

JAHRESBERICHT
ANNUAL REPORT

2019

2020



ENERGIEN BÜNDELN
FOCUSING ENERGIES



FRAUNHOFER IWS

The Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS Dresden stands for innovations in laser and surface technology. As an institute of the Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., IWS offers one-stop solutions ranging from the development of new processes to implementation into production to application-oriented support. Systems technology development and process simulation complement the core competencies. The business fields of Fraunhofer IWS include PVD and nanotechnology, chemical surface technology, thermal surface technology, additive manufacturing and printing, joining, laser ablation and cutting as well as microtechnology. The competence field of material characterization and testing supports the research activities. At Westsächsische Hochschule Zwickau, IWS runs the Fraunhofer Application Center for Optical Metrology and Surface Technologies AZOM. The Fraunhofer project group at the Dortmunder OberflächenCentrum DOC® is also integrated into the Dresden Institute. The main cooperation partners in the U.S. include the Center for Coatings and Diamond Technologies (CCD) at Michigan State University in East Lansing and the Center for Laser Applications (CLA) in Plymouth, Michigan.

Certified according to ISO 9001:2015

Quality is the cornerstone of our success. We have made it our task to refine our own potential, as well as to establish and keep our partners' and customers' satisfaction at the highest level. For this reason, in 1997 Fraunhofer IWS Dresden introduced a quality management system and this system has been continuously refined and regularly externally certified according to the ISO standard 9001 ever since. This audit is regarded as the basis for working sustainably by means of documented procedures on the domestic and international markets.

DAS FRAUNHOFER IWS

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden steht für Innovationen in der Laser- und Oberflächentechnik. Als Einrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. bietet das Institut Lösungen aus einer Hand – von der Entwicklung neuer Verfahren über die Integration in die Fertigung bis hin zur anwendungsorientierten Unterstützung. Systemtechnikentwicklung und Prozesssimulation ergänzen die Kernkompetenzen. Zu den Geschäftsfeldern des Fraunhofer IWS gehören PVD- und Nanotechnik, Chemische Oberflächentechnik, Thermische Oberflächentechnik, Generieren und Drucken, Fügen, Laserabtragen und -trennen sowie Mikrotechnik. Das Kompetenzfeld Werkstoffcharakterisierung und -prüfung unterstützt die Forschungsaktivitäten. An der Westsächsischen Hochschule Zwickau betreibt das Dresdner Institut das Fraunhofer-Anwendungszentrum für Optische Messtechnik und Oberflächentechnologien AZOM. Die Fraunhofer-Projektgruppe am Dortmunder OberflächenCentrum DOC® ist ebenfalls Teil des Fraunhofer IWS. Die Hauptkooperationspartner in den USA sind das Center for Coatings and Diamond Technologies CCD an der Michigan State University in East Lansing und das Center for Laser Applications CLA in Plymouth, Michigan.

Zertifiziert nach ISO 9001:2015

Qualität ist das Fundament für unseren Erfolg. Wir haben es uns zur Aufgabe gemacht, die eigenen Potenziale weiterzuentwickeln sowie die Zufriedenheit unserer Partner und Kunden auf höchstem Niveau zu etablieren. Deshalb hat das Fraunhofer IWS Dresden bereits 1997 ein Qualitätsmanagementsystem eingeführt, das seither kontinuierlich weiterentwickelt und regelmäßig nach dem ISO-Standard 9001 extern zertifiziert wird. Dies dient als Basis, um anhand dokumentierter Verfahren zukunftssicher am nationalen und internationalen Markt agieren zu können.

JAHRESBERICHT 2019/2020

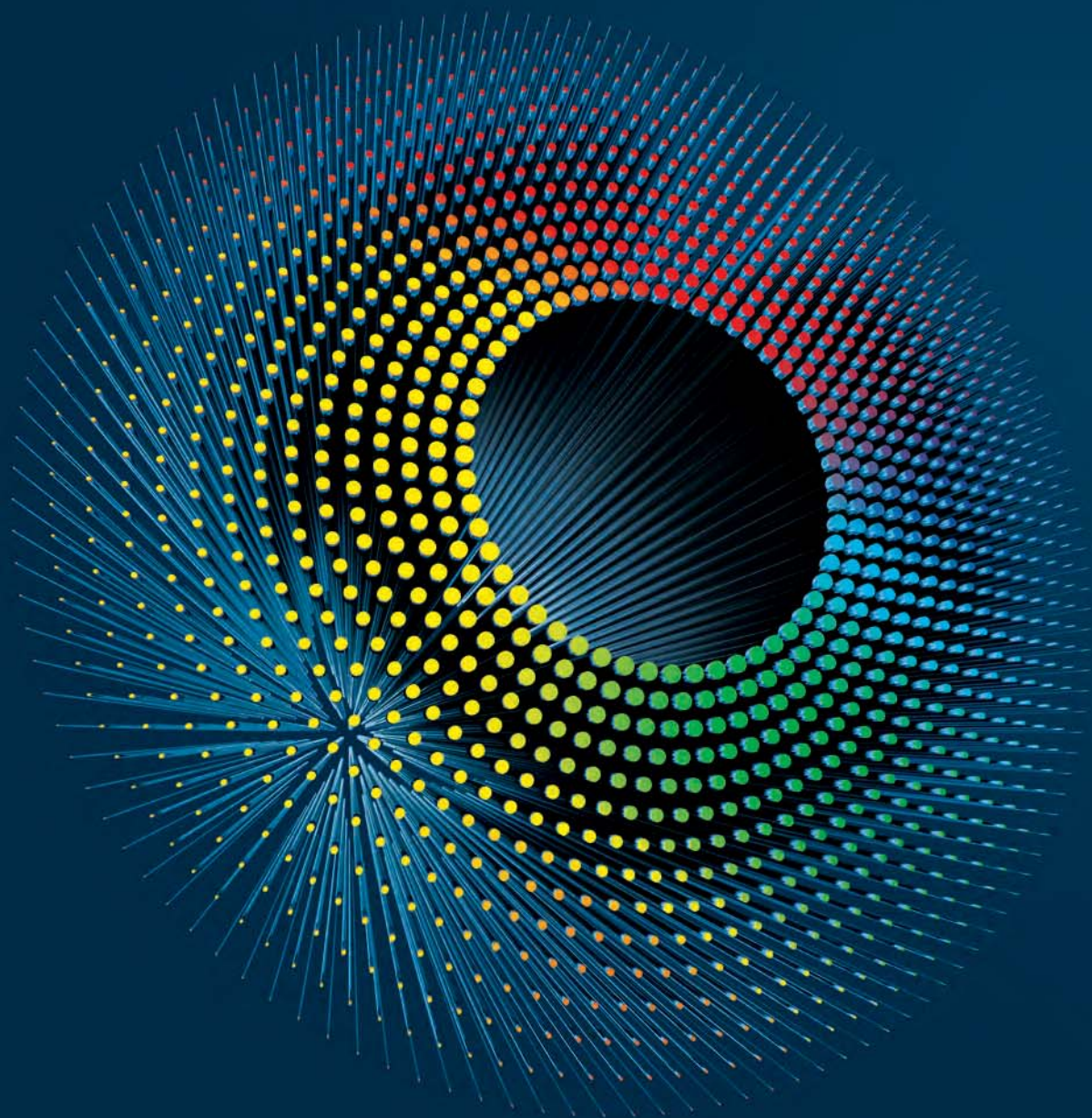
**FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFF- UND
STRAHLTECHNIK IWS**

ANNUAL REPORT 2019/2020

**FRAUNHOFER INSTITUTE FOR MATERIAL AND
BEAM TECHNOLOGY IWS**

INHALT

CONTENTS



DAS FRAUNHOFER IWS

4	Vorwort
8	Kernkompetenzen
10	IWS im Überblick
12	Auszeichnungen und Ehrungen
14	Aus dem Kuratorium
16	Organisation und Ansprechpartner

FRAUNHOFER IWS

Foreword
Core competencies
IWS at a glance
Awards and honors
From the Board of Trustees
Organization and contacts

AUS DEN GESCHÄFTSFELDERN

20	PVD- und Nanotechnik
28	Chemische Oberflächentechnik
36	Thermische Oberflächentechnik
44	Generieren und Drucken
52	Fügen
60	Laserabtragen und -trennen
68	Mikrotechnik
76	Werkstoffcharakterisierung und -prüfung
82	Optische Messtechnik und Oberflächentechnologien

FROM THE BUSINESS UNITS

PVD- and Nanotechnology
Chemical Surface Technology
Thermal Surface Technology
Additive Manufacturing and Printing
Joining
Laser Ablation and Cutting
Microtechnology
Materials Characterization and Testing
Optical Metrology and Surface Technologies

ZENTREN UND NETZWERKE

88	Kooperationspartner
90	Zentren
92	Außenstellen
93	Netzwerke
96	Fraunhofer
97	Impressum

CENTERS AND NETWORKS

Cooperation partners
Centers
Branches
Networks
Fraunhofer
Editorial notes

VORWORT

FOREWORD



Executive Director **Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens**

Ladies and Gentlemen,

Change dominates discourse across all levels. In times of growing complexity in the world and an absence of straightforward answers, we see it as our task to provide the best possible clarity by contributing scientific solutions. Therefore, we are guided by the motto: "Focusing energies". This is to be taken quite literally, since on the one hand we are moving closer together in the IWS community and are joining forces to transfer ideas to industry. On the other hand, the technologies developed and used almost always involve focusing energies.

Our institute is also subject to constant change and we internally set the course for successfully meeting future challenges. To this end, we have launched the "IWSmove" program, with which we strive to realize our vision for 2023. As passionate forerunners, we see ourselves in line with the driving forces of business, ecology and politics, as well as the Fraunhofer-Gesellschaft. In the recent past, for example, we

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

der Wandel beherrscht den Diskurs auf allen Ebenen. In Zeiten, in denen die Komplexität in der Welt zunimmt und es keine einfachen Antworten zu geben scheint, sehen wir es als unsere Aufgabe an, mit wissenschaftlichen Lösungen für bestmögliche Klarheit zu sorgen. Unser Motto lautet daher: »Energien bündeln«. Das ist ganz wörtlich zu nehmen, denn einerseits rücken wir in der IWS-Gemeinschaft zusammen und bündeln unsere Kräfte, um Ideen in die Industrie zu übertragen. Andererseits haben die dabei entwickelten und eingesetzten Technologien fast immer auch etwas mit der Bündelung von Energien zu tun.

Unser Institut unterliegt ebenfalls einem steten Wandel und wir stellen intern die Weichen, um zukünftigen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen. Dafür haben wir das Programm »IWSmove« ins Leben gerufen, mit dem wir dazu ansetzen, unsere Vision für das Jahr 2023 zu realisieren. Als leidenschaftliche Taktgeber sehen wir uns dabei in einer Linie mit den treibenden Kräften aus Wirtschaft, Umwelt und Politik, aber auch der Fraunhofer-Gesellschaft.

So ist es uns in jüngerer Vergangenheit gelungen, uns beim Megathema »Energie« mit unseren Forschungs- und Entwicklungslösungen stark zu positionieren. Egal ob es sich um die Themen Speicherung, Mobilität und Batterie der Zukunft handelt: In Dresden schlägt das Herz der Forschung und Entwicklung kräftig mit. Beispielsweise haben wir im November 2019 mit dem BMBF-Projekt »KaSiLi« gemeinsam mit weiteren Partnern ein Zentrum etabliert, das mit den drei anderen »ExcellBattMat-Zentren« in Münster, München und Ulm kooperieren wird. Unter unserer Federführung wird es als »Hightech-Schmiede« für neue Werkstoffe innerhalb des deutschlandweiten Dachkonzepts »Forschungsfabrik Batterie« agieren. Zusätzlich stellen wir uns dem Wettstreit der Technologien, indem wir mit unseren Entwicklungen nicht nur auf ein Pferd setzen, sondern z. B. auch dazu beitragen möchten, eine neue Generation Brennstoffzellen marktfähig zu entwickeln. Ebenfalls für Klarheit sorgen unsere gebündelten Kräfte beim Thema Digitalisierung, dem wir uns bereits seit einiger Zeit verschrieben haben. Dabei setzen wir uns zum Ziel, die Wirkzusammenhänge zwischen Laserprozessen, Werkstoffgefügen und Bauteileigenschaften quantitativ zu erfassen, um die Qualität digitaler Laserprozesse auf hohem Niveau zu sichern und mit neuartigen Simulationsverfahren die Entwicklungszeit von Hochleistungsbauteilen deutlich zu verkürzen. Eine ebenso wichtige digitale Dimension entfalten unsere »Lab-on-a-chip«-Plattformen, die wir seit einigen Jahren kontinuierlich entwickeln und dem Einsatz für die individualisierte Medizin immer näher bringen.

Sie sehen: Wir setzen uns nach Kräften dafür ein, den Fortschritt als querdenkende Ideentreiber zu beflügeln und klare Antworten auf komplexe Fragen zu finden. Eine Vielzahl spannender und zukunftsfähiger Themen haben wir auch dieses Jahr für Sie zusammengetragen, um Ihnen einen Einblick in unser Institut zu gewähren. Wir wünschen Ihnen eine aufschlussreiche Lektüre!

Herzlichst, | Sincerely,

Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens

have succeeded in strongly positioning ourselves in the energy megatopic with our research and development solutions. Regardless of whether we are talking about storage, mobility or future batteries – Dresden strongly supports the heartbeat of research and development. For example, in November 2019, together with our partners, we launched a center with the BMBF project "KaSiLi", which will cooperate with three further "ExcellBattMat centers" in Münster, Munich and Ulm. Under our leadership, it will act as a "high-tech forge" for the development of new materials as part of Germany's concept "Battery Research Factory". In addition, we are facing the technological competition by focusing our developments not only on a single horse, but also, for example, on contributing to the marketable development of a new generation of fuel cells. Equally, clarity is provided by our combined efforts in the field of digitization, to which we have been committed for some time now. Our goal here is to quantitatively record the causal relationships between laser processes, material structures and component properties in order to ensure the quality of digital laser processes at a high level and to significantly shorten the development time for high-performance components with innovative simulation processes. An equally important digital dimension is unfolded by our "lab-on-a-chip" platforms, which we have been continuously developing for a number of years and which steadily approach application in individualized medicine.

As you can tell, as lateral thinkers we are doing our utmost to inspire progress and to find clear answers to complex questions. This year we have once again compiled numerous exciting and future-oriented topics to give you an insight into our research activities. Enjoy the illuminating read!



DAS FRAUNHOFER IWS

FRAUNHOFER IWS

KERNKOMPETENZEN
CORE COMPETENCIES

IWS IM ÜBERBLICK
IWS AT A GLANCE

AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN
AWARDS AND HONORS

AUS DEM KURATORIUM
FROM THE BOARD OF TRUSTEES

**ORGANISATION
UND ANSPRECHPARTNER**
ORGANIZATION AND CONTACTS

KERNKOMPETENZEN

CORE COMPETENCIES

The transfer of the most recent research results to industry is the primary motivation for our activities, the reason why we have continuously extended our core competencies in the areas below:

LASER MATERIALS PROCESSING

Our laser materials processing competency involves managing integrated value-added chains – from analyzing the component loads and stresses, material use tailored to individual stress requirements and component-related process development up to implementing advanced techniques. IWS research focuses on material and component characteristics, which in turn determine the process and system parameters that establish the basis for equipment design. Process monitoring and control complete the portfolio.

SURFACE TECHNOLOGY

A central task is to improve surface functionality. For this purpose, the IWS offers a wide range of functionalization and coating techniques. This allows us to produce coatings and layers whose thickness ranges from only a few nanometers to some millimeters, made of various materials and combinations. In many cases, researchers have to refine the system hardware, such as the plasma sources, for optimal component treatment or coating.

MATERIALS SCIENCE

Our core expertise includes surface- and interface-treated, as well as coated, welded, cut, and micro- or nano-structured materials and parts characterization. We consider this the foundation for process development and quality assurance tailored to the part and the material. This expertise is also the basis for design that meets material and manufacturing as well as load- and stress-related requirements.

Die Überführung aktueller Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis ist der wesentliche Antrieb für unsere Forschungsarbeiten. Dafür bauen wir auf folgenden Gebieten unsere Kernkompetenzen ständig weiter aus:

LASERMATERIALBEARBEITUNG

Die Kernkompetenz der Lasermaterialbearbeitung umfasst die Beherrschung durchgehender Wertschöpfungsketten von der Analyse der Bauteilbelastung über den beanspruchungsgerechten Werkstoffeinsatz und die bauteilbezogene Verfahrensentwicklung bis hin zur industriellen Umsetzung moderner Verfahren. Werkstoff- und Bauteilverhalten stehen im Vordergrund. Daraus ergeben sich die Prozess- und Systemparameter, die letztlich das Anlagenkonzept bestimmen. Prozessüberwachung und -regelung runden das Portfolio ab.

OBERFLÄCHENTECHNIK

Die Verbesserung der Funktionalität der Oberfläche ist eine zentrale Aufgabe. Dafür steht am IWS ein breites Spektrum an Verfahren zur Funktionalisierung und Beschichtung zur Verfügung. Schichten und Strukturen von wenigen Nanometern bis zu einigen Millimetern Dicke aus unterschiedlichen Materialien und Materialkombinationen können damit hergestellt werden. In vielen Fällen ist für eine optimale Bauteilbehandlung oder -beschichtung die Weiterentwicklung der Systemtechnik (zum Beispiel Plasmaquellen) erforderlich.

WERKSTOFFTECHNIK

Zur Kernkompetenz gehört die Charakterisierung oberflächen- und randschichtbehandelter sowie beschichteter, geschweißter, geschnittener und mikro- beziehungsweise nanostrukturierter Werkstoffe und Bauteile. Dies stellt die Grundlage für die werkstoff- sowie bauteilangepasste Verfahrensentwicklung und Qualitätssicherung sowie für eine werkstoff-, fertigungs- und beanspruchungsgerechte Konstruktion dar.



SYSTEMTECHNIK

Sensorik zur Prozessüberwachung und informationstechnische Vernetzung helfen, die Prozessqualität zu sichern und zu dokumentieren. Die Anpassung der Systemtechnik ist häufig unausweichlich. In Verbindung mit einer Vielzahl von Industrieüberführungen erarbeitete sich das IWS umfangreiche systemtechnische Kompetenz und bringt sein Verfahrens-Know-how bei Entwicklung, Fertigung und Design industrietauglicher integrierbarer Komponenten, Anlagen und Systeme mit der dazugehörigen Software systematisch ein.

DIGITALISIERUNG

Auf allen Forschungsgebieten des Fraunhofer IWS ist die enge Verzahnung von werkstofftechnischem mit prozess- und produktionstechnischem Know-how ein Schlüsselfaktor zur Lösung komplexer Probleme. Die Digitalisierung entlang der gesamten Prozesskette gehört zu den aktuellen Kernherausforderungen. Bei der Weiterentwicklung der Systemtechnik zu volldigitalisierten Systemen steht der Plattformgedanke im Vordergrund. Das IWS bringt dafür seine Kompetenzvielfalt in der Laseranwendung, Oberflächen- und Werkstofftechnik ein.

SYSTEM- UND PROZESSIMULATION

Die Kompetenz in der Simulation erstreckt sich auf die Entwicklung von Simulationsmodulen zur thermischen Oberflächentechnik, zum additiven Fertigen, Schneiden, Schweißen und Vakuumbogenbeschichten sowie auf die Berechnung der optischen Eigenschaften von Nanoschichtsystemen. Kommerzielle Simulationsmodule kommen beim Optimieren der Gas- und Plasmaströmung bei Beschichtungsprozessen und der Lasermaterialbearbeitung zum Einsatz.

SYSTEMS ENGINEERING

Sensors for process monitoring and networking process data contribute to securing and documenting process quality. The modification of systems engineering is often inevitable. Thanks to many transfers to industry, IWS has acquired comprehensive systems engineering expertise and has applied its procedural know-how to the development, manufacturing and design of components, equipment and systems suitable for industry and integration, as well as the necessary software.

DIGITIZATION

Combining materials science with process and production engineering know-how is a key part of solving complex issues in all Fraunhofer IWS research areas. Digitization along the entire process chain is currently our core challenge. We primarily use the platform approach when upgrading system hardware to fully digitized systems. To achieve this, the IWS utilizes its broad expertise in laser application, surface technology and materials science.

SYSTEM AND PROCESS SIMULATION

Our simulation expertise includes not only developing simulation modules for thermal surface technology, additive manufacturing, cutting, welding and vacuum arc coating, but also calculating the nanolayer systems' optical properties. Commercial simulation modules are used to optimize gas and plasma flows during coating procedures and laser materials processing.

IWS IM ÜBERBLICK

IWS AT A GLANCE



Mitarbeiter | Employees

IWS

	Anzahl Number
Wissenschaftler/Ingenieure (TU, FH) Scientists/engineers (TU, FH)	163
Facharbeiter mit techn. oder kaufmänn. Ausbildung Skilled workers with technical or trade-related training	65
Auszubildende Trainees	12
Wissenschaftliche Hilfskräfte Research assistants	138
Stipendiaten und externe Mitarbeiter Scholarship holders and external colleagues	4
Gastwissenschaftler TU Dresden Guest scientists from TU Dresden	41
Gesamt Total	423

A list of all scientific contributions by Fraunhofer IWS published in 2019 is available via the bibliographic database "Fraunhofer-Publica":

<http://publica.fraunhofer.de/institute/iws/2019>

Publikationen | Publications

Art der Publikation | Type of publication

	Anzahl Number
Dissertationen Dissertations	13
Diplomarbeiten Diploma theses	54
Masterarbeiten Master's theses	12
Veröffentlichungen Journal papers	153
Patente (Erstanmeldungen) Patents (first filing)	17
Gesamt Total	249

Eine Liste aller wissenschaftlichen Fraunhofer-IWS-Publikationen aus dem Jahr 2019 stellen wir über die bibliografische Datenbank »Fraunhofer-Publica« unter dem folgenden Link zur Verfügung:

<http://publica.fraunhofer.de/institute/iws/2019>

Aufwendungen | Expenses

Fraunhofer IWS und deutsche Außenstellen 2019 in Mio. €

Fraunhofer IWS and German branches, 2019 (million €)

Personalaufwand Staff	17.5
Sachaufwendungen Material costs	14.4
Investitionen Investments	2.8
Sonderinvestitionen durch Bund, Land und EU Special Investments from federal, state and European sources	0.1
	34.8

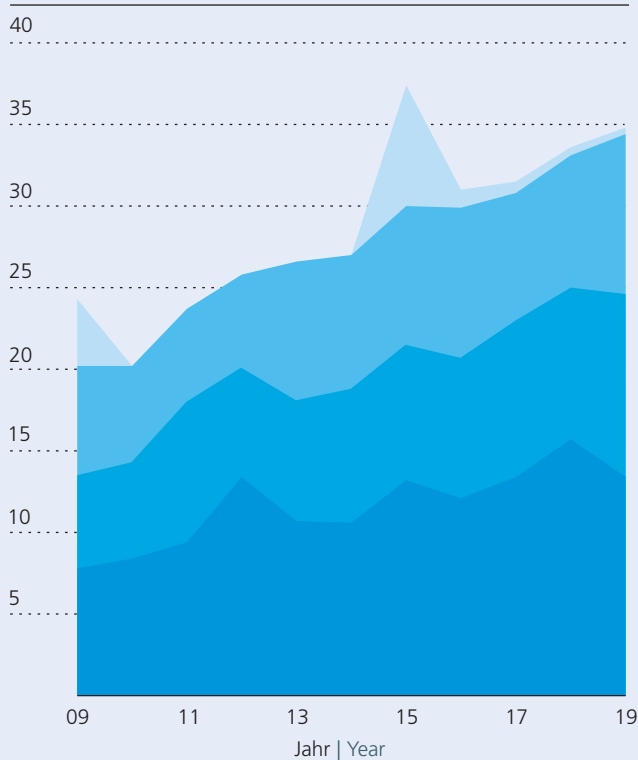
As of January 2020



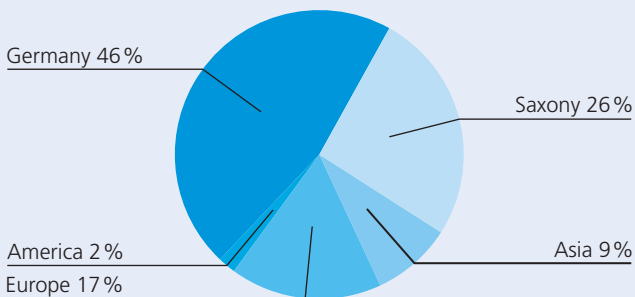
Erträge | Revenues

Fraunhofer IWS und deutsche Außenstellen 2019 in Mio. € | Fraunhofer IWS and German branches, 2019 (million €)

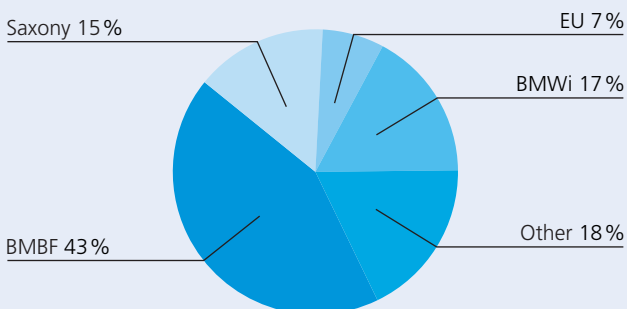
Ertrag / Mio. € | Revenues / million



Herkunft der Industrieerträge | Origin of industrial revenues



Herkunft der öffentlichen Erträge | Public revenues by source



	Betrieb Operation	Investitionen Investments	Gesamt Total
Projekterträge aus der Industrie Project revenues from industry	13.3	0.1	13.4
Projekterträge durch Bund, Land und EU Project revenues from federal, state and European sources	11.0	0.2	11.2
Grundfinanzierung und interne Programme Base funding and Fraunhofer internal programs	7.3	2.5	9.8
Sonderfinanzierung durch Bund, Land und EU Special Investments from federal, state and European sources	0.3	0.1	0.4
	31.9	2.9	34.8

Fraunhofer Industrie ρ_{Ind} | Fraunhofer Industry $\rho_{Ind} = 41.9\%$

As of January 2020

AUSZEICHNUNGEN UND EHRUNGEN

AWARDS AND HONORS

ARGENTINISCHER STAATSPREIS

ARGENTINIAN NATIONAL AWARD

Professor Andrés Lasagni and his twin brother Dr Fernando Lasagni were honored by the Senate of the Argentine Nation with the "Domingo Faustino Sarmiento" award for their outstanding expertise in engineering sciences. A. Lasagni heads the Chair for Laser-Based Methods for Large-Area Surface Structuring at TU Dresden and the Center for Advanced Micro-Photonics (CAMP) at Fraunhofer IWS. He ranks among the leading international experts for laser technology. His brother Fernando Lasagni is Managing Director of the Advanced Center for Aerospace Technologies (CATEC) in Seville, Spain. In his research work Andrés Lasagni focuses on the development of a laser technology enabling different materials to be structured to provide their surfaces with specific functions. Using the direct laser interference technology, he and his team have succeeded in processing various materials at speeds of up to one square meter per minute – a world record.

