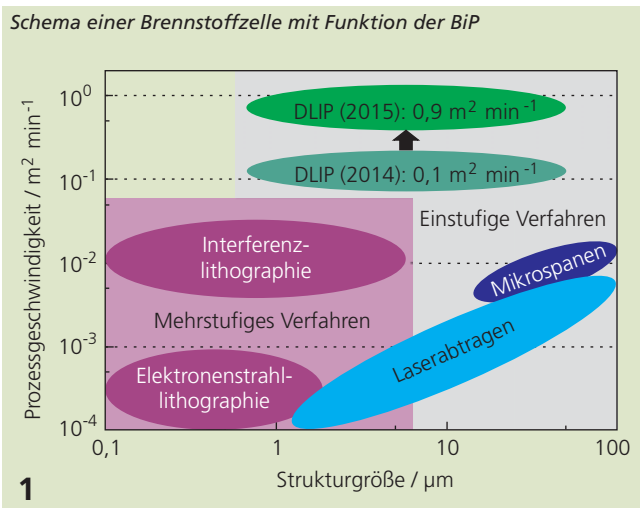
Definierte Mikro- und Submikrometerstrukturen bewirken innovative anwendungsspezifische mechanische, biologische oder optische Oberflächenfunktionen. Derartige Strukturen lassen sich heutzutage mit Hilfe unterschiedlichster Technologien herstellen, wobei oftmals die industrielle Anforderung nach effizienteren Abläufen durch schnellere Prozesszeiten maßgeblich ist (Abb. 1).

Das Generieren hochaufgelöster Strukturen auf großen Flächen mit hohen Prozessgeschwindigkeiten stellt eine technische Herausforderung dar, welche die Entwicklung moderner Lösungskonzepte erfordert. Eine Lösung des technologischen Konflikts zwischen erzielbarer Strukturauflösung und ausführbarer Bearbeitungsgeschwindigkeit ist das direkte Laserinterferenzstrukturieren (DLIP). Am Fraunhofer IWS Dresden ist der Transfer der DLIP-Technologie zu industriell nutzbaren High-Speed-Bearbeitungsoptiken und -anlagen ein wesentliches Entwicklungsziel.

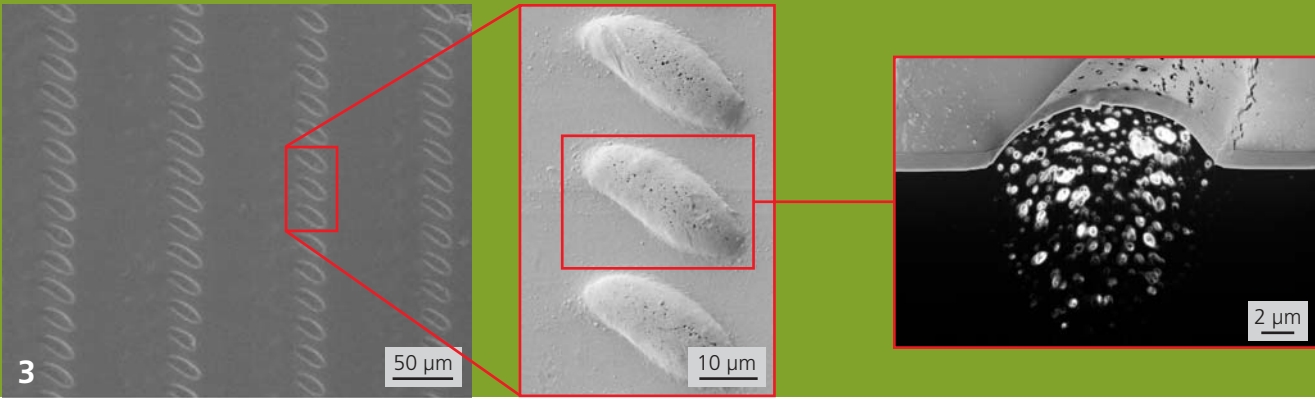
## UNSERE LÖSUNG

Bei direktem Laserinterferenzstrukturieren wird ein kohärenter Laserstrahl in zwei oder mehr Laserstrahlen geteilt. Anschließend werden diese Laserstrahlen auf der Werkstückoberfläche wieder überlagert. Dabei kommt es zu einer periodischen Modulation der Laserintensität, der sogenannten Interferenz, infolge derer Bauteiloberflächen definiert bearbeitet werden können. Die interferenz-bedingte Laserintensitätsverteilung existiert im gesamten Überschneidungsbereich der Laserstrahlen. Es können Flächen von bis zu mehreren Quadratentimetern mit einem einzigen Laserpuls strukturiert werden.

Das Fraunhofer IWS Dresden bietet anwendungsspezifische Bearbeitungsoptiken, Lösungsansätze zur Prozessentwicklung und -integration sowie komplette DLIP-Bearbeitungssysteme an. Es können in Abhängigkeit der gestellten Anforderungen unterschiedliche Laserquellen im IR, sichtbaren oder UV-Bereich implementiert und verschiedene Achssysteme zur Bauteilpositionierung verwendet werden.



Ein Schwerpunkt bei der industriellen Überführung des DLIP-Verfahrens ist das Erarbeiten optischer Konzepte zum Realisieren kompakter DLIP-Bearbeitungsköpfe (Abb. 2). Damit setzt das Fraunhofer IWS beim Bearbeiten verschiedenster Materialien wie Metalle, Keramiken oder Polymere in einem einzigen Prozessschritt neue Maßstäbe.



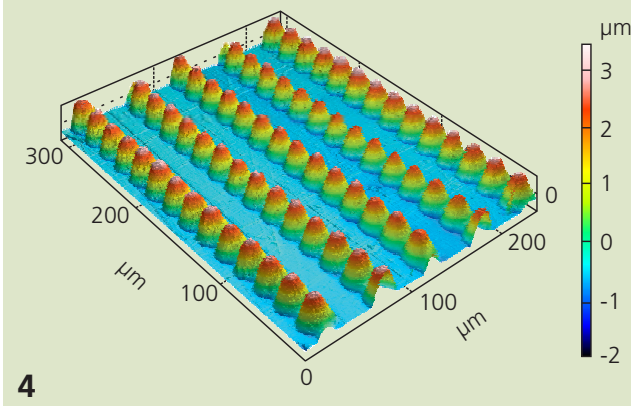
### ERGEBNISSE

Die am Fraunhofer IWS entwickelten Konzepte des direkten Laserinterferenzstrukturierens ermöglichen eine flexible und hochaufgelöste Strukturierung mit Strukturgrößen im Submikrometerbereich und hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten von annähernd  $1 \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ .

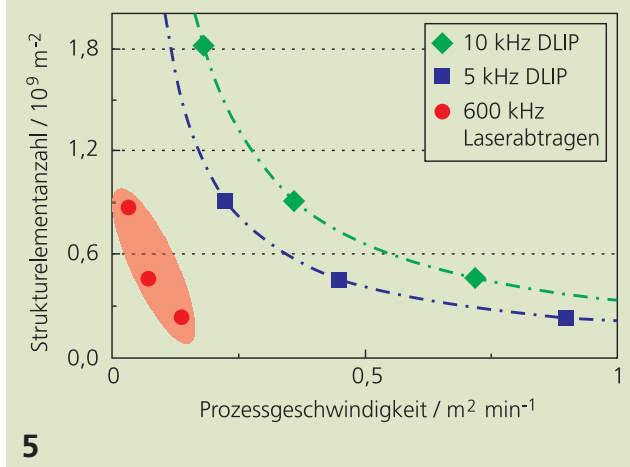
Mit einer auf Prozessgeschwindigkeit optimierten Konfiguration konnten  $0,9 \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  auf Polycarbonat und  $0,36 \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  auf Metallsubstrat erreicht werden. Dabei wurden Linien und Punktstrukturen mit Perioden im Bereich von  $5 \text{ µm}$  bis  $22 \text{ µm}$  realisiert.

Die erzielten Bearbeitungsgeschwindigkeiten bestätigen das Potenzial der DLIP-Technologie zur großflächigen und effizienten Herstellung hochaufgelöster periodischer Strukturen. Verglichen mit dem konventionellen Laserabtragen können mehr Strukturelemente mit höherer Effizienz hergestellt werden. Während beispielsweise beim Laserabtragen pro Laserpuls genau ein Strukturelement erzeugt wird, können mit Hilfe der direkten Laserinterferenzstrukturierung 100 bis 1.000.000 Strukturelementen mit einem einzigen Laserpuls generiert werden.

Konfokalmikroskopische Aufnahme von strukturiertem Polycarbonat-Substrat



Vergleich der Prozessgeschwindigkeiten von DLIP und konventionellem direktem Laserabtragen auf Polycarbonat



Durch den Einsatz leistungsstärkerer Lasersysteme und eine innovative Strahlführung und -formung ist perspektivisch eine Steigerung der Prozessgeschwindigkeit auf mehrere  $\text{m}^2 \text{ min}^{-1}$  erreichbar. Damit wird das direkte Laserinterferenzstrukturieren neue mechanische, biologische oder optische Anwendungen, z. B. in der Automobilindustrie, der Medizintechnik, der Lebensmittelindustrie, der Druck- und Prägeindustrie sowie im Bereich erneuerbare Energien erschließen und industriell attraktiv machen.

- 2 DLIP-Bearbeitungskopf
- 3 REM-Aufnahme einer mit DLIP hergestellten Struktur auf Polycarbonat

### KONTAKT

Dipl.-Ing. Valentin Lang  
 +49 351 83391-3249  
 valentin.lang@iws.fraunhofer.de





## VOLLSTÄNDIGE SORTENREINE AUFBEREITUNG VON PHOTOVOLTAIKMODULEN

### DIE AUFGABE

Angetrieben vom Wunsch nach emissionsarmer, umweltfreundlicher und dezentraler Energieerzeugung sind Photovoltaikmodule ein zentraler Baustein erneuerbarer Energiepolitik und –realität. Im selben Maß, wie die installierte Leistung exponentiell steigt, erhöht sich die Menge der zu entsorgenden Photovoltaikmodule. Nicht nur aus Umweltschutzgründen sind Aufbereitung und Wiederverwertung erforderlich, auch aus wirtschaftlicher Sicht ist sortenreines Recycling sinnvoll, denn vor allem das hochsaubere Frontglas ist ein wertvolles Produkt. Zudem können die in den Modulen enthaltenen seltenen Werkstoffe/Materialien wie Kupfer, Indium und Selen direkt wieder in den europäischen Markt gebracht werden, was Einfuhr- und Bereitstellungsrisiken minimiert.

Die bisherige Methode des mechanischen Schredderns und Einschmelzens der Module erlaubt zwar eine Nachnutzung, wegen Verunreinigungen und Schaumbildung jedoch nur in Form minderwertiger Folgeprodukte wie Flaschenglas. Alternative Verfahren auf chemischer oder thermischer Basis sind zeitlich oder im Hinblick auf erforderliche Energie unverträglich. Für eine vollständige und sortenreine Aufbereitung von wertvoller Frontglasabdeckung, enthaltenen Metallen, Kunststoffolie sowie Rückglas ist eine zerstörungsfreie Technologie zum Öffnen des Verbundglassystems erforderlich.

Das Entwickeln einer großflächentauglichen Lösung, die ein schädigungsarmes Öffnen des photovoltaischen Mehrlagenverbundes und damit ein 100 prozentiges Recycling zu hochwertigen Folgeprodukten ermöglicht, hat sich das Fraunhofer IWS Dresden zur Aufgabe gemacht.

### UNSERE LÖSUNG

Photovoltaikmodule liegen als flächiges Verbundglassystem vor. Zwischen hochwertigem Front- und stabilem Rückglas sind die stromerzeugenden metallisch-halbleitenden Schichten witterungsstabil gekapselt. Die dauerhafte Verbindung beider Glasscheiben wird durch eine vollflächige Verklebung mit Kunststoffolie gewährleistet. Der Verbund ist äußerst stabil und stellt beim Recycling eine große Herausforderung dar.

Um ein flächiges Verbundsystem so zu schwächen, daß sich Front- und Rückglas ohne größeren mechanischen Kraftaufwand und zerstörungsfrei voneinander lösen, ist das Einbringen einer definierten Schwächungszone erforderlich. Die entscheidende Idee dazu liegt in der punktgenauen Schwächung des Haftverbundes durch Laserbestrahlung. Um sowohl Prozesssicherheit als auch wirtschaftlich interessante Flächenleistungen zu erzielen, wurde ein laseroptisch-mechanisches Hybridverfahren entwickelt, das eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit gewährleistet und eine On-the-fly-Bearbeitung ermöglicht.

### ERGEBNISSE

Die laserbasierte Lösung erfordert sowohl eine ausreichend hohe Transparenz von Front- oder Rückglas (je nach Bearbeitungsstrategie) als auch eine ausreichend hohe Absorption im Inneren. Deshalb wurden im nahen Infrarot strahlende Lasersysteme ausgewählt. Deren Wellenlänge durchdringt das Glas ohne größere Verluste und wird an der metallischen oder halbleitenden Funktionsschicht vollständig absorbiert. Damit ist die grundsätzliche Bereitstellung der erforderlichen Energie an der richtigen Stelle im Mehrlagenverbund gegeben.



2

Um den Haftverbund gleichmäßig zu schwächen und eine lokale Überbeanspruchung des Materials zu vermeiden, besteht die weitaus größere Herausforderung in der Abstimmung von eingesetzter Lasersystemtechnik und Bearbeitungsregime. Um thermisch induzierte Risse im Flachglas und die damit unweigerliche Zerstörung auszuschließen, wird im gepulsten statt im kontinuierlichen Betrieb gearbeitet. Pulsdauern im Bereich einiger zehn Nanosekunden und ein angepasster Strahlvorschub mit Geschwindigkeiten bis zu  $3 \text{ m s}^{-1}$  minimieren die Wahrscheinlichkeit lokaler Überhitzungen. Durch das explosionsartige Verdampfen der metallisch-halbleitenden Funktionsschicht mit einem deutlich über den Brennfleck hinausreichenden Wirkdurchmesser wurde sogar bei nicht vollflächiger Bearbeitung eine ausreichend bemessene Schwächung für das nachfolgende Öffnen erzielt.

Mit geschickter Abstimmung lasersystemtechnischer Kenngrößen (wie z. B. Brennweite und Pulsfolgefrequenz) sowie bearbeitungsstrategischer Parameter (z. B. linienförmiger Vorschub des fokussierten Laserstrahls, Abstand der einzelnen Linien zueinander sowie Art und Stärke der Krafterbringung) wurden für typische Solarmodultypen Verfahrensvarianten erarbeitet, die eine laserinduzierte Schwächung mit paralleler mechanischer Öffnung ermöglichen.

Die konsequente Ausrichtung des Hybridverfahrens auf eine On-the-fly-Bearbeitung gewährleistet, dass die Photovoltaikmodule in einem kontinuierlichen Durchlaufverfahren zerstörungsfrei laserbehandelt und parallel mechanisch in Front- und Rückglas getrennt werden können. Die metallisch-halbleitenden Schichten sowie die Kunststoffolie sind nun für die anschließenden chemischen Verfahrensschritte zugänglich. Technologisch herausfordernd ist die Behandlung von Sonderbereichen wie den Randzonen, in denen die photovoltaische aktive Schicht und damit ein effektiver Laserstrahlabsorber fehlen. Hier wurden Lösungen sowohl zum Bestrahlen mit angepassten Wellenlängen als auch alternative mechanische Bearbeitungsvarianten entwickelt.

Der für ein sortenreines und wirtschaftlich sinnvolles Recycling großer Mengen an Photovoltaikschrott erforderliche erste und entscheidende Schritt – das schadungsfreie Öffnen des Verbundglassystems – wurde mit einem laserbasierten Hybridverfahren erfolgreich realisiert. Es wurden bereits Flächenleistungen bis  $0,75 \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  erreicht; das Verfahren ist aufskalierbar.

Durch das laserbasierte Verfahren entstehen hochwertige Recycling-Zwischenprodukte, die als Ausgangsmaterialien für Nachfolgeprodukte mit hoher Wertschöpfung bereitstehen. Damit wird auch ein signifikanter Beitrag zur lokalen Bereitstellung seltener Rohstoffe geleistet. Das Verfahren bietet sich grundsätzlich auch für das Recycling weiterer Formen flächiger Verbundsysteme an.

Die Entwicklungen wurden vom Sächsischen Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit durch den Projektträger Sächsische Aufbaubank SAB gefördert (FKZ: 100192199/2936).

- 1 *Solarwafer-Schrott (Produktionsabfall)*
- 2 *Öffnung von Photovoltaikmodulen durch laserinduzierte Schwächung*

## KONTAKT

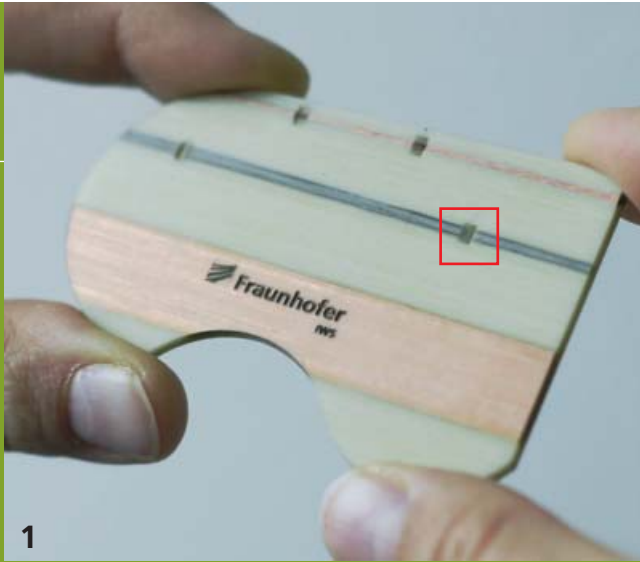
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Kuntze

+49 351 83391-3227

thomas.kuntze@iws.fraunhofer.de







# BEARBEITEN GLASFASERVERSTÄRKTER KUNSTSTOFFE MIT GEPULSTEN LASERSYSTEMEN

## DIE AUFGABE

Faserverstärkte Kunststoffe erreichen durch die Kombination von hochbelastbaren Fasern mit leichtem polymerem Matrixmaterial sehr hohe spezifische Festigkeiten. Gleichzeitig eröffnet das thermoplastische Material den Einsatz etablierter Urform- und Umformprozesse aus der Polymerverarbeitung. Beispiele dafür sind das Thermoformen von endlosfaserverstärkten Organoblechen und die Ausbildung zusätzlicher Strukturen mittels Spritzguss. Über die Bauteillebensdauer ist eine stabile Verbindung der ausgeformten Strukturen mit den lasttragenden Fasern notwendig.

Eine spezifische Eigenheit endlosfaserverstärkter Kunststoffe ist der Lagenaufbau, der spezifische Materialdicken und -belastungen sowie eine Integration von Funktionselementen wie Aktoren und Sensoren ermöglicht. Diese werden zwischen Einzellagen positioniert und anschließend durch den Konsolidierungsprozess des Gesamtwerkstückes fixiert. Im Anschluss sind diese Inserts zur elektrischen Kontaktierung wieder lokal frei zu legen.

Beide vorgestellte Aufgabenstellungen bedürfen eines Werkzeuges, welches einen definierten und lokalisierten Abtrag des Werkstoffes ermöglicht. Das Fraunhofer IWS Dresden hat dafür unterschiedliche Lasersysteme erprobt und hinsichtlich ihrer Eignung zur selektiven und homogenen Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen qualifiziert.

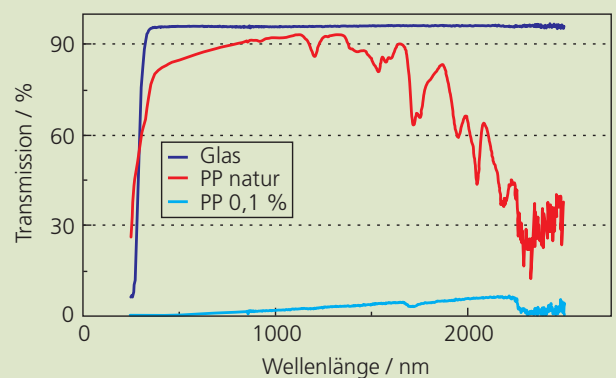
## UNSERE LÖSUNG

Das Fraunhofer Institut für Werkstoff und Strahltechnik verfügt über ein breites Spektrum gepulster Laserquellen mit unterschiedlicher Wellenlänge und Pulsdauer. Bei der Auswahl

des Lasersystems ist zu beachten, welche Art von Abtrag gewünscht ist. Unter dem selektiven Abtrag wird das Entfernen der polymeren Matrix bei minimaler mechanischer Beeinflussung der Verstärkungsfasern verstanden. Der homogene Materialabtrag ist gekennzeichnet durch den zeitgleichen Abtrag von polymerer Matrix und Verstärkungsfaser.

Ausgangspunkt der Arbeiten war die Charakterisierung der optischen Eigenschaften des Verbundmaterials und der Einzelkomponenten. Dafür wurden mittels optischer Spektroskopie die Transmissionsspektren bestimmt. Im Allgemeinen weisen polymere Matrix und Verstärkungsfaser ähnliche Transmissionseigenschaften auf. Durch die gezielte Einlagerung von Additiven in die Matrix wird eine definierte Absorption und deutliche Verringerung der Transmission der Matrix erreicht, was beim selektiven Abtrag zur Abgrenzung von Matrix und Verstärkungsfaser genutzt werden kann.

Prinzipdarstellung der Transmission-Spektren von Verstärkungsfaser, polymerer Matrix und mit Additiv versetzter Matrix im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm



2



**ERGEBNISSE**

Im Bereich des UV- und mittleren Infrarotspektrums zeigen sowohl die Matrix als auch die Verstärkungsfasern eine geringe Transmission. Für das Laserbearbeiten mit den Wellenlängen 355 nm (Frequenzverdreifachter Nd:YAG-Laser) und 10600 nm (CO<sub>2</sub>-Laser) hat das zur Folge, dass nur in einem sehr kleinen Prozessfeld die Möglichkeit zum selektiven Abtrag besteht. Ein homogener Verbundabtrag ist mit den genannten Lasersystemen dagegen sehr gut realisierbar. Im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich (VIS-NIR) zeichnen sich die naturfarbene Matrix und die Glasfasern dagegen durch eine hohe Transmission aus. Sowohl ein selektiver als auch ein homogener Abtrag ist mit Lasern in diesem Wellenlängenbereich nur schwer möglich.

Allerdings wird durch eine gezielte Pigmentierung der Matrix ein selektiver Abtrag mit Kurzpulslasern im VIS-NIR Bereich möglich. Die Untersuchungen zeigen, dass bei dieser Material-Laserkombination ein breites Prozessfenster zum Entfernen der polymeren Matrix mit minimaler Beeinflussung der Verstärkungsfasern vorhanden ist (Abb. 4). Bei hohen Leistungen kann die Schlichte der Fasern komplett entfernt werden. Die thermische Beeinflussung des Verbundmaterials ist von der Laserpulsdauer abhängig. Der Einsatz von Ultrakurzpulslasersystemen (UKP) mit Pulsdauern im Bereich kleiner 10 ps

reduziert die wärmebeeinflusste Zone auf ein Minimum. Damit einher geht eine geringere Beeinflussung der mechanischen Festigkeit in angrenzenden Bereichen.

Zugleich kann der physikalische Effekt der Multiphotonenabsorption dazu genutzt werden, pigmentierte und naturfarbene Polymere gleichermaßen mit Laserwellenlängen im VIS und NIR Spektralbereich zu bearbeiten. Mit UKP-Lasersystemen ist sowohl die selektive Matrixentfernung als auch der homogene Verbundabtrag durch Anpassen der Prozessparameter realisierbar. Abbildung 1 und 3 zeigen lasergenerierte elektrische Kontaktpunkte an funktionalisierten Fasern.

Die hier vorgestellten Arbeiten entstanden innerhalb eines von der AiF geförderten Projektes (FKZ: VP2097548TA3). Das erarbeitete Know-how zum definierten Bearbeiten von Faserverbundmaterialien wird gemeinsam mit Kooperationspartnern an konkreten Anwendungen weiterentwickelt. Der Prozess des selektiven Matrixabtrags wird am Beispiel ausgewählter Fahrzeugbaukomponenten dahingehend qualifiziert, die Anhaftung von Spritzgussmaterial an endlosfaserverstärkte Organobleche zu verbessern.

Erscheinungsbild von teilweise und komplett freigelegten Endlosfasern in PP Matrix nach der Laserbearbeitung



- 1 *Mittels UKP-Laser bearbeitetes Demonstratorbauteil aus glasfaserverstärktem Polypropylen mit Cu-Inserts und funktionalisierten Fasern. Entstanden in Zusammenarbeit mit dem IPF Dresden.*
- 3 *Lasergenerierte Kontaktstelle*

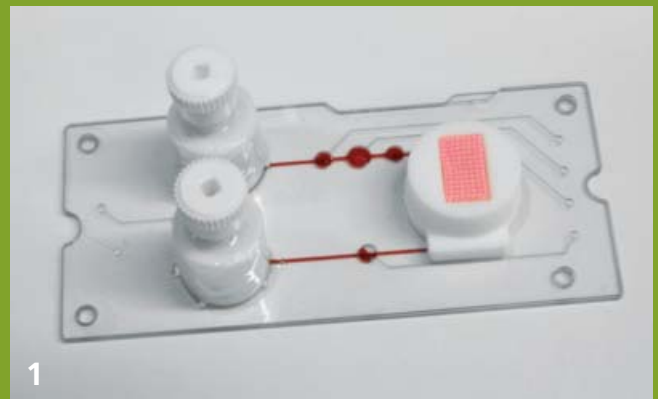
**KONTAKT**

Dipl.-Ing. Volker Franke

+49 351 83391-3254

volker.franke@iws.fraunhofer.de





# UNIVERSELLE LAB-ON-CHIP-PLATTFORM FÜR GEDRUCKTE, KOMPLEXE 3D-GEWEBE

## DIE AUFGABE

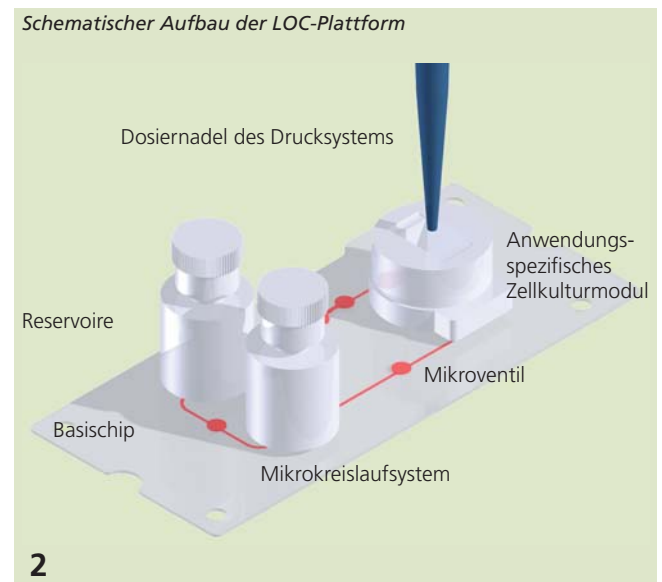
Das Herstellen und Kultivieren dreidimensionaler, organtypischer Gewebe ist für die pharmazeutische und kosmetische Industrie von großer Bedeutung, denn die dreidimensionalen Gewebe können organtypische Funktionen bedeutend besser abbilden als klassische, zweidimensionale Zellkulturmodelle. Die praktische Umsetzung stellt jedoch eine interdisziplinäre Herausforderung dar. Komplexe Gewebe benötigen eine kontinuierliche Versorgung mit Nährstoffen und sind deshalb nur in kontinuierlich perfundierten Lab-on-Chip-Systemen (LOC) herstellbar.

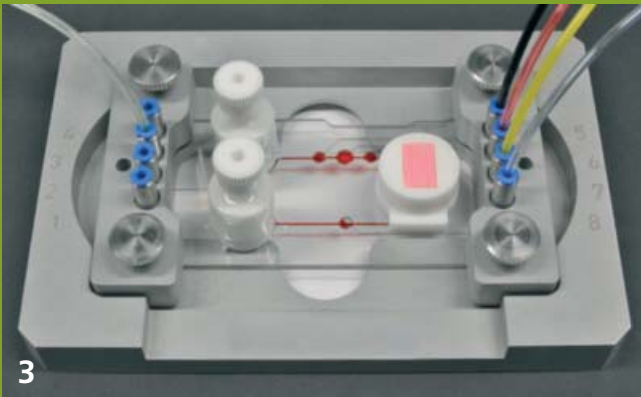
Additive Fertigungsverfahren eröffnen anwendungsübergreifend faszinierende Möglichkeiten, in der Fertigung von Mikrosystemen ebenso wie beim Generieren komplexer, organtypischer Gewebe. Das 3D-Drucken lebender Zellen, auch Biofabrikation oder 3D-Bioprinting genannt, ermöglicht das Herstellen komplexer Gewebe, die sich aus unterschiedlichen Zellen und Materialien zusammensetzen und integrierte Versorgungskanäle enthalten. Analog zum menschlichen Körper ist jedoch eine permanente Durchblutung der generierten Gewebe teilweise bereits im Herstellungsprozess erforderlich, denn die Zellen im Inneren können nicht allein durch Diffusion mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt werden. Ein aktiver Stofftransport durch Konvektion ist notwendig, anderenfalls sterben die Zellen im Inneren ab. Aus diesem Grund muss unter sterilen Bedingungen Blut oder eine geeignete Nährlösung durch die integrierten Versorgungskanäle des Gewebes gefördert werden.

## UNSERE LÖSUNG

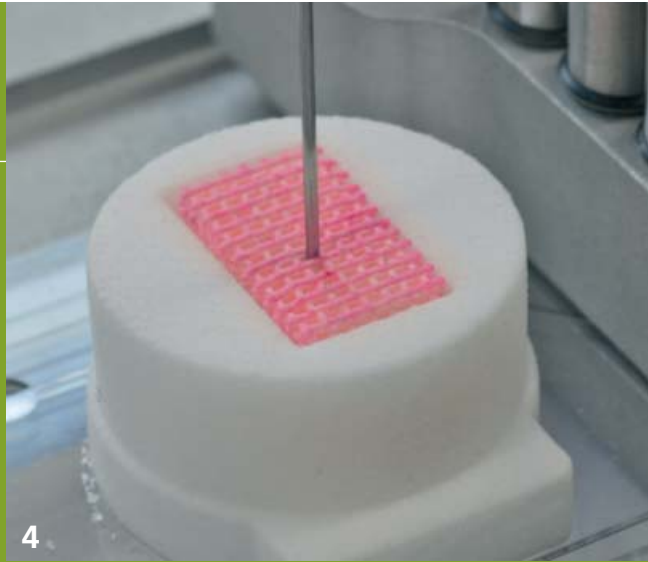
Für die kontinuierliche Versorgung komplexer, mittels 3D-Drucken generierter Gewebe unter sterilen Bedingungen wurde am Fraunhofer IWS Dresden eine universelle und modulare LOC-Plattform entwickelt und etabliert.

Diese besteht aus einem Basischip der mit anwendungsspezifischen Zellkulturmodulen kombiniert werden kann (Abb. 1 und 2). Für die Basischips werden Lasermikrostrukturierte Polymer- und Elastomerfolien mit applikationsspezifischen Technologien zu dreidimensionalen Mikrofluidiksystemen zusammengeführt. Die Verwendung hochtransparenter Polymere erlaubt einen optischen Zugang für die nicht-invasive Online-Überwachung. Integrierte flexible Membranen können durch pneumatisches Ansteuern definiert ausgelenkt werden. Dies gestattet das Integrieren von Ventilen und peristaltischen Mikropumpen zum Fördern und Regulieren von Volumenströmen.





3



4

## ERGEBNISSE

Mittels 3D-Druck generierte, komplexe Polymerbauteile bilden die Basis der anwendungsspezifischen Zellkulturmodule. An Unter- und Oberseite befinden sich definierte Schnittstellen zum mechanischen und fluidischen Koppeln an den Basischip sowie zum Handhaben der Gewebe (Abb. 3).

Komplexe, dreidimensionale Gewebe können direkt in die Zellkulturmodule gedruckt werden (Abb. 4). Der Druckvorgang gewährleistet an definierten Stellen eine fluidisch dichte Verbindung zwischen Gewebe und Zellkulturmodul. So wird sichergestellt, dass Blut oder Nährlösung durch die im Gewebe integrierten Versorgungskanäle fließen.

Die vielfältigen Möglichkeiten der LOC-Plattform erfordern ein komplexes Embedded System auf Linux-Basis, das flexibel programmiert werden kann. Dieses stellt 24 unabhängig voneinander schaltbare, pneumatische Ausgänge bereit und ermöglicht so die Ansteuerung von bis zu acht Pumpen. Ergänzend stehen zahlreiche Schnittstellen für die Kopplung mit Peripheriegeräten (Sensoren, Aktoren), Datenspeichern und Netzwerken zur Verfügung. Der Netzwerk-Stack des Linux-Systems ermöglicht eine Fernüberwachung sowie die Kommunikation mit Labor-Information-Management- und Labor-Automationssystemen. Die Interaktion mit dem Nutzer erfolgt über ein integriertes 7-Zoll-Touchscreen oder entsprechende PC-Software.

Mit verschiedenen Fertigungssystemen wurden komplexe, dreidimensionale Gewebe inklusive lebender Zellen direkt in Zellkulturmodule der LOC-Plattform gedruckt. Beim Druckvorgang erfolgte an definierten Stellen die Ausbildung einer fluidisch dichten Verbindung zwischen Gewebe und Zellkulturmodul. Darüber konnte sichergestellt werden, dass die Nährlösung durch die im Gewebe integrierten Versorgungskanäle fließt. Die Gewebe wurden über einen Zeitraum von 28 Tagen kontinuierlich durchströmt. Im Inneren waren die Zellen über den kompletten Zeitraum vital, da ausreichend mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt.

Mit der universellen und modularen LOC-Plattform ist es möglich komplexe, mittels 3D-Drucken hergestellte Gewebe unter sterilen Bedingungen über einen Zeitraum von mehreren Wochen kontinuierlich zu versorgen.

- 1 *LOC-System*
- 3 *LOC-System in Aufnahme*
- 4 *Drucken von Geweben in LOC-Plattform*

## KONTAKT

Dr. Frank Sonntag

+49 351 83391-3259

frank.sonntag@iws.fraunhofer.de







# BIGDATA: DATENMANAGEMENT UND DATENANALYSE IN MEDIZIN UND PRODUKTION

## DIE AUFGABE

Datenmanagement und der verantwortungsvolle Umgang mit Versorgungsdaten sind wichtige Themen unserer Zeit, nicht nur im Bereich Medizin und Life Sciences. Die Verwaltung medizinischer Daten, beispielsweise Befundergebnisse, kostet Forscher bis zu einem Viertel ihrer Arbeitszeit. Zudem erzeugen die verschiedenen Diagnostik- und Laborgeräte unterschiedliche Datentypen, dabei geht die Übersichtlichkeit schnell verloren.

In großen, komplexen medizinischen Datensätzen sind wichtige Informationen enthalten, die nicht mit herkömmlichen technischen und analytischen Verfahren extrahiert werden können. Der Begriff »BigData« beschreibt Datenstrukturen, die in ihrer Größe, Diversität und Komplexität neue Datenverarbeitungs- und Analysetechniken erfordern, um daraus verborgenes Wissen zu gewinnen. Solche BigData-Lösungen werden am Fraunhofer IWS Dresden im Laborbetrieb erprobt.

In der medizinischen Forschung und Versorgungsforschung stellt die Nutzung von medizinischen Routinedaten eine wertvolle Ressource dar, um Versorgungs- und Risikomuster besser zu verstehen und darauf aufbauend individualisierte Präventions- und Therapiestrategien zu entwickeln. Große Datenmengen bedürfen neuer technischer Möglichkeiten der Speicherung, Prozessierung und Analyse, um die medizinische Forschung voranzutreiben. BigData-Verfahren bieten speziell für die Versorgungsforschung und personalisierte Medizin neue Möglichkeiten und können wichtige, bisher unbekannte Informationen zu Erkrankungsrisiken, Verläufen, therapeutischem Ansprechen und zur Arzneimittelsicherheit liefern.

## UNSERE LÖSUNG

Im Rahmen von verschiedenen öffentlich geförderten Projekten wendet das Fraunhofer IWS Dresden erstmals BigData-Analyseverfahren zur Verarbeitung und wissenschaftlichen Analyse von Routinedaten der Krankenhäuser und gesetzlichen Krankenversicherung an. Zur Identifikation von Krankheitsprädiktoren in medizinischen Routinedaten kommen multiparametrische Methoden des maschinellen Lernens bereits zur Anwendung. Nun werden erstmals bioinformatische BigData-Methoden zur Mustererkennung eingesetzt.

In fachlicher Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Carl Gustav Carus Dresden und dem Verband der Universitätsklinik Deutschlands e. V. werden dem Anwender BigData-Konzepte erläutert, implementiert sowie anhand vieler praktischer Beispiele gezeigt.

Das Kompetenzprofil der BigData-Gruppe am Fraunhofer IWS umfasst folgende Facetten:

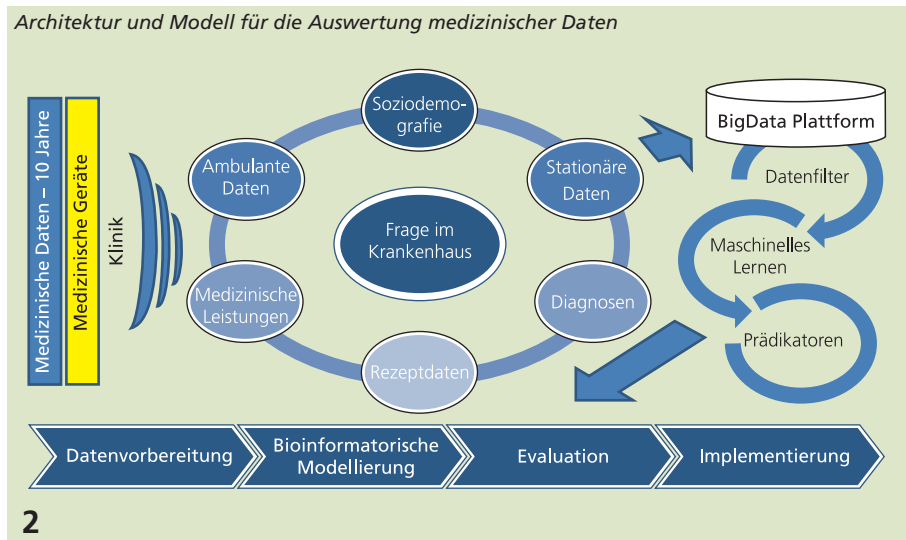
- Forschung an der BigData-Plattform und Anpassung an Anwendungen,
- Prozessoptimierung für Verwaltung und Speicherung in Datenbanken,
- Visual-Analytics
- multiparametrische und statistische Datenauswertung, Visualisierung, Management,
- automatische Echtzeit-Datenbearbeitung und -verwaltung
- Entwicklung von Bilddatenbanken und Technologien,
- Bildbearbeitung und 3D-Visualisierung,
- Entwicklung biomedizinischer Bildformate,
- Softwareentwicklung für Planung, Modellierung, Architektur, Analyse,

- Entwicklung von Technologie- und Datenstandards für die Verwaltung von digitalen Bildern und Metadaten,
- professionelle Softwareentwicklung und Beratung im Hinblick auf objektorientierte Programmiersprachen, professionelle Projektverwaltung sowie die Modellierung von IT- und Softwarearchitektur.

**ERGEBNISSE**

Der BigData-Einsatz in medizinischen Studien dient als Quelle für die Generierung neuer Hypothesen zu Erkrankungsrisiken und -verläufen bei Zivilisationskrankheit sowie für neue Hypothesen zu Ursachen, Zusammenhängen und Folgen der Krankheiten. Daraus resultiert die Entwicklung individualisierter Präventions- und Therapiemaßnahmen. Darüber hinaus kann BigData zur Ermittlung von Prädiktoren für die Wirksamkeit und Sicherheit von medikamentösen Therapien und Versorgungspfaden für Patienten eingesetzt und somit für eine bessere Versorgung genutzt werden.

Der neue Ansatz der Nutzung von bioinformatischen Methoden der Mustererkennung in medizinischen Routinedaten ist auf zahlreiche andere Krankheitsbilder und Fragestellungen der Versorgungsforschung übertragbar. Zur Erkennung neuer, bisher unbekannter Zusammenhänge zwischen den Zielvariablen der untersuchten Einflussgrößen (Expositionsfaktoren) werden anhand nichtparametrischer Verfahren und mittels



Methoden des maschinellen Lernens sehr viele unterschiedliche Ausgangsdaten zu Gruppen gebündelt und auf Ähnlichkeiten untersucht. Dieser Ansatz ist auf zahlreiche Beispiele in der industriellen Fertigung und Analytik übertragbar.

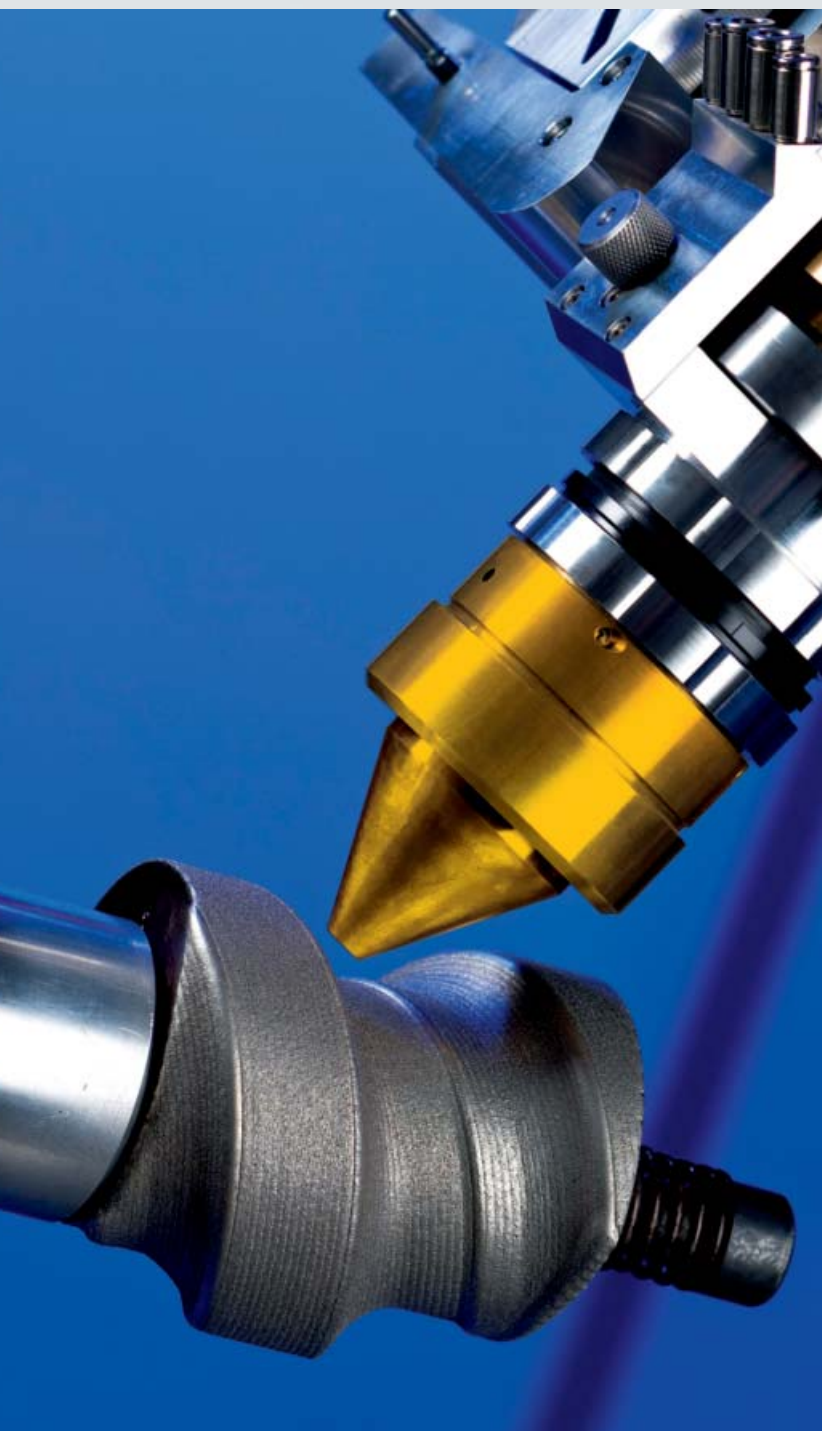
1 Cluster Server für BigData Plattform

**KONTAKT**

Prof. Karol Kozak  
 +49 351 83391-3717  
 karol.kozak@iws.fraunhofer.de



## THERMISCHE OBERFLÄCHENTECHNIK



**Redaktion:** Herr Prof. Leyens, das drahtbasierte Laserauftragschweißen hat in jüngster Vergangenheit erheblichen Zuspruch aus dem Bereich industrieller Anwender gefunden. Bietet es eine Alternative zum Laser-Pulver-Auftragschweißen?

**Prof. Leyens:** In der Tat stößt die vom IWS entwickelte Systemtechnik zum Laser-Drahtauftragschweißen auf großes Interesse. Die Vorteile des Verfahrens liegen dabei auf der Hand: 100 Prozent des eingesetzten Drahtwerkstoffs werden aufgeschmolzen und können in Form einer Schicht oder eines 3D-Auftrags genutzt werden. Damit ist der Prozess »sauber« und wirtschaftlich zugleich. Durch die vom IWS entwickelte Prozessüberwachung ist es außerdem möglich, den Prozess zu kontrollieren und dabei gleichbleibend qualitativ hochwertige Auftragschweißungen durchzuführen. Ein derart automatisierbarer Prozess ist für viele Branchen interessant. Das Laser-Drahtauftragschweißen ist somit eine hervorragende Ergänzung zu den pulverbasierten Verfahren, setzt allerdings voraus, dass die verwendeten Werkstoffe in Drahtform verarbeitbar sind, so dass die Werkstoffpalette etwas kleiner ist.

**Redaktion:** Was ist das Besondere am COAXwire Drahtkopf des IWS?

**Prof. Leyens:** Bei der Entwicklung des Drahtkopfes haben wir uns sehr stark von den Kundenwünschen nach einem robusten, praxistauglichen Werkzeug leiten lassen. Der Drahtkopf ist nach dem coaxialen Prinzip gebaut, d. h., der Laserstrahl wird in einem Strahlteilersystem in drei Teilstrahlen aufgespalten, diese schmelzen coaxial den Draht ab. Mit Laserleistungen von bis zu 6 kW lassen sich hiermit auch hochschmelzende Metalle verarbeiten. Der Kopf selbst ist modular aufgebaut, kompakt und mit 13 kg problemlos auf robotergestützten Plattformen oder CNC-Maschinen verwendbar.



»Es ist nicht genug, dass man etwas erfindet, man muss auch merken, dass man etwas erfunden hat.«

Karl Steinbuch



#### GESCHÄFTSFELDLLEITER

**PROF. CHRISTOPH LEYENS**

☎ +49 351 83391-3242

✉ christoph.leyens@iws.fraunhofer.de

**Redaktion:** Das Thermische Spritzen gehört ebenfalls zu den Kompetenzfeldern des IWS. Welche Fortschritte gibt es hier?

**Prof. Leyens:** In unserem Spezialgebiet, dem Spritzen mit Suspensionen, haben wir mit Hilfe der im IWS entwickelten Systemtechnik Beschichtungslösungen für unterschiedliche Anwendungsbereiche erarbeitet. Sie umfassen den Verschleißschutz, den Oxidations- und Korrosionsschutz bis hin zu sensorischen und thermoelektrischen Funktionalitäten. Dabei kommt uns besonders das Wissen um die Wirkzusammenhänge von Prozess und Werkstoffeigenschaften zugute, mit dem es uns möglich ist, auf den Anwendungsfall maßgeschneiderte Lösungen zu erarbeiten.

**Redaktion:** Ist die Wechselwirkung zwischen Prozess und Werkstoffverhalten nicht auch beim Laserhärten wichtig?

**Prof. Leyens:** Richtig, denn beim Laserhärten verändern wir durch lokalen Wärmeeintrag das Werkstoffgefüge und damit auch seine Eigenschaften, in der Regel mit dem Ziel, die Härte des Werkstoffs zu verbessern. Allerdings kann ein Zuviel an Härte auch nachteilig sein, indem z. B. Risse auftreten. Unsere langjährige Erfahrung hilft dabei, die richtige technologische Lösung für unsere Kunden zu finden. Diese hängt vom verwendeten Werkstoff, der Geometrie des Bauteils und natürlich von den Einsatzbedingungen ab. Daher führen wir mit unseren Kunden intensive Gespräche und technische Beratungen durch, um ihre Anforderungen zu erfassen und bestmögliche Prozessergebnisse zu erzielen. Die Kunden schätzen dabei sehr, dass wir Ihnen Lösungen aus einer Hand anbieten können, die die prozesstechnischen und systemtechnischen Herausforderungen adressieren und dabei auch die werkstofftechnische Charakterisierung und gegebenenfalls die Prüfung des Bauteils umfassen.





## KOMPETENZEN UND ANSPRECHPARTNER



*Dr. Steffen Bonß, Abteilungsleiter Wärmebehandeln und Plattieren*

☎ +49 351 83391-3201 / ✉ [steffen.bonss@iws.fraunhofer.de](mailto:steffen.bonss@iws.fraunhofer.de)

» Für Bauteilgeometrien, Verschleißfälle und Werkstoffe, bei denen konventionelle Härtetechnologien versagen, bieten Laserrandschichttechnologien wie z. B. das Laserstrahlhärten, das Laserstrahlumschmelzen 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. «



*Dipl.-Ing. Jan Hannweber, Gruppenleiter Wärmebehandlungssysteme*

☎ +49 351 83391-3360 / ✉ [jan.hannweber@iws.fraunhofer.de](mailto:jan.hannweber@iws.fraunhofer.de)

» Eine erfolgreiche Überführung innovativer Technologien in eine industrielle Anwendung wird wesentlich von der technologischen Reife verwendeter Einzelkomponenten bestimmt. Die Kernkompetenz der Arbeitsgruppe ist die Neu- und Weiterentwicklung von Systemtechnik für die Lasermaterialbearbeitung, insbesondere für das Laserstrahlhärten. Bei der Konzipierung und Entwicklung von einzelnen Geräten, bis hin zu komplexen Maschinen und Anlagen, werden bei der Bearbeitung der Projekte konsequent geltende Europäische Richtlinien beachtet. Das Leitprojekt »Industrie 4.0« ist ein wichtiger Richtungsgeber. «



*Dipl.-Phys. Marko Seifert, Gruppenleiter Mechanisch-Thermische Verfahren*

☎ +49 351 83391-3204 / ✉ [marko.seifert@iws.fraunhofer.de](mailto:marko.seifert@iws.fraunhofer.de)

» Kernkompetenz der Arbeitsgruppe ist die Verfahrensentwicklung und Erarbeitung kundenspezifischer Bearbeitungskonzepte im Bereich der laserunterstützten mechanisch-thermischen Materialbearbeitung. Hauptarbeitsgebiete sind das Laserhärten von Stahlwerkstoffen sowie das Laserinduktionswalzplattieren zum Fügen komplexer Metall-Mischverbindungen. Weiterhin werden spezielle technische Lösungen zum Löten, Umschmelzen und Gaslegieren angeboten. Als Werkzeuge stehen Hochleistungslaser im Multi-Kilowatt-Bereich bis 9 kW zur Verfügung. Ein Schwerpunkt bei allen Entwicklungen ist die Realisierung einer präzisen Temperaturregelung als Basis für reproduzierbare industrielle Prozesse. «



*Dr. Filofteia-Laura Toma, Gruppenleiterin Thermisches Spritzen*

☎ +49 351 83391-3191 / ✉ [filofteia-laura.toma@iws.fraunhofer.de](mailto:filofteia-laura.toma@iws.fraunhofer.de)



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

*Prof. Steffen Nowotny, Abteilungsleiter Auftragschweißen*

☎ +49 351 83391-3241 / ✉ [steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de](mailto:steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de)



» Das Kompetenzfeld umfasst die Anwendung des Laser-Auftragschweißens mit Draht und Pulver für das Beschichten sowie Funktionalisieren von Oberflächen. Einen wichtigen Schwerpunkt bildet die anwenderspezifische Entwicklung von Bearbeitungsköpfen, Bauteiltechnologien und CAM-Software. Für die produktionstechnische Nutzung stehen dem Anwender sowohl langjährige Expertise auf den Gebieten der Prozessentwicklung, der Systemtechnik und der Vor-Ort-Betreuung als auch umfangreiche Beratungs-, Fortbildungs- und Trainingsangebote zur Verfügung. «

#### BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2015

1. Industrielle Lösungen für das großflächige Laser-Auftragschweißen	54
2. Miniatur-Laserbearbeitungsoptik für hartmetallische Innenbeschichtungen	56
3. Effiziente Hartmetallbeschichtungen für Hochtemperaturanwendungen	58
4. Verbesserung der Kavitationsverschleißbeständigkeit von Turbinenwerkstoffen	60



# INDUSTRIELLE LÖSUNGEN FÜR DAS GROSS-FLÄCHIGE LASER-AUFTRAGSCHWEISSEN

## DIE AUFGABE

Auftragschweißen von Mikro bis Makro mit ein und demselben Werkzeug ist ein Markenzeichen der Lasertechnik, das keinem anderen Schweißverfahren in vergleichbarem Maße gegeben ist. Mit verschiedenen in der Praxis angewendeten laserbasierten Verfahrensvarianten werden Raupenbreiten zwischen 30 µm und mehr als 30 mm erzeugt. Die Dimensionen überstreichen somit die enorme Spanne von 4 Größenordnungen, woraus branchenübergreifend ein bemerkenswert großes Anwendungsspektrum resultiert.

Während beim Mikro-Laser-Auftragschweißen vor allem die geometrischen Ansprüche hinsichtlich Präzision und Reproduzierbarkeit im Vordergrund stehen, entscheiden im Makro-Bereich die Auslegung der optischen Komponenten und Bearbeitungsköpfe sowie die Standfestigkeit der Systemtechnik über den Erfolg der großflächigen Oberflächenbeschichtung. Durch höchste Laserleistungen und Wärmestrahlung aus den großen Schmelzbädern unterliegen die Pulverdüsen einer enormen thermischen Belastung. Aber auch Einflüsse auf die Schmelzmetallurgie wie Aufheiz- und Abkühlraten sowie die Dynamik der laserinduzierten Schmelzbäder mit großer Breite und vergleichsweise geringer Höhe stellen anspruchsvolle Fragestellungen dar.

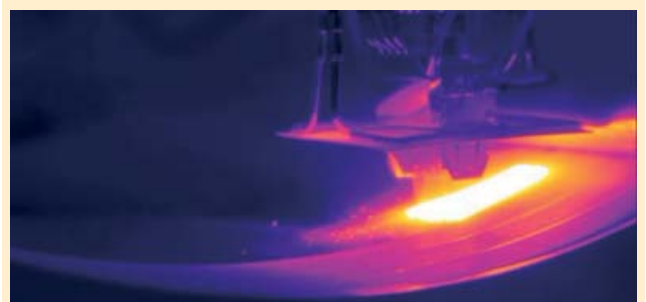
Die wissenschaftlich-technische Herausforderung besteht deshalb in der Entwicklung von modernen Laser-Bearbeitungsköpfen, die ein homogenes, rechteck- oder linienförmiges Pulverstrahlprofil und eine langzeitstabile Pulverzufuhr unter enormer thermischer Belastung gewährleisten. Gleichzeitig sind die prozess- und werkstoffseitigen sowie wirtschaftlichen Erfordernisse von Großflächenbeschichtungen umzusetzen.

## UNSERE LÖSUNG

Die systemtechnische Lösung des Fraunhofer IWS Dresden besteht in einer Erweiterung und Qualifizierung des modularen Systems von Bearbeitungsköpfen der Serie COAXn. Für die Weiterentwicklung wurde besonderes Augenmerk auf das Konzept der Breitstrahldüse mit rechteckigem Pulverstrahlquerschnitt gelegt. Im Unterschied zum bisherigen Stand der Technik zeichnet sich der neue, patentierte Breitstrahl-Bearbeitungskopf durch ein überarbeitetes Pulverzuführungskonzept aus, das speziell den Erfordernissen höchster Laserleistungen und hoher Pulverförderraten angepasst ist (siehe Abb. 1).

Die Pulverzuführung erfolgt über speziell geformte austauschbare Kanalplatten, welche an Laserspotform und Pulverdurchsatz angepasst werden. In der Standardkonfiguration ist der Breitstrahl-Bearbeitungskopf für eine Brennfleckdimension von 16 x 6 mm ausgelegt. In weiteren Konfigurationen ist der Bearbeitungskopf auch für Laserspotbreiten bis 45 mm adaptierbar. Der Arbeitsabstand ist entsprechend den Anforderungen des Prozesses und Bauteiles zwischen 20 mm und 30 mm variabel einstellbar.

*Wärmebildaufnahme beim Laser-Pulver-Auftragschweißen mit 15 kW Laserleistung und Breitstrahldüse*





6

## ERGEBNISSE

Abbildung 4 und 5 zeigen typische Schweißergebnisse auf Flach- und Rundproben, die mit dem 45 mm breiten rechteckigen Pulverstrahlquerschnitt erzielt werden. Durch die spezielle Gestaltung der Pulverkanäle wird eine homogene Pulvermassenstromverteilung auch bei großen Strahlbreiten erreicht. Ein typischer Querschliff einer 45 mm breiten Einzelraupe aus der Ni-Basis-Legierung IN82 ist in Abbildung 6 dargestellt. Selbst bei dieser außergewöhnlich hohen Raupenbreite ist der Raupenquerschnitt gleichmäßig und die Anbindung zum Grundmaterial durchgängig schmelzmetallurgisch und fehlerfrei.

Unter Nutzung der maximal zur Verfügung stehenden Laserleistung eines 20 kW Diodenlasers beträgt die maximale Auftragrate für Ni-Basis-Pulver  $14 \text{ kg h}^{-1}$  bei einem Pulvernutzungsgrad von etwa 90 Prozent. Das begrenzende Kriterium ist hierbei nicht die Strömungsvorgänge in der Pulverdüse, sondern die verfügbare Laserleistung. Im Unterschied zum Laser-Auftragschweißen mit rundem Laserstrahl wird beim Auftragschweißen

mit breitem Rechteckstrahl mit geringerer Laserleistungsdichte und Schweißgeschwindigkeit gearbeitet, um einen ruhigen Schweißprozess zu erzielen und die Überhitzungsgefahr des Schmelzbades zu mindern. Die korrespondierend geringere Schweißgeschwindigkeit führt zu kleineren Abkühlraten. Diese erweisen sich als vorteilhaft für die Verarbeitung risskritischer Pulverwerkstoffe und aufhärtungsempfindlicher Grundwerkstoffe.