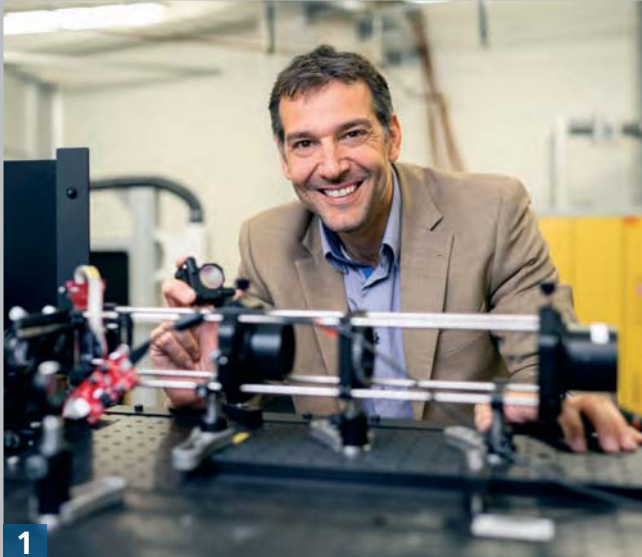
1 Professor Andrés Lasagni received the Argentinian National Prize for his outstanding expertise in the field of engineering science.

Prof. Andrés Lasagni und sein Zwillingsbruder Dr.-Ing. Fernando Lasagni wurden vom Senat der Argentinischen Nation für ihre hervorragenden Leistungen in den Ingenieurwissenschaften mit dem Preis »Domingo Faustino Sarmiento« ausgezeichnet. A. Lasagni leitet die Professur für Laserbasierte Methoden der großflächigen Oberflächenstrukturierung an der TU Dresden und das Center for Advanced Micro Photonics (CAMP) am Fraunhofer IWS. Er gehört zu den international führenden Experten für Lasertechnologie. Sein Bruder Fernando Lasagni ist Geschäftsführer am Advanced Center for Aerospace Technologies (CATEC) im spanischen Sevilla. In seiner Forschungsarbeit konzentriert sich Andrés Lasagni auf die Entwicklung einer Lasertechnologie, die es ermöglicht, verschiedene Materialien so zu strukturieren, dass ihre Oberflächen bestimmte Funktionen erhalten. Mit dem direkten Laserinterferenzverfahren ist es seinem Team und ihm gelungen, verschiedene Materialien mit Geschwindigkeiten von bis zu einem Quadratmeter pro Minute zu verarbeiten – das ist Weltrekord.

CREATE THE FUTURE AWARD

Researchers at Fraunhofer IWS were honored with the "Create the Future Award 2019" in New York City, USA. Annett Klotzbach, Philipp Götze and Maurice Langer were presented with the award in the category Manufacturing/Robotics/Automation for their contribution "High-Speed Joining of Metal to Plastics with the HPCI® Joining Gun". The "Create the Future" design competition was launched in 2002 by the editors of Tech Briefs magazine to promote and reward technical innovation. The awarded IWS process

Forschende des Fraunhofer IWS erhielten den »Create The Future Award 2019« in New York City, USA. Annett Klotzbach, Philipp Götze und Maurice Langer wurden in der Kategorie Manufacturing/Robotics/Automation für Ihre Einreichung »High-Speed Joining of Metal to Plastics with the HPCI® Joining Gun« ausgezeichnet. Der Design-Wettbewerb »Create the Future« wurde 2002 von den Herausgebern der Zeitschrift Tech Briefs ins Leben gerufen, um technische Innovationen zu fördern und zu belohnen. Das prämierte IWS-Verfahren »HeatPressCool-Integrative«



1

(HPCI) eignet sich dazu, aufwändige Klebprozesse zu ersetzen. Eine eigens entwickelte Fügezange verpresst laserstrukturiertes Metall mit thermoplastischen Bauteilen. Es entstehen produktive Lösungen zum stoff- und formschlüssigen Fügen.



2

“HeatPressCool-Integrative” (HPCI) is ideally suited to replace complex bonding processes. A specially developed joining gun presses laser structured metal with thermoplastic components. This results in productive solutions for material and form-fit joining.

2 On behalf of his team, Philipp Götze was honored with the “Create the Future Award 2019”.

INTERNATIONALE EHRUNGEN

INTERNATIONAL AWARDS FOR IWS SCIENTISTS

Auszeichnungen für den globalen Wissens- und Forschungstransfer stellen wichtige Gütesiegel für das Engagement der involvierten Personen dar. Zwei führende Wissenschaftler des Fraunhofer IWS erhielten Ehrungen internationaler Forschungsinstitutionen und festigten so das Renomee des Dresdner Instituts. Gleich zweimal ausgezeichnet wurde Prof. Christoph Leyens, Institutsleiter des Fraunhofer IWS und Direktor des Instituts für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden, von der renommierten RMIT University in Melbourne, Australien, und der University of Waterloo, Ontario, Kanada. Der Dresdner Werkstoffexperte wurde für seine Kooperation in der Additiven Fertigung von beiden Universitäten zum »Adjunct Professor« ernannt. Der Begriff gilt im angelsächsischen Raum als Ehrentitel für externe Wissenschaftler, die in enger Verbindung mit einer Universität stehen und die Betreuung von Doktoranden übernehmen sowie den Studierenden- und Wissenschaftleraustausch fördern. Eine weitere internationale Auszeichnung erhielt Prof. Stefan Kaskel. Der Inhaber der Professur für anorganische Chemie an der TU Dresden und Geschäftsfeldleiter Chemische Oberflächentechnik am Fraunhofer IWS, trägt nun den Titel »Distinguished Visiting Professor«. Die renommierte Pekinger Tsinghua University verlieh ihm diesen aufgrund langjähriger gemeinsamer Arbeiten in der Entwicklung neuer Energiespeicher und Batteriematerialien.

Honors for the global transfer of knowledge and research are important quality seals for the commitment of the people involved. Two leading scientists at Fraunhofer IWS received awards from international research institutions and thus strengthened the reputation of the Dresden institute. Professor Christoph Leyens, Director of Fraunhofer IWS and Director of the Institute for Materials Science at TU Dresden, was even honored twice by the renowned RMIT University in Melbourne, Australia, and the University of Waterloo, Ontario, Canada. The Dresden materials expert was appointed “Adjunct Professor” by both universities for his cooperation in Additive Manufacturing. In the Anglo-Saxon world, the term is considered an honorary title for scientists who are closely associated with a university and who promote the supervision of doctoral students as well as the exchange of students and scientists. Professor Stefan Kaskel received another international award. The head of the Chair of Inorganic Chemistry at TU Dresden and head of the business unit Chemical Surface Engineering at Fraunhofer IWS is now “Distinguished Visiting Professor”. The renowned Tsinghua University in Beijing awarded him this title basing on many years of cooperation in the development of new energy storage and battery materials.

AUS DEM KURATORIUM

FROM THE BOARD OF TRUSTEES

The Board of Trustees consults and supports the institute's management and the Fraunhofer-Gesellschaft bodies. The Board of Trustees held its 29th meeting at Fraunhofer IWS Dresden on 22 March 2019. We thank all trustees of the last reporting period:

Das Kuratorium berät und unterstützt die Institutsleitung sowie die Organe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 29. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 22. März 2019 im Fraunhofer IWS Dresden statt. Wir bedanken uns bei den Kuratorinnen und Kuratoren des vergangenen Berichtszeitraums:

DR. REINHOLD ACHATZ

Chairman of the Board of Trustees; Manager Corporate Function Technology, Innovation & Sustainability thyssenkrupp AG, Essen

DR. ANNEROSE BECK

Head of Division Bund-Länder-Forschungseinrichtungen, Saxon State Ministry for Higher Education, Research and the Arts, Dresden

DR. JOACHIM FETZER

President of Business Unit Electric Energy Management, Calsonic Kansei Corp., Saitama-city/Japan

RALF-MICHAEL FRANKE

CEO Factory Automation, Digital Factory Division, Siemens AG, Nürnberg

THORSTEN FRAUENPREIß

Managing Director of XLase GmbH, Hamburg

DR. ANDREAS HANDSCHUH

Chancellor of the Technische Universität Dresden

PROF. DR. TIM HOSENFELDT

Senior Vice President Technologie Strategie & Innovation, Schaeffler AG, Herzogenaurach

DR. UWE KRAUSE

Karlsruhe Institute of Technology, Project Management Agency Karlsruhe, Production and Manufacturing Technologies, Head of Branch Office Dresden

PETER G. NOTHNAGEL

Head of Structural Development, Division 3, Saxon State Ministry of Economic Affairs, Labour and Transport, Dresden

DR. CHRISTOPH RÜTTIMANN

CTO Bystronic Laser AG, Niederörsz/Schweiz

DR. INGA STOLL

Director Engineering Support Processes (TEP), MTU Aero Engines AG, München

DR. CHRISTOPH ULLMANN

CEO Laserline GmbH, Mülheim-Kärlich

DR. FRANZ-JOSEF WETZEL

BMW Motorrad, UX-EV, München



Das Fraunhofer IWS beansprucht auf den Feldern Werkstoff-, Laser- und Oberflächentechnik eine Führungsrolle in Europa. Eine enge Verzahnung zwischen Prozess- und Werkstoff-Know-how ist dafür Voraussetzung. Diesem hohen Anspruch wird das Institut gerecht, indem es sich mit Technologien zur Lösung aktueller gesellschaftlicher Herausforderungen wie der Energiewende oder neuer Formen der Mobilität beschäftigt. Der Hype um das Thema »Additive Manufacturing« ist einem hilfreichen Realismus gewichen. Nun ist es umso wichtiger, mit fundierten, richtungsweisenden Arbeiten Technologien zu etablieren, die messbaren Mehrwert für die Kunden liefern. Auch »Energiespeicher« werden unmittelbar ein Dauerbrenner bleiben. Die Entwicklung von Technologien zur Batteriezellfertigung ist ein wesentliches Element. In der Mobilität wird aus Fachsicht die Brennstoffzelle eine wichtigere Rolle einnehmen. Neben den batterie-elektrischen Fahrzeugen werden in Zukunft auch immer mehr Brennstoffzellenfahrzeuge auf die Straße kommen. Voraussetzung ist eine Kostendegression, die von Entwicklungen in der Oberflächentechnik angetrieben wird. Auch das Institutsthema Energieeffizienz wird weiter wichtig sein. Die Reduktion von Reibung und die Steigerung der Effizienz von Elektroblechen sind hier gute Beispiele. Hohes Effizienzsteigerungspotenzial liegt zusätzlich in der verstärkten Nutzung cyber-physikalischer Systeme. Die Wissenshoheit über die Kombination von Werkstoffen, Mechanik und Anwendung eingebetteter Softwaresysteme wird auf lange Sicht eine auch im internationalen Kontext wichtige Differenzierung bleiben. Zusätzlich werden die Möglichkeiten maschinellen Lernens neue Nutzungspotenziale eröffnen. Der wissenschaftliche Erfolg und die gute Auslastung des Instituts zeigen, dass das Fraunhofer IWS auf einem guten Weg ist, den das Kuratorium gerne begleitet. Es dankt den Kunden für ihr entgegengebrachtes Vertrauen und allen weiteren Beteiligten und Partnern für das gezeigte Engagement, die gute Zusammenarbeit und die erreichten Ergebnisse.

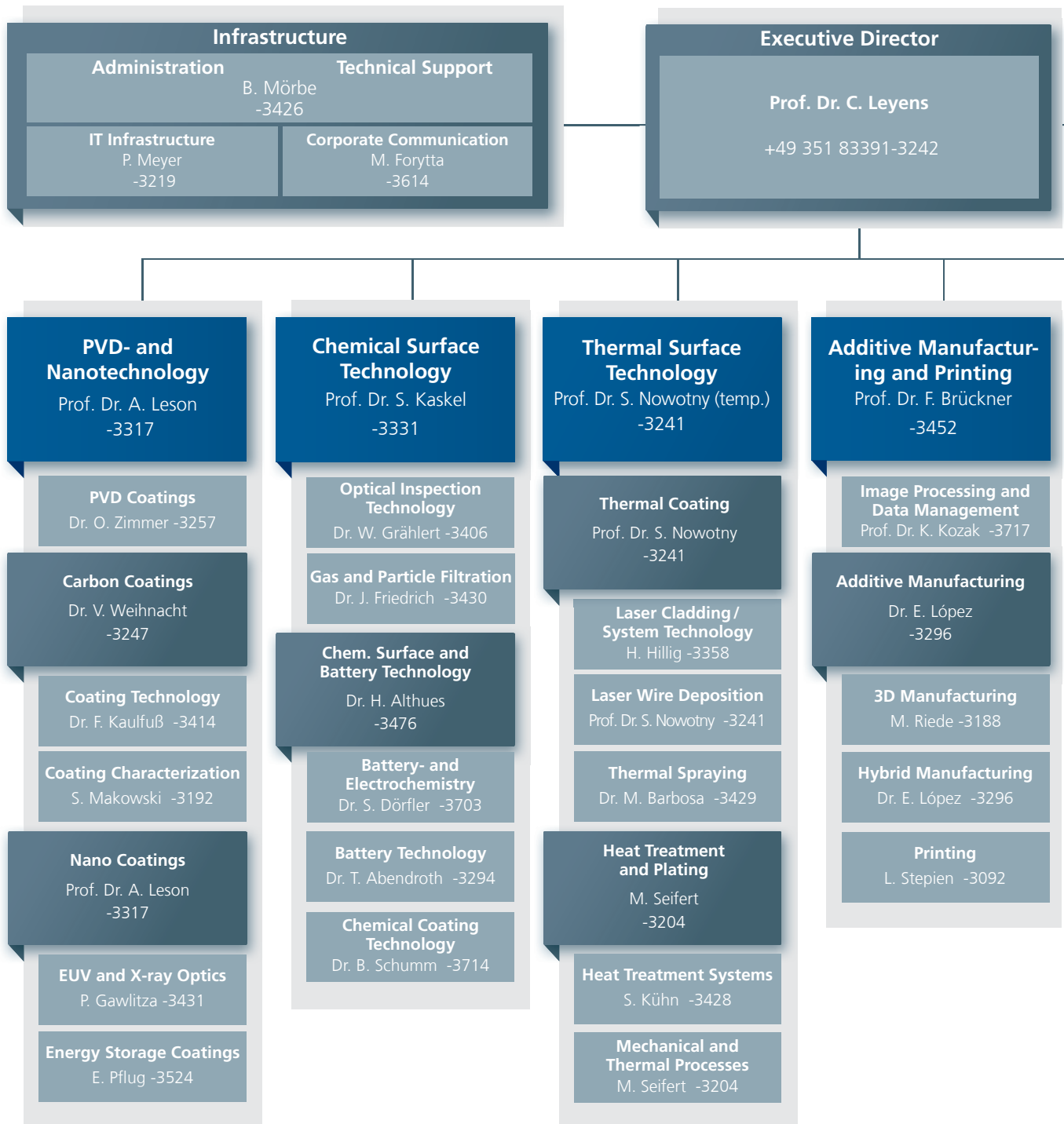
Herzlichsts | Sincerely

Dr.-Ing. Reinhold Achatz

Fraunhofer IWS claims a European leading position in the fields of materials, laser and surface technology. This is based on a close interaction between process and materials know-how. The institute meets this high standard by focusing on technologies to solve current societal challenges such as the energy turnaround or new forms of mobility. The hype surrounding the topic of "additive manufacturing" has given way to a helpful realism. Now it is all the more important to establish technologies that deliver measurable added value for customers by profound, trend-setting work. Energy storage systems will also remain an ongoing topic in the near future. Here, the development of technologies for battery cell production is one of the key elements. From a technical perspective, the fuel cell will play a more significant role in mobility. Alongside to battery electric vehicles, progressively fuel cell vehicles will be coming onto the road. This requires cost reductions driven by developments in surface technology. The institute's focus on energy efficiency will also continue to be important. In this context, reducing friction or increasing the efficiency of electrical steel sheets are prime examples. The increased use of cyber-physical systems provides additional benefits for increasing efficiency. In the long term, the knowledge sovereignty over the combination of materials, mechanics and the application of embedded software systems will remain an important source of distinction, also in an international context. In addition, machine learning will unlock new potential applications. The institutes' success and its good workload show that the IWS, guided by the Board of Trustees is forging a sustainable path. The Board would like to thank the customers for their confidence and all other stakeholders as well as partners for their commitment, their good cooperation and the achieved results.

ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER

ORGANIZATION AND CONTACTS



External Project Groups

AZOM – Zwickau
Prof. Dr. P. Hartmann +49 375 536-1538

DOC® – Dortmund
Dr. T. Roch +49 231 844-3512

Cooperation Partners

PC Wrocław – Poland
Prof. Dr. E. Chlebus
+48 713200-2705

Laser Integrated Manufacturing
Prof. Dr. K. Kozak
-3717

CCL-Group – USA
Prof. Dr. C. Leyens
+49 351 83391-3242

CLA Laser Applications
C. Bratt
+1 734 738-0550

CCD Coatings and Diamond Techn.
Prof. Dr. T. Schülke
+1 517 432-8709

Joining

Dr. J. Standfuß
-3212

Bonding and Composite Technology
A. Klotzbach -3235

Special Joining Technologies
Dr. S. Schulze -3565

Laser Beam Joining

Dr. A. Jahn
-3237

Laser Beam Welding
Dr. D. Dittrich -3228

Component Design
Dr. A. Jahn -3237

Laser Ablation and Cutting

Dr. A. Wetzig
-3229

Laser Cutting
Dr. P. Herwig -3199

Process Design and Analysis
Dr. A. Mahrle -3407

High Speed Laser Processing

Dr. J. Hauptmann
-3236

Laser Cutting of Non-Metals
Dr. J. Hauptmann -3236

Laser Systems Engineering
P. Rauscher -3012

Microtechnology

Dr. U. Klotzbach
-3252

Micro Materials Processing
V. Franke -3254

Micro- and Biosystems Engineering
Dr. F. Sonntag -3259

Surface Functionalization
Dr. T. Kunze -3661

IWS Centers

Battery Research Center
Dr. H. Althues -3476

Tailored Joining Center
Dr. J. Standfuß -3212

Additive Manufacturing Center Dresden AMCD
Prof. Dr. F. Brückner -3452

Center for Advanced Micro Photonics CAMP
Dr. U. Klotzbach -3252
Prof. Dr. A. Lasagni -3007

Competence Field Materials Characterization and Testing

Prof. Dr. M. Zimmermann
-3573

Materials and Failure Analysis
Dr. J. Kaspar -3216

Materials and Component Reliability
R. Kühne -3156



AUS DEN GESCHÄFTSFELDERN

FROM THE BUSINESS UNITS

PVD- UND NANOTECHNIK

PVD- AND NANOTECHNOLOGY

CHEMISCHE OBERFLÄCHENTECHNIK

CHEMICAL SURFACE TECHNOLOGY

THERMISCHE OBERFLÄCHENTECHNIK

THERMAL SURFACE TECHNOLOGY

GENERIEREN UND DRUCKEN

ADDITIVE MANUFACTURING AND PRINTING

FÜGEN

JOINING

LASERABTRAGEN UND -TRENNEN

LASER ABLATION AND CUTTING

MIKROTECHNIK

MICROTECHNOLOGY

WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG

MATERIAL CHARACTERIZATION AND TESTING

FRAUNHOFER-ANWENDUNGSZENTRUM FÜR OPTISCHE MESSTECHNIK UND OBERFLÄCHENTECHNOLOGIEN

FRAUNHOFER APPLICATION CENTER FOR OPTICAL
METROLOGY AND SURFACE TECHNOLOGIES

PVD- UND NANOTECHNIK

PVD- AND NANOTECHNOLOGY

Business unit manager

Prof. Dr. Andreas Leson

+49 351 83391-3317

andreas.leson@iws.fraunhofer.de



Division manager Nano Coatings

Prof. Dr. Andreas Leson

+49 351 83391-3317

andreas.leson@iws.fraunhofer.de



Division manager Carbon Coatings

Dr. Volker Wehnacht

+49 351 83391-3247

volker.wehnacht@iws.fraunhofer.de



Group manager EUV- and X-ray Optics

Dipl.-Phys. Peter Gawlitza

+49 351 83391-3431

peter.gawlitza@iws.fraunhofer.de



Group manager Coating Technology

Dr. Frank Kaulfuß

+49 351 83391-3414

frank.kaulfuss@iws.fraunhofer.de



Group manager Energy Storage Coatings

Dipl.-Ing. Erik Pflug

+49 351 83391-3524

erik.pflug@iws.fraunhofer.de



Group manager Coating Characterization

Dipl.-Ing. Stefan Makowski

+49 351 83391-3192

stefan.makowski@iws.fraunhofer.de



Group manager PVD Coatings

Dr. Otmar Zimmer

+49 351 83391-3257

otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de



THE BUSINESS UNIT

The PVD- and nanotechnology business unit stands for unique surfaces. It develops and researches techniques to produce various coatings and layer systems based on physical deposition techniques. The solutions are suitable for a wide variety of applications. Researchers focus on creating and utilizing super-hard carbon coatings, which are characterized by their wear resistance and low friction. In addition to tribological properties, the focus is increasingly on functional properties: Due to simulation methods and specialized design it is possible to optimize coating systems for specific applications. In addition, the business unit specializes in fabricating extremely precise multilayers that are deposited with atom-level precision. Scientists are also developing hard coatings with thicknesses of up to 100 micrometers in order to enhance machine components' and tools' resistance and durability. The research spectrum also includes the development of the corresponding plant technology.

DAS GESCHÄFTSFELD

Das Geschäftsfeld PVD- und Nanotechnik steht für einzigartige Oberflächen. Entwickelt und erforscht werden Verfahren zur Herstellung unterschiedlicher Schichten und Systeme auf Basis physikalisch gestützter Abscheidungsverfahren. Die Lösungen eignen sich für verschiedenste Anwendungen. Der Fokus liegt auf der Herstellung und Anwendung extrem harter Kohlenstoffschichten mit hoher Verschleißbeständigkeit und geringer Reibung. Zunehmend rücken neben tribologischen auch funktionelle Eigenschaften ins Blickfeld: Simulationsverfahren und spezialisiertes Design ermöglichen für den Anwendungsfall optimierte Schichtsysteme. Zusätzlich wird die Herstellung höchstpräziser Multischichten erforscht, die atomar exakt abgeschieden werden. Ebenso entwickeln die Wissenschaftler Hartstoffschichten mit Dicken von bis zu 100 Mikrometern, um die Widerstandsfähigkeit und Haltbarkeit von Maschinenkomponenten oder Werkzeugen zu erhöhen. Außerdem gehört die Entwicklung der jeweils zugehörigen Anlagentechnik zum Forschungsspektrum.



HIGHLIGHT

Superhart, effizient und wirtschaftlich

Die Zukunft der Mobilität wird im Vergleich zu heute aller Voraussicht nach deutlich vielfältiger werden und auf verschiedenen Antriebskonzepten beruhen. Ob Verbrennungsmotor, synthetische Kraftstoffe oder auf Wasserstoff bzw. Batterie basierende Antriebe – für alle Konzepte gilt gleichermaßen, dass sie zur erfolgreichen Umsetzung die Kriterien der Langzeitstabilität und der effizienten Energieausnutzung in vollem Umfang erfüllen müssen. Diamantähnliche Kohlenstoffschichten (DLC-Schichten) können hierzu einen maßgeblichen Beitrag leisten, da sie sich durch eine hohe Härte und damit hohe Verschleißfestigkeit sowie vergleichsweise niedrige Reibungskoeffizienten auszeichnen. Insbesondere die wasserstofffreien Kohlenstoffschichten, die sogenannten ta-C-Schichten, zeichnen sich durch hervorragende technische Kennwerte aus. Für die Abscheidung solcher Schichten eignet sich besonders die am Fraunhofer IWS entwickelte Laser-Arc-Technologie aufgrund ihrer hohen Produktivität und Langzeitstabilität. Gemeinsam mit dem Anlagenbauer VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH sowie der Federal-Mogul Burscheid GmbH, beides Unternehmen der Tenneco-Gruppe, einem der weltweit führenden Anbieter von Antriebsstrangkomponenten, wurden auch 2019 mehrere Beschichtungsanlagen in die Serienproduktion überführt. Dort werden sie erfolgreich für die Beschichtung von Kolbenringen eingesetzt. Diese zeigen eine extreme Dauerfestigkeit sowie deutlich reduzierte Reibungsverluste und tragen somit zu einer Verringerung des CO₂-Ausstoßes bei. Die Schichten der IWS-Ingenieure eignen sich aber nicht nur für Kolbenringe: Praktisch alle bewegten Teile kommen für eine Beschichtung in Frage, um die Reibungsvorteile zu nutzen. Etliche Komponenten haben sich bereits in der Praxis bewährt und befinden sich auf dem Weg zur Serieneinführung.

HIGHLIGHT

Super hard, efficient and economic

The future of mobility is likely to be much more diverse than it is today and will be based on different drive concepts. Whether combustion engines, synthetic fuels or drives based on hydrogen or batteries – all concepts must meet the criteria of long-term stability and efficient energy utilization in full if they are to be successfully implemented. Diamond-like carbon coatings (DLC coatings) can play a crucial role in this context, as they are characterized by high hardness and thus wear resistance as well as comparatively low friction coefficients. In particular, the hydrogen-free carbon layers, the so-called ta-C layers, reveal outstanding technical characteristics. The laser arc technology developed at Fraunhofer IWS is particularly suitable for the deposition of such layers due to its high productivity and long-term stability. In 2019, several coating systems were transferred to series production together with VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH and Federal Mogul Burscheid GmbH, both companies of the Tenneco Group, one of the world's leading providers of powertrain components. The systems are now being successfully used for the coating of piston rings. These show extreme durability and significantly reduced friction losses, thus contributing to a reduction in CO₂ emissions. However, the IWS coatings are not only suitable for piston rings: virtually any moving part can be coated to benefit from these friction advantages. A number of components have already proved successfully in practice and are currently on their way to series production.

1 *ta-C-coated piston rings have a significantly longer service life and reduce CO₂ emissions.*

AUTOMATISIERTES REAKTIVES FÜGEN ELASTOMERBASIERTER HOHLRAUMDICHTUNGEN

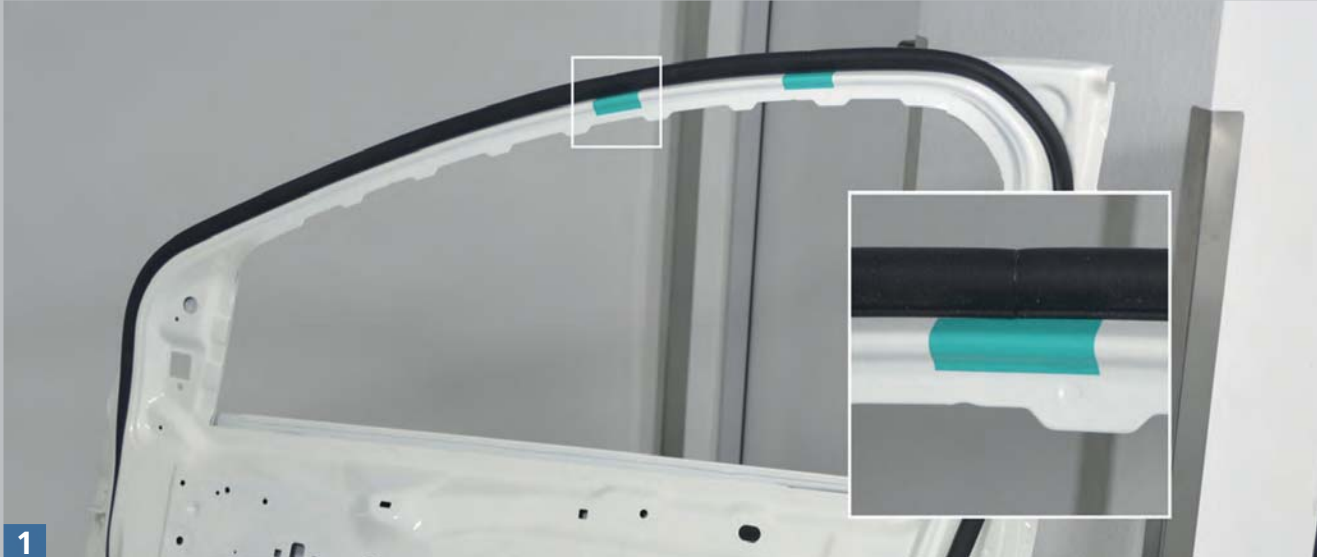
AUTOMATED REACTIVE JOINING OF ELASTOMER-BASED CAVITY SEALS

Elastomer-based cavity profiles are widely used in industry to seal passenger cabins. Here, an efficient and cost-effective process for joining ethylene-propylene-diene rubber profiles (EPDM) plays a major role. As part of a Sächsische Aufbaubank (SAB) project, scientists at Fraunhofer IWS developed a semi-automated joining process for various procedures meeting all joining demands of end users.

The development of an efficient process for joining ethylene-propylene-diene rubber profiles (EPDM) creates challenges for the automotive industry. The challenge is to develop material-locking joining technologies suitable for butt joints in automated production and to reduce process time and costs. As an alternative to the state of the art solutions based on cyanoacrylate, Fraunhofer scientists have researched adhesive systems and combined bonding and thermal joining processes employing reactive multilayer systems (RMS). RMS consist of a nano-laminate of two reactive materials which generate an exothermic reaction via activation energy and release a precisely defined amount of heat within a very short time. The scientists applied this effect to locally soften the EPDM and to melt a thermoplastic additive material in order to achieve joints between cavity profiles. They melted the foils using integrated RMS as well as thermal radiation or convection. All joints met the end-user demands for mechanical strength under room conditions and alternating climatic loads. In cooperation with the project partner ATN Hölzel GmbH, Fraunhofer IWS has also successfully implemented a semi-automated joining system with PLC control for all these processes.

Der Einsatz elastomerbasierter Hohlraumprofile zum Abdichten von Fahrgasträumen ist industriell weit verbreitet. Ein effizienter und kostengünstiger Fügeprozess zum Verbinden von Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk-Profilen (EPDM) spielt dabei eine große Rolle. Innerhalb eines SAB-Projekts entwickelten Wissenschaftler des Fraunhofer IWS einen teilautomatisierten Fügeprozess für verschiedene Verfahren, die zudem sämtliche Verbindungsanforderungen der Endanwender erfüllten.

Die Entwicklung eines effizienten Fügemechanismus zum Verbinden von Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk-Profilen (EPDM) stellt eine Herausforderung in der Automobilbranche dar. Dabei gilt es, stoffschlüssige Fügetechnologien zu entwickeln, die sich für Stoßfügen in der automatisierten Fertigung eignen und Prozesszeit sowie -kosten reduzieren. Alternativ zur bisherigen Lösung auf Basis von Cyanacrylat haben Fraunhofer-Wissenschaftler Klebstoffsysteme sowie eine Kombination aus Kleben und thermischem Fügen mittels reaktiver Multischichtsysteme (RMS) erforscht. RMS bestehen aus einem Nanolaminat zweier reaktiver Materialien, die über eine Aktivierungsenergie eine exotherme Reaktion ausbilden und innerhalb kürzester Zeit eine präzise definierte Wärmemenge freisetzen. Diesen Effekt wendeten die Forscher zum lokalen Erweichen des EPDM sowie zum Aufschmelzen eines thermoplastischen Zusatzmaterials an, um somit Fügungen zwischen Hohlraumprofilen zu realisieren. Mithilfe thermoplastischer Folien konnten sie EPDM-Verbindungen über die Stirnseite des Hohlraumprofils herstellen. Dabei schmolzen die Wissenschaftler die genannten Folien sowohl mittels RMS als auch per Wärmestrahlung oder Konvektion auf. Alle Verbindungen erfüllten die Anforderungen



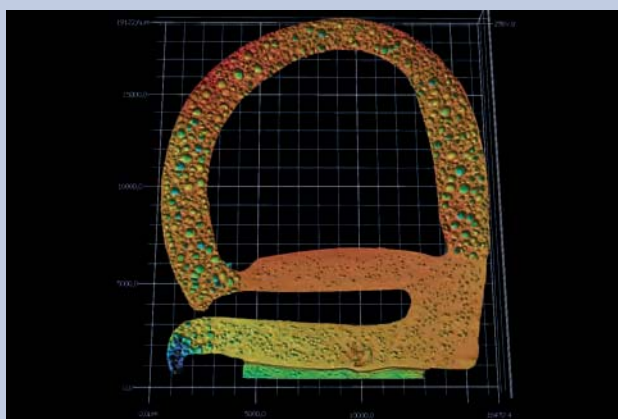
1

der Endanwender bezüglich mechanischer Festigkeit unter Raumbedingungen sowie bei klimatischer Wechsellast. Für eine industrielle Umsetzung hat das IWS in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ATN Hölzel GmbH zudem erfolgreich eine teilautomatisierte Fügevorrichtung mit SPS-Ansteuerung für alle genannten Verfahren realisiert. Im Gegensatz zur konventionellen Fügemethode sowie zur Wärmestrahlung bzw. Konvektion bietet der RMS-Fügeprozess den Vorteil präzise dosierbarer und schneller Erwärmung. Innerhalb weniger Sekunden entsteht auf diese Weise eine materialschonende und feste Verbindung. In gleicher Zeit lassen sich somit bis zu viermal höhere Stückzahlen erzielen. Dass sich EPDM-Hohlraumprofile zielführend und effektiv verbinden lassen, zeigten die Projektpartner mit den entwickelten Fügeverfahren anhand von Autotürgummidichtungen.

In contrast to conventional joining methods as well as to heat radiation and convection, the RMS joining process offers the advantage of a precisely adjustable and fast heating. Within a few seconds, a material-saving and firm joint is generated. Quantities up to four times as high can be achieved in the same time. EPDM cavity profiles can be joined successfully, as the project partners demonstrated with the developed joining technologies for car door rubber seals.

1 *Joined elastomer-based cavity seal of a car door using reactive joining or thermal direct joining.*

Surface profile of the elastomer-based cavity seal



The EPDM cavity profile consists of two joining segments which differ in their surface condition. The semi-circular sponge rubber or cellular rubber area shows a capillary state, whereas the web-like solid rubber is dimensionally stable and dense. The real effective joining surface was determined by laser scanning microscopy with approx. 62 mm².

CONTACT

Dipl.-Ing. Erik Pflug
 Energy Storage Coatings
 +49 351 83391-3524
 erik.pflug@iws.fraunhofer.de



SUPRANIEDRIGE REIBUNG MIT SUPERHARTEN SCHICHTEN

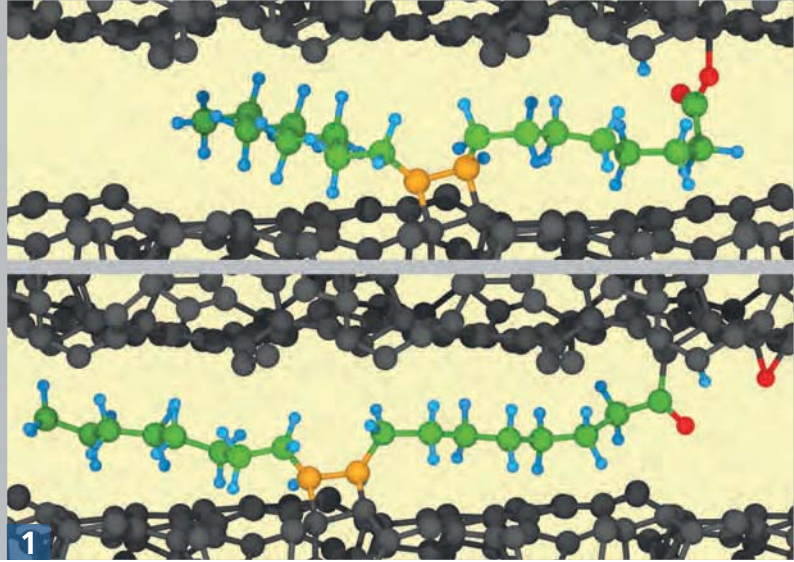
SUPER LOW FRICTION WITH SUPER HARD COATINGS

Every power transmission results in energy losses due to friction. For many years, research and industry have been focusing on reducing these losses as far as possible. The theoretical minimum is the so-called "superlubricity" with friction coefficients close to zero ($\mu < 0.01$). If, for example, it were possible to reduce friction in automotive engines and transmissions in this way, annual global CO₂ emissions would be reduced by several hundred million tons.

In cooperation with Fraunhofer IWM, Fraunhofer IWS has taken an important step towards the future vision of super-low friction. In the PEGASUS II project, funded by the Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi), researchers from both institutes discovered an atomic superlubricity mechanism. The prerequisite for this effect are special diamond-like, hydrogen-free, tetrahedral amorphous carbon coatings (short: ta-C). A special PVD process, the laser-assisted pulse-vacuum arc, was developed at the IWS for the deposition of these coatings. An integrated plasma filtering system enables thick ta-C coatings to be produced on an industrial scale. The deposited films belong to superhard materials, thus predestining them for use as wear protection layers. The friction tests on the ta-C-coated steel samples showed a clear correlation between the friction reductions achieved and the functionalities of lubricant molecules: while the friction is highest with octadecane, friction is extremely reduced in the case of lubricants with two or three reactive centers. With oleic acid and glycerol, the friction even drops to the level of superlubricity. Atomistic simulations at Fraunhofer IWM demonstrated that this relationship can be explained by

Bei jeder Kraftübertragung entstehen Energieverluste durch Reibung. Diese weitestgehend zu reduzieren steht seit vielen Jahren im Fokus von Forschung und Industrie. Das theoretische Minimum bildet die sogenannte »Supraschmierung« mit Reibwerten nahe null ($\mu < 0,01$). Würde es etwa gelingen, die Reibung in Fahrzeugmotoren und -getrieben derart zu vermindern, säne der jährliche globale CO₂-Ausstoß um viele Hundert Millionen Tonnen.

Der Zukunftsvision der supraniedrigen Reibung ist das Fraunhofer IWS in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWM einen wichtigen Schritt nähergekommen. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanzierten Projekt PEGASUS II deckten Forscher beider Institute einen atomaren Supraschmiermechanismus auf. Die Voraussetzung für diesen Effekt bilden spezielle diamantartige, wasserstofffreie tetraedrisch amorphe Kohlenstoffschichten (kurz: ta-C). Diese Schichten werden mit einem besonderen, am IWS entwickelten PVD-Verfahren, dem lasergestützten Puls-Vakuumbogen-Verfahren (Laser-Arc), abgeschieden. Eine integrierte Plasmafilterung ermöglicht es, dicke ta-C-Schichten auf industriellem Niveau herzustellen. Die abgeschiedenen Schichten zählen zu den superharten Materialien, was sie für den Einsatz als Verschleißschutzschichten prädestiniert. Die Reibungsuntersuchungen an den ta-C-beschichteten Stahlproben zeigten einen klaren Zusammenhang zwischen der erzielten Reibungsreduzierung und den Funktionalitäten von Schmierstoffmolekülen: Während bei Oktadekan die Reibung am höchsten ist, wird mit den Schmierstoffen mit zwei oder drei Reaktivzentren die Reibung extrem gesenkt. Mit Ölsäure und Glycerin sinkt



die Reibung sogar auf das Niveau der Supraschmierung. Atomistische Simulationen am Fraunhofer IWM zeigten, dass sich dieser Zusammenhang durch eine mechano-chemische Schmierstoff-Fragmentierung an den Reaktivzentren erklären lässt. Die Fragmente werden in der ta-C-Oberfläche integriert und bilden eine graphenartige Oberfläche. Alle Ergebnisse der Studie werden in der Zeitschrift Nature Communications, Ausgabe 10/2019, präsentiert. Mit diesem Wissen beginnt nun die Suche nach geeigneten technischen Schmierstoffen, um die Supraschmierung mit ta-C-Schichten in die Anwendung zu übertragen.

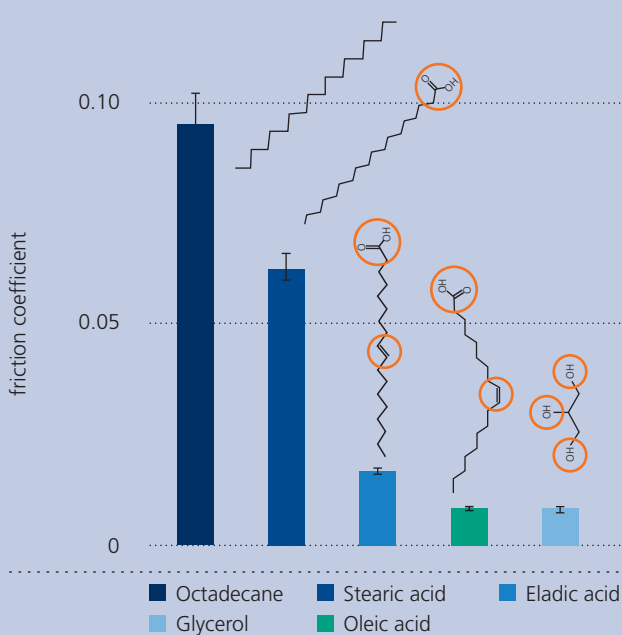
mechano-chemical lubricant fragmentation at the reactive centers. The fragments are integrated into the ta-C surface and form a graphene-like lubricating surface. The results of the study are published in Nature Communications 10/2019. Building on this knowledge, the next step is to search for suitable technical lubricants in order to transfer the superlubricity with ta-C coatings into the application.

DOI: doi.org/10.1038/s41467-018-08042-8

1 Oleic acid (colored) forms chemical bonds with both ta-C surfaces (black). Movement causes the oleic acid to pull, a hydroxyl group splits off and superlubricity is formed.

Funded by  Federal Ministry for Economic Affairs and Energy
FKZ: 03ET1187B

A ta-C coated steel pin oscillates on a ta-C coated steel disc



The friction intensity depends significantly on the number of lubricant reactive centers (orange circles).

CONTACT

Dr. Volker Weihnacht
Carbon Coatings
+49 351 83391-3247
volker.weihnacht@iws.fraunhofer.de



HOCHENTROPIELEGIERUNGEN ALS NEUARTIGE VERSCHLEISSCHUTZBESCHICHTUNGEN?

HIGH ENTROPY ALLOYS AS INNOVATIVE WEAR PROTECTION COATINGS?

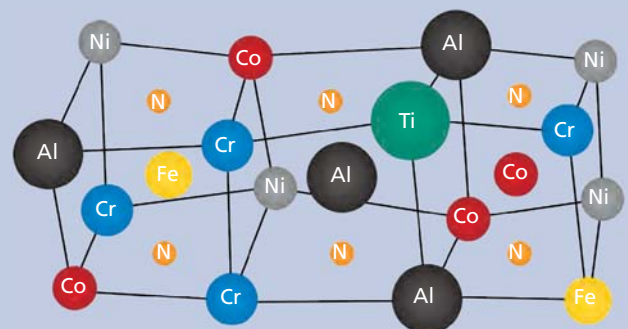
Wear-resistant coatings based on classic nitride materials improve the performance of cutting tools, but are increasingly reaching application limits. Fraunhofer IWS researchers are currently analyzing novel metal-nitrogen materials for particularly resistant wear protection.

The material class of high-entropy alloys is increasingly attracting scientific interest. They usually consist of five or more chemical elements randomly distributed in the atomic lattice, which appear almost equimolar in the material. An essential feature of this material class lies in the combination of high hardness and strength, good wear resistance and thermal stability. In addition, some systems also exhibit good corrosion resistance, which particularly qualifies them for technical applications in wear, corrosion and diffusion protection. So far, the use of high-entropy alloys and their coating systems has occupied a subordinate importance in industry. Fraunhofer IWS researchers are aiming to change this trend through the use of modern PVD technologies and materials analysis, and to qualify novel protective coatings for application. Coatings based on niobium-titanium-vanadium-zirconium-molybdenum nitrogen (NbTiVZrMoN) are deposited by means of a vacuum arc process in a nitrogen atmosphere in order to adjust the structure. In addition to the study of the coating process' stability and the abrasion behavior of the cathodes used, the coatings are also fundamentally analyzed with regard to their chemical-physical and mechanical properties. The microstructure analysis shows single-phase materials as they are typical for high-entropy alloys. Current work has shown that, compared to

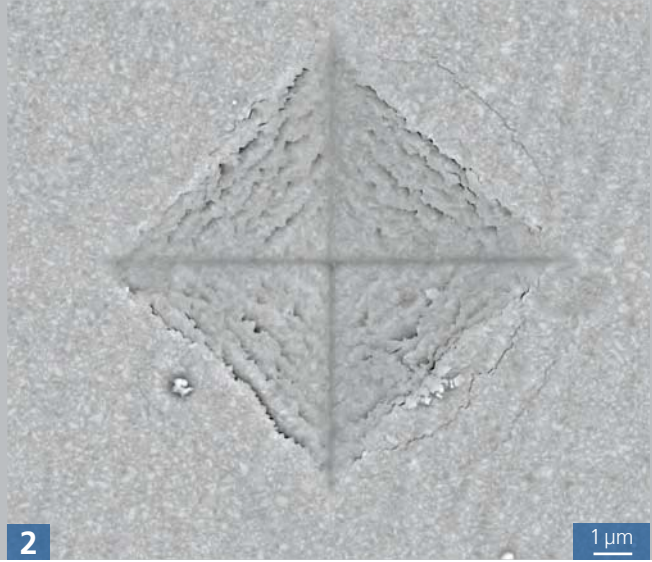
Verschleißschichtungen auf Basis klassischer nitridischer Materialien verbessern die Leistungsfähigkeit von Zerspanwerkzeugen, stoßen aber zunehmend an die Grenzen der Einsatzfähigkeit. Forscher am Fraunhofer IWS untersuchen aktuell neuartige Metall-Stickstoff-Werkstoffe zum Einsatz für besonders widerstandsfähigen Verschleißschutz.

Die Materialklasse der Hochentropielegierungen gewinnt zunehmend an wissenschaftlichem Interesse. Sie besteht zumeist aus fünf oder mehr zufällig im Atomgitter verteilten chemischen Elementen, die nahezu äquimolar im Material vertreten sind. Eine wesentliche Besonderheit dieser Materialklasse liegt in der Kombination hoher Härte und Festigkeit, guter Verschleißbeständigkeit sowie thermischer Stabilität. Zudem weisen einige Systeme auch eine gute Korrosionsbeständigkeit auf, was sie

Lattice structure of high entropy alloys



Schematic diagram of a high entropy alloy of niobium, titanium, vanadium, zirconium, molybdenum and nitrogen. This material system can offer high hardness in combination with high toughness.



interessant für die technische Anwendung im Verschleiß-, Korrosions- und Diffusionsschutz machen kann. Bisher spielte die Anwendung von Hochentropielegierungen und deren Schichtsystemen in der Industrie eine untergeordnete Rolle. Das wollen Forscher am Fraunhofer IWS durch den Einsatz moderner PVD-Technologien sowie Werkstoffanalytik ändern und neuartige Schutzschichten fit für ihren Einsatz machen. Schichten auf Basis von Niob-Titan-Vanadium-Zirkonium-Molybdän-Stickstoff (NbTiVZrMoN) werden mit dem Vakuumlichtbogenverfahren unter einer Stickstoffatmosphäre abgeschieden, um die Struktur einzustellen. Neben der Stabilität des Beschichtungsprozesses und dem Abtragsverhalten der eingesetzten Kathoden erfolgt auch eine grundlegende Charakterisierung der Schichten hinsichtlich ihrer chemisch-physikalischen sowie mechanischen Eigenschaften. Die Gefügeanalyse ergibt einphasige Materialien, wie sie typisch für Hochentropielegierungen sind. Im Vergleich zu herkömmlichen Titanitrid-Schichten entstehen deutlich rissunempfindlichere Hochentropielegierungen, wie die aktuellen Arbeiten zeigen. Bemerkenswert ist deren vergleichbare Härte. Die in den Vickers-Eindrücken erkennbaren Rissnetzwerke stellen dabei ein Maß für die Zähigkeit dar. Aufbauend auf diesem Ergebnis sollen möglichst hochbelastbare und mechanisch stabile Verschleißschutzschichten entwickelt werden. Einsatz können solchen Schichten in Zukunft bspw. auf Zerspanungswerkzeugen finden. Gleichzeitig lassen sich die entwickelten Verschleißschutzschichten bei höheren Prozesstemperaturen einsetzen, um das Anwendungsspektrum deutlich zu erweitern.

conventional titanium nitride coatings, high-entropy alloys are much less susceptible to cracking. Their comparable hardness is particularly remarkable. The crack networks visible in the Vickers indentations provide a measure of their ductility. Based on this result, wear-resistant coatings with the highest possible mechanical strength are to be developed. Such coatings can be used in future, for example, on cutting tools. In addition, the developed wear-resistant coatings can be operated at higher process temperatures in order to significantly expand the range of their applications.

- 1 *Vickers indentation of an NbTiVZrMoN coating with weak crack network.*
- 2 *Vickers hardness indentation of a TiN coating with pronounced crack network.*

CONTACT

Dipl.-Ing. Tim Krülle
 Coating Technology
 +49 351 83391-3179
 tim.kruelle@iws.fraunhofer.de



CHEMISCHE OBERFLÄCHEN- TECHNIK

CHEMICAL SURFACE TECHNOLOGY

Business unit manager

Prof. Dr. Stefan Kaskel

+49 351 83391-3331

stefan.kaskel@iws.fraunhofer.de



Division manager Chemical Surface and Battery Technology

Dr. Holger Althues

+49 351 83391-3476

holger.althues@iws.fraunhofer.de



Group manager Chemical Coating Technology

Dr. Benjamin Schumm

+49 351 83391-3714

benjamin.schumm@iws.fraunhofer.de



Group manager Battery- and Electrochemistry

Dr. Susanne Dörfler

+49 351 83391-3703

susanne.doerfler@iws.fraunhofer.de



Group manager Optical Inspection Technology

Dr. Wulf Grählert

+49 351 83391-3406

wulf.graehlert@iws.fraunhofer.de



Group manager Battery Technology

Dr. Thomas Abendroth

+49 351 83391-3294

thomas.abendroth@iws.fraunhofer.de



Group manager Gas and Particle Filtration

Dr. Jens Friedrich

+49 351 83391-3430

jens.friedrich@iws.fraunhofer.de

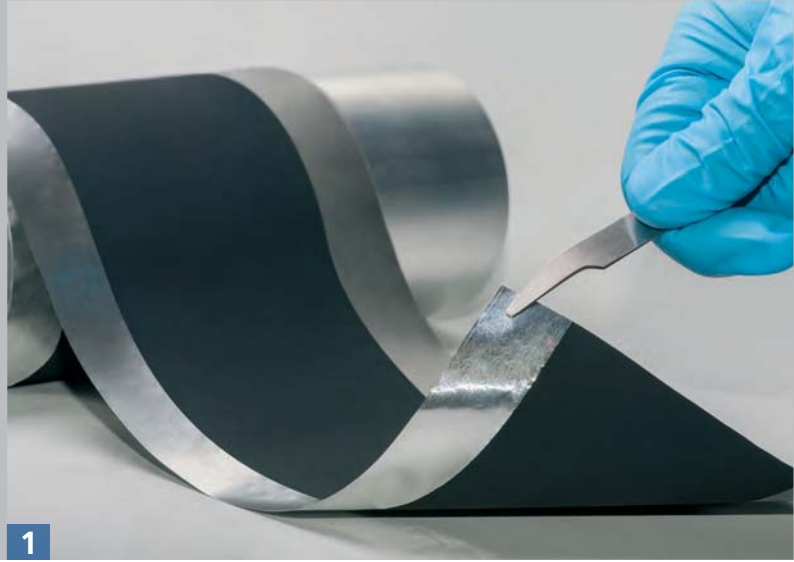


THE BUSINESS UNIT

The business unit Chemical Surface Technology focuses its research on next-generation batteries. Central topics include electromobility and stationary energy storage. The scientists design methods for fast, efficient and reliable battery manufacturing. They study innovative approaches such as lithium-sulfur technology or solid-state batteries. All this is based on a profound understanding of the chemical processes inside the battery. The scientists use this basis to develop the appropriate system technology and use monitoring and characterization methods to quickly analyze processes and coatings with imaging methods for any surface area. For surface analysis, the team combines detailed technical expertise in system design with sophisticated materials knowledge. From coating materials to base materials, the IWS researchers exactly understand the physical properties and their application profile and offer customized methods for surface evaluation, such as optical inspection technology using hyperspectral imaging.