Aufgrund der überragenden Auftragraten und Flächenleistungen besteht ein großes Anwendungsspektrum für die großflächige Beschichtung an korrosions- und verschleißbeanspruchten Bauteilen im Kraftwerks- und Offshore-Bereich. Abbildung 7 zeigt das Beschichten großer Behälterbauteile beim Industriekunden. Im Rahmen eines FuE-Vorhabens wurde hier der speziell für 45 mm Spurbreite entwickelte Breitstrahl-Bearbeitungskopf erstmals erprobt.

Anlage zum großflächigen Laser-Auftragschweißen von Behälterbauteilen mit Breitstrahlbeschichtungsoptik vom Fraunhofer IWS



- 1 Breitstrahl-Bearbeitungskopf mit Rechteck-Pulverdüse
- 2 Prozess des Laser-Pulver-Auftragschweißens mit 20 kW Laserleistung und 45 mm-Breitstrahldüse
- 4/5 Mit 45 mm Spurbreite beschichtete Probeteile
- 6 Querschliff einer Einzel-Schweißraupe aus IN82

7

## KONTAKT

Dipl.-Ing. (FH) Holger Hillig

+49 351 83391-3358

holger.hillig@iws.fraunhofer.de







## MINIATUR-LASERBEARBEITUNGSOPTIK FÜR HARTMETALLISCHE INNENBESCHICHTUNGEN

### DIE AUFGABE

Verschleißbeständige, hartmetallische Beschichtungen sind für Panzerungen hervorragend geeignet. Ein potenzielles Einsatzgebiet sind Zylinder von Extrudierwerkzeugen zur Herstellung von Kunststoff-Rohmaterial. Bei der Herstellung von Kunststoff-Rohmaterial werden Kunststoffteilchen über einen Trichter in einen Zylinder mit innenlaufender Extruderschnecke geschüttet. Durch die Bewegung und den Druck der rotierenden Extruderschnecke im erwärmten Zylinder wird die Kunststoffschmelze vermischt, gepresst und über eine schmale Austrittsöffnung herausgespritzt. Aufgrund der äußeren Zusetzerwärmung und der starken Reibung entstehen starke Verschleißerscheinungen in den bis zu 8 m langen Zylindern. Die Innenbeschichtung der Zylinder mit einer verschleißfesten hartstoffhaltigen Schicht war deshalb Entwicklungsgegenstand des Projektkonsortiums im EU-Projekt DEBACOAT (FP-7, FZK: 315417). Dabei handelt es sich um tiefliegende, schwer zu erreichende Stellen mit kleinen Innendurchmessern.

Gegenstand der Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWS Dresden war die Entwicklung eines Innenbeschichtungskopfes zum Herstellen besonders hoch hartstoffhaltiger Innenbeschichtungen. Folgende Anforderungen waren dabei zu erfüllen:

- das Innenbeschichten von langen Zylindern, die auch konisch oder doppelt ausgeführt sein können,
- das Erreichen einer maximalen Eintauchtiefe von 1800 mm für minimale Innendurchmesser von 58 mm,
- maximal mögliche Laserleistungen von 1000 W bei einem stabilen Langzeitprozess von mindestens einer Stunde,
- die Integration einer Prozesskamera und einer Temperaturerfassung.

### UNSERE LÖSUNG

Mit der Entwicklung der neuen Innenbeschichtungsoptik »Mini-ID« (Abb. 1) besteht die Funktionalität, hohe Eintauchtiefen bis zu 3000 mm und minimale Innendurchmesser von 50 mm zu bearbeiten. Der Aufbau der kompletten Innenbeschichtungsoptik ist so konzipiert, dass die Lichtleitfaser im Kopf vollständig integriert und von allen Medien wie Pulver, Schutzgas und Kühlwasser ummantelt wird. Der hinter dem Faserstecker liegende Anschlusskörper bietet Anschlussmöglichkeiten für das Pulver-Gas-Gemisch, Schutzgas, Kühlwasser-Vor- und Rücklauf, ein Thermoelement bis zur letzten optischen Komponente sowie eine integrierte Endoskop-Kamera, die bis kurz vor das Schmelzbad geführt ist. Der aus dem Faserende austretende Laserstrahl wird durch optische Linsen kollimiert, mit langen Brennweiten fokussiert, um 90 ° umgelenkt und wiederum kurz vor dem Austritt auf das Substrat fokussiert. Eine Kassette ermöglicht den schnellen Wechsel des letzten optischen Elements.

Die Pulverzufuhr ist seitlich angebracht und kann sowohl schleppend als auch stechend im Rohr schweißen (Abb. 2). Die Abschirmung des Schmelzbades erfolgt durch das Mitführen des Schutzgases im Laserstrahlengang bis zur Austrittsöffnung. Der Innenbeschichtungskopf ist vom Anschlusskörper bis hin zum Laserstrahlaustritt und zurück vollständig wassergekühlt. Der Kopf bietet eine Justierung des kollimierten Laserstrahls zur Austrittsöffnung und zusätzlich eine Justage der Pulverdüse zum Schmelzbad. Mit Hilfe einer Kugeldruckschraube kann der um jeweils 500 mm modular erweiterbare Innenbeschichtungskopf problemlos im zu beschichtenden Rohr abgestützt werden.



2



4

## ERGEBNISSE

Die Innenbeschichtungsoptik Mini-ID ist bis zu einer maximalen Laserleistung von 1,5 kW ausgelegt und mit einer integrierten Endoskop-Kamera zur Prozessbeobachtung sowie einem Thermoelement zur Temperaturerfassung der letzten optischen Komponente ausgestattet.

Um Langzeitbeschichtungsversuche in tiefliegenden Rohren durchführen zu können, musste der Innenbeschichtungskopf in zahlreichen Schweißvorversuchen seine prozesstechnische Qualität unter Beweis stellen. Flächenbeschichtungen bis zu einer Beschichtungszeit von zunächst 15 min wurden mit Ni-Basislegierungen bei einem typischen Laserstrahldurchmesser von 1,8 mm, einem Arbeitsabstand von 6,5 mm und einer Laserleistung von 500 W erfolgreich durchgeführt.

Für die eigentliche Langzeit-Stabilität im Rohr wurden Realbauteile für die Herstellung von Kunststoff-Rohmaterial innenliegend auftraggeschweißt. Die zu beschichtenden Zylinder haben einen Außendurchmesser von 200 mm, einen Innendurchmesser von 110 mm und eine Länge von 500 mm. Sie sind zusätzlich mit induktiv unterstützter Vor- und Nacherwärmung so temperiert worden, dass die bei der Beschichtung

mit risikritischen, hartmetallischen Legierungen häufig beobachteten Spannungsrisse komplett vermieden werden. In Abbildung 4 ist der induktionsunterstützte Schweißaufbau dargestellt.

Mit einer induktiven Vorwärmung von 300° C, einer Laserleistung von 700 W und einer Vorschubgeschwindigkeit von 500 mm min<sup>-1</sup> konnte bei einem Laserstrahldurchmesser von etwa 2 mm eine erfolgreiche Langzeit-Innenbeschichtung von bis zu 2 Stunden durchgeführt werden (Abb. 3). Der 0,5 mm dick mit einer Nickelbasislegierung beschichtete Zylinder hatte nach dem Prozess eine Temperatur von 370° C. Alle optischen Komponenten im ständig gekühlten Innenbeschichtungskopf blieben während des Funktionstests trotz starker Wärmestrahlung des erhitzten Rohres und Umströmung mit Restpulver unversehrt.

- 1 *Innenbeschichtungsoptik Mini-ID am KUKA-Roboter*
- 2 *Laterale Pulver-Gasströmung am Beschichtungskopf*
- 3 *Langzeit-Innenbeschichtung eines Zylinders durch Laser-Pulver-Auftragsschweißen*

*Schweißaufbau zum induktiv-unterstützten Innenrohr-Auftragsschweißen*



3

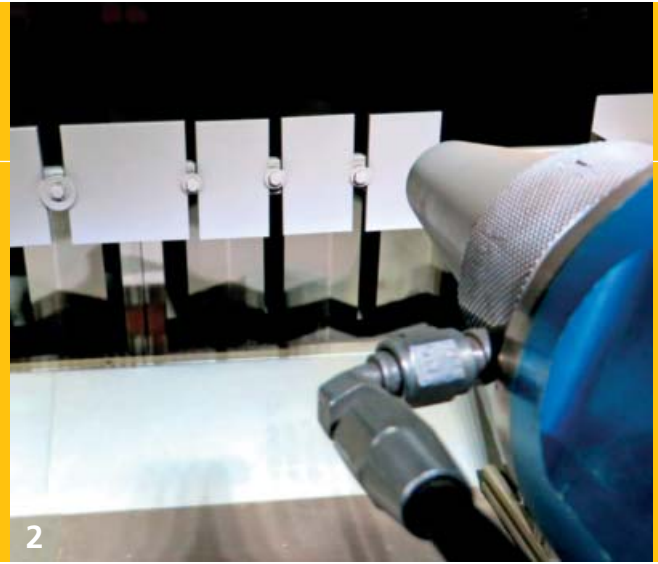
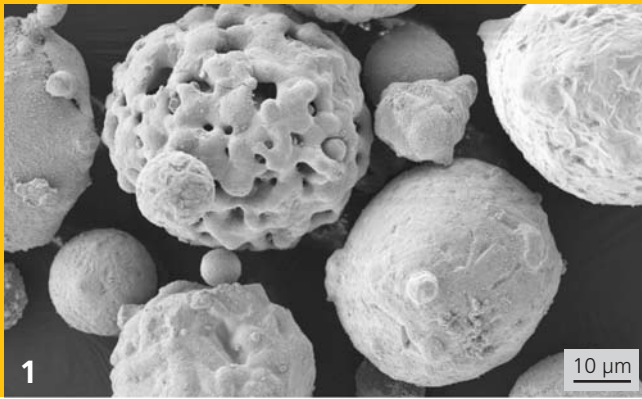
## KONTAKT

Dipl.-Ing. (FH) Frank Kubisch

+49 351 83391-3147

frank.kubisch@iws.fraunhofer.de





# EFFIZIENTE HARTMETALLBESCHICHTUNGEN FÜR HOCHTEMPERATURANWENDUNGEN

## DIE AUFGABE

Verschleißschutz ist eine der wichtigsten Anwendungen für thermisch gespritzte Hartmetallschichten. Stand der Technik sind Hartmetallschichten auf der Basis von WC und  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  mit verschiedenen Bindern (Co, Ni oder NiCr), die vorwiegend durch Hochgeschwindigkeitsflammspritzverfahren (HVOF) hergestellt werden. Ein Problem in der industriellen Anwendung ist der geringe Auftragwirkungsgrad von nur 35 bis 40 Prozent für Flüssigbrennstoffanlagen. Mit gasbetriebenen HVOF-Brennern der dritten Generation können ca. 60 Prozent erreicht werden, allerdings nur bei reduzierter Pulverförderrate. Die Ursache für die geringen Auftragwirkungsgrade liegt u. a. in der inhomogenen Erwärmung der Partikel im Spritzstrahl. Außerdem sind hohe Auftragwirkungsgrade nicht automatisch mit hoher Schichtqualität gleichzusetzen.

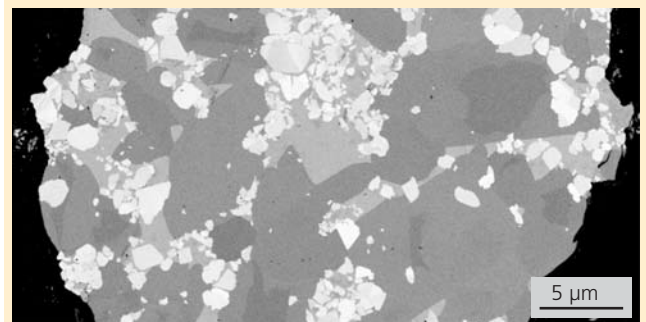
Für die Entwicklung neuer Anwendungen bestehen sowohl technische als auch wirtschaftliche Herausforderungen, beispielsweise die Verbesserung der Schichteigenschaften, auch bei hohen Temperaturen und die Senkung der Beschichtungskosten, z. B. durch Erhöhung des Auftragwirkungsgrades. Weiterhin sind die Zusammenhänge zwischen Pulvereigenschaften, Spritzparametern und den daraus resultierenden tribologischen Eigenschaften der Schichten nur ansatzweise bekannt.

Eine systematische Untersuchung von Beschichtungspulvern aus den Werkstoffsystemen  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr und  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -WC-Ni, sowie deren Einfluss auf die Schichteigenschaften und den Auftragwirkungsgrad beim Hochgeschwindigkeitsflammspritzen wurde in diese Studie durchgeführt. Neben den wirtschaftlichen Parametern lag der Fokus der Untersuchungen auf dem Verschleißverhalten der Schichten bis 800 °C.

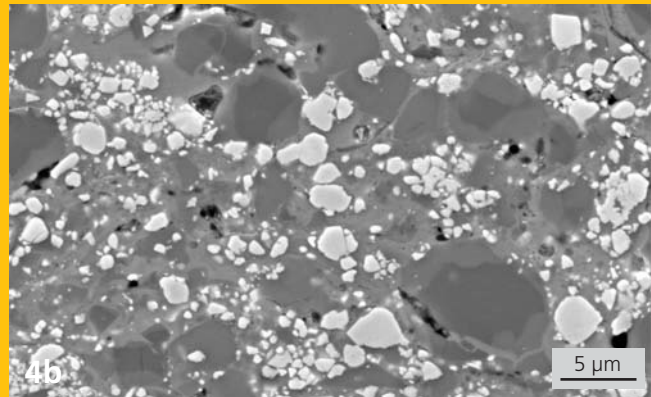
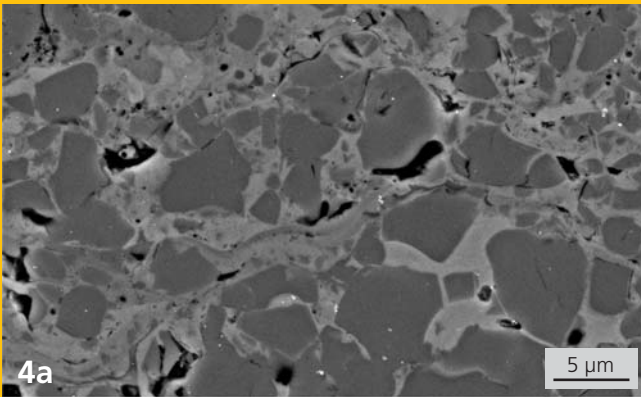
## UNSERE LÖSUNG

Für die  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr Pulver (C1 bis C5) wurden nach der Sprühtrocknung unterschiedliche Technologien zur Konsolidierung angewendet (Sintern oder Plasmaverdichten). Durch die verschiedenen Herstellungsverfahren unterscheiden sich die typischen Eigenschaften der Pulver (Morphologie, Porosität, Karbidkorngöße). Im  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -WC-Ni (W1 und W2) Pulver liegen neben den  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  Partikeln sehr feine WC Körner vor. Die Binderphase besteht hauptsächlich aus Nickel (Abb. 3).

REM-Aufnahme eines  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -WC-Ni (W1) Pulverpartikels mit WC (weiß),  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (dunkelgrau) und Binder (hellgrau)



Die Schichten wurden mit zwei verschiedenen HVOF-Verfahren mit flüssigem (K2) und gasförmigem Brennstoff (DJ2700) sowie mit dem HVOF-Verfahren (M3) hergestellt. Im Vergleich zum HVOF ist das HVOF ein bis jetzt wenig verbreiteter Spritzprozess mit hohem Potenzial, sowohl bei der technischen Leistungsfähigkeit der Schichten, als auch bezüglich der Wirtschaftlichkeit des Spritzprozesses. Für die Beschichtung wurden Parametersätze ausgewählt, mit denen dichte Schichten bei gleichzeitig hohen Auftragwirkungsgraden hergestellt werden können.



## ERGEBNISSE

Die mit Flüssigbrennstoff gespritzten HVOF-Schichten (K2) und die HVOF-Schichten (M3) sind deutlich dichter als die der gasbetriebenen HVOF-Anlage (DJ2700). Die Form der Karbide aus den Pulvern bleibt auch in den Schichten weitgehend erhalten (Abb. 4a und 4b). In den  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr-Schichten wurden  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  und die Binderphase nachgewiesen. Die feineren WC-Körner im W1-Pulver sind auch nach dem Spritzen deutlich sichtbar (Abb. 4b).

Für die Mehrzahl der Schichten wurden Härtewerte von über 1000 HV0,3 gemessen. Damit entsprechen sie denen typischer kommerzieller Schichten oder übertreffen diese. Die E-Module liegen überwiegend im Bereich von 150 bis 200 GPa; das sind exzellente Ergebnisse für  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr-Schichten. Durch die Verwendung feinerer Karbide und durch WC-Zusätze werden die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflusst.

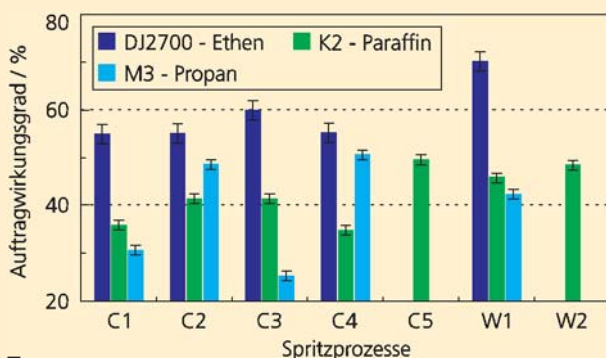
Mit dem flüssigbrennstoffbetriebenen HVOF-Verfahren und insbesondere mit dem HVOF-Verfahren werden hohe Schichtauftragraten von bis zu  $4 \text{ kg h}^{-1}$  erreicht, was eine erhebliche Zeitersparnis bei der Beschichtung der Bauteile bedeutet. Vorteil der gasbetriebenen HVOF-Verfahren sind die besseren Auftragwirkungsgrade (Abb. 5). Mit dem WC-legierten Pulver wurde sogar ein Auftragwirkungsgrad von 70 Prozent erreicht.

Bei Flüssigbrennstoff-HVOF Schichten konnte der Auftragwirkungsgrad unter Verwendung experimenteller  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -(WC)-Ni-Pulver (C5 und W2) auf knapp 50 Prozent erhöht werden.

Die Untersuchungen zum Abrasionsverschleiß ergaben deutliche Trends hinsichtlich des Einflusses der Materialtypen auf den Verschleißwiderstand. Der WC-Zusatz führt bei allen untersuchten Temperaturen zu einer deutlichen Verbesserung des Verschleißwiderstandes, um etwa 100 Prozent gegenüber reinen  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr-Schichten. Dies ist insbesondere bei hohen Anwendungstemperaturen und Hochlastbedingungen bemerkenswert, da rein WC-basierte Hartmetalle hier üblicherweise versagen. Bedeutsam ist auch die Erhöhung der Verschleißbeständigkeit bei Raumtemperatur nach einer Wärmebehandlung der Schichten für 8 h bei  $800 \text{ °C}$  in Argon. Durch diese einfache Nachbehandlung kann das Anwendungsspektrum der  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr-Schichten deutlich erweitert werden.

Die hier vorgestellten Arbeiten erfolgten im Rahmen des binationalen Cornet-Forschungsvorhabens: In Deutschland wurde das IGF-Vorhaben 91EBR in Kooperation mit dem Fraunhofer IKTS durch die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS gefördert, in Österreich wurde das Vorhaben 839126 der AC2T research GmbH durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH unterstützt.

Auftragwirkungsgrade für die verwendeten Beschichtungspulver und Spritzprozesse



- 1  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr Pulver
- 2 Equipment zum Spritzen der Hartmetallpulver
- 4 REM-Aufnahme einer  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr- (a) und einer  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -WC-Ni-Schicht (b)

## KONTAKT

Dr. Filofteia-Laura Toma

+49 351 83391-3191

filofteia-laura.toma@iws.fraunhofer.de







# VERBESSERUNG DER KAVITATIONSVERCHLEISS-BESTÄNDIGKEIT VON TURBINENWERKSTOFFEN

## DIE AUFGABE

Moderne Hochleistungswerkstoffe, die in Anlagen zur Energieerzeugung in Kraftwerken eingesetzt werden, sind bekanntermaßen sehr hohen Temperaturen und Verschleißintensitäten ausgesetzt. So werden die Eintrittskanten von Dampfturbinenschaufeln in der Niedertemperaturstufe der Turbine durch auskondensierende Wassertröpfchen, die mit bis zu Schallgeschwindigkeit auf die Oberflächen treffen, regelrecht abgetragen. Um dennoch eine hohe Lebensdauer der verschleißbelasteten Komponenten zu gewährleisten, müssen neben einer beanspruchungsgerechten Werkstoffauswahl zusätzliche Maßnahmen zum Verschleißschutz getroffen werden. Begleitend zur Optimierung der Werkstoffeigenschaften und Technologieparameter ist eine Prüfung der Verschleißbeständigkeit unerlässlich, um die Bauteileigenschaften an die Belastung unter realen Betriebsbedingungen anzupassen.

## UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer IWS Dresden wurden verschiedene Verschleißschutztechnologien für Hochleistungswerkstoffe aus dem Bereich der Energietechnik entwickelt. Als ein geeignetes Werkzeug hat sich dabei der Hochleistungsdiodenlaser mit Laserleistungen im Multi-Kilowatt-Bereich etabliert.

Grundsätzlich kann in drei verschiedene Technologievarianten unterschieden werden:

- Martensitisches Randschicht-Umwandlungshärten von härtbaren Stählen,
- Laserlösungsglühen einer Randschicht an ausscheidungshärtenden Stählen und nachfolgende Niedertemperatur-ausscheidungshärtung im Ofen ohne Beeinflussung des Grundwerkstoffs,

- Lasergaslegieren (z. B. von Titanwerkstoffen) durch Umschmelzen der Randschicht unter geeigneter Gasatmosphäre.

Für die technische Umsetzung der Härtetechnologien wurden verschiedene Anlagenkonzepte, basierend auf robotergeführten Bearbeitungsoptiken und optional mit bauteilangepassten Schutzgaskammern, entwickelt. Unter Verwendung einer zusätzlichen Dreh-Schwenk-Achse zur Bauteilbewegung können sehr flexibel 3D-Bearbeitungsspuren in die Bauteiloberflächen eingebracht werden. Die Realisierung eines stabilen und qualitätssicheren Laserprozesses erfolgt unter Verwendung einer Temperaturregelung (»LompocPro«) mit einer Wärmebildkamera (»E-FAqS«) zur Erfassung der Temperaturfelder. Für die Prüfung der Kavitationsbeständigkeit der auf diese Weise bearbeiteten Werkstoffe wurde am Fraunhofer IWS Dresden ein Prüfstand entwickelt (siehe Abb. 3). Unter genormten Prüfbedingungen wird die Probenoberfläche mittels Ultraschall-Sonotrode abgetragen. Der Volumenabtrag pro Zeit ergibt eine präzise Aussage zum Verschleißverhalten.

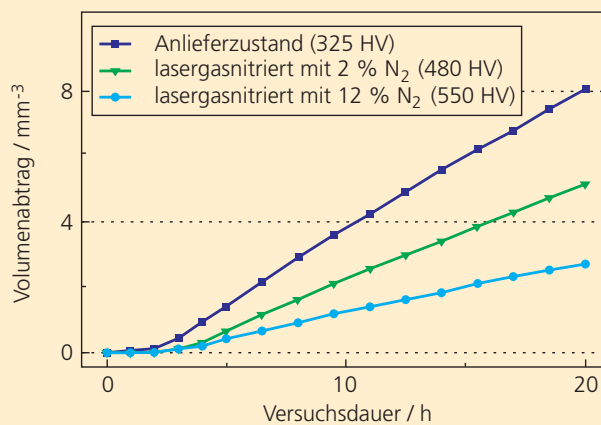
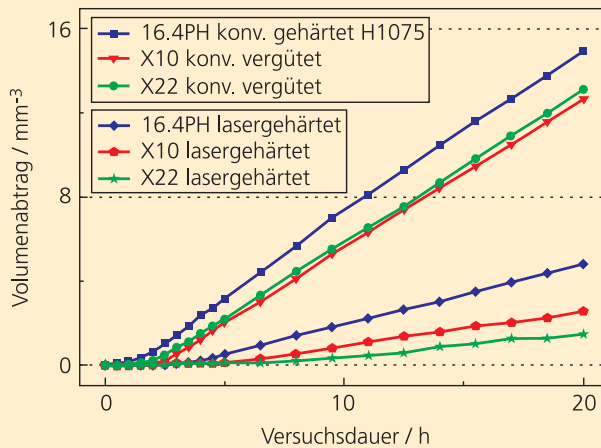
## ERGEBNISSE

Die lasergehärteten Oberflächen weisen im Vergleich zu den konventionell bearbeiteten Werkstoffzuständen deutlich höhere Härtewerte auf. Bei den Stählen wird in der Regel die werkstoffspezifische Maximalhärte realisiert, bei Titanwerkstoffen gilt es, einen guten Kompromiss aus hoher Härte und gleichzeitig ausreichend hoher Dauerschwingfestigkeit zu finden.



3

Kavitationsverschleiß an verschiedenen Turbinenschaufelstählen (oben) und Titanwerkstoffen (unten)



Spezifikation des Prüfgerätes:  
Ultraschall-Homogenisator VC 501

Prüfbedingungen nach ASTM G 32-92:

Prüfspitze:  $\varnothing 15,9 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$   
Eintauchtiefe:  $12 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$   
Amplitude: 100 %  
Frequenz: 20 kHz  
Destilliertes Wasser:  $22 \text{ }^\circ\text{C} + 4 \text{ }^\circ\text{C}$

4

Mittels Laserhärten kann der Volumenabtrag an lasergehärteten Hochleistungsstählen unter Kavitationsverschleißbelastung auf etwa ein Drittel bis ein Achtel abgesenkt werden. Für gängige Titanlegierungen konnte eine Korrelation der Verschleißigenschaften mit dem Stickstoffgehalt in der Gasatmosphäre beim Lasergasnitrieren sowie der resultierenden Oberflächenhärte ermittelt werden. Der Verschleißabtrag lässt sich zum Beispiel bei der Titanlegierung Ti6Al-4V auf bis zu etwa ein Drittel reduzieren. Eine deutlich verlängerte Lebensdauer der laserbehandelten Bauteiloberflächen ist damit zu erwarten, auch wenn der Kavitationsprüfstand die realen Verschleißbedingungen nur modellhaft abbilden kann.

Die Verwendung des Kavitationsprüfstandes stellt eine vergleichsweise kostengünstige Lösung dar und ist neben der Härteprüfung und Gefügeanalyse im metallographischen Schliff eine geeignete Methode zur Bewertung der Verschleißfestigkeit von Werkstoffen und Oberflächen.

- 1 Ausgewählte Turbinenschaufeltypen für die Laserbearbeitung
- 2 Laserhärten einer Turbinenschaufel mit Scanneroptik (Typ »LASSY«)
- 3 Kavitationsverschleißprüfstand

#### KONTAKT

Dipl.-Phys. Marko Seifert

+49 351 83391-3204

marko.seifert@iws.fraunhofer.de



## CHEMISCHE OBERFLÄCHEN- UND REAKTIONSTECHNIK



**Redaktion:** Herr Professor Kaskel, warum setzen Sie in der Batterieentwicklung weiterhin auf die Lithium-Schwefel-Batterie?

**Prof. Kaskel:** Das liegt doch auf der Hand. Nach wie vor ist die Lithium-Schwefel-Batterie das System mit dem höchsten Potenzial zur Erhöhung der Energiedichte. Bis heute liegt der Rekord bei klassischen Lithiumionenbatterien bei 250 Wh pro Kilogramm. Das wird aber bisher nur in vereinzelt Zellen erreicht. Die Lithium-Schwefel-Batterie hat das Potenzial mindestens 350 bis 450 Wh pro Kilogramm zu erreichen, sodass eine deutliche Steigerung der Energiedichte gegeben ist.

**Redaktion:** Aber warum kann man diese Batterien noch nicht kaufen?

**Prof. Kaskel:** Nun, es gibt bereits erste Firmen, die diese Art von Batterie vermarkten. Trotzdem sind diese Systeme nicht auf dem offenen Markt erhältlich. Es besteht auch noch erheblicher Innovationsbedarf bei der Auswahl geeigneter Materialien und Komponenten. Das reicht von porösen Kohlenstoffmaterialien für Kathoden über Separatoren bis hin zu geeigneten Elektrolyten und Anodenmaterialien. Hier besteht weiter erheblicher Entwicklungsbedarf, v. a. um die Zyklenstabilität zu verbessern. In den letzten drei Jahren gelang es uns, eine komplette Prozessstrecke zur Fertigung derartiger Batterien aufzubauen und zudem die Entwicklung innovativer Herstellungsprozesse voranzutreiben. Besonders hervorzuheben ist dabei die trockene Herstellung von Elektroden, bei der auf die Verwendung toxischer Lösungsmittel verzichtet werden kann.

**Redaktion:** Das erstaunt mich. Sehen Sie wirklich in der Entwicklung von Kohlenstoffmaterialien einen derart hohen Innovationsgehalt?

»Die Technik entwickelt sich immer mehr vom Primitiven über das Komplizierte zum Einfachen.«

Antoine de Saint-Exupéry



#### GESCHÄFTSFELDLLEITER

#### PROF. STEFAN KASKEL

☎ +49 351 83391-3331

✉ stefan.kaskel@iws.fraunhofer.de

**Prof. Kaskel:** Die Generierung neuer Kohlenstoffmaterialien spielt eine Schlüsselrolle in vielen energierelevanten Technologien. Denken Sie nur an Carbonfasern. Hier entwickeln wir zur Zeit neue Carbonisierungsprozesse, welche Plasma verwenden und dadurch die Carbonisierungszeiten deutlich reduzieren. Momentan arbeiten viele Firmen an der Entwicklung kostengünstigerer Basispolymere für Carbonfasern, z. B. aus nachwachsenden Rohstoffen. Zum Teil versagen da die klassischen Carbonisierungsverfahren, während die Plasmen bei Atmosphärendruck sehr effizient arbeiten. Aber auch im Bereich der Leistungselektronik könnten Kohlenstoffmaterialien eine große Rolle spielen. Ein großes Potenzial wird dabei der diamantbasierten Elektronik zugeschrieben.

**Redaktion:** Sie arbeiten auch an modernen Verfahren der Prozessüberwachung, z. B. dem »Hyperspectral Imaging« (HSI). Welche Anwendungsmöglichkeiten bietet diese Technologie?

**Prof. Kaskel:** Stimmt! Das ist eine neue Technik, mit der man bildgebend chemische Analysen machen kann. So sind z. B. auf Oberflächen unterschiedliche Verunreinigungen nebeneinander nachweisbar. In der Prozesskontrolle wird die Technik bspw. beim Unterscheiden von Kunststoffen mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung eingesetzt. Man kann auch Obst und Gemüse damit sortieren, da man die Druckstellen unter der Oberfläche mit HSI sehr gut sehen kann. Zudem hat HSI in der Medizintechnik eine große Zukunft für die Gewebeuntersuchung auf Tumore und andere Erkrankungen. Dies ist also eine ziemlich breit einsetzbare Technik. Mittlerweile haben wir sie so ausgebaut, dass man auch ortsaufgelöst Schichtdicken im Bereich weniger Nanometer kontrolliert messen und Fehlstellen in organischen Solarzellen bzw. OLEDs detektieren kann. Daher sehen wir in der Prozesskontrolle ein großes Anwendungspotenzial.





## KOMPETENZEN UND ANSPRECHPARTNER



*Dr. Holger Althues, Abteilungsleiter Chemische Oberflächentechnik*

☎ +49 351 83391-3476 / ✉ [holger.althues@iws.fraunhofer.de](mailto:holger.althues@iws.fraunhofer.de)

» In der Abteilung Chemische Oberflächentechnik werden Funktions-Materialien und Beschichtungen für einen breiten Einsatzbereich entwickelt. Neben funktionalen Dünnschichten bilden Elektroden für Energiespeicher dabei einen thematischen Schwerpunkt. Durch die drei Arbeitsgruppen wird die Optimierung der Schlüsselprozesse zur Entwicklung von Batterien der nächsten Generation (insbesondere Lithium- und Natrium-Schwefelzellen) vom Material über Beschichtungsprozesse bis zur Fertigung von Prototypzellen abgedeckt. «



*Dr. Philipp Thümmeler, Gruppenleiter Batterietechnik*

☎ +49 351 83391-3215 / ✉ [philipp.thuemmler@iws.fraunhofer.de](mailto:philipp.thuemmler@iws.fraunhofer.de)

» Verfahren zum Aufbau von Prototyp-Batteriezellen und deren Test bilden den Schwerpunkt dieser Arbeitsrichtung. Lithium-Schwefel-Zellen mit 4 Ah und spezifischen Energien  $>300 \text{ Wh kg}^{-1}$  werden gefertigt, erprobt und gruppenübergreifend weiterentwickelt. Eine Prozesslinie zur Batteriezellenfertigung in lokaler Trockenraum-Atmosphäre mit integriertem Remote-Laserstrahlschweißen »on-the-fly« und Remote-Laserstrahlschweißen wurde am IWS installiert. «



*Dr. Benjamin Schumm, Gruppenleiter Chemische Beschichtungsverfahren*

☎ +49 351 83391-3714 / ✉ [benjamin.schumm@iws.fraunhofer.de](mailto:benjamin.schumm@iws.fraunhofer.de)

» Wasserbasierte Beschichtungen und lösungsmittelfreie Prozesse zur Elektrodenherstellung werden für die kostengünstige Fertigung von Doppelschichtkondensatoren und Batterien im Rolle-zu-Rolle-Verfahren entwickelt. Gasphasen- (CVD) und Flüssigphasen-Verfahren zur Abscheidung von funktionalen Dünnschichten für leitfähige, kratzfeste, optische oder selbstreinigende Oberflächen sind ein weiterer Schwerpunkt der Arbeitsgruppe. «



*Dr. Susanne Dörfler, Gruppenleiterin Batterie- und Elektrochemie*

☎ +49 351 83391-3703 / ✉ [susanne.doerfler@iws.fraunhofer.de](mailto:susanne.doerfler@iws.fraunhofer.de)

» Die Entwicklung maßgeschneiderter Materialien (insbesondere Kohlenstoff- und Silizium-Nanomaterialien) und die elektrochemische Charakterisierung von Batterie-Elektroden stehen im Fokus dieser Arbeitsrichtung. So entstehen die Grundlagen für Lithium- und Natrium-basierte Sekundärbatterien als hochkapazitive Speicher der nächsten Generation. «



*Dr. Gerrit Mäder, Gruppenleiter Plasmatechnik und Nanomaterialien*  
☎ +49 351 83391-3262 / ✉ [gerrit.maeder@iws.fraunhofer.de](mailto:gerrit.maeder@iws.fraunhofer.de)



» In der Arbeitsgruppe Plasmatechnik und Nanomaterialien werden großflächige Atmosphärendruck-Plasmaquellen für kundenspezifische Anwendungen entwickelt bzw. angepasst. Als Anwendungsgebiete erschließen sich hierbei die Klebevorbehandlung, der Auftrag von Haftvermittlerschichten sowie der Pulverauftrag mittels Plasmatechnologie. Ein weiteres Arbeitsgebiet ist die Entwicklung von Gasphasenreaktoren für die Herstellung von Nanopartikeln und metallisch leitenden Kohlenstoff-Nanoröhren (CNTs). Speziell zur Synthese von einwandigen, defektarmen Single-Wall-CNTs wurde ein flexibles, kostengünstiges Hochrate-Syntheseverfahren entwickelt. «

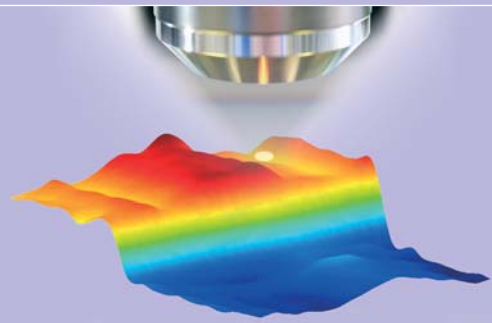
*Dr. Wulf Grählerlert, Gruppenleiter Prozess-Monitoring*  
☎ +49 351 83391-3406 / ✉ [wulf.graehlert@iws.fraunhofer.de](mailto:wulf.graehlert@iws.fraunhofer.de)



» Optisch-spektroskopische Verfahren sind ein hervorragendes Werkzeug des Prozess-Monitorings, um industrielle Produktionsprozesse sowie deren Produkte während oder nach der Fertigung zu charakterisieren. Je nach genutzter Methode können relevante Informationen über Prozessatmosphären (Gaszusammensetzung) und Produkteigenschaften (Oberflächen, Schichten, Zusammensetzung, Porosität etc.) berührungslos und hochempfindlich – z. T. sogar lateral aufgelöst – bestimmt werden. Die dabei erhaltenen Ergebnisse können zur automatisierten Überwachung, Steuerung und Optimierung der Prozesse eingesetzt werden. «

#### BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2015

1. Berührungslose hyperspektrale Schichtanalyse	66
2. Anlagentechnik zur kostengünstigen automatisierten Zellfertigung	68
3. Vom Pulver zur Rolle: Trocken beschichtete Batterieelektroden	70
4. Plasmatechnik zur effizienten Herstellung von Kohlenstofffasern	72
5. Leistungselektronische Bauelemente basierend auf einkristallinem Diamant	74
6. Separierung einkristalliner Diamantplatten mittels Ionenimplantation	76



# BERÜHRUNGSLÖSE HYPERSPEKTRALE SCHICHTANALYSE

## DIE AUFGABE

Funktionsschichten haben in vielen Produktionsverfahren und Anwendungen eine Schlüsselrolle. Ein maßgeblicher produktionstechnischer Aspekt ist jedoch für viele Anwendungsfelder noch völlig ungelöst: Wie kann die Qualität der entscheidenden Schichteigenschaften kontinuierlich und über die gesamte prozessierte Fläche zuverlässig überwacht und somit gewährleistet werden? Dies gilt insbesondere für Schichteigenschaften, die nicht direkt oder nur mit vergleichsweise hohem Zeitaufwand bestimmt werden können. So stellt sich in vielen Beschichtungsprozessen die Frage nach der Dicke oder auch Leitfähigkeit bzw. nach der Stabilität weiterer Prozessparameter. Es gibt aktuell keine etablierten Methoden, die diese Aufgabenstellung für eine ortsaufgelöste, 100-prozentige Kontrolle erfüllen können.

## UNSERE LÖSUNG

Das »Hyperspectral Imaging« (HSI, auch hyperspektrale Bildgebung) bezeichnet eine Klasse von bildgebenden Spektrometern, die sich in den vergangenen Jahren entwickelt hat. Die optisch-berührungslose Arbeitsweise ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber invasiv arbeitenden Inspektions- und Monitorierungs-Methoden. Die Aufnahme von Spektren wiederum bietet gegenüber der Aufnahme von Farbbildern eine wesentlich größere Informationstiefe. So sind RGB-Bilder mit maximal  $(2^8)^3$  Farbwerten pro Pixel kodiert, hyperspektrale Bilder bei 1000 Wellenlängen hingegen mit  $(2^8)^{1000}$  Tonwerten. Damit stehen für eine industrielle Inspektion wesentlich mehr Informationen über die Proben- bzw. Produkteigenschaften zur Verfügung. Von zentraler Bedeutung ist es, diese große Informationsmenge im Bereich von Gigabyte pro Sekunde sinnvoll zu verarbeiten und zu interpretieren. Dies kann auf verschiedenen Wegen erfolgen:

- (i) direkte Interpretation der Spektren, analog zur klassischen Spektroskopie;
- (ii) Nutzung der Daten für eine multivariate, statistische (chemometrische) Datenanalyse in Bezug auf die Zielgröße (z. B. Ermittlung einer Stoffkonzentration);
- (iii) Auswertung der Bildinformationen aus ortsaufgelösten Abbildungen.

Übersicht der Einsatzmöglichkeiten für die berührungslose hyperspektrale Schichtanalyse



Am Fraunhofer IWS sind Lösungswege entwickelt worden, die die Informationsgewinnung sowohl durch eine direkte physikalische Berechnung ermöglichen (»hard modelling«), als auch unter Nutzung multivariater Algorithmen sowie Methoden zur Bildauswertung eine Korrelation zu einzelnen Prozessgrößen erlauben (»soft modelling«). Insbesondere auf letzterem Weg lässt sich eine schnelle inline-Analytik realisieren.



3

## ERGEBNISSE

Die Technologie der hyperspektralen Bildgebung konnte für eine Vielzahl von Anwendungsfällen bei der Beschichtung etabliert werden. Die Auswertung der Spektren mittels »hard-modelling« – also der physikalischen Beschreibung der Schichtdicken, Brechzahlen, Absorptionskoeffizienten und Widerstände bzw. Leitfähigkeiten – bietet die Möglichkeit, mit hoher Präzision von jedem einzelnen Probenpunkt diese gewünschten Informationen zu ermitteln.

Ausgehend von bekannten Materialkennwerten kann für eine Vielzahl von Substraten und Schichten die Bestimmung unterschiedlicher Schichteigenschaften vorgenommen werden.

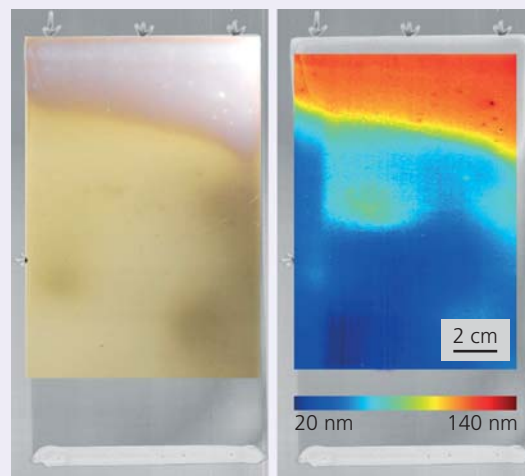
### Substrate und Schichtmaterialien für die hyperspektrale Analyse

Mögliche Substrate	Mögliche Schichten
- Metalle	- Anorganische Dünnschichten (z. B. $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{SiO}_2$ , $\text{TiO}_2$ )
- Wafer	- Metallische Dünnschichten (z. B. Au, Ag)
- Glas	- Transparente leitfähige Schichten (z. B. FTO, ITO, ATO)
- Polymere	- Polymere
- Folien	

4

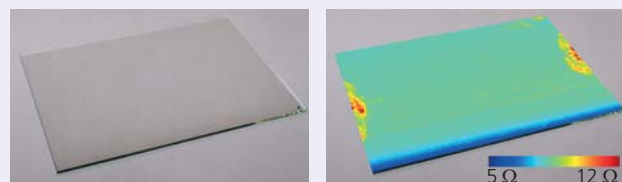
Einen schnelleren und somit inline-fähigen Ansatz bietet die Auswertung mittels »soft modelling«. Dabei erfolgt die direkte Korrelation der Spektren mit einer Zielgröße, wie z. B. einer der o. g. Schichteigenschaften. Aber auch Prozessparameter wie die Bandgeschwindigkeit, die Auftragsmenge des Eduktes, die Trockenzeit u. a. können als Zielgrößen dienen. Insgesamt ist mit Hilfe der HSI-Technologie die Erweiterung der bestehenden Möglichkeiten des Prozess-Monitorings und einer sich darauf stützende Prozesssteuerung und -regelung maßgeblich möglich.

Aluminiumoxid-Dünnschicht auf Stahl;  
links: visuelles Bild,  
rechts: berechnete Schichtdickenverteilung



5

Indiumzinnoxid-Dünnschicht auf Glas;  
links: visuelles Bild,  
rechts: berechnete Flächenwiderstandsverteilung



6

- 1 Mikroskopische Untersuchung eines leitfähigen Substrats
- 3 Integrationsphäre (Eigenentwicklung) zur makroskopischen Messung von Schichten

## KONTAKT

Dr. Philipp Wollmann

+49 351 83391-3316

philipp.wollmann@iws.fraunhofer.de







## ANLAGENTECHNIK ZUR KOSTENGÜNSTIGEN AUTOMATISIERTEN ZELLFERTIGUNG

### DIE AUFGABE

Nach wie vor wird in der Batterieforschung nach technischen Lösungen gesucht, um die Produktionskosten von lithiumbasierten Batterien zu senken und damit eine intensivere Marktdurchdringung dieser Speichertechnologie zu forcieren. Im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojektes DryLIZ (KIT 02PJ2302) hat sich das IWS zusammen mit Projektpartnern die Aufgabe gestellt, die Bearbeitungszeiten zur Elektrodenkonfektionierung zu verkürzen und den Transport der Elektroden hin zum Stapeln zu optimieren. Der gesamte Zuschnitt und die Elektrodenablage sollen dabei in einem minimierten Trockenluftvolumen abgebildet werden, um die Prozessnebenkosten gering zu halten.

Ein weiteren Schwerpunkt bilden innovative Elektrodenkonzepte, abseits von bekannten Elektrodenherstellrouten. Neben nass beschichteten Elektrodenmaterialien auf Basis von Wasser anstelle von organischen Lösungsmitteln sind trockenprozessierte Elektroden mit neuartigem Elektrodenaufbau zu entwickeln und deren Leistungsfähigkeit gegenüber Standardelektroden-Systemen zu untersuchen (siehe auch Seite 70-71).

### UNSERE LÖSUNG

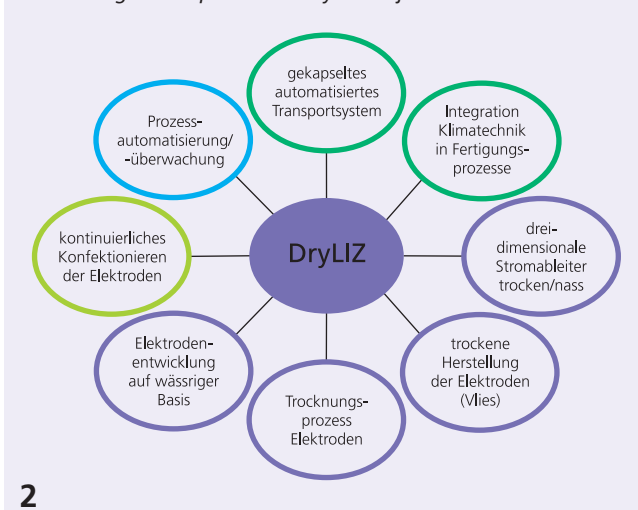
Eine schnelle unterbrechungsfreie Konfektionierung der Elektroden ermöglicht einen höheren Durchsatz in der Zellproduktion. Daher sind Möglichkeiten des kontinuierlichen Elektroden-schnitts zu evaluieren, um anhand der Kriterien Bearbeitungsgeschwindigkeit, Qualität der Zuschnitte, Prozessstabilität und Werkzeugkosten zu bewerten. Untersucht wurde, ob das Stanzen der Elektroden bei kontinuierlichem Materialvorschub mit einer auf Rollen aufgetragenen Stanzmatrix oder das Schneiden der Elektroden mit einem über einen Scanner

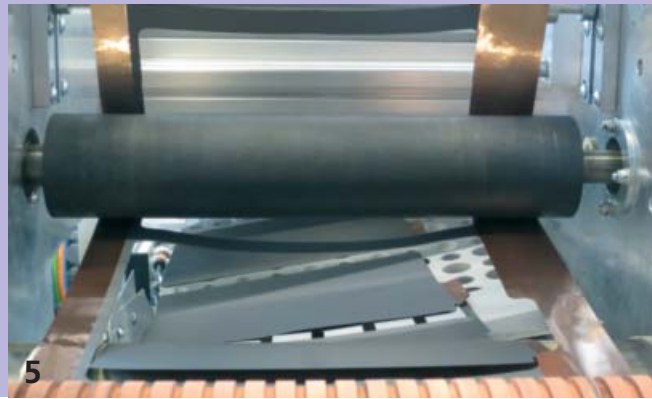
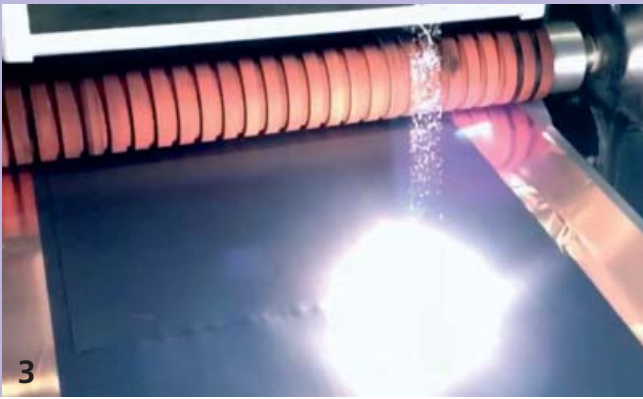
gelenkten Laser für verschiedene Elektrodenmaterialien ziel-führender ist.

Die Vorgabe, einen Zuschnitt pro Sekunde zu erzeugen und diesen auch entsprechend schnell beschädigungsfrei abzu-transportieren, stellte dabei eine große Herausforderung dar. Für den beinahe berührungsfreien Elektroden-transport wurde ein Ultraschall-basiertes Transportsystem installiert, bei dem die Elektroden auf einem Luftkissen schweben.

Die Verarbeitung von trocken prozessierten oder nassbeschich- teten und anschließend getrockneten Elektroden bedarf defi- nierter Umgebungsbedingungen, um einen irreversiblen Ver- lust nutzbarer Elektrodenkapazität zu vermeiden. Durch die im Projekt entwickelte Trockenlufttechnik und prozessangepasste Einhausung sorgt die applizierte Trockenluft mit einem Tau- punkt von  $-40^{\circ}\text{C}$  dafür, dass eine Rückbefeuchtung der Elek- troden verhindert wird.

Entwicklungsschwerpunkte im DryLIZ-Projekt



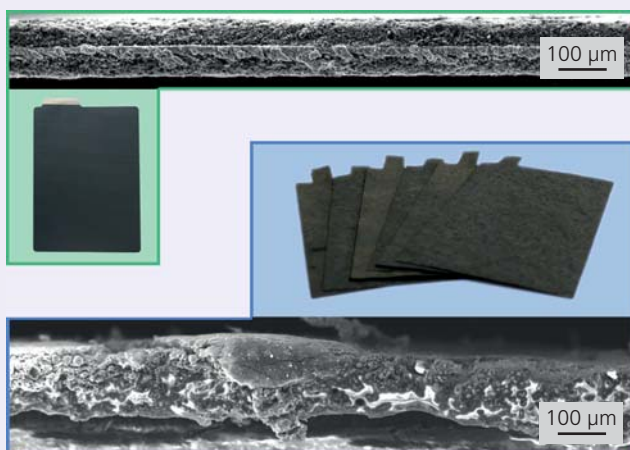


## ERGEBNISSE

Während der kontinuierliche Elektrodenzuschnitt mit rotierendem Stanzwerkzeug nicht reproduzierbar abgebildet werden konnte, wurden durch das Remote-Laserstrahlschneiden mit einem kostengünstigen cw-Single-Mode-Laser gute Schneid-ergebnisse und hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten erzielt. Bei einem Vorschub des Bahnmaterials von  $200 \text{ mm s}^{-1}$  wurden Zuschnitte im A5-Format erzeugt, die mit einer Taktrate von weniger als einer Sekunde die Anlage verließen.

Die aus der Materialentwicklung des Projektes stammenden trocken prozessierten Elektroden konnten ebenfalls mit dem Laser zugeschnitten werden. Bei diesen Elektroden dient ein leitfähiges  $200 \mu\text{m}$  dickes Vlies als Träger und Stromkollektor für das verpresste Aktivmaterial. Der neuartige Aufbau verhinderte im erreichten Entwicklungsstadium zwar noch das kontinuierliche Laserschneiden »on the fly«. Die in einem kleineren Format statisch erzeugten Laserzuschnitte konnten aber zum Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität dieses neuen Elektrodensystems eingesetzt werden.

Laserzuschnitte und REM-Aufnahmen der lasergeschnittenen Kante der Elektrodenmaterialien (grün: Referenzelektrodenmaterial, lasergeschnitten »on the fly«; blau: trocken prozessierte Vlies-Kathode, statisch lasergeschnitten)



4

Der Elektrodentransport konnte erfolgreich dargestellt werden. Die vereinzelt Zuschnitte wurden ohne nachweisbare Schädigung oder Kontamination von einem Ultraschallförder-system aufgenommen und sowohl schwebend als auch nach der Übergabe an ein weiteres Transportelement frei hängend abtransportiert und in Magazine überführt.

Der gesamte Konfektionier- und Transportprozess wurde im Rahmen des DryLIZ-Projektes in einem für die jeweiligen Prozesse minimierten Trockenluftvolumen abgebildet. Gegenüber großen Trockenlufträumen reduzieren sich die Kosten der Luftaufbereitung somit deutlich. Auf den Laborbetrieb des Fraunhofer IWS bezogen beträgt die Reduktion ca. 90 Prozent, nur 10 Prozent des gesamten Raumvolumens werden klimatisiert. Die Anlagenbediener arbeiten in natürlicher Atmosphäre.

Der gesamte Demonstrator zur Elektroden- und Zellfertigung steht nach dem erfolgreichen Abschluss des Projektes für weitere Forschungsarbeiten mit Partnern aus Forschung und Industrie zur Verfügung.

- 1 Anlagenübersicht: Konfektionieren und Transportieren in Trockenluftatmosphäre
- 3 Laserzuschnitt der Vlies-Kathode
- 5 Abtransport der Zuschnitte

## KONTAKT

Dr. Philipp Thümmeler

+49 351 83391-3215

philipp.thuemmler@iws.fraunhofer.de





## VOM PULVER ZUR ROLLE: TROCKEN BESCHICHTETE BATTERIEELEKTRODEN

### DIE AUFGABE

Das industrielle Standardverfahren zur Herstellung von Batterieelektroden basiert derzeit auf nasschemischen Beschichtungsprozessen, bei denen das Aktivmaterial in Form von einer Suspension auf eine Metallfolie aufgetragen wird. Um eine hohe Qualität der erzeugten Elektroden zu gewährleisten, ist die Entfernung der verwendeten z. T. toxischen Lösemittel von großer Bedeutung. Dafür werden sehr lange und aufwendige Trocknungsstrecken benötigt, was einen immensen Energieeinsatz bedeutet.

Neue Umweltauflagen und gestiegene Energiepreise erfordern ein Umdenken in der Konzeption neuartiger Produktionstechniken für Batterieelektroden. Ein Verfahren zur Elektrodenherstellung, das ohne den Einsatz von Lösungsmitteln auskommt, hat somit großes Potenzial für die Einsparung von Produktionskosten.

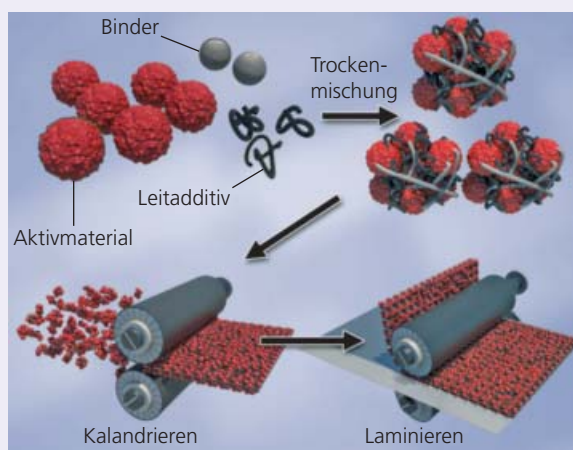
### UNSERE LÖSUNG

Das Fraunhofer IWS setzt hier mit dem Trockenbeschichtungsverfahren an, bei dem Ausgangspulver lösungsmittelfrei in Schichten und freistehende Trockenfilme überführt werden. Im Rahmen der Verbundprojekte DryLIZ (FKZ: 02PJ2302) und BaSta (FKZ: 0325563A) wurden die Grundlagen für die trockene Materialverarbeitung zu Batterieelektroden gelegt. Untersucht wurden Kathodenmaterialien für die Lithiumionentechnik (Lithiumeisenphosphat LFP; DryLIZ) und Kohlenstoff-Schwefelkomposite für Raumtemperatur-Natrium/Schwefel-Batterien (BaSta). Im Rahmen von BaSta entstand eine Versuchsanlage, die nun technisch für den kontinuierlichen Betrieb erweitert wurde. Der Prozess der Trockenbeschichtung umfasst zwei wesentliche Schritte. Zunächst werden in einem

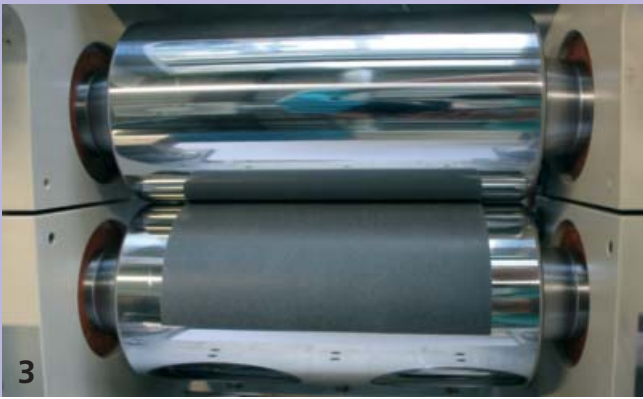
Trockenmischprozess die Pulver der Aktivmaterialien, Additive und Binder vermischt. Entscheidend dabei ist die Struktur und Verteilung des polymeren Binders. Bei optimaler Verteilung von Polymerfibrillen werden bereits mit geringen Binder-Anteilen unter 5 Gewichtsprozent mechanisch stabile, freistehende Filme erhalten.

Das dem Mischprozess entstammende pulverförmige Material kann nun in einem zweiten Prozessschritt zu ca. 50 – 100 µm dünnen Elektrodenfilmen gepresst werden, freistehend oder auf einem Stromkollektor als Substrat. Von hoher Bedeutung dabei ist die gleichmäßige Verteilung des pulverförmigen Materials. Dies wird durch ein am IWS speziell dafür angepasstes Auftragssystem realisiert. Durch die flexible Anlagentechnik am IWS ist es möglich, verschiedene Ausgangspulver kontinuierlich zu gewickelten Elektrodenfilmen zu verarbeiten. Die Prozesse und Anlagenkomponenten können in zukünftigen Arbeiten an spezielle Kundenanforderungen angepasst und weiterentwickelt werden.

Prozessschema zur Herstellung von Trockenfilmen



2

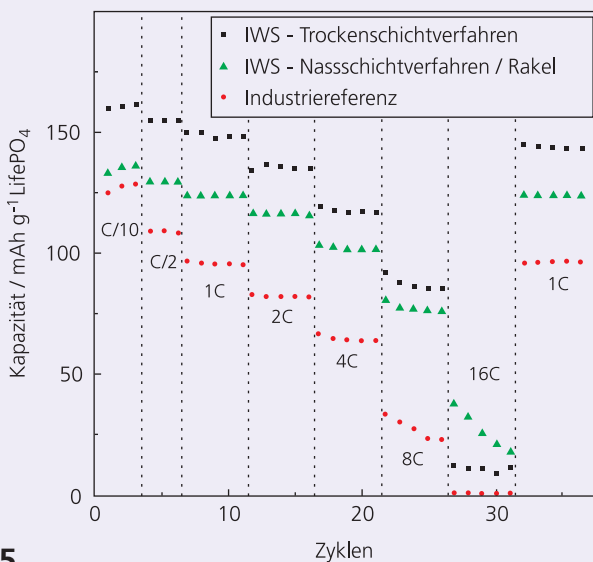


## ERGEBNISSE

Die mittels Trockenbeschichtung hergestellten und anschließend elektrochemisch untersuchten Lithiumeisenphosphat-Kathoden wurden mit herkömmlich prozessierten Kathoden verglichen. Sowohl für die Aktivmaterialausnutzung als auch die Ratenfähigkeit, also die Kapazität bei erhöhter C-Rate, werden bei den Trockenfilmelektroden höhere Werte erzielt als für die Referenzelektroden.

Zudem sind trocken hergestellte Kohlenstoff / Schwefel-Kathoden den mittels Rakelverfahren produzierten Kohlenstoff / Schwefel-Kathoden überlegen. So konnte bei einer Flächenbeladung Schwefel von über  $3 \text{ mg cm}^{-2}$  eine spezifische Kapazität von über  $1.100 \text{ mAh g}^{-1}$  Schwefel in der Li-S-Batterie erreicht werden.

Vergleich  $\text{LiFePO}_4$  – Kathoden unterschiedlicher Herstellungsmethoden



5

Mittels eines zur Konzeptionierung der Demonstrationsanlage verwendeten Versuchsaufbaus konnten bei einer Bandgeschwindigkeit von  $1 \text{ m min}^{-1}$  bereits  $100 \mu\text{m}$  dicke Kathodenschichten auf Aluminiumfolie erzeugt werden. Das große Potenzial des neuartigen Trockenfilmprozesses, welches zukünftig für verschiedenste Elektrodenmaterialien eingesetzt werden kann, ist damit demonstriert.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Vorteile der Trockenbeschichtung ableiten:

- Kostenersparnis durch Wegfall von Lösungsmittel und Trocknungsprozess
- Umweltfreundlich durch Wegfall toxischer Lösungsmittel
- Defektfreier Auftrag von dicken Schichten
- Verarbeitbarkeit schwer zu dispergierender Additive und Aktivmaterialien
- Vermeidung negativer Beeinflussung durch Lösungsmittel / Trocknungsprozess

- 1 Rolle-zu-Rolle-Prozess zur Trockenbeschichtung
- 3 Herstellung einer freistehenden  $\text{LiFePO}_4$ -Kathode
- 4 Trockenbeschichtungsanlage

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Sebastian Tschöcke

+49 351 83391-3297

sebastian.tschoecke@iws.fraunhofer.de





# PLASMATECHNIK ZUR EFFIZIENTEN HERSTELLUNG VON KOHLENSTOFFFASERN

## DIE AUFGABE

Der steigende Bedarf an Kohlenstofffasern und deren Verbunden basiert auf den sensationellen Leichtbaueigenschaften dieser Materialien. Neben ihrer hohen Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte weisen sie auch eine hohe Korrosionsbeständigkeit sowie ein gutes Dämpfungsvermögen auf. Der Preis der Kohlenstofffasern wird durch den Herstellungsprozess und die Anlagenkosten bestimmt. Die kohlenstoffhaltigen Ausgangsfasern (meist aus Polyacrylnitril, PAN) müssen oxidiert und karbonisiert werden, um eine graphitartige Struktur auszubilden. Durch die Karbonisierung erreichen die Fasern eine höhere Festigkeit und Steifigkeit.

Mit zunehmender Behandlungstemperatur steigt der relative Kohlenstoffanteil der Fasern, gleichzeitig sinkt der Wirkungsgrad der bisher verwendeten industriellen Anlagen und damit die Effizienz des Prozesses. Alternative Behandlungsmethoden sind deshalb wichtige Stellgrößen zur Kostensenkung und Steigerung der Effizienz der Kohlenstofffaserherstellung. Das größte Potenzial wird in einer Reduzierung der Behandlungsdauer bei gleichzeitiger Verkleinerung der Anlagendimensionen gesehen.

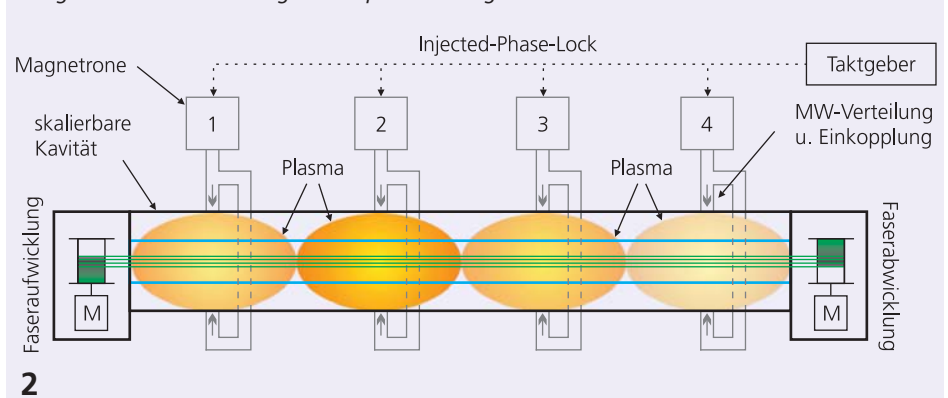
## UNSERE LÖSUNG

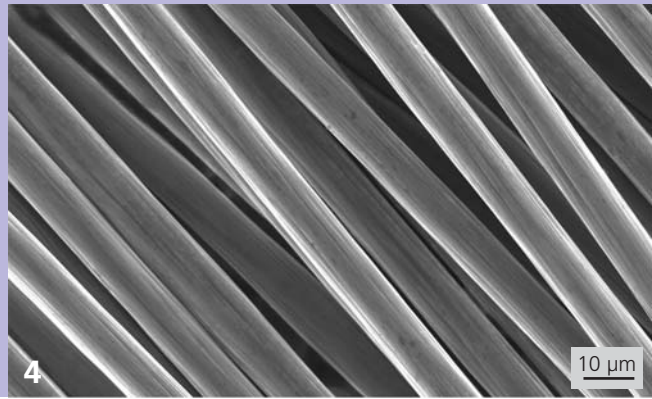
Die konventionelle Karbonisierung ist im unteren Temperaturbereich mit sehr geringen Aufheizraten verbunden, da Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff und deren Verbindungen aus dem Material ausdiffundieren und damit der Kohlenstoffgehalt im

Material prozentual ansteigt. Mit einer Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit durch eine alternative Aufheizmethode und der damit verbundenen Steigerung der Aufheizrate ist eine erhebliche Effizienzsteigerung möglich. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass keine Faserschädigung auftritt und der Karbonisierungsprozess unter inerter Atmosphäre stattfindet. Tritt Sauerstoff während der Behandlung in den Prozessraum ein, führt dies zu einer erheblichen Verschlechterung der Faserqualität.

Am Fraunhofer IWS Dresden wurde im Rahmen eines öffentlich geförderten Projekts eine neue Niederdruck-Mikrowellen-Plasmaanlage entwickelt. Sie ermöglicht die Karbonisierung voroxidierter PAN-Fasern innerhalb von 10 Minuten. Kernstück der Anlage ist eine linear ausgedehnte Kavität mit einer Länge von momentan 400 mm. Sie beherbergt im Inneren ein Quarzglasrohr mit einem Durchmesser von 70 mm, durch welches die Fasern hindurchgeführt werden. An zwei gegenüberliegenden Seiten der Kavität wird Mikrowellenstrahlung in die mit einer Stickstoff-Argon-Mischung gefüllte Quarzglasröhre eingekoppelt. Dadurch ist es möglich, in diesem Bereich der Kavität ein Mikrowellen-Plasma zu generieren, welches die

Anlagenskizze zur inlinefähigen Faserprozessierung





Fasern durch eine Kombination aus Strahlung verschiedener Wellenlängenbereiche karbonisiert. Die Besonderheit des entwickelten Verfahrens liegt in der kurzen Behandlungszeit der Fasern durch die Wechselwirkung mit dem Mikrowellen-Plasma. In Verbindung mit der geringen Anlagengröße können der Faserdurchsatz erheblich gesteigert und die Kosten minimiert werden. Als Prozessgase werden ausschließlich Argon und Stickstoff verwendet.

Eine Weiterentwicklung dieses Anlagenkonzeptes für eine inlinefähige Faserprozessierung wird derzeit am IWS aufgebaut und untersucht. Die neue Anlage arbeitet mit dem sogenannten Injected-Phase-Locking, welches eine phasensynchrone Einkopplung der Mikrowellen-Strahlung ermöglicht. Dies ist für die Aufskalierung der Plasmaquelle zwingend notwendig. Diese Methode ermöglicht es auch, die Plasmaleistungsdichte in der Kavität definiert zu variieren und somit, je nach Karbonisierungsgrad, einen optimalen Energieeintrag in die Fasern zu generieren.

## ERGEBNISSE

Die PAN-Fasern werden mit einer definierten Zugspannung längs durch die Kavität geführt. Durch diese Vorspannung wird eine Vorzugsrichtung für die Ausbildung der Graphitebenen vorgegeben. Daraus resultiert eine erhöhte Festigkeit in Faserrichtung.

Die Faserfestigkeit wird durch die Bestimmung der Einzelfilament-Zugfestigkeit charakterisiert. Durch Variation der Mikrowellenleistung lassen sich die Ausbreitung des Plasmas und damit auch sein Wirkungsbereich beeinflussen. Über die Veränderung des Druckes wird die Intensität des Plasmas variiert, was Auswirkungen auf die Temperatur in der Kavität hat.

Auch der Gesamtgasfluss und die Gaszusammensetzung beeinflussen die Fasereigenschaften. Die Festigkeit der Fasern kann durch die Mikrowellen-Plasma-Behandlung im Vergleich zum Ausgangsmaterial erheblich gesteigert werden. Bei einer Mikrowellenleistung von 1150 W und 7 Minuten Verweilzeit im Plasma konnte die Festigkeit des Ausgangsmaterials von ursprünglich ca. 300 MPa auf eine mittlere Zugfestigkeit von 1200 MPa bis 1800 MPa gesteigert werden. Der Festigkeitsverlust mit steigender Verweilzeit kann unter anderem mit einem zu hohen Energieeintrag in die Fasern durch die gewählte Mikrowellenleistung erklärt werden.

Die Arbeiten erfolgten im Projekt »Energieeffiziente Herstellung von Kohlenstofffasern mittels Mikrowellenplasmen« (Fkz.: 100154468/2894) in Kooperation mit der SITEC Automation GmbH, finanziert aus Mitteln der Europäischen Union und des Freistaates Sachsen.

- 1 *Linear ausgedehntes Niederdruck-Mikrowellenplasma zur Herstellung von Kohlenstofffasern*
- 3 *T-Verteiler an LIMAPP-Quelle*
- 4 *REM-Aufnahme von Kohlenstofffasern, welche mittels Mikrowellen-Plasma-Verfahren hergestellt wurden*

## KONTAKT

Dr. Gerrit Mäder

+49 351 83391-3262

[gerrit.maeder@iws.fraunhofer.de](mailto:gerrit.maeder@iws.fraunhofer.de)



# LEISTUNGSELEKTRONISCHE BAUELEMENTE BASIEREND AUF EINKRISTALLINEM DIAMANT

## DIE AUFGABE

Für die Entwicklung effizienter leistungselektronischer Bauelemente sind Halbleitermaterialien mit größerer Bandlücke als Silizium von besonderer Bedeutung. Könnte man Diamant anstelle von Silizium verwenden, würden der elektrische Widerstand und damit die Verlustleistung des Bauelements um das Tausendfache sinken und erhebliche Energieeinsparungen in leistungselektronischen Anwendungen ermöglichen.

Die nach Silizium folgende Generation von leistungselektronischen Bauelementen basiert auf Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Die für leistungselektronische Anwendungen relevanten intrinsischen Eigenschaften von Diamant übersteigen diejenigen von SiC und GaN noch einmal erheblich (Abb. 1). Werden zur Isolierung von 10 kV noch 1000 µm dicke Siliziumelemente und ca. 100 µm dicke SiC- oder GaN-Elemente benötigt, reichen bereits 20 µm dicke Diamantelemente zur Isolation dieser Spannung aus.

Gegenwärtig basieren die Erwartungen an die Diamantelektronik auf dem Vergleich von intrinsischen Materialeigenschaften und den daraus ableitbaren Möglichkeiten. Die Aufgabe besteht deshalb darin, reale leistungselektronische Bauelemente aus Diamant herzustellen und die theoretisch erwarteten Vorteile praktisch zu demonstrieren.

*Ausgewählte Eigenschaften von Halbleitern mit großer Bandlücke*

	Si	6H-SiC	GaN	Diamant
Bandlücke / eV	1,12	3,03	3,45	5,45
Elektrische Durchbruchfeldstärke / kV cm <sup>-1</sup>	300	2500	2000	10000
Wärmeleitfähigkeit / W cm <sup>-1</sup> K	1,5	4,9	1,3	22

1

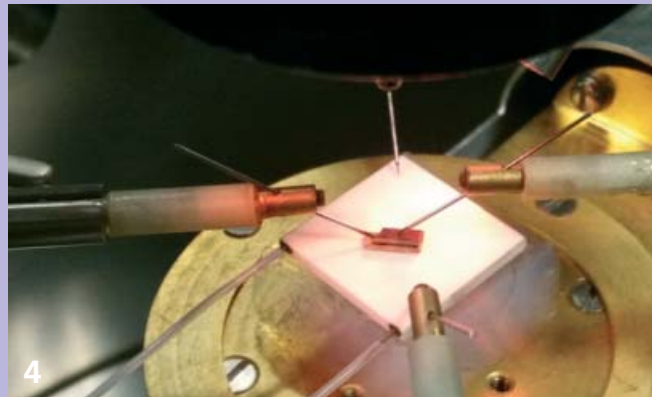
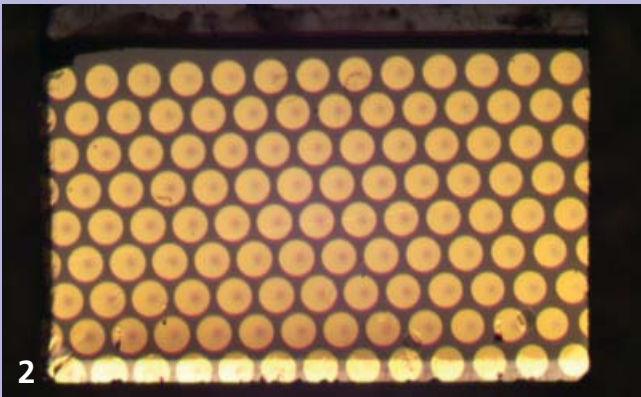
## UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer Center for Coatings and Diamond Technologies CCD (siehe auch S. 128) werden in enger Zusammenarbeit mit der Michigan State University Diamantdioden für leistungselektronische Anwendungen entwickelt und gefertigt. Der Fokus liegt auf vertikalen Schottky- und Schottky-pn-Übergangsdioden.

Bei der Herstellung der Dioden sind die Prozesse für die p- und n-Dotierung von Diamant besonders anspruchsvoll. Am CCD erfolgt die Dotierung während des plasmabasierten homoepitaktischen Wachstums des Diamantkristalls mit Bor als p-Dotierstoff und Phosphor als n-Dotierstoff. In einem durch das U.S. Department of Energy finanzierten Projekt (FKZ: DE-AR0000455) werden die Herstellungsschritte für Diamantdioden erforscht und in Zusammenhang mit den erzielten Eigenschaften gebracht.

Drei auf plasmagestützter CVD basierende Dotierprozesse stehen aktuell im Fokus. Zwei der Prozesse erzeugen hochdotierte n- und p-Typ-halbleitende Regionen. Der dritte Prozess erzeugt niedrig dotierte Regionen vom p-Typ. Diese dotierten Regionen wurden mit Diagnostikmethoden analysiert, um deren Dotierstoffkonzentrationen und elektrische Eigenschaften zu bestimmen.

In einem Halleffektsystem werden die elektrischen Eigenschaften der Halbleiter von Raumtemperatur bis 700 K studiert. Messungen bei diesen höheren Temperaturen sind wichtig, da von Diamantbauelementen gerade in diesem Bereich besondere Leistungen erwartet werden.

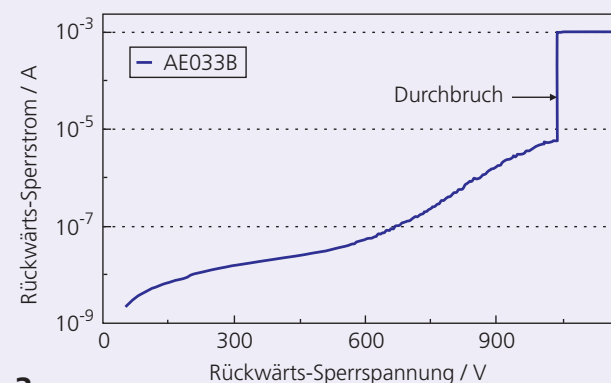


## ERGEBNISSE

Mit 0,36 eV bzw. 0,58 eV sind die Aktivierungsenergien der Elemente Bor und Phosphor für die Freisetzung von Ladungsträgern so hoch, dass bei niedrigen Temperaturen (z. B. Raumtemperatur) nur wenige Ladungsträger verfügbar sind. Damit sind der elektrische Widerstand und die Verlustleistung in Vorwärtsrichtung eines solchen Gebietes hoch.

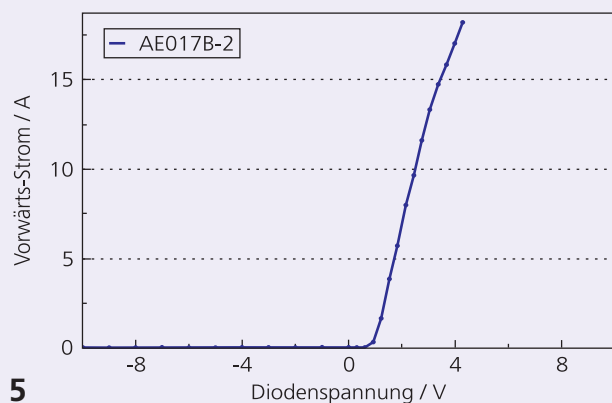
Abbildung 2 zeigt ein am CCD hergestelltes Feld von Schottky-Dioden mit jeweils 150 µm Durchmesser. Die leicht mit Bor dotierte Diamantregion (Dotierlevel =  $10^{16}$  Atome  $\text{cm}^{-3}$ ) ist 10 µm dick. Viele dieser Dioden haben im Test eine Durchbruchspannung (Spannung in Gegenrichtung) von mehr als 1000 V ausgehalten (siehe Abb. 3).

*Stromfluss einer in Gegenrichtung vorgespannten Diamant-Schottky-Diode mit 1040 V Durchbruchspannung*



Kontaktfläche von 1 mm x 2 mm, Abbildung 5 das dazugehörige Strom-Spannungs-Diagramm. Die Diode hat ebenfalls eine leichtdotierte Region von 10 µm Dicke mit einem Dotierlevel von  $5 \times 10^{17}$  Atome  $\text{cm}^{-3}$ . Der Vorwärtsstrom erreicht Werte bis 18 A.

*Strom-Spannungs-Verlauf einer 1 mm x 2 mm großen Diamant-Schottky-Diode mit einem Vorwärtsstrom von 18 A*



Die Ergebnisse demonstrieren die Herstellbarkeit von Diamant-Schottky-Dioden sowie erste vielversprechende Messdaten von Spannungs- und Stromkennwerten. Gegenwärtige Arbeiten fokussieren auf die Vereinigung von hohen Vorwärtsströmen und hohen Durchbruchsspannungen in ein und derselben Diode.

In hochdotierten Diamanten sind die Aktivierungsenergien erheblich geringer. Zudem werden bei höheren Betriebstemperaturen (z. B. durch Erwärmung) mehr Ladungsträger freigesetzt. Gleichzeitig hat Diamant eine sehr große Bandlücke, so dass das Material bei hohen Temperaturen stabil als Halbleiter funktioniert. Derartige Überlegungen werden beim Design der elektronischen Bauelemente aus Diamant berücksichtigt. Abbildung 4 zeigt eine Diamant-Schottky-Diode mit einer

- 2 *Diamant-Schottky-Dioden mit jeweils 150 µm Durchmesser*
- 4 *1 mm x 2 mm große Diamant-Schottky-Diode im Messaufbau*

## KONTAKT

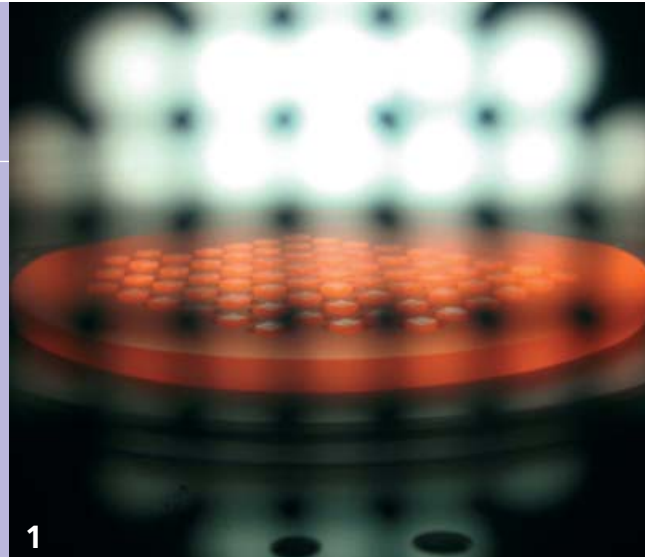
Prof. Timothy Grotjohn

+1 517 353 8906

tgrotjohn@fraunhofer.org







1

## SEPARIERUNG EINKRISTALLINER DIAMANT- PLATTEN MITTELS IONENIMPLANTATION

### DIE AUFGABE

Großflächige einkristalline Diamantplatten, kurz EKD, (< 40 µm bis 500 µm dick) sind von erheblichem Interesse für Anwendungen in optischen und röntgenoptischen Komponenten, Strahlungsdetektoren und elektronischen Bauelementen. Gegenwärtig sind hochqualitative Diamantplatten nur bis etwa 10 mm Kantenlänge verfügbar, da sie aus gewachsenen Diamantkristallen geschnitten und poliert werden. Insbesondere zur Herstellung von Diamantwafern für die Halbleiterindustrie sind Durchmesser von mindestens 50 mm gefragt.

Natürliche Schmuckdiamanten werden traditionell mit rotierenden Kupfermessern geschnitten. Dies ist ein vergleichsweise unpräziser Prozess und nicht geeignet für Hochtechnologieanwendungen. Zunehmend kommt auch Laserschneiden zum Einsatz mit guten Ergebnissen für kleinere Schnitttiefen (< 10 mm), aber auch Nachteilen. Zum einen hat der Laserschnitt eine V-Form, wodurch sich bei größeren Schnitttiefen erhebliche Materialverluste ergeben. Zum anderen erzeugt der Laserschnitt eine Defektzone von mehreren zehn Mikrometern, die im Nachgang von der Platte durch Polieren entfernt werden muss.

Mit Hinblick auf zukünftige Entwicklungen von Diamantplatten mit wesentlich größeren Ausmaßen sind gegenwärtige Separationstechniken unzureichend. Die Aufgabe besteht deshalb in der Entwicklung von Prozessen, die die Separation großflächiger Platten aus Diamantkristallen ohne großen Materialverlust und mit geringen Defektzonen erlauben.

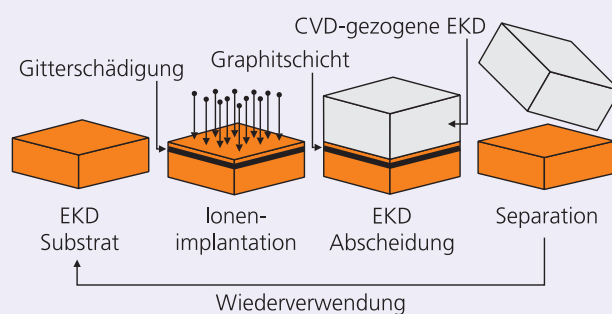
### UNSERE LÖSUNG

Am Fraunhofer Center for Coatings and Diamond Technologies CCD (siehe auch S. 128) werden in enger Zusammenarbeit mit der Michigan State University und der Western Michigan University Techniken entwickelt, die Ionenimplantationsprozesse zur Separation von Diamantplatten ausnutzen (Abb. 2).

Das Diamantausgangssubstrat wird zunächst mit hochenergetischen Ionen bestrahlt, um eine dünne Schädigungszone wenige Mikrometer unterhalb der Kristalloberfläche zu erzeugen. Dieser Prozess ist auf für die Halbleiterindustrie typische Flächen skalierbar. Die Kristalloberfläche bleibt dabei intakt, so dass nachfolgend per Plasma CVD neuer Diamant aufgewachsen werden kann.

Infolge der hohen Prozesstemperatur (900 °C) graphitisiert die Schädigungszone im Kristall und wird dann durch chemisches Ätzen entfernt, um den neu gewachsenen Diamantkristall vom Substrat zu separieren. Das Substrat wird poliert und erneut für den nächsten Zyklus genutzt.

*Schematischer Prozess der Diamantseparation mittels Ionenimplantation*



2

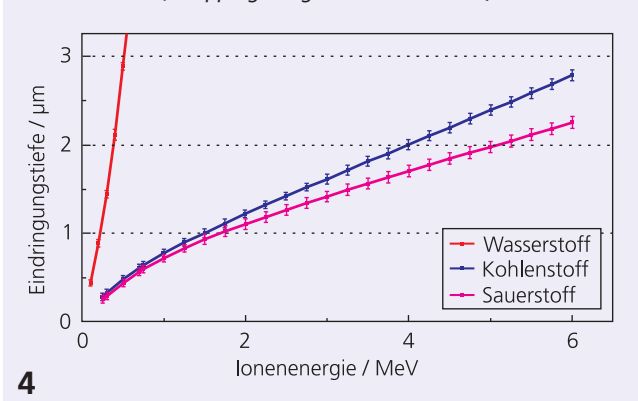


## ERGEBNISSE

Zur Vorbereitung der Experimente wurden zunächst Monte Carlo Simulationen durchgeführt, um geeignete Ionenenergien zu finden. Die Energie muss ausreichen, um eine Schädigungszone in der gewünschten Tiefe im Substratkristall zu erzeugen. Die gewünschte Eindringtiefe beträgt einige Mikrometer.

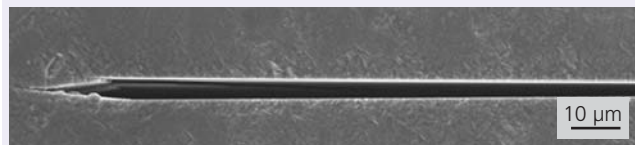
Für die Experimente wurden Ionenenergien von 500 keV für Protonen, 3 MeV für Kohlenstoff-Ionen und 3,25 MeV für Sauerstoff-Ionen gewählt. Die Nutzung von Kohlenstoff-Ionen hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen chemischen Elemente in den Diamantkristall eingetragen werden. Sauerstoff-Ionen andererseits unterstützen und beschleunigen den nachfolgenden Ätzprozess. Protonen haben eine wesentliche höhere Eindringtiefe im Vergleich zu den schwereren Ionen bei vergleichbarer Energie. Dies ist für weitere Anwendungen der Implantationstechnik von Interesse.

*Eindringtiefen von Wasserstoff-, Kohlenstoff- und Sauerstoff-Ionen in Diamantkristalle als Funktion der Ionenenergie (SRIM Monte Carlo Simulation, Stopping Range of Ions in Matter)*



Direkt nach dem Ionenimplantationsprozess sehen die bestrahlten Substrate dunkel aus. Bleibt das Substrat auch nach dem Diamantwachstum schwarz, so war das Experiment erfolgreich und die Schädigungszone kann entfernt werden. Dies erfolgt durch thermische Oxidation bei Temperaturen von 550 - 580 °C. In diesem Temperaturbereich oxidiert die graphitische Kohlenstoffphase zu CO und CO<sub>2</sub> während die Diamantphase nicht oxidiert. Abbildung 4 zeigt eine REM-Aufnahme der geätzten Schädigungszone nach dem Oxidationsprozess. Abbildung 3 zeigt CVD-Diamanten verschiedener Formen und Größen die durch den hier vorgestellten Prozess vom jeweiligen Wachstumssubstrat separiert wurden.

*REM Aufnahme durch eine Diamantsubstratkristalls. Die dunkle horizontale Linie entspricht der Schädigungszone, die durch chemisches Ätzen entfernt wurde.*



5

- 1 Herstellung von 70 Diamantkristallen in einem Plasma-CVD-Prozess
- 3 CVD-Diamanten verschiedener Form und Größe, separiert durch Ionenimplantation und thermisches Oxidieren

Die Ionenimplantationsexperimente wurden mit einem 6 MeV Van de Graaff Tandembeschleuniger an der Western Michigan University durchgeführt. Ein spezieller Probenhalter erlaubt die schrittweise Bestrahlung von Substraten mit Ausmaßen bis zu 75 mm x 75 mm (Abb. 3).

## KONTAKT

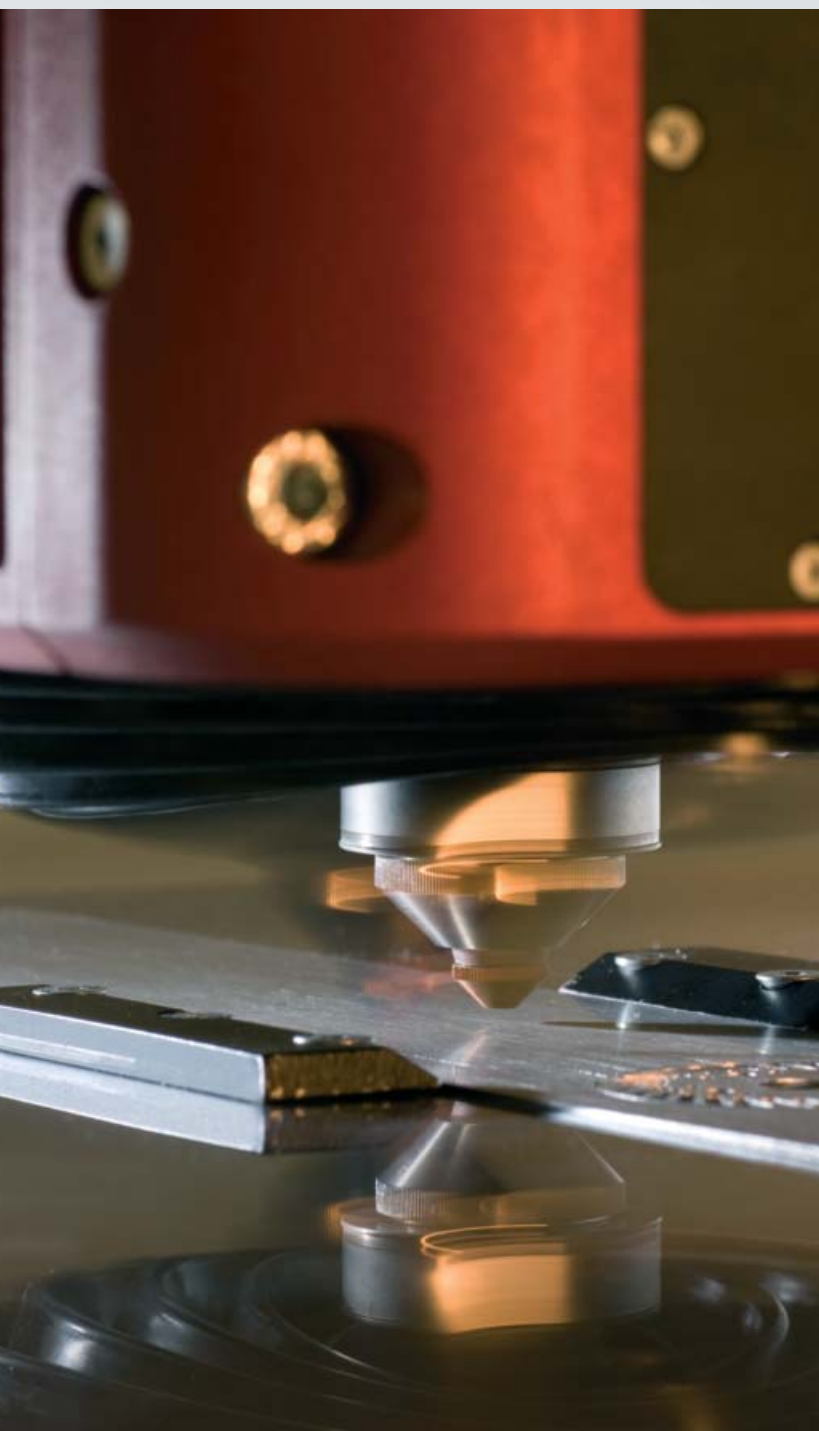
M.Sc. Michael Becker

+1 517 353 8181

mbecker@fraunhofer.org



## LASERABTRAGEN UND -TRENNEN



**Redaktion:** Herr Dr. Wetzig, das Geschäftsfeld Abtragen und Trennen hat mit Jahresbeginn einen neuen Zuschnitt bekommen. Können Sie etwas zu Hintergrund und Intention sagen?

**Dr. Wetzig:** Zum einem ist die große Bandbreite an Themen zu nennen, die das »alte« Geschäftsfeld abgedeckt hat und die vom klassischen Dickblechschneiden mit Hochleistungslasern bis zur Entwicklung von Mikrofluidikmodulen reicht. Zum anderen ist das Geschäftsfeld in den letzten 5 bis 6 Jahren um mehr als 50 Prozent gewachsen, so dass es trotz der vorhandenen Gemeinsamkeiten naheliegend war, die Forschungsthemen aufzuteilen und in diesem Zuge die Mikro-technik als eigenes Geschäftsfeld zu führen. Jedes der beiden Geschäftsfelder ist jetzt in der Lage, sich auf seine eigenen Stärken zu fokussieren, was auch an der positiven Entwicklung im Jahr 2015 abzulesen ist.

**Redaktion:** Welche Veränderungen hat es noch gegeben?

**Dr. Wetzig:** Ich freue mich sehr, dass die Gruppe Prozessauslegung und -analyse nun zu unserem Geschäftsfeld gehört. Wir arbeiten schon viele Jahre sehr eng auf dem Gebiet des Dickblechschneidens und der Remote-Bearbeitung zusammen. Jetzt haben wir die Chance, unseren Kunden ein noch größeres Spektrum anzubieten, das auch die geschäftsfeldübergreifende Simulation von laserbasierten Prozessen beinhaltet.

**Redaktion:** Wo sehen Sie für das Laserstrahlschneiden die Forschungsschwerpunkte der nächsten Jahre?

**Dr. Wetzig:** Bekanntermaßen ist Laserschneiden innerhalb der Lasermaterialbearbeitung die Anwendung mit der größten industriellen Relevanz. Uns erreichen eine Reihe von interessanten Forschungsfragen rund um das Schneiden und die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung mit Lasern. Häufige Themen sind

»Eine Erkenntnis von heute kann die Tochter eines Irrtums von gestern sein.«

Marie von Ebner-Eschenbach



#### GESCHÄFTSFELDLEITER

**DR. ANDREAS WETZIG**

☎ +49 351 83391-3229

✉ [andreas.wetzig@iws.fraunhofer.de](mailto:andreas.wetzig@iws.fraunhofer.de)

Qualitätsverbesserung beim klassischen Laserschneiden, Systeme für Prozessüberwachung und -regelung, Schneiden von Nichtmetallen mit dem Laser und die Weiterentwicklung des hochdynamischen Schneidens.

**Redaktion:** Auf der diesjährigen Lasermesse haben Sie mit ihren Partnern hochdynamische MEMS-Spiegel präsentiert. Wann kommen diese Systeme auf den Markt?

**Dr. Wetzig:** Leider kann ich noch keinen genauen Zeitpunkt nennen, da wir noch mitten in der Entwicklung und Ersterprobung stecken. Unseren Industriepartnern, die bereits hohes Interesse an der Verwendung von MEMS-Spiegeln für die dynamische Strahlformung bekundeten, werden wir im Laufe des Jahres 2016 Entwicklungsprojekte anbieten.

**Redaktion:** Und wie steht es um die Laserbehandlung weichmagnetischer Werkstoffe?

**Dr. Wetzig:** Nach wie vor sehr gut. Es geht auf der einen Seite um die Laserbehandlung sogenannter kornorientierter Elektrobleche, die im Transformatorenbau verwendet werden. Wir setzen neue wissenschaftlich-technische Ideen um, die die Effizienz von Transformatoren noch weiter steigern. Gleichzeitig sind wir dabei, neue Kunden, u. a. auch in Deutschland, zu gewinnen. Auf der anderen Seite geht es um die Laserbearbeitung von nichtkornorientierten weichmagnetischen Werkstoffen, die zum Bau von Generatoren und Motoren benötigt werden. Das Ziel ist auch hier die Effizienzsteigerung der elektrischen Maschinen. Bisher haben wir diese Technologien v. a. durch öffentlich-geförderte Projekte voran gebracht. In 2015 konnten wir dazu erstmals einen größeren Industrieauftrag eines renommierten deutschen Großunternehmens akquirieren. Es bestehen gute Chancen, dass diese Zusammenarbeit fortgeführt wird.





## KOMPETENZEN UND ANSPRECHPARTNER



*Dr. Jan Hauptmann, Abteilungsleiter High-Speed-Laserbearbeitung*  
 ☎ +49 351 83391-3236 / ✉ [jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de](mailto:jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de)

» 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 Trennen, Abtragen und Oberflächenbehandeln von Nichtmetallen auch das Entwerfen, Aufbauen und Qualifizieren hochdynamischer Bearbeitungssysteme. «



*Dipl.-Ing. Peter Rauscher, Gruppenleiter Lasersystemtechnik*  
 ☎ +49 351 83391-3012 / ✉ [peter.rauscher@iws.fraunhofer.de](mailto:peter.rauscher@iws.fraunhofer.de)

» Die Kernkompetenz der Arbeitsgruppe ist die Neu- und Weiterentwicklung von Systemtechnik, die insbesondere für das Laserschneiden, -oberflächenbehandeln und -schweißen angewendet werden kann. Es werden sowohl Software- als auch Hardwarekomponenten zur schnellen Strahlableitung und Strahlformung anwendungsspezifisch entwickelt. Bei der Verfahrensentwicklung steht die Laserstrukturierung von kornorientiertem Elektroblech für hocheffiziente Transformatoren im Mittelpunkt. «



*Dr. Jan Hauptmann, Gruppenleiter Laserschneiden Nichtmetalle*  
 ☎ +49 351 83391-3236 / ✉ [jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de](mailto:jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de)

» Das Hauptaugenmerk der Gruppe ist neben dem Lasertrennen von klassischen Kunststoffen auf die Laserbearbeitung von Verbundwerkstoffen gerichtet. Es werden Remote-Schneidverfahren zum Trennen von Faserkunststoffverbunden (FKV) entwickelt, deren Besonderheit u. a. darin besteht, Laserstrahlung unterschiedlicher Wellenlängen simultan anzuwenden. Darüber hinaus beschäftigt sich die Gruppe mit dem Laserschneiden von nichtmetallischen Werkstoffen bzw. mit der Laserbearbeitung neuartiger Hybridwerkstoffe und Hochleistungstextilien. «



*Dr. Patrick Herwig, Gruppenleiter Laserschneiden*

☎ +49 351 83391-3199 / ✉ [patrick.herwig@iws.fraunhofer.de](mailto:patrick.herwig@iws.fraunhofer.de)



» Forschungsschwerpunkte im Bereich Laserstrahlschneiden sind, neben grundlegenden Untersuchungen zum Prozessverständnis, Verfahrensentwicklungen auf dem Gebiet des Laserschmelzschneidens und -brennschneidens. So geht es beispielweise um die Verbesserung der Schneidqualität beim Trennen mit Festkörperlasern oder um die Optimierung des Laserstrahlschneidens von Elektroblechen unter Beibehaltung der magnetischen Eigenschaften. Darüber hinaus steht die Qualifizierung neuartiger Schneidverfahren wie das Remote-Laserschneiden für die Fertigungsintegration im Mittelpunkt. Für diese Aufgaben verfügt das IWS über alle gängigen Laser unterschiedlicher Wellenlänge, Leistung und Strahlqualität in Kombination mit hochdynamischen 2D- und 3D-Schneidanlagen. «

*Dr. Achim Mahrle, Gruppenleiter Prozessauslegung und -analyse*

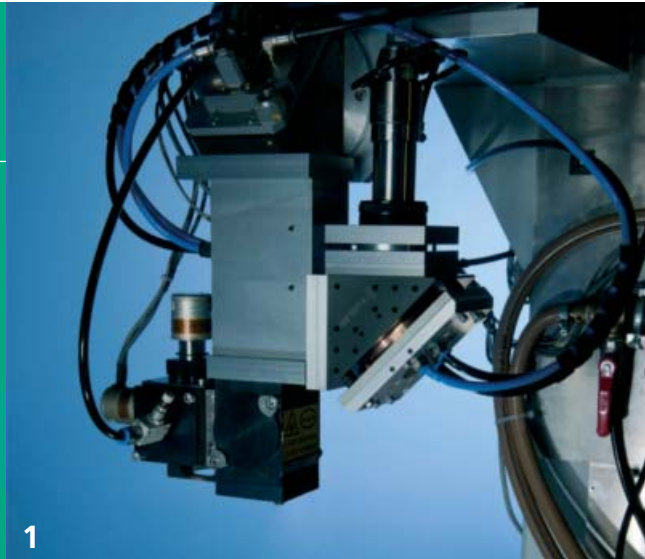
☎ +49 351 83391-3407 / ✉ [achim.mahrle@iws.fraunhofer.de](mailto:achim.mahrle@iws.fraunhofer.de)



» Auf Basis thermodynamischer Erhaltungssätze und Zustandsgleichungen erfolgt eine grundlegende Bilanzierung der untersuchten Lasermaterialbearbeitungsverfahren. Im Vergleich zum realen Prozess und konkurrierenden Technologien können Rückschlüsse auf die Energieeffizienz und erzielbare Prozesswirkungsgrade gezogen werden. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Prozessanalyse unter der Zielstellung einer Beschreibung funktionaler Abhängigkeiten zwischen Regel-, Einfluss-, Stör- und Zielgrößen eines Lasermaterialbearbeitungsprozesses. Hierfür werden sowohl numerische als auch experimentelle Untersuchungsmethoden eingesetzt. «

#### BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2015

1. Effiziente Lasermaterialbearbeitung von Faser-Kunststoff-Verbunden	82
2. Multifunktionale Ansteuerungsplattform für Laser-Remote-Applikationen	84
3. Laserschmelzschnneiden mit dynamischer Strahlformung	86
4. Strömungstechnische Optimierung von Bearbeitungsprozessen und Anlagen	88
5. Einfluss des Laserstrahlschneidens auf die Schwingfestigkeit	90



1

## EFFIZIENTE LASERMATERIALBEARBEITUNG VON FASER-KUNSTSTOFF-VERBUNDEN

### DIE AUFGABE

Hochleistungswerkstoffe, basierend auf Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) finden derzeit eine breite Anwendung in der Industrie. Neben der Luftfahrt- und Automobilindustrie setzen sich FKV zunehmend im allgemeinen Maschinenbau durch. Hierbei liegt der Fokus auf der Bereitstellung von funktions-integrativen Bauteilen.

Eine der größten Herausforderung auf dem Gebiet der FKV ist die Verbesserung und Optimierung der Herstellungs- und Bearbeitungsprozesse. Hier ist vor allem die hohe abrasive Wirkung der Kohlenstofffasern zu nennen, die zu einem extremen Werkzeugverschleiß sowohl beim Fräsen als auch beim Wasserstrahlschneiden führt. Gleichzeitig steigen die werkzeuginduzierten Schädigungen infolge von Krafteinwirkungen und dem Erreichen der Standzeit der verwendeten Werkzeuge oder Abrasivmittel. Aufgrund dieser Reglementierungen erscheint der Laser als berührungsloses und gut zu automatisierendes Werkzeug als Mittel der Wahl, um eine effiziente Bearbeitung bei gleichzeitiger Verschleißfreiheit zu gewährleisten.

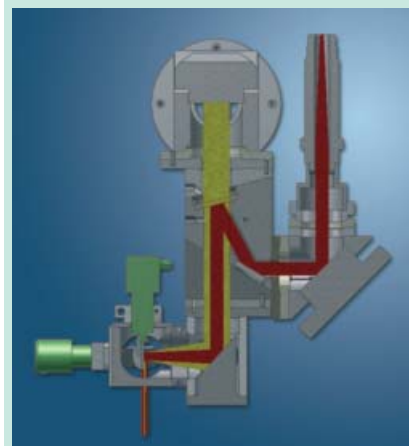
### UNSERE LÖSUNG

FKV bestehen in der Regel aus einem Faserwerkstoff und einer duroplastischen oder thermoplastischen Matrix. Beide Grundwerkstoffe zeichnen sich durch stark unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten, Verdampfungstemperaturen sowie Absorptionseigenschaften aus. Um eine effiziente und qualitativ hochwertige Bearbeitung zu ermöglichen, sind diese stark voneinander abweichenden Materialverhalten der Einzelwerkstoffe bei der Lasermaterialbearbeitung zu berücksichtigen.

Das Remote-Laserschneiden mit cw-Strahlquellen wurde bereits für die Bearbeitung von FKV qualifiziert. Die hohen Vorschubgeschwindigkeiten des Laserspots verringern die Wechselwirkungszeit zwischen Laser und Werkstoff signifikant. Dies hat eine Minimierung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit des Faseranteiles zur Folge. Soll Material von einigen Millimetern Stärke geschnitten werden, so erfolgt die Bearbeitung im »Multi-Zyklus-Betrieb«. Dabei werden pro Zyklus bis zu 500  $\mu\text{m}$  tiefe Spuren im Material verdampft und nach oben aus der Schnittfuge ausgetrieben.

Um die spezifischen Materialeigenschaften der Einzelwerkstoffe eines FKV zu berücksichtigen, hat das Fraunhofer IWS gemeinsam mit der TU Dresden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 639 ein Laserstrahlkombinationsmodul entwickelt (siehe Abb. 1 und 2). Dabei wird das Konzept verfolgt, Laserstrahlung aus zwei Strahlquellen mit den Emissionswellenlängen  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$  koaxial übereinander zu legen. Hierbei wird das optimale Absorptionsverhalten der polymeren Matrix bei Beaufschlagung mit  $\text{CO}_2$ -Strahlung ( $10,6 \mu\text{m}$ ) ausgenutzt, um diese zu verdampfen. Gleichzeitig kann durch die gute Fokussierbarkeit des Festkörperlaserstrahls (FKL,  $1,07 \mu\text{m}$ ) eine ausreichend hohe

Prinzipdarstellung der koaxialen Strahlüberlagerung



2



Intensität erreicht werden, um den Verstärkungsfaserteil zu sublimieren. Durch die wählbaren Anteile der wellenlängen-spezifischen Laserleistungen ergeben sich dabei neuartige Parametervariationen.

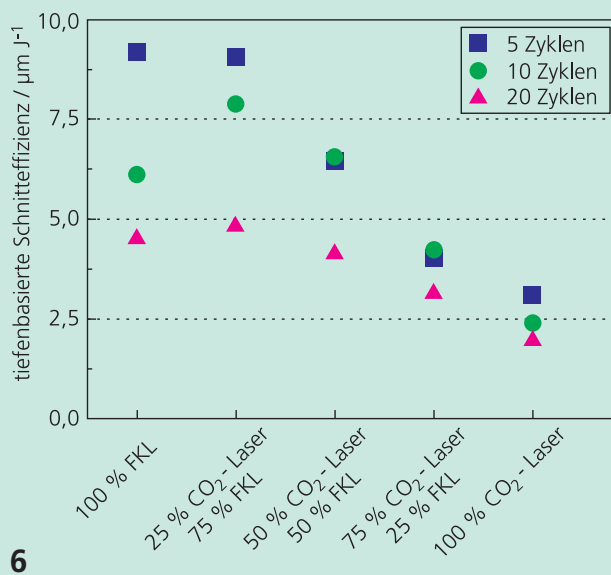
## ERGEBNISSE

Die gute Fokussierbarkeit der Festkörperlaserstrahlung führt bei gleichem optischen Aufbau zu einem um den Faktor 10 kleineren Fokusdurchmesser im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung. Damit einher geht eine Verkleinerung der Wechselwirkungszone sowie Verkürzung der Wechselwirkungszeit zwischen Laserstrahl und Werkstoff. An einem FKV, basierend auf hochmoduliger Kohlenstofffaser und Epoxydharz mit einem Faservolumengehalt von ca. 60 Prozent, kann die Effizienzsteigerung nachgewiesen werden. Durch die hohe Intensität der Festkörperlaserstrahlung sowie die kurze Wechselwirkungszeit sind hochwertigere Schnitte im Vergleich zur Bearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung möglich (siehe Abb. 3 und 4).

Durch Anwendung von synchroner Laserstrahlung mit einem Anteil von 25 Prozent CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung kann die tiefenbezogene Schnitteffizienz der Bearbeitung weiter gesteigert werden (Abb. 6). Die Aufweitung der Schnittkerbe durch die Verwendung des CO<sub>2</sub>-Laseranteiles ist ursächlich für die höheren Abtragsvolumina. Durch die Wechselwirkung der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung mit dem Matrixmaterial wird dieses thermisch zersetzt. Damit einher geht eine lokale Anhebung des Faservolumenanteils, was zu einem höheren Anteil an absorbiertem Festkörperlaserstrahlung im Verstärkungsfaserteil innerhalb der Wechselwirkungszone führt. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass durch die breite Schnittkerbe die Festkörperlaserstrahlung zu einem geringen Anteil mit den Schnittkerbflanken wechselwirkt. Dies führt zu einem geraderen Schnitt und zu einer Vergrößerung der Schnitttiefe (Abb. 5 und 6).

Die Kombination von Festkörper- und CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung erweitert das Parameterfeld für eine anforderungsgerechte Bearbeitung von FKV. Der erhöhte systemtechnische Aufwand lässt sich durch eine vielversprechende Verbesserung der Bearbeitungsergebnisse rechtfertigen.

Schnitteffizienz bei 1200 W Gesamtlaserleistung und 1 m s<sup>-1</sup> Vorschubgeschwindigkeit, tiefenbasiert



- 1 Laserstrahl-Kombinationsmodul mit Scanner
- 3-5 Querschliffe von Schnittfugen in CFK nach dem Remote-Laserstrahlschneiden mit CO<sub>2</sub>-Laser (3), Festkörperlaser (4) und einer Wellenlängenkombination mit 25 Prozent CO<sub>2</sub>-Laseranteil (5)

## KONTAKT

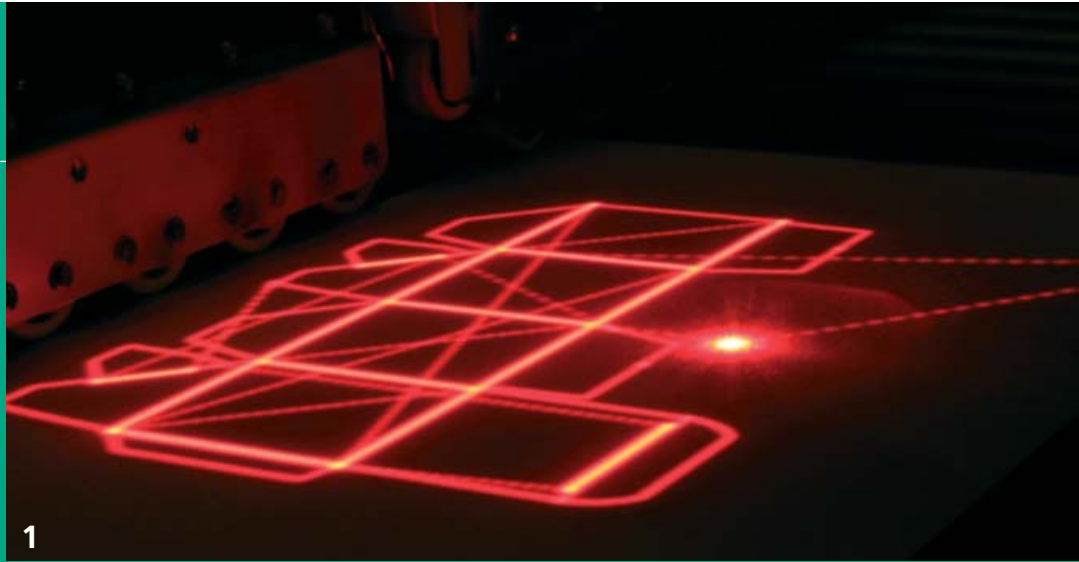
Dipl.-Ing. Andreas Fürst

+49 351 83391-3544

andreas.fuerst@iws.fraunhofer.de







# MULTIFUNKTIONALE ANSTEUERUNGSPLATTFORM FÜR LASER-REMOTE-APPLIKATIONEN

## DIE AUFGABE

Galvanometerscanner werden aufgrund ihrer herausragenden Dynamik im Bereich der Lasermaterialbearbeitung sowohl für sehr schnelle Konturbewegungen als auch zur hochfrequenten Strahlformung verwendet. Der Einsatz dieses Strahlpositionierverfahrens erhöht die Effizienz und Flexibilität von Füge- und Trennprozessen, was eine Verringerung der Fertigungskosten zur Folge hat. So kann bei Substitution von Stanzprozessen durch das Laser-Remote-Verfahren auf die zeitaufwändige Herstellung von formgebundenen Werkzeugen verzichtet werden. Auch die Zeit von der Zeichnung bis zum ersten Prototypen oder Bauteil sinkt durch die Verwendung des frei positionierbaren Laserstrahls dramatisch.

Zugleich werden viele Prozesse wie das Schweißen von Mischverbindungen durch den Einsatz hochdynamischer Galvanometerscanner erst möglich und eröffnen neue Chancen der Lasermaterialbearbeitung. Eine hochfrequente, scannerbasierte Strahlformung mit kleinen Oszillationsamplituden erlaubt die gezielte Beeinflussung der Schmelzbadgröße und -dynamik, wodurch Ausgasungs- und Erstarrungsprozesse optimiert werden können.

Essentiell für diese Anwendungen ist eine leistungsfähige und anwendungsspezifische Steuerungssoftware. Da die Bedürfnisse an eine solche Lösung je nach Kunde und Prozess stark variieren, muss diese maximale Flexibilität und Skalierbarkeit bieten. Die Herausforderung besteht in der produktunabhängigen Integration von Galvanometerscannern in ein breites Spektrum von Steuerungsanlagen zur Realisierung verschiedenster Prozesse und Lösungen.

## UNSERE LÖSUNG

Durch den Einsatz modernster objektorientierter Entwicklungsverfahren und einer skalierbaren Softwarearchitektur wurde am Fraunhofer IWS Dresden eine Plattform entwickelt, welche die Steuerungs- und Prozesslogik abstrahiert und von den verwendeten Hardwarekomponenten trennt. Somit ist die Entwicklung komplexer Arbeitsschritte und Prozesssteuerungen hardwareunabhängig möglich.

Speziell im industriellen Umfeld kommen zahlreiche Systeme unterschiedlicher Hersteller zum Einsatz. Angefangen von den Steuerungsanlagen, über die Galvanometerscanner selbst bis hin zu Kameras für die Bildverarbeitung – um mit diesen Komponenten zu interagieren – ist ein individueller Anpassungsaufwand nahezu unvermeidbar. Durch die entkoppelte Betrachtung der Hardware kann dieser jedoch auf die Implementierung weniger Schnittstellen reduziert werden, wodurch sich Entwicklungszeit und Kosten stark verringern lassen, während Flexibilität und Qualität durch einheitliche Vorgehensweisen und Softwaremodule erhöht werden. Zudem ermöglicht dieses Vorgehen eine einmalig entwickelte Laser-Remote-Applikation mit überschaubarem Zeit- und Anpassungsaufwand in nahezu jedes Kundensystem zu integrieren, zu modifizieren und zu erweitern.

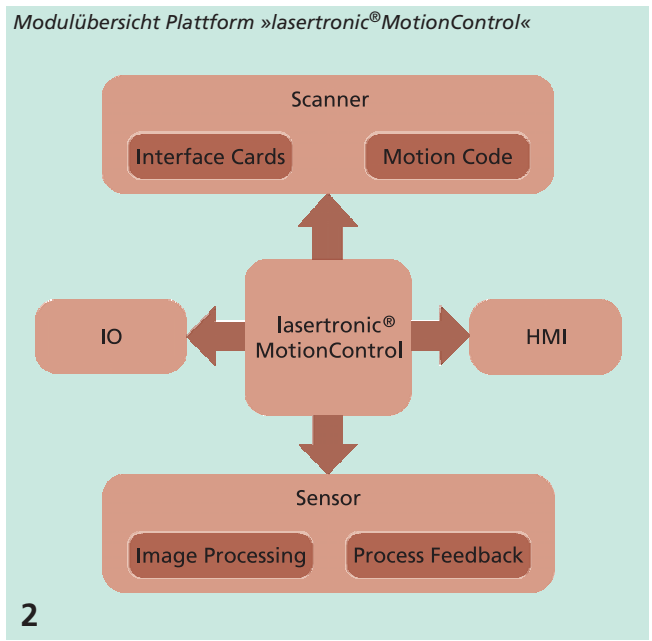
## ERGEBNISSE

Die IWS-Anwendungsplattform »lasertronic®MotionControl« besteht aus 4 grundlegenden Bausteinen (siehe Abb. 2). Das Modul »Scanner« beinhaltet die Ansteuerung der Scanner-elektronik durch Ansteuerkarten unterschiedlicher Hersteller. Die Anbindung der Hardware erfolgt dynamisch über ein Plug-In und ist somit vollkommen produktunabhängig. Die

Bewegungsbahn des Scanners wird programmiert und graphisch visualisiert. Hierfür stehen bereits verschiedene Befehlssätze zur Verfügung wie z. B. der in der NC-Welt gängige G-Code, wobei Erweiterungen kundenspezifisch möglich sind.

Die Kommunikation mit peripheren Komponenten wie z. B. speicherprogrammierbaren Steuerungen wird über das Submodul »IO« realisiert. Unterstützt werden dabei alle gängigen Bussysteme sowie digitale und analoge Ein- und Ausgänge.