DAS GESCHÄFTSFELD

Die Batterien der nächsten Generation erforscht das Geschäftsfeld Chemische Oberflächentechnik. Elektromobilität und stationäre Energiespeicher zählen zu den zentralen Themen. Entwickelt werden Methoden für die schnelle, effiziente und sichere Fertigung. Erforscht werden innovative Ansätze, wie etwa die Lithium-Schwefel-Technologie oder die Festkörperbatterie. Die Grundlage bildet ein tiefgründiges Verständnis der chemischen Prozesse innerhalb der Batterie. Auf dieser Basis entwickeln die Wissenschaftler die passende Systemtechnik und nutzen Monitoring- sowie Charakterisierungsmethoden, um Prozesse und Beschichtungen zügig mit bildgebenden Verfahren für jegliches Flächenmaß zu analysieren. In der Oberflächenanalytik verbindet das Geschäftsfeld vertieftes Fachwissen in der Systementwicklung mit ausgereifter Werkstoffkenntnis. Von Beschichtungs- bis hin zu Grundwerkstoffen kennen die IWS-Forscher die physikalischen Eigenschaften sowie ihr Anwendungsprofil genau und bieten maßgeschneiderte Methoden zur Oberflächenevaluierung, wie die optische Inspektionstechnik mittels hyperspektraler Bildgebung.



HIGHLIGHT

Auf dem Weg zur feuerfesten Festkörperbatterie

Ein neues Transferverfahren zur Trockenbeschichtung von Elektrodenmaterialien soll die energie- und kostenintensive Massenfertigung von Batteriezellen effizienter und umweltfreundlicher gestalten. Ein finnisches Unternehmen erprobt die neue Technologie bereits in der Praxis. Im BMBF-Projekt »DryProTex« soll das Konzept zusammen mit Industriepartnern weiter verfeinert werden. Die am Fraunhofer IWS entwickelte Technologie ermöglicht es Batterieherstellern, nicht nur auf Lösungsmittel zu verzichten und Trockenstrecken einzusparen, sie lässt auch Elektrodenmaterialien zu, die sich nasschemisch nicht verarbeiten lassen – eine Grundvoraussetzung für künftige Energiespeicher, wie etwa Festkörperbatterien. Diese setzen statt brennbarer Flüssigelektrolyten ionenleitende Feststoffe ein. Dafür werden Aktivmaterial und Festelektrolyt mit dem Binderpolymer gemischt und in einem Kalandrierungsverfahren verarbeitet. Es entsteht ein flexibler Elektrodenfilm, der direkt auf eine Aluminiumfolie laminiert wird. Einen Meilenstein zur Herstellung von Festkörperbatterien haben die Fraunhofer-Forscher bereits erreicht: Das Trockenfilmverfahren ermöglicht es, Elektroden mit extrem niedrigen Bindergehalten von bis zu 0,1 Masseprozent herzustellen. Die Polymerfibrillen blockieren dabei nicht die Aktivmaterialoberfläche wie herkömmliche Binder. Das Resultat ist eine ungehinderte Ionenwanderung durch den Querschnitt der Elektrode, selbst bei einer hohen Flächenbelastung von $6,5 \text{ mAh cm}^{-2}$.

HIGHLIGHT

Towards a safe and green solid-state battery

A new transfer process for the dry coating of electrode materials will make the energy- and cost-intensive mass production of battery cells more efficient and environmentally friendly. A Finnish company is already testing the new technology in practice. The concept is to be further refined in the BMBF project "DryProTex" together with industrial partners. The technology developed at Fraunhofer IWS not only enables battery manufacturers to avoid solvents and drying sections, it also allows for electrode materials for which wet chemical processing is not technically feasible – a basic requirement for future energy storage techniques such as solid-state batteries. These employ ion-conducting solids instead of flammable liquid electrolytes. Active material and solid electrolyte are mixed with the binder polymer and processed in a calender. The result is a flexible electrode film which is laminated directly onto an aluminum foil. The Fraunhofer researchers have already achieved a milestone in manufacturing solid-state batteries: The dry film process allows electrodes to be fabricated with extremely low binder contents of down to 0.1 percent in weight. The polymer fibrils do not block the active material surface as conventional binders would do. This results in unhindered ion migration through the cross-section of the electrode, even with a high areal capacity of 6.5 mAh cm^{-2} .

DOI: [10.1016/j.ensm.2019.05.033](https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.05.033)

1 With the new Fraunhofer IWS dry transfer technology, battery electrodes can be fabricated without the use of toxic solvents on pilot scale.

Funded by



Federal Ministry
of Education
and Research

FKZ: 02P17E010



DÜNNE LITHIUM-METALL-ANODEN FÜR ZUKÜNFTIGE BATTERIETECHNOLOGIEN

THIN LITHIUM METAL ANODES FOR FUTURE BATTERY TECHNOLOGIES

Lithium metal anodes are key elements for future battery systems. They maximize energy density both in terms of cell volume and mass. Melt coatings enable the production of thin lithium films at low cost. By means of laser cutting, these lithium anodes can be tailored for use in a wide variety of cell formats.

Lithium metal anodes maximize energy density both in terms of cell volume and mass. They are already applied in lithium sulfur cells to achieve record specific energy values of more than 400 watt hours per kilogram. By comparison, the best lithium-ion battery cells currently only achieve 250 watt hours per kilogram. In addition, solid state batteries could exceed the volumetric energy density of today's lithium-ion batteries by more than 70 percent using the lithium metal anode. Conventional production solutions for lithium foils include rolling processes. One of the difficulties with these processes is that it is very expensive to produce coatings less than 50 micrometers thick over large areas. In addition, production technologies for high-quality and thin lithium coatings on current collectors such as copper or nickel foils are commercially available only to a limited extent. The special mechanical and chemical properties of lithium must also be taken into account when cutting various electrode geometries from lithium foils. Conventional mechanical cutting processes have proven inefficient.

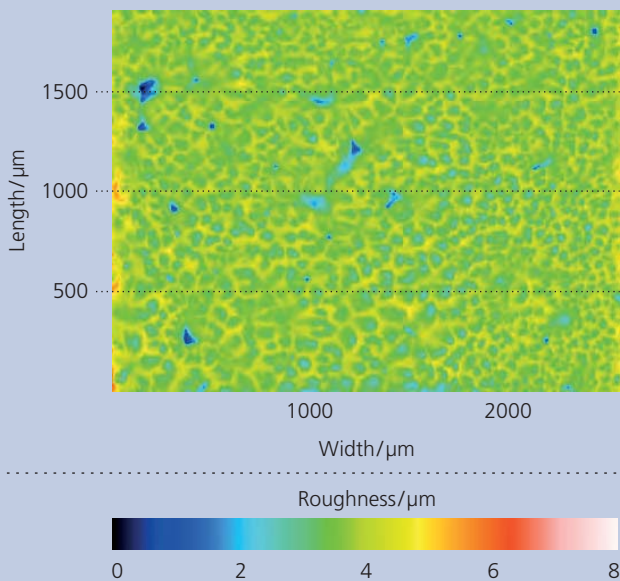
Lithium-Metall-Anoden gelten als Schlüsselement für die Batteriesysteme der Zukunft. Sie ermöglichen die Maximierung der Energiedichte sowohl in Bezug auf das Zellvolumen als auch auf die Masse. Schmelzbeschichtungen erlauben die Herstellung dünner Lithiumschichten mit geringem Aufwand. Mittels Laser-Schneidprozess lassen sich diese Lithiumschichten für verschiedenste Zellformate konfektionieren.

Lithium-Metall-Anoden ermöglichen die Maximierung der Energiedichte in Bezug sowohl auf das Zellvolumen als auch auf die Masse. Sie kommen bereits in Lithium-Schwefel-Zellen zum Einsatz, um Rekordwerte in der spezifischen Energie von mehr als 400 Wattstunden pro Kilogramm zu erreichen. Die besten Lithium-Ionen-Batterie-Zellen erreichen im Vergleich dazu derzeit lediglich 250 Wattstunden pro Kilogramm. Darüber hinaus könnten Festkörperbatterien die volumetrische Energiedichte heutiger Lithium-Ionen-Batterien bei Verwendung der Lithium-Metall-Anode um mehr als 70 Prozent überschreiten. Zu den herkömmlichen Produktionslösungen für Lithiumfolien gehören Walzverfahren. Deren Schwierigkeit besteht darin, dass sich damit Schichten unter 50 Mikrometern Dicke großflächig nur sehr aufwendig herstellen lassen. Hinzu kommt, dass Produktionstechnologien für hochwertige und dünne Lithiumschichten auf Stromkollektoren wie Kupfer- oder Nickelfolien kommerziell nur begrenzt verfügbar sind. Auch zum Zuschneiden verschiedener Elektrodengeometrien aus den Lithiumfolien sind die besonderen mechanischen sowie chemischen Eigenschaften des Lithiums zu beachten. Herkömmliche mechanische Trennverfahren haben sich als unproduktiv erwiesen.



2

Height profile of a lithium metal layer created by melt coating



Confocal microscopy analyzes the surface quality of the melt-coated lithium metal anodes.

Beschichtung aus der Lithiumschmelze: Kostengünstiger Ansatz für Anoden-Produktion zukünftiger Batteriesysteme

Das Fraunhofer IWS setzt bei der Herstellung definierter Lithiumanoden auf die Beschichtung aus der Metallschmelze – ein Prozess, der sich ohne großen apparativen Aufbau realisieren lässt. Eine große Herausforderung liegt jedoch in der großen Grenzflächenspannung des Lithiums gegenüber den Substratoberflächen. Erst eine Innovation ermöglicht eine für die Beschichtung notwendige Benetzung des Lithiums auf Kupfer- oder Nickelfolien: die lithiophile Oberflächenbehandlung

Coating from lithium melt: cost-effective approach for anode fabrication for future battery systems

For the production of defined lithium anodes, Fraunhofer IWS scientists rely on coating from the molten metal – a process that can be realized without the need for a large apparatus. A major challenge, however, lies in the high interface tension of the lithium compared to the substrate surfaces. Only an innovation enables the lithium to be wetted on copper or nickel foils, a process necessary for coating: the lithiophilic surface processing of the foils. IWS researchers have developed a technique that guarantees complete spreading of the lithium melt and thus a homogeneous coating. Further advantages include the fact that the IWS technology can be implemented at particularly low cost and can be scaled to industrial standards in the roll-to-roll process.

“MaLiBa” and “LiMeCut” to ensure contact and flexibility

Modifications of the lithium surface are targeted as an extension of this coating process in the joint project Customized metal anodes for future battery systems “MaLiBa”. The project team, coordinated by the IWS, aims to significantly improve the handling, stability and safety of lithium anodes for use in battery cells. This work will be complemented by the development of a laser cutting process in the context of “LiMeCut”. This project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research within the eurostars program and will enable flexible packaging of lithium anodes. The result is a toolbox for adapting anodes to customer-specific cell systems and formats. Fraunhofer IWS's role in “MaLiBa”

is focused on developing customized and surface-modified lithium anodes for future batteries. Here, lithium layers are generated with a thickness of about 25 micrometers and a very low roughness. This is particularly important in order to establish good contact with the adjacent electrolyte in solid-state cells. The "LiMeCut" project focuses on the development of a flexible laser process technology for cutting lithium anodes. Main emphasis is placed on providing a safe process environment – both for the plant operator and for the lithium – and on the development of cutting parameters for reproducible cutting results. In order to minimize reactions of the lithium with the working atmosphere during laser processing, the environment must be as dry as possible and the cutting process must be automated without external operator intervention. The handling of the process exhaust air enriched with lithium particles requires adapted treatment. In addition, electrodes punched in lithium sulfur test cells are directly compared to laser-processed electrodes. Flexible electrode fabrication from metallic lithium foils and tailor-made lithium anodes deposited on nickel foil is an important part of the IWS strategy to provide new products and optimized manufacturing processes for future battery types.

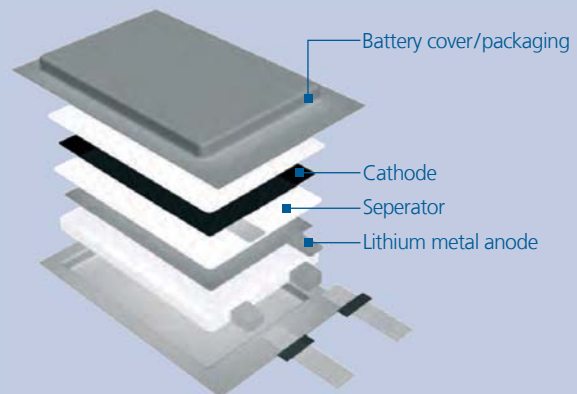
- 1 *Copper foil coated with lithium: Extremely thin but still manageable in rolls.*
- 2 *Lithium sulfur pouch cell: Thanks to a flexible laser cutting process, pouch cells can be produced in various formats.*
- 3 *Laser-cut lithium metal anode: The laser cutting process enables the precise packaging of lithium metal anodes.*

der Folien. Die Wissenschaftler des IWS haben hierfür eine Methode entwickelt, die eine vollständige Spreitung der Lithiumschmelze und damit eine homogene Beschichtung ermöglicht. Weitere Vorteile liegen darin, dass sich die entwickelte IWS-Technologie besonders günstig realisieren und wie bereits umgesetzt im Rolle-zu-Rolle-Verfahren auf industrielle Maßstäbe skalieren lässt.

»MaLiBa« und »LimeCut« sollen für Kontakt und Flexibilität sorgen

Modifizierungen der Lithium-Oberfläche sollen diesen Beschichtungsprozess im Verbundprojekt »Maßgeschneiderte Metall-Anoden für zukünftige Batteriesysteme (MaLiBa)« erweitern. Das Projekt-Team unter Koordination des IWS will so das Handling und die Stabilität sowie die Sicherheit der Lithium-Anoden für den Einsatz in Batteriezellen entscheidend verbessern. Ergänzt werden diese Arbeiten durch die Entwicklung eines Laserschneidprozesses innerhalb des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des eurostars-Programms geförderten Projekts »LiMeCut«, der eine

Electrode stack with lithium metal anode



The lithium metal anode is a key component of high energy battery cells and is being evaluated in stacked multilayer prototype cells.



3

flexible Konfektionierung von Lithium-Anoden ermöglichen wird. So ergibt sich ein Werkzeugkasten für die Anpassung von Anoden an kundenspezifische Zellsysteme und -formate. Innerhalb von »MaLiBa« entwickelt das Fraunhofer IWS maßgeschneiderte und oberflächenmodifizierte Lithium-Anoden für Batterien der Zukunft. Dabei werden Lithium-Schichten erzeugt, die zum einen eine Dicke von etwa 25 Mikrometern und zum anderen eine sehr geringe Rauigkeit aufweisen. Dies ist besonders wichtig, um in Festkörperzellen einen guten Kontakt zum angrenzenden Elektrolyten herzustellen. Das Projekt »LiMeCut« zielt auf die Entwicklung einer flexiblen Laserprozessstechnologie zum Schneiden von Lithiumanoden ab. Schwerpunkte sind hierbei die Bereitstellung einer sicheren Prozessumgebung – sowohl für den Anlagenbediener als auch für das Lithium – und die Entwicklung von Schneidparametern für reproduzierbare Schneidergebnisse. Um Reaktionen des Lithiums mit der Arbeitsatmosphäre während der Laserbearbeitung zu minimieren, muss eine möglichst trockene Umgebung geschaffen werden und der Schneidprozess ohne äußeren Eingriff des Bedieners automatisiert erfolgen. Die Behandlung der mit Lithiumpartikeln angereicherten Prozessabluft bedarf einer angepassten Aufbereitung. Außerdem werden in Lithium-Schwefel-Testzellen gestanzte Elektroden direkt mit den laserbearbeiteten verglichen. Für das IWS ist die flexible Elektrodenkonfektionierung aus elementaren Lithiumfolien und den auf Nickelfolie abgeschiedenen maßgeschneiderten Lithiumanoden ein wichtiger Bestandteil der Strategie, um für zukünftige Batterietypen neue Produkte und dafür optimierte Fertigungsprozesse bereitzustellen.

LiMeCut: This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 814471.

MaLiBa: The project on which this report is based was funded by the Federal Ministry of Education and Research (grant agreement no. 03XP0185). Responsibility for the content of this publication lies with the author.

Funded by



Co-funded by the Horizon 2020 programme of the European Union

CONTACT

Dipl.-Ing. Kay Schönherr

Chemical Coating Technology

+49 351 83391-3003

kay.schoenherr@iws.fraunhofer.de



INLINE-INSPEKTION VON BARRIEREFOLIEN DURCH HYPERSPEKTRALE BILDGEBUNG

INLINE INSPECTION OF BARRIER FILMS BY HYPERSPECTRAL IMAGING

Measuring the water vapor permeability of barrier films is a time-consuming process. It can take weeks until the result is available. Continuous "inline measurement" has therefore been impossible up to now. Scientists at Fraunhofer IWS demonstrated for the first time that a quick continuous prediction of water vapor permeability might nevertheless work, based on hyperspectral imaging (HSI) in combination with machine learning.

Barrier films find many applications in industry, but also in everyday life. Films protecting against water vapor and oxygen are crucial for economy, whether for food protection or sensitive electronics. Particularly in the case of organic electronics, such as organic light-emitting diodes or photovoltaics, the high quality of the barrier films is essential for a products' service life. Manufacturers and users therefore require continuous barrier film monitoring during processing and fabrication. However, at present such an approach is still impossible. Conventional measurement methods for barrier film performance are too time-consuming, require sampling and therefore cannot be performed continuously during production.

Hyperspectral Imaging and machine learning enable barrier film measurement

On the basis of hyperspectral microscopy, researchers at Fraunhofer IWS have developed a quick, non-contact and thus inline-capable sensor system for the continuous measurement of barrier films' water vapor permeability. The

Die Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Barrierefolien ist zeitaufwändig. So kann es Wochen dauern, bis das Ergebnis vorliegt. Eine kontinuierliche »Inline-Messung« ist somit bislang unmöglich. Wissenschaftler des Fraunhofer IWS demonstrierten erstmals, dass eine schnelle kontinuierliche Vorhersage der Wasserdampfdurchlässigkeit mithilfe der hyperspektralen Bildgebung (HSI) in Verbindung mit Methoden des maschinellen Lernens doch funktionieren kann.

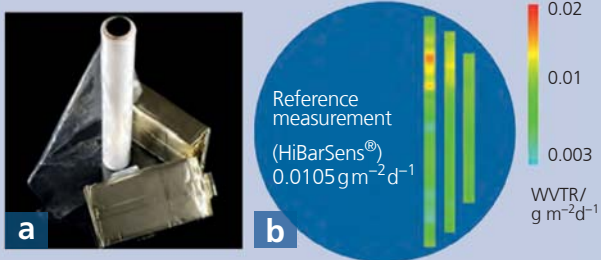
Barrierefolien finden in der Industrie, aber auch im täglichen Leben vielfältige Anwendung. Folien, die vor Wasserdampf und Sauerstoff schützen, sind von großer wirtschaftlicher Bedeutung, egal ob für den Schutz von Lebensmitteln oder empfindlicher Elektronik. Insbesondere bei organischer Elektronik, wie organischen Leuchtdioden oder Photovoltaik, ist eine hohe Qualität der Barrierefolien für die Lebensdauer der Produkte wichtig. Hersteller und Anwender benötigen daher eine kontinuierliche Kontrolle der Leistungsfähigkeit von Barrierefolien während der Produktion bzw. der Verarbeitung. Dies ist derzeit aber noch unmöglich. Herkömmliche Verfahren zur Messung der Barrierewirkung der Folien sind zu zeitaufwändig, bedürfen einer Probenahme und lassen sich somit nicht kontinuierlich während der Produktion durchführen.

Hyperspektrale Bildgebung und maschinelles Lernen ermöglichen Barrieremessung

Auf Grundlage der hyperspektralen Mikroskopie haben Forscher am Fraunhofer IWS eine schnelle, berührungslose und somit inlinefähige Sensorik für die kontinuierliche Messung der



Example of a hyperspectral barrier measurement



Typical barrier films (a) and result of continuous measurement of water vapor permeability (b). Figure (b) shows the color-coded water vapor transmission rate (WVTR), predicted using hyperspectral data with different lateral resolutions (stripes) compared to the water vapor transmission rate (WVTR) integrally measured over the entire sample area using the HiBarSens® reference method (circle).

Wasserdampfdurchlässigkeit von Barrierefolien entwickelt. Die Hyperspektraldaten der Folien enthalten qualitative und quantitative Informationen – sowohl über das Substrat und die aufgetragenen Barrierschichten als auch von Kontaminationen und Defekten. Mittels Methoden des maschinellen Lernens und unter Verwendung von HiBarSens®-Referenzdaten ließen sich aus den Hyperspektralmessungen Modelle zur Vorhersage der Wasserdampfdurchlässigkeit trainieren. Für Proben zwischen 0,001 und 0,02 Gramm pro Quadratmeter und Tag ließ sich die Wasserdampfdurchlässigkeit mit einem mittleren relativen Fehler von unter zehn Prozent vorhersagen. Die entwickelte Methode stellt damit einen vielversprechenden Ansatz für eine kontinuierliche Inline-Inspektion von Barrierefolien dar.

hyperspectral data contain qualitative and quantitative information about the substrate and the deposited barrier films as well as about contamination and defects. Using machine learning methods and HiBarSens® reference data, hyperspectral measurements could be used to train models for predicting water vapor permeability. For samples between 0.001 and 0.02 grams per square meter and day, the water vapor permeability could be predicted with a mean relative error of less than ten percent. The method developed thus represents a promising approach for the continuous inline inspection of barrier films.

1 Microscope for the hyperspectral measurement of barrier films.

CONTACT

M. Sc. Florian Gruber
Optical Inspection Technology
+49 351 83391-3721
florian.gruber@iws.fraunhofer.de



THERMISCHE OBERFLÄCHEN- TECHNIK

THERMAL SURFACE TECHNOLOGY

Business unit manager (temp.)

Prof. Dr. Steffen Nowotny

+49 351 83391-3241

steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de



Division manager
Thermal Coating

Group manager

Laser Wire Deposition (temporary)

Prof. Dr. Steffen Nowotny

+49 351 83391-3241

steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de



Division manager
Heat Treatment and Plating

Group manager

Coating Properties (temporary)

Dipl.-Phys. Marko Seifert

+49 351 83391-3204

marko.seifert@iws.fraunhofer.de



Group manager
Laser Cladding/System Technology

Dipl.-Ing. (FH) Holger Hillig

+49 351 83391-3358

holger.hillig@iws.fraunhofer.de



Group manager
Thermal Spraying

Dr. Maria Barbosa

+49 351 83391-3429

maria.barbosa@iws.fraunhofer.de



Group manager
Heat Treatment Systems

Dipl.-Ing. Stefan Kühn

+49 351 83391-3428

stefan.kuehn@iws.fraunhofer.de

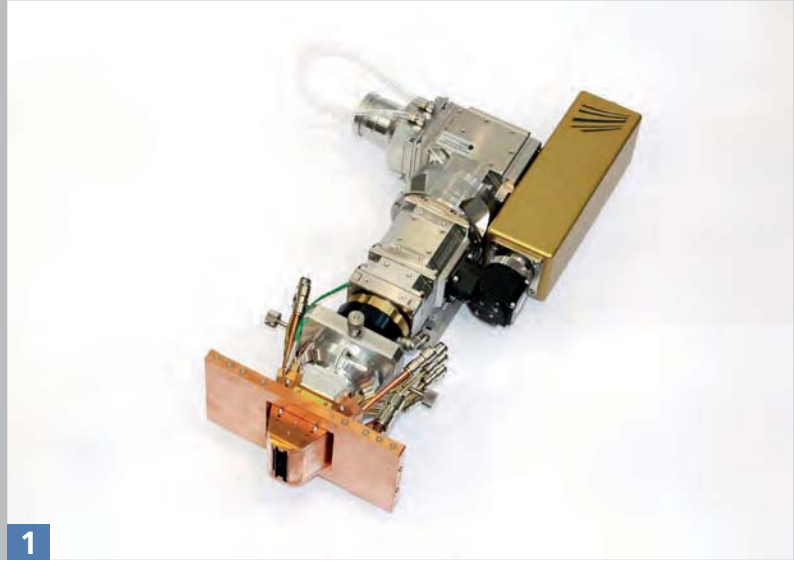


THE BUSINESS UNIT

Researchers in the Thermal Surface Technology business unit consider the entire value chain of systems and process engineering with respect to coating structures and heat treatment. The business unit has gained extensive experience in efficiently designing highly complex processes that are both environmentally and economically sustainable, in forging innovative approaches, and in shaping processes to meet an end product's needs. Research activities include process and systems engineering for laser-supported coating and layer techniques, thermal spraying, and heat treatment with a special focus on highly precise surface layer hardening. Increasing levels of automation are playing an ever more important role. The primary objective is to ensure the process reliability of an efficient technology in order to prevent costly downtimes and to enable competitive and high-quality industrial applications.