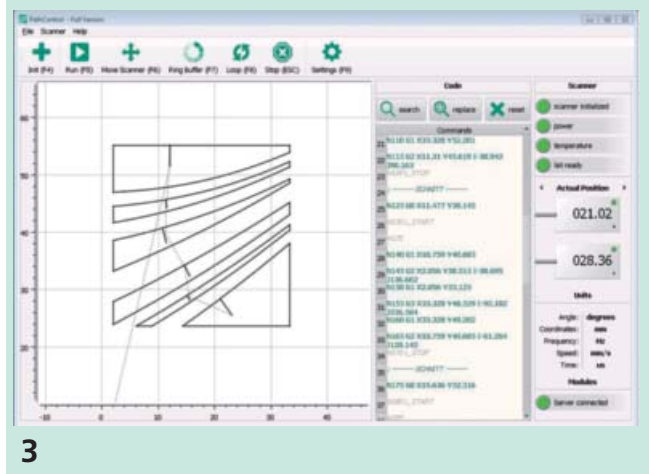
Ein weiteres Modul bildet »Sensor«, welches die Anbindung von Prozess-Sensorik »Process Feedback«, die Ansteuerung von Kameras sowie die Auswertung der gewonnenen Kamerabilder »Image Processing« unterstützt. Die daraus gewonnenen Informationen können z. B. zur Bahnkorrektur des Scanners oder zur Prozessverifikation verwendet werden.



Die »HMI« bietet neben Editoren für die Bearbeitung der Befehlslisten auch interaktive grafische Elemente zur Visualisierung der Schnittmuster. Weiterhin können Kamerabilder integriert, sowie die dazugehörigen Daten der Bildverarbeitung

dargestellt werden. Zur übersichtlichen Überwachung der Hardwarekomponenten steht eine Vielzahl an Anzeigekomponenten zur Verfügung. Für die Realisierung von Laser-Remote-Applikationen ist am Fraunhofer IWS Dresden die Software »PathControl« entstanden. Diese bietet Funktionalitäten zum Erstellen, Visualisieren und Editieren von Bearbeitungsprogrammen sowie deren Ausführung mit dem verwendeten Galvanometer-scanner (Abb. 3). Verschiedene Anwendungen mit diversen Produkten etablierter Hersteller haben das Potenzial einer multifunktionalen Ansteuerungsplattform aufgezeigt und das Konzept der strikten Entkopplung von Hard- und Software erfolgreich verwirklicht.

Softwaresystem zur Realisierung von Laser-Remote-Applikationen



1 Hochdynamisches Laserschneiden und Laserrillen von Kartonagen

KONTAKT

Dipl.-Ing. (FH) Karsten Zenger

+49 351 83391-3551

karsten.zenger@iws.fraunhofer.de





# LASERSCHMELZSCHNEIDEN MIT DYNAMISCHER STRAHLFORMUNG

## DIE AUFGABE

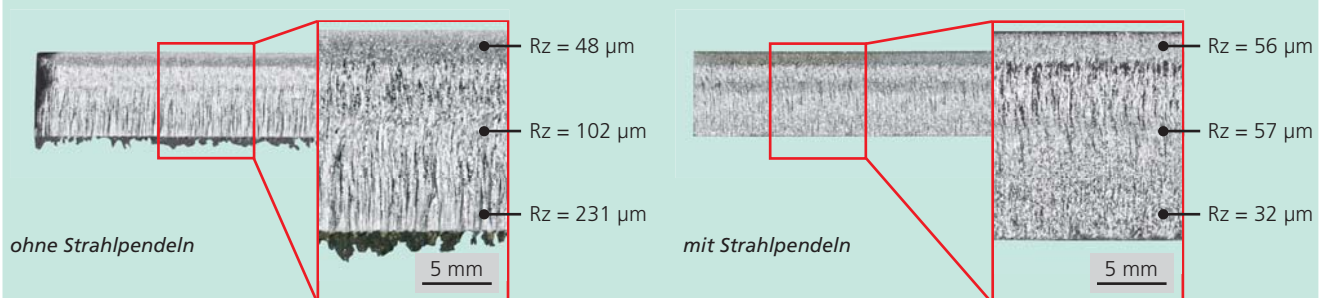
Gute Schnittqualität und maximale Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei geringen Investitions- und Betriebskosten gelten bei Laserschneidanlagen als kaufentscheidendes Argument. Durch deutlich höhere Schneidgeschwindigkeiten im Dünnschleibereich und die Möglichkeit der Nutzung von Lichtleitkabeln sind Faser- und Scheibenlaser als Strahlquelle für Schneidanwendungen bereits führend. Optimierungsbedarf besteht bei Blechdicken größer 4 mm. Hier sind im Vergleich zum CO<sub>2</sub>-Laser eine erhöhte Kantenrauheit und eine stärkere Gratbildung zu beobachten. Insbesondere letztgenannter Aspekt muss durch geeignete Lösungsansätze der Prozessoptimierung verbessert werden, um die Vorrangstellung der Festkörperlaser als universell einsetzbare Strahlquelle im Schneidmarkt weiter auszubauen. Ein Optimierungsansatz lässt sich durch die Abhängigkeit des Absorptionsgrades vom lokalen Einfallswinkel der Laserstrahlung auf der Schmelzfront ableiten. Dementsprechend sind mittels Modifikationen der Strahlgeometrie und der Intensitätsverteilung gezielte Anpassungen der Absorptionsverhältnisse möglich. Die bisher verfolgten Ansätze der statischen Strahlformung beruhen darauf, applikationsspezifische Intensitätsprofile durch Skalierung des Laserstrahls

einzustellen, sodass Verbesserungen bezüglich der Prozesseffizienz und/oder der Schnittkantenqualität erreicht werden. Umfangreiche Parameterstudien zu diesem Ansatz liefern jedoch nur geringfügige Qualitätsverbesserungen im Vergleich zu Resultaten von Standardschneidmaschinen.

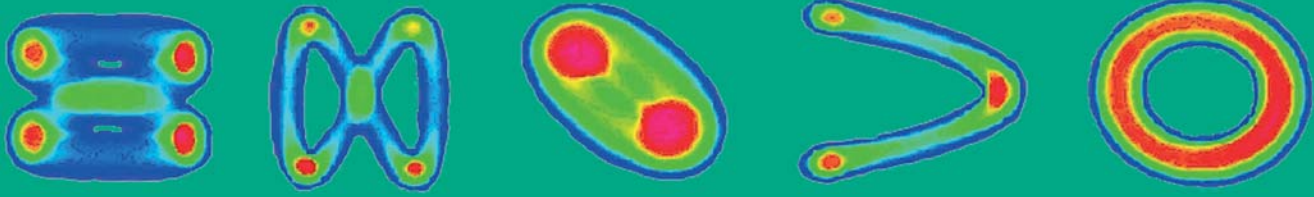
## UNSERE LÖSUNG

Ein neuer Ansatz für die Prozessbeeinflussung beim Schneiden von Dickblech ist die dynamische Strahlformung. Die Grundidee besteht darin, mittels zeitlicher und räumlicher Modifikation der Energiedeposition die Vorteile hoher Fokusintensitäten weiterhin zu nutzen und die Absorption positiv zu verstärken. Hierzu wird ein konventioneller Schneidkopf mit einem Hochleistungsscannersystem kombiniert (Abb. 1). Mittels einer speziell entwickelten Ansteuerlösung ist am Fraunhofer IWS Dresden der Ausgangspunkt für frei definierbare Funktionen des Ablenssystems im Kilohertz-Bereich geschaffen. Eine Vielzahl ansprechbarer Freiheitsgrade steuert die Oszillation des Laserstrahles (Abb. 3) und bietet in Ergänzung zu den konventionellen Schneidparametern, wie beispielsweise Laserleistung, Vorschub, Fokuslage und Gasdruck eine zusätzliche Möglichkeit der Prozesssteuerung.

Schnittkante von Stahl X5CrNi18-10, Blechdicke 12 mm, geschnitten mit 3 kW Faserlaser



2



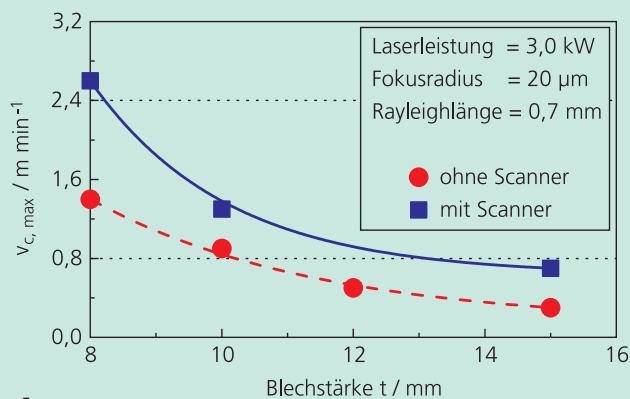
### 3

#### ERGEBNISSE

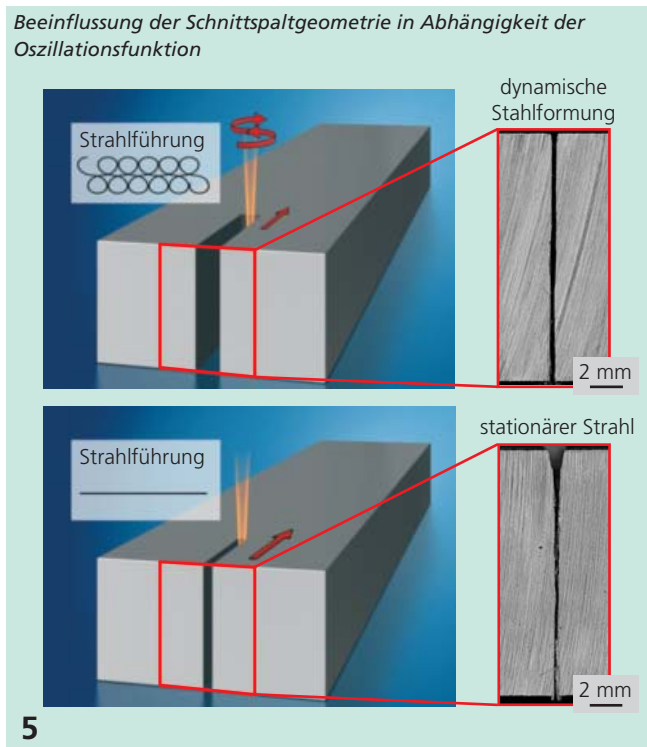
Unter Nutzung der dynamischen Strahlformung lassen sich deutliche Effekte bezüglich der Performanz erzielen. Maßgebliche Ergebnisgrößen sind die erreichbare Schneidgeschwindigkeit, die Schnittspaltgeometrie sowie die qualitätsbestimmenden Merkmale der Schnittkante, welche die Oberflächenrauheit und mögliche Gratanhafungen betreffen. Parameterstudien mit einer marktüblichen Laserleistung von 3 kW haben eine deutliche Minimierung der Gratanhftung (Abb. 2) und eine veränderte Riefenstruktur bewiesen. Vergleichende Betrachtungen mit identischer Leistung zwischen konventionellem und scannergestütztem Schneiden zeigen eine Homogenisierung der Rauheit über die gesamte Schnittkante sowie eine Reduzierung der absoluten Rautiefe. Ähnliche Resultate wie bei der dynamischen Strahlformung beschrieben, können in Standardschneidmaschinen nur durch eine signifikante Erhöhung der Laserleistung erzielt werden. Neben Qualitätsverbesserungen sind je nach gewähltem optischem Standardaufbau auch Steigerungen der Schnittgeschwindigkeit (Abb. 4) und/oder eine Beeinflussung der Schnittspaltgeometrie (Abb. 5) mit verbesserter Parallelität der Schnittkanten realisierbar. Die Prozessentwicklung des scannergestützten Schneidens erzielt mit einer Brennweite sowohl im Dünublech-, als auch im Dickblechbereich eine sehr

gute Schneidperformanz, was für Standardschneidmaschinen bisher nur mit physischer Anpassung der Brennweite möglich ist. Die Herausforderung dynamischer Strahlformung besteht in der anwendungsspezifischen Ermittlung optimaler Strahlformungsparameter. Mittels verfügbarer Prozesssensorik ist der Auswerteaufwand vermindert und eine kundenspezifische Optimierung des Schneidergebnisses zielgerichtet möglich.

Vergleich der Schneidgeschwindigkeiten beim Laserschneiden mit und ohne Scannermodul



### 4



### 5

- 1 Schneidkopf mit Scannermodul
- 3 Strahlprofile verschiedener Oszillationsfunktionen

#### KONTAKT

M.Eng. Cindy Goppold

+49 351 83391-3542

cindy.goppold@iws.fraunhofer.de





# STRÖMUNGSTECHNISCHE OPTIMIERUNG VON BEARBEITUNGSPROZESSEN UND ANLAGEN

## DIE AUFGABE

In der Lasermaterialbearbeitung werden Gase in vielen Aufgabenbereichen eingesetzt. Als Schutzgase dienen sie der Abschirmung der Prozesszone von der umgebenden Atmosphäre. Als Prozessgase erfüllen sie wesentliche Aufgaben für die technische Realisierbarkeit eines Bearbeitungsprozesses, wie z. B. den Materialaustrieb beim Laserstrahlschneiden. Zusätzlich erfolgt ein vielfältiger Einsatz als Sekundärgas zum Schutz der eingesetzten Bearbeitungsoptiken und zur Reinhaltung der Raumluft in Bearbeitungskabinen. Letzterer Aspekt ist nicht nur unter arbeitsschutzrechtlichen Kriterien von Bedeutung, sondern kann auch maßgeblich die Prozessstabilität und die Bearbeitungsqualität beeinflussen.

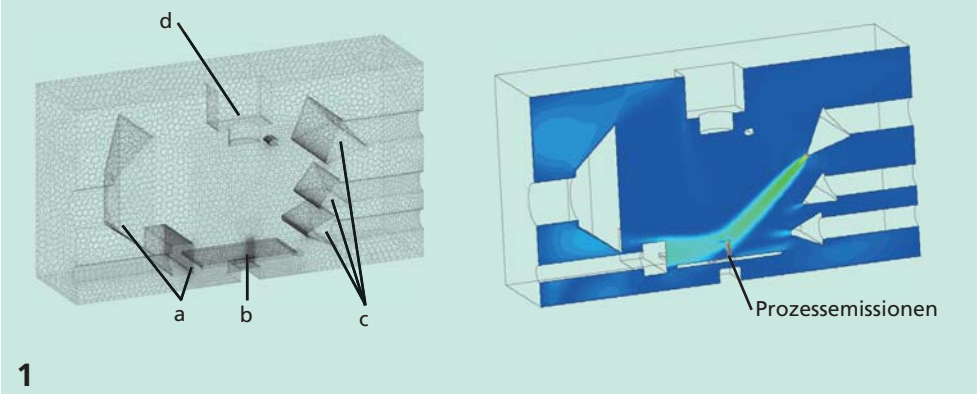
Den vorgenannten Anwendungsbeispielen ist gemein, dass Gasströmungen für einen gegebenen Einsatzzweck dimensioniert und möglichst optimiert werden müssen. Hierbei steht nicht nur die angestrebte Funktion sondern häufig auch der Gasverbrauch als kostenrelevante Größe im Fokus des Interesses. Die technische Auslegung der Anlagen und die Analyse und Optimierung der sich ergebenden Strömungen werden jedoch erschwert durch deren Komplexität und durch die eingeschränkten Möglichkeiten der Visualisierung und Messung direkt im Bearbeitungsprozess. Hier sind alternative Lösungen gefragt.

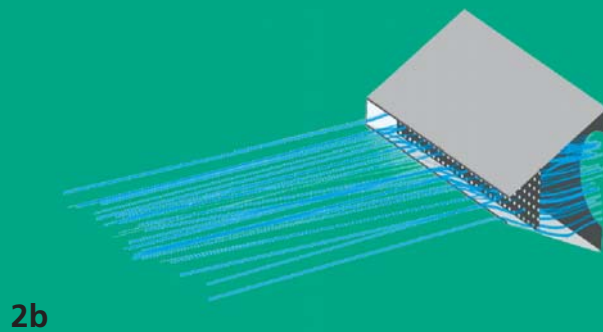
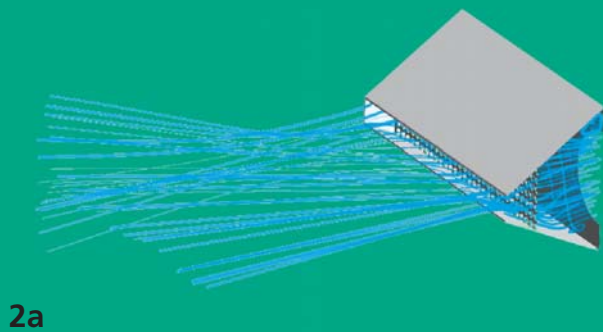
## UNSERE LÖSUNG

Eine Möglichkeit ist die Simulation der Strömungsverhältnisse mit problemangepassten numerischen Modellen unter Nutzung leistungsfähiger kommerzieller CFD-Software an. Aufgrund der hinreichend genauen Beschreibung des Zustandsverhaltens von Gasen können hierbei in der Regel eine hohe Vorhersagegenauigkeit sowie eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen erwartet und erreicht werden.

Beispielgebend zeigt Abbildung 1 das CFD-Modell einer Demonstrationsanlage zum Remote-Laserstrahlschweißen. Damit wird am Fraunhofer IWS Dresden die Wirkung unterschiedlicher raumlufttechnischer Komponenten auf die Ausbreitung und Verteilung der induzierten Prozessemissionen untersucht. Um die effiziente Durchführung umfangreicher Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien im Rahmen von Methoden der statistischen Versuchsplanung zu ermöglichen, wurde auf die Parametrisierbarkeit von Geometrie- und Netz-erstellung sowie die automatische Steuerung des gesamten Simulationsprozesses Wert gelegt.

Modell einer Remote-Laserbearbeitungskammer mit problemangepasster Vernetzung: (a) Abluftkomponenten, (b) Prozesszone, (c) Zuluftkomponenten, (d) Remote-Laserbearbeitungskopf

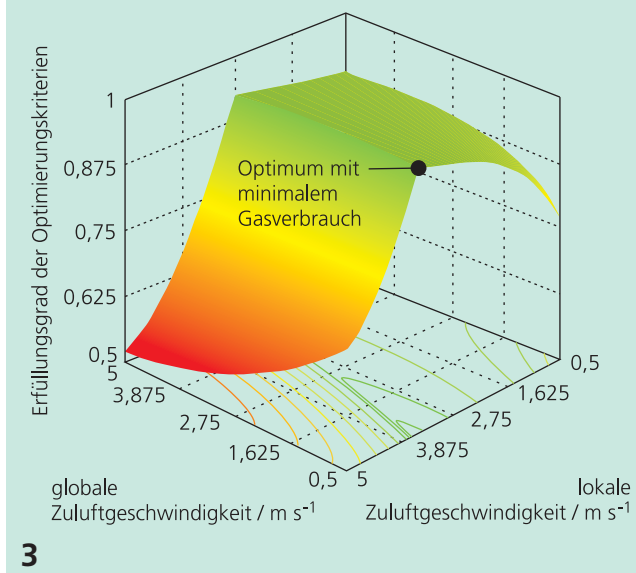




## ERGEBNISSE

Die Modellierung der im Prozess auftretenden Gase erfolgt über ein Mehrkomponentenmodell. Hierbei wird die Zuluft als Luft bei Umgebungsbedingungen (Atmosphärendruck, Raumtemperatur) modelliert, während die Prozessemissionen als Eisendampf bei Verdampfungstemperatur in das Berechnungsgebiet eingeführt werden. In dem in Abbildung 1 dargestellten Anwendungsfall werden der Transport der Spezies durch die Bearbeitungskabine sowie Wärmetransportvorgänge berücksichtigt. Nicht modelliert werden Phasenübergänge, Partikelbildungsmechanismen und chemische Reaktionen. Als Zielgröße zur qualitativen Bewertung unterschiedlicher Parameterkonstellationen wird die räumliche Ausdehnung der Prozessemissionen im Strahlengang des Lasers berechnet und ausgewertet (Abb. 1, rechts).

*Erfüllungsgrad der Optimierungskriterien in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit der Zuluftkomponenten*



Von besonderer Bedeutung für die Vorhersagegenauigkeit solcher globalen Raumlufthmodelle ist eine detaillierte strömungstechnische Analyse der verwendeten Komponenten (Abb. 2). Die Ergebnisse dienen einerseits der Evaluierung der Baugruppen als Eingangsgröße für die Kabinensimulation und andererseits der individuellen Optimierung der Komponenten. Mit dem beispielhaft vorgestellten Simulationsmodell wurden auf der Grundlage von Methoden der statistischen Versuchsplanung umfangreiche numerische Versuchsreihen realisiert.

In einem ersten Schritt wurden zahlreiche geometrische und strömungstechnische Faktoren bezüglich ihrer Wirkung auf das Systemverhalten untersucht und die Haupteinflussgrößen identifiziert. Im weiteren Verlauf erfolgte eine statistisch signifikante Formulierung des Systemverhaltens durch ein komplexes nichtlineares Regressionsmodell. Anhand dessen wurde eine Optimierung bezüglich der Prozessparameter durchgeführt (Abb. 3). Unter Annahme einer im Bearbeitungsvorgang akzeptierbaren Ausdehnung der Prozessemissionen konnte hierbei ein deutliches Potenzial zur Reduzierung des Gasverbrauchs im Vergleich zu bestehenden Anlagenkonzepten festgestellt werden.

*2 Zuluftdüse mit integriertem Lochblech; Lochdurchmesser (a) 8 mm, (b) 4 mm*

## KONTAKT

Dipl.-Math. Madlen Borkmann

+49 351 83391-3720

madlen.borkmann@iws.fraunhofer.de





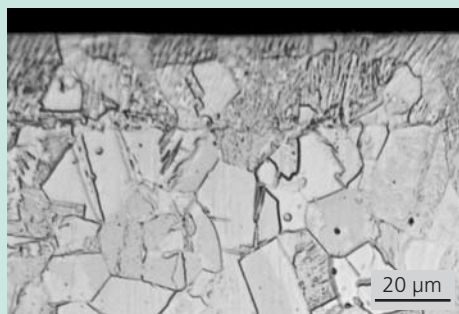
# EINFLUSS DES LASERSTRAHLSCHNEIDENS AUF DIE SCHWINGFESTIGKEIT

## DIE AUFGABE

Das Laserstrahlschneiden stellt wegen der hohen Materialausnutzung, Schnittgeschwindigkeiten und Flexibilität sowie der geringen Materialdeformation im Bereich der Schnittkante ein hoch effizientes Verfahren dar. Gleichwohl kommt es mit zunehmender Blechdicke zur Ausbildung eines signifikanten Oberflächenreliefs auf der Schnittfläche und durch den thermischen Eintrag im Material zu mikrostrukturellen Veränderungen im oberflächennahen Bereich (Abb. 2). Bei nicht ausreichend angepasster Einstellung der Schneidparameter erstarrt ein Teil des ansonsten durch das Schneidgas ausgetriebenen Schmelzgutes an der unteren Schneidkante und bildet dort eine makroskopische Kerbe in Form einer Gratanhftung aus.

Zur Herstellung von Bauteilen, die einer statischen und/oder zyklischen mechanischen Belastung ausgesetzt sind und eine sicherheitsrelevante Funktion übernehmen, kommt das Verfahren deshalb bisher nicht zur Anwendung. Die Mikro- und Makrokerben der Schnittkante führen zu einer lokalen Span-

*Wärmeeinflusszone an der Schneidkante*



nungsüberhöhung und beeinflussen die Schwingfestigkeit im Bereich der klassischen Dauerfestigkeit.

Derzeit liegen keine experimentellen Daten vor, die eine zuverlässige Abschätzung des Einflusses von Oberflächenrelief und Gratanhftung beim Laserstrahlschneiden auf die Festigkeit erlauben. Hier setzen die Forschungsarbeiten des Fraunhofer IWS Dresden an.

## UNSERE LÖSUNG

Zur Bestimmung des Einflusses des Laserstrahlschneidprozesses auf die Schwingfestigkeit wurden Wechselverformungsversuche für verschiedene Schnittqualitäten an Blechen aus dem metastabilen Austenitstahl 1.4301 durchgeführt. Mit dem Laserstrahlschneiden lässt sich der Werkstoff zeit- und kostengünstig bearbeiten. Die geometrischen und metallurgischen Veränderungen an der Schnittkante werden u. a. durch die Ausbildung hochschmelzender Oxidphasen an der Oberfläche beeinflusst, die ihrerseits durch die Legierungszusammensetzung bestimmt werden. Eine Prozessoptimierung zur Verbesserung der Schwingfestigkeit setzt voraus, dass die Wechselwirkung zwischen geometrischer Unstetigkeit (Gratbildung), Härtegradient (infolge Wärmeeintrag u. Gefügeumwandlung) und Einfluss der Oberflächenqualität verstanden ist.

Eine besondere Herausforderung bei der Charakterisierung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschnittener Proben liegt in der vergleichsweise großen Streuung der Versuchsergebnisse. Zurückführen lässt sich das vor allem auf die stark zerklüftete Oberflächenstruktur der Schnittkante. Diesem Umstand begegnet man am IWS durch eine ausreichend hohe Anzahl an Versuchsergebnissen. Das lässt sich jedoch nur durch die am IWS verfügbaren Hochfrequenz-Ermüdungsprüfstände in einem zeitlich vertretbaren Rahmen realisieren (Abb. 3).

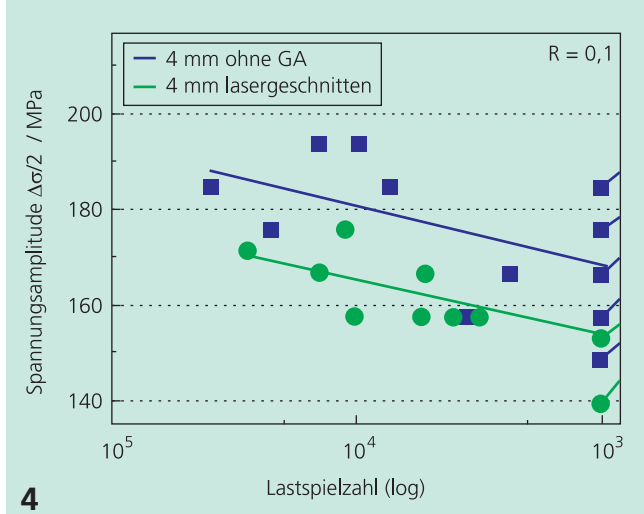


## ERGEBNISSE

In Abhängigkeit von der Blechdicke stellen sich verschiedene Oberflächenrauheiten auf der Schnittkante ein. Dies spiegelt sich unmittelbar in den erzielbaren Schwingfestigkeiten wider. Die Ermüdungsversuche wurden im Zugschwellbereich durchgeführt, da die Bruchflächen bei dieser Beanspruchungsart in der Regel einen eindeutigeren Schluss auf die rissauslösenden Merkmalsgrößen zulassen. Für eine Grenzlastspielzahl von  $N = 10$  Mio. bei einer 50-prozentigen Ausfallwahrscheinlichkeit variiert die Schwingfestigkeitsamplitude der lasergeschnittenen Proben bei Blechdicken von 2 bis 6 mm zwischen 154 und 166 MPa. Die Rissinitiierung geht hierbei in der Regel von der Gratanhftung aus (Abb. 5), die in ihrer geometrischen Gestalt nahezu einem technischen Anriss gleich kommt.

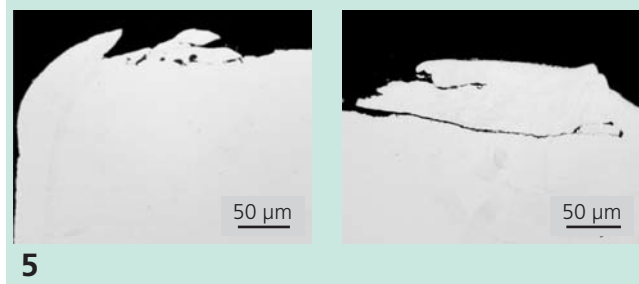
Um den Optimierungsprozess des Schneidprozesses zu simulieren, wurde in einer weiteren Versuchsreihe mit einem 4 mm dicken Blech nach dem Laserschneiden die versagenskritische Gratanhftung abgearbeitet, so dass nun lediglich noch das Oberflächenrelief und die Wärmeinflusszone wirksam werden konnten. Diese Maßnahme führte zu einer Erhöhung der zulässigen Schwingfestigkeit um ca. 10 Prozent (siehe Abb. 4).

Schwingfestigkeit von lasergeschnittenen Ermüdungsproben aus dem Werkstoff 1.4301 mit und ohne Gratanhftung (GA)



Im Rahmen der hier präsentierten Voruntersuchungen zum Einfluss einer Laserschneidkante auf die Schwingfestigkeit von Blechen aus 1.4301 kam erstmalig ein neuer Hochfrequenz-Ermüdungsprüfstand eines Schweizer Prüfmaschinenherstellers zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um einen Resonanzpulsationsprüfstand, der sogenannten Gigaforte, welche Versuche bei einer Prüffrequenz von rund 1000 Hertz erlaubt.

Gratanhftungen an der Schneidkante



Das bisher so nicht am Markt verfügbare Prüfstandskonzept erlaubt aufgrund der realisierbaren Prüffrequenz eine signifikante Reduzierung von Prüfzeiten. Grenzlastspielzahlen bis 100 Mio. Lastwechsel können nun in circa 1 bis 2 Tagen erreicht werden. Bisher waren derartige Laufzeitverkürzungen nur durch die innovative, aber auf limitierte Probengeometrien beschränkte Ultraschall-Ermüdungsprüftechnik möglich, die ebenfalls am IWS zum Einsatz kommt.

- 1 Laserschmelzscheiden
- 3 1000-Hz Resonanzpulsationsprüfstand

## KONTAKT

Prof. Dr. Martina Zimmermann

+49 351 83391 3573

martina.zimmermann@iws.fraunhofer.de





## GENERIEREN UND DRUCKEN



**Redaktion:** Herr Prof. Leyens, die generative Fertigung bahnt sich mit großen Schritten ihren Weg in die industrielle Fertigung. Wo sehen Sie die wesentlichen Herausforderungen?

**Prof. Leyens:** Bei der generativen Fertigung entstehen Werkstoff und Bauteil während des Prozesses gleichzeitig. Stand in früheren Jahren im Zusammenhang mit dem »rapid prototyping« noch die Abbildung eines Geometriemusters oder Modells im Vordergrund, bedeutet die Einführung der generativen Fertigung in die industrielle Produktion, dass auch die geforderten funktionalen Eigenschaften des Bauteils erfüllt werden. Dies stellt besondere Anforderungen an Herstellungsprozess und Prozesskontrolle und setzt eine profunde Kenntnis der Möglichkeiten zur Beeinflussung der Werkstoff- und Bauteileigenschaften durch die generative Fertigung voraus. Momentan gibt es weltweit nur wenige Beispiele, bei denen eine durchgängige Kenntnis der additiven Prozesskette zu Produkten höchster Qualität geführt hat. Im IWS arbeiten wir mit unseren Partnern aus Wissenschaft und Industrie an Lösungen für Produkte, die bei höchster geometrischer Komplexität industrietaugliche Eigenschaftskombinationen aufweisen.

**Redaktion:** Welche Aufgabe übernimmt das kürzlich von Ihnen eröffnete »Zentrum für Generative Fertigung« Dresden?

**Prof. Leyens:** Es gibt eine fast unüberschaubare Vielzahl generativer Fertigungsverfahren, einige hauptsächlich für spezielle Anwendungen, andere sind für unterschiedliche Applikationen. Darüber hinaus existiert mit den Kunststoffen, Metallen und Keramiken die gesamte Palette der Struktur- und Funktionswerkstoffe, die für eine potenzielle Anwendung infrage kommen. Am »Zentrum für Generative Fertigung« Dresden, das in enger Kooperation mit der Technischen Universität Dresden im Rahmen des Dresden concept betrieben wird, bieten wir unseren Kunden verfahrens- und werkstoffübergreifende Kompetenzen an.

»Es genügt eben nicht, dass Technik gut funktioniert. Sie muss auch in die Welt passen.«

Gero von Randow



#### GESCHÄFTSFELDLEITER

**PROF. CHRISTOPH LEYENS**

☎ +49 351 83391-3242

✉ christoph.leyens@iws.fraunhofer.de

So lassen sich die bestmöglichen Produktlösungen entwickeln. Unseren Kunden und Partnern stehen modernste Forschungsgeräte zur Verfügung, die die Bauteilherstellung bis hin zur Charakterisierung und Prüfung, z. B. mittels zerstörungsfreier Computertomografie ermöglichen.

**Redaktion:** Welche Fortschritte konnten Sie beim Drucken von Funktionswerkstoffen erzielen?

**Prof. Leyens:** Kürzlich gelang es uns, mittels Dispenserdruck einen kompletten thermoelektrischen Generator auf einer flexiblen Trägerfolie zu erstellen. Schon bei geringen Temperaturdifferenzen kann der Generator eine elektrische Spannung erzeugen, welche ausreicht, um z. B. Sensoren mit elektrischer Energie zu versorgen. Diese wiederum können an unterschiedlichsten Komponenten von Fertigungsanlagen aufgebracht werden und die Basis für ein Sensornetzwerk bilden, das eine bessere Kommunikation der einzelnen Maschinenteile untereinander gewährleistet. Ein wichtiger Beitrag für Industrie 4.0.

**Redaktion:** Diese Vernetzung wird doch aber riesige Datenmengen erzeugen. Wie soll das Problem gelöst werden?

**Prof. Leyens:** Die Echtzeitanalyse von großen Datenmengen, deren Vergleich mit bestehenden Datenbanken und die Ablage in einer Form, dass ein schneller Zugriff möglich ist, stellt die große Herausforderung für unsere neuen Forschungsaktivitäten im Bereich »Big Data« dar. Hier lernen wir derzeit von anderen Fachdisziplinen, z. B. der Medizin, wo aufgrund der aufwändigen Diagnostik heute ebenfalls große Datenmengen erzeugt und verarbeitet werden. Das dort verfügbare Methodenwissen wird weiterentwickelt und auch auf technische Prozesse angepasst. Damit leisten wir einen Beitrag zur noch besseren Patientenversorgung und stoßen neue Türen bei der Datenverarbeitung und beim -management in der Technik auf.



## KOMPETENZEN UND ANSPRECHPARTNER



*Dr. Aljoscha Roch, Gruppenleiter Drucken*

☎ +49 351 83391-3415 / ✉ [aljoscha.roch@iws.fraunhofer.de](mailto:aljoscha.roch@iws.fraunhofer.de)

» Neue integrierte Lösungen im Bereich 2D- und 3D-Druck werden durch eine Kombination von Drucktechnologien realisiert. Hierbei werden sowohl Materialien, Druckprozesse als auch Nachbehandlungsschritte wie Sintermethoden für Lösungen aus einer Hand entwickelt. Schwerpunkte bilden dabei das funktionale Drucken, welches die Integration und Erweiterung von Funktionalitäten jenseits der Formgebung darstellt. Dabei können z. B. Leiterbahnen in 3D-Körpern bereits während der Herstellung integriert werden. Einen Teilbereich stellt die gedruckte Thermoelektrik dar. Die Fokussierung auf thermoelektrischen Materialien in Form von Pasten und Tinten erlaubt es die Drucktechnologie als industrielles Fertigungsverfahren für thermoelektrische Generatoren zu verwenden. Das Ziel ist es flexible thermoelektrische Generatoren für Sensorik, z. B. für »Structural Health Monitoring« und andere »low power«-Anwendungen im mW bis W Bereich zu verwenden. «



*Prof. Dr. Karol Kozak, Gruppenleiter Bildverarbeitung und Datenmanagement*

☎ +49 351 83391-3717 / ✉ [karol.kozak@iws.fraunhofer.de](mailto:karol.kozak@iws.fraunhofer.de)

» Big Data bezeichnet Datenmengen (Bilder oder alphanumerische Daten), die zu groß oder zu komplex sind oder sich zu schnell ändern, um sie mit manuellen und klassischen Methoden der Datenverarbeitung auszuwerten. Klassische visuelle Bildbearbeitung, relationale Datenbanksysteme sowie Statistik- und Visualisierungsprogramme sind oft nicht in der Lage, derart große Datenmengen zu verarbeiten. Für Big Data kommen daher neue Arten von Plattformen, Datenspeicher- und Machine Learning Methoden zum Einsatz, die parallel auf bis zu Hunderten oder Tausenden von Prozessoren bzw. Servern arbeiten. Unternehmen erhoffen sich von der Analyse von Big Data Möglichkeiten zur Erlangung von Wettbewerbsvorteilen, zur Generierung von Einsparungspotenzialen und zur Schaffung von neuen Geschäftsfeldern. «



*Dr. Frank Brückner, Gruppenleiter Generative Fertigung*  
☎ +49 351 83391-3452 / ✉ [frank.brueckner@iws.fraunhofer.de](mailto:frank.brueckner@iws.fraunhofer.de)



» Für die flexible und effiziente Fertigung individualisierter Produkte entwickelt die Arbeitsgruppe generative Fertigungstechnologien und -prozesse, mit denen moderne metallische und nichtmetallische Konstruktionswerkstoffe zu funktionalen Bauteilen und Strukturen verarbeitet werden. Die Prozesse werden zur Reparatur und Neuteilfertigung eingesetzt und die hergestellten Produkte müssen meist komplexe Beanspruchungsprofile erfüllen. Das besondere Alleinstellungsmerkmal besteht im skalen- und werkstoffübergreifenden fertigungstechnischen Ansatz, so dass die Anwender aus den unterschiedlichsten Branchen von maßgeschneiderten Lösungen profitieren können. «

#### BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2015

1. Generieren von porösen Strukturen durch Laser-Pulver-Auftragschweißen	96
2. Generieren von Volumenkörpern auf dünnwandigen Bauteilen	98
3. Additive Fertigung großformatiger Volumenkörper	100
4. Thermoelektrische Module mit flexibler Geometrie	102
5. Additive Fertigung im Pulverbett	104





# GENERIEREN VON PORÖSEN STRUKTUREN DURCH LASER-PULVER-AUFTRAGSCHWEISSEN

## DIE AUFGABE

Der Einsatz gewichtsreduzierter und beanspruchungsgerecht ausgelegter Bauteile bietet ein hohes Innovationspotenzial für die Branchen der Luft- und Raumfahrt, den Energiesektor, die Automobilindustrie sowie medizinische Applikationen.

Die Herstellung derartiger Strukturen mit konventionellen Fertigungsmethoden ist oft nur mit erheblichem Aufwand oder gar nicht möglich. Generative Verfahren versprechen dahingegen eine enorme gestalterische Freiheit. Mittels additiver Fertigungsmethoden wie dem generativen Laser-Pulver-Auftragschweißen oder dem Laserstrahlschmelzen im Pulverbett lassen sich durch einen sequentiellen Werkstoffauftrag auch anspruchsvolle Freiformkörper umsetzen.

Ein aus der Natur entliehenes Anwendungsbeispiel für Leichtbau sind die Knochen des menschlichen Körpers. Sie besitzen im Inneren verzweigte Strukturen mit offenen oder geschlossenen Kavitäten und sind außen von einer dichten Knochenhaut umschlossen.

Dieses Gestaltungsprinzip bietet ein großes Potenzial für eine Vielzahl technischer Anwendungen, wenn voneinander getrennte und pulverfreie Hohlräume realisiert werden können. Hier spielt die additive Fertigung durch eine endkonturnahe Verarbeitung des Materials ohne werkstoffbedingten Mehraufwand ihre Vorzüge aus.

## UNSERE LÖSUNG

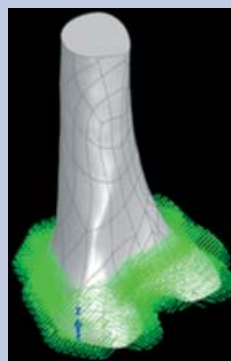
Zur Herstellung knochenartiger Strukturen kommt am Fraunhofer IWS Dresden das Laser-Pulver-Auftragschweißen in koaxialer Pulverdüsenanordnung zur Anwendung (Abb. 1). Zum »Aufschäumen« des Metallpulvers wird das pulverförmige Ausgangsmaterial in-situ mit einem Porenbildner versetzt. Die Mischung und Zuführung von Metall und Porenbildner erfolgt dabei durch zwei getrennte vollautomatisch geregelte Förderstrecken. Dadurch können die Anteile der beiden Bestandteile stufenlos variiert werden, was die lokale Variation des Hohlraumanteils erlaubt und so eine flexible Anpassung an die spätere Beanspruchung ermöglicht.

Die gezielte Einbringung von Hohlräumen ereignet sich dabei direkt im Bearbeitungsprozess. Die prozesstypisch hohe Erstarungsgeschwindigkeit beim Laser-Pulver-Auftragschweißen verhindert ein Entweichen des gebildeten Prozessgases und ermöglicht so geschlossene Zellstrukturen.

Planung der Aufbaustrategie und Ableitung des NC-Codes



CAD-Daten



Slicen des Datenfiles



NC-Programm

2



3



4

## ERGEBNISSE

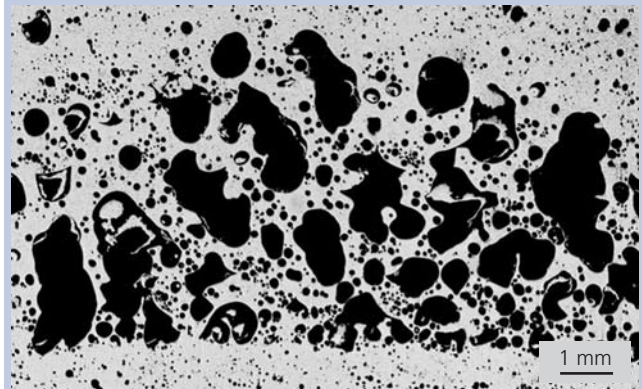
Die Vorgehensweise beim lagenweisen Generieren von Bauteilen macht die Fertigung von Leichtbauteilen mit poröser Innenstruktur realisierbar. Es wurden bisher Hohlraum-Werkstoff-Verhältnisse bis etwa 1:1 eingestellt.

Das Verfahren erlaubt aber nicht nur die Berücksichtigung von Hohlräumen. Durch die gezielte Einbringung von porösen Strukturen im Wechsel mit dichten Abschnitten ist es möglich, die mechanischen Eigenschaften eines Bauteiles lokal zu variieren und so Bauteile mit gradierter Dichte herzustellen.

Der Automatisierungsgrad der verwendeten Systemtechnik ermöglicht dabei den bedarfsgerechten und geregelten lokalen Wechsel zwischen Vollmaterial und hohlzelliger Struktur (siehe Abb. 4). Auf diese Weise sind sowohl scharfe (siehe Abb. 5 unten) als auch gradierte Übergänge (siehe Abb. 5 oben) erreichbar.

Somit kann insbesondere der Bereich der Hybridbearbeitung, bestehend aus dem Generieren und der Endbearbeitung, um ein vielversprechendes Gestaltungsmerkmal erweitert werden, woraus sich neue Anwendungen ableiten lassen. Derartige Anwendungen können neben dem Leichtbau auch neue Funktionalitäten einschließen, z. B. verdeckte Sollbruchstellen oder Bereiche mit großen Oberflächen zur verbesserten Biokompatibilität.

Querschliff eines Volumenkörpers mit lokaler Variation des Hohlraumanteils



5

- 1 Prozessbild des generativen Aufbaus der Knochenstruktur
- 3 Per Laser-Pulver-Auftrag-schweißen generierter Knochenabschnitt
- 4 Anschnitt des Knochenabschnitts mit poröser Innenstruktur und dichter Hülle

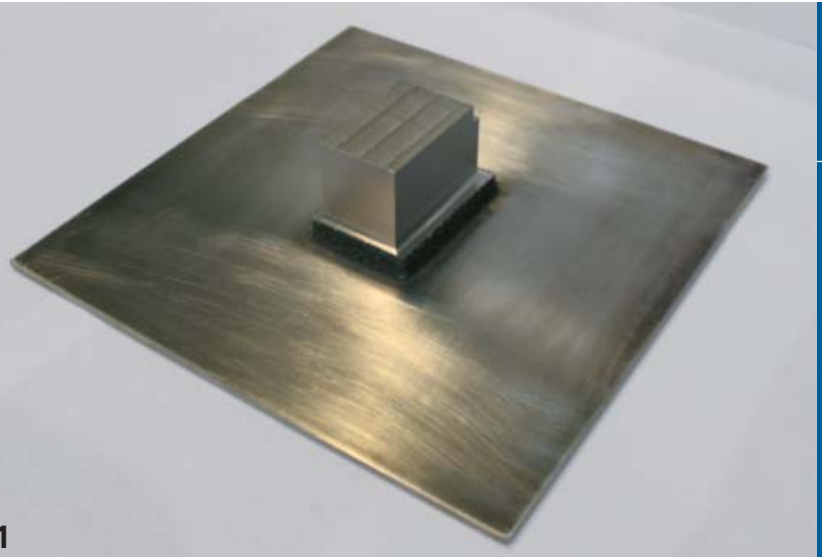
## KONTAKT

Dr. Frank Brückner

+49 351 83391-3452

frank.brueckner@iws.fraunhofer.de





1

# GENERIEREN VON VOLUMENKÖRPERN AUF DÜNNWANDIGEN BAUTEILEN

## DIE AUFGABE

Um der Forderung nach einem reduzierten Ressourceneinsatz und der wirtschaftlichen Bearbeitung schwer zerspanbarer metallischer Hochleistungswerkstoffe gleichermaßen gerecht zu werden, fordern Unternehmen der Automobil-, Energie- und Luftfahrtbranche häufig Alternativen zur rein subtraktiven Bearbeitung. Hybride Fertigungstechniken, wie die Kombination der additiv-generativen Laserbearbeitung und der Fräsbearbeitung, bieten hier das Potenzial einer erheblichen Steigerung der Materialausnutzung.

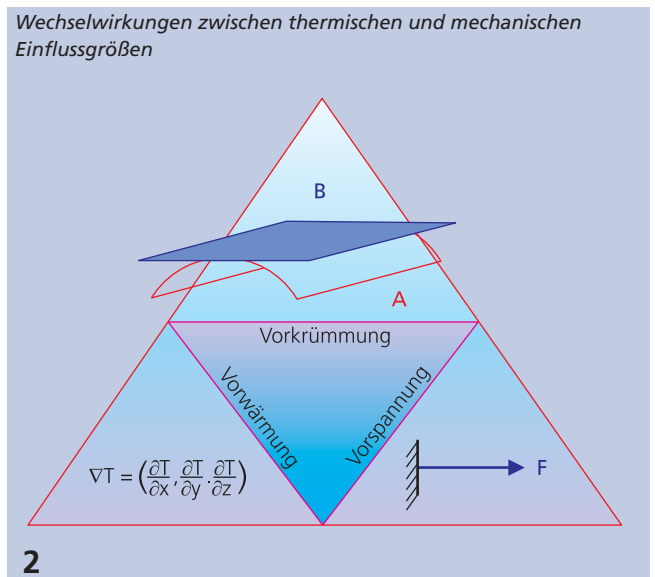
Eine besondere Herausforderung ist in diesem Zusammenhang das Auftragen größerer Volumen auf dünnwandige Bauteile. Hier gilt es, die Einbringung thermisch induzierter Spannungen zu beherrschen, da diese speziell bei Strukturen mit geringer Steifigkeit ohne entsprechende Gegenmaßnahmen zu Formabweichungen (Verzug) führen. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, werden in der Industrie viele Bauteile »aus dem vollen gefräst«. Bei schwer zerspanbaren Werkstoffen führt das schnell zu einem erheblichen zeitlichen, technologischen und damit wirtschaftlichen Aufwand.

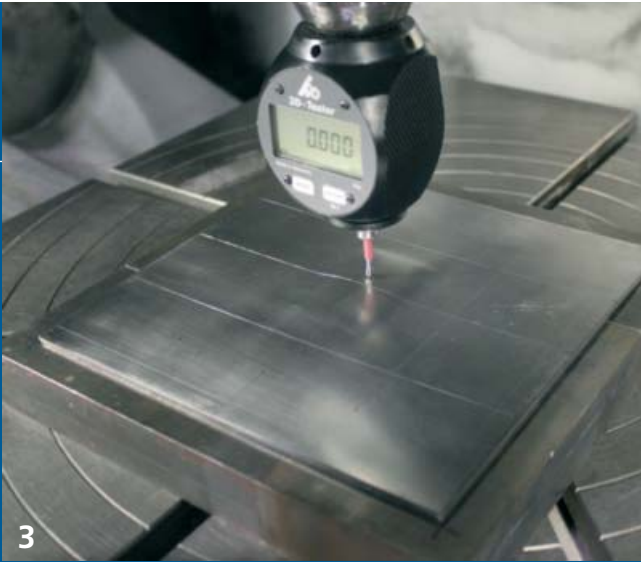
Besonders hervorzuheben sind dünnwandige Strukturbauteile, welche häufig zur Erhöhung der Steifigkeit aber auch aus Gründen einer montagegerechten Produktgestaltung lokale Dickenänderungen aufweisen. In Abhängigkeit von der Geometrie der Übergangsbereiche bzw. der maximal erforderlichen Gesamtdicke können neben einem signifikanten Zerspannungsvolumen prozessbeeinflussende Kräfte und Momente entstehen, welche speziell bei dünnwandigen Querschnitten eine fertigungsgerechte Auslegung der Bauteile erfordern.

An dieser Stelle bedarf es der Entwicklung von Bearbeitungsstrategien, die den generativen Auftrag größerer Materialvolumen auf dünnwandige Bauteile bei minimalen Formänderungen ermöglichen.

## UNSERE LÖSUNG

Mit dem Laser-Pulver-Auftragschweißen steht ein additiver Prozess zur Verfügung, der unter Verwendung einer geeigneten Prozessführung den direkten Materialauftrag auf dünnwandige Bauteile ermöglicht. Dies gelingt durch die gezielte Vorkrümmung des Bauteils in Kombination mit einer genauen Abstimmung von Laserenergieeintrag und Vorwärmtemperatur bei gleichzeitiger Behinderung der plastischen Formänderung durch die Vorspannung des Bauteils (Abb. 2). Die kombinierte Vorgehensweise ermöglicht so auch den Aufbau großer Materialvolumen bei geringer Struktursteifigkeit.



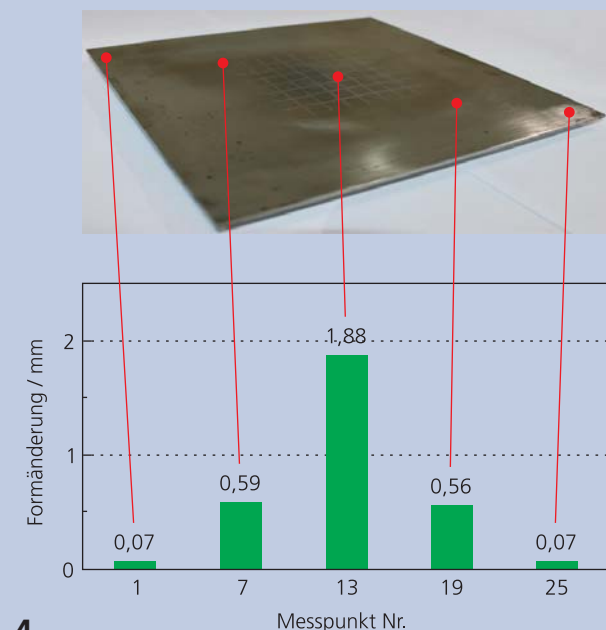


## ERGEBNISSE

Mittels Laser-Pulver-Auftragschweißen wurde auf einem 2,4 mm dicken Substrat ein Quader mit einer Höhe von über 40 mm generativ aufgebaut und so ein Dickenverhältnis von ca. 1:17 realisiert (siehe Abb. 1). Die lateralen Abmessungen des Bauteils betragen 200 mm für das quadratische Substrat und 60 bzw. 40 mm für das darauf aufgetragene Volumen. Als Werkstoff wurde eine hochwärmefeste Nickelbasis-Superlegierung verwendet.

Durch die maßgeschneiderte Prozessführung konnte die lokale Formänderung gegenüber dem Ausgangszustand auf weniger als 2 mm (siehe Abb. 4) begrenzt werden.

Darstellung der Formänderung des Substrates gegenüber dem Ausgangszustand



Außerhalb des Bereiches, in dem ein Materialauftrag erfolgte, liegt die bleibende Formänderung bei maximal 0,56 mm. Abbildung 3 zeigt die Messeinrichtung zur Erfassung der lokalen Formänderung. Sie wurde prozessbegleitend mittels taktiler Messung eingesetzt.

Mit Hilfe der dargestellten Vorgehensweise kann nun der Fräsaufwand insbesondere bei schwer zerspanbaren Werkstoffen erheblich reduziert werden. Weiterhin lassen sich komplexe Bauteilgeometrien unter enormer Reduzierung des Werkstoffeinsatzes realisieren, was besonders bei preisintensiven Materialien hohe wirtschaftliche Vorteile verspricht.

- 1 Volumenaufbau auf dünnwandigem Substrat (Isometrie)
- 3 Taktile Messung der Formänderung

## KONTAKT

Dipl.-Ing. André Seidel (SFI)

+49 351 83391-3854

andre.seidel@iws.fraunhofer.de







1



2

# ADDITIVE FERTIGUNG GROSSFORMATIGER VOLUMENKÖRPER

## DIE AUFGABE

Für die flexible und effiziente Fertigung individualisierter Produkte stehen heute additive Fertigungstechnologien zur Verfügung, mit denen moderne metallische und nichtmetallische Konstruktionswerkstoffe zu funktionalen Bauteilen und Strukturen verarbeitet werden. Das besondere Alleinstellungsmerkmal besteht im skalen- und werkstoffübergreifenden fertigungstechnischen Ansatz, so dass die Anwender aus den unterschiedlichsten Branchen von maßgeschneiderten Lösungen profitieren können.

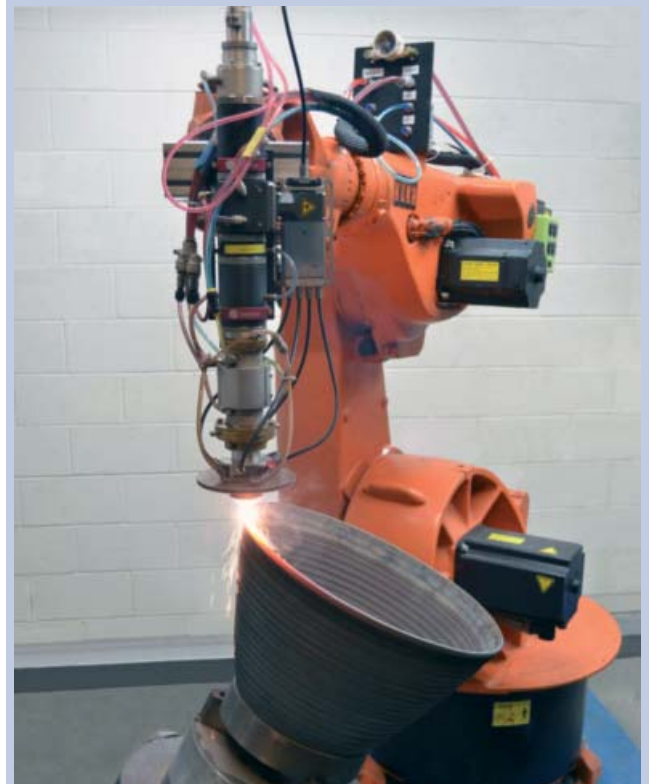
Prinzipiell wird zwischen Verfahren mit kontinuierlicher Werkstoffzufuhr und pulverbettbasierten Verfahren unterschieden. Pulverbettbasierte Verfahren ermöglichen die Herstellung von Bauteilen mit nahezu beliebiger dreidimensionaler Geometrie, sogar Hinterschnitte, die sich in konventioneller mechanischer oder gießtechnischer Fertigung nicht herstellen lassen, können erzeugt werden. Somit gewährt das Verfahren ein hohes Maß an Designfreiheit, Funktionsoptimierung und -integration, hinsichtlich der Bauteilgröße bestehen jedoch starke Limitierungen. Und auch die Fertigungsgeschwindigkeit lässt häufig noch zu wünschen übrig.

Daher hat das Fraunhofer USA Center for Laser Applications (CLA) eine additive Fertigungstechnologie entwickelt, die den Aufbau von deutlich größeren Volumenkörpern mit wesentlich höherer Bearbeitungsgeschwindigkeit ermöglichen.

## UNSERE LÖSUNG

Das CLA setzt auf das Verfahren des Laser-Pulver-Auftragschweißens mit kontinuierlicher Pulverzufuhr. Dabei kommen Roboteranlagen und CNC-Maschinen sowie die im Fraunhofer IWS Dresden entwickelten Pulverdüsen in Verbindung mit verschiedenen Lasern zum Einsatz. Die Roboter und CNC-Anlagen erlauben die Fertigung von Bauteilen mit Abmessungen bis zu 2 m x 4 m x 2 m.

*Laserbasierte additive Fertigung eines Demonstrators für die Luftfahrtindustrie*



3

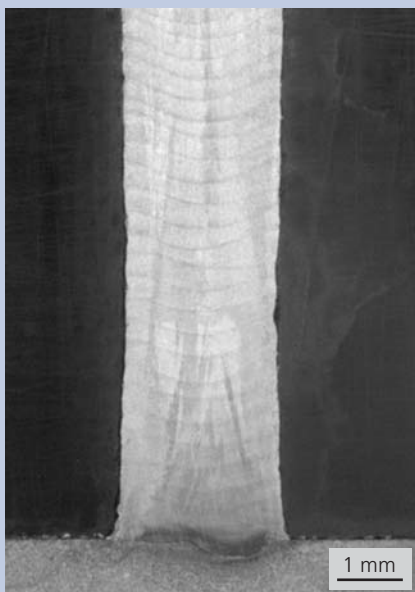


## ERGEBNISSE

Mit den Laseranlagen und IWS-Pulverdüsen COAX8 und COAX9 wurden großformatige Demonstratoren für Luft- und Raumfahrtanwendungen hergestellt (siehe Abb. 1 und 3). Auch Turbinenschaufeln mit Hohlstruktur und Komponenten von Raketentriebwerken sind möglich.

Der Raketendüsensdemonstrator in Abbildung 3 wurde mit Inconel 625 Pulvermaterial an einer Roboteranlage mit 6 kW Laserleistung gebaut. Die Werkzeugbahnen wurden mit Hilfe einer CAD-CAM-Software off-line programmiert. Ein typischer Querschnitt des lasergenerierten Demonstrators zeigt Abbildung 5.

Querschnitt einer lasergenerierten Raketendüse aus Inconel 625



Mit Hilfe von CAD-CAM-Software wurden verschiedene Build-up-Strategien zur Herstellung von Testteilen mit der Pulverbeschichtungstechnologie entwickelt und bewertet. So wurden Abscheidungsraten von bis zu 2 kg pro Stunde erreicht.

Mit einem 6 Achs-Roboter mit Dreh-Kipptisch und der IWS-Pulverdüse COAX8 wurde ein Extrusionszylinder aus Edelstahl 316L hergestellt. Dazu wurde ein Schraubengewinde auf ein Standard-Stahlrohr gefertigt (siehe Abb. 2). Das Bauteil ist über 1120 mm lang, der Durchmesser beträgt 255 mm. Die Fertigungszeit beträgt 18 Stunden.

Fraunhofer CLA erprobt auch den neuen Drahtkopf COAXwire des Fraunhofer IWS Dresden für den multidirektionalen Aufbau mit Drahtmaterial (Abb. 4). Im Mittelpunkt steht dabei die Herstellung von hochwertigen Titankomponenten für die Luftfahrtindustrie.

- 1 *Laserbasierte additive Fertigung einer Gasturbinenschaufel*
- 2 *Laserbasierte additive Fertigung einer Extruderschnecke aus Edelstahl*
- 4 *Additive Fertigung mit dem IWS-Drahtkopf COAXwire*

## KONTAKT

Craig Bratt

+1 734 738 0550

cbratt@fraunhofer.org





1

# THERMOELEKTRISCHE MODULE MIT FLEXIBLER GEOMETRIE

## DIE AUFGABE

Die Sicherung einer zuverlässigen und vor allem wartungsfreien Energieversorgung für Sensornetzwerke wird zukünftig an Bedeutung gewinnen. Mit der zunehmenden Digitalisierung und Miniaturisierung von Sensornetzwerken z. B. für die Zustandsüberwachung von Bauteilen oder Maschinen, das »Internet der Dinge« oder mobile Anwendungen wird der Bedarf für autarke Elektronik und damit auch Energieversorgung deutlich ansteigen.

Für energieautarke Sensorplattformen mit drahtloser Kommunikationseinheit werden Betriebsspannungen von nur wenigen 100 mV benötigt. In diesem Spannungsbereich kann die Thermoelektrik einen wesentlichen Beitrag für eine zuverlässige, langlebige und autarke Energieversorgung leisten, wenn die Elemente kostengünstig, effizient und massenfertigungstauglich hergestellt werden können. Thermoelektrik basiert auf dem Seebeck-Effekt, nach dem ein Temperaturgradient in einem thermoelektrischen Material zu einer Diffusion von Ladungsträgern führt, die in einer nutzbaren elektrischen Spannung resultiert. Der Wärmefluss zwischen der Warm- und der Kaltseite wird direkt in elektrische Energie umgewandelt.

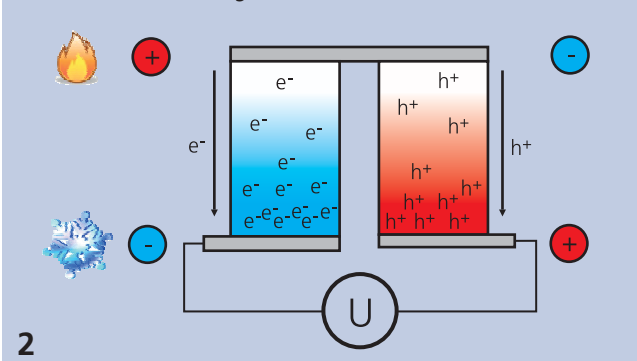
Die Herstellung thermoelektrischer Module erfolgt momentan semi-manuell, was im Vergleich zu einer automatisierten Fertigung zu hohen Fehlerquoten führt. Die für konventionelle Elemente genutzten Materialien (z. B. Bismut, Tellur, Germanium) sind oft toxisch, selten oder teuer. Der Aufbau eines konventionellen thermischen Moduls ist starr und geometrisch unflexibel; thermische Spannungen zwischen den Materialien limitieren die maximale Elementgröße. Wünschenswert ist die Entwicklung flexibler thermoelektrischer Module, die mit hohem Automatisierungsgrad gefertigt werden können.

## UNSERE LÖSUNG

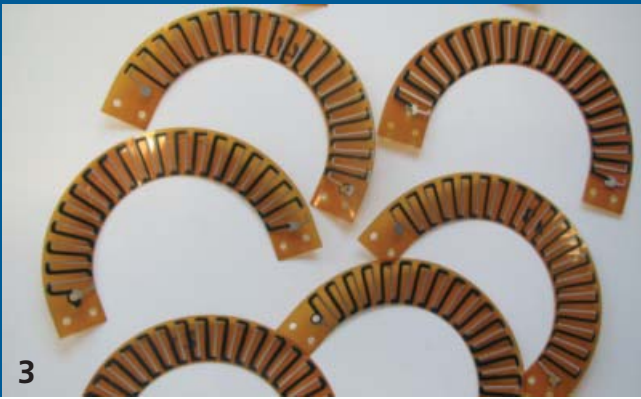
Mittels des Dispenserdrucks ist es möglich, thermoelektrische Module kostengünstig und effizient herzustellen. Das maskenlose Verfahren zeichnet sich durch einen hohen Automatisierungsgrad sowie Durchsatz aus und ist hinsichtlich geometrischer Parametervariationen sehr flexibel. Dispenserdruck ist nutzbar für verschiedene Materialien (Metalle, Polymere und Komposite), die als Pasten vorliegen. Das pastöse Material wird definiert durch eine feine Kanüle gefördert und auf dem zwei- oder dreidimensionalen Substrat abgelegt.

Die Verfahrensvorteile werden besonders bei der Herstellung von individuell konturangepassten thermoelektrischen Modulen deutlich. Hier wird das Substrat zunächst mit einer elektrischen Kontaktierung und dem thermoelektrischen Material bedruckt. Anschließend wird die erforderliche Kontur mit einem Laser ausgeschnitten. Die nun konturangepassten Streifen werden gestapelt, vertikal angeordnet und elektrisch kontaktiert. Durch die vertikale Anordnung lässt sich eine hohe Anzahl an Thermopaaren realisieren. Die Höhe des thermoelektrischen Materials und des resultierenden Temperaturgradienten ist an die jeweilige Anwendung anpassbar.

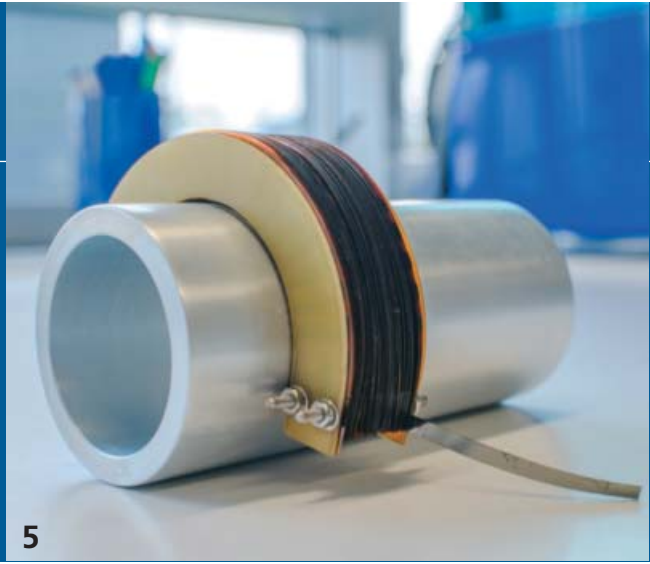
Schematische Darstellung eines thermoelektrischen Generators



2



3



5

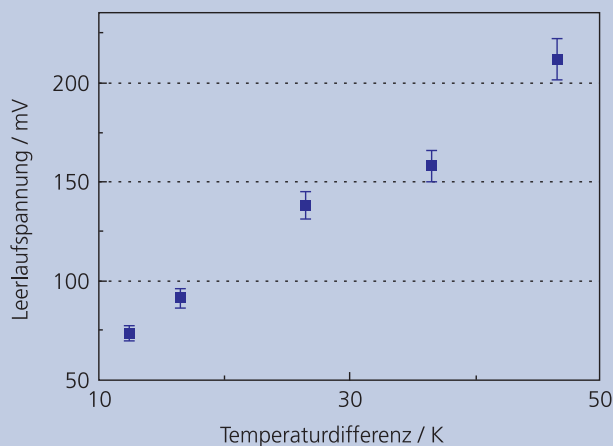
## ERGEBNISSE

Zur Erzeugung der angepassten Kontur für die thermoelektrischen Folien wird die Geometrie der Wärmequelle analysiert und in ein CAD-Modell überführt. Darauf aufbauend wird das Druckbild für die elektrische Kontaktierung und das thermoelektrische Material erzeugt. Als Substrat wird meist eine flexible und temperaturbeständige Polyimidfolie verwendet.

Die elektrische Kontaktierung der thermoelektrischen Materialien erfolgt durch aufgedruckte Silberleitbahnen. Die Silberpaste zeichnet sich nach dem Trocknen durch eine hohe elektrische Leitfähigkeit und eine geringe Neigung zur Rissbildung bei Biegung aus.

Nachfolgend wird das thermoelektrische Material auf die Trägerfolie mit den Silberkontakten aufgedruckt. Zur Demonstration der Machbarkeit wird nur ein p-leitendes Material, Poly(ethylendioxythiopen:Polystyrolsulfonsäure, kurz PEDOT:PSS) verwendet, da thermoelektrisch einsetzbare n-leitende Polymere kommerziell nicht verfügbar sind. Je nach Anwendung werden zur Erhöhung des Leitungsquerschnitts mehrere Lagen PEDOT:PSS gedruckt und jeweils getrocknet.

Leerlaufspannung eines thermoelektrischen Moduls in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz



4

Anschließend wird die Trägerfolie konturangepasst mit einem Laser geschnitten. Als Ergebnis erhält man mehrere kleine flexible Folienstücke. Diese thermoelektrischen Folien können anschließend elektrisch seriell oder parallel verschaltet werden, um die benötigte Ausgangsspannung oder den Strom zu erhöhen.

Bei serieller Verschaltung der Folien und einer Temperaturdifferenz von ca. 25 K wurde eine Leerlaufspannung von etwa 125 mV erzeugt. Die Kaltseite des Moduls wies dabei Raumtemperatur auf. Diese Spannung reicht bereits für den Betrieb eines kommerziellen Mikrocontrollers in einer Sensorplattform aus.

Durch die Verwendung von Materialien mit einem höheren Seebeck-Koeffizienten oder von p- und n-leitendem Material kann die Ausgangsspannung und -leistung bei unveränderter Geometrie oder Prozessierung deutlich erhöht werden. Durch Verbesserungen im Bereich der Wärmeübertragung von der Quelle und zur Senke werden weitere Fortschritte hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des konturangepassten thermoelektrischen Moduls erwartet.

- 1 *Bedrucktes Substrat vor dem Laserzuschnitt*
- 3 *Separate Generatorfolien nach dem Zuschnitt*
- 5 *Konturangepasstes thermoelektrisches Modul auf einem Rohrstück*

## KONTAKT

M.Sc. Lukas Stepien

+49 351 83391-3092

lukas.stepien@iws.fraunhofer.de





1



## ADDITIVE FERTIGUNG IM PULVERBETT

### DIE AUFGABE

Mit der additiven Fertigung im Pulverbettverfahren ergeben sich in der Fertigung von Bauteilen bisher nicht gekannte geometrische Freiheiten. Die Technologie ermöglicht es, vorhandene Produkte so zu verändern oder grundlegend neu zu gestalten, dass sich maßgeblich verbesserte Eigenschaften erreichen lassen. Geometrisch hochkomplexe Bauteile weisen durch die Möglichkeit zur Funktionsintegration signifikant verbesserte Eigenschaften auf.

Durch die endkonturnahe Herstellung der Bauteile wird das Ausgangsmaterial effizient genutzt. Diese Ressourceneffizienz wird mit Strategien des Leichtbaus, wie zum Beispiel der Substitution von Vollmaterial durch Gitterstrukturen mit nahezu gleicher Festigkeit, noch weiter gesteigert. Daneben können individuell optimierte Strukturen hergestellt werden, die durch Steigerung der relativen Oberfläche eine signifikante Effizienzverbesserung von Kühlsystemen bewirken.

Aus den additiven Fertigungsverfahren leiten sich enorme Potenziale zur Ressourcenschonung, Energieeinsparung, Steigerung der Ergonomie sowie Effizienz ab. Demgegenüber stehen die besonderen Herausforderungen dieser neuartigen Fertigungsverfahren, wie die Erstellung, das Handling und der Schutz von Bauteildaten, aber auch Reproduzierbarkeit, Geschwindigkeit sowie Genauigkeit des Herstellungsprozesses sowie Oberflächengüte, Detailauflösung und Materialeigenschaften der hergestellten Objekte. An dieser Stelle bedarf es der Entwicklung von speziell angepassten Prozessketten und der Festlegung von Designrichtlinien, von der Erstellung des CAD-Modells über die fertigungsgerechte Aufbereitung der Daten bis hin zu Nachbearbeitung der fertigen Bauteile zur Herstellung der zuvor festgelegten Oberflächen- und Struktureigenschaften.

### UNSERE LÖSUNG

Mit dem Selektiven Laser Schmelzen (SLM) und dem Elektronen Strahl Schmelzen (EBM) stehen zwei additive Verfahren zur Verfügung, die unter Verwendung einer geeigneten Prozessführung die Herstellung hochkomplexer Bauteile aus pulverförmigen Ausgangsmaterialien ermöglichen.

Die Verfahren basieren auf dem wiederholten flächigen Auftragen von Pulver und selektiven Aufschmelzen Lage für Lage. Der Fertigungsprozess wird beim SLM unter Schutzgasatmosphäre und beim EBM im Vakuum ausgeführt, um Reaktionen des geschmolzenen Pulvers mit der umgebenden Atmosphäre zu vermeiden.

Abbildung 2 zeigt die Einzellagen eines Bauteils, deren Erzeugung rechnergestützt im Vorfeld der Prozessierung in der Anlage erfolgen muss.

*In Schichten geteiltes Modell*

2





3

## ERGEBNISSE

Am Fraunhofer IWS wurden neben weitverbreiteten Materialien auch spezielle Werkstoffe wie hochkorrosionsbeständige Stähle und hochwarmfeste Nickelbasislegierungen für das selektive Laserschmelzen qualifiziert. Durch die geeignete Auslegung der Prozessparameter konnte der Energieeintrag in das Pulverbett soweit optimiert werden, dass nahezu vollständig porenfreie Bauteile entstanden.

Die Bauteilfestigkeiten liegen dabei im Bereich der Grundwerkstoffe und können in Aufbaurichtung deren Festigkeiten sogar überschreiten. Mit dem verfahrensgerechten Einsatz dieser Werkstoffe ist ein entscheidender Beitrag zur Etablierung der additiven Herstellungsverfahren insbesondere für luftfahrtorientierte Anwendungen gelungen. Dadurch ergeben sich in diesem Hochtechnologiesektor neuartige Möglichkeiten, bei denen die Vorteile der additiven Fertigung bestmöglich ausgeschöpft werden.

Beispielstruktur einer Brennkammer mit angepassten Kühlkanälen



4

Ein mögliches Anwendungsgebiet sind Kühlkanalstrukturen für Brennkammern. Für diese Systeme wurden Kühlrippen mit Wandstärken im (Sub-)millimeterbereich generiert. Nachfolgend wurde eine Optimierung der Oberflächenbeschaffenheit durchgeführt, um Strömungsverhalten und Wärmeübergang in den generierten Kühlkanälen zu verbessern.

Bei derartig geringen Wandstärken ist aufgrund der eingetragenen Wärmeenergie häufig mit Verzug zu rechnen. Um dem entgegen zu wirken, werden dem Bauteil verzugsreduzierende Maßnahmen wie Stützstrukturen hinzugefügt, die auch wesentlich zur Wärmeableitung aus dem Bauteil und zur mechanischen Verankerung dienen.

Durch Optimierung der Stützstrukturherzeugung und Erhöhung der Baukammertemperatur konnte das Temperaturregime im Bauprozess verbessert werden. Daraus folgte eine Reduzierung des thermisch induzierten Verzugs, was eine wesentliche Erhöhung der Reproduzierbarkeit zur Folge hat.

- 1 *Mit SLM hergestelltes Modell der Dresdner Frauenkirche*
- 3 *In einem Fertigungsschritt (ohne Fügen) hergestellte Planetengetriebe*

## KONTAKT

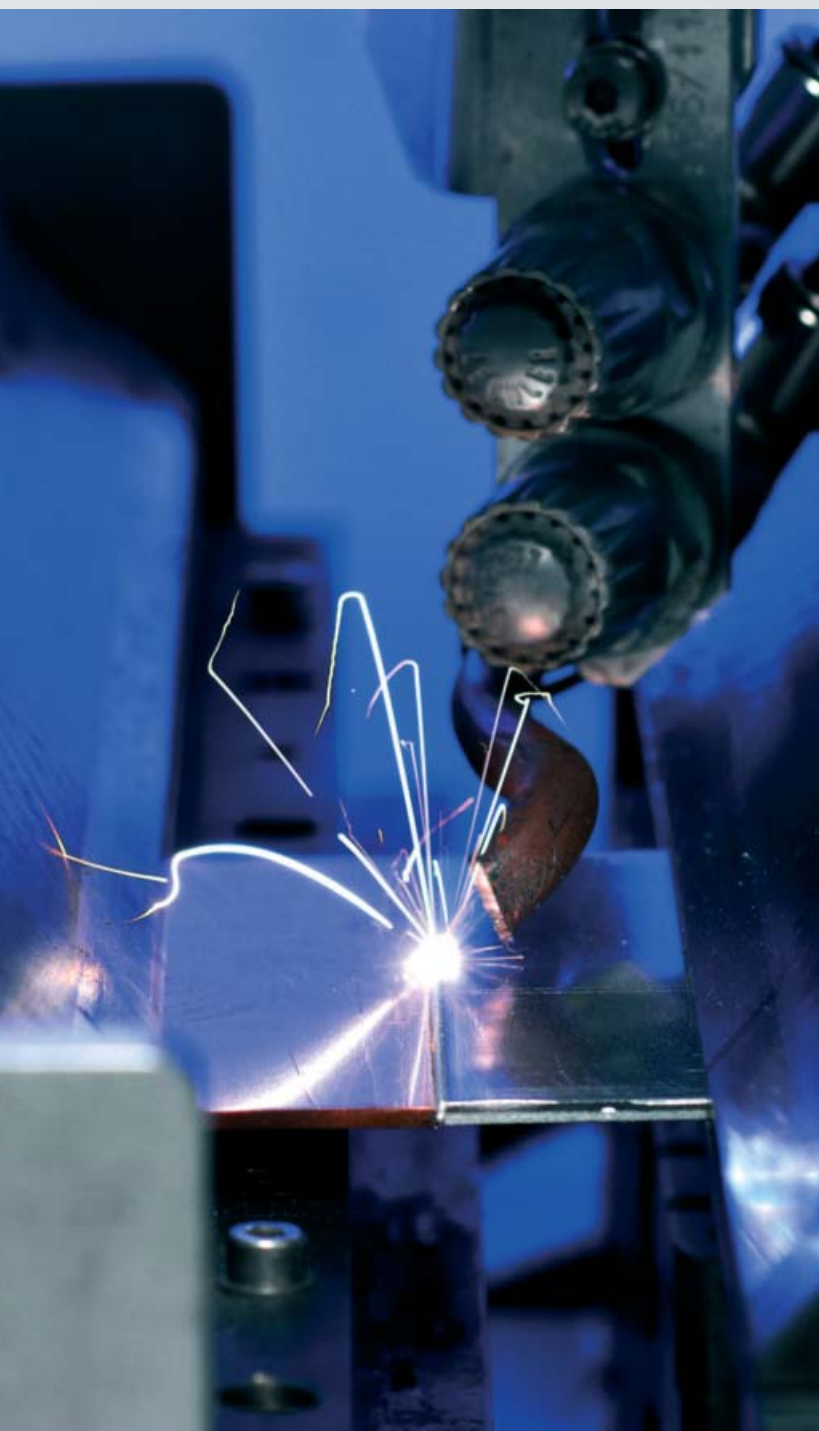
M. Sc. Dipl.-Ing. (FH) Robin Willner

+49 351 83391-3859

robin.willner@iws.fraunhofer.de



# FÜGEN



**Redaktion:** Herr Dr. Standfuß, das Laserstrahlschweißen zählt mit zu den anspruchsvollsten Schweißverfahren. Welche Anwendungsgebiete konnten Sie bereits erschließen und welche Applikationen stehen derzeit im Fokus Ihrer Forschungen?

**Dr. Standfuß:** Das Laserstrahlschweißen wird für viele Anwendungen als Fügetechnologie technisch und wirtschaftlich interessanter. War es in der Vergangenheit nicht zuletzt aufgrund der Kosten für Laserstrahlquellen vor allem für Großserienanwendungen im Bereich der Automobil- und Zulieferindustrie mit hohen Stückzahlen rentabel, wird es nun auch für andere Industriezweige und viele KMU mit unterschiedlichem Anwendungsprofil interessant. Eine besondere Herausforderung, auch für andere Schweißverfahren, stellt zum Beispiel das Schweißen von Aluminium-Druckguss dar. Die gelösten Gase und andere Hilfsstoffe führen hier in der Regel zu undichten und porösen Schweißnähten. Daher kommen oft aufwendige mechanische Fügeverfahren mit Dichtungen zum Einsatz. Unter Nutzung neuer brillanter Strahlquellen und einer hochfrequenten Strahloszillation ist es gelungen, ein Verfahren zum dichten Verschweißen von Aluminium-Druckgussbauteilen in die industrielle Anwendung zu bringen (siehe Seite 114). Aber auch in Bereichen wie dem Stahlbau mit dickwandigen Bauteilen und Wandstärken von 50 mm und darüber bietet das Laserstrahlschweißen Vorteile. So ist es zum Beispiel beim Mehrlagenschweißen mit Hochleistungsdiodenlasern bei Wandstärken von bis zu 90 mm die Streckenergie um fast den Faktor 3 geringer als bei konventionellen Lichtbogenschweißverfahren (siehe Seite 116).

**Redaktion:** Seit diesem Jahr gibt es in Ihrem Geschäftsfeld auch eine Gruppe Kleben und Faserverbundtechnik. Welche Forschungsthemen verfolgt die Gruppe?

»Soweit es die Technik angeht, wird die Welt tatsächlich mehr und mehr zu einer Welt.«

Jawaharal Nehru



#### **GESCHÄFTSFELDLLEITER**

**DR. JENS STANDFUß**

☎ +49 351 83391-3212

✉ [jens.standfuss@iws.fraunhofer.de](mailto:jens.standfuss@iws.fraunhofer.de)

**Dr. Standfuß:** Mit der Fertigstellung unserer neuen Räumlichkeiten im 4. Bauabschnitt haben wir ca. 400 m<sup>2</sup> Laborfläche für die Aktivitäten zum Kleben gewonnen und diese mit der Faserverbundtechnik gebündelt. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt zum einen auf Plasma- und Laserverfahren für die berührungslose und automatisierbare Vorbehandlung von Fügeiteiloberflächen vor dem Kleben. Daneben arbeiten wir an der Entwicklung von Fügeverfahren für Metall-Kunststoff-Mischverbindungen. Hierzu gibt es eine Reihe von vielversprechenden Ergebnissen und technologischen Ansätzen (siehe Seiten 120 & 122). Des Weiteren widmet sich diese Arbeitsgruppe der Entwicklung von Verfahren zur Herstellung von sogenannten Fiber-Metal-Laminates (FML) für zukünftige Anwendungen im Bereich Luftfahrt. Die Forschungsarbeiten werden im Rahmen des laufenden Luftfahrtforschungsprogramms zusätzlich zu unseren Aktivitäten zum Laserstrahlschweißen bzw. Rührreibschweißen von metallischen Rumpfstrukturen gefördert.

**Redaktion:** Die belastungsangepasste und fertigungsgerechte Auslegung von hochbelasteten Bauteilen wird immer wichtiger. Haben Sie dieses Thema auch im Fokus?

**Dr. Standfuß:** Natürlich! Die Themen Leichtbau, angepasste Fertigungsverfahren und Auslegungskriterien für gefügte Strukturen liegen im Fokus aller Arbeitsgruppen des Geschäftsfeldes und waren für den größten Teil der durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Jahr 2015 ein Hauptanliegen. Ich denke dies wird, wenn auch nur auszugsweise möglich, an den Themenstellungen dieses Jahresberichtes deutlich. Nennen möchte ich hier beispielhaft die Arbeiten zu Aluminium-Stahl-Mischverbindungen, wo wir uns aktuell mit dem EMP-Fügen von Blechbauteilen (siehe Seite 110) und dem Korrosionsverhalten beschäftigen.





## KOMPETENZEN UND ANSPRECHPARTNER



*Dr. Axel Jahn, Abteilungsleiter Laserstrahlfügen*

☎ +49 351 83391-3237 / ✉ [axel.jahn@iws.fraunhofer.de](mailto:axel.jahn@iws.fraunhofer.de)

» Laserstrahlfügen findet zunehmend ein breitgefächertes industrielles Anwendungsfeld. Dabei können die laserbasierten Verfahren ihre Vorteile besonders dort ausspielen, wo hohe Präzision und Bauteilqualität verbunden mit hoher Wirtschaftlichkeit gefragt sind. Aufgrund der rasant steigenden Herausforderungen bezüglich zu fügender Werkstoffe und –kombinationen sowie höherer Bauteilbelastungen werden immer anspruchsvollere fügetechnische Lösungen gesucht. Die Abteilung Laserstrahlfügen bearbeitet umfassende Aufgaben von der prozess- und belastungsgerechten Bauteilauslegung über die werkstoffgerechte Schweißprozessentwicklung bis hin zur Bewertung der Bauteilqualität und Prozesseffizienz. «



*Dr. Dirk Dittrich, Gruppenleiter Laserstrahlschweißen*

☎ +49 351 83391-3228 / ✉ [dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de](mailto:dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de)

» Prozessverständnis und metallphysikalisches Hintergrundwissen sind die Basis für angepasste Laserstrahlschweißverfahren. Verfahren mit integrierter Kurzzeitwärmebehandlung, mit werkstoffangepassten Zusatzwerkstoffen sowie hochfrequenter Strahlmanipulation ermöglichen einen neuen Zugang zur Herstellung rissfreier Schweißverbindungen aus härtbaren, hochfesten Stählen, Gusseisen, Leichtmetall-Druckguss und heißbrisanfälligen Al- oder Ni-Werkstoffen, Mischverbindungen sowie Bauteilen mit hoher Steifigkeit. Dem Credo »Lösungen aus einer Hand« entsprechend entwickelt die Arbeitsgruppe hierfür angepasste Schweißtechnologien und begleitet diese gemeinsam mit Kunden bis hin zur industriellen Anwendung. «



*Dr. Axel Jahn, Gruppenleiter Bauteilauslegung*

☎ +49 351 83391-3237 / ✉ [axel.jahn@iws.fraunhofer.de](mailto:axel.jahn@iws.fraunhofer.de)

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



*Dipl.-Ing. Annett Klotzbach, Gruppenleiterin Kleben und Faserverbundtechnik*  
☎ +49 351 83391-3235 / ✉ [annett.klotzbach@iws.fraunhofer.de](mailto:annett.klotzbach@iws.fraunhofer.de)



» Den industriellen Anforderungen zur Entwicklung von Fügetechnologien für den Faserverbund-Leichtbau wurde durch die Bündelung der Kompetenzen in der Arbeitsgruppe Rechnung getragen. Moderne Labore und effiziente Anlagentechnik stehen zum Beispiel für die Entwicklung von neuen Vorbehandlungsprozessen für das großflächige Kleben von Metallen und Polymeren zur Verfügung. Dabei kommen sowohl Plasma- als auch Laser-vorbehandlungsverfahren zum Einsatz. In Ergänzung zu den Kompetenzen des strukturellen Klebens werden die Grundlagen für das thermische Direktfügen von thermoplastischen Verbundmaterialien erarbeitet. Für den Nachweis der Verbindungsfestigkeit unter Umweltbedingungen erfolgen neben mechanischen Prüfverfahren auch Alterungsuntersuchungen, wie Klima- und Salzsprühtests. «

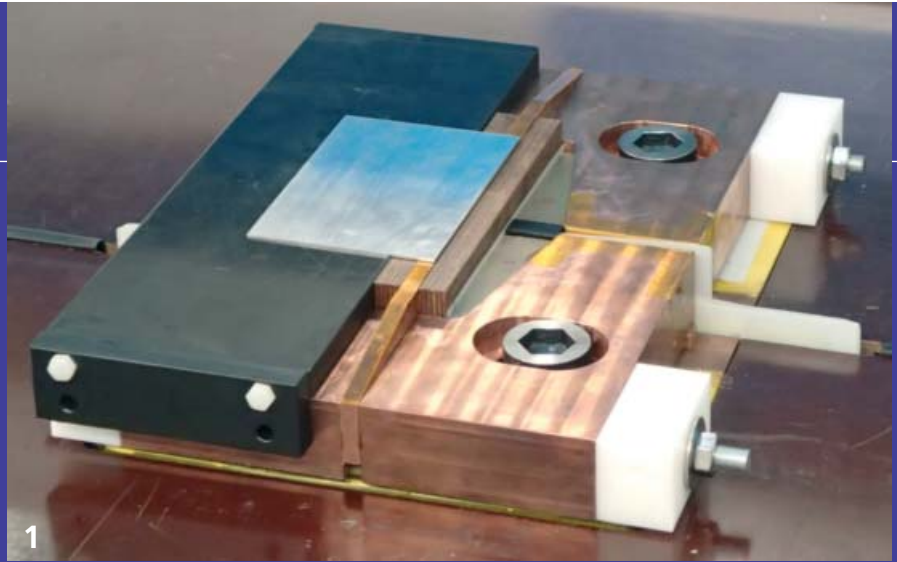
*Dipl.-Ing. Sebastian Schulze, Gruppenleiter Sonderfügeverfahren*  
☎ +49 351 83391-3565 / ✉ [sebastian.schulze@iws.fraunhofer.de](mailto:sebastian.schulze@iws.fraunhofer.de)



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

#### BEISPIELE AUS DEN ARBEITEN 2015

1. Aluminium-Stahl-Blech-Verbindungen – EMP-Fügen macht es möglich	110
2. Umformen von sphärischen Aluminiumblechen für die Luftfahrt	112
3. Dichtschweißen von Druckgusswerkstoffen mit Faserlaser	114
4. Mehrlagenschweißen im Stahlbau mit Hochleistungsdiodenlaser	116
5. Laserverfestigte Stahlblechstrukturen - jetzt auch zyklisch hoch belastbar!	118
6. Technologien zum Direktfügen von Metall und Thermoplast	120
7. Strukturelles Kleben textilverstärkter Thermoplastverbunde	122
8. Prozessmonitoring beim Laserstrahlschweißen von Titanlegierungen	124



# ALUMINIUM-STAHL-BLECH-VERBINDUNGEN – EMP-FÜGEN MACHT ES MÖGLICH

## DIE AUFGABE

Das elektromagnetische Pulsfügen (EMP) ist ein neues Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen artungleicher Werkstoffe in der Festphase. Es beruht auf dem physikalischen Prinzip, ein leitfähiges Material in einem veränderlichen Magnetfeld mit Hilfe des magnetischen Druckes lokal stark zu beschleunigen, umzuformen und schließlich gezielt mit einem zweiten Material kollidieren zu lassen. Dabei treten in dem Auftreffbereich lokal begrenzte, aber sehr große Deformationen und Kollisionsdrücke auf, die schließlich zum Kaltverschweißen führen.

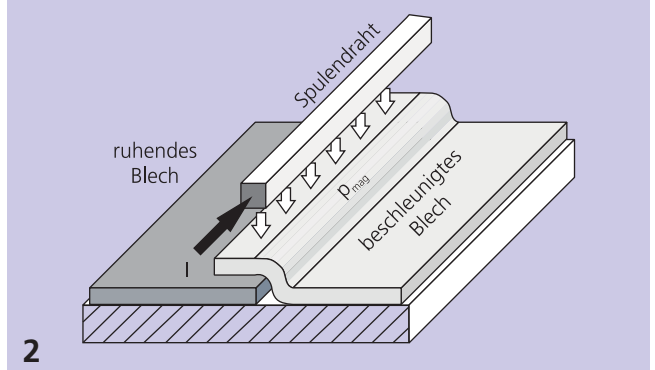
Das Prinzip wurde am Fraunhofer IWS Dresden in den vergangenen Jahren erfolgreich für das stoffschlüssige Verbinden von rotationssymmetrischen Bauteilen im Überlappstoß angewandt. Dabei konnten unter anderem Aluminium-Stahl-, aber auch Aluminium-Kupfer- und Kupfer-Stahl- Verbindungen mit sehr guter Reproduzierbarkeit ohne die Ausbildung von spröden, intermetallischen Phasen in der Verbindungszone erzeugt werden. Die Dimensionen der verwendeten Werkzeugspulen zur Hochgeschwindigkeitsumformung des Außenrohres sind auf die hohen mechanischen Belastungen abgestimmt und garantieren eine hohe Anzahl an durchführbaren Pulsvorgängen.

Eine Anwendung des Magnetpulsschweißens für das Fügen von ebenen Blechstrukturen ist ebenfalls möglich. Eine Herausforderung stellt dabei allerdings die Spulengestaltung dar. Der Spulendraht sollte einerseits eine hohe mechanische Stabilität und andererseits einen geringen Leiterquerschnitt zur Erzeugung großer Magnetfelder aufweisen. Die Lösung dieser gegensätzlichen Forderungen erfordert eine neuartige Spulenkonstruktion.

## UNSERE LÖSUNG

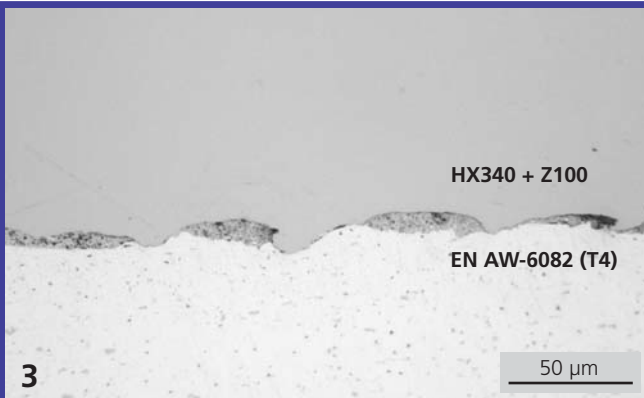
Unter Berücksichtigung der notwendigen Ströme und den zu erwartenden Kräften wurde für das elektromagnetische Pulsfügen ebener Bleche eine Werkzeugspule entwickelt, die das in Abbildung 2 dargestellte Prinzip umsetzt.

*Schematische Abbildung zur Wirkweise einer Flachspule beim elektromagnetischen Pulsfügen von Blechen*



Vorversuche zeigten, dass ein einzelner Schweißprozess nahezu unabhängig von der Nahtlänge maximal 30  $\mu$ s dauert. Mit Hilfe eines High-Speed-Kamerasystems konnten die Auftreffgeschwindigkeiten zwischen beiden Blechen ermittelt werden (Abb. 4). Sie erreichen Werte bis 300  $\text{m s}^{-1}$ .

Diese Ergebnisse dienen als Eingangsgrößen für die am Fraunhofer IWS durchgeführten numerische Simulationen zur Ermittlung der zu erwartenden Stoßbelastungen, welche in die Abstützung des ruhenden Blechs eingeleitet werden. Um einen hohen Wirkungsgrad der Werkzeugspule zu gewährleisten, erfolgten weitere FEM-Simulationen zur Beurteilung und Optimierung der komplexen magnetischen Druck- sowie Stromdichteverteilung.



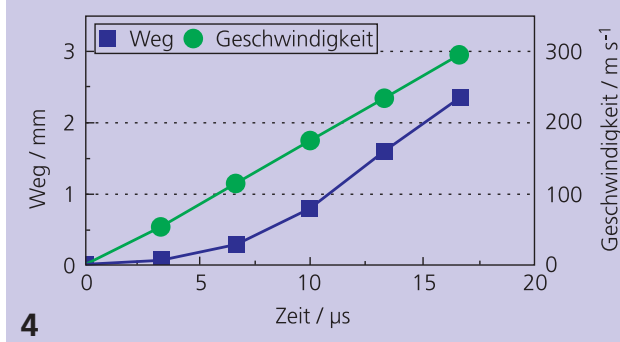
## ERGEBNISSE

Die Spulengeometrie wurde so gestaltet, dass sie flexibel an die jeweilige Fügeaufgabe angepasst werden kann. Unterschiedlich breite und auch konturierte Spulenstege sind in die Vorrichtung einsetzbar. Dadurch kann der magnetische Druck in seiner Verteilung und Intensität an die beteiligten Materialien und Blechstärken angepasst werden.

Die Abstützung des ruhenden Bleches ist so gestaltet, dass nahezu endlos lange Fügestellen im Überlappstoß hergestellt werden können. Eine integrierte Höhenverstellung der Abstützung ermöglicht es außerdem, sowohl Bleche unterschiedlicher Dicke einzulegen als auch Blech-Profilverbindungen zu realisieren.

Abbildung 3 zeigt den Querschliff einer linearen Fügezone zwischen verzinktem Stahlblech und einem Aluminiumblech mit der für das elektromagnetische Pulsfügen typischen, welligen Struktur. Erste mechanische Tests zeigen, dass die Festigkeit der stoffschlüssigen Verbindung über der des Grundwerkstoffs Aluminium liegt, was auf die Verfestigung, die während des Hochgeschwindigkeitsumformens und der Kollision auftritt, zurückzuführen ist.

Gemessene Position des beschleunigten Bleches während des elektromagnetischen Pulsfügens (High-Speed Aufnahme mit 300.000 Bildern pro Sekunde)



Neben der Schnelligkeit des Verfahrens ist die Einsparung aufwendiger Vor- oder Nachbehandlungen ein großer Vorteil des Verfahrens. Es ist somit sowohl für die Herstellung von Halbzeugen als auch im Montageprozess geeignet, da artungleiche Materialien im Überlappstoß gefügt und sofort weiter verarbeitet werden können.

Das Verfahren ist auch im Karosseriebau anwendbar, wo Überlappverbindungen üblicherweise durch Widerstandspunktschweißungen am Flansch zweier aufeinanderliegender Stahlbleche erzeugt werden. Mittels Magnetpulsschweißen ist es zudem möglich, stoffschlüssige Hybridverbindungen in dieser Konfiguration zu erzeugen. Ein Fügeseit dient als Beschleunigungsstrecke für das Material in der Fügezone. Um unnötigen Positionieraufwand im Montageprozess zu vermeiden, werden dafür lokale Sicken in das Blech eingebracht. Anschließend können die Fügepartner wie gewohnt mit einem Nullspalt aufeinander gelegt und schließlich in den Sickenbereichen mittels Magnetpulsschweißen verbunden werden. Das Bauteil in Abbildung 4 zeigt sowohl eine mittels Magnetpulsumformung erzeugte Sicke als auch die magnetpuls geschweißte Steppnaht zwischen dem Aluminium- und dem Stahlblech.

- 1 Werkzeugspule aus Kupfer mit mittigem Spulensteg
- 3 Lichtmikroskopische Aufnahme der Fügezone im Querschliff
- 5 Stahl-Aluminium-Hybridplatte aus zweistufigem Fügeprozess

## KONTAKT

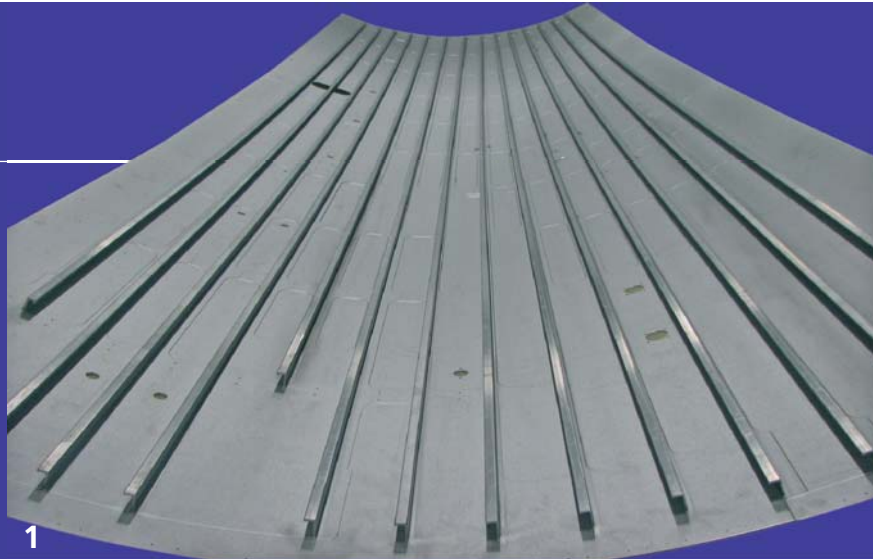
M.Sc. Jörg Bellmann

+49 351 83391-3716

joerg.bellmann@iws.fraunhofer.de







# UMFORMEN VON SPHÄRISCHEN ALUMINIUMBLECHEN FÜR DIE LUFTFAHRT

## DIE AUFGABE

Stetige Leichtbauanforderungen und das starke Bestreben nach niedrigen Fertigungskosten sorgen bei metallischen Flugzeugstrukturen für eine zunehmende Nachfrage an integralen Bauweisen. Neue Aluminiumlegierungen, beispielsweise auf AlMgSc-Basis, ermöglichen aufgrund niedrigerer Dichte und hoher Festigkeit eine deutliche Gewichtsreduzierung und zeichnen sich zudem durch bessere Korrosionsbeständigkeit sowie eine sehr gute Laserschweißbarkeit aus.

Fertigungstechnisch besteht die Vision, sphärisch gekrümmte Hautfelder mit Längsversteifungen (Abb. 1) im ebenen Zustand mittels Laser zu verschweißen und anschließend durch einen Kriechformprozess bei erhöhter Temperatur in die Endkontur zu bringen. Da die neuen AlMgSc-Legierungen auch bei Temperaturen oberhalb von 300 °C keine Eigenschaftsdegradation aufweisen, sind sie für diesen Prozess besonders geeignet.

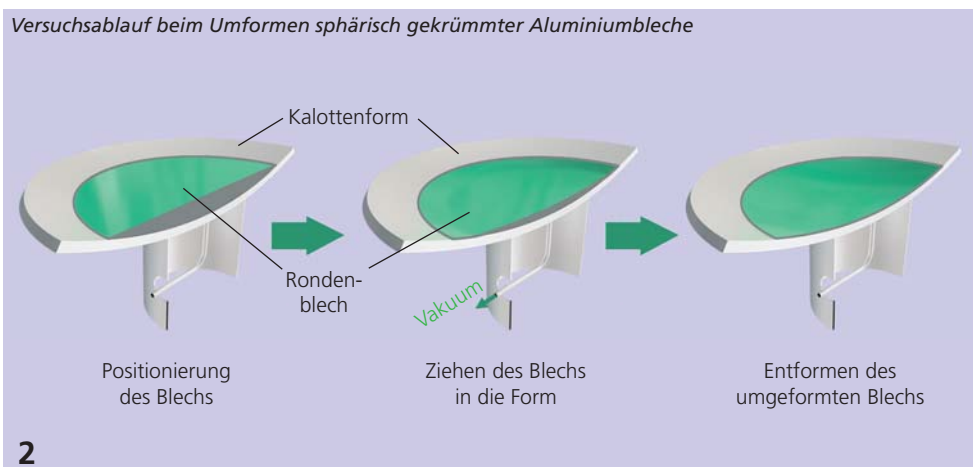
Eine besondere Herausforderung stellen doppelt gekrümmte bzw. sphärische Strukturen dar. Sie neigen während des Umformprozesses aufgrund tangentialer Druckspannungen im Randbereich zum Beulversagen. Hier sind innovative Lösungsansätze gefragt.

## UNSERE LÖSUNG

Das Fraunhofer IWS Dresden untersucht im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms »LuFo V« die Umformbarkeit von großflächigen, dünnwandigen und sphärischen Aluminiumstrukturen und erarbeitet Lösungen zur Reduzierung des Beulverhaltens.

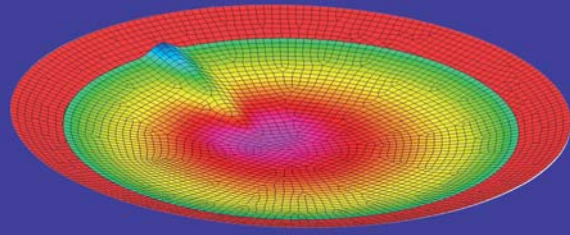
Als generisches Modell wurde ein Kugelschalensegment gewählt, welche in beide Richtungen die gleiche Krümmung aufweist. Daraus folgte der Lösungsansatz, in Abhängigkeit von Formkrümmung und Dicke des umzuförmenden Blechs iterativ »faltenkritische« Blech- bzw. Rondendurchmesser zu bestimmen. Das bedeutet, kleinere Rondendurchmesser (»unterkritische Durchmesser«) würden nicht beulen, größere (»überkritische«) Rondendurchmesser wären hingegen nicht faltenfrei umformbar.

In Abbildung 2 ist der Versuchsablauf schematisch dargestellt. Dabei werden kreisrunde Rondendbleche mit Hilfe des Vakuums in die Kalottenform gezogen.





3



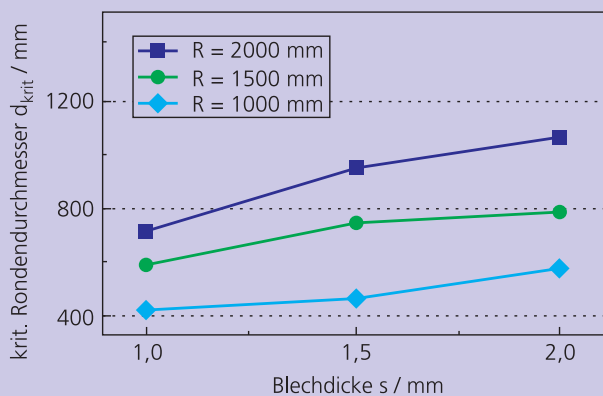
5

## ERGEBNISSE

Für die experimentellen Untersuchungen (Abb. 3) sind mit  $s = 1 \dots 1,5 \dots 2$  mm drei Blechdicken ausgewählt worden, die der Größenordnung von Flugzeuganwendungen entsprechen. Aufgrund von ebenfalls drei verwendeten Kalottenformen mit den Krümmungsradien  $R = 1000 \dots 1500 \dots 2000$  mm konnten insgesamt 9 faltenkritische Ronden Durchmesser  $d_{krit} = f(s, R)$  ermittelt werden. Die Umformversuche wurden durch FE-Analysen simulativ abgebildet, die mit den experimentellen Untersuchungen sehr gut korrelieren (Abb. 5).

Aus den Ergebnissen (Abb. 4) geht hervor, dass sowohl hohe Blechdicken  $s$  als auch große Krümmungsradien  $R$  (d. h. kleine Krümmungen  $1/R!$ ) zu höheren faltenkritischen Rondenmessern führen.

Vergleich der Ergebnisse aus Experiment und FE-Simulation für das Umformen sphärischer Aluminiumbleche



4

Unterkritische und damit faltenfrei umformbare Aluminiumbleche lassen sich während des Umformvorgangs bei erhöhter Temperatur (bei AlMgSc:  $\vartheta_{max} = 325$  °C) und andauernder Belastung (Vakuumdruck  $p_{Vak} \approx 1$  bar für etwa  $t = 2$  h) wärmebehandeln. Dabei werden durch den Kriecheffekt bzw. durch die Spannungsrelaxation sowohl eine geringere elastische Rückfederung als auch geringere Eigenspannungen erreicht, ohne die mechanischen Eigenschaften des Fertigbauteils maßgeblich zu beeinträchtigen.

Im Hinblick auf größere Strukturen, welche aufgrund der Faltenkritikalität nicht ohne weiteres umformbar sind, sind zusätzliche Maßnahmen (bspw. ein Niederhalter) notwendig. Auch dazu befinden sich aktuell Untersuchungen am Fraunhofer IWS Dresden in Arbeit.

- 1 Sphärische Rumpfschale mit laserstrahlgefügt Stringern zur Versteifung
- 3 Umformversuch mit einem »faltenüberkritischen« Rondenblech
- 5 FE-Simulation eines Umformversuchs mit einem »faltenüberkritischen« Rondenblech

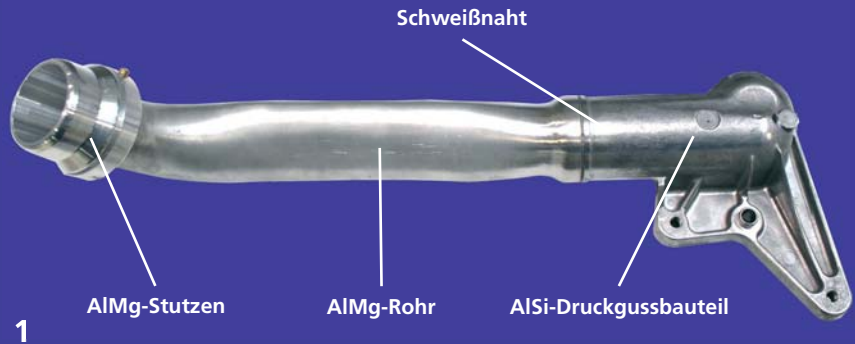
## KONTAKT

Dipl.-Ing. Frieder Zimmermann

+49 351 83391-3063

frieder.zimmermann@iws.fraunhofer.de





# DICHTSCHWEISSEN VON DRUCKGUSSWERKSTOFFEN MIT FASERLASER

## DIE AUFGABE

Aluminium-Druckguss wird im Automobilbau wegen seiner hervorragenden Gießbarkeit vielseitig eingesetzt, insbesondere jedoch für Bauteile mit dünnwandigen Querschnitten. Diese Gusskomponenten weisen häufig Schnittstellen zu Profil- oder Rohrrhalbzeugen auf, die druckdicht und mit hoher, reproduzierbarer Schweißnahtqualität miteinander verbunden werden müssen. Qualitativ hochwertige Fügeverbindungen der beteiligten Komponenten sind eine wesentliche Voraussetzung für deren industrielle Anwendung. Daneben muss der eingesetzte Prozess verzugsarm ausgelegt werden, um den Toleranzen im Zusammenbau und in der Einbausituation gerecht zu werden.

Für solch anspruchsvolle Verbindungen von Druckgusskomponenten sind Strahlschweißverfahren, bei denen die Komponenten in den schmelzflüssigen Zustand überführt werden, bisher nicht geeignet. Bedingt durch das Auftreten von Lunkern oder Poren, die beim Druckgießen verfahrensbedingt auftreten und unter hohem Druck stehen, kommt es zu einem extrem instabilen Schweißprozess. Auch die Formtrennmittel aus dem Druckgussprozess behindern die homogene Schweißnahtausbildung. Infolge dessen entstehen im Schweißgut verstärkt Poren, im Schweißprozess treten stochastische Auswürfe auf. Konventionell hergestellte Druckgussbauteile gelten deshalb als nahezu nicht schweißbar.

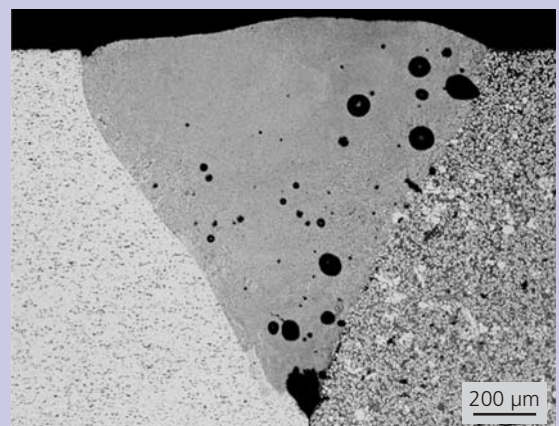
Um dennoch die Herstellung verzugsarmer, druckdicht verschweißter Druckgussbauteile zu ermöglichen, ist die Entwicklung eines neuen Schmelzschweißverfahrens unerlässlich. Es soll durch wenig Spritzer und eine deutlich reduzierte Auswurfwahrscheinlichkeit gekennzeichnet sein und eine Entgasung der Schmelze erlauben.

## UNSERE LÖSUNG

Für eine stoffschlüssige Fügeverbindung zwischen einer Aluminium-Druckgusskomponente und einem Aluminiumrohr, (Abb. 1) wurde am Fraunhofer IWS Dresden ein neuartiges Schweißverfahren entwickelt. Der Schweißprozess erfolgt unter Verwendung von Strahlquellen mit höchster Strahlqualität und unter Einsatz hochfrequenter Strahloszillation.

Die gezielte Beeinflussung der geometrischen Keyhole-Ausbildung durch Scanfrequenzen im kHz-Bereich ermöglicht das Einstellen einer werkstoffangepassten Schmelzbaddynamik und erlaubt ein gezieltes Ausgasen der Schmelze. Durch die kontrollierte Führung der dünnflüssigen Schmelze während des Prozesses erstarrt das flüssige Metall homogen. Dadurch wird die Anzahl von Gaseinschlüssen im Schweißgut deutlich reduziert. Die erhöhte Prozessstabilität des Verfahrens ermöglicht zudem eine hohe Ausbringung an geschweißten Komponenten.

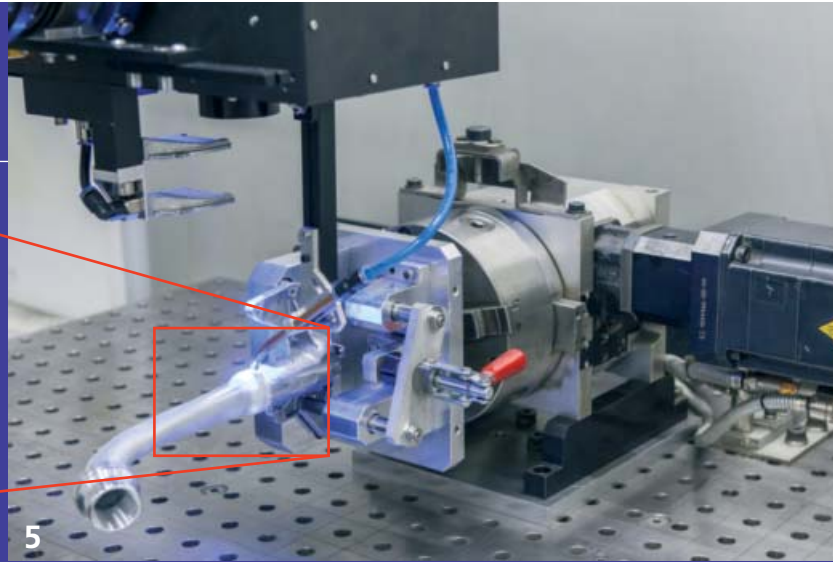
Mit hochfrequenter Strahloszillation lasergeschweißte Fügeverbindung (links: AlMg-Rohr, rechts: konventioneller AlSi-Druckguss)



2



3



5

## ERGEBNISSE

Die Schweißversuche an Druckgusskomponenten im Labor haben gezeigt, dass mit Hilfe der hochfrequenten Strahloszillation eine Stabilisierung der Keyhole-Ausbildung erzielt wird. Der Prozess verläuft gleichmäßig und stabil, ohne die für Druckgussbauteile übliche massive Spritzer- oder Auswurfproblematik.

Bestätigt werden diese Beobachtungen von der metallographischen Analyse. Im Lichtmikroskop zeigt sich, dass die verbleibende Porenanzahl im Schweißgut äußerst gering ist (Abb. 2). Die im Vergleich zum Laserstrahlschweißen ohne Strahloszillation auftretenden Poren konzentrieren sich nur noch auf der Seite des Druckgussbauteils. Der durchgeführte Bauteiltest, bei dem die Schweißnaht mit 2,5 bar Innendruck beaufschlagt wird, verläuft ohne Fehleranzeigen, die Schweißnaht ist druckdicht.

Bedingt durch den geringen Energieeintrag in das Bauteil (Laserleistung < 1 kW) weist das 3D-geformte Bauteile nach dem Schweißprozess eine sehr hohe Maßhaltigkeit auf, Verzug ist kaum noch messbar. Komplexe Einbausituationen werden somit ohne zusätzlichen Richtprozess der Bauteile möglich. Darüber hinaus belegen Schweißversuche an einer großen Zahl von Prototypen die Serientauglichkeit des entwickelten Prozesses mit den gewünschten Eigenschaften.

*Blick durch die im Strahlengang koaxial angeordnete Kamera zur Fügstellendetektion und Positionierung des Laserstrahls über die Scanneroptik*



4

Das Angebot des Fraunhofer IWS umfasste dabei die werkstofftechnische Analyse, das Fügstellendesign, die Prozessentwicklung und die Charakterisierung der Verbindungseigenschaften.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde der Schweißprozess durch das Fraunhofer IWS bei einem Automobilzulieferer in die Serienproduktion (Abb. 3/5) überführt. Dieser Schritt umfasste neben dem Technologietransfer die Integration von Hardware (Laser und Schweißoptik) und integrierte Nahterkennung in eine bestehende Schweißmaschine.

Ergänzend wurde eine dem Anwendungszweck entsprechende Software zur Steuerung der Scanneroptik und zur automatisierten Bilderkennung entwickelt (Abb. 4) und in die Schweißmaschine integriert. Mit dem speziell entwickelten Schweißprozess, der automatisierten Bilderkennung und der eigens entwickelten Software für die Scanneransteuerung steht nunmehr ein serientaugliches Verfahren für weitere Applikationen zur Verfügung.

- 1 Lasergeschweißte Druckguss-Kühlrohrkomponente
- 3 Laserstrahlschweißprozess
- 5 Technischer Aufbau beim Kunden mit IWS-Schweißkopf (oben) und aktiver Bilderkennung (rechts)

## KONTAKT

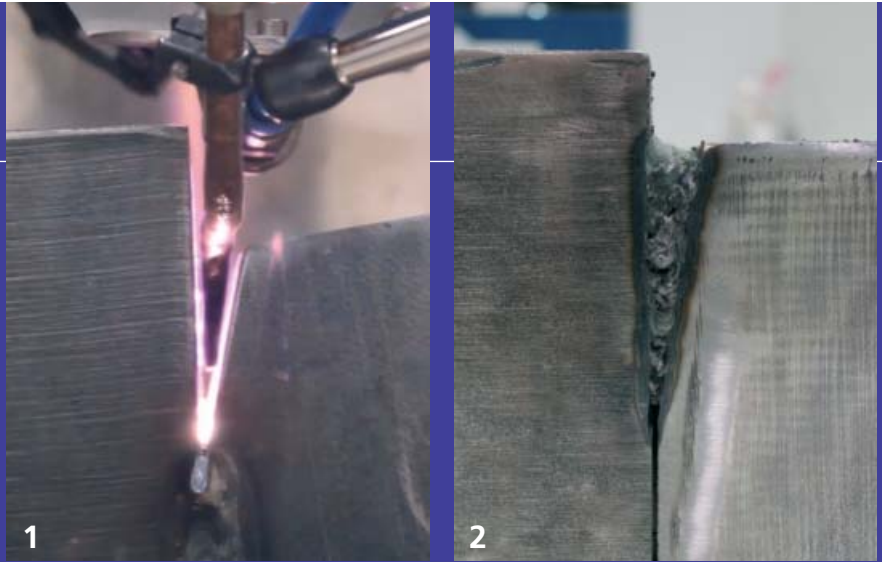
Dr. Dirk Dittrich

+49 351 83391-3228

dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de







# MEHRLAGENSCHWEISSEN IM STAHLBAU MIT HOCHLEISTUNGSDIODENLASER

## DIE AUFGABE

Im Stahlbau bilden konventionelle Schweißverfahren wie Unterpulver- und Metall-Schutzgasschweißen das Rückgrat in der Herstellung von dickwandigen Schweißkonstruktionen. Um mit den Schweißwerkzeugen tief in die Schweißfuge einzudringen, sind häufig Öffnungswinkel größer 40 Grad nötig. Diese klassische Fugenvorbereitung wird im Stahlbau mittels Plasma- oder Brennschnitt durchgeführt. Sie führt zu einem sehr großen V-förmigen Fugenquerschnitt, der mit Blick auf den Bauteilverzug mit zunehmender Blechdicke ungünstig wirkt.