DAS GESCHÄFTSFELD

Die Thermische Oberflächentechnik erforscht die gesamte Wertschöpfungskette der Systemtechnik- und Prozessentwicklung für den Beschichtungsaufbau und die Wärmebehandlung. Wenn es darum geht, Verfahren mit hohen Komplexitätsgraden auch im Hinblick auf ökologische und ökonomische Faktoren effizient zu gestalten, diese in innovative Prozesse zu überführen und mit dem Zielprodukt in Einklang zu bringen, dann punktet das Geschäftsfeld mit langjähriger Erfahrung. Das Forschungsspektrum umfasst die Prozess- und Systemtechnikentwicklung für lasergestützte Beschichtungs- und Aufbauverfahren, das thermische Spritzen sowie die Wärmebehandlung mit besonderem Fokus auf hochpräzise Randschichthärteverfahren. Eine zunehmend wichtige Rolle spielen steigende Automatisierungsgrade. Das übergeordnete Ziel: Prozesssicherheit einer effizienten, zuverlässigen Technologie gewährleisten, um kostspielige Stillstandzeiten zu verhindern und konkurrenzfähige sowie hochwertige industrielle Anwendungen zu ermöglichen.



1

HIGHLIGHT

Neue Dimensionen: Großflächen-Laser-Auftragschweißen

Jahrelang waren Großflächenbeschichtungen aufgrund wirtschaftlicher Erwägungen lichtbogenbasierten Auftragschweiß- und Spritzverfahren vorbehalten. Funktionale Nachteile, wie ein erhöhter Aufmischgrad, mangelnde Haftfestigkeit oder schlechte Oberflächenqualität, sorgen jedoch für einen permanenten und aktuell signifikant wachsenden Bedarf an effizienten, produktiven und funktional hochwertigen Oberflächenbeschichtungen für Schichtdicken zwischen einem und zwei Millimetern. Vor diesem Hintergrund hat das Fraunhofer IWS in Zusammenarbeit mit dem renommierten Laserquellenhersteller Laserline GmbH eine Technologie entwickelt, die bestehende Defizite beseitigt. In der Kombination neuer Hochleistungslaser-Bearbeitungsköpfe und effizienter Hochleistungsdiodenlaser steht nunmehr das Laser-Auftragschweißen für das Oberflächenbeschichten im Quadratmetermaßstab qualifiziert zur Verfügung. Die neuen Breitstrahlbearbeitungsköpfe der COAXn-Familie des IWS wurden für Laserleistungen bis 20 kW im industriellen Dauereinsatz eingeführt und bieten dem Nutzer stabile Auftragsraten von über 20 kg h^{-1} Metallpulver etwa zum Beschichten großer Hydraulikzylinder. Unter Laborbedingungen erzielten die Dresdner Ingenieure gemeinsam mit Laserline einen weit darüber hinausgehenden Rekord in der Auftragsrate von 33 kg h^{-1} Metallpulver unter Nutzung einer Laserleistung von 50 kW. Die technischen Voraussetzungen zum Erreichen dieser grundlegend neuen Dimension der Laserbeschichtungstechnik betreffen gleichermaßen die Systeme und Prozesse. So ist die neue Generation der Beschichtungsköpfe mit variabel und anwendungsorientiert konfigurierbaren Sensoren ausgestattet. Sie dienen einerseits der Selbstüberwachung der Bearbeitungsköpfe und andererseits der Kontrolle von Medienströmen sowie Prozessparametern unter den besonderen physikalischen Bedingungen der mindestens 45 Millimeter breiten Schmelzbäder. Aktuelle Forschungsarbeiten erschließen weitreichende Anwendungspotenziale für Einsatzgebiete, wie etwa die Öl- und Gasindustrie, die Stahlerzeugung, den Bergbau sowie die Gleitlagerindustrie.

HIGHLIGHT

New Dimensions in Large-Area Laser Cladding Processes

For years, large-area coatings were applied only in arc welding and spraying processes due to economic considerations. However, functional disadvantages such as increased dilution, low adhesion or poor surface quality result in a permanent and currently significantly growing demand for efficient, productive and functionally high-quality surface coatings for thicknesses between one and two millimeters. For this reason, Fraunhofer IWS, in cooperation with renowned laser source manufacturer Laserline GmbH, has developed a technology that eliminates these shortcomings. Combining new high-performance laser processing heads with efficient high-performance diode lasers, the laser cladding technology now offers qualified solutions for surface coating on a square-meter scale. The new flat-jet processing heads of the IWS COAXn family were introduced for laser powers up to 20 kW in industrial series production and provide the operator with stable deposition rates of over 20 kg h^{-1} of metal powder, as required for coating large hydraulic cylinders, for example. Under laboratory conditions, the Dresden engineers, together with Laserline, achieved a well above this record in application rates of 33 kg h^{-1} of metal powder using a laser power of 50 kW. The technical prerequisites for achieving this fundamentally new dimension in laser coating technology are similarly applicable to the systems and processes. The new generation of coating heads is equipped with variable and application-oriented configurable sensors. On the one hand, they are used for self-monitoring of the processing heads and, on the other hand, for controlling media flows and process parameters under the special physical conditions of the melting baths, each at least 45 millimeters wide. Current research is working to map out further potential application fields including the oil and gas industry, steel production, mining and the manufacturing of industrial slide bearings.

1 High-performance laser processing head for large area coatings.

WÄRMEFELDREGLER FÜR DIE LASER-OBERFLÄCHENBEARBEITUNG MIT SCANNER

THERMAL FIELD CONTROLLER FOR LASER SURFACE TREATMENT WITH SCANNER

Due to its process-specific advantages, laser hardening is often particularly efficient for protecting highly stressed component surfaces against high surface pressures and wear. Users appreciate the rapid process speed and precision, the good reproducibility and the low distortion of the treated components. Laser beam shaping and process control are decisive for implementation.

Scientists at Fraunhofer IWS have developed a specific new model of the thermal field control. This combines temperature measurement including pyrometer ("E-FAqS") and thermal imaging camera ("E-MAqS") in a qualified manner with a high-frequency oscillation of the laser beam (scanning). Several problems in laser hardening of geometrically complicated components can thus be solved at the same time: Laser beam scanning facilitates flexible adjustment of the hardening zone width and, if necessary, rapid continuous changes in the running process. This process already considerably expands the range of components to be processed. Additionally, by changing the local scanning speed, the laser intensity can be precisely adapted to the local heat dissipation. Radii, edges or even bores in the processing area pose no longer a general problem. But only a sufficiently fast power control can automate the process to such an extent that the system operator practically no longer has to carry out any manual interventions. Scanning motion and laser power are controlled on the basis of real-time temperature data. The measured values from the pyrometer and the thermal imaging camera, important for certain process control tasks, are actually available. By combining both, measuring methods

Aufgrund seiner verfahrensspezifischen Vorteile ist das Laserhärten oft besonders effizient, um hochbelastete Bauteiloberflächen gegen hohe Flächenpressungen und Verschleiß zu schützen. Anwender schätzen die hohe Prozessgeschwindigkeit und Präzision, die gute Reproduzierbarkeit sowie den geringen Verzug der behandelten Bauteile. Entscheidend für die Umsetzbarkeit sind die Laserstrahlformung und die Prozessregelung.

Wissenschaftler am Fraunhofer IWS entwickelten eine spezielle neue Variante der Wärmefeldregelung. Diese kombiniert die Temperaturmessung inklusive Pyrometer («E-FAqS») und Wärmebildkamera («E-MAqS») auf geeignete Weise mit einer

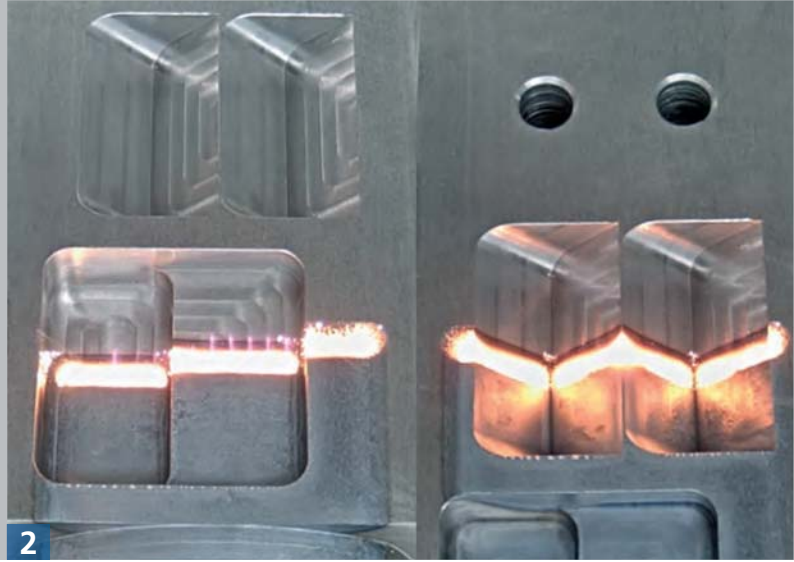
CAD-Layout of LASSY-1D-scanning system



The example shows a laser optics with decoupling unit and connected E-FAqS pyrometer as well as the 1D-LASSY scanning system (blue) with integrated E-MAqS camera. In the LASSY box, the laser beam pre-focused by the optics is shaped into a wide line.



1



2

hochfrequenten Pendelbewegung des Laserstrahls (Scanning). Damit lassen sich gleich mehrere Problemstellungen beim Laserhärten geometrisch komplizierter Bauteile lösen: Das Laserstrahlscanning ermöglicht es, die Härtezonenbreite flexibel einzustellen und bei Bedarf schnelle, kontinuierliche Änderungen im laufenden Prozess vorzunehmen. Bereits damit erweitert sich das zu bearbeitende Bauteilspektrum erheblich. Gleichzeitig lässt sich durch die Veränderung der lokalen Scangeschwindigkeit die Laserintensität punktgenau an die lokale Wärmeableitung anpassen. Damit stellen Radien, Kanten oder sogar Bohrungen im Bearbeitungsbereich kein generelles Problem mehr dar. Aber erst durch die Hinzunahme einer ausreichend schnellen Leistungssteuerung lässt sich der Prozess so weit automatisieren, dass der Anlagenbediener praktisch keine manuellen Eingriffe mehr vornehmen muss. Die Steuerung von Scanbewegung und Laserleistung erfolgt auf Basis der in Echtzeit erfassten Temperaturdaten. Dabei stehen grundsätzlich die Messwerte von Pyrometer und Wärmebildkamera zur Verfügung, die für bestimmte Teilaufgaben bei der Prozessregelung wichtig sind. Durch die Verknüpfung beider Messverfahren und verfügbarer Steuerungsgrößen lassen sich die verbleibenden Temperaturschwankungen so weit minimieren, dass an jeder Position im Bearbeitungsbereich das optimale Randhärteniveau erreicht wird.

Vollautomatisch: Komplexe Oberflächen mit einer einzigen Parametereinstellung härten

Den ersten Prototyp des Wärmefeldreglers auf Basis des bereits industriell erprobten 1D-Scanningsystems vom Typ »LASSY« integrierten die Wissenschaftler und Ingenieure bereits erfolgreich

and available control variables, the remaining temperature fluctuations can be minimized to such an extent that the optimum hardness level is achieved at every position in the processing area.

Fully automatic: Complex surfaces hardened with a single parameter setting

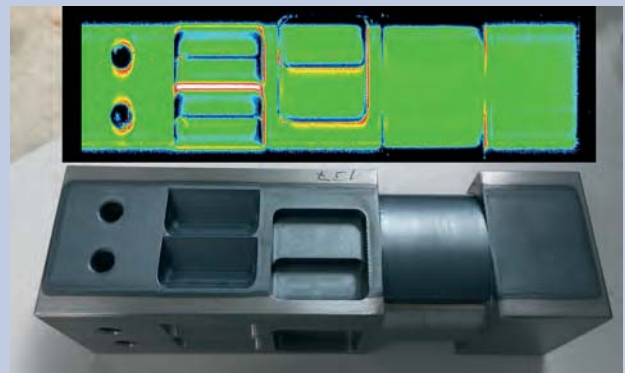
Scientists and engineers have already successfully integrated the first prototype of the thermal field controller, based on the already industrially tested 1D scanning system type "LASSY", into a job-shop hardening system at ALOtec Dresden GmbH. Together, they tested the new process on component geometries previously impossible for laser hardening. They showed that – fully automated and using a single parameter setting – complexly shaped surfaces with abrupt transitions can be hardened. For the first time, small radii, single or double V-grooves and multiple steps can be machined in a single process run. In direct comparison, however, massive hardness errors occur if fixed optics are used, since heat build-up effects appear at edges within the laser's effective zone and the laser power is thus too strongly reduced. Therefore, standard hardening systems can only process small areas in one pass and require several process runs. Particularly in job-shop manufacturing with constantly changing components, the use of scanner-based thermal field control considerably reduces the costs of system programming and process setting. Saving the pure processing time additionally reduces process costs.

The vision: Fast heat treatment for virtually all shapes

In future, even more users may benefit from the fact that surface hardening of specially shaped surfaces will also be possible, for which – apart from furnace processes such as case-hardening or nitriding – there is currently no technical solution. The ongoing trend towards ever more complex and filigree electrical-mechanical systems is paving the way for completely new possibilities for localized wear protection while at the same time significantly saving energy, machining time and costs. However, this process must be considered in context. The special properties of laser hardening zones and the low component distortion often facilitate the reduction of production steps or even open up new production strategies. Laser hardening technology with scanner-based thermal field control generally still offers considerable potential for the future. Therefore, Fraunhofer IWS' ongoing developments are designed to continuously expand the variety of geometries to be processed. An obvious technical solution is to additionally integrate a second scanner axis (2D scanning). Furthermore, system optimization for ever more powerful lasers offers not only the possibility of implementing ever wider hardness zones, but also significantly higher surface rates. The vision: large-area and fully automatic high-speed thermal treatment of virtually any shaped component.

in eine Lohnhärteanlage der ALOtec Dresden GmbH. Gemeinsam erprobten sie das neue Verfahren an bisher dem Laserhärten nicht zugänglichen Bauteilgeometrien. Dabei zeigten sie, dass sich – vollautomatisch und in einer einzigen Parametereinstellung – komplex geformte Oberflächen mit schroffen Übergängen härten lassen. Somit lassen sich kleine Radien, Einfach- oder Doppel-V-Nuten sowie Mehrfachstufen erstmals in einem einzigen Prozessdurchlauf bearbeiten. Im Direktvergleich kommt es hingegen zu massiven Härtefehlern, wenn Festoptiken zum Einsatz kommen, da Wärmestauereffekte an Kanten innerhalb der Wirkzone des Lasers entstehen und dadurch die Laserleistung zu stark abgeregelt wird. Deshalb können Standardhärtesysteme jeweils nur kleine Teilflächen in einem Zug bearbeiten und es sind mehrere Prozessdurchläufe erforderlich. Insbesondere bei der Lohnfertigung mit ständig wechselnden Bauteilen reduziert die Anwendung der scannerbasierten Wärmefeldregelung die Aufwendungen bei der Anlagenprogrammierung sowie Prozesseinrichtung erheblich. Die Einsparung reiner Bearbeitungszeit senkt zusätzlich die Prozesskosten.

Temperature distribution visualization with E-MAqS camera



False color image of the E-MAqS visualizes the maximum temperature achieved at each hardening position in a compact form. The high contrast enhancement already shows small temperature deviations of 5 to 10 Kelvin and was used to optimize the process and control parameters.



3



4

Die Vision: Schnell und nahezu beliebig geformt wärmebehandeln

Zukünftig können weitere Anwender davon profitieren, dass auch das Randschichthärten speziell geformter Oberflächen möglich wird, für die es – abgesehen von Ofenprozessen wie Einsatzhärten bzw. Nitrieren – aktuell keine technische Lösung gibt. Im anhaltenden Trend der Entwicklung immer komplexerer und filigranerer elektrisch-mechanischer Systeme eröffnen sich damit völlig neue Möglichkeiten des lokalisierten Verschleißschutzes bei gleichzeitig deutlicher Einsparung von Energie, Bearbeitungszeit und Kosten. Dabei darf das Härteverfahren aber nicht singulär betrachtet werden, denn die besonderen Eigenschaften von Laserhärtezonen sowie der geringe Verzug der Bauteile ermöglichen es oft, Fertigungsschritte zu reduzieren oder sogar neue Fertigungsstrategien einzuführen. Die Laserhärte-technologie mit scannerbasierter Wärmefeldregelung bietet generell noch ein erhebliches Potenzial für die Zukunft. Deshalb zielen die laufenden Entwicklungen am Fraunhofer IWS darauf ab, die Vielfalt der zu bearbeitenden Geometrien kontinuierlich zu erweitern. Dabei besteht eine naheliegende technische Lösung darin, eine zweite Scannerachse (2D-Scanning) zusätzlich zu integrieren. Außerdem bietet eine Systemoptimierung für immer leistungsstärkere Laser nicht nur die Möglichkeit, immer breitere Härtezonen, sondern auch deutlich höhere Flächenraten umzusetzen. Die Vision: die großflächige und vollautomatische Hochgeschwindigkeits-Wärmebehandlung von nahezu beliebig geformten Bauteilen.

- 1 Sample hardened in one pass with 1D-LASSY scanning system and thermal field controller: The width was approx. 45mm, machined from right to left. The uniform grey color of the oxide layers represents the homogeneous temperature level.
- 2 Two process images from the ongoing laser hardening process with thermal field control. Processed with the laser hardening machine at ALOtec Dresden GmbH. Left: Step profile with two edges within the laser exposure zone. Right: Processing of a double V-profile.
- 3,4 Wide laser hardening tracks with narrow radii, uniformly hardened by LASSY thermal field controller. This result cannot be achieved with conventional laser hardening methods due to the different local path speeds.

CONTACT

Dipl.-Phys. Marko Seifert
Heat Treatment and Plating
+49 351 83391-3204
marko.seifert@iws.fraunhofer.de



THERMISCHES SPRITZEN FUNKTIONALISIERT CFK-OBERFLÄCHEN

THERMAL SPRAYING FUNCTIONALIZES CFRP SURFACES

Fiber-reinforced composites – the lightweight solution for aerospace engineering – offer maximum mechanical strength at minimum weight. A further sophisticated option for weight reduction is the functionalization of surfaces with an application-specific coating. Functionalized surfaces on fiber-reinforced composite components are thus an optimum way of reducing weight.

Combining different technologies facilitates the realization of synergies between fiber-reinforced composite lightweight construction and surface functionalization. Thermal spraying is the most versatile coating technology for polymers, metals, alloys, hard metals and ceramics. However, even for this flexible technology, the implementation of functions on surfaces of fiber-reinforced composite components remains a challenge. In order to provide the necessary conditions for coating adhesion, special requirements have to be met in terms of cleanliness and, above all, roughness of the surface. Only in this way spray particles can be mechanically clamped to the surface and form a layer. In order to adjust the roughness of fiber-reinforced composite components, current methods use additives during component fabrication (e. g. gelcoat with particles) or additional methods for subsequent structuring (e. g. laser ablation or sandblasting). Surface structuring often leads to fiber destruction and strength reduction of high-performance components.

Faserverbundwerkstoffe – die Leichtbaulösung der Luft- und Raumfahrttechnik – erzielen höchste mechanische Festigkeiten bei geringstem Gewicht. Die Funktionalisierung von Oberflächen mit einer anwendungsgerechten Beschichtung ist eine weitere anspruchsvolle Möglichkeit zur Gewichtsreduzierung. Funktionalisierte Oberflächen auf Faserverbundbauteilen stellen damit ein Optimum der Gewichtseinsparung dar.

Die Kombination verschiedener Technologien ermöglicht es, Synergien aus Faserverbundleichtbau und Oberflächenfunktionalisierung zu erzielen. Thermisches Spritzen ist die vielseitigste Beschichtungstechnologie, die Polymere, Metalle, Legierungen, Hartmetalle und Keramiken als Beschichtung aufbringt. Dennoch stellt die Übertragung von Funktionen auf Oberflächen von Faserverbundbauteilen selbst für diese flexible Technologie eine Herausforderung dar. Um die notwendigen Voraussetzungen zur Schichtanhaftung zu erfüllen, gilt es spezielle Anforderungen an Reinheit und vor allem Rauheit der Oberfläche zu gewährleisten. Erst dadurch lassen sich Spritzpartikel mit der Oberfläche mechanisch verklammern und eine Schicht ausbilden. Um die Rauheit von Faserverbundbauteilen einzustellen, verwenden aktuelle Methoden Zusatzstoffe während der Bauteilherstellung (z. B. Gelcoat mit Partikeln) oder Zusatzverfahren zur nachträglichen Strukturierung (z. B. Laserablation oder Sandstrahlen). Eine Oberflächenstrukturierung führt dabei oft zu einer Zerstörung der Fasern und einer Festigkeitsminderung der Hochleistungsbauteile.



Smarte Beschichtungslösung für die Serienfertigung von funktionalisierten Faserverbundbauteilen

Das Fraunhofer IWS hat die Entwicklung eines thermisch gespritzten Heizschichtsystems auf CFK ganzheitlich von der Bauteilherstellung bis zur Beschichtung betrachtet. Dabei verglichen die Wissenschaftler etablierte Methoden mit neuen Ideen zur Beeinflussung der Schichtanhaftung. Im Vordergrund der Forschung: eine wirtschaftliche und zukunftsorientierte Serienfertigung von funktionalisierten Leichtbauteilen. Als Ergebnis erfüllt die Oberflächenvorbereitung im ersten Herstellungsschritt, dem Laminieren, die zuvor genannten Anforderungen. Die favorisierte Lösung entstammt der Fertigung von faserverstärkten Kunststoffen und der Verwendung von Abreißgeweben zur Vorbereitung von Fügeverbindungen. Nach dem Aushärtungsprozess wird durch Abreißen des Gewebes überschüssiges Laminierharz entfernt. Die Vorteile bestehen darin, kein zusätzliches Material das Gewicht erhöht, dass die Oberfläche gleichmäßig aufgeraut wird und keine Schädigung oder Freilegung von Fasern auftritt. Somit entstehen Synergien aus Schichthaftung, Bauteilfestigkeit und -gewicht. Vor der Beschichtung muss die Oberfläche nur gereinigt werden. Mit der Oberflächenaufrauung beim Laminieren und der Beschichtung eines thermisch gespritzten Heizschichtsystems wurden Winglets für die Luftfahrtanwendung funktionalisiert, ohne zusätzliche Kosten und Arbeitsschritte bei der Oberflächenvorbereitung zu erzeugen. Aktuell werden vergleichbare Anwendungen in die Automotiv-Branche überführt.

Smart coating solution for serial production of functionalized fiber-reinforced composite components

Fraunhofer IWS has holistically considered the development of a thermally sprayed heating system on CFRP, covering everything from component fabrication to coating. The scientists contrasted established methods with new ideas for modifying layer adhesion. The research focuses on economically viable and future-oriented serial fabrication of functionalized lightweight components. As a result, surface preparation in the first fabrication step, i. e. lamination, meets the aforementioned requirements. The favored solution is based on the fabrication of fiber-reinforced plastics and the use of peel plies for the preparation of bondings. After the curing process, excess laminating resin is removed by tearing off the peel plies. Benefits include that no additional material increases the weight, that the surface is evenly roughened and that fibers are not damaged or exposed. Synergies between layer adhesion, component strength and weight are thus achieved. Prior to coating, the surface only needs to be cleaned. With the surface roughening during lamination and the coating of a thermally sprayed heating system, winglets were functionalized for aerospace applications without generating additional costs for surface preparation. Comparable applications are currently being implemented in the automotive industry.

- 1 *Thermally sprayed heating system on CFRP winglet, consisting of metallic bond coat, ceramic insulation and heating layer as well as two copper contact strips (from left to right).*
- 2 *Glider with winglet at the wing tip.*

CONTACT

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Scheitz

Thermal Spraying

+49 351 83391-3094

stefan.scheitz@iws.fraunhofer.de



GENERIEREN UND DRUCKEN

ADDITIVE MANUFACTURING AND PRINTING

Business unit manager

Prof. Dr. Frank Brückner

+49 351 83391-3452

frank.brueckner@iws.fraunhofer.de

Division manager Additive Manufacturing

Group manager

Hybrid Manufacturing (temporary)

Dr. Elena López

+49 351 83391-3296

elena.lopez@iws.fraunhofer.de



Group manager Printing

M.Sc. Lukas Stepien

+49 351 83391-3092

lukas.stepien@iws.fraunhofer.de



Group manager Image Processing and Data Management

Prof. Dr. Karol Kozak

+49 351 83391-3717

karol.kozak@iws.fraunhofer.de



Group manager 3D-Manufacturing

Dipl.-Ing. Mirko Riede

+49 351 83391-3188

mirko.riede@iws.fraunhofer.de



THE BUSINESS UNIT

Researchers in the Additive Manufacturing and Printing business unit apply materials layer by layer for a wide range of applications. They fabricate complex parts from basic materials such as powder, wire, pastes and foils. They primarily work with metals and plastics, applying technologies including remelting, additive manufacturing and printing. This approach relies on profound technological and material expertise. Only by combining them can additive manufacturing be used to create sophisticated, innovative parts that are both cost-effective and reliable. The team applies various processes, such as laser cladding, using powder, and wire electron as well as laser beam welding, and hybrid methods, which combine subtractive with additive techniques. In this process, Fraunhofer IWS scientists not only focus on the individual process, but also investigate and develop solutions along the process chain. Together with customers from industry, they follow the entire path of development from the initial idea to the feasibility study to system hardware engineering to full marketability.

DAS GESCHÄFTSFELD

Lage für Lage formt das Geschäftsfeld Generieren und Drucken Werkstoffe für verschiedenste Anwendungszwecke. Aus Ausgangswerkstoffen wie Pulver, Draht, Pasten oder Bändern entstehen komplette Bauteile. Hauptsächlich werden Metalle und Kunststoffe verarbeitet. Ein besonderes Merkmal bildet die ausgeprägte Verfahrens-, Systemtechnik- und Werkstoffkompetenz. Nur in dieser Kombination lassen sich komplexe neuartige Bauteile mittels additiver Fertigung herstellen, die einerseits kostengünstig und andererseits zuverlässig sind. Zum Einsatz kommen vielfältige Verfahren wie das Laserauftragsschweißen mit Pulver und Draht, selektives Elektronen- und Laserstrahlschmelzen oder Hybridlösungen, die subtraktive mit additiven Methoden kombinieren. Dabei konzentrieren sich die Wissenschaftler am Fraunhofer IWS nicht ausschließlich auf den einzelnen Prozess, sondern erforschen und erarbeiten Lösungen entlang der gesamten Prozesskette. Gemeinsam mit dem Industriepartner beschreiten sie den gemeinsamen Weg von der Idee über die Machbarkeitsstudie und die Entwicklung der Systemtechnik bis hin zur kompletten Marktreife.



1

HIGHLIGHT

Llsec – Pulverdüsenmesssystem für das Laser-Auftragschweißen

Das Pulverdüsenmesssystem »Llsec« löst ein grundlegendes Problem des Laser-Pulver-Auftragschweißens, was bei konventionellen Fertigungsverfahren bereits Stand der Technik ist: Die Bestimmung der genauen Position des »Tool Center Points«. Darüber hinaus ermittelt das Gerät die Intensitätsverteilung des Pulverkegels und dessen geometrische Ausdehnung. Nach dem Funktionsprinzip des Laser-Lichtschnittverfahrens wird die Pulverströmung fein aufgelöst vermessen. Mittels Bildverarbeitungsalgorithmen entsteht basierend auf den Messdaten ein dreidimensionales Abbild. Über eine nutzerfreundliche Software werden alle relevanten Düsenparameter berechnet, wie etwa die genaue Position sowie Ausdehnung des Pulverfokus. Neben diesem neuartigen Ansatz zur Qualitätssicherung sowie Verschleißkontrolle lässt sich auch der Einfluss von Prozessparametern auf die Ausformung des Pulverkegels visualisieren. Aufgrund seiner geringen Abmessungen lässt sich das Messsystem Llsec einfach und platzsparend in nahezu alle Fertigungsanlagen zum Laser-Pulver-Auftragschweißen integrieren. Zum korrekten Betrieb ist es lediglich notwendig, das Gerät auf das Maschinenkoordinatensystem auszurichten. Dabei stehen drei verschiedene Messmodi zur Verfügung. Für eine vollständig automatisierte Vermessung der montierten Pulverdüse steht eine Anwendungsschnittstelle (API) zur Verfügung. Die Kommunikation zwischen Anlage, Messeinheit und Analysesoftware erfolgt über eine Ethernetverbindung mit integrierter Spannungsversorgung (Power-over-Ethernet). Llsec eröffnet auf diesem Weg eine sehr schnelle und einfache Möglichkeit zur quantitativen Düsencharakterisierung.

HIGHLIGHT

Llsec – Nozzle measuring system for laser metal deposition with powder

The exact determination of the position of the “Tool Center Point” is state-of-the-art for conventional production methods, but not for laser metal deposition with powder. The powder nozzle measuring system “Llsec” solves this fundamental issue. Additionally, the unit determines the intensity distribution and the geometry of the powder cone. According to the principle of laser light section technology, the powder flow is measured in fine resolution. Based on the measured data, image processing algorithms calculate a digital three-dimensional model. All relevant nozzle parameters, such as the exact position and dimension of the powder focus, are analyzed by means of user-friendly software. In addition to the new quality assurance concept and wear monitoring, the influence of process parameters on the powder cone characteristics can also be visualized. Due to its small dimensions, the Llsec measuring system can easily be integrated into almost all laser metal deposition machines without using much space. For operating the system it is only necessary to align the device with the machine coordinate system. It is possible to choose between three different measuring modes. An application interface (API) is available for fully automated measurement of the powder nozzle. Communication between the system, measuring unit and analysis software is implemented via an Ethernet connection with integrated power supply (Power-over-Ethernet). Thus, Llsec enables a very fast and simple possibility for quantitative nozzle characterization.

1 *Compact “Llsec” measuring system for characterizing the powder cone for laser metal deposition nozzles.*

DURCHGÄNGIGE DIGITALISIERUNG DER ADDITIVEN FERTIGUNG

DIGITAL ADDITIVE MANUFACTURING

The individual steps of additive manufacturing processes have already been partially digitized, but are still insufficiently linked. Causes and dependencies of errors are thus difficult to identify. Fraunhofer IWS is therefore developing customized sensors and powerful methods for data analysis. The goal is to digitize the manufacturing process in its entirety.

There are numerous influencing factors for the additive manufacturing process, starting with the initial material to component fabrication up to post-treatment. Minor fluctuations of individual parameters and the constantly changing conditions during fabrication significantly influence the result. The digitization of the manufacturing process offers the potential to detect defects and their complex interaction mechanisms at an early stage. The acquisition and analysis of process data as well as a control system based on artificial intelligence enable an increased process reliability, reduced lead times and lower production costs. Researchers at

Die einzelnen Prozessschritte additiver Fertigungsprozesse sind zwar bereits teilweise digitalisiert, jedoch noch unzureichend miteinander verknüpft. Fehlerursachen und -abhängigkeiten lassen sich so nur schwer identifizieren. Deshalb werden am Fraunhofer IWS maßgeschneiderte Sensoren und leistungsfähige Methoden zur Datenanalyse entwickelt. Ziel ist die Digitalisierung des Fertigungsprozesses als Ganzes.

Beginnend beim Ausgangswerkstoff über die Bauteilherstellung bis hin zur Nachbehandlung existieren zahlreiche Einflussfaktoren für den additiven Fertigungsprozess. Geringe Schwankungen einzelner Parameter sowie die ständig wechselnden Randbedingungen während des Aufbaus haben großen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Die Digitalisierung des Fertigungsprozesses bietet das Potenzial, Fehler und deren komplexe Wirkmechanismen frühzeitig zu erkennen. Einen wesentlichen Beitrag dazu, die Prozesssicherheit zu erhöhen sowie Vorlaufzeiten und Produktionskosten abzusenken, leisten die Erfassung und

Infrastructure of the process information management system for the individual steps in the additive process chain





Verarbeitung von Prozessdaten und eine auf künstlicher Intelligenz basierende Regelung. Um dieses Ziel zu erreichen, entwickelten Forscher am Fraunhofer IWS diverse maschinenintegrierbare cyberphysische Systeme zur Datenakquisition. Diese umfassten u. a. die Überwachung der eingesetzten Prozesstechnik mit einem sensorintegrierten Prozesskopf sowie das Monitoring und die Regelung wichtiger Prozesseinflussparameter, wie z. B. eine Pulvermassenstromregelung oder die Integration der Pulverdüsenmesseinheit »Llsec«. Ein auf die additive Fertigung zugeschnittenes Prozessinformationsmanagementsystem erfasst strukturiert die anfallenden großen Datenmengen. Auf diese Weise entsteht ein »digitaler Zwilling« des AM-Bauteils, der sämtliche Herstellinformationen enthält. Das System agiert darüber hinaus als »virtuelles Labor« zur Datenerfassung an abweichenden Anlagenstandorten und als Qualitätssicherungswerkzeug über die gesamte Prozesskette. Um bisher unbekannt Zusammenhänge in den großen Datenmengen (Stichwort: »Big Data«) zu finden, werden am Fraunhofer IWS Methoden des maschinellen Lernens genutzt. Den Mehrwert zeigten die Wissenschaftler bereits bei der automatisierten Detektion von Fehlzuständen. Auf diesem Weg stellten sie nicht nur neue Ansätze zur Prozessregelung und Qualitätssicherung bereit, sondern beschleunigten auch die Prozessentwicklung für neuartige, schwer zu verarbeitende Materialien.

Fraunhofer IWS developed various machine-integrated cyberphysical systems for data acquisition. These include a sensor-integrated process head to monitor system conditions as well as control systems for important process parameters, such as powder mass flow or the powder distribution at the nozzle with the measuring unit "Llsec". A process information management system tailored to additive manufacturing records the extensive data amounts in a structured manner. This creates a "digital twin" of the AM component that includes all manufacturing information. The system also acts as a "virtual laboratory" for data acquisition at different sites and as a quality assurance tool throughout the entire process chain. In order to identify previously unknown correlations in the large amounts of data (keyword: "big data"), Fraunhofer IWS researchers apply machine learning methods. The scientists have already demonstrated the added value in the automated detection of malfunctions. Thus, they not only provide new approaches for process control and quality assurance, but also accelerate process development for novel challenging materials.

- 1 *The intelligent process head records process data in-situ with over 20 integrated sensors during component manufacturing. A control system based on artificial intelligence performs data processing.*

CONTACT

Dipl.-Ing. Mirko Riede
3D-Manufacturing
+49 351 83391-3188
mirko.riede@iws.fraunhofer.de



EVOLUTIONÄRE ALGORITHMEN FÜR DIE HYBRIDFERTIGUNG

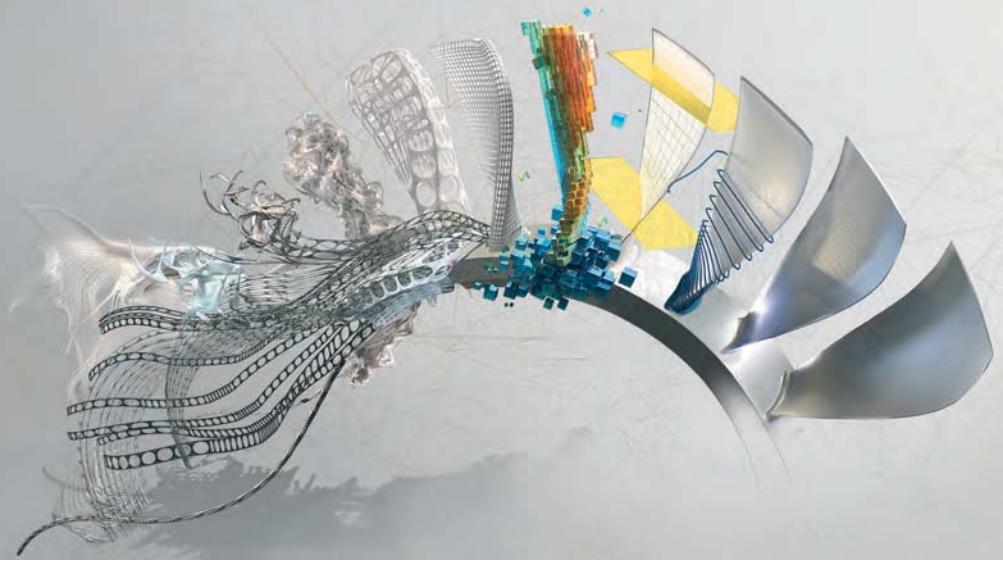
EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR HYBRID MANUFACTURING

An important mission of the European Space Agency (ESA) is the "Advanced Telescope for High Energy Astrophysics" (ATHENA). The Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS is developing a main component for the telescope: an optical bench to be manufactured using a hybrid manufacturing strategy. For this purpose, laser powder build-up welding is combined with cryogenic precision machining in an iterative form. The Fraunhofer Lighthouse Project "Evolopro" addresses complementary challenges and goes far beyond existing solutions.

"Evolopro" focuses on "Biological Manufacturing Systems", which are able to adapt independently to new requirements and environmental conditions, analogous to biological organisms. Unlike nature, a Biological Manufacturing System does not take thousands of years to develop, but improves its components immediately based on "biological" algorithms in combination with industrial 4.0 systems. In this way, process steps, travel routines and process parameters can be quickly modified automatically and self-oriented using the example of the optical bench of the ATHENA mission and adapted to the current machine situation. To implement this idea for future manufacturing processes, "Evolopro" not only relies on new algorithms based on biology, but also on the principle of the digital twin interacting with a digital environment. All developments for the construction of the optical bank include components that require considerable technological know-how. Various methods have been developed to achieve this goal.

Eine bedeutende Mission der European Space Agency (ESA) ist das »Advanced Telescope for High Energy Astrophysics«, kurz ATHENA. Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS entwickelt für das Teleskop ein Hauptbauteil: eine optische Bank, die mittels einer hybriden Fertigungsstrategie hergestellt werden soll. Dafür wird das Laser-Pulver-Auftragschweißen mit der kryogenen Präzisionszerspanung in iterativer Form kombiniert. Das Fraunhofer-Leitprojekt »Evolopro« adressiert komplementäre Fragestellungen und geht weit über heute verfügbare Lösungen hinaus.

»Evolopro« betrachtet »Biological Manufacturing Systems«, die analog zu biologischen Organismen in der Lage sind, sich selbstständig an neue Anforderungen und Umgebungsbedingungen anzupassen. Ein Biological Manufacturing System benötigt dafür nicht wie die Natur viele Jahrtausende, sondern Verbesserungen können sofort, basierend auf »biologischen« Algorithmen in Kombination mit Industrie-4.0-Systemen, in die Bauteilerstellung einfließen. Auf diese Weise lassen sich Verfahrensschritte, Verfahrerroutinen und Prozessparameter automatisiert und selbstorientiert am Beispiel der optischen Bank der ATHENA-Mission rasch modifizieren und an die aktuelle Maschinensituation anpassen. Zur Umsetzung dieser Idee für zukünftige Fertigungsprozesse setzt »Evolopro« nicht nur auf neue, der Biologie nachempfundene Algorithmen, sondern auch auf das Prinzip des digitalen Zwillings, der mit einer digitalen Umwelt interagiert. Alle Entwicklungen für den Aufbau der optischen Bank beinhalten Komponenten, die ein erhebliches technologisches Know-how erfordern. Um dieses Ziel zu erreichen wurden diverse Methoden entwickelt.



Methode zum strukturierten, systematischen Aufbau des Digitalen Zwillings

Ein intelligentes Fertigungssystem ermöglicht die sofortige und integrative Detektion von Fertigungsabweichungen (z. B. Verzug) oder Werkstoffmodifikationen (z. B. in Randzonen). Das System umfasst die Kopplung von Werkstoff- und Fertigungsdaten in einem Digitalen Zwilling (DZ), Methoden zum strukturierten, systematischen Aufbau der digitalen Umwelt, eine Datenbank zur Erstellung der digitalen Umwelt und Kopplung bzw. Referenzierung dieser mit dem DZ, die Integration vorhandener Bauteil- mit Prozessdaten sowie einen effizienten Zugriff auf Echtzeit- und historische Daten. Das Leitprojekt »Evolopro« greift nicht nur diese Fragestellungen singular auf, sondern verknüpft derartige Themen miteinander, wertet sie aus und verarbeitet sie weiter. Auf diese Weise leistet das Fraunhofer IWS einen entscheidenden Beitrag für robuste Prozesse, eine schnelle Produktentwicklung sowie die intelligente Verlinkung von Prozessschritten. Dies erfolgt skalenübergreifend, d. h. von Aspekten des Schmelzbads bis hin zur vollständigen Betrachtung des erstellten Bauteils.

Method for the structured, systematic setup of the digital twin

An intelligent manufacturing system enables the immediate and integrative detection of production-related deviations (e.g. distortion) or material modifications (e.g. in edge zones). The system comprises the coupling of material and manufacturing data in a digital twin (DT), methods for the structured, systematic setup of the digital environment, database for the generation of the digital eco-system and coupling or referencing with the DT, integration of existing component data with process data, efficient access to real-time and historical data. The lead project "Evolopro" not only addresses these questions, but also links digital processes with each other, evaluates them and processes them further. In this way, Fraunhofer IWS contributes decisively to robust processes, rapid product development and intelligent linking of process steps. This is achieved across scales, i. e. from aspects regarding the melt pool to the complete consideration of the produced component.

CONTACT

Prof. Dr. Karol Kozak
Image Processing and Data Management
+49 351 83391-3717
karol.kozak@iws.fraunhofer.de



SCHNELLER, INDIVIDUELLER UND PRÄZISER – HOHER PATIENTENNUTZEN DURCH AM

FASTER, INDIVIDUALIZED AND MORE PRECISE – HIGH PATIENT BENEFIT THROUGH AM

Across all areas of the medical sciences, demand for patient-specific care is rising. The Additive Manufacturing Center Dresden (AMCD) offers a wide range of 3D printing processes for maximum flexibility in terms of processes and materials. The processes Laser Powder Bed Fusion (LPBF) and Binder Jetting, for example, allow titanium implants to be manufactured with high precision and surface quality.

Currently, the majority of implants consist of prefabricated unit sizes. During surgery, the best fitting part is often selected and inserted. Here, additive manufacturing with its process-related geometric freedom for 3D-printed parts enables patient-specific care. As a precondition, the classic process chain must be modified. The use of 3D X-ray diagnostics, implant printing and the best possible adjustment prior to surgery ensure optimal therapy prediction. Using digital patient data, researchers at Fraunhofer IWS used LPBF to generate individual parts (pads) of mandibular distractors made of TiAl6V4 titanium alloy. As a result, manual intraoperative adjustment of the distractor is no longer necessary. In addition, the IWS scientists also analyze surface textures and roughness as well as various post-treatment options such as vibratory grinding and electropolishing. Sandblasting with corundum powder removes loosely bound powder particles from the parts immediately after printing. The roughness is homogenized in such a way that the average roughness value is around 14 micrometers. Electropolishing achieves a surface roughness of around four micrometers within 20 minutes. Even if vibratory grinding increases the processing time, it results in a significantly better average

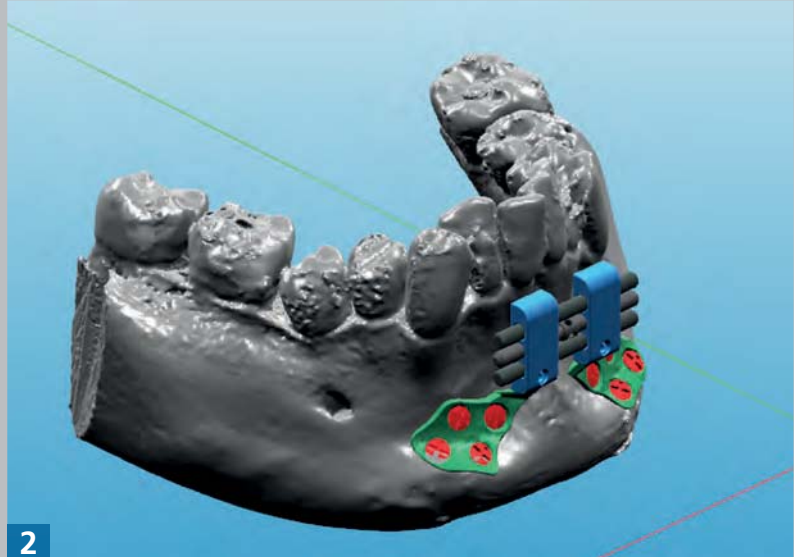
In der Medizin wird auf allen Ebenen zunehmend eine patientenindividuelle Versorgung gefordert. Das Additive Manufacturing Center Dresden (AMCD) bietet eine breite Palette an 3D-Druckverfahren für höchste Flexibilität hinsichtlich Prozessen und Werkstoffen. So lassen es die Verfahren Selektives Laserstrahlschmelzen (LPBF) und Binder Jetting zu, Implantate aus Titan mit hoher Präzision und Oberflächengüte herzustellen.

Aktuell besteht ein Großteil hergestellter Implantate aus vorgefertigten Einheitsgrößen. Während eines operativen Eingriffs wird häufig das am besten passende Teil gewählt und eingesetzt. Hier ermöglicht die additive Fertigung mit ihrer prozessbedingten geometrischen Freiheit für 3D-gedruckte Teile eine patientenindividuelle Versorgung. Als Vorbedingung muss die klassische Prozesskette angepasst werden. Der Einsatz von 3D-Röntgendiagnostik, der Druck des Implantats und die optimale Anpassung bereits vor der Operation stellen eine optimale Therapievorhersage sicher. Anhand digitaler Patientendaten

Printed mandibular distractor pads



Base plate with Laser Powder Bed Fusion-printed mandibular distractor pads made of TiAl6V4.



fertigten Forscher am Fraunhofer IWS mittels LPBF Bereiche (Pelotten) von Unterkieferdistraktoren patientenindividuell aus der Titanlegierung TiAl6V4. Dadurch entfällt die manuelle intraoperative Anpassung des Distraktors vollständig. Darüber hinaus nehmen die IWS-Wissenschaftler auch Oberflächenbeschaffenheiten und -rauigkeiten sowie verschiedene Nachbehandlungsmöglichkeiten wie Gleitschleifen und Elektropolieren in den Blick. Druckluftstrahlen mit Korund-Pulver befreit die Teile direkt nach dem Drucken von lose angebondenen Pulverpartikeln. Die Rauigkeit wird homogenisiert, sodass der Mittenrauwert bei etwa 14 Mikrometern liegt. Das Elektropolieren bringt die Oberflächenrauheit innerhalb von 20 Minuten auf Werte von rund vier Mikrometern. Auch wenn das Gleitschleifen die Bearbeitung verlängert, entsteht dadurch ein deutlich besserer Mittenrauendwert von 0,6 Mikrometern nach etwa 20 Stunden. Die Oberflächenrauheit kann gezielt das Anwachsen von Gewebe kontrollieren und einstellen, was für temporäre Implantate von enormer Bedeutung ist. Das Binder-Jetting-Verfahren zeichnet sich durch seine hohe Produktivität aus. Im Vergleich zum LPBF ist die Aufbaurrate bis zu 60 Mal so hoch. Weitere Vorteile liegen darin, dass sich der Bauraum komplett ausnutzen lässt und Stützstrukturen entfallen. So steigt die Produktivität zusätzlich und der Aufwand für manuelle Nacharbeit sinkt. Außerdem macht das Binder Jetting in Verbindung mit einer digitalisierten Prozesskette den obligatorischen Modellabdruck und das händische Nacharbeiten sowie das Entfernen von Anguss oder Stützstrukturen überflüssig.

roughness value of 0.6 micrometers after about 20 hours. The surface roughness can specifically control and regulate tissue growth, an important factor for temporary implants. The Binder Jetting process is characterized by its high productivity. Compared to LPBF, its buildup rate is up to 60 times higher. Other advantages include the fact that the installation space can be fully utilized and supporting structures are no longer required. As a result, productivity is increased and manual post-processing is reduced. In addition, Binder Jetting in conjunction with a digitized process chain avoids the need for model imprints, manual reworking and the removal of sprues or supporting structures.

- 1 Binder Jetting refines and simplifies the processing of medical devices, such as clasp prostheses.
- 2 Additive methods such as LPBF facilitate individual patient solutions, for instance pads made of TiAl6V4 (shown in green).

Research was partially funded by



CONTACT

Dr. Elena López
 Additive Manufacturing
 +49 351 83391-3296
 elena.lopez@iws.fraunhofer.de



FÜGEN

JOINING

Business unit manager

Dr. Jens Standfuß

+49 351 83391-3212

jens.standfuss@iws.fraunhofer.de



Division manager Laser Beam Joining

Group manager

Component Design (temporary)

Dr. Axel Jahn

+49 351 83391-3237

axel.jahn@iws.fraunhofer.de



Group manager

Bonding and Composite Technology

Dipl.-Ing. Annett Klotzbach

+49 351 83391-3235

annett.klotzbach@iws.fraunhofer.de



Group manager

Special Joining Technologies

Dr. Sebastian Schulze

+49 351 83391-3565

sebastian.schulze@iws.fraunhofer.de



Group manager

Laser Beam Welding

Dr. Dirk Dittrich

+49 351 83391-3228

dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de



THE BUSINESS UNIT

The Joining business unit provides solutions in single-source responsibility. Equipped with profound technical materials knowledge, the researchers cover the complex process chain from analysis of material characteristics to process development to implementation. The business unit develops customized joining technologies and helps customers transfer these solutions into industrial production. Laser welding enables the generation of defect-free welds from materials that are highly prone to cracking. For the material-locked joining of advanced functional materials and metallic composites, the IWS team refines techniques, such as friction stir welding and electro-magnetic pulse joining. Advanced labs and efficient hardware are available for the development of adhesive bonding and fiber composite technologies. In component design, the Joining business unit runs structural-mechanic Finite-Element simulations, as well as thermo-mechanically linked calculations, and verifies them in experiments. Other services include the development of customized systems hardware.

DAS GESCHÄFTSFELD

Lösungen komplett aus einer Hand bietet das Geschäftsfeld Fügen. Ausgestattet mit fundiertem werkstofftechnischen Fachwissen bilden die Forscher eine komplexe Prozesskette ab: von der Analyse des Werkstoffverhaltens über die Verfahrensentwicklung bis hin zur Umsetzung in maschinentechnischen Lösungen. Das Geschäftsfeld entwickelt angepasste Fügetechnologien und begleitet diese bis in die industrielle Anwendung. Das Laserstrahlschweißen ermöglicht es, fehlerfreie Schweißverbindungen aus risikritischen Werkstoffen herzustellen. Für stoffschlüssiges Fügen moderner Funktionswerkstoffe und metallischer Verbindungen werden Verfahren wie das Rührschweißen und das elektromagnetische Pulsfügen weiterentwickelt. Moderne Labore und effiziente Anlagentechnik stehen für die Entwicklung von Technologien des Klebens und der Faserverbundtechnik zur Verfügung. In der Bauteilauslegung erstellt das Geschäftsfeld Fügen strukturmechanische Finite-Elemente-Simulationen sowie thermisch-mechanisch gekoppelte Berechnungen und verifiziert diese im Experiment. Abgerundet wird das Portfolio mit der Entwicklung individuell angepasster Systemtechnik.