Laserbasierte Verfahren sind im Stahlbau derzeit ungebräuchlich, da die klassische Nahtvorbereitung für Laseranwendungen ungeeignet und die mechanische Bearbeitung der Fuge im Vorfeld zu teuer ist. Um den im modernen Stahlbau typischen Anforderungen nach effizienten Schweißverfahren zur Überbrückung großer Bauteiltoleranzen in Verbindung mit geringer Nacharbeit gerecht zu werden und das große Wertschöpfungspotenzial bei der Herstellung von dickwandigen Bauteilen weiterhin für Deutschland attraktiv zu halten, hat das Fraunhofer IWS Dresden ein laserbasiertes Verfahren für das Fügen im Dickblechbereich entwickelt.

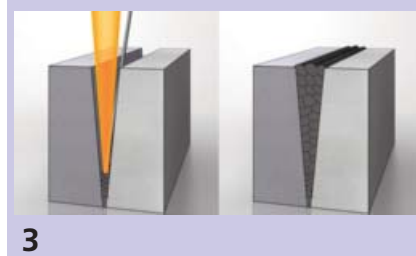
## UNSERE LÖSUNG

Das von den Forschern am Fraunhofer IWS entwickelte Laser-Mehrlagen-Engstspaltschweißen (Laser-MES) stellt einen neuen Ansatz für die Herstellung von Schweißkonstruktionen aus dicken Blechen sowie für Reparaturaufgaben dar. Mit diesem Verfahren wird es möglich, die bisherige Prozessgrenzen beim Tiefschweißen mit dem Laserstrahl weitgehend aufzuheben.

Der bereits beim Schweißen von dicken Aluminiumblechen erprobte Lösungsansatz ist für Stahlbauanwendungen nur leicht modifiziert worden. Statt einem Faserlaser kommt ein 10 kW-Diodenlaser zum Einsatz. Bedingt durch seine Strahlqualität und der ausgewählten optischen Komponenten wird ein Spotdurchmesser von ca. 3 mm auf dem Werkstück erzeugt, der Bauteiltoleranzen von ca. 2 mm sicher überbrückt.

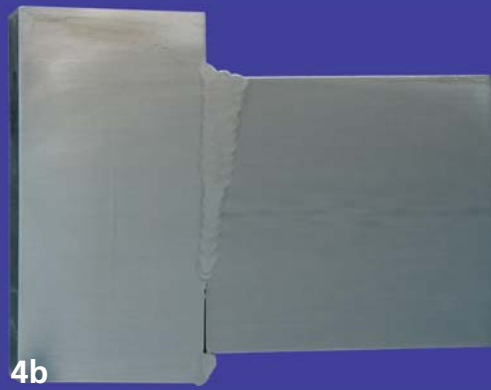
Da der minimale Öffnungswinkel der Fuge von der Kaustik des Laserstrahles abhängt, kann dieser auf Werte kleiner 15 Grad reduziert werden, ohne das die Flanken im oberen Bereich der betrachteten 120 mm DHV-Naht abgeschmolzen werden. Der Strahl wird statisch durch die Fuge geführt, um entweder mit einer Raupe pro Lage oder mit zwei bis drei Raupen pro Lage den Spalt zu füllen (Abb. 3). Als Zusatzwerkstoff wird ein Schweißdraht mit einem Durchmesser von 1,6 mm schleppend dem Prozess zugeführt.

Prinzipbild des Laser-Mehrlagen-Engstspaltschweißens (MES)



Kleine Schmelzbadgrößen, wie sie aus dem klassischen Laserstrahlschweißen bekannt sind, können bei der mehrlagig ausgeführten Schweißnaht beibehalten werden.

Dadurch werden die Vorteile des Laserstrahlschweißens, geringer und lokal begrenzter Energieeintrag ins Bauteil sowie reduzierter Bauteilverzug auch für Dickblechanwendungen realisiert. Die hohe Leistungsintensität im Fokus wird gleichermaßen für die lokale Aufschmelzung der Bauteilflanken und des Schweißzusatzwerkstoffs genutzt.



## ERGEBNISSE

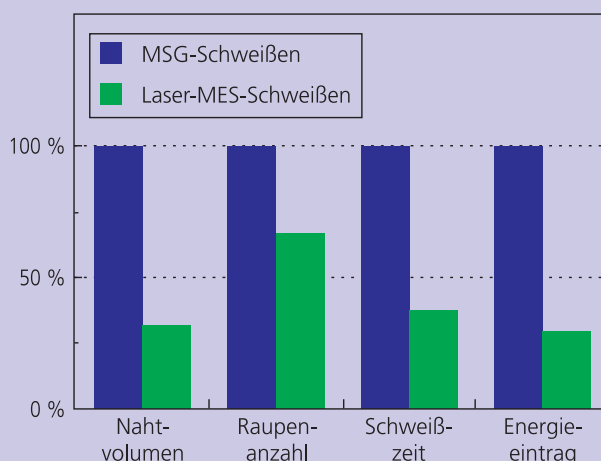
Mit den gewählten optischen Komponenten und einer Fugenvorbereitung mit  $12^\circ$  Öffnungswinkel wurden bauteilähnliche Proben von 800 mm Länge und 60 mm Nahthöhe hergestellt (Abb. 1, 2, 4). Die Kantenvorbereitung erfolgte mit der im Stahlbau üblichen Fugenvorbereitung, dem Plasmaschnitt. Die Besonderheit liegt in dem extrem schmalen Öffnungswinkel. Durch doppelseitiges Schweißen der HV-Naht sind mit dem Laser-MES-Verfahren sogar Blechdicken bis 120 mm sicher schweißbar.

Optimierte Schweißparameter garantieren die reproduzierbare Herstellung riss- und bindefehlerfreier Schweißverbindungen mit homogenem Lagenaufbau. Die Laserschweißnaht weist ebenso wie die konventionelle Schweißnaht eine sehr geringe Porenhäufigkeit auf (Abb. 4a und b) und kann somit der besten Bewertungsgruppe (B) für Unregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 13919-1 zugeordnet werden.

Das Schweißnahtvolumen wurde durch den Einsatz des Laser-MES-Verfahrens gegenüber dem MAG-Verfahren auf 32 Prozent reduziert (Abb. 5). Dadurch reduziert sich die Anzahl der zu schweißenden Einzelraupen bei einer 120 mm DHV-Naht von 105 auf 70, wodurch auch die Schweißzeit sinkt. Zudem werden durch das Laser-MES-Verfahren Abschmelzraten von ca.  $5 \text{ kg h}^{-1}$  erzielt, ein sehr hoher Wert für Laseranwendungen. Vorteilhaft ist der geringe Schweißnahtquerschnitt auch hinsichtlich des deutlich reduzierten Bauteilverzuges. Dazu trägt neben dem geringeren Flankenöffnungswinkel auch der drastisch reduzierte Energieeintrag je Schweißlage bei.

Die Untersuchungen bestätigen die hohen Erwartungen an das Laser-MES-Verfahren hinsichtlich seiner Effizienz, die für den Stahlbau wichtige Entscheidungskriterien darstellt. Durch den Einsatz von Diodenlaser sinkt auch die Investitionshürde, da die Kosten pro Kilowatt Laserleistung seit einigen Jahren deutlich abfallen.

DHV-Naht mit 120 mm Dicke



- 1,2 Laser-MES Fügen einer 60 mm dicken HV-Probe mit 12 Grad Öffnungswinkel  
4 Querschliff von konventionellgeschweißten (a) und lasergeschweißten (b) Stahlblechen

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Robert Strohbach

+49 351 83391-3576

robert.strohbach@iws.fraunhofer.de





# LASERVERFESTIGTE STAHLBLECHSTRUKTUREN – JETZT AUCH ZYKLISCH HOCH BELASTBAR!

## DIE AUFGABE

Die aktuellen gesetzlichen Vorgaben für die Automobilhersteller fordern eine drastische Limitierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und forcieren damit die Entwicklung im Karosseriebau hinsichtlich effizienter Leichtbauweisen ohne Einschränkung der Fahrzeugsicherheit. Daraus ergeben sich immer höhere Anforderungen an die Beanspruchbarkeit bei immer komplexeren Strukturen. Mit konventionellen Konstruktionsprinzipien, die überwiegend auf der Verwendung homogener, hochfester Werkstoffe beruhen, sind diese Anforderungen künftig nicht mehr ausreichend umsetzbar.

Zur Verbesserung der Crasheigenschaften von Karosseriebauteilen aus Stahl wurde der innovative Ansatz der »Lokalen Laserverfestigung« entwickelt. Durch eine gezielte Beeinflussung der lokalen Werkstofffestigkeit können damit Bauteileigenschaften präzise auf die wirkenden Belastungen abgestimmt werden. Eine deutliche Verbesserung der statischen sowie dynamischen (Crash-) Belastbarkeit von Stahlblechbauteilen wurde bereits nachgewiesen. Automobile Fahrwerks- aber auch Karosseriekomponenten unterliegen im Betrieb allerdings nicht nur statischen und stoßartigen sondern auch zyklischen mechanischen Beanspruchungen.

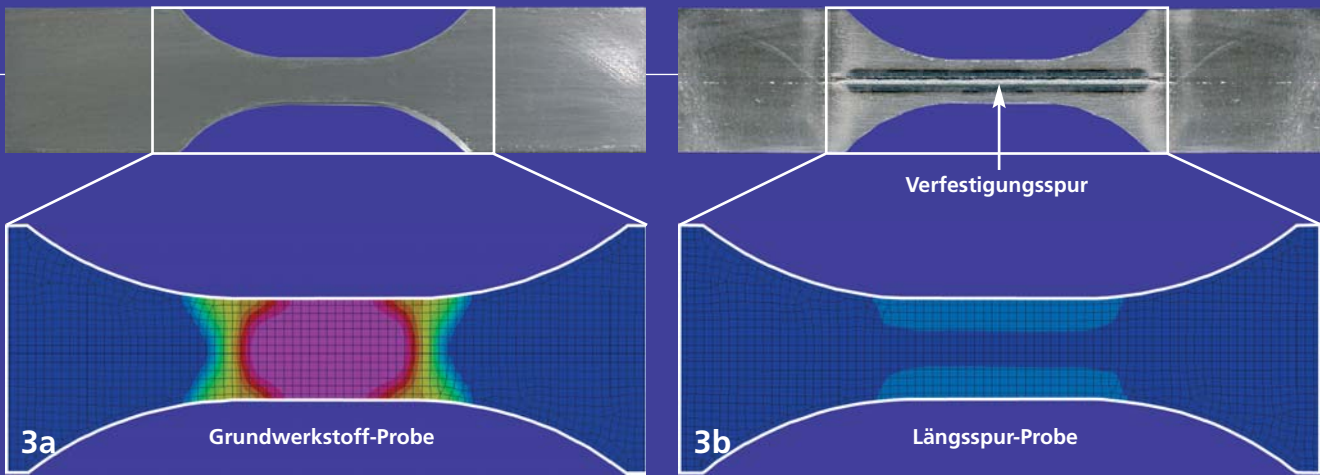
Die Aufgabe bestand daher in der Untersuchung des Einflusses von Laserverfestigungsstrukturen auf das Schwingfestigkeitsverhalten fahrwerkstypischer Blechwerkstoffe. Dazu wurden qualitative Vergleiche zwischen laserverfestigten Zuständen und dem reinen Grundwerkstoffzustand angestellt und so eine Basis zur Abschätzung des Effekts einer laserverfestigten Struktur auf die Schwingfestigkeit und damit für die spätere Bauteilauslegung geschaffen.

## UNSERE LÖSUNG

Das Verfahren der lokalen Laserverfestigung zielt grundsätzlich auf den Einsatz kostengünstiger niedrigfester Stahlbleche mit minimierter Wandstärke ab, welche lediglich in hoch belasteten Bereichen lokal verfestigt werden. Zur Herstellung wird ein fokussierter Laserstrahl mit definierter Geschwindigkeit über die Blechoberfläche geführt. Infolge des konzentrierten Wärmeeintrags kommt es zu einer spurförmigen starken Erwärmung oder sogar zur Aufschmelzung mit anschließender Erstarrung (Abb. 2). Bei der anschließenden Abkühlung tritt für die überwiegend im Fahrzeugbau eingesetzten Stähle eine martensitische Härtung ein, welche gezielt als lokale Verfestigungsmethode genutzt wird. Damit kann die Zugfestigkeit in der Behandlungszone bis zu einem Faktor von 2,5 gegenüber der Grundwerkstofffestigkeit gesteigert werden.

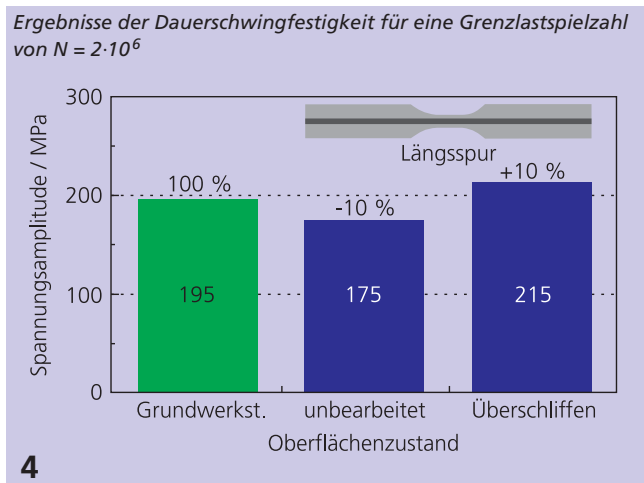
Zur Untersuchung des Einflusses der Verfestigungsspuren auf die Schwingfestigkeit wurde gemeinsam mit der Abteilung Werkstoffcharakterisierung und -prüfung des IWS für einen fahrwerkstypischen Werkstoff (S355 J2+N) ein spezielles Prüfprogramm entwickelt. Darin wurde der Einfluss von Gestalt (Spurorientierung) und Oberflächenzustand im Zeit- sowie Dauerfestigkeitsbereich analysiert.

Die Versuchsmatrix umfasst die in Abbildung 4 dargestellten Varianten. Im überschlifften Zustand wurden die Schweißnahtkerben entfernt und für die gesamte Probenoberfläche eine mittlere Rauheit von  $R_z \approx 6 \mu\text{m}$  eingestellt. Zusätzlich wurden FE-Simulationen (statisch nichtlinear) durchgeführt, um den Anteil der plastischen Dehnung infolge definierter Belastungsamplituden für verschiedene Spurorientierungen zu ermitteln.



## ERGEBNISSE

In der FE-Simulation wurden die Schwingproben mit einer definierten statischen Zugbelastung beaufschlagt und anschließend wieder entlastet (1 Zyklus). Bei der reinen Grundwerkstoffprobe stellt sich im Prüfbereich eine homogen verteilte bleibende plastische Dehnung ein (Abb. 3a). Bei gleicher Belastungsamplitude verbleibt bei einer Längsspurorientierung eine vernachlässigbar geringe plastische Dehnung im Bereich des Grundwerkstoffs (Abb. 3b). Als Ursache hierfür ist das deutlich höhere Fließspannungsniveau der Verfestigungsspur zu sehen. Dieses längsorientierte »Zugband« reduziert die bleibende Verformung, was auch eine wirksame Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit erwarten lässt.



Bei einer Spuranordnung längs zur Belastungsrichtung tritt im unbearbeiteten Zustand die Rissinitiierung an der Randkerbe der Verfestigungsspur auf. Die Stützwirkung der Spur bewirkt bei gleicher Belastungsamplitude insgesamt eine geringere Dehnungsamplitude und kann damit den festigkeitsreduzierenden Effekt der geometrischen Kerbe nahezu ausgleichen. Die Dauerfestigkeit wird im Vergleich zum Grundwerkstoffniveau nur leicht reduziert (Abb. 4, blau unbearbeitet).

Im überschlifften Zustand konnte mittels Längsspuranordnung sogar eine tendenzielle Verbesserung der Dauerfestigkeit erzielt werden (Abb. 4, blau überschlifft). Trotz eines relativ geringen Stichprobenumfangs für die hier vorgestellten Versuch, zeigten sich die grundsätzlichen Niveauunterschiede im Dauerfestigkeitsbereich auch für den Zeitfestigkeitsbereich.

Es konnte nachgewiesen werden, dass Verfestigungsspuren nicht nur für statisch und stoßartig beanspruchte Strukturen eingesetzt werden können, sondern unter Beachtung bestimmter Randbedingungen auch auf zyklisch beanspruchte Bauteile anwendbar sind. Während die Belastbarkeit insbesondere von Fahrwerkskomponenten für stoßartige Missbrauchslastfälle maßgeblich erhöht wird, konnten erfolgreich Strategien zur Beibehaltung der Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs identifiziert werden. Eine tendenzielle Verbesserung kann bei einer weiteren Prozessoptimierung erwartet werden, wodurch beispielsweise auf ein zusätzliches Überschleifen der Proben verzichtet werden könnte.

- 1 *Automobile Fahrwerksbaugruppe mit einem Stahlblech-Querlenker*
- 2 *Laserverfestigte Stahlblechstruktur*
- 3 *Vergleich der plastischen Dehnung an unbehandelten (a) und laserverfestigten (b) Schwingproben (gleiche Skalierung)*

## KONTAKT

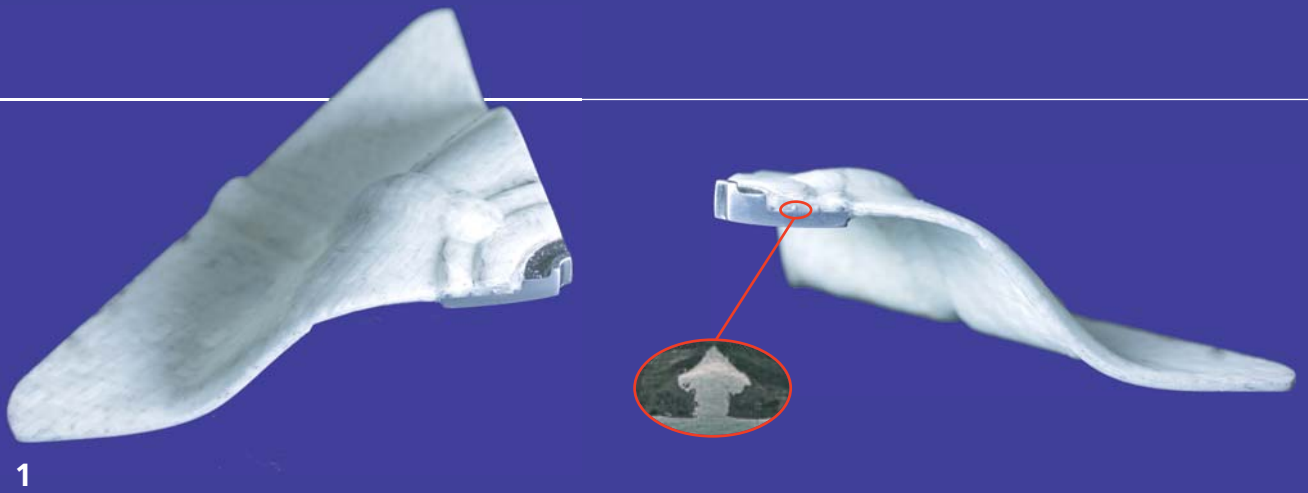
Dipl.-Ing. Markus Wagner

+49 351 83391-3536

markus.wagner@iws.fraunhofer.de







1

# TECHNOLOGIEN ZUM DIREKTFÜGEN VON METALL UND THERMOPLAST

## DIE AUFGABE

Belastungsgerechte Mischverbindungen mit den werkstoff-spezifischen Vorteilen von Metall und Thermoplast werden für industrielle Anwendungen, gerade im Bereich des Leichtbaus, zunehmend bedeutsamer. Hierzu sind effiziente Prozessketten erforderlich, bei denen abgestimmt auf den konkreten Lastfall eine optimierte Vorbehandlungs- und Fügetechnologie sowie angepasste Werkzeuge zur Prozesssimulation und Eigenschaftscharakterisierung zum Einsatz kommen.

Post- und In-Mould Assembly-Prozesse, mechanische Fügeverfahren wie Schrauben und Nieten und das Kleben sind bisher gängige Verfahren, um zuverlässig artungleiche Fügeverbindungen herzustellen. Spezifische Restriktionen dieser Verfahren ergeben sich insbesondere durch:

- eingeschränkte Geometrie komplexitäten,
- lokale Querschnittsverminderungen mit gestörtem Kraftfluss bei Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV),
- die Notwendigkeit zur Einbringung von Zusatzmaterialien
- sowie verlängerte Prozesszeiten.

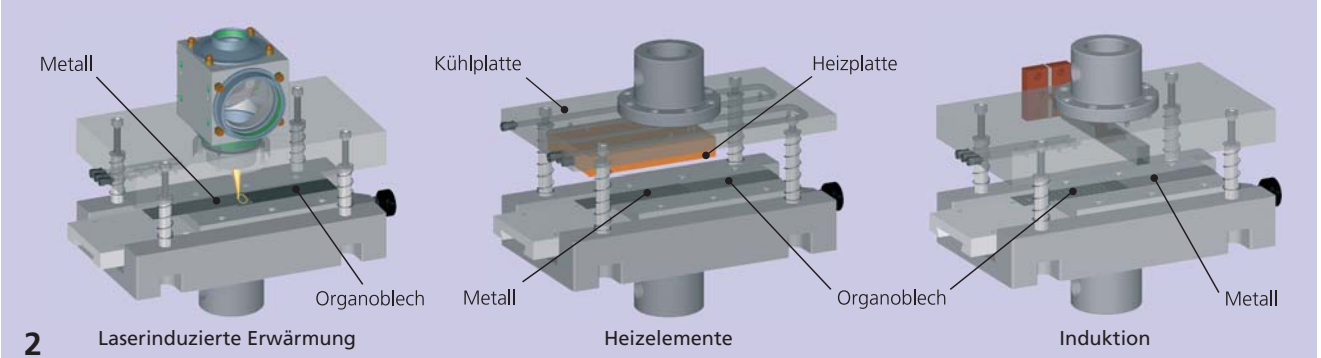
Deshalb werden neue Fügeverfahren ohne die genannten Restriktionen und mit kurzen Fügezeiten gesucht.

## UNSERE LÖSUNG

Basierend auf ausgeprägtem Werkstoffwissen und Prozess-Know-how zu laser- und plasmabasierten Fertigungsverfahren werden am Fraunhofer IWS Dresden neben Oberflächenvorbehandlung und Klebtechnologien auch Verfahren zum thermisch induzierten Fügen untersucht. Die thermischen Direktfügeverfahren zeichnen sich durch kurze Fügezeiten und die Substitution von Zusatzmaterial (z. B. Klebstoff) aus. Beim Fügen von Mischverbindungen aus Metall und Thermoplast greift das IWS auf belastungsgerechte Oberflächenstrukturierungen, haftvermittelnde Schichten und unterschiedliche Erwärmungskonzepte zurück. Die applikationsangepasste Erwärmung erfolgt mit Laserstrahlung, Heizelementen oder Induktion (Abb. 2). Eine weitere Methode zur Einbringung kurzzeitiger lokaler Wärmeenergie besteht in der Verwendung von Reaktivmulti-schichten (RMS).

Auf Basis numerischer Simulationen wird der erforderliche Wärmeeintrag an die jeweilige Werkstoffpaarung sowie Fügegeometrie technologieabhängig angepasst, um ein ausreichendes Schmelzvolumen ohne Schädigungen der Grundmaterialien zu erhalten.

*Schematische Darstellung unterschiedlicher Erwärmungskonzepte*

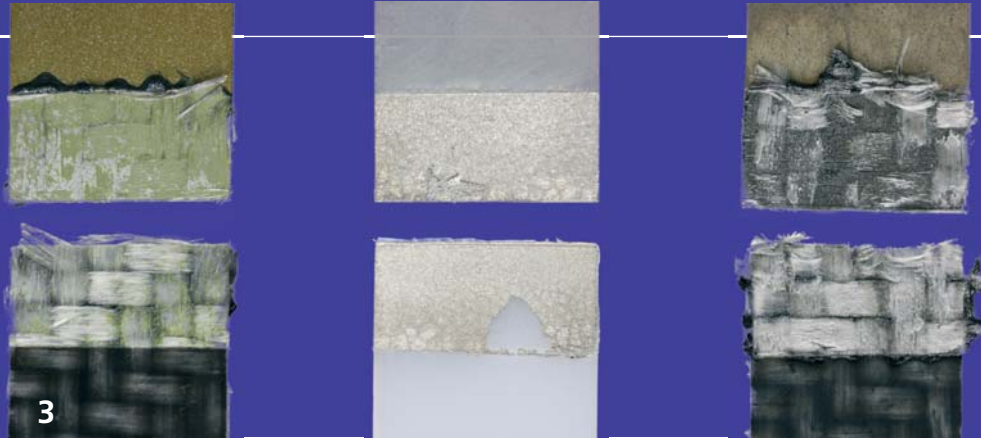


2

Laserinduzierte Erwärmung

Heizelemente

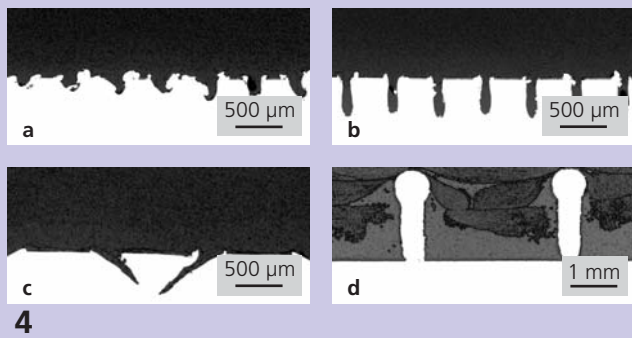
Induktion



## ERGEBNISSE

In einem ersten Schritt wird die Metalloberfläche belastungsgerecht strukturiert (Abb. 4a-c) oder mit generativ aufgebauten Strukturen (Abb. 4d) versehen, um eine bestmögliche Anbindung des aufgeschmolzenen thermoplastischen Materials zu ermöglichen. Um die Effizienz derartig ausgebildeter Oberflächenstrukturen nicht nur auf einen reinen Formschluss sowie schwache nichtkovalente Wechselwirkungen (Van-der-Waals-Kräfte) zu beschränken, kann die Festigkeit dieser Metall-Thermoplast-Mischverbindungen werkstoffspezifisch durch Applikation haftvermittelnder Schichten nochmals signifikant erhöht werden. Die so ausgebildete Direktverbindung vereint die Wirkprinzipien form- und stoffschlüssiger Fügeverfahren.

*Direktverbindungen mit angepassten Oberflächenstrukturen zur Verbesserung der Verbundfestigkeiten von Metall (unten) zu Thermoplast (a-c) sowie zu FKV (d)*



Für das wirtschaftliche Fügen hochkomplexer Bauteilgeometrien aus Metall und Thermoplasten werden am Fraunhofer IWS Dresden unterschiedliche applikationsangepasste Erwärmungskonzepte (Abb. 2) hinsichtlich ihrer Einsatzpotenziale und -grenzen untersucht. Das laserbasierte Einbringen von Wärme in die Bauteiloberflächen bietet gegenüber der konventionellen Erwärmung über Heizelemente die Möglichkeit eines örtlich begrenzten und wenn benötigt auch graduierten Temperaturverlaufs mit integrierter Pyrometerregelung und hoher Geometrieflexibilität.

Bei induktiver Erwärmung ist hingegen eine deutlich ausgeprägtere Kenntnis zur Fügestellengeometrie, dem Werkstoffverhalten sowie der Prozessführung für die Auslegung von Generator und Induktor notwendig. Vorteile dieser Technologie beruhen ebenfalls auf sehr kurzen Fügezeiten mit der Möglichkeit, auch im Bereich optisch unzugänglicher Stellen eine Erwärmung zu realisieren. Gleiches gilt auch für die Verwendung von RMS-Folien. Bei entsprechender Prozessführung lässt sich die eingebrachte Wärmemenge somit auf den Kontaktbereich zwischen Metall und Thermoplast reduzieren.

Durch Wärmeleitung erfolgt bei allen Verfahren im Kontaktbereich ein gezieltes Plastifizieren des thermoplastischen Werkstoffs bzw. der thermoplastischen Werkstoffmatrix vorkonsolidierter Faserverbund-Halbzeuge (sog. Organobleche). Durch das Aufbringen eines Fügedrucks fließt das plastifizierte Material in die zuvor erzeugten Strukturen mit Hinterschnittgeometrie und erstarrt dort formschlüssig bzw. bindet stoffschlüssig an die haftvermittelnde Schicht an. Die erzielbaren Prozesszeiten lassen sich so auf nur wenige Sekunden verkürzen, was gegenüber konventionellen Verfahrenslösungen wie dem Kleben einen entscheidenden Vorteil darstellt.

- 1 *Glasfaser-Polypropylen-Federbeindom mit direktgefügttem Edelstahl-Domlager*
- 3 *Bruchbilder thermisch gefügter Metall-Thermoplast-Verbindungen*

## KONTAKT

Dipl.-Ing. Maurice Langer

+49 351 83391-3852

maurice.langer@iws.fraunhofer.de





## STRUKTURELLES KLEBEN TEXTILVERSTÄRKTER THERMOPLASTVERBUNDE

### DIE AUFGABE

Für den industriellen Einsatz von thermoplastischen Faserverbundkunststoffen in Großserien werden auch geeignete reproduzierbare stoffschlüssige Verbindungstechniken benötigt. Besonderen Stellenwert hat dabei die Klebtechnik aufgrund der Möglichkeit, eine flächige und gleichmäßige Lastübertragung in der komplexen Faserverbundstruktur zu realisieren. Da thermoplastische Polymere wie Polyamide, Polyethylen und Polypropylen bei der Herstellung und Verarbeitung von Faserkunststoffverbunden im Vergleich zu den duromerbasierten Matrixwerkstoffen Vorteile bei der Fertigung hoher Stückzahlen bieten, muss bei der Fügeprozessentwicklung neben einer hohen Anfangsfestigkeit und guten Alterungsstabilität auch auf geringe Taktzeiten innerhalb einer Serienfertigung geachtet werden.

### UNSERE LÖSUNG

In der Arbeitsgruppe Kleben und Faserverbundtechnik des Fraunhofer IWS Dresden wird deshalb an der Entwicklung und Umsetzung von automatisierbaren Prozessschritten gearbeitet, die das Kleben ebener und räumlich gekrümmter faserverstärkter Thermoplastverbunde ermöglichen. Dabei werden die folgenden Teilprozessschritte:

- Oberflächenvorbehandlung,
- Klebstoffauswahl,
- Klebstoffauftrag und -aushärtung,
- Dokumentation der Übertragungsfestigkeit und Alterungsbeständigkeit

untersucht und weiterentwickelt. Diese Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit der TU Dresden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 639 »Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen« durchgeführt.

### *Oberflächenvorbehandlung:*

Thermoplaste mit niedriger Oberflächenenergie, wie z. B. Polypropylen, sind aufgrund ihrer schlechten Adhäsion nicht ohne weiteres klebbar und daher schwer für strukturelle Anwendungen einsetzbar. Die Nutzung physikalischer Methoden zur Oberflächenvorbehandlung oder die Verwendung modifizierter Klebstoffsysteme können hierbei eine verbesserte Adhäsion bewirken. Atmosphärendruckplasma sowie Laserstrahlung sind für eine flexible Oberflächenvorbehandlung besonders prädestiniert. Diese beiden Methoden werden in erster Linie zur Oberflächenreinigung (Entfernung von Weichmachern, Trennmitteln usw.) und teilweise zur Funktionalisierung der unpolaren Kunststoffoberfläche genutzt. Bei der automatisierten Plasmavorbehandlung mit geringem Wärmeinput konnte die Bildung funktioneller Gruppen nachgewiesen werden. Neben der Oberflächenreinigung und -aktivierung führt insbesondere die Laseroberflächenstrukturierung zu einer Vergrößerung der Oberfläche und ermöglicht dem Klebstoff neben der chemischen Wechselwirkung zur Oberfläche eine mechanische Verankerung.

### *Klebstoff-Auswahl, -Auftrag und -Aushärtung:*

Um hochbelastbare strukturelle Klebungen an faserverstärkten Thermoplastverbunden zu realisieren, wurden angepasste Klebstoffsysteme auf Basis von Polyolefinen, Epoxidharz, Polyurethan sowie Acrylaten untersucht und deren quasistatische Verbindungsfestigkeiten verglichen. Um den Prozessanforderungen der Serienfertigung gerecht zu werden, wurde außerdem die Möglichkeit der beschleunigten Klebstoffhärtung am Beispiel thermisch sensibler Glasfaser-Polypropylen-Verbunde erforscht, damit auch größere Strukturen in einer Zeit von wenigen Minuten handhabbar für die nächsten Prozessschritte sind.



Mittels hochfrequenter Induktionserwärmung und der Zugabe von ferromagnetischen Partikeln in industrielle 1K- und 2K-epoxidharzbasierte Klebstoffsysteme erfolgte eine beschleunigte Klebstoffhärtung. Die Aushärtungszeiten konnten von 60 - 90 min im Wärmeschrank auf 3 - 5 min reduziert werden. Die glasfaserverstärkten thermoplastischen Bauteile waren dabei keiner großen thermischen Belastung ausgesetzt, wie es beispielsweise bei einer konventionellen Härtung in Wärmeschränken typisch ist, da die Erwärmung lokal und zielgerichtet in der Klebstoffschicht erfolgt.

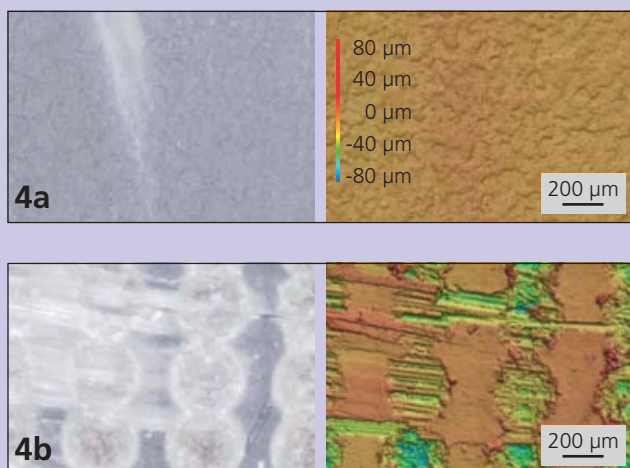
## ERGEBNISSE

Beim strukturellen Kleben von faserverstärkten Thermoplastverbunden wurden deutliche Steigerungen der Klebfestigkeiten auch nach Alterungstests mittels Atmosphärendruckplasma-behandlung sowie gepulster Festkörperlaserstrahlung erzielt. Dabei konnte im Vergleich zu dem Ausgangszustand (nur durch Lösungsmittel gereinigt), mit reinem adhäsiven Versagen der Klebungen und Schälkräften von  $15 \text{ N m}^{-1}$ , durch Laserstrukturierung der Proben eine deutliche Steigerung der Schälkräfte auf  $3800 \text{ N m}^{-1}$  und einem kohäsiven bzw. delaminierenden

Versagen der Proben erzielt werden. Die unterschiedlichen Oberflächenzustände der Ausgangsprobe und der laserstrukturierten Probe sind in Abbildung 4 dargestellt. Weiterhin konnte eine beschleunigte Klebstoffhärtung mittels hochfrequenter Induktion realisiert werden. Möglich wurde dies durch das Eindispersieren von nanoskaligen super-paramagnetischen mit Siliziumoxid umhüllten Eisenoxidpartikeln in verschiedene Klebstoffsysteme. Ein bewegungsgesteuerter Induktor regt die Nanoferrite an und sorgt für eine Klebstoffaushärtung bei Temperaturen zwischen  $130 \text{ °C} - 180 \text{ °C}$ .

Bei der mechanischen Prüfung wurden Klebfestigkeiten der induktiv gehärteten Proben auf einem Niveau der konventionell gehärteten Proben basierend auf Härtung bei Raumtemperatur bzw. im Wärmeschrank erzielt. Bei Verwendung von glasfaserverstärktem Polypropylen lagen diese je nach Vorbehandlung und Klebstoffsystem zwischen 8 MPa und 12 MPa. Die Automatisierung des Klebprozesses konnte innerhalb des Sonderforschungsbereiches 639 durch Kopplung der Vorbehandlungsaggregate (Atmosphärenplasmakopf) sowie der Klebstoffauftragseinheit (2K-Dosier- und Auftragseinheit) oder der Induktionsanlage an kooperativ arbeitenden Industrierobotern umgesetzt werden (Abb. 2 und 3).

Oberflächen von faserverstärkten Thermoplastverbunden (links: Mikroskopie, rechts Oberflächentopologie) a) unbehandelt und b) Laserstrukturierung mit punktueller Faserfreilegung



- 1 Funktionsintegrativer Fahrzeugsystemträger (FiF)
- 2 Fahrerkabine des FiF's mit der automatisierten Vorbehandlung und Klebstoffapplikation
- 3 Pyrometergeregelte induktiv beschleunigte Klebstoffhärtung mit Industrieroboter

## KONTAKT

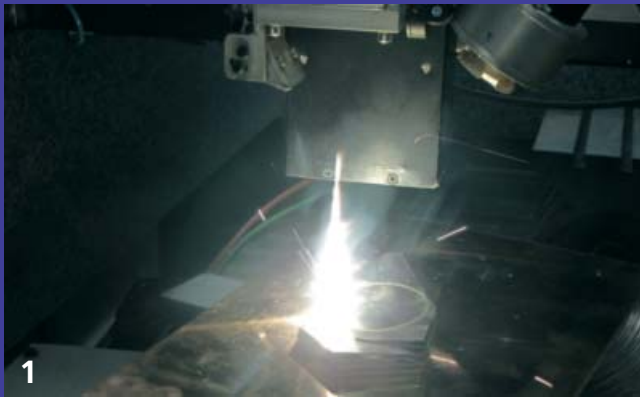
Dipl.-Ing. Tom Schiefer

+49 351 83391-3853

tom.schiefer@iws.fraunhofer.de







# PROZESSMONITORING BEIM LASERSTRAHLSCHWEISSEN VON TITANLEGIERUNGEN

## DIE AUFGABE

Die Bearbeitung von Nichteisenmetallen durch Laser stellt hohe Anforderungen an die Wahl und Einhaltung der Prozessparameter. Vor allem in der Medizintechnik kommt es auf höchste Präzision und hohe Festigkeiten beim Fügen von titanbasierten Bauteilen an. Durch unzureichende Zufuhr von Schutzgas und die hohe Reaktionsfreudigkeit zu atmosphärischen Gasen kommt es zur Bildung von Anlauffarben im Bearbeitungsbe- reich. Die entstehenden Oxide sind nicht nur ein optisches Problem, sondern beeinflussen auch die Biokompatibilität von Implantatprodukten und die Korrosionsbeständigkeit der Füge- verbindung.

Beim Fügen von Materialien mit mittlerem bzw. niedrigem Schmelzpunkt sind Systeme zur Prozessanalyse weitgehend etabliert. Der Prozess für das Fügen von Nichteisenmetallen mit einem sehr hohen Schmelzpunkt lässt sich derzeit nicht zufriedenstellend überwachen.

Eine genaue Bestimmung der Parameter, die zu Abweichungen im Bearbeitungsprozess führen, ist vor allem wegen der starken Abhängigkeit der zu messenden Strahlungsintensität vom Emis- sionskoeffizient des Materials schwierig. Dieser hängt wiederum von der Materialoberfläche, von der Homogenität des Material- gefüges und der Wellenlänge ab.

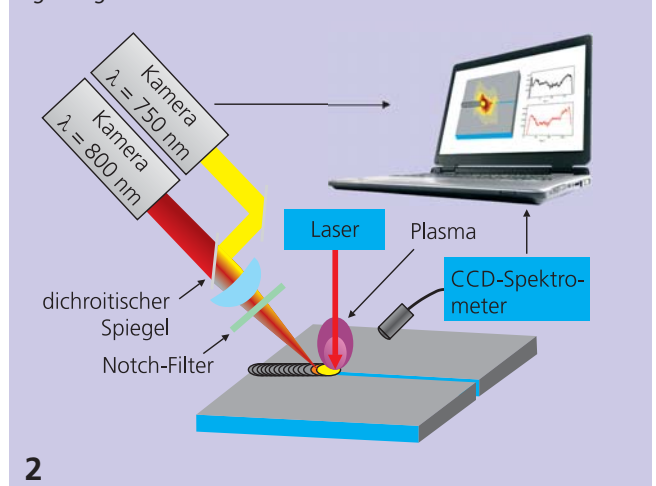
Ziel des Projektes war deshalb die Entwicklung einer kamera- basierte Online-Prozesskontrolle, basierend auf der ortsaufge- lösten pyrometrischen Messung von Temperaturen der Material- oberfläche. Dabei sollten Inhomogenitäten im Temperaturver- lauf zur Detektion von Fehlstellen beim Fügeprozess genutzt werden.

## UNSERE LÖSUNG

Das orts aufgelöste Messen von Temperaturen bis 2500 °C wird über spezielle CMOS-Kamerasensoren umgesetzt. Dabei kommt es vor allem darauf an, sowohl sehr hohe als auch niedrige Intensitäten zu erfassen. Durch die Verwendung zwei voneinander getrennter Kamerasysteme mit einer Dynamik von 120 dB können auch bei großer Intensität Temperat- urinformationen vom Bearbeitungsort ermittelt werden.

Für den Aufbau des Pyrometers wurden zwei Kameras des Typs UI-5120SE orthogonal zueinander angeordnet. Jede dieser Kameras detektiert die Abstrahlintensität beim Bearbeitungs- prozess in einem genau definierten Wellenlängenbereich. Eine Kamera filtert die Wärmestrahlung bei 800 nm, die zweite bei 750 nm. Die Bereiche wurden so gewählt, dass die Kameras im empfindlichen Bereich arbeiten und ein hoher Anteil an Photonen vom Messobjekt über einen möglichst großen Tem- peraturmessbereich erfasst werden kann.

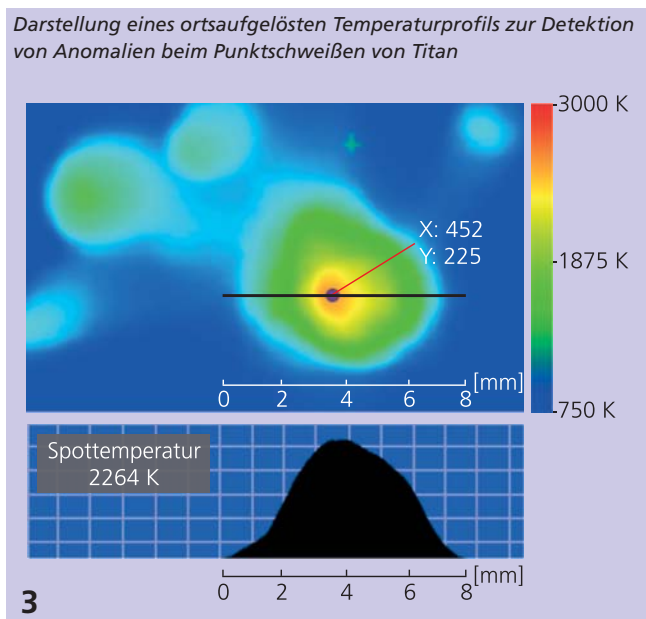
Kamerabasierte Online-Prozesskontrolle zum Fügen von Titan- legierungen



**ERGEBNISSE**

Die vom Probenstück emittierte Strahlung wird durch abbildende Elemente fokussiert und der Strahlengang mittels Strahlenteiler zu beiden Kameras aufgeteilt. Mittels dieses Pyrometeraufbaus kann die thermische Strahlung, unabhängig von den Einflussgrößen des untersuchten Objektes, erfasst werden. Vor jeder Messung wird ein Kalibrierprozess durchgeführt. Dabei wird eine Probeschweißnaht erstellt und parallel das System an die auftretenden Intensitäten angepasst. Durch die in die Software integrierte Lagekorrektur für die aufgenommenen Intensitätsinformationen können die beiden Bilder exakt miteinander überlagert werden.

In Abbildung 3 ist die orts aufgelöste Temperaturverteilung auf der Oberfläche eines Titanwerkstücks zu sehen. Der Verlauf des laserbasierten Punktschweißprozesses, bei dem es durch



falsche Schutzgaszufuhr zu einem inhomogenen Wärmeeintrag und Materialspritzern kommt, kann durch die quotientenbasierte Temperaturüberwachung aktiv überwacht und kontrolliert werden. Durch Registrierung dieser Ereignisse kann neben der Prozessregelung eine Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Dabei kann die Temperatur der zentralen Bearbeitungszone über eine Spotmessung ermittelt werden. Eine Messung des Temperaturprofils zeigt die Homogenität der Wärmeeinflusszone auf. Durch die Einbindung des Systems in eine Maschinensteuerung kann eine echtzeitfähige Prüfung und Regelung bei Fügeprozessen von Nichteisenmetallen umgesetzt werden.

Das Kamerapyrometer hat folgende Parameter:

- Steuerung der Pyrometereinstellungen,
- echtzeitfähige Messvorgänge,
- halbautomatische Kalibrierung,
- vergrößerte Abbildung im Bereich bis 3:1 Abbildungsmaßstab,
- 50 Bilder pro Sekunde zur Bildgebung bei entsprechenden Schweißgeschwindigkeiten,
- Online-Analyse des Schweißpunktes in Form von Spot- bzw. Linienmessung.

**1 Laserschweißen mit Online-Prozesskontrolle**

**KONTAKT**

Dipl.-Ing. (FH) Benjamin Lempe

+49 375 536-1973

benjamin.lempe@iws.fraunhofer.de



# ZENTREN





# SYNERGIEN DURCH GLOBALE VERNETZUNG DIE CCL-GROUP IN MICHIGAN, USA

Für die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung ist der US-amerikanische Markt einer der wichtigsten Innovationsmotoren. Aus diesem Grund fokussiert sich das Fraunhofer IWS seit mehr als zehn Jahren auf die Entwicklung ihrer Tochtergesellschaften in Michigan, USA. Ziele der Geschäftstätigkeit in den USA sind vor allem der Technologietransfer, das Erweitern der wissenschaftlichen Kompetenz durch intensive Zusammenarbeit mit Forschungszentren der internationalen Spitzenklasse und die Qualifikation von Mitarbeitern in einem internationalen Umfeld.

Bereits seit 1994 betreibt Fraunhofer in den USA eine 100-prozentige Tochter der Fraunhofer-Gesellschaft, die Fraunhofer USA Inc. Derzeit arbeiten unter dem Dach von Fraunhofer USA sieben Forschungseinheiten und weitere Einrichtungen. Fraunhofer IWS ist Mutterinstitut und Forschungspartner für zwei, seit 2015 eigenständig agierende Forschungseinheiten. Das eng mit der Michigan State University MSU verknüpfte Center for Coatings and Diamond Technologies CCD hat seinen Sitz in East Lansing, Michigan. Das Center for Laser Applications CLA ist in Plymouth, Michigan, angesiedelt.

Für einen nachhaltigen Erfolg der Zentren sind die Kenntnis der Kundenanforderungen, die kontinuierliche wissenschaftliche Forschung und die Aufrechterhaltung eines wettbewerbsfähigen Innovationspotenzials unerlässlich. Deshalb fand am 17. und 18. August 2015 in East Lansing und Plymouth ein gemeinsames strategisches Audit der beiden Center statt. Forschungs- und Finanzziele der einzelnen Center sowie gemeinsame Entwicklungsschwerpunkte für die nächsten Jahre wurden definiert und vor den Auditoren präsentiert. Das 8-köpfige Gutachtergremium aus USA und Deutschland, bestehend aus sechs Industrievertretern und zwei Forschungseinrichtungen, bescheinigten den Stakeholdern eine klare Strategie und Entwicklungspers-

## KOORDINATION

### DR. ANJA TECHEL

Telefon: +49 351 83391 3473  
anja.techel@iws.fraunhofer.de



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

spektive der Center. Der umfangreiche bilaterale Wissenschaftleraus-tausch wird einhellig als eine Basis des bisherigen und zukünftigen Erfolgs angesehen. CCD und CLA haben ihre gute Position im amerikanischen Forschungsmarkt im Jahr 2015 erfolgreich gefestigt und blicken positiv auf das abgeschlossene Wirtschaftsjahr zurück. Im folgenden sind ausgewählte Ergebnisse des Geschäftsjahres 2015 dargestellt.

## BUDGET CCL GROUP

5,5 MIO. \$

### MITARBEITER

Anzahl

Stammpersonal	22
Mitarbeiter MSU (Arbeitsort CCD)	7
Wissenschaftliche Hilfskräfte	22
<b>GESAMT</b>	<b>51</b>

### PUBLIKATIONEN

Anzahl

Promotionen	3
Diplom- / Masterarbeiten	6
Veröffentlichungen	7
<b>GESAMT</b>	<b>16</b>

### PATENTE (Erstanmeldung)

3





## CENTER FOR COATINGS AND DIAMOND TECHNOLOGIES (CCD)

Das Fraunhofer-Center für Coatings and Diamond Technologies (CCD) ist eines der beiden neu gegründeten Center in den USA. Das Center befindet sich in East Lansing, Michigan, auf dem Campus der Michigan State University (MSU). Seit zwölf Jahren arbeiten die MSU und die IWS-Tochter auf den Forschungsfeldern Dünnschicht- und Diamanttechnik zusammen. Fraunhofer CCD bietet kundenspezifische Technologielösungen durch Kombination von Prozess, Materialien und systemtechnischem Know-how mit wissenschaftlicher Exzellenz, Qualitäts- und Projektmanagement.

Im Jahr 2014 erhielten die Forscher des Fraunhofer CCD und der Michigan State University den Zuschlag für ein ARPA-E-Projekt auf dem Gebiet der Diamantelektronik. Das Projekt beinhaltet die Entwicklung einer Diamant-basierten Diode, die bei einer Durchbruchspannung von 1200 V und einem Vorlaufstrom von 100 A arbeitet (siehe auch S. 74-77). Diamant besitzt im Hinblick auf elektronische Anwendungen herausragende Eigenschaften, z. B. die dominierende Wärmeleitfähigkeit, die hohe Ladungsträgerbeweglichkeit und die hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit. Hinsichtlich der Diamantsynthese und Verarbeitung von qualitativ hochwertigen einkristallinen Diamantmaterialien besitzen Fraunhofer CCD und MSU spezifisches Prozess-Know-how und patentierte Anlagentechnik.

Gemeinsam mit der Mackinac Technology Company und der University of Michigan arbeiten die Forscher des Fraunhofer CCD an einem vom amerikanischen Verkehrsministerium bezuschussten Projekt zur Entwicklung einer antireflektierenden Beschichtung für die Windschutzscheibe von Bussen (SBIR-Projekt). Ziel der Untersuchung ist die Verbesserung der Verkehrssicherheit durch Reduzierung von Reflexionen durch die für die Fahrgäste notwendige Innenbeleuchtung.

### DIREKTOR

**PROF. DR. THOMAS SCHÜLKE**

Telefon +1 517 432 8173  
tschuelke@fraunhofer.org



### FRAUNHOFER-USA

**CENTER FOR COATINGS AND  
DIAMOND TECHNOLOGIES CCD**

Engineering Research Complex,  
1449 Engineering Research Court,  
East Lansing, Michigan 48824-1226, USA

[www.ccd.fraunhofer.org](http://www.ccd.fraunhofer.org)

In Phase I des Projektes hat das Team gezeigt, dass eine innovative Beschichtung aus amorphem diamantähnlichen Kohlenstoff (DLC) die Reflexion spürbar reduzieren und die Fahrersicht signifikant verbessern kann. Phase II hat das Ziel, die Technologie in Richtung einer Kommerzialisierung für Linienbusfenster voranzutreiben.

Ein neues, gemeinsam mit dem Fraunhofer CLA voran getriebenes Projekt widmet sich der Aufgabe, kostengünstig nachrüstbare energieeffiziente Fensterverglasung für bereits bestehende Gebäude zu entwickeln. Das Konzept basiert auf einem sehr dünnen, leichten, optisch transparentem und UV-stabilem Polymerfilm, der mit einer wellenlängen-selektiven und nicht-metallischen Schicht versehen wird. Im Bereich des sichtbaren Lichts ist der beschichtete Polymerfilm vollständig transparent. Er kann mit Hilfe eines Leichtmetallrahmens leicht an der Innenseite des Gebäudes an einem Fenster installiert und auch wieder entfernt werden.



## CENTER FOR LASER APPLICATIONS (CLA)

Das Fraunhofer-Center for Laser Applications (CLA) ist ein Ergebnis der Bündelung aller Laser-Aktivitäten von Fraunhofer USA in einem gemeinsamen Center. Im Mittelpunkt der Aktivitäten steht die Bereitstellung von Laser-Technologien und Systemen für industrielle Anwendungen. Das CLA befindet sich in Plymouth, Michigan in der Nähe von Detroit. Das 1200 m<sup>2</sup> große Laserapplikationslabor beherbergt modernstes Laser- und Anlagenequipment.

Fraunhofer CLA bietet eine breite Palette von Laserprozessen einschließlich Schweißen, Schneiden, Bohren, Beschichten, Wärmebehandeln, Oberflächenmarkierung und -strukturierung sowie additive Fertigung. Ein weiteres Spezialgebiet ist die Entwicklung von Systemtechnik zur Prozessüberwachung und Steuerung sowie Bearbeitungsköpfe zum Auftragschweißen und Generieren.

Eine neue Innovation im Jahr 2015 war die Entwicklung eines Innenbeschichtungskopfes für hohe Beschichtungsraten, nutzbar in Verbindung mit Diodenlaser bis 6 kW Laserleistung. Mit dem Beschichtungskopf können Bohrungen ab 100 mm Durchmesser bis zu 1 m tief beschichtet werden.

Fraunhofer CLA hat daneben erfolgreich Prozesse für das Additive Manufacturing großer Bauteile entwickelt (siehe S. 100-101). Dabei kommen Roboter und CNC-Bewegungssysteme in Kombination mit IWS Pulverdüsentechnologie zur Anwendung. Die direkten Beschichtungsprozesse bieten im Vergleich zu pulverbettbasierten Verfahren den Vorteil, große Teile schneller und mit weniger Beschränkungen bezüglich der Bauteilgröße zu erzeugen.

### DIREKTOR

#### CRAIG BRATT

Telefon +1 734 738 0550  
cbratt@fraunhofer.org



### FRAUNHOFER-USA

#### CENTER FOR LASER APPLICATIONS CLA

46025 Port St.  
Plymouth, Michigan 48170-6080, USA

[www.cla.fraunhofer.org](http://www.cla.fraunhofer.org)

Die Lithium-Ionen-Akku-Technologie wurde in den letzten 7 Jahren eine Kernkompetenz des Fraunhofer CLA. Das Center hat im Auftrag mehrerer großer Industriekunden aus dem Bereich Lithium-Ionen-Batterie zahlreiche Projekte zur Entwicklung von Technologien zum Laserschweißen bearbeitet. Einige Ergebnisse wurden bereits erfolgreich in die industrielle Produktion bei verschiedenen Kunden überführt. Die Arbeiten auf diesem Gebiet werden auch in den folgenden Jahren fortgesetzt.

Die Beteiligung an Messen und Tagungen ist für das Center eine bewährte Möglichkeit zur Akquisition von Neukunden. Im Rahmen der ALAW 2016 lädt das Fraunhofer CLA vom 6.-8. Juni die Konferenzteilnehmer wieder zur Besichtigung ihrer Labore und zum Erfahrungsaustausch mit den Fraunhofer-Forschern ein. 2015 nutzten 150 Teilnehmer die Möglichkeiten des Open house.

## FRAUNHOFER PROJECT CENTER AND WROCLAW CENTER OF EXCELLENCE FOR MANUFACTURING

Die Forschungsarbeiten des im Jahr 2008 gegründeten Fraunhofer Project Center Laser Integrated Manufacturing in Wrocław (PCW) konzentrieren sich auf drei Hauptgebiete:

- Auftragsforschung und Entwicklungen für Industriekunden,
- öffentlich geförderte Forschungsprojekte auf nationaler, bilateraler und europäischer F&E-Programm Ebene,
- interne Projekte, um die Kompetenz beider Partner zu stärken.

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

- Abtragen, Trennen und Fügen
- Mikrobearbeiten und - Thermisches Beschichten
- BigData-Plattform für Produktion und Medizin
- Randschichttechnik

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

- Herstellungstechnologien, einschließlich generativer Technologien
- Produktionsmanagement und Qualitätsprüfsystem
- Produktionsautomatisierung und Steuerung

In den Jahren 2015 und 2016 stellt die Errichtung des Wrocław Centre of Excellence (WCE) den Schwerpunkt der Arbeiten dar. Durch eine enge Zusammenarbeit der Technischen Universität Wrocław mit dem Nationalen Zentrum für Forschung und Entwicklung und renommierten deutschen

Wissenschaftseinrichtungen, der Universität Würzburg und dem Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden, wird das bestehende Kooperationsnetzwerk erfolgreich erweitert. Die Vision der WCE umfasst innovative Technologie- und Geräteentwicklung auf der state-of-the-Art-Ebene sowie wirtschaftliche Aktivitäten durch Wechselwirkungen mit etablierten polnischen und europäischen Unternehmen sowie die Gründung neuer Spin-off-Unternehmen. Besonderes Augenmerk wird auf neue Materialien, Nanophotonik, additive laserbasierte Technologien und neue Management-Organisationssysteme gelegt.

WCE soll die Fortentwicklung in den Herstellungstechnologien mit der Nanophotonik kombinieren, um neuartige Designs, effizientere Gerätelösungen und zugehörige Dienstleistungen in folgenden Bereichen zu gewährleisten:

- Herstellung von Multi-Material-Elementen, Teile mit interessanten mechanischen/ thermischen/ chemischen Eigenschaften und komplette Multifunktionsprodukte.
- Erzeugen von Eigenschaften, die mit herkömmlichen Mikrobearbeitungssystemen nicht zu erreichen sind.
- Bildbearbeitung zur Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle - Überwachung und Steuerung von Laserprozessen.