HIGHLIGHT

remoweld®-MES: Laser-Mehrlagen-Schweißen ins Reich der Mitte transferiert

Dickwandige metallische Bauteile aus Stählen sowie Aluminium- und Nickellegierungen kommen besonders im Kraftwerks- und Chemieanlagenbau als Kernkomponenten vieler Strukturen zum Einsatz. Deren schweißtechnische Verarbeitung gehört mit Blick auf Effizienz in der Fertigung und Qualität zu den Schlüsselfaktoren. Das Fraunhofer IWS hat eine Lösung entwickelt, mit der sich Bauteile mit Wandstärken von bis zu 150 Millimetern per Laser verschweißen lassen: *remoweld®*-MES («Laser-Mehrlagen-Engstspalt-Schweißen»). Die verfahrens- und systemtechnische Lösung zum Laserstrahlschweißen benötigt dafür eine geringe Ausgangsleistung von weniger als fünf Kilowatt. Die Dresdner Wissenschaftler stellen auf diese Weise sicher, dass die Eigenschaften des Grundwerkstoffs neben der Schweißnaht kaum beeinflusst werden und die erzeugten Schweißverbindungen riss- und weitgehend porenfrei sind. So lässt sich auch der Bauteilverzug gegenüber konventionellen Verfahren stark minimieren und aufwändige Richtprozesse der geschweißten Bauteile einsparen. Eine Verkürzung der Fertigungskette rückt in greifbare Nähe. Überzeugt von den Vorteilen der Laser-MES-Technologie bestellte eine führende chinesische Universität aus Shanghai in einer bilateralen Kooperation eine erste Prototyp-Anlage, die Wissenschaftler des Fraunhofer IWS im chinesischen Laserzentrum installierten und die nun chinesischen Unternehmen für gemeinsame Entwicklungen zur Verfügung steht. Auch 50 Millimeter dicke Aluminiumbauteile lassen sich verzugsfrei schweißen, wie z.B. für Tieftemperaturanwendungen wie Flüssiggastransport oder Gasverflüssigung.

HIGHLIGHT

remoweld®-MPNG: Laser multi-pass narrow gap welding transferred to the Middle Kingdom

Thick-walled metallic components made of steels or aluminum and nickel alloys are applied as core components of many structures, especially in power plant and chemical plant construction. Welding processing is one of the key factors in terms of production efficiency and quality. Fraunhofer IWS has developed a solution for laser welding components with wall thicknesses of up to 150 millimeters: *remoweld®*-MPNG ("Laser-Multi-Pass Narrow Gap Welding"). The process and systems technological solution for laser beam welding requires a low output line of less than five kilowatts. In this way, the Dresden scientists ensure that the properties of the base material are hardly influenced along the welded joint and that the joints are crack-free and almost free of pores. As a result, compared to conventional processes, component distortion can be strongly minimized and complex aligning processes can be saved. It is now within reach to shorten the production chain. Convinced of the advantages of laser MPNG technology, a leading Chinese university from Shanghai ordered a first prototype system as part of bilateral cooperation. Fraunhofer IWS scientists installed the system in the Chinese Laser Center and it is now available to Chinese companies for joint developments. Even 50-millimeter-thick aluminum components can be welded without distortion, e.g. for low temperature applications such as liquid gas transport or gas liquefaction.

1 *Fraunhofer IWS remoweld®-MPNG welding head after successful implementation in a robot welding cell belonging to an Asian research laboratory.*

STABILES LASERSTRAHLSCHWEISSEN MIT ANGEPASTER INTENSITÄTSVERTEILUNG

RELIABLE LASER BEAM WELDING WITH ADAPTED INTENSITY DISTRIBUTION

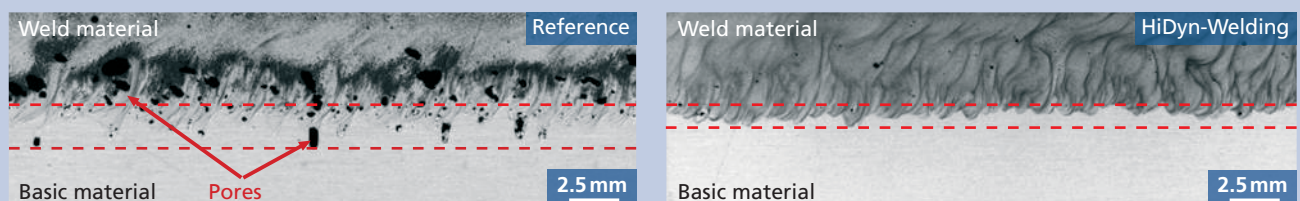
Laser beam sources with brilliant beam quality facilitate new machining processes. The beam intensity must be adjusted for best possible results. One option is the successfully implemented high-frequency beam oscillation in the x-y plane with REMOweld®-Flex. The new approach is to control the beam energy via dynamic beam shaping with piezo-operated deformable mirrors in the third dimension.

Smart laser machining processes are becoming increasingly interesting for many industrial cutting and welding applications. In many cases, flexible adjustment of the focus point or beam density is required to respond to changing process conditions. Laser processes can be significantly improved by high-frequency beam oscillation in the x-y plane. New requirements additionally demand a fast, active vertical shift of the beam focus and thus the energy within the workpiece. As a result, process stability, speed and component quality can be significantly improved due to sufficiently high frequency and repeatable focus positioning. As part of the "PISTOL³"

Laserstrahlquellen mit brillanter Strahlqualität ermöglichen neue Bearbeitungsprozesse. Für bestmögliche Ergebnisse kann die Strahlintensität angepasst werden. Die erfolgreich umgesetzte hochfrequente Strahloszillation in der x-y-Ebene mit REMOweld®-Flex ist eine Variante. Neu ist der Ansatz, die Strahlenergie über eine dynamische Strahlformung mit piezobetriebenen, verformbaren Spiegeln in der dritten Dimension zu steuern.

Intelligente Laserbearbeitungsprozesse werden für viele industrielle Anwendungen beim Schneiden und Schweißen immer interessanter. In vielen Fällen ist eine flexible Anpassung der Fokusposition oder der Strahlintensität erforderlich, um auf veränderte Prozessbedingungen zu reagieren. So lassen sich Laserprozesse durch eine hochfrequente Schwingung des Strahls in der x-y-Ebene deutlich verbessern. Neue Anforderungen verlangen zusätzlich nach einer schnellen, aktiven vertikalen Verschiebung des Strahlfokus und der Energie im Werkstück. Durch ausreichend hohe Frequenz und wiederholbare Fokus-

Metallographic longitudinal cross-sections through welding seams of an aluminum-magnesium alloy

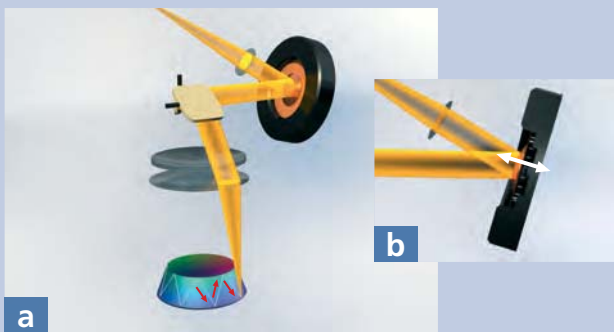


Left: Conventional laser beam welding (pores, strongly varying). Right: Welding process with high-frequency focus shift (pore-free, reliable welding depth).

1



Basic principle of vertical focus shift by a deformable mirror membrane



a: The deformable mirror membrane allows fast and active vertical shifting of the beam focus and the energy in the workpiece.
b: Basic principle of vertical focus shift by a deformable mirror membrane.

positionierung werden Prozessstabilität, -geschwindigkeit und Bauteilqualität deutlich verbessert. Im Rahmen des Kooperationsprojekts »PISTOL³« entwickelte das IWS gemeinsam mit mehreren Partnern ein neuartiges Konzept einer piezoelektrisch getriebenen Fokussieroptik. Dieses »HiDyn-Modul« realisiert die piezoaktorische Deformation einer Spiegelmembran. Integriert in herkömmliche Laser-Bearbeitungsoptiken ermöglicht es eine hochdynamische Strahlformung mit bis zu 2,5 Kilohertz. Die Fokuslagenänderung um den Faktor drei bis fünf bezüglich der Rayleigh-Länge bewirkt die Änderung der Strahlintensität auf der Werkstückoberfläche um etwa den Faktor vier. Erste Versuche zeigen beim Laserstrahlschweißen von Aluminium-Magnesium-Legierungen eine signifikante Verbesserung der Nahtqualität. Weitere Anwendungen zum Schneiden und Strukturieren sind Gegenstand aktueller Entwicklungen.

cooperation project, Fraunhofer IWS collaborated with several partners to develop a novel concept for piezoelectric dynamic focusing optics. This "HiDyn module" realizes the piezoelectric deformation of a mirror membrane. Integrated in conventional laser processing optics, it enables highly dynamic beam shaping with up to 2.5 kilohertz. The modulation in focus position by a factor of three to five with respect to the Rayleigh length causes the beam intensity on the workpiece surface to change by a factor of about four. During the laser beam welding of aluminum-magnesium alloys, initial tests have demonstrated a significant improvement in the seam quality. Current developments focus on further applications for cutting and structuring.

1 HiDyn module for piezo-driven beam modulation, developed in cooperation with Fraunhofer IOF and Physikinstrumente GmbH.

The HiDyn module was developed in cooperation with Fraunhofer IOF and Physikinstrumente GmbH. The project PISTOL³ was funded by the Federal Ministry of Education and Research within the initiative "Zwanzig20" in the smart³ network.

Funded by



CONTACT

Dr. Axel Jahn
Laser Beam Joining
+49 351 83391-3237
axel.jahn@iws.fraunhofer.de



METALLISCHE MISCHVERBINDUNGEN – PROZESSICHER FÜGEN

METALLIC MULTI-MATERIAL JOINTS – RELIABLE JOINING PROCESSES

Increasing demands on technical designs, resource efficiency and recycling capability require an optimized use of materials. The right metallic material in the right place enables to meet these demands and is a suitable solution for a wide range of applications. The focus is on adapted, modern joining technology, as it is often not possible to create the desired multi-material joints conventionally.

Metallic multi-material constructions are becoming increasingly interesting, above all for automotive development, whether in steel-light metal bodies, aluminum-copper contacts for e-mobility or in drive systems. Conventional fusion welding processes are not suitable for manufacturing these multi-material metal joints, e.g. between steel and aluminum, because brittle intermetallic phases are formed. The challenge is therefore to suppress this phase formation as far as possible. At Fraunhofer IWS, low-heat joining processes are therefore being developed to generate loadable direct multi-material joints between metals.

Laser beam welding with transition joint

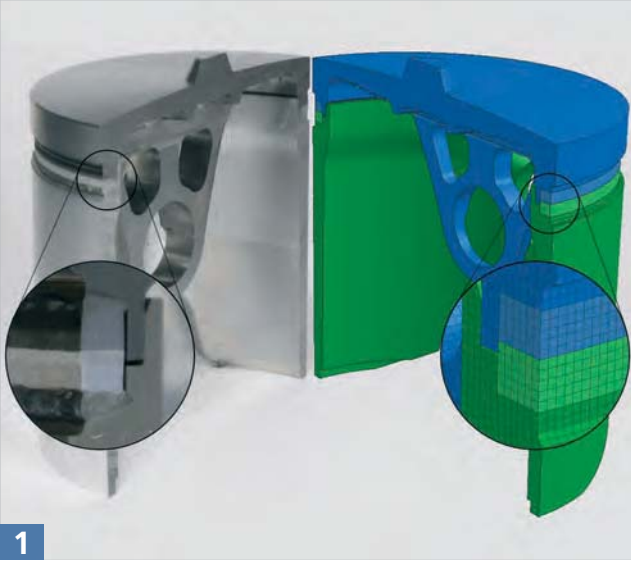
One possibility is a specially prefabricated bimetal strip, e.g. made of steel and aluminum, as a so-called "transition joint". This can be generated using an IWS-developed laser induction roll plating process, which optimizes the strength and formability of the multi-material joint zone. A low-heat laser beam welding process subsequently joins both individual layers directly with the joining partners (steel-steel and alu-

Steigende Anforderungen an technische Konstruktionen, Ressourceneffizienz und Recyclingfähigkeit erfordern einen angepassten Werkstoffeinsatz. Der richtige metallische Werkstoff an der richtigen Stelle ermöglicht es, diese Bedingungen zu erfüllen, und ist Lösung für vielfältige Anwendungen. Angepasste, moderne Fügeverfahren rücken dabei in den Fokus, denn oft lassen sich die gewünschten Mischverbindungen nicht auf herkömmliche Weise herstellen.

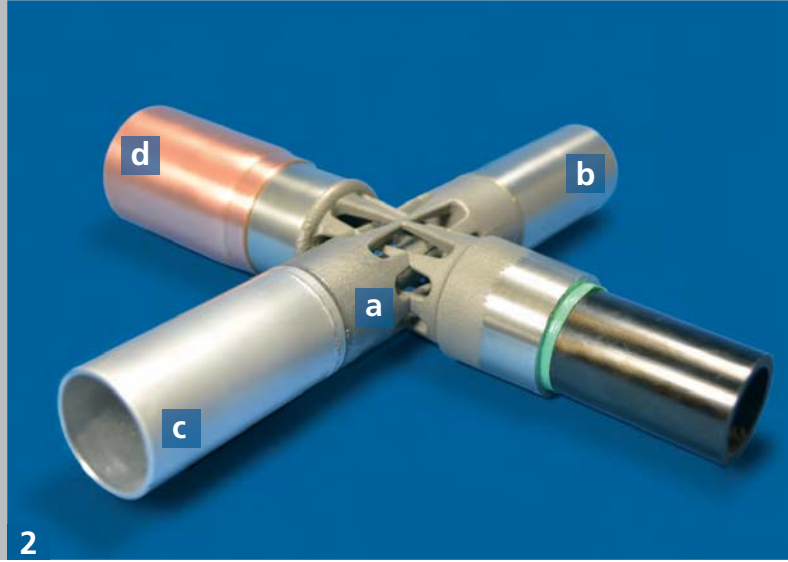
Metallische Mischbauweisen sind vor allem für die Automobilentwicklung zunehmend interessant, sei es in Stahl-Leichtmetall-Karosserien, in Aluminium-Kupfer-Kontakten für die E-Mobilität oder im Antrieb. Die üblichen Schmelzschweißverfahren eignen sich nicht für die Herstellung metallischer Mischverbindungen, z. B. zwischen Stahl und Aluminium, weil spröde intermetallische Phasen entstehen. Die Herausforderung besteht somit darin, diese Phasenbildung weitestgehend zu unterdrücken. Am Fraunhofer IWS werden deshalb wärmearme Fügeverfahren entwickelt, um belastbare stoffschlüssige Mischverbindungen zwischen Metallen zu erzeugen.

Laserstrahlschweißen mit Transition Joint

Eine Möglichkeit bietet ein speziell vorgefertigtes Bimetall-Band, z.B. aus Stahl und Aluminium, als sogenannter »Transition-Joint«. Dieser lässt sich über ein am IWS entwickeltes Laser-Induktions-Walzplattierverfahren herstellen, wobei Festigkeit und Umformbarkeit der Mischverbindungszone optimiert werden. Wärmearmes Laserstrahlschweißen fügt anschließend beide Einzellagen direkt mit den Fügepartnern (Stahl-Stahl bzw. Alu-Alu).



1



2

Im Ergebnis entsteht eine stoffschlüssige Verbindung mit bisher nicht erreichter Belastbarkeit. In einem Kooperationsprojekt wurde auf diese Weise ein Stahl-Aluminium-Mischbaukolben für Hochleistungs-Verbrennungsmotoren entwickelt und prototypisch aufgebaut.

Rührreibschweißen oder elektromagnetisches Pulsfügen

Mechanisch belastbare Mischverbindungen lassen sich aber auch durch direktes Fügen der Metalle mit minimalem thermischen Energieeintrag erzeugen. So ermöglicht z. B. das Rührreibschweißen die sichere stoffschlüssige Verbindung zwischen Aluminium- und Kupferlegierungen. Bei diesem Verfahren wird über ein rotierendes Werkzeug der zu fügende Werkstoff in einen teigigen Zustand gebracht und verrührt. Eine weitere Möglichkeit stellt das elektromagnetische Pulsfügen dar. Dieses Verfahren erzeugt über die elektromagnetische Beschleunigung eines Fügepartners eine kontrollierte Hochgeschwindigkeitskollision mit dem zweiten Fügepartner. Dadurch verschweißen die Oberflächen lokal miteinander. In beiden Fällen sorgt die niedrige Prozesstemperatur für eine haltbare metallische Verbindung, ohne dass sich nennenswerte störende intermetallische Phasen bilden.

minum-aluminum). The result is a material-locking joint with a load capacity never before achieved. In this way, a steel-aluminum piston for high-performance combustion engines was developed and prototypically designed in a cooperative project.

Friction stir welding or electromagnetic pulse joining

Mechanically loadable multi-material joints can also be generated by directly joining the metals with minimal thermal energy input. Friction stir welding enables a reliable metallic joint between aluminum and copper alloys. In this process, the material is softened and stirred using a rotating tool. Another technique is electromagnetic pulse joining. This method generates a controlled acceleration of one joining partner by an electromagnetic field. As a result, both partners collide rapidly and the surfaces weld locally together. In both cases, low process temperature ensures a durable metallurgical bond without critical intermetallic phases.

- 1 *Steel-aluminum piston for combustion engines: The highly loaded piston crown is made of steel, the piston skirt of aluminum.*
- 2 *Demonstrator for metallic mixed joints: (a) Basic body (stainless steel) joined with (b) steel, (c) aluminum or (d) copper.*

CONTACT

Dr. Axel Jahn
 Laser Beam Joining
 +49 351 83391-3237
 axel.jahn@iws.fraunhofer.de



CONTIJOIN – SCHWEISSEN THERMOPLASTISCHER HOCHLEISTUNGSKUNSTSTOFFE

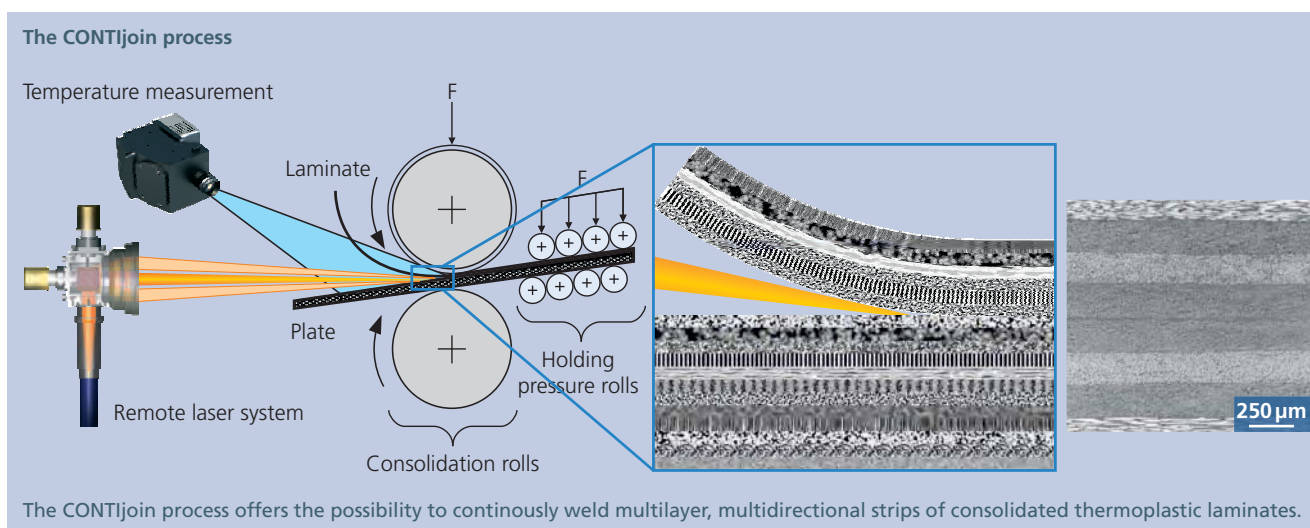
CONTIJOIN – WELDING OF THERMOPLASTIC HIGH-PERFORMANCE POLYMERS

Due to their lightweight construction potential and excellent processing properties, thermoplastic high-performance polymers are increasingly being used in modern constructions. The automated laser welding of fiber-reinforced thermoplastic laminates has so far posed a challenge. Fraunhofer IWS is developing a continuous joining process for welding multidirectional laminates of fiber-plastic composites (FRPC).

In the "TRumpf" joint project of the "LuFo V-3" aerospace research program funded by the Federal Ministry of Economics and Technology, Fraunhofer IWS scientists are exploring concepts for joining strip-shaped thermoplastic semi-finished products in cooperation with their partner Airbus. They aim to structurally joining monolithic fuselage segments by means of continuous laser beam welding

Aufgrund ihres Leichtbaupotenzials sowie hervorragender Verarbeitungseigenschaften kommen in modernen Konstruktionen vermehrt auch thermoplastische Hochleistungskunststoffe zum Einsatz. Das automatisierte Laserschweißen faserverstärkter Thermoplastlaminat stellt bislang eine Herausforderung dar. Am Fraunhofer IWS wird ein kontinuierlicher Fügeprozess zum Schweißen multidirektionaler Laminat aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) entwickelt.

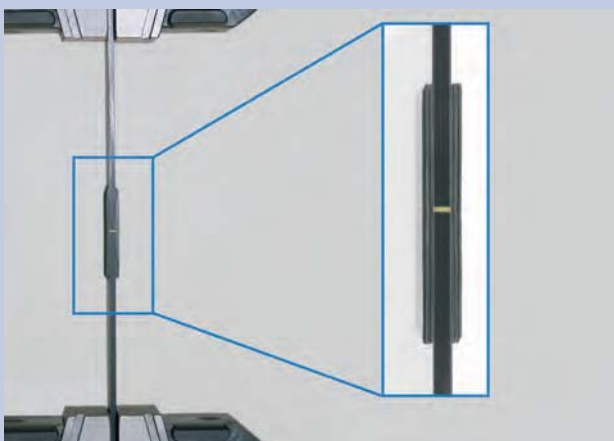
In dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Verbundprojekt »TRumpf« des Luftfahrtforschungsprogramms »LuFo V-3« untersuchen Wissenschaftler des Fraunhofer IWS in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Airbus Konzepte zum Schweißen bandförmiger Thermoplasthalbzeuge. Ziel ist es, monolithische Rumpfsegmente mittels kontinuierlicher





Laserstrahlschweißverfahren (CONTIjoin) strukturell zu fügen. Der im Projekt gewählte Verfahrensansatz ähnelt dem Prozess des automatisierten Tapelegens (ATL). Während sich Verfahren wie dieses auf die Verarbeitung unidirektionaler Materialien beschränken, wurden im Vorhaben innerhalb eines Fertigungsschritts erfolgreich mehrlagige multidirektionale Streifen konsolidierter Lamine aus Kohlefasern und Polyetherketonketon (CF/PEKK) abgelegt. Möglich wird dies durch den Einsatz eines CO₂-Lasers in Verbindung mit einer hochdynamischen Strahlablenkung sowie einer temperaturgesteuerten Laserleistungsregelung. Das hierfür entwickelte Systemkonzept gewährleistet trotz unterschiedlicher Schmelzenthalpien der Fügeelemente die Einhaltung einer konstanten Schweißtemperatur während des gesamten Fügeprozesses. Entsprechende Strahlbewegungskonzepte mit defokussierter Laserstrahlung ermöglichen quasi-simultan die graduelle Vorwärmung sowie Schweißung während des Ablegevorgangs. Mit dem CONTIjoin-Verfahren lassen sich aktuell multidirektionale Laminatstreifen bspw. aus bis zu sechs Einzellagen CF/PEKK mit einer Gesamtdicke von einem Millimeter innerhalb eines Fertigungsschritts ablegen. Die erzielte Prozessgeschwindigkeit liegt bei etwa 0,4 Metern pro Minute.

Validation of placement quality



Investigation of the placement parameters through mechanical characterization of a welded CF/PEKK double strap joint.

(CONTIjoin). The approach used in the project is similar to the automated tape laying (ATL) process. But such methods are limited to the processing of unidirectional materials. The developed CONTIjoin process allows to weld multi-layer multidirectional strips of consolidated laminates consisting of carbon fibers and polyetherketoneketone (CF/PEKK) in one production step. This is achieved by connecting a CO₂ laser with highly dynamic beam deflection and temperature-guided laser power control. The developed system concept ensures a constant welding temperature during the joining process. Corresponding beam movement concepts with defocused laser radiation enable quasi-simultaneous gradual preheating and welding during the process. With the CONTIjoin process, multidirectional laminate strips can currently be placed, for example, from up to six individual plies of CF/PEKK with a total thickness of one millimeter in one production step. The process speed achieved is around 0.4 meters per minute.

Funded by



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

FKZ: 20W1721C

CONTACT

Dipl.-Ing. Maurice Langer

Bonding and Composite Technology

+49 351 83391-3852

maurice.langer@iws.fraunhofer.de



LASERABTRAGEN UND -TRENNEN

LASER ABLATION AND CUTTING

Business unit manager

Dr. Andreas Wetzig

+49 351 83391-3229

andreas.wetzig@iws.fraunhofer.de

Division manager High Speed Laser Processing

Group manager

Laser Cutting of Non-Metals (temp.)

Dr. Jan Hauptmann

+49 351 83391-3236

jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de



Group manager Laser Cutting

Dr. Patrick Herwig

+49 351 83391-3199

patrick.herwig@iws.fraunhofer.de



Group manager Process Design and Analysis

Dr. Achim Mahrle

+49 351 83391-3407

achim.mahrle@iws.fraunhofer.de



Group manager Laser Systems Engineering

Dipl.-Ing. Peter Rauscher

+49 351 83391-3012

peter.rauscher@iws.fraunhofer.de



THE BUSINESS UNIT

Highly specialized and innovative – the Laser Ablation and Cutting business unit plays a key role in all those application fields for which the market does not offer any suitable solutions. The scientists research and develop processes and systems technology related to lasers. Process design and analysis complete the portfolio to guarantee the efficient use of the developed solutions. A broad range of established laser sources with various wavelengths, power and beam quality is available at Fraunhofer IWS. The researchers focus both on metallic and non-metallic materials. However, they also have comprehensive expertise in processing soft magnetic materials. Cutting speed, edge quality, contouring accuracy and cycle time optimization are crucial parameters. The team employs techniques that include laser fusion cutting, oxygen cutting and remote laser cutting, as well as drilling, ablation and high-speed processing with high-power lasers.

DAS GESCHÄFTSFELD

Hochspezialisiert und unkonventionell – das Geschäftsfeld Laserabtragen und -trennen kommt bei allen Anforderungen ins Spiel, für die der Markt keine passenden Lösungen bereithält. Die Wissenschaftler erforschen und entwickeln Verfahren und Systemtechnik rund um den Laser. Für den effizienten Einsatz der entwickelten Lösungen runden die Prozessauslegung und -analyse das Portfolio ab. Dem Fraunhofer IWS steht eine breite Spanne gängiger Laserquellen unterschiedlicher Wellenlängen, Leistungen und Strahlqualitäten zur Verfügung. Die Forscher fokussieren sich sowohl auf metallische als auch nicht metallische Werkstoffe. Darüber hinaus verfügen sie über umfassendes Fachwissen hinsichtlich der Bearbeitung weichmagnetischer Werkstoffe. Im Fokus stehen Schnittgeschwindigkeit, Kantenqualität, Konturgenauigkeit und Taktzeitoptimierung. Zum Einsatz kommen Verfahren wie das Schmelz-, Brenn- und Remoteschneiden sowie das Bohren, Abtragen sowie das Hochgeschwindigkeitsbehandeln mit hohen Laserleistungen.

HIGHLIGHT

Inline-Laserbehandlung von kornorientiertem Elektroblech

Eine effiziente Energieübertragung spielt im Zuge der Energiewende eine entscheidende Rolle. Mit dem steigenden Anteil regenerativer Energien sowie einer zunehmend dezentralen Stromerzeugung ergeben sich neue Anforderungen an die Netzinfrastruktur. Gleichzeitig müssen die zur Übertragung notwendigen Transformatoren effizienter werden, indem die mit der Übertragung verbundenen Verluste reduziert werden. Sogenannte Ummagnetisierungsverluste lassen sich mittels Laserbehandlung des Transformatorkerns verringern. Dabei werden thermische Spannungen lotsenkrecht zur Walzrichtung in einem äquidistanten Abstand in das Bandmaterial eingebracht. Sie führen zu einer Verfeinerung der magnetischen Domänen und reduzieren somit die Ummagnetisierungsverluste um mehr als zehn Prozent. Zudem soll die Laserbehandlung die Isolationsschicht nicht beschädigen. Zusammen mit Coherent-Rofin und der Maschinenfabrik Arnold installierte das Fraunhofer IWS bei thyssenkrupp Electrical Steel in Gelsenkirchen ein Strahlableitensystem, das aus drei Faserlasern besteht und auf hochdynamischen Scanspiegeln basiert, die den Laserstrahl über die gesamte Bandbreite bewegen. Aufgrund der hohen Scangeschwindigkeiten von bis zu 300 Metern pro Sekunde lassen sich Bandgeschwindigkeiten von bis zu 90 Metern pro Minute erreichen. Das in eine bestehende Bandanlage integrierte Strahlableitensystem zur Laserbehandlung von kornorientiertem Elektroblech synchronisiert die Behandlungsparameter automatisch mit der aktuellen Bandgeschwindigkeit. Die Laserbehandlung ist über ein industrielles Feldbussystem mit dem Steuerungssystem der Bandanlage verbunden, sodass deren Steuerung und Überwachung zentral vom Leitstand erfolgen kann. Das Strahlableitensystem ist für einen Betrieb rund um die Uhr konzipiert und wird zur finalen Veredelung von kornorientiertem Elektroblech verwendet.

HIGHLIGHT

Inline laser processing of grain-oriented electrical steel sheets

In the energy transition, efficient energy transmission plays a decisive role. With the rising share of renewable energy and increasingly decentralised power generation, new demands are being placed on the grid infrastructure. At the same time, the transformers required for transmission must improve efficiency by reducing losses at transmission. So-called core losses can be reduced by laser processing of the transformer core. Thermal stresses perpendicular to the rolling direction are applied to the strip material at an equidistant distance, reducing the width of the magnetic domains and thus minimizing core losses by more than ten percent. In addition, the laser processing is not to damage the insulation layer on the material. Together with Coherent-Rofin and Maschinenfabrik Arnold, Fraunhofer IWS installed a beam deflection system at thyssenkrupp Electrical Steel in Gelsenkirchen. The beam deflection system consists of three fiber lasers and is based on highly dynamic scanning mirrors that move the laser beam across the entire bandwidth. Due to the high scanning velocities of up to 300 meters per second, coil speeds of up to 90 meters per minute can be achieved. The beam deflection system integrated into an existing silicon steel line of grain-oriented electrical steel automatically synchronizes the treatment parameters to the current coil speed. An industrial fieldbus system links the laser processing to the control system of the silicon steel line, so that it can be controlled and monitored centrally from the control station. The beam deflection system is designed for twenty-four seven operation and is used for the final finishing of grain-oriented electrical steel.

GLEICHER STAHL, UNTERSCHIEDLICHE CHARGE: EINFLUSS AUF DEN LASERSCHNITT

SAME STEEL, DIFFERENT BATCH: INFLUENCE ON LASER CUTTING

The laser is the most universal tool for cutting various materials. Thickness-dependent adjustment of cutting parameters significantly influences the quality of the cutting results. In this context, the influence of the material also plays a decisive role. According to the standard, steels of the same material quality can have tolerances in the element content. Differences within these tolerances have a crucial influence on the cutting result.

For over 40 years, laser cutting of thick sheet metal has been an established cutting process. In spite of its long tradition, the continuous development of laser sources and cutting material creates new challenges when it comes to achieving high-quality cutting results. In the course of globalization, material from all parts of the world is processed. Even if the alloy composition complies with valid standards, it is subject to regional fluctuations. Nevertheless, significant differences can be observed in the cutting quality of steels of the same material grade. These quality losses can be seen generally in burr adhesion and increased roughness values of the cutting edge. Researchers at Fraunhofer IWS therefore studied the influence of the material composition. In a first step, they classified the alloying elements into categories. They were classified into surface-active and surface-neutral elements. The former directly influence the melting phase of the material, while the latter indirectly affect the surface-active elements. In this categorization the positive influence of the surface-active element sulfur has already been demonstrated. Further investigations focus on solving the questions of how individual elements of a specific material composition affect

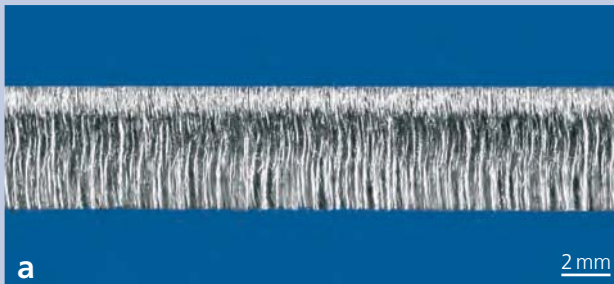
Der Laser ist das universelle Werkzeug zum Trennen verschiedener Werkstoffe. Eine dickenabhängige Anpassung der Schneidparameter beeinflusst die Qualität der Schneidergebnisse maßgeblich. Dabei spielt der Materialeinfluss ebenfalls eine Rolle. Stähle gleicher Werkstoffgüte können laut Norm Toleranzen im Elementgehalt aufweisen. Unterschiede innerhalb dieser Toleranzen wirken sich entscheidend auf das Schneidergebnis aus.

Das Laserstrahlschneiden von Dickblech ist ein seit über 40 Jahren etabliertes Trennverfahren. Trotz der langen Tradition entstehen aufgrund stetiger Weiterentwicklung der Laserquellen und der zu schneidenden Werkstoffe neue Herausforderungen, wenn es darum geht, qualitativ hochwertige Schneidergebnisse zu erzielen. Im Zuge der Globalisierung wird Material aus allen Teilen der Welt bearbeitet. Auch wenn die Legierungszusammensetzung gültigen Normen entspricht, unterliegt sie regionalen Schwankungen. So lassen sich dennoch signifikante Unterschiede in der Schnittqualität bei Stählen gleicher Güte feststellen. Diese Qualitätsverluste zeigen sich vor allem in unerwünschter Grathaftung und erhöhten Rauheitswerten der Schnittkante. Forscher des Fraunhofer IWS untersuchten daher den Einfluss der Materialzusammensetzung. Im ersten Schritt unterteilten sie die Legierungselemente in Kategorien. Die Zuordnung erfolgte dabei in grenzflächenaktive und -neutrale Elemente. Erstere beeinflussen die Schmelzphase des Werkstoffs direkt, während sich Letztere eher indirekt auf die grenzflächenaktiven Elemente auswirken. In dieser Kategorisierung ließ sich bereits der positive Einfluss des grenzflächenaktiven Elements Schwefel zeigen. Weiterführende Untersuchungen widmen sich den

1



Cutting edge of chrome-nickel steel 1.4301



Cutting edge of a 5 mm specimen (a) without burr adhesion and (b) with burr adhesion.

Fragen, wie sich einzelne Elemente einer chargenspezifischen Zusammensetzung auf das Schneidergebnis auswirken und wie eine Anpassung der Parameter dieses verbessert. Zukünftig soll das Werkstoffzeugnis die Wahl chargenspezifischer Schnittparameter ermöglichen, indem ein Modell erstellt wird, das spezifische Werkstoffverhalten berücksichtigt.

the cutting result and how an adjustment of the parameters improves the result. In the future, the material certificate should enable the selection of batch-specific cutting parameters by generating a model that considers specific material behavior.

1 Fork-shaped specimen to determine the cutting edge properties.

CONTACT

Dipl.-Ing. Thomas Wanski

Laser Cutting

+49 351 83391-3066

thomas.wanski@iws.fraunhofer.de



KANTENTOPOGRAPHIE BEIM LASERSCHMELZSCHNEIDEN

EDGE TOPOGRAPHY FOR LASER FUSION CUTTING

The formation of edge topography in laser fusion cutting raises a number of unresolved questions. Current Fraunhofer IWS research focuses on the influence of the gas flow on the edge quality and possible solutions for process optimization.

Laser cutting of stainless steel metal sheets is an established manufacturing process. However, the specific interaction between process parameters and cutting results has not yet been sufficiently investigated and results in increased experimental effort to determine optimal process windows. In order to close this information deficit, Fraunhofer IWS and TU Dresden scientists performed cutting experiments under controlled process conditions and systematically analyzed the morphology of the cutting edges using high-resolution imaging techniques. As a result, they introduced a novel classification of the cutting edge into several structural zones. The zones differ significantly in roughness and typical surface structures. In a more detailed analysis of the cut edge topography, the scientists were surprised to discover previously unknown surface features. In the upper part of the cut edges they identified small grooves with a diameter of about 20 micrometers. However, the secondary structures between the vertical grooves in the lower part of the cutting edge are particularly remarkable. Here they discovered accumulations of solidified melt residues with a spiral surface structure. The researchers observed an accumulation on only one side of the grooves and mainly with the same direction of spiral rotation. From the spatial linkage of the shapes they concluded that the formation of grooves and secondary structures is an interrelated process. The

Die Entstehung der Kantentopographie beim Laserschmelzschneiden wirft eine Reihe ungeklärter Fragen auf. Aktuelle Arbeiten am Fraunhofer IWS beschäftigen sich mit dem Einfluss der Gasströmung auf die Kantenqualität und möglichen Lösungsansätzen einer Prozessoptimierung.

Das Trennen von hochlegierten Stahlblechen mit dem Laserstrahl ist ein etabliertes Fertigungsverfahren. Der konkrete Zusammenhang zwischen den verwendeten Prozessparametern und dem Schneidergebnis ist aber bislang ungenügend verstanden und dies führt zu einem erhöhten experimentellen Aufwand zur Bestimmung optimaler Prozessfenster. Um diese Wissenslücke zu schließen, haben Wissenschaftler des Fraunhofer IWS und der TU Dresden Schneidversuche unter kontrollierten Prozessbedingungen durchgeführt und die Morphologie der Schnittkanten systematisch mit hochauflösenden Bildgebungsverfahren untersucht. Im Ergebnis haben sie eine neuartige Einteilung der Schnittkante in mehrere Strukturzonen eingeführt. Die Zonen unterscheiden sich teils deutlich in ihrer Rauheit und ihren typischen Oberflächenstrukturen. Bei der genaueren Analyse der Schnittkantentopographie waren die Wissenschaftler überrascht, als sie bisher unbekannte Oberflächenformen entdeckten. Im oberen Teil der Schnittkanten fanden sie kleine Vertiefungen mit einem Durchmesser von rund 20 Mikrometern. Besonders bemerkenswert sind allerdings die sekundären Strukturen zwischen den markanten vertikalen Riefen im unteren Teil der Schnittkante. Hier entdeckten sie aneinandergereihte Anhäufungen aus erstarrten Schmelzresten mit einer spiralförmigen Oberflächenstruktur. Die Forscher stellten fest, dass diese Anhäufungen meist nur auf einer Seite der Riefen auftreten und



1

50 μm



2

mehrheitlich dieselbe Spiraldrehrichtung aufweisen. Aus der räumlichen Verknüpfung der Formen schlossen sie auf eine zusammenhängende Entstehung von Riefen und Sekundärstrukturen. Spiralförmigkeit und Anordnung der Schmelzreste deuten außerdem auf eine Beteiligung der Gasströmung an der Struktur-entstehung hin. Um die Wechselwirkung zwischen Schneidgas und Material genauer zu untersuchen, wurden hochaufgelöste Simulationen der Gasströmung durchgeführt. Im Mittelpunkt des Interesses lagen hier besonders die Vorgänge in Wandnähe. Die Simulationen enthüllten eine unbekannt komplexe Wirbelstruktur im Schneidgas, die durch den Übergang von dessen laminarer Strömungsform in die turbulente verursacht wird. Die IWS-Wissenschaftler stellten eine Übereinstimmung zwischen den berechneten Wirbelstrukturen und den beobachteten Strukturen auf den Schnittkanten fest. Damit wiesen sie auf den Einfluss der Gasströmung auf die Schnittkantenqualität hin und eröffneten somit ein neues Forschungsfeld zur Beeinflussung des Schneidergebnisses.

spiral shape and arrangement of the melting residues also indicate that the gas flow is involved in the structure formation. High-resolution simulations of the gas flow were performed to investigate the interaction between cutting gas and material in more detail. The scientists focused their main interest especially on the processes near the wall. The simulations revealed an unknown complex vortex structure in the cutting gas, caused by the transition from its laminar flow form to the turbulent one. The IWS scientists identified a match between the calculated vortex shapes and the observed structures on the cutting edges. Thus they pointed out the influence of the gas flow on the cut edge quality and opened up a new field of research for influencing the cutting result.

- 1 *Microscope image of the lower cutting edge with grooves and spiral-shaped secondary structures.*
- 2 *The simulation result of the gas flow in the cutting gap shows a complex vortex structure near the wall.*

CONTACT

Dipl.-Math. Madlen Borkmann

Process Design and Analysis

+49 351 83391-3720

madlen.borkmann@iws.fraunhofer.de





1

TECHNOLOGIE- UND SYSTEMTECHNIKENTWICKLUNG FÜR DAS HOCHRATELASERABTRAGEN

TECHNOLOGY AND SYSTEMS DEVELOPMENT FOR HIGH-RATE LASER ABLATION

Drives for electromobility require maximum currents, which have led to the development of pin and hairpin technology. The step from coiled conductive wire to rods requires new mounting and contacting methods. Welding and soldering provide the electrical connection for the individual conductors. This requires a bare copper surface, which is locally stripped and free of residues.

Fraunhofer IWS studied hairpin processing and faced the special challenges of continuous workpiece movement, the high reflectivity of copper for a large number of relevant laser wavelengths and the targeted ablation rates of more than $1,000\text{mm}^2\text{ s}^{-1}$. The scientists used high-power beam sources with wavelengths of 1.07, 9.3 and 10.6 micrometers to map the ablation process to meet individual requirements and to obtain optimum results. Continuously emitting lasers with average output powers of one kilowatt and more in combination with highly dynamic beam deflection systems were used to achieve the required extremely high ablation rates. The intensive study of the ablation process and the associated determination of the parameters such as laser power and focus diameter were the basis for determining the processing strategy. A multi-stage process ensures the ablation result. In order to ensure the required productivity, the IWS researchers designed a processing setup consisting of a beam source, a uniform laser beam splitting and two opposing galvanometer scanners. This constellation of two partial beams in combination with a highly reflective workpiece required a segmented processing sequence. The design of the optical beam path, the selection of the components and

Antriebsmotoren für die Elektromobilität benötigen maximale Stromstärken, die zur Entwicklung der Pin- bzw. Hairpin-Technologie geführt haben. Der Schritt vom gewickelten Leitungsdraht zu Stäben bedingt neue Montage- und Kontaktierungsverfahren. Schweißen und Löten stellen die elektrische Verbindung der Einzelleiter her. Dies erfordert eine blanke Kupferoberfläche, die lokal abisoliert und frei von Rückständen ist.

Das Fraunhofer IWS beleuchtete die Hairpin-Bearbeitung und stellte sich dabei den besonderen Herausforderungen der kontinuierlichen Bewegung des Werkstücks, der hohen Reflexion des Kupfers gegenüber einer Vielzahl relevanter Laserwellenlängen und den angestrebten Abtragsraten jenseits von $1000\text{mm}^2\text{ s}^{-1}$. Dazu nutzten die Wissenschaftler Hochleistungsstrahlquellen mit Wellenlängen von 1,07, 9,3 und 10,6 Mikrometern, um den Abtragsprozess entsprechend der individuellen Anforderung bzw. dem optimalen Ergebnis abzubilden. Kontinuierlich emittierende Laser mit mittleren Ausgangsleistungen von einem Kilowatt und mehr in Verbindung mit hochdynamischen Strahlablesensystemen kamen zum Einsatz, um die geforderten enormen Abtragsraten zu erreichen. Die intensive Untersuchung des Abtragsprozesses und der damit einhergehenden Festlegung der Parameter Laserleistung und Fokusbildung bildeten die Basis, um die Bearbeitungsstrategie festzulegen. Ein mehrstufiger Prozess führt zum Abtragsergebnis. Um die erwünschte Produktivität abzusichern, entwarfen die IWS-Forscher eine Bearbeitungsanordnung aus einer Strahlquelle, einer gleichmäßigen Laserstrahlteilung und zwei gegenüberliegenden Galvanometerscannern. Diese Konstellation mit zwei Teilstrahlen in Verbindung mit einem stark



reflektierenden Werkstück erforderte eine segmentierte Bearbeitungsabfolge. Die Auslegung des optischen Strahlengangs, die Auswahl der Komponenten sowie die Bearbeitungsstrategie führen zu einem stabilen Bearbeitungsprozess und schützen die Strahlquelle vor gefährlichen Rückreflexen. Das am Fraunhofer IWS entwickelte ESL2-100-Modul erlaubt die direkte Integration von Galvanometerantrieben in die Architektur einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS). Diese generiert die Bewegungsbefehle für die Strahlableitungs- und Strahlreflektionspiegel. Dabei berücksichtigt die Steuerung Signalabläufe der übergeordneten Maschine, verarbeitet Sensorinformationen in Echtzeit und kommuniziert mit der Laserstrahlquelle. Im Ergebnis steht nun eine vollständig in die Gesamtanlage integrierte Lasertechnologie als ganzheitliche Lösung für die industrielle Umsetzung zur Verfügung. Der Laserbearbeitungsprozess reagiert koinzident auf veränderliche Umgebungsbedingungen oder Produktionsvorgaben. Auf Basis eines tiefen Prozessverständnisses entwickelt das Fraunhofer IWS anforderungsgerechte Technologien zum Hochleistungslaserabtrag. Daraus leiten die Wissenschaftler die Randbedingungen für die Auslegung der Systemtechnik ab und entwerfen produktionsrelevante Konzepte. Auf den individuellen Nutzen abgestimmte Steuerungs- und -software rundet die Lösung ab. Der Anwender erhält ein industrietaugliches Ergebnis für den direkten Einsatz in seiner Produktionsumgebung.

the machining strategy result in a reliable process and protect the beam source from dangerous back reflections. The IWS-developed ESL2-100 module can directly integrate of galvanometer drives into the architecture of a programmable logic controller (PLC), which generates the motion commands for the beam deflection mirrors. The controller considers signal sequences of the higher-level machine as well as process sensor information in real time and communicates with the laser source. As a result, laser processing completely integrated into the overall system can now be provided as a holistic solution for industrial implementation. The laser machining process reacts coincidentally to changing environmental conditions or production specifications. On the basis of a profound process understanding, Fraunhofer IWS develops technologies for high-performance laser ablation tailored to requirements. The scientists establish the boundary conditions for the systems technology and design production-relevant concepts. Control hardware and software tailored to the individual benefit complete the solution. The customer receives an industry-compatible result for direct use in his production environment.

- 1 *The ESL2-100 communication module enables the integration of galvanometer scanners into programmable logic controllers.*
- 2 *Demonstration of the ablation quality using a partially stripped copper conductor.*

CONTACT

Dr. Jan Hauptmann

High Speed Laser Processing

+49 351 83391-3236

jan.hauptmann@iws.fraunhofer.de



MIKROTECHNIK

MICROTECHNOLOGY

Business unit manager

Dr. Udo Klotzbach

+49 351 83391-3252

udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de



Group manager Micro Materials Processing

Dipl.-Ing. Volker Franke

+49 351 83391-3254

volker.franke@iws.fraunhofer.de



Group manager Surface Functionalization

Dr. Tim Kunze

+49 351 83391-3661

tim.kunze@iws.fraunhofer.de



Group manager Micro- and Biosystems Engineering

Dr. Frank Sonntag

+49 351 83391-3259

frank.sonntag@iws.fraunhofer.de



THE BUSINESS UNIT

The Microtechnology business unit concentrates its research on laser micromachining to produce structures smaller than 100 µm in size. Researchers are studying and developing surfaces whose functionalities resemble those of lotus leaves or sharkskin. The miniaturization trend in electronics, semiconductor manufacturing and biomedical engineering calls for ever smaller and more exact structures for a wide variety of substrates. Fraunhofer IWS supports its customers and partners by providing laser microprocessing technology. The Microtechnology business unit's services address product-oriented users requiring solutions for highly specialized questions which can only be answered with systemic materials knowledge and corresponding laser parameters. The business unit offers technologies such as laser interference patterning, refined by Fraunhofer IWS scientists for industrial use for the first time. Microtechnology is a pioneering area in "embedded systems" and machine learning: collecting, analyzing and optimizing acoustic and visual data with regard to process speed – this is what future users will benefit from.

DAS GESCHÄFTSFELD

Auf Lasertechnik unter der Lupe hat sich das Geschäftsfeld Mikrotechnik spezialisiert. Die Wissenschaftler erforschen und entwickeln Oberflächen mit Funktionalitäten, die Lotusblätter oder der Haut von Haifischen ähneln. Denn die fortschreitende Miniaturisierung in Elektronik, Halbleiterfertigung und Biomedizintechnik erfordert immer kleinere und präzisere Strukturen für die unterschiedlichsten Substrate. Dies ermöglicht das Fraunhofer IWS mit der Technologie des Lasermikrobearbeitens. Das Angebot des Geschäftsfelds Mikrotechnik richtet sich an produktorientierte Anwender, die tiefgreifendes systemisches Wissen über den Werkstoff und die dafür notwendigen Laserparameter benötigen, um hochspezifische Fragestellungen zu beantworten. Dafür bietet das Geschäftsfeld etwa das Laserinterferenzstrukturieren, das erst durch die Arbeit der Wissenschaftler des Fraunhofer IWS Industriereife erfahren hat. Eine Vorreiterrolle übernimmt die Mikrotechnik beim Thema »Embedded Systems« und beim maschinellen Lernen: Akustische und visuelle Daten zu sammeln, auszuwerten und hinsichtlich der Prozessgeschwindigkeit zu optimieren – davon soll zukünftig der Anwender profitieren.

HIGHLIGHT

Wie Lotuseffekt und Haifischhaut vorhersagbar werden

Das funktionale Oberflächentexturieren mithilfe des Lasers entwickelt sich seit einigen Jahren zu einem leistungsfähigen Werkzeug. Auf diese Weise lassen sich Oberflächeneigenschaften auf Bauteilen und Komponenten anpassen. So sind heute selbstreinigende Oberflächen mit verbesserter Benetzbarkeit, effiziente Motorkomponenten mit optimierten tribologischen Eigenschaften sowie funktionelle Implantate mit erhöhter Biokompatibilität möglich. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit des funktionellen Laseroberflächentexturierens wird die Vorhersage resultierender Oberflächeneigenschaften immer wichtiger, um Entwicklungszeiten zu verkürzen. Dies macht fortschrittliche Ansätze zum Prognostizieren komplexer Oberflächenfunktionen – die sogenannte prädiktive Modellierung – erforderlich. Forscher am Fraunhofer IWS entwickeln Vorhersagemodelle in Bezug zum funktionalen Laseroberflächentexturieren mittels ausgewählter laserbasierter Fertigungsverfahren. Der Fokus liegt dabei auf der Entwicklung grundlegender Konzepte, die es ermöglichen, Oberflächeneigenschaften wie Rauheit und Benetzbarkeit auf Basis KI-basierter Lernansätze und statistischer Methoden