### Partnerkonsortium von Wrocław Center of Excellence

FRAUNHOFER GESELLSCHAFT |

UNIVERSITY OF WÜRZBURG |  
Nanoplus GmbH |



WROCLAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

International Centre for Excellence  
in Manufacturing Technologies and  
Applications (ICEMTA)

Nanophotonics Technology Center (NTC)



- integrierte Systeme für kundenspezifisches Design und additive Fertigung von Einzelprodukten.
- vertriebsfähiges und bezahlbares System für Produktionsplanung und Kontrolle für moderne Industrie.
- Echtzeit-Simulation von Fertigungsprozessen auf Basis von 3D-Hallenlayout.
- Automatisierung von Fertigungsprozessen für Sensoren- und Gerätenetzwerke auf Basis von Internet der Dinge.
- Entwicklung von Infrarot-Photonenvorrichtungen und Systemen auf Basis neuer Materialien zum Ersetzen toxischer Bestandteile, wie Quecksilber oder Cadmium.
- Low-Power-Lösungen mit photonischen Komponenten für tragbare Gassensoren.
- neue Halbleitervorrichtungen, immun gegen externe Bedingungen, wie Temperatur, Druck oder mechanischen Schock.
- haltbare photonische Komponenten für effiziente Sensorsysteme und ihre Anwendung in schwer zugänglichen abgelegenen Gebieten.
- Fortentwicklung in den Epitaxie- und Post-Wachstumsverarbeitungstechnologien für die Fertigung von neuartigen photonischen und optoelektronischen Geräten, die die bestehenden übertreffen.

Die zweite wichtige Aktivität stellt das Projekt »MedMODEL« (2016-2018) dar, das für Förderung aus Mitteln von INTEREG-Programm (für die bilaterale Zusammenarbeit zwischen

**DIREKTOR**

**PROF. DR. EDWARD CHLEBUS**

TU Wroclaw

Telefon +48 71 320 2705

edward.chlebus@pwr.wroc.pl



**PROJECT CENTER LASER**

**INTEGRATED MANUFACTURING**

Wrocław University of Technology

ul. Łukasiewicza 5

50-371 Wrocław, Poland

**KOORDINATION**

**PROF. DR. KAROL KOZAK**

Telefon: +49 351 83391-3717

karol.kozak@iws.fraunhofer.de

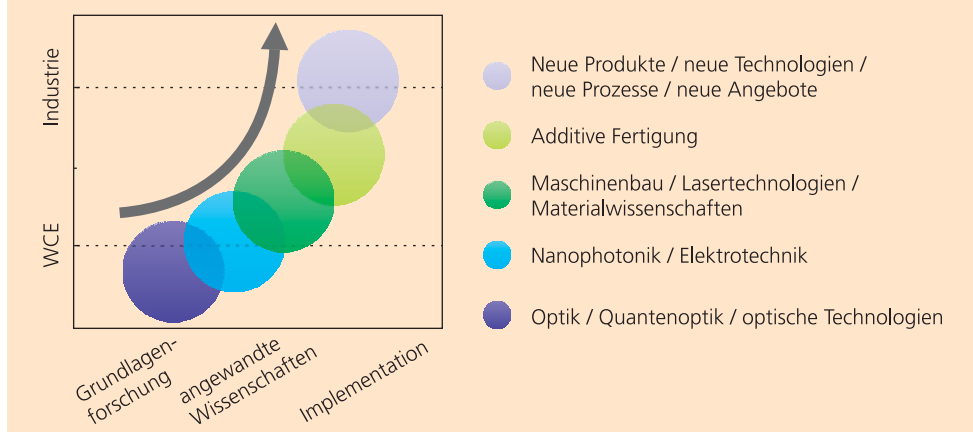


www.iws.fraunhofer.de/polen

Niederschlesien und Sachsen) anspruchsberechtigt ist. Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Einbindung von einheitlichen Standards für die Planung von chirurgischen Prozessen basierend auf präoperativen Modellen, hergestellt mit additiven Technologien, in die tägliche Praxis.

Das Konsortium besteht u. a. aus Wroclaw University of Technology (CAMT), Fraunhofer IWS, Universitätsklinikum Dresden, der Technischen Universität Dresden, dem Marschallamt der Woiwodschaft Niederschlesien sowie dem Fachklinikum Alfred Sokolowski in Walbrzych.

**Technologietransfer und Verwertung in WCE**



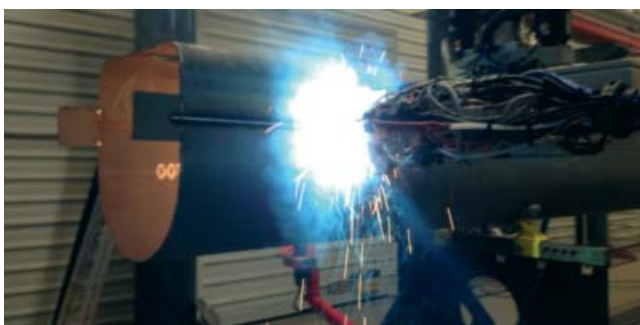




## DORTMUNDER OBERFLÄCHENCENTRUM (DOC®)

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

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



Aktuelle Schwerpunkte Dünnschichttechnik:

- Entwicklung leitfähiger, umformbarer Kohlenstoffschichtsysteme
- Graphite Like Carbon (GLC) und plasmanitrocarborierte Oberflächen für die Elektromobilität, z. B. für Stahl-Bipolarplatten für Brennstoffzellen sowie Al- und Cu-Elektroden für Batterien und Superkondensatoren (z. B. Leitfähigkeit vgl. Gold ohne Degradation im Brennstoffzellen-Stacktest, s. Seite 34)
- Diamor®-Schichtsysteme (ta-C: tetraedisch amorpher Kohlenstoff) für den Verschleißschutz auf Basis des short pulsed Arc (spArc®)-Verfahrens (z. B. erfolgreiche Serieneinführung von selbstschärfenden Kochmessern)
- neuartige PVD-Hochleistungsverfahren im Druckbereich über 30 mbar für die Bandveredelung und die Entwicklung von Korrosionsschutzsystemen auf Basis von Zinklegierungsüberzügen, z. B. für hochkorrosionsfeste metallische Überzüge (z. B. ZnMg) und metallische Überzüge für die Warmumformung (z. B. ZnFe)

Aktuelle Schwerpunkte Lasermaterialbearbeitung und Spritztechnik:

- Entwicklung von Fügeverfahren auf der Basis des Laser-MSG-Hybridschweißens für den Leichtbau, z. B. für das Schweißen von Mobilkrankomponenten aus höchstfesten Feinkornbaustählen (siehe Abb. S. 132)
- spritzerarmes Hochgeschwindigkeits-Laserschweißen mit Festkörperlaser hoher Strahlqualität
- Lichtbogendrahtspritzen
- Kombinationsverfahren Fügen/Lichtbogendrahtspritzen, z. B. bei der Nachverzinkung von Schweißnähten
- Remoteschweißen von Fahrzeugkomponenten
- kontinuierliche Laserflächenbehandlung von Bandoberflächen



Darüber hinaus bietet die Fraunhofer-Projektgruppe auf einer Fläche von 1100 m<sup>2</sup> eine Reihe sich ergänzender Verfahren zur Oberflächenveredlung 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 Korrosionsschutz-funktionalitäten sind in der Entwicklung.

Die Fraunhofer-Projektgruppe im DOC<sup>®</sup> verfügt unter anderem über folgende Anlagentechnik:

- 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 Lichtbogen-drahtspritztechnik mit Spritzkabine, Vakuumkammer und Möglichkeiten der Kombination mit dem Laser,
- 3D-taugliche Laser- und Laser-MSG-Hybrid-schweißanlagen (Kragarmportalanlage, Roboteranlagen) mit einem mobilen 8 kW Faserlaser,
- Remoteschweißtechnik.

#### **KOORDINATION**

##### **DR. AXEL ZWICK**

Fraunhofer IWS  
Telefon +49 231 844 3512  
axel.zwick@iws.fraunhofer.de



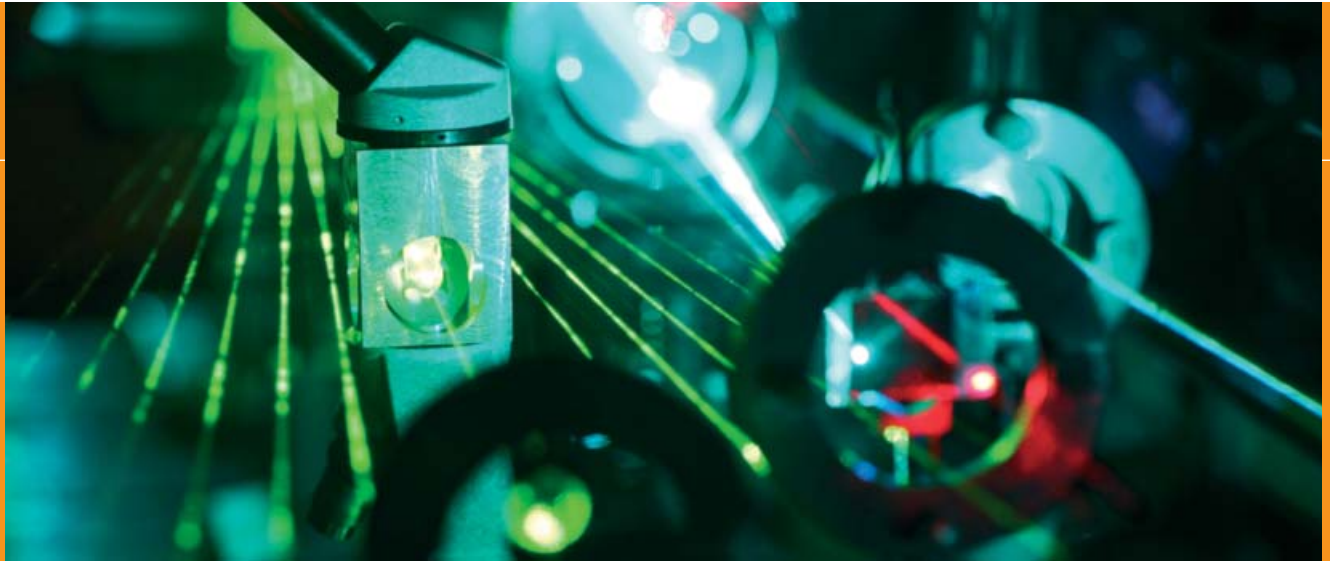
#### **FRAUNHOFER-PROJEKTGRUPPE AM DORTMUNDER OBERFLÄCHENCENTRUM DOC<sup>®</sup>**

Eberhardstraße 12  
44145 Dortmund

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

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.



# ANWENDUNGSZENTRUM FÜR OPTISCHE MESS- TECHNIK UND OBERFLÄCHENTECHNOLOGIEN

Im August 2015 hat das neue Fraunhofer-IWS-Anwendungszentrum für Optische Messtechnik und Oberflächentechnologien (AZOM) seine Arbeit aufgenommen. Angesiedelt im Umfeld der Westsächsischen Hochschule Zwickau (WHZ) bildet es eine Brücke zwischen dem Fraunhofer IWS in Dresden und der regionalen Wirtschaft in Westsachsen.

Aktuell sind sowohl das IWS Dresden als auch die WHZ Partner zahlreicher Unternehmen in Sachsen und den angrenzenden Regionen Ostthüringens und Oberfrankens. Das Anwendungszentrum wird es zukünftig beiden Einrichtungen ermöglichen, ihr Angebot an Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen aber auch ihre Qualifikationsangebote in der Region zu bündeln und bedarfsgerecht zu erweitern. Damit kann das neue Fraunhofer Anwendungszentrum einen wesentlichen Beitrag zur Stärkung der Wirtschaftskraft der Region Südwestsachsens leisten.

Thematisch ist das Fraunhofer-Anwendungszentrum an der Schnittstelle zwischen den für die Region typischen Bereichen des Maschinenbaus, der Kraftfahrzeugtechnik und Medizintechnik angesiedelt. Dabei ergänzen die Kompetenzen des Anwendungszentrums die Geschäftsfelder des Fraunhofer IWS in den Bereichen optische Messtechnik, Sensorik und Oberflächentechnik. Die Arbeitsfelder bzw. Kompetenzen des neuen Fraunhofer-Anwendungszentrums liegen insbesondere in den Bereichen:

## BILDVERARBEITUNG UND OPTISCHE PROZESSKONTROLLE

- industrielles Prozess Monitoring
- zerstörungsfreie Charakterisierung von Bauteilen
- bildgebende optische Verfahren in der Medizintechnik
- Highspeed Imaging thermischer Prozesse
- applikationsspezifische Automatisierungslösungen

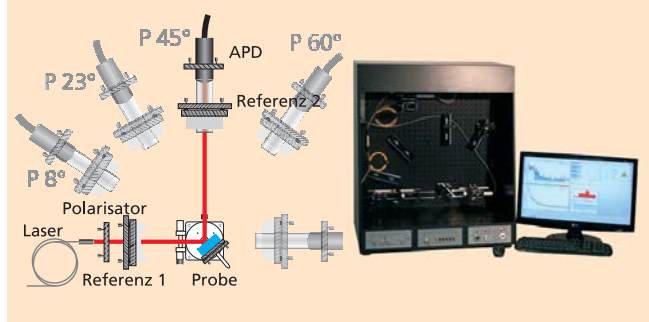
## PHOTONISCHE SYSTEMKOMPONENTEN, FASERTECHNOLOGIEN UND OPTISCHE MESSTECHNIK

- Laserstrahlcharakterisierung und Stabilitätsuntersuchungen
- Technologien der nichtlinearen Optik
- Entwicklung von Speziallichtquellen
- Messung von humanen Funktionalparametern
- optische Sensorelemente für Biomikrosensorik
- Fasermesstechnik (Dispersionsmessungen)
- Fasersensorik
- Schichtmesstechnik (z. B. CRD-Messplatz, siehe Abb. unten)

## OBERFLÄCHEN- UND WERKSTOFFTECHNOLOGIEN

- interferometrische Oberflächen- und Schichtanalyse
- optische Analyse der Werkstoffparameter bei Randschichtverfahren
- Modifikation von Implantatoberflächen
- optische Messverfahren im Bereich Lebensqualität
- laserbasierte spektroskopische Verfahren
- Farb- und Texturmesstechnik

*Cavity-ring-down Messplatz zur Bestimmung optischer Verluste von high-end-Beschichtungen*

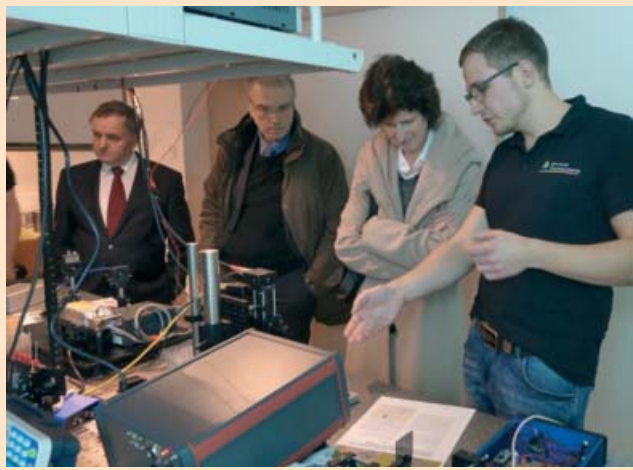




Enger Kontakt zur WHZ ist ein wesentlicher Bestandteil des Konzeptes für das neue Fraunhofer-Anwendungszentrum des IWS Dresden. So wurden parallel zur Aufnahme der wissenschaftlichen Arbeiten am AZOM auch mehrere Bachelor- und Masterarbeiten von Studenten der WHZ begonnen. Darüber hinaus wird auch die Einbindung des AZOM in den Lehrbetrieb der WHZ intensiviert. So sollen im kommenden Wintersemester erstmals auch gemeinsame Lehrveranstaltungen des Fraunhofer IWS und der WHZ angeboten werden.

Ausdruck der engen Kooperation mit dem Mutterinstitut war zudem ein erster gemeinsamer Messeauftritt auf der Laser World of Photonics 2015 in München. Vorgestellt wurde ein am AZOM entwickeltes Verfahren zur Prozessüberwachung von Laserschweißprozessen. Für das Jahr 2016 ist die Teilnahme am Innovationsabend für Unternehmen - Industrie@Fraunhofer IWS - sowie am internationalen Lasersymposium »Fiber,

*Besuch der sächsischen Staatsministerin für Wissenschaft und Kunst Dr. Eva-Maria Stange (3. v.l.), dem Ministerialrat Hermann Jaekel vom SMWK (2. v.l.) und dem Rektor des WHZ, Prof. Dr. Gunter Krauthaim (1. v.l.) bei der Projektgruppe des AZOM in den Räumen der Westsächsischen Hochschule Zwickau*



#### KOORDINATION

##### PROF. DR. PETER HARTMANN

Telefon +49 171 9066350

peter.hartmann@iws.fraunhofer.de



#### FRAUNHOFER-ANWENDUNGSZENTRUM FÜR OPTISCHE MESSTECHNIK UND OBERFLÄCHENTECHNOLOGIEN AZOM

Keplerstraße 2

08056 Zwickau

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

Disc & Diode« und Füge-technischen Symposium »Tailored Joining« bereits fest eingeplant. Weitere Messeauftritte sind in der Vorbereitung.

Räumlich wird das AZOM in unmittelbarer Nähe zum Innenstadt-campus der WHZ angesiedelt. Dazu werden in den nächsten Monaten ca. 475 m<sup>2</sup> Labor- und Bürofläche ausgebaut. Parallel dazu werden mit Hilfe von Investitionsmitteln des Freistaates Sachsen modernste Messgeräte und Laborausrüstungen angeschafft und in Betrieb genommen. Der Freistaat Sachsen fördert den Aufbau des Fraunhofer-Anwendungszentrums über den Zeitraum 2015 bis 2020 mit insgesamt 2,6 Mio. Euro.

Wesentlich für den Erfolg des IWS-Anwendungszentrums ist die erfolgreiche Etablierung von Forschungsk Kooperationen mit der Industrie. Im Auftrag großer Industrieunternehmen aus der Automobilbranche arbeiten die Forscher am AZOM bereits an ersten Projekten zur Implementierung optischer Messverfahren in den industriellen Fertigungsprozess.





# GENERATIVE FERTIGUNG – KOMPETENZ IN WERKSTOFF- UND FERTIGUNGSTECHNIK

Die generative Fertigung von Bauteilen führt zu einem Paradigmenwechsel in der Fertigungstechnik. Durch die schichtweise Bauteilherstellung wird der Werkstoff nur dort aufgebaut, wo er notwendig ist. Darüber hinaus lassen es die neuen Freiheitsgrade in der Fertigung zu, Produkte losgelöst von den Grenzen der konventionellen Fertigungstechnik auf ihre Funktionalität hin zu optimieren und die Produktion in bislang unbekanntem Ausmaß zu flexibilisieren und neue Geometrien überhaupt erst zu realisieren. Dementsprechend groß ist das Interesse der Wirtschaft an der Qualifizierung der additiven Fertigung zur Herstellung von Produkten in Industriequalität.

Allerdings steht dem großen Potenzial der additiven Fertigung derzeit noch eine Vielzahl ungelöster Fragestellungen gegenüber. Diese können nur im engen Schulterschluss zwischen Wirtschaft und Wissenschaft beantwortet werden. Dafür steht unter anderem das vom Fraunhofer IWS Dresden initiierte Projekt »Additiv-generative Fertigung« (kurz Agent-3D). Das aus über 80 Partnern bestehende Konsortium wird die additiv-generative Fertigung maßgeblich weiter entwickeln und das Netzwerk zwischen Industrie und Forschung ausbauen.

Mit seinem »Zentrum für Generative Fertigung« hat das Fraunhofer IWS im Rahmen des Dresden concept gemeinsam mit der TU Dresden ein international anerkanntes Kompetenzzentrum etabliert, das verfahrensübergreifend Werkstoff- und Fertigungslösungen für herausfordernde Produkte erarbeitet. Derzeit liegt der Fokus sehr stark in den Branchen Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Energietechnik, Werkzeug- und Formenbau sowie Medizintechnik. Das Zentrum bietet somit eine ideale Vernetzungsplattform für die Wirtschaft mit der universitären Grundlagenforschung und der anwendungsorientierten Forschung in einem sich rasant entwickelnden Hochtechnologiefeld.

## SPRECHER

**PROF. DR. CHRISTOPH LEYENS**

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



## KOORDINATION

**DR. FRANK BRÜCKNER**

Telefon +49 351 83391-3452  
frank.brueckner@iws.fraunhofer.de



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

Die zur Verfügung stehende breite Verfahrenspalette umfasst unter anderem

- Laserauftragschweißen mittels Pulver und Draht,
- Selektives Laser- und Elektronenstrahlschmelzen,
- 3D-Druck

für metallische und intermetallische Werkstoffe, Kunststoffe, Funktionswerkstoffe sowie Multimaterialsysteme. Verfahrenseitig stehen neben der Prozessentwicklung auch die Entwicklung von Systemtechnik, Sensorik und Prozessdiagnostik im Mittelpunkt. Die Forschungsarbeiten des »Zentrum für Generative Fertigung« fokussieren sich auf produkt- und branchentypische Prozessketten, angefangen vom Bauteildesign, über den eigentlichen Herstellungsprozess bis hin zu Nachbehandlungs- und -bearbeitungsschritten sowie Reparatur und Recycling. Auch die Prüfung und Charakterisierung von generativ hergestellten Werkstoffen und Bauteilen gehören zur Kernkompetenz des Zentrums.



## ENERGIEEFFIZIENZ – DA GEHT NOCH WAS!

Der sparsame Umgang mit Energie und die Weiterentwicklung ressourcenschonender Technologien ist ein zentrales Anliegen des Fraunhofer IWS. Seit seiner Gründung hat das Institut eine Vielzahl von Technologien zur Industriereife entwickelt, die den Unternehmen und der Gesellschaft zum Teil erhebliche Energieeinsparungen ermöglichen. So konnte z. B. durch die Entwicklung einer neuartigen, lokal wirkenden Wärmebehandlungstechnologie der energetische Wirkungsgrad von Dampfturbinen gesteigert werden. Ebenso konnte durch eine Laserbehandlung der Wirkungsgrad von Transformatoren verbessert werden.

Die Einführung der im IWS entwickelten Technologie zum Laserstrahlschweißen im Unterrumpfbereich verschiedener Airbusmodelle ermöglicht eine deutliche Verringerung des Strukturgewichts. Beim A340-600 werden dadurch rund 100 Kilogramm eingespart. Für Primärstrukturen werden die durch Laserstrahlschweißen erzielten Gewichtseinsparungen auf ca. 10 Prozent beziffert.

Auch in der Massenproduktion von Getriebekomponenten für Autos ist das Laserstrahlschweißen nahezu unverzichtbar geworden. Einsparungen im Kraftstoffverbrauch und eine bessere Energiebilanz sind zu erzielen. Reibungsmindernde Schichten des IWS auf Motorkomponenten sind ein anderer Weg, den Kraftstoffverbrauch weiter zu verringern. Die IWS-Technologie ist gemeinsam mit der Anlagentechnik zur Diamor®-Abscheidung auf dem Weg zu einer breiten industriellen Nutzung.

Um den Ausbau der Region Dresden für das Zukunftsthema Energieeffizienz über die bestehenden institutionellen Grenzen

### SPRECHER

**PROF. DR. ECKHARD BEYER**

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



### KOORDINATION

**DR. RALF JÄCKEL**

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



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

hinaus voranzutreiben und Innovationen für die Wirtschaft zu beschleunigen, wurde im Jahre 2009 das »Dresdner Innovationszentrum Energieeffizienz DIZE<sup>EFF</sup>« gegründet und vom IWS koordiniert. Im DIZE<sup>EFF</sup> bearbeiteten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der TU Dresden und der Dresdner Fraunhofer-Institute in zahlreichen Projekten gemeinsam Forschungsaufgaben in den Bereichen Hochleistungssolarzellen, Brennstoffzellen, Hochtemperaturenergie-technik, Leichtbau und energieeffiziente Fertigung sowie energiesparende Displays.

Aktuelle Entwicklungsarbeiten des IWS fokussieren sich unter anderem auf die Rückgewinnung von Wärmeenergie durch thermoelektrische Generatoren sowie die Reduzierung der magnetischen Verluste von Elektromotoren. Neueste Ergebnisse im Bereich Energieeffizienz präsentiert das IWS jedes Jahr auf der Hannovermesse Industrie sowie im Rahmen der Konferenz »Zukunft Energie«. Siehe [www.zukunftenergie-dresden.de](http://www.zukunftenergie-dresden.de)



# BATTERIEFORSCHUNG 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 das Zentrum für Batterieforschung mit neuestem Equipment am IWS aufgebaut.

Das IWS hat sich zum Ziel gesetzt für diese Batterietypen Lösungen von der Material- und Elektrochemie bis zur Produktion von Zellen und Modulen zu entwickeln. Zusammen mit Partnern aus Industrie und Forschung werden so Fragestellungen entlang der Wertschöpfungskette bearbeitet und für die Herstellung und Evaluierung von Prototypzellen umgesetzt.

Folgende Schwerpunkte werden am IWS für das Angebot an Industriepartnern und für die Weiterentwicklung von Materialien und Technologien im Rahmen von öffentlich geförderten Projekten gesetzt:

## ENTWICKLUNG VON LITHIUM-SCHWEFEL-BATTERIEN FÜR MOBILE SPEICHER

Lithium-Schwefel-Batterien zeichnen sich durch hohe gravimetrische Energiedichten und geringe Materialkosten im Vergleich zu Li-Ionen-Batterien aus. Damit ist diese Zellchemie äußerst attraktiv für zukünftige Speicherlösungen, insbesondere zur Steigerung der Reichweite von Elektrofahrzeugen. Das IWS produziert Prototypzellen mit 3 Ah Kapazität, an denen neue Material- und Zellkonzepte evaluiert werden können. Im Rahmen des EU-Projektes ALISE werden seit 06/2015 in Kooperation mit hochrangigen europäischen Partnern Li-S-Zellen für die Automobilanwendung entwickelt.

## SPRECHER

### DR. HOLGER ALTHUES

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



## KOORDINATION

### DR. PHILIPP THÜMMLER

Telefon +49 351 83391-3215  
philipp.thuemmler@iws.fraunhofer.de



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

## ENTWICKLUNG VON NATRIUM-SCHWEFEL-BATTERIEN FÜR STATIONÄRE SPEICHER

Auf Basis von Natrium-Schwefel-Batterien lassen sich Energiespeicher aufbauen, deren Rohstoffe weltweit kostengünstig verfügbar sind. Eine ideale Voraussetzung für den Einsatz in zukünftigen Energiespeichersystemen für die Entlastung der Netze bei weiterem Ausbau von erneuerbarer Energie. Im Rahmen des Verbundprojektes BaSta (BMW: FZJ 0325563A) gelang nun erstmalig die Entwicklung einer Natrium-Schwefel-Batterie für den Betrieb bei Raumtemperatur. Erste Prototypzellen können über 1.000-mal geladen und entladen werden und kommen nun in einem ersten Batteriemodul zum Einsatz.



## »TAILORED JOINING« – FÜGETECHNISCHE KOMPETENZEN IN DRESDEN

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

Im Bereich der anwendungsorientierten, industrienahen Entwicklung am Fraunhofer IWS betrifft das die Verfahren:

- Laserstrahlschweißen
- Laserhybridschweißen (Plasma, Arc, Induktion)
- Löten mit Laser und Reaktivmultischichten
- Magnetpulsfügen (Umformen + Schweißen)
- Rührreißschweißen
- formschlüssiges Laserstrahlfügen (Steg-Schlitz-Verbindungen)
- Diffusionsschweißen (Laser-Induktions-Walzplattieren)
- Kleben und Thermisches Direktfügen von Metall-Kunststoff-Mischverbindungen.

Der Partner TU Dresden konzentriert sich am Lehrstuhl Fügetechnik und Montage auf Verfahren und Werkzeuge in den Bereichen thermisches Fügen (Lichtbogenverfahren, Löten), umformtechnisches und mechanisches Fügen (Schrauben, Pressen) sowie Hybridfügen und beschäftigt sich mit der ganzheitlichen Planung von Montage-, Handhabungs- und Fügeprozessen.

### SPRECHER

#### DR. JENS STANDFUSS

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



### KOORDINATION

#### CLAUDIA ZELLBECK

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



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

Der Dresdner Verbund wird seit 2014 aktiv durch die Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) mit ihrem Know-how zum Elektronenstrahlschweißen unterstützt. Besonderes Augenmerk legen alle Partner auf eine wertungsfreie Gegenüberstellung der verschiedenen Lösungen, so dass Anwender direkt Entscheidungshilfen für ihr jeweiliges Anliegen erhalten.

Eine bewährte Möglichkeit des Erfahrungsaustausches ist das Internationale Fügetechnische Symposium »Tailored Joining«, welches zeitgleich mit dem Internationalen Lasersymposium »Fiber, Disc & Diode« am 23. und 24. Februar 2016 stattfindet. Wie schon bei den ersten Veranstaltungen dieser Reihe wird eine große Bandbreite an modernen Fügeverfahren und ihre aktuellen Entwicklungen vorgestellt. Ebenso besteht die Möglichkeit, Grundlagenkurse für ausgewählte Verfahren zu besuchen, die mit praktischen Vorführungen in den jeweiligen Laboren der Partner verbunden werden. Damit können sich auch Neueinsteiger sehr schnell mit einer Technologie vertraut machen und deren Möglichkeiten und Grenzen evaluieren. Mehr unter [www.fuegesymposium.de](http://www.fuegesymposium.de).





1



2

## KOMPETENZFELD WERKSTOFF-CHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG

Neue, leistungsfähige Werkstoffe sind die Grundlage und der Motor für die Entwicklung zuverlässiger und innovativer Produkte für die Welt von Morgen. Um das Eigenschaftspotenzial klassischer sowie neuartiger Konstruktions- und Funktionswerkstoffe bestmöglich ausnutzen zu können, bedarf es eines breiten Spektrums an experimentellen Erfahrungen und eines tiefen Verständnisses für die werkstoffphysikalischen Vorgänge. Nur so lassen sich tragfähige Innovationen in den Bereichen Produktdesign, Systementwicklung und Prozessoptimierung vorantreiben.

Keiner geringeren Herausforderung stellt sich das Kompetenzfeld Werkstoffcharakterisierung und -prüfung des IWS und versteht sich hier als Partner über alle Geschäftsfelder hinweg ebenso wie für externe industrielle Kunden. Neue, leistungsfähigere Werkstoffe benötigen fast immer eine Anpassung der bestehenden Verarbeitungstechnologien und eine Evaluierung der erzielten Bauteileigenschaften. Eine zeitlich und inhaltlich rasche Rückkopplung zwischen den Ergebnissen der Werkstoffcharakterisierung und der Entwicklung neuer, auf die jeweilige Anwendung maßgeschneiderter Prozesstechnologien sichert dabei höchste Qualitätsstandards. Eine enge Verflechtung von Werkstoffanalytik und -prüfung sind die Eckpfeiler des schlagkräftigen Teams am IWS.

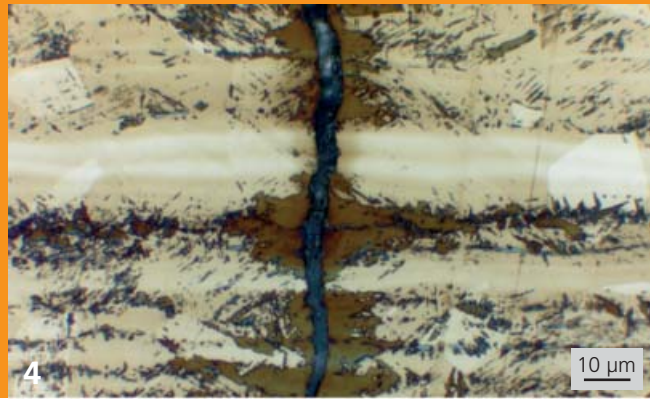
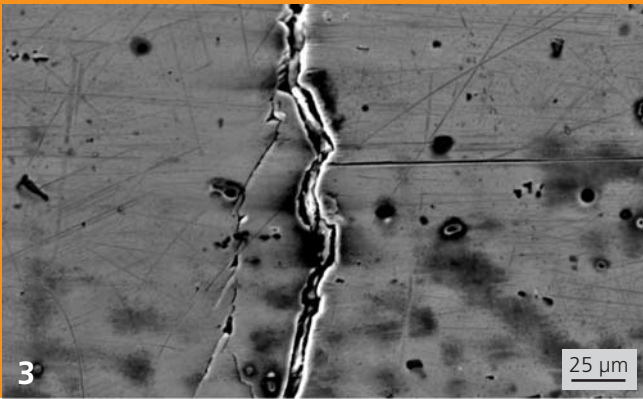
Das Angebot reicht insgesamt von der Bestimmung mechanischer Kennwerte von Werkstoffen und Werkstoffverbunden, über die Ermittlung von Kennlinien zur Bewertung der Schwingfestigkeit und hier insbesondere die zeitverkürzte Ermüdungsprüfung bei hohen Prüffrequenzen bis hin zur hochauflösenden, abbildenden und analytischen Charakterisierung von lasermodifizierten Randzonen, Fügengrenzflächen, Dünnschichtsystemen, Nanotubes und Nanopartikeln.

Jüngste Highlights in der Erweiterung der experimentellen Ausstattung sind eine Focused-Ion-Beam (FIB) Ionenoptik im dual-beam-Betrieb mit REM sowie EDX- und EBSD-Analytik (Abb. 1) und die Erweiterung des Hochfrequenzermüdungsprüflabors durch den Prototyp eines 1000-Hz-Resonanzpulsators (Abb. 2). Neben einer hochmodern ausgestatteten Metallographie verfügt das Werkstoffkompetenz-Team u. a. über folgende Ausstattung:

- ultrahochauflösendes Feldemissionsrasterelektronenmikroskop (FE-REM),
- hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop für »low-vacuum«-Betrieb mit großer Probenkammer,
- analytisches 200 kV-Transmissionselektronenmikroskop,
- Ionenstrahlpräparation, Sputter- und Bedampfanlagen,
- Torsions-Axial-Prüfstand bis zu einem max. Torsionsmoment von 8 kNm und einer max. Axialkraft von 40 kN,
- Ultraschallermüdungsprüfmaschine mit Vorlast ( $f = 20$  kHz).

Aktuelle Untersuchungsschwerpunkte im Bereich der Werkstoff- und Schadensanalytik sind u. a.:

- die Charakterisierung von reibungsmindernden Schutzschichten wie bspw. ta-C-Kohlenstoffschichten, bei denen der zumeist mehrphasige komplexe Übergang zwischen Substrat und ta-C-Schicht über die Zuverlässigkeit der Schutzschicht entscheidet und deren Identifizierung nur mithilfe spezieller Präparationsroutinen zur TEM-Folien-Herstellung sichtbar gemacht werden kann,
- die mittels hochauflösender Elektronenmikroskopie analysierbaren intermetallischen Phasen gefügter Mischverbindungen (z. B. Al-Cu-Verbindungen wie sie u. a. für die Elektromobilität von signifikanter Bedeutung sind) und den Einfluss der zumeist sehr spröden intermetallischen Phase auf die Betriebssicherheit und die elektrischen Eigenschaften dieser Verbindungen.



Des Weiteren kommt die langjährige Erfahrung und das fundierte Werkstoff- und Prozessverständnis des IWS-Teams zur Aufklärung von Schadensfällen zum Einsatz. Neben der Feststellung der Schadensursache bieten die IWS-Experten auch Beratung im Hinblick auf Werkstoffalternativen, Gestaltoptimierungen und Prozessverbesserungen für eine zukünftige Schadensprävention. Die Projektbearbeitung ist dabei geprägt von einer engen Zusammenarbeit der Experten aus Metallographie, Analytik und Werkstoffprüfung.

Aktuelle Untersuchungs-Schwerpunkte im Bereich der Werkstoff- und Bauteilprüfung sind u. a.:

- die Charakterisierung der Schwingfestigkeit gefügter Mischverbindungen (z. B. aus schwer schweißbaren Werkstoffkombinationen wie Einsatzstahl mit Gusseisen), wie sie u. a. im Powertrain-Bereich zum Einsatz kommen, die Entwicklung bauteilähnlicher Prüfkörper und Prüfstrategien, bei denen die Fügeverbindung die höchbeanspruchte Struktur darstellt, erlauben eine frühzeitige Aussage über die Zuverlässigkeit der geschweißten Komponenten,
- die Ermittlung von Werkstoffkennwerten zur Vorhersage der versagenskritischen Bereiche laserprozessierter Strukturen, wie beispielsweise laserfestigter Blechkonstruktionen, wie sie in crashbeanspruchten Bauteilen zum Einsatz kommen, hier wurde der Einfluss von geometrischer und struktureller Kerbe auf die statische und zyklische Festigkeit separiert bewertet,
- das Ermüdungsverhalten im Bereich sehr hoher Lastspielzahlen (und damit jenseits der klassischen Dauerfestigkeit) verschiedenster Werkstoffgruppen und -verbände, von Edelstahl über Aluminium bis hin zu Nickelbasislegierungen, wie sie u. a. in hocheffizienten Kraftwerken zukünftig zum Einsatz kommen sollen.

Auch bei den zahlreichen Aufgaben auf dem Gebiet der Werkstoff- und Bauteilprüfung gibt sich das Werkstoffkompetenz-Team nicht damit zufrieden »nur« Kennzahlen zur Vorhersage des Umformverhaltens, des Festigkeitspotenzials und des Risswachstumsverhaltens (Abb. 3) von Werkstoffen

#### SPRECHER

**PROF. DR. MARTINA ZIMMERMANN**

Telefon +49 351 83391-3573

[martina.zimmermann@iws.fraunhofer.de](mailto:martina.zimmermann@iws.fraunhofer.de)



#### KOORDINATION

**DR. JÖRG KASPAR**

Telefon +49 351 83391-3216

[joerg.kaspar@iws.fraunhofer.de](mailto:joerg.kaspar@iws.fraunhofer.de)



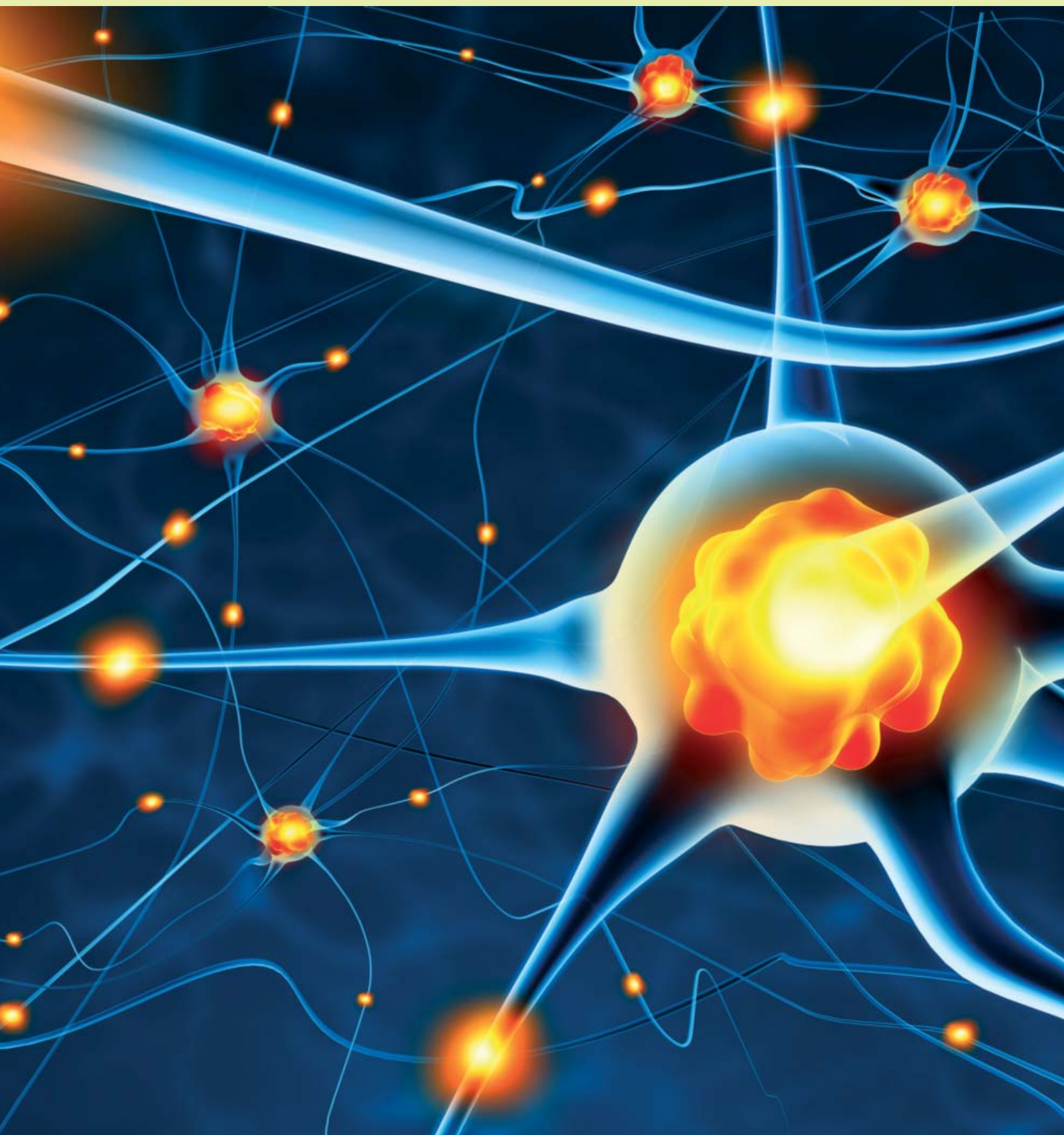
[www.iws.fraunhofer.de/werkstoffcharakterisierung](http://www.iws.fraunhofer.de/werkstoffcharakterisierung)

und Strukturen zu ermitteln. In der Regel schließt sich an die Prüfung eine eingehende fraktographische zum Teil sogar elektronenmikroskopische Analyse zur Aufklärung der rissauslösenden Gefügecharakteristika an (Abb. 4). Daraus werden werkstoff- und prozessspezifische Strategien zur Verbesserung der anwendungsbedingten Anforderungen abgeleitet. So konnte u. a. für lasergeschnittene Strukturen die Bedeutung der Gratminimierung herausgestellt werden.

Die Abteilung Werkstoffcharakterisierung und -prüfung trägt durch ihr intensives Engagement in der Ausbildung von Werkstoffprüfern dazu bei, dass jungen Menschen dieses spannende Berufsbild zugänglich gemacht wird. Durch die personelle Verknüpfung mit der Professur Werkstoffmechanik und Schadensfallanalyse an der TU Dresden sind ein steter Erkenntniszugewinn aus grundlagenorientierten Forschungsvorhaben und auch hier eine gezielte Nachwuchsförderung gewährleistet.



# 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 Forschungseinrichtungen. Knapp 24 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2 Milliarden Euro. Davon fallen rund 1,7 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

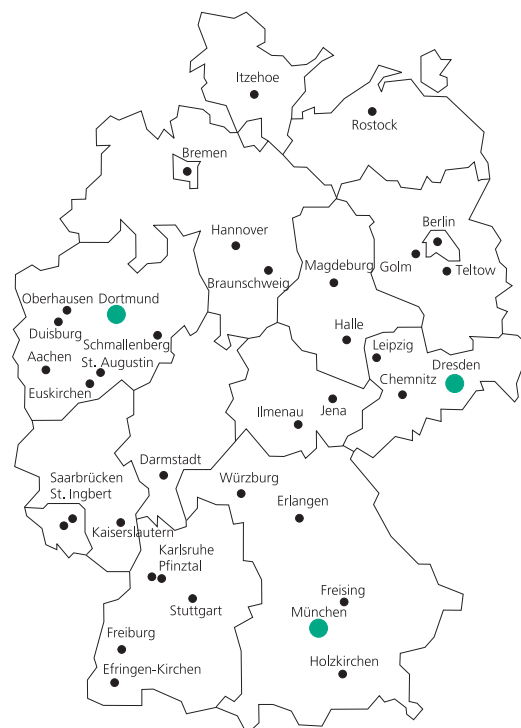
Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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

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

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

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







## FRAUNHOFER-VERBUND LIGHT & SURFACES

### KOMPETENZ DURCH VERNETZUNG

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

### KERNKOMPETENZEN DES VERBUNDS

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

### KONTAKT

Verbundvorsitzender  
Prof. Dr. Reinhart Poprawe  
Verbundassistentin  
Gabriela Teresa Swoboda-Barthel  
Telefon +49 241 8906-8347

### FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ORGANISCHE ELEKTRONIK, ELEKTRONENSTRAHL- UND PLASMA-TECHNIK FEP, DRESDEN

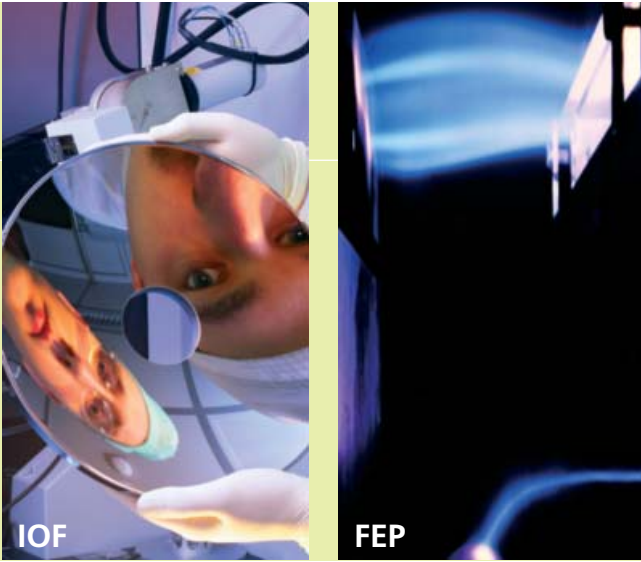
Die Kernkompetenzen des Fraunhofer FEP sind die Elektronenstrahltechnologie, die plasmaaktivierte Hochratebedampfung und die Hochrate-PECVD. Die Arbeitsgebiete umfassen die Vakuumbeschichtung sowie die Oberflächenbearbeitung und -behandlung mit Elektronen und Plasmen. Neben der Entwicklung von Schichtsystemen, 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 STRAHLENTECHNIK IWS, DRESDEN**

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS steht für Innovationen in den Geschäftsfeldern Fügen, Trennen sowie Oberflächentechnik und Beschichtung. Geschäftsfeldübergreifende Querschnittsthemen sind Energiespeicher, Energieeffizienz, Additive Fertigung, Leichtbau und Big Data. 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 FERTIGUNGSTECHNIK

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



### Themen:

- Nanotechnik
- Dünnschichttechnologie

## FAKULTÄT MASCHINENWESEN INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK

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



### Themen:

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

## FAKULTÄT MASCHINENWESEN INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK

PROFESSUR FÜR LASERBASIERTE METHO-  
DEN DER GROSSFLÄCHIGEN OBER-  
FLÄCHENSTRUKTURIERUNG  
PROF. DR.-ING.  
ANDRÉS-FABIÁN LASAGNI



### Themen:

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



»Es geht um Freude an der Arbeit. Es gibt kein größeres Glück als die Erkenntnis, dass wir etwas erreicht haben.«  
Henry Ford

**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 MATHEMATIK UND NATURWISSENSCHAFTEN  
FACHRICHTUNG CHEMIE UND LEBENSMITTELCHEMIE**

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



**Themen:**

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

**FAKULTÄT MASCHINENWESEN  
INSTITUT FÜR WERKSTOFFWISSENSCHAFT**

**PROFESSUR FÜR WERKSTOFFMECHANIK UND  
SCHADENSFALLANALYSE  
PROF. DR.-ING.  
MARTINA ZIMMERMANN**



**Themen:**

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

**MEDIZINISCHE FAKULTÄT  
KLINIK FÜR NEUROLOGIE**

**PROFESSUR FÜR DATENVERWALTUNG  
UND DATENAUSWERTUNG  
PROF. DR.-ING.  
KAROL KOZAK**



**Themen:**

- Bildbearbeitung
- Machine Learning
- BigData





## DRESDNER LICHTJAHR 2015

Im Rahmen des von der UNESCO ausgerufenen »Internationalen Jahr des Lichts und lichtbasierter Technologien« präsentierte das Fraunhofer IWS in Kooperation mit zahlreichen Partnern das Dresden Lichtjahr 2015 und stellte damit die Bedeutung des Lichts als elementare Lebensvoraussetzung für Menschen, Tiere und Pflanzen und somit als wesentlicher Bestandteil von Wissenschaft und Kultur in den Mittelpunkt. Höhepunkte des Dresden Lichtjahres 2015 waren:

### 19. Januar 2015



Eröffnung des Dresden Lichtjahres mit der von der Dresdner Künstlergruppe KAZOOSH! entwickelten Medienkunstinstallation »TALKING TOWER« am Ernemannurm der Technischen Sammlungen Dresden.

### 25.-26. Februar 2015

Das Internationale Symposium »Additive Manufacturing« am Fraunhofer IWS Dresden bringt Experten im Bereich Additive Fertigung mit mehr als 150 potenziellen Anwendern dieser faszinierenden Technologie zusammen und zeigt Laserlicht in Aktion.



### 23. April 2015



Am Girls'Day bringen IWS-Forscher jungen Mädchen die Vielfalt der Lasertechnik nahe. Gespannt und begeistert sind die Mädchen bei der Sache und experimentieren mit Licht und Lasertechnik.

### 29. April 2015

Schülerinnen und Schüler der Klassen 3 bis 5 sind im Rahmen des Juniordoktor-Programms der Stadt Dresden im Fraunhofer IWS zu Gast: »Es werde Licht« ist das Thema der Veranstaltung, bei der die Kinder erfahren, wie Laserlicht entsteht, warum es mal rot und mal grün ist und wie man mit Licht Metall zerschneiden kann.



### 19. Juni 2015

Mit der Eröffnung der Ausstellung »Hi Lights« in den Technischen Sammlungen Dresden erreichen die Aktivitäten des Fraunhofer IWS und der Dresdner Forschungs-, Bildungs- und Kultureinrichtungen im Rahmen des »Dresden Lichtjahr 2015« einen ganz besonderen Höhepunkt. Die Ausstellung führt mit vielen Mitmach-Experimenten in die Wissenschaftsgeschichte des Lichts ein und erzählt von der Entwicklung des Lasers. In einer Manege der Photonik stellen Versuchsaufbauten und Prototypen sowie interaktive Exponate die wichtigsten Anwendungen in der aktuellen Photonikforschung vor (S. 149 unten). Die Ausstellung kann noch bis zum 30.06.2016 in den Technischen Sammlungen Dresden besucht werden.



### 27. Juni 2015



Premiere des Forschungs-theaters »Licht!« in den Technischen Sammlungen Dresden. Es stellt Fragen nach der Faszination eines Naturphänomens, seiner wissenschaftlichen Erforschung und nach modernen

technischen Entwicklungen. Die Koproduktion lädt zum Eintauchen in die Welt der Illusionen, des Scheins und des Seins ein und begeistert vor allem junge Menschen für eines der wichtigsten und zugleich dynamischsten Gebiete der aktuellen Technologieforschung.

### 3. Juli 2015

Das Fraunhofer IWS öffnete zur Langen Nacht der Wissenschaften wieder die Türen für seine Besucher. Erstmals waren die neuen Gebäude des »Zentrums für ressourcenschonende Energietechnologien« auf der Winterbergstraße 31f zu besichtigen. Anwohner und Interessenten haben das Angebot rege genutzt und den Forschern in den neuen Gebäuden über die Schulter geschaut.



### 24.-28. August 2015

4. Internationale Sommerschule »Trends und neue Entwicklungen in der Lasertechnologie« Die einwöchige internationale Sommerschule bringt internationale Jungwissenschaftler zu einem intensiven Studium der Grundlagen und Anwendungen der Lasertechnologie zusammen.



### 5. November 2015

Verleihung des 2. Wissenschafts-Kunst-Preis des Dresdner Zentrums der Wissenschaft und Kunst in den Technischen Sammlungen Dresden. Preisträger des »KuWiDresden 2015« wurde Detlef Schweiger mit seiner CD-Skulptur. Der Preis prämierte die interdisziplinäre Auseinandersetzung mit neuartigen Technologien und wissenschaftlichen Themen auf dem Gebiet der optischen Effekte und Systeme.



### Januar-Dezember 2015

Das Thalia-Kino veranstaltete in Kooperation mit Dresdner Wissenschaftseinrichtungen und Unternehmen die Filmreihe »Lichtspiel«. Gezeigt wurden Dokumentar- und Spielfilme zu allen Facetten des Themas Licht. Höhepunkt war die Präsentation des Filmes »Interstellar« auf der Bühne der »Filmnächte am Elbufer« vor ca. 3000 Zuschauern (S. 148 oben).

Mit dem Film »Hugo Cabret« ging das Dresdner Lichtjahr am 28.12.2015 zu Ende. Mehr als 50 Veranstaltungen begeisterten zahlreiche Kinder, Jugendliche und Erwachsene, Laien ebenso wie Experten.

[www.dresdner-lichtjahr.de](http://www.dresdner-lichtjahr.de)

# AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN



Im Rahmen der SPIE-Konferenz PHOTONICS West 2015, dem internationalen Treff der Optik- und Photonik-Branche in San Francisco, ging der Green Photonics Award 2015 an ein Dresdner Forscherteam. Herr Prof. **Andrés Lasagni** und Herr **Sebastian Eckhardt**, Mitarbeiter am

Fraunhofer IWS und am Institut für Fertigungstechnik der TU Dresden, Lars Müller-Meskamp aus dem Institut für Angewandte Photophysik sowie Dr. Mathias Siebold und Markus Löser vom Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf erhielten den Preis für ihre gemeinsame Arbeit zum Thema: »Herstellung von hocheffizienten, transparenten Metalldünnfilm-Elektroden mit direkter Laserinterferenz-Strukturierung« in der Kategorie lasergestützte Fertigung und Mikro-/Nano-Fertigung.



Die Association of Laser Users AILU hat Herrn Prof. **Eckhard Beyer** am 18. März 2015 für seine außergewöhnlichen Verdienste im Bereich der industriellen Lasermaterialbearbeitung mit dem AILU International Award

2015 geehrt. Herr Prof. Beyer erhält den Preis als Pionier und international führende Persönlichkeit auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung. Der Leiter des Fraunhofer-Institutes für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden und Direktor des Institutes für Fertigungstechnik an der Technischen Universität Dresden unterstützt die AILU (Association of Laser Users) seit vielen Jahren als aktives Mitglied. Mit dem Preis dankt die AILU Herrn Prof. Beyer für die vielen Beiträge und Präsentationen, die er den Laser Nutzern in Großbritannien zur Verfügung gestellt hat.

Für die Entwicklung des Laser-Arc-Verfahrens und der Anwendung von ta-C-Beschichtungen in der Serienfertigung wurde Herrn Prof. **Andreas Leson**, Herrn Dr. **Hans-Joachim Scheibe** und Herrn Dr. **Volker Weihnacht** im Rahmen der Fraunhofer Jahrestagung am 9. Juni 2015 der Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2015 verliehen.



Die Forscher modifizierten das Laser-Arc-Verfahren so, dass es mit einer hohen Beschichtungsrate präzise steuerbar die gewünschten Schichten auftragen kann. Mit der neuen Technologie werden die Anforderungen der Industrie an Qualität und Kosten verschleißfester Beschichtungen in hohem Maße erfüllt. Das Verfahren wird bereits von zahlreichen Automobil-, Zulieferer- und Werkzeugherstellern in der Produktion hochwertiger Bauteile eingesetzt.



Frau Dr. **Susanne Dörfler**, Herr **Markus Piwko** und Herr **Patrick Strubel**, Mitarbeiter am Fraunhofer IWS und am Institut für Anorganische Chemie der TU Dresden, wurden am 29. April 2015 im Rahmen der Konferenz i-Wing 2015

vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ausgezeichnet. Die Autoren stellten auf dem mit Platz 1 bewerteten Poster neue Materialien und Zellkonzepte für Lithium-Schwefel-Batterien vor.





Am 18. Dezember wurden die IWS-Preisträger des Jahres 2015 gekürt.

Für die Entwicklung einer multifunktionalen Ansteuerungsplattform für Laser-Remote-Applikationen, lasertronic®MotionControl genannt, wurden **Marius Boden** und **Karsten Zenger** mit dem Preis für die beste wissenschaftlich-technische Leistung ausgezeichnet. Sie entwickelten ein aus 4 Bausteinen bestehendes Programmiergerüst (Framework), welches Programmieraufgaben abstrahiert und getrennt von den projektspezifischen Softwaremodulen umsetzt. Das Gerüst reduziert die Entwicklungsaufwände zur Programmierung von kundenspezifischen Steuerungslösungen beim Laserbearbeiten mit Scannern und stellt sowohl eine Softwarearchitektur als auch Bibliotheken und Funktionalitäten zur Verfügung (siehe auch S. 84/85).

Der Preis für die beste innovative Produktidee zur Eröffnung eines neuen Geschäftsfeldes ging an Herrn **Stefan Grünzner**. Er hat die Entwicklung von universellen Mikrofluidikplattformen für zellbasierte Untersuchungen durch zahlreiche ingenieurtechnische Teillösungen entscheidend vorangetrieben. Vor allem der von ihm optimierte Multilagengestützte Herstellungsprozess ist beliebig skalierbar, bietet großen Gestaltungsspielraum beim Design und somit ein hohes Anwendungspotenzial (siehe auch S. 46/47).

Herr **Michael Kohl** erhielt den Preis für die beste wissenschaftliche Leistung eines Nachwuchswissenschaftlers. Er widmet sich in seiner Promotionsarbeit dem Thema »Entwicklung von Raumtemperatur-Na-S-Batterien«. Durch Einsatz neuer Anodenkonzepte und Anpassung der Kathoden, Elektrolyte und Prozessschritte an diesen Ansatz konnte die Betriebstemperatur von Na-S-Batterien von 300 °C auf Raumtemperatur reduziert werden. Der Ansatz basiert auf kostengünstigen Ausgangsmaterialien und einfachen Prozessschritten und ermöglicht deutlich erhöhte Entladekapazitäten und höhere Lade-Effizienzen. Erstmals wurden damit über 1000

reversible Lade/Entladezyklen bei Raumtemperatur realisiert. Die Forschungsarbeiten von Herrn **Robert Pautzsch** zum »Fügen von Metall und Thermoplast mittels reaktiver Multischichten« wurden als herausragende studentische Leistung geehrt. Durch die Beeinflussung der Grenzfläche zwischen Metall und Polymer und Optimierung des Fügeprozesses können nunmehr neue Einsatzgebiete in Elektronik-Industrie und Optikfertigung erschlossen werden.

Auch die Arbeiten von Herrn **Martin Zawischa** wurden als herausragende studentische Leistung ausgezeichnet. Herr Zawischa analysierte und klassifizierte das Versagen von ta-C-Schichten und definierte einen neuen Kennwert zur Quantifizierung der adhäsiven Versagensbereiche beim Ritztest, welcher zur standardmäßigen Prozesscharakterisierung herangezogen werden kann.

Der Sonderpreis des Institutes ging an Frau Dr. **Anja Techel**, Herrn Dr. **Günter Wiedemann** und Herrn Dr. **Dieter Pollack** für ihre Engagement im Rahmen des Dresdner Lichtjahr 2015 (siehe S. 148/149).

*Andreas Leson, Dieter Pollack, Anja Techel, Günter Wiedemann, Stefan Grünzner, Martin Kohl, Marius Boden, Karsten Zenger, Eckhard Beyer (v.l.n.r.)*





# VERÖFFENTLICHUNGEN



**RV** = Rezensierte Veröffentlichung

**[L01] RV**

T. Abendroth, H. Althues,  
G. Mäder, S. Kaskel, E. Beyer

»Selective absorption of carbon nanotube thin films for solar energy applications«

Solar energy materials and solar cells 143 (2015), S. 553-556  
DOI: 10.1016/j.solmat.2015.07.044

**[L02]**

T. Abendroth, J. Liebich, P. Härtel,  
B. Schumm, H. Althues, S. Kaskel,  
E. Beyer

»Transparente und leitfähige Veredelung von Kunststoffoberflächen: Antistatische und elektrooptische Anwendungen«

Vakuum in Forschung und Praxis 27 (2015), Nr. 3, S. 36-40  
DOI: 10.1002/vipr.201500583

**[L03] RV**

M. A. Adam, P. Strubel,  
L. Borchardt, H. Althues, S. Dörfler,  
S. Kaskel

»Trimodal hierarchical carbide-derived carbon monoliths from steam- and CO<sub>2</sub>-activated wood templates for high rate lithium sulfur batteries«

Journal of materials chemistry A, Materials for energy and sustainability 3 (2015), Nr. 47,  
S. 24103-24111  
DOI: 10.1039/C5TA06782K

**[L04] RV**

A. I. Aguilar-Morales, J. A. Álvarez-Chávez, A. Morales-Ramirez,  
M. Panzner, M. A. Ortega-Delgado,  
L. M. Rosales-Olivares

»Photomechanical ablation in obsidianus lapis via Q-switched 1064-nm laser energy«

Optical engineering 54 (2015),  
Nr. 9, Art. 097101  
DOI: 10.1117/1.OE.54.9.097101

**[L05] RV**

R. R. Ahmed, O. Ali, O. N. H. Faisal,  
N. M. Al-Anazi, S. H. Al-Mutairi,  
F.-L. Toma, L.-M. Berger, A. Pott-  
hoff, M. F. A. Goosen

»Sliding wear investigation of suspension sprayed WC-Co nanocomposite coatings«

Wear 322-323 (2015), S. 133-150  
DOI: 10.1016/j.wear.2014.10.021

**[L06] RV**

R. R. Ahmed, N. H. Faisal,  
N. Al-Anazi, S. Al-Mutairi,  
F.-L. Toma, L.-M. Berger,  
A. Potthoff, E. K. Polychroniadis,  
M. Sall, D. Chaliampalias,  
M. F. A. Goosen

»Structure property relationship of suspension thermally sprayed WC-Co nanocomposite coatings«

Journal of thermal spray technology 24 (2015), Nr. 3, S. 357-377  
DOI: 10.1007/s11666-014-0174-2

**[L07]**

T. Baselt, C. Taudt, A.-F. Lasagni,  
P. Hartmann

»Dispersion characterization of large mode-area YB<sup>3+</sup> doped double-clad fibers implemented in a laser cavity during operation«

4<sup>th</sup> International Summer School  
»Trends and new developments in Laser Technology 2015«, 24.-28.  
August 2015, Dresden  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-366369.html>

**[L08] RV**

T. Baselt, C. Taudt, A.-F. Lasagni,  
P. Hartmann

»Experimental measurement of group velocity dispersion during operation in cladding-pumped large-mode-area Yb-doped fibers«

Lehmann, P.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX: 22.-25. Juni 2015, München  
Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 95253Z (Proceedings of SPIE 9525)  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-356614.html>,  
DOI: 10.1117/12.2184803

**[L09] RV**

R. Baumann, R. Siebert, P. Herwig,  
A. Wetzig, A., E. Beyer

»Laser remote cutting and surface treatment in manufacturing electrical machines: High productivity, flexibility, and perfect magnetic performance«

Journal of laser applications: JLA 27 (2015), Supplement 2, Art. S28002  
DOI: 10.2351/1.4906383

**[L10]**

J. Bellmann, J. Lueg-Althoff,  
A. Leigh-Lorenz, S. Schulze, S. Gies,  
A. E. Tekkaya, E. Beyer

»Influence of axial workpiece position in the coil for electromagnetic pulse joining. Shed some light on the black box«

I2FG / PAK 343 Workshop on Electromagnetic Pulse Forming and Joining 2015, 5.-6. Oktober 2015, Dortmund  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-366368.html>,  
DOI: 10.17877/DE290R-16373

**[L11]**

L.-M. Berger, R. Trache, F.-L. Toma,  
S. Thiele, J. Norpoth, L. Janka

»Entwicklung wirtschaftlich effizienter Hartmetallbeschichtungs-lösungen für Hochtemperaturanwendungen. Teil 1: Beschichtungspulver, Wirtschaftlichkeit und Schichteigenschaften«

Thermal spray bulletin 8 (2015), Nr. 2, S. 126-136

**[L12]**

L.-M. Berger

»Tribology of thermally sprayed coatings in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> system«

Thermal sprayed coatings and their tribological performances, Hershey/Pa.: Engineering Science Reference, 2015, S. 227-267  
DOI: 10.4018/978-1-4666-7489-9.ch008

**[L13]**

L.-M. Berger

»Application of hardmetals as thermal spray coatings«

International journal of refractory metals and hard materials 49 (2015), S. 350-364  
DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029

**[L14] RV**

M. Bieda, C. Schmädicke, T. Roch,  
A.-F. Lasagni

»Ultra-low friction on 100cr6-steel surfaces after direct laser interference patterning«

Advanced engineering materials 17 (2015), Nr. 1, S. 102-108  
DOI: 10.1002/adem.201400007

**[L15] RV**

T. Biemelt, K. Wegner, J. Teichert,  
S. Kaskel

»Microemulsion flame pyrolysis for hopcalite nanoparticle synthesis: A new concept for catalyst preparation«

Chemical communications 51 (2015), Nr. 27, S. 5872-5875  
DOI: 10.1039/c5cc00481k

**[L16] RV**

G. Bolelli, L.-M. Berger, T. Börner,  
H. Koivuluoto, L. Lusvarghi,  
C. Lyphout, N. Markocsan,  
V. Matikainen, P. E. Nylén,  
P. Sassatelli, R. Trache, P. Vuoristo

»Tribology of HVOF- and HVOF-sprayed WC-10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment«

Surface and coatings technology 265 (2015), S. 125-144  
DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.01.048

**[L17] RV**

V. Bon, N. Klein, I. Senkovska, Irena,  
A. Heerwig, J. Getzschmann,  
D. Wallacher, I. Zizak, M. M. Brzhezinskaya, U. C. Müller,  
S. Kaskel

»Exceptional adsorption-induced cluster and network deformation in the flexible metal-organic framework DUT-8(Ni) observed by in situ X-ray diffraction and EXAFS«

Physical chemistry, chemical physics: PCCP 17 (2015), Nr. 26,  
S. 17471-17479  
DOI: 10.1039/c5cp02180d

**[L18]**

S. BonB

»Abteilung Wärmebehandeln und Plattieren des Fraunhofer IWS Dresden«

Elektrowärme international (2015), Nr. 3, S. 115-118

**[L19] RV**

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

»Laser heat treatment with latest system components«

Heat Treating Society -HTS-; ASM International: Heat Treating 2015, 28<sup>th</sup> ASM Heat Treating Society Conference, 20.-22. Oktober 2015, Detroit, Michigan, USA; Materials Park, Ohio: ASM International, 2015, S. 15-20

**[L20]**

M. Borkmann, A. Mahrle, E. Beyer,  
J. Walter, C. Hennigs, M. Hustedt,  
S. Kaierle

»Optimierte Luftströmungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen. Teil II: Numerische Untersuchungen«

Czarske, J.; Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie e.V -GALA-: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik: 23. Fachtagung, 8.-10. September 2015, Dresden  
Karlsruhe: Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA, 2015, S. 25/1-25/8  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-360123.html>

**[L21]**

M. Borkmann, A. Mahrle,  
A. Wetzig, E. Beyer, J. Walter,  
C. Hennigs, A. Brodeßer,  
M. Hustedt, S. Kaierle, H. Exner

»Optimierung der Luftströmungsführung in Bearbeitungskabinen zum Remote-Laserstrahlschweißen«

9. Mittweidaer Lasertagung 2015. Lasertechnik: Im Rahmen der 24. Wissenschaftlichen Konferenz der Hochschule Mittweida (IVKM), 19.-20. November 2015, Mittweida (Scientific Reports 4/2015)

**[L22]**

F. Bouchard

»2-Photonen-Polymerisation für das 3D-Generieren einer verzweigten Hohlfaser zur Anwendung in Mikrofluidiksystemen«

Dresden, TU, Dipl.-Arb., 2015

**[L23] RV**

S. Braun, A. Kubec, P. Gawlitza,  
M. Menzel, A. Leson

»Low-stress coatings for sputtered-sliced Fresnel zone plates and multilayer Laue lenses«

R. Hudec, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: EUV and x-ray optics: Synergy between laboratory and space IV: 13.-14. April 2015, Prag, Tschechische Republik  
Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 95100L, 9 S. (Proceedings of SPIE 9510)

DOI: 10.1117/12.2178851

**[L24]**

S. Braun, A. Leson

»Optical elements for EUV lithography and X-ray optics«

Fecht, H.-J.: »The nano-micro interface. Bridging the micro and nano worlds. Vol. 2«  
Weinheim: Wiley-VCH, 2015, S. 613-628  
DOI: 10.1002/9783527679195.ch30

**[L25] RV**

M. F. Broglia, D. F. Acevedo,  
D. Langheinrich, H. R. Perez-Hernandez, C. A. Barbero,  
A.-F. Lasagni

»Rapid fabrication of periodic patterns on poly(styrene-co-acrylonitrile) surfaces using direct laser interference patterning«

International journal of polymer science (2015), Art. 721035  
DOI: 10.1155/2015/721035

**[L26] RV**

F. Brückner, T. Finaske, R. Willner,  
A. Seidel, S. Nowotny, C. Leyens,  
E. Beyer

»Laser additive manufacturing with crack-sensitive materials: Temperature monitoring system for defect-free material build-up«

Laser-Technik-Journal 12 (2015), Nr. 2, S. 28-30  
DOI: 10.1002/latj.201500015

**[L27]**

F. Brückner, A. Seidel, A. Straubel,  
R. Willner, C. Leyens, E. Beyer

»Laser-based manufacturing of components using materials with high cracking susceptibility«

Laser Institute of America -LIA-: ICALEO 2015, 34<sup>th</sup> International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Conference Proceedings: 18.-22. Oktober 2015. Atlanta, Ga., USA  
Orlando, Fla.: LIA, 2015, S. 586-592, Paper 1001

**[L28]**

F. Brückner, M. Riede, T. Finaske,  
A. Seidel, S. Nowotny, C. Leyens,  
E. Beyer

»AM with high-performance materials & lightweight structures by Laser Metal Deposition & Laser Infiltration«

LIA Today 23 (2015), Nr. 2, S. 10-13

**[L29]**

M. Busek, A. Rudolph, S. Grünzner,  
F. Schmieder, F. Sonntag,  
K. Hofmann, U. Grätz

»Design and regulation of complex microfluidic systems with simulationX«

Gesellschaft für Ingenieurtechnische Informationsverarbeitung -ITI-, Dresden: ITI-Symposium 2015. Conference Proceedings of the 18<sup>th</sup> ITI Symposium, 9.-11. November 2015, Dresden  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-370244.html>  
DOI: 10.13140/RG.2.1.2859.9761

**[L30] RV**

A. Chamas, M. Giersberg,  
K. Friedrich, F. Sonntag, D. Kunze,  
S. Uhlig, K. Simon, K. Baronian,  
G. Kunze

»Purification and immunodetection of the complete recombinant HER-2[neu] receptor produced in yeast«

Protein expression and purification 105 (2015), S. 61-70  
DOI: 10.1016/j.pep.2014.10.004

**[L31]**

I. Dani

»Additive manufacturing of electrical functionalities«

1<sup>st</sup> International Symposium on Additive Manufacturing (ISAM), 25.-26. Februar 2015, Dresden  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-364395.html>

**[L32] RV**

N. Danz, A. Sinibaldi, P. Munzert,  
A. Anopchenko, E. Förster,  
S. Schmieder, R. Chandrawati,  
R. Rizzo, R. Heller, F. Sonntag,  
A. Mascioletti, S. Rana, T. Schubert,  
M. M. Stevens, F. Michelotti

»Biosensing platform combining label-free and labelled analysis using Bloch surface waves«

Baldini, F.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: Optical Sensors 2015: 13.-16. April 2015, Prag, Tschechische Republik  
Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 95060V (Proceedings of SPIE 9506)  
DOI: 10.1117/12.2178444

**[L33]**

G. Dietrich, E. Pflug, M. Rühl,  
S. Braun, A. Leson, E. Beyer

»Neuartige reaktive Multilayersysteme für die Mikroverbindungs-technik«

Schweißen und Schneiden 67 (2015), Nr. 8, S. 456-457

**[L34] RV**

I. Dirnstorfer, N. Schilling, S. Körner,  
P. Gierth, A. Waltinger,  
B. Leszczynska, D. K. Simon,  
J. Gärtner, P. M. Jordan,  
T. Mikolajick, I. Dani, M. Eberstein,  
L. Rebenklau, J. Krause

»Via hole conditioning in silicon heterojunction metal wrap through solar cells«

Energy Procedia 77 (2015), S. 458-463  
DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.065



- [L35]**  
D. Dittrich, R. Schedewy, R. Strohbach, B. Brenner, J. Standfuß  
»Laser-Mehrlagenengstspaltschweißen (Laser-MES) für Bauteildicken in Aluminium bis 50 mm und Stahl bis 60 mm«  
Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V. -DVS-: Große Schweißtechnische Tagung 2015: DVS-Studentenkongress, DVS Congress und DVS Expo, 15.-17. September 2015, Nürnberg Düsseldorf: DVS Media, 2015, S. 777-782 (DVS-Berichte 315)
- [L36]**  
D. Dittrich, R. Schedewy, B. Brenner, E. Beyer  
»Laserstrahl-Mehrlagen-Engstspaltschweißen zum verzugsarmen und heißbrissfreien Fügen von Aluminiumlegierungen im Dickblechbereich«  
Schweißen und Schneiden 67 (2015), Nr. 3, S. 114-117
- [L37]**  
D. Dittrich, R. Schedewy, B. Brenner, E. Beyer  
»Multi-pass narrow-gap (MPNG) laser welding process for the low-distortion and hot-crack-free joining of thick plates made of aluminium alloys«  
Welding and cutting 14 (2015), Nr. 3, S. 174-177
- [L38] RV**  
S. Eckhardt, L. Müller-Meskamp, M. Löser, M. Siebold, A.-F. Lasagni  
»Fabrication of highly efficient transparent metal thin film electrodes using direct laser interference patterning«  
Klotzbach, U.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - SPIE-, Bellingham/Wash.: Laser-based Micro- and Nanoprocessing IX: 10.-12. Februar 2015, San Francisco, California, USA Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 935116 (Proceedings of SPIE 9351) DOI: 10.1117/12.2082537
- [L39]**  
J. Fichtner  
»Druckbare Kohlenstoffnanoröhren – Polymerpaste«  
Saarbrücken: AV Akademikerverlag, 2015  
ISBN 978-3-639-72663-3,  
ISBN 3-639-72663-4
- [L40] RV**  
R. Frenzel, T. Schiefer, I. Jansen, F. Simon, A. Calvimontes, K. Grundke, L. Häußler, E. Beyer  
»Polyelectrolytes to promote adhesive bonds of laser-structured aluminium«  
International journal of adhesion and adhesives 61 (2015), S. 35-45  
DOI: 10.1016/j.jadhadh.2015.05.001
- [L41]**  
V. Fux, T. Fiebiger, A. Berger, J. Kaspar, S. Kühn, B. Brenner  
»Laserwalzplattierte Bimetalle«  
Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V. -DVS-: Große Schweißtechnische Tagung 2015: DVS-Studentenkongress, DVS Congress und DVS Expo, 15.-17. September 2015, Nürnberg Düsseldorf: DVS Media, 2015, S. 741-745 (DVS-Berichte 315)
- [L42] RV**  
A. Ganvir, N. Curry, N. Markocsan, P. E. Nylén, F.-L. Toma  
»Comparative study of suspension plasma sprayed and suspension high velocity oxy-fuel sprayed YSZ thermal barrier coatings«  
Surface and coatings technology 268 (2015), S. 70-76  
DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.054
- [L43] RV**  
W. Garkas, M. Fröhlich, K. D. Weltmann, C. Leyens  
»Oxidation and decomposition of Ti<sub>2</sub>AlN MAX phase coating deposited on Nickel-based super alloy IN718«  
C. Edtmaier: 20<sup>th</sup> Symposium on Composites 2015, 1.-3. Juli 2015, Wien, Österreich  
Durnten-Zurich: TTP, 2015, S. 628-635 (Materials Science Forum 825-826)  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.628
- [L44]**  
C. Goppold, T. Pinder, P. Herwig, A. Mahrle, A. Wetzig, E. Beyer  
»Beam oscillation - periodic modification of the geometrical beam properties«  
Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik -WLT-: Lasers in Manufacturing, LiM 2015: International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, LiM 2015, 22.-25. Juni 2015, München, Paper 112
- [L45] RV**  
S. Grigoriev, T. Nikolaevich, V. Tatyana, G. O. Gvozdeva, S. Nowotny  
»Solidification behaviour during laser microcladding of Al-Si alloys«  
Surface and coatings technology 268 (2015), S. 303-309  
DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.001
- [L46]**  
A. Grimm, S. Schulze, A. F. Silva, G. Gunther, J. Standfuß, B. Brenner, E. Beyer, U. Füssel  
»Friction stir welding of light metals for industrial applications«  
Materials today. Proceedings 2 (2015), Supplement 1, S. S169-S178  
DOI: 10.1016/j.matpr.2015.05.007
- [L47]**  
D. Günther, R. Heß, B. Beutner, S. Subhani, M. Masroor, X. Wang, C. Zwahr, A. Welle, T. Weingärtner, D. Scharnweber, A.-F. Lasagni  
»Einfluss von Topographie und Chemie auf das Verhalten von lebenden Zellen«  
Werkstoffwoche 2015, Kongress für innovative Werkstoffe, Verfahren und Anwendungen, 14.-17. September 2015, Dresden URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-370226.html>
- [L48]**  
D. Günther, R. E. Alves, S. Dani, S. Eckhardt, M. Bieda, T. Roch, I. Cestari, A.-F. Lasagni  
»Anpassung von Polyurethan durch direkte Laserinterferenzstrukturierung«  
Werkstoffwoche 2015, Kongress für innovative Werkstoffe, Verfahren und Anwendungen, 14.-17. September 2015, Dresden URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-370225.html>
- [L49]**  
J. Haag, T. Mertens, M. Kolb, L. Kotte, S. Kaskel  
»Plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) at atmospheric pressure (AP) of organosilicon films for adhesion promotion on Ti<sub>15</sub>V<sub>3</sub>Cr<sub>3</sub>Sn<sub>3</sub>Al and Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V«  
Journal of Materials Science and Engineering A 5 (2015), Nr. 8, S. 274-284  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-364205.html>, DOI: 10.17265/2161-6213/2015.7-8.004
- [L50]**  
J. Hannweber, S. Bonß, S. Kühn, M. Seifert, U. Karsunke, D. Pögen, B. Brenner, E. Beyer  
»Systems engineering for laser heat treatment«  
Japan Laser Processing Society: LAMP 2015, 7<sup>th</sup> International Congress on Laser Advanced Materials Processing: LPM 2015, the 16<sup>th</sup> International Symposium on Laser Precision Microfabrication; HPL 2015, the 7<sup>th</sup> International Symposium on High Power Laser Processing; 26.-29. Mai 2015, Kitakyushu, Fukuoka, Japan, Paper A160
- [L51] RV**  
G.-P. Hao, N.-R. Sahraie, Q. Zhang, S. Krause, M. Oschatz, A. Bachmatiuk, P. Strasser, S. Kaskel  
»Hydrophilic non-precious metal nitrogen-doped carbon electrocatalysts for enhanced efficiency in oxygen reduction reaction«  
Chemical communications 51 (2015), Nr. 97, S. 17285-17288  
DOI: 10.1039/c5cc06256j



**[L52]**

J. Hauptmann, A. Fürst, P. Rauscher, P. Herwig, A. Wetzig, E. Beyer

»Hochleistungs-Remote-Bearbeitung – Applikationen und Systemtechnik«

9. Mittweidaer Lasertagung 2015. Lasertechnik: Im Rahmen der 24. Wissenschaftlichen Konferenz der Hochschule Mittweida (IVKM), 19.-20. November 2015, Mittweida, S. 60-63 (Scientific Reports 4/2015)

**[L53]**

J. Hauptmann, R. Michael, A. Fürst, A. Klotzbach, A. Wetzig, E. Beyer

»Laser cutting of fiber reinforced polymers and its applications«

11<sup>th</sup> International Conference Advances in Plastics Technology, APT 2015. Conference Papers. CD-ROM: Sosnowiec, Poland, 13.-15. Oktober 2015 Sosnowiec, 2015, Paper 19

**[L54]**

J. Hauptmann, P. Herwig, A. Wetzig, D. Dittrich, E. Beyer, U. Hofmann, F. Senger

»System technology for dynamic beam shaping«

Laser Institute of America: ICALEO 2015, 34<sup>th</sup> International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Conference Proceedings: 18.-22. Oktober 2015. Atlanta, Ga., USA Orlando, Fla.: LIA, 2015, S. 930-939, Paper 2003

**[L55] RV**

S. Helten, B. Sahoo, P. Müller, D. Janßen-Müller, N. Klein, R. Grünker, V. Bon, F. Glorius, S. Kaskel, I. Senkovska

»Functional group tolerance in BTB-based metal-organic frameworks (BTB - benzene-1,3,5-tribenzoate)«

Microporous and mesoporous materials 216 (2015), S. 42-50 DOI: 10.1016/j.micromeso.2015.02.055

**[L56]**

P. Herwig

»Prozesssichere Laserbearbeitung hochreflektiver Werkstoffe«

Aachen: Shaker, 2015, 141 S. Zugl.: Dresden, TU, Diss., 2015 ISBN 978-3-8440-3861-3

**[L57]**

D. Höche, J. Kaspar, P. Schaaf

»Laser nitriding and carburization of materials«

Lawrence, J.: »Laser surface engineering. Processes and applications« Cambridge: Woodhead Publishing, 2015, S. 33-58 DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00002-7

**[L58]**

C. Hoffmann, P. Plate, A. Steinbrück, S. Kaskel

»Nanoporous silicon carbide as nickel support for the carbon dioxide reforming of methane«

Catalysis science & technology 5 (2015), Nr. 8, S. 4174-4183 DOI: 10.1039/c4cy01234h

**[L59]**

A. Jahn, M. Wagner, J. Bellmann, J. Standfuß, B. Brenner, E. Beyer

»LBW of steel-aluminum corner joints generated by selected laser material melting«

Laser Institute of America: ICALEO 2015, 34<sup>th</sup> International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Conference Proceedings : 18.-22. Oktober 2015, Atlanta, Ga., USA Orlando, Fla.: LIA, 2015, S. 702-708, Paper 1502

**[L60]**

A. Jahn, J. Bellmann, M. Wagner, J. Standfuß, E. Beyer

»Metallische Mischverbindungen für automobile Anwendungen«

Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V -DVS-: Große Schweißtechnische Tagung 2015: DVS-Studentenkongress, DVS Congress und DVS Expo, 15.-17. September 2015, Düsseldorf: DVS Media, 2015, S. 481-486 (DVS-Berichte 315)

**[L61]**

A. Kabardiadi, T. Baselt, P. Hartmann

»Designing of measurement for fast alternative method for measuring the wavefront of lithography exposure systems«

4<sup>th</sup> International Summer School »Trends and new developments in Laser Technology 2015«, 24.-28. August 2015, Dresden URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-366370.html>

**[L62] RV**

M. Kästner, S. Müller, F. Hirsch, J.-S. Pap, I. Jansen, V. Ulbricht

»XFEM modeling of interface failure in adhesively bonded fiber-reinforced polymers«

Advanced engineering materials (2015), Online First DOI: 10.1002/adem.201500445

**[L63]**

C. Katsich, J. Norpoth, M. Rodriguez Ripoll, L. Janka, L.-M. Berger, S. Thiele, F.-L. Toma, R. Trache

»Wear properties of chromium carbide based HVOF and HVAF thermal spray coatings up to 800°C«

Gesellschaft für Tribologie -GfT-: Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen. Bd.1 : 56. Tribologie-Fachtagung, 21.-23. September 2015, Göttingen Aachen: GfT, 2015, Paper 31

**[L64]**

J. Köckeritz

»Herstellung und Charakterisierung einer thermoelektrischen Dispenserdruckpaste«

Dresden, HTW, Bachelorthesis, 2015

**[L65]**

T. Köckritz, F. Wehnert, J.-S. Pap, I. Jansen

»Increasing the electrical values of polydimethylsiloxane by the integration of carbon black and carbon nanotubes: A comparison of the effect of different nanoscale fillers«

Nihon-setchaku-gakkaishi = Journal of the Adhesion Society of Japan 51 (2015), Supplement 1, S. 221-222 DOI: 10.11618/adhesion.51.221

**[L66] RV**

M. Kohl, J. Brückner, I. Bauer, H. Althues, S. Kaskel

»Synthesis of highly electrochemically active Li<sub>2</sub>S nanoparticles for lithium-sulfur-batteries«

Journal of materials chemistry A, Materials for energy and sustainability 3 (2015), Nr. 31, S. 16307-16312 DOI: 10.1039/C5TA04504E

**[L67] RV**

M. S. Komlenok, V. V. Kononenko, E. V. Zavedeev, V. D. Frolov, N. R. Arutyunyan, A. A. Chouprik, A. S. Baturin, H.-J. Scheibe, M. L. Shupegin, S. M. Pimenov, M. Sergei

»Laser surface graphitization to control friction of diamond-like carbon coatings«

Applied physics. A 121 (2015), Nr. 3, S. 1031-1038 DOI: 10.1007/s00339-015-9485-5

**[L68]**

L. Kotte, J. Roch, G. Mäder, J. Haag, T. Mertens

»Large area atmospheric pressure plasma processes: Applications of the LARGE plasma source«

Bogaerts, A; Sanden, R. van de; University of Antwerp: ISPC 22, 22<sup>nd</sup> International Symposium on Plasma Chemistry. Proceedings: 5.-10. Juli 2015, University of Antwerp, Stadscampus, Antwerp, Belgium, Paper P-III-6-26

**[L69]**

L. Kotte, J. Roch, M. Julius, G. Mäder

»Mobile Plasmaquelle jetzt industriereif«

Maschinenmarkt. MM, das Industriemagazin (2015), Nr. 7, S. 56-58, 60

- [L70]**  
A. Krause, J. Brückner, S. Dörfler, F. M. Wisser, H. Althues, M. Grube, J. Martin, J. Grothe, T. Mikolajick, W. Thomas, W. M. Weber  
»Stability and performance of heterogeneous anode assemblies of silicon nanowires on carbon meshes for lithium-sulfur battery applications«  
G. Koblmüller, Materials Research Society: Semiconductor nanowires - growth, physics, devices and applications: 30. November - 5. Dezember 2014, Boston, Massachusetts, USA; Symposium LL: Semiconductor Nanowires - Growth, Physics, Devices and Applications; held at the 2014 MRS fall meeting, Red Hook, NY: Curran, 2015, S. 19-24 (Materials Research Society Symposium Proceedings 1751)  
DOI: 10.1557/opl.2015.196
- [L71] RV**  
A. Kubec, N. Kujala, R. Conley, N. Bouet, J. Zhou, T. M. Mooney, D. Shu, J. Kirchman, K. Goetze, J. M. Maser, A. T. Macrander  
»Diffraction properties of multilayer Laue lenses with an aperture of 102  $\mu\text{m}$  and  $\text{WSi}_2/\text{Al}$  bilayers«  
Optics Express 23 (2015), Nr. 21, S. 27990-27997  
DOI: 10.1364/OE.23.027990
- [L72]**  
F. Kubisch, M. Pfennig, F. Brückner, S. Nowotny  
»Internal laser cladding of barrels with the newly developed Mini-ID cladding head«  
Associazione Italiana di Metallurgia -AIM-; International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering: Heat treatment and surface engineering. CD-ROM: From tradition to innovation. European Conference on Heat Treatment 2015 & 22<sup>nd</sup> IFHTSE congress, 20.-22. Mai 2015, Venice, Italien  
Milano: AIM, 2015, S. 60-63
- [L73]**  
T. Kunze, T. Roch, T. Hoffmann, E. Fedyna, V. Konovalov, D. Oulianov, A.-F. Lasagni  
»High resolution direct laser interference patterning by high energy q-switched lasers«  
Fotonika : Naucno-techniceskij zurnal = Photonics Russia 53 (2015), Nr. 5, S. 34-41
- [L74]**  
T. Kunze, F. Böttcher, V. Lang, A. Gärtner, A.-F. Lasagni  
»Surface functionalization of forming using direct laser interference patterning for dry forming applications«  
Dry metal forming open access journal 1 (2015), S. 108-112  
URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:46-00104815-13>
- [L75]**  
A.-F. Lasagni, E. Beyer  
»Fabrication of periodic submicrometer and micrometer arrays using laser interference-based methods«  
Lawrenc, J.: Laser surface engineering. Processes and applications, Cambridge: Woodhead Publishing, 2015, S. 423-439 (Woodhead publishing series in electronic and optical materials 65)  
DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00017-9
- [L76] RV**  
A.-F. Lasagni, T. Roch, J. Berger, T. Kunze, V. Lang, E. Beyer  
»To use or not to use (direct laser interference patterning), that is the question«  
Klotzbach, U.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: Laser-based Micro- and Nanoprocessing IX: 10.-12. Februar 2015, San Francisco, California, USA  
Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 935115, 7 S. (Proceedings of SPIE 9351)  
DOI: 10.1117/12.2081976
- [L77]**  
A. Leifert, N. Mohamed-Noriega, A. Meier, G. Giovanni, S. Dörfler, J. Grothe, S. Kaskel, B. Schumm, C. Nowka, S. Hampel, E. L. Cuéllar  
»Mechanical reinforcement of copper films with ceramic nanoparticles«  
Kriven, W. M.; American Ceramic Society -ACerS-, Westerville/Ohio: Developments in Strategic Materials and Computational Design V: A collection of papers presented at the 38<sup>th</sup> International Conference on Advanced Ceramics and Composites, 27.-31. Januar 2014, Daytona Beach, Florida, USA  
Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc., 2015, S. 361-366 (Ceramic engineering and science proceedings Vol. 35, Nr. 8)  
DOI: 10.1002/9781119040293.ch31
- [L78]**  
A. Leson, G. Englberger, D. Hammer, S. Makowski, C.-F. Meyer, M. Leonhardt, H.-J. Scheibe, V. Weihnacht  
»Diamantartige Kohlenstoffschichten steigern die Effizienz: Laser-Arc-Verfahren zur Abscheidung von ta-C-Schichten«  
Vakuum in Forschung und Praxis 27 (2015), Nr. 4, S. 24-28  
DOI: 10.1002/vipr.201500588
- [L79]**  
C. Leyens, E. Beyer  
»Innovations in laser cladding and direct laser metal deposition«  
Lawrence, J.: Laser surface engineering. Processes and applications, Cambridge: Woodhead Publishing, 2015, S. 181-192 (Woodhead publishing series in electronic and optical materials 65)  
DOI: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8
- [L80]**  
J. Liebich, H. Althues, S. Kaskel  
»Leitfähige Polymeroberflächen durch CNT Dünnschichten«  
Galvanotechnik 106 (2015), Nr. 7, S. 1378-1381
- [L81] RV**  
C.-H. Lu, M. Beckmann, S. Unz, D. GlöB, P. Frach, E. Holst, A.-F. Lasagni, M. Bieda  
»Heat transfer model of dropwise condensation and experimental validation for surface with coating and groove at low pressure«  
Heat and mass transfer (2015), Online First  
DOI: 10.1007/s00231-015-1641-0
- [L82] RV**  
A. T. Macrander, A. Kubec, R. Conley, N. Bouet, J. Zhou, M. J. Wojcik, J. M. Maser  
»Efficiency of a multilayer-Laue-lens with a 102  $\mu\text{m}$  aperture«  
Applied Physics Letters 107 (2015), Nr. 8, Art. 081904  
DOI: 10.1063/1.4929505
- [L83]**  
J. Marx  
»Herstellung und Evaluierung eines n-leitenden Polymers für thermoelektrische Anwendungen«  
Dresden, 2015, 92 S., Ilmenau, TU, Masterthesis, 2015
- [L84] RV**  
I. Maschmeyer, T. Hasenberg, A. Jaenicke, M. Lindner, A. K. Lorenz, J. Zech, L. A. Garbe, F. Sonntag, P. J. Hayden, S. Ayehunie, L. Seyoum, R. Lauster, U. Marx, E. M. Materne  
»Chip-based human liver-intestine and liver-skin co-cultures: A first step toward systemic repeated dose substance testing in vitro«  
European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics 95, Part A (2015), S. 77-87  
DOI: 10.1016/j.ejpb.2015.03.002
- [L85] RV**  
I. Maschmeyer, A. K. Lorenz, K. Schimek, T. Hasenberg, A. P. Ramme, J. Hübner, M. Lindner, C. Drewell, S. Bauer, A. Thomas, N. S. Sambo, F. Sonntag, R. Lauster, U. Marx  
»A four-organ-chip for interconnected long-term co-culture of human intestine, liver, skin and kidney equivalents«  
LAB on a chip 15 (2015), Nr. 12, S. 2688-2699  
DOI: 10.1039/C5LC00392J

**[L86] RV**

E. M. Materne, I. Maschmeyer, A. K. Lorenz, R. Horland, K. Schimek, M. Busek, F. Sonntag, R. Lauster, U. Marx

»The multi-organ chip – A microfluidic platform for long-term multi-tissue coculture«

Journal of visualized experiments : JoVE. Online resource (2015), Nr. 98, Art. e52526  
DOI: 10.3791/52526

**[L87] RV**

L. Müller-Meskamp, S. Schubert, T. Roch, S. Eckhardt, A.-F. Lasagni, K. W. Leo

»Transparent conductive metal thin-film electrodes structured by direct laser interference patterning«

Advanced engineering materials 17 (2015), Nr. 8, S. 1215-1219  
DOI: 10.1002/adem.201400454

**[L88] RV**

S. Nowotny, F. Brückner, S. Thieme, C. Leyens, E. Beyer

»High-performance laser cladding with combined energy sources«

Journal of laser applications: JLA 27 (2015), Supplement 1, Art. S17001  
DOI: 10.2351/1.4817455

**[L89] RV**

M. Oschatz, M. Leistner, W. Nickel, S. Kaskel

»Advanced structural analysis of nanoporous materials by thermal response measurements«

Langmuir. The ACS journal of surfaces and colloids 31 (2015), Nr. 13, S. 4040-4047  
DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b00490

**[L90]**

J.-S. Pap, J. Schiefer, I. Jansen

»Adhesively bonded structures with hybrid yarn textile-reinforced plastics«

Nihon-setchaku-gakkaishi = Journal of the Adhesion Society of Japan 51 (2015), Supplement 1, S. 229-230  
DOI: 10.11618/adhesion.51.229

**[L91]**

D. F. Pessoa, A. Mahrle, P. Herwig, A. Wetzig, M. Zimmermann

»Einfluss des Laserschneidens auf das Ermüdungsverhalten eines metastabilen austenitischen Stahls«

Borsutzk, M.; Deutsche Gesellschaft für Materialkunde -DGM-: Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis: 33. Vortrags- und Diskussionstagung Werkstoffprüfung 2015, 3.-4. Dezember 2015, Bad Neuenahr  
Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 2015, S. 273-278

**[L92]**

M. Piwko, H. Althues, B. Schumm, S. Kaskel

»Confocal microscopy for process monitoring and wide-area height determination of vertically-aligned carbon nanotube forests«

Coatings 5 (2015), Nr. 3, S. 477-487  
DOI: 10.3390/coatings5030477

**[L93]**

A. Rank, T. Kunze, T. Hoffmann, A.-F. Lasagni

»Fabrication of surface architectures on metallic stamps for hot embossing of polymers«

4<sup>th</sup> IWS Summer School »Trends and new developments in Laser Technology 2015«, 27. August 2015, Dresden  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-369992.html>

**[L94] RV**

A. Roch, M. Greifzu, E. Talens, L. Stepien, T. Roch, J. Hege, N. V. Nong, T. Schmiel, I. Dani, C. Leyens, O. Jost, A. Leson

»Ambient effects on the electrical conductivity of carbon nanotubes«

Carbon 95 (2015), S. 347-353  
DOI: 10.1016/j.carbon.2015.08.045

**[L95] RV**

T. Roch, D. Benke, S. Milles, A. Roch, T. Kunze, A.-F. Lasagni

»Dependence between friction of laser interference patterned carbon and the thin film morphology«

Diamond and Related Materials 55 (2015), 55, S. 16-21  
DOI: 10.1016/j.diamond.2015.02.002

**[L96]**

M. Rose, A. Fürst, J.-S. Pap, A. Klotzbach, J. Hauptmann, I. Jansen, E. Beyer

»Optical deformation analysis of the failure behavior of fiber reinforced polymers caused by laser processing«

20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials 2015, Proceedings, 19.-24. Juli 2015, Kopenhagen, Dänemark  
Kopenhagen, 2015, Paper 1206-1  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-370061.html>

**[L97] RV**

G. Rotella, M. Alfano, T. Schiefer, I. Jansen

»Enhancement of static strength and long term durability of steel/epoxy joints through a fiber laser surface pre-treatment«

International journal of adhesion and adhesives 63 (2015), S. 87-95  
DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.08.009

**[L98] RV**

F. Sandra, N. Klein, M. Leistner, M. R. Lohe, M. Benusch, M. Wöllner, J. Grothe, S. Kaskel

»Speeding up chemisorption analysis by direct IR-heat-release measurements (infrasp technology): A screening alternative to breakthrough measurements«

Industrial and Engineering Chemistry Research 54 (2015), Nr. 26, S. 6677-6682  
DOI: 10.1021/acs.iecr.5b01404

**[L99] RV**

F. J. Sanza, D. Langheinrich, J. Berger, A. L. Hernandez, S. Dani, R. Casquel, A. Lavin, A. Oton, B. Santamaria, M. Laguna, A.-F. Lasagni, M. Holgado

»Direct laser interference patterning (DLIP) technique applied to the development of optical biosensors based on biophotonic sensing cells (BICELLS)«

Klotzbach, U.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: Laser-based Micro- and Nanoprocessing IX: 10.-12. Februar 2015, San Francisco, California, USA  
Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 935114 (Proceedings of SPIE 9351)  
DOI: 10.1117/12.2077292

**[L100] RV**

S. Scheitz, F.-L. Toma, T. Kuntze, C. Leyens, S. Thiele

»Surface preparation for ceramics functionalization by thermal spraying«

McDonald, A.; ASM International; The Thermal Spray Society: Thermal spray 2015. International Thermal Spray Conference ITSC 2015. Proceedings: Innovative Coating Solutions for the Global Economy; 11.-14. Mai 2015, Long Beach, Ca., Materials Park, Ohio: ASM International, 2015, S. 684-688

**[L101]**

T. Schiefer, I. Jansen, M. Bieda, J.-S. Pap, A.-F. Lasagni

»Large area surface structuring by direct laser interference patterning for adhesive bonding applications«

Nihon-setchaku-gakkaishi = Journal of the Adhesion Society of Japan 51 (2015), Supplement 1, S. 223-224  
DOI: 10.11618/adhesion.51.223

**[L102] RV**

N. Schilling, N. Wiegand, U. Klotzbach

»Laser assisted electrical contacting in multifunctional GF/PP composites«

C. Edtmaier: 20<sup>th</sup> Symposium on Composites 2015: 20<sup>th</sup> Symposium on Composites, 1.-3. Juli 2015, Wien, Österreich  
Durnten-Zurich: TTP, 2015, S. 541-547 (Materials Science Forum 825-826)  
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.541

**[L103] RV**

N. Schilling, B. Krupop, U. Klotzbach

»Laser processing of glass fiber reinforced thermoplastics with different wavelengths and pulse durations«

Klotzbach, U.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: Laser-based Micro- and Nanoprocessing IX: 10.-12. Februar 2015, San Francisco, CA, USA  
Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 93510N (Proceedings of SPIE 9351)  
DOI: 10.1117/12.2081903

**[L104]**

N. Schilling, D. Linaschke, I. Dani

»Laserdotieren als mögliche Alternative zur Ionenimplantation zur Erzeugung definierter Dotierprofile«

Wetzig, K.; Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. -EFDS-: Morphologie und Mikrostruktur Dünner Schichten und deren Beeinflussung, 12. März 2015, Dresden; Tagungsband, Dresden: EFDS, 2015

**[L105]**

S. Schulze, A. Grimm, G. Göbel, J. Standfuß, B. Brenner, E. Beyer

»Konzept zum Fügen zukünftiger metallischer Flugzeugumpfstruktur«

Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V. -DVS-: Große Schweißtechnische Tagung 2015: DVS-Studentenkongress, DVS Congress und DVS Expo, 15.-17. September 2015, Nürnberg Düsseldorf: DVS Media, 2015, S. 215-218 (DVS-Berichte 315)

**[L106] RV**

F. Senger, U. G. Hofmann, T. von Wantoch, C. Mallas, J. Janes, W. Benecke, P. Herwig, P. Gawlitza, M. A. Ortega Delgado, C. Gruhne, J. Hannweber, A. Wetzig

»Centimeter-scale MEMS scanning mirrors for high power laser application«

Piyawattanametha, W.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: MOEMS and Miniaturized Systems XIV : 7.-12. Februar 2014, San Francisco, Ca., USA Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 937509 (Proceedings of SPIE 9375) DOI: 10.1117/12.2079600

**[L107]**

R. Siebert

»Bestimmung der magnetischen Flussdichteverteilung in nichtkornorientiertem Elektroblech nach dem Laserschneiden mittels Neutronen-Dunkelfeld-Bildgebung«

Aachen : Shaker, 2015, VI, 116 S., XXIX  
Zugl.: Dresden, TU, Diss., 2015  
ISBN 978-3-8440-3956-6,  
ISBN 3-8440-3956-2,  
DOI: 10.2370/9783844039566

**[L108]**

A. Sinibaldi, N. Danz, A. Anopchenko, P. Munzert, S. Schmieder, R. Chandrawati, R. Rizzo, S. Rana, F. Sonntag, A. Occhicone, L. Napione, S. de Panfilis, M. M. Stevens, F. Michelotti

»Label-free detection of tumor angiogenesis biomarker angiopoietin 2 using Bloch surface waves on one dimensional photonic crystals«

Journal of Lightwave Technology 33 (2015), Nr. 16, S. 3385-3393  
DOI: 10.1109/JLT.2015.2448795

**[L109] RV**

F. Sonntag, S. Grünzner, F. Schmieder, M. Busek, U. Klotzbach, V. Franke

»Multilayer based lab-on-a-chip systems for substance testing«

Klotzbach, U.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: Laser-based Micro- and Nanoprocessing IX : 10.-12. Februar 2015, San Francisco, Ca., USA Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 93510C, (Proceedings of SPIE 9351) DOI: 10.1117/12.2083100

**[L110]**

J. Standfuß, A. Jahn, M. Wagner, J. Bellmann, E. Beyer

»Innovative laser processes for lightweight constructions«

Industrial laser solutions for manufacturing 30 (2015), Nr. 4  
URL: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-30/issue-4/features/innovative-laser-processes-for-lightweight-constructions.html>

**[L111]**

J. Standfuß, E. Beyer, B. Brenner, R. Schedewy, D. Dittrich, R. Strohbach

»Laser-multi-pass-welding of aluminium and steel with sheet thickness above 50mm«

Laser Institute of America: ICALEO 2015, 34th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Conference Proceedings, 18.-22. Oktober 2015, Atlanta, Ga., USA  
Orlando, Fla.: LIA, 2015, S. 626-631, Paper 1201

**[L112]**

L. Stepien, A. Roch, S. Schlaier, I. Dani, A. Kiriya, F. Simon, M. v. Lukowicz, C. Leyens

»Investigation of the thermoelectric power factor of KOH-treated PEDOT: PSS dispersions for printing applications«

Energy harvesting and systems (2015), Online First  
DOI: 10.1515/ehs-2014-0060

**[L113]**

W. Storch, M. Seidel, D. Sagan, R. Kühberger, B. Brenner

»Betriebsbewährung von Alloy 617 in Gasturbinen«

Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V. -DVS-: Große Schweißtechnische Tagung 2015: DVS-Studentenkongress, DVS Congress und DVS Expo, 15.-17. September 2015, Nürnberg Düsseldorf: DVS Media, 2015, S. 828-830 (DVS-Berichte 315)

**[L114]**

A. Straubel, S. Wolf, F. Brückner, A. Seidel, T. Finaske, C. Leyens

»Umsetzung verschiedener Präparationstechniken zur Untersuchung des Gefüges und der mechanischen Eigenschaften von wärmebehandelten  $\gamma$ -Titanaluminid Legierungen mit unterschiedlichen Herstellungsrouten«

Schneider, G.; Zschech, E.; Petzow, G.; Deutsche Gesellschaft für Materialkunde: Fortschritte in der Metallographie -DGM-: Vortragstexte der 49. Metallographie-Tagung, 16.-18. September 2015, Dresden  
Sankt Augustin: Inventum, 2015, S. 263-266 (Sonderbände der praktischen Metallographie 47)

**[L115]**

C. Strehmel, H. R. Perez-Hernandez, Z. Zhang, A. Löbus, A.-F. Lasagni, M. C. Lensen

»Geometric control of cell alignment and spreading within the confinement of antiadhesive poly(ethylene glycol) microstructures on laser-patterned surfaces«

ACS biomaterials science & engineering 1 (2015), Nr. 9, S. 747-752  
DOI: 10.1021/ab5001657

**[L116] RV**

P. Strubel, S. Thieme, T. Biemelt, A. Helmer, M. Oschatz, J. Brückner, H. Althues, S. Kaskel

»ZnO hard templating for synthesis of hierarchical porous carbons with tailored porosity and high performance in lithium-sulfur battery«

Advanced Functional Materials 25 (2015), Nr. 2, S. 287-297  
DOI: 10.1002/adfm.201402768

**[L117] RV**

C. Taudt, T. Baselt, G. Oreski, C. Hirschl, E. Koch, P. Hartmann

»Cross-linking characterization of polymers based on their optical dispersion utilizing a white-light interferometer«

Lehmann, P.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX: 22.-25. Juni 2015, München Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 95250P, 6 S. (Proceedings of SPIE 9525) URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-360115.html>, DOI: 10.1117/12.2184814

**[L118]**

S. Thieme, J. Brückner, A. Meier, I. Bauer, K. Gruber, J. Kaspar, A. Helmer, H. Althues, M. Schmuck, S. Kaskel

»A lithium-sulfur full cell with ultralong cycle life: Influence of cathode structure and polysulfide additive«

Journal of materials chemistry A, Materials for energy and sustainability 3 (2015), Nr. 7, S. 3808-3820  
DOI: 10.1039/C4TA06748G

**[L119]**

S. Thieme, M. Oschatz, W. Nickel, J. Brückner, J. Kaspar, H. Althues, S. Kaskel

»Tailoring commercially available raw materials for lithium-sulfur batteries with superior performance and enhanced shelf life«

Energy technology 3 (2015), Nr. 10, S. 1007-1013  
DOI: 10.1002/ente.201500140



**[L120] RV**

F.-L. Toma, A. Potthoff,  
L.-M. Berger, C. Leyens

»Demands, potentials, and economic aspects of thermal spraying with suspensions: A critical review«

Journal of thermal spray technology 24 (2015), Nr. 7, S. 1143-1152  
DOI: 10.1007/s11666-015-0274-7

**[L121] RV**

F.-L. Toma, S. Scheitz, R. Trache,  
S. Langner, C. Leyens, A. Potthoff,  
K. Oelschlägel

»Effect of feedstock characteristics and operating parameters on the properties of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings prepared by suspension-HVOF spray«

McDonald, A.; ASM International; The Thermal Spray Society -TSS-: Thermal spray 2015. International Thermal Spray Conference 2015, proceedings: Innovative Coating Solutions for the Global Economy; 11.-14. Mai 2015, Long Beach, California, USA  
Materials Park, Ohio: ASM International, 2015, S. 329-334

**[L122]**

F.-L. Toma

»Industrietaugliche Suspensionsförderer für das Thermische Spritzen mit Suspensionen: Ohne Unterbrechung zur Dauerbeschichtung«

Thermal spray bulletin 8 (2015), Nr. 2, S. XIX

**[L123] RV**

R. Trache, F.-L. Toma, C. Leyens,  
L.-M. Berger, S. Thiele, A. Michaelis

»Effects of powder characteristics and high velocity flame spray processes on Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr-coatings«

McDonald, A.; ASM International; The Thermal Spray Society -TSS-: Thermal spray 2015. International Thermal Spray Conference 2015, proceedings: Innovative Coating Solutions for the Global Economy; 11.-14. Mai 2015, Long Beach, California, USA  
Materials Park, Ohio: ASM International, 2015, S. 988-995

**[L124]**

M. V. Tsurkan, R. Wetzlar,  
H. R. Perez-Hernandez, K. Chwalek,  
A. Kozlova, U. Freudenberg,  
G. Kempermann, Y. Zhang,  
A.-F. Lasagni, C. Werner

»Photopatterning of multifunctional hydrogels to direct adult neural precursor cells«

Advanced healthcare materials 4 (2015), Nr. 4, S. 516-521  
DOI: 10.1002/adhm.201400395

**[L125]**

E. Uhlmann, C. Leyens, J. Gäbler, B. Stawiszynski, F. Oyanedel, A. Javier, S. Heinze

»Neuartige Beschichtungen für die Drehbearbeitung: Hartbearbeitung, Leichtmetallbearbeitung, Verschleißreduktion«

Werkstatt und Betrieb 148 (2015), Nr. 10, S. 90-93

**[L126] RV**

J. Valle, S. Burgui, D. Langheinrich,  
C. Gil, Carmen, C. Solano,  
A. Toledo-Arana, R. Helbig,  
A.-F. Lasagni, I. Lasa

»Evaluation of surface microtopography engineered by direct laser interference for bacterial anti-biofouling«

Macromolecular bioscience 15 (2015), Nr. 8, S. 1060-1069  
DOI: 10.1002/mabi.201500107

**[L127]**

J. Walter, C. Hennigs, A. Brodeßer,  
M. Hustedt, S. Kaierle, M. Borkmann, A. Mahrle

»Optimierte Luftströmungsführung beim Remote-Laserstrahlschweißen. Teil I: Experimentelle Untersuchungen«

Czarske, J.; Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie e.V.-GALA-: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik: 23. Fachtagung, 8.-10. September 2015, Dresden  
Karlsruhe: Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA, 2015, Paper 24

**[L128] RV**

F. Wehnert, M. Langer, J. Kaspar,  
I. Irene

»Design of multifunctional adhesives by the use of carbon nanoparticles«

Journal of adhesion science and technology 29 (2015), Nr. 17, S. 1849-1859  
DOI: 10.1080/01694243.2015.1014536

**[L129] RV**

F. Wehnert, P. Pötschke, I. Jansen

»Hotmelts with improved properties by integration of carbon nanotubes«

International journal of adhesion and adhesives 62 (2015), S. 63-68  
DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.06.014

**[L130] RV**

A. Wetzlar, R. Baumann, P. Herwig,  
R. Siebert, E. Beyer

»Laser remote cutting of metallic materials: Opportunities and limitations«

Green, M.; Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers -SPIE-, Bellingham/Wash.; Association of Industrial Laser Users: Industrial Laser Applications Symposium, ILAS 2015, 17.-18. März 2015, Kenilworth, United Kingdom  
Bellingham, WA: SPIE, 2015, Paper 965708 (Proceedings of SPIE 9657)  
DOI: 10.1117/12.2175507

**[L131]**

A. Wetzlar, L. D. Scintilla, C. Goppold, R. Baumann, P. Herwig, A. Mahrle, A. Fürst, J. Hauptmann, E. Beyer

»New progress in laser cutting«

3<sup>rd</sup> International Conference on Laser and Plasma Application in Materials Science 2015, proceedings: 15.-17. Juli 2015, Kolkata, India, S. 4-6

**[L132] RV**

D. Wisser, F. M. Wisser, S. Raschke,  
N. Klein, M. Leistner, J. Grothe,  
E. Brunner, S. Kaskel

»Biological Chitin-MOF composites with hierarchical pore systems for air-filtration applications«

Angewandte Chemie. International edition 54 (2015), Nr. 43, S. 12588-12591  
DOI: 10.1002/anie.201504572

**[L133]**

F. M. Wisser, B. Schumm,  
G. Mondin, J. Grothe, S. Kaskel

»Precursor strategies for metallic nano- and micropatterns using soft lithography«

Journal of materials chemistry C, Materials for optical and electronic devices 3 (2015), Nr. 12, S. 2717-2731  
DOI: 10.1039/c4tc02418d

**[L134]**

P. Wollmann, F. Gruber,  
W. Grählert, S. Kaskel

»Hyperspektrales Imaging für die Schichtanalytik«

GIT. Labor-Fachzeitschrift 59 (2015), Nr. 5, S. 27-29

**[L135]**

M. Zawischa

»Beanspruchung und Versagen von TA-C-Schichten beim Ritztest«

Dresden, TU, Dipl.-Arb., 2015  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-345387.html>

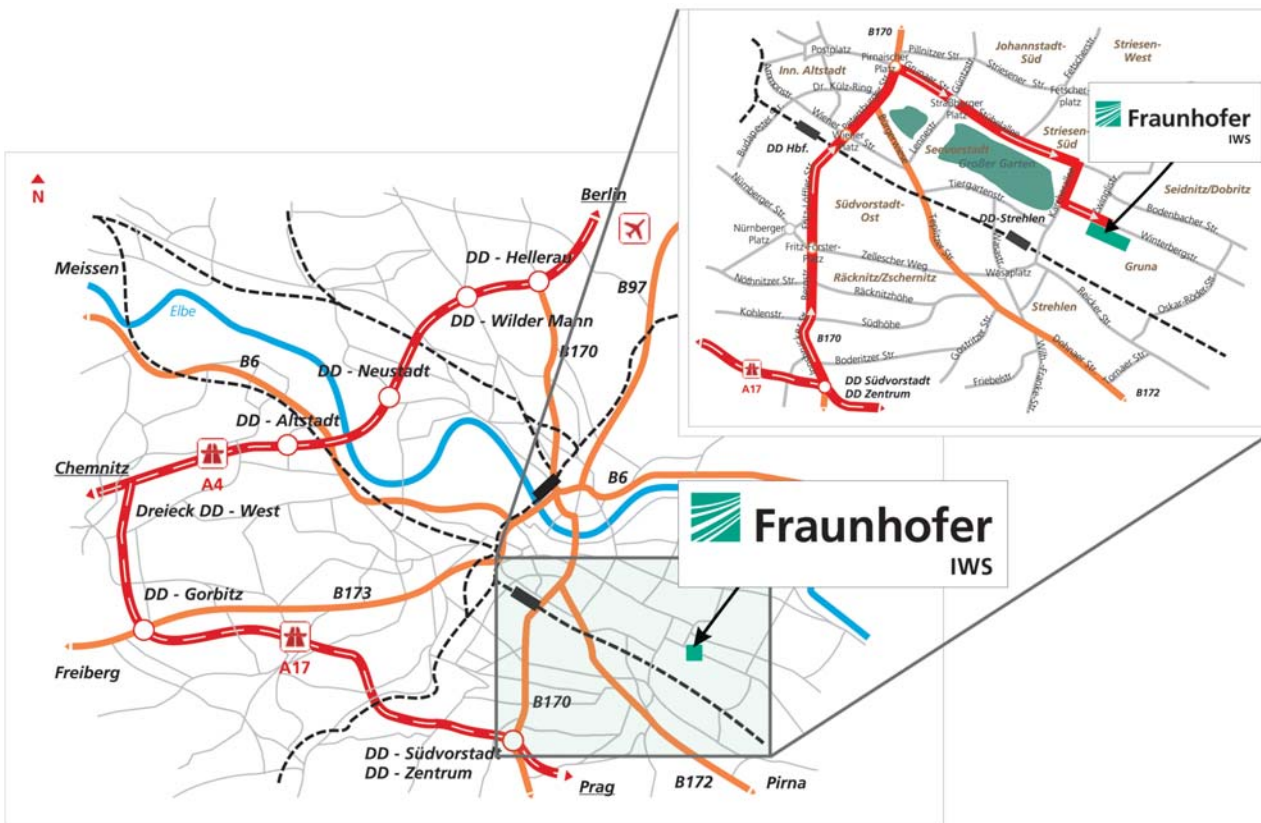
**[L136]**

C. Zwahr, D. Günther, N. Gulow,  
M. G. Holthaus, A.-F. Lasagni

»Surface structuring of titanium for biological applications«

4<sup>th</sup> IWS Summer School »Trends and new developments in Laser Technology 2015«, 27. August 2015, Dresden  
URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-369991.html>

# 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  
Winterbergstraße 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:	Dr. Anja Techel	
Koordination:	B.Sc. Matti Hilbert, M.Sc. Anne Gärtner Dipl.-Kffr. Anne Kutzleb, Dr. Ralf Jäckel	
Gestaltung:	René Zenner, Kerstin Zenner	
Bildnachweis:	S. 3, 15, 21, 51, 63, 79, 93 S. 5, 6, 9, 20, 60 (Abb. 1), 61 (Abb. 3), 78, 82 (Abb. 1), 92 S. 10 S. 13 (Abb. 2) S. 13 (Abb. 3), 18, 36, 50, 62, 90 (Abb. 1), 106 S. 14, 134 (oben), 152 S. 27 (Abb. 3) S. 28, 29, 10, 75, 77, 100, 101, 128, 129 S. 34 S. 35 (Abb. 3) S. 54 (Abb. 3), 55 (Abb. 7) S. 58 (Abb. 1, 3) S. 107 S. 114 (Abb. 1), 115 (Abb. 2) S. 124 (Abb. 2) S. 126 S. 131 (Abb. 1) S. 135 S. 142 S. 144 S. 145 S. 146 S. 148 (linke Spalte Abb. 1) S. 149 (linke Spalte Abb. 1) S. 151  alle anderen Abbildungen	IWS Dresden / Jürgen Jeibmann  Frank Höhler Joachim Blobel WFL Millturn Technologies GmbH & Co. KG Jürgen Jeibmann Shutterstock Dirk Mahler Fraunhofer Group USA IWS Dresden / Fotolia.com Daimler AG Nuclear AMRC IKTS Dresden IWS Dresden / Frank Höhler Finow Automotive GmbH MEV-Verlag James Thew, Fotolia.com Fotolia.com Marcus Wittig adimas, Fotolia.com Fraunhofer IPM, ILT, IST Fraunhofer IOF, FEP TU Dresden, Ulrich van Stipriaan kazoosh.com Dorit Günter DDpix.de, Marcel Quietzsch  Fraunhofer IWS

© Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2015  
Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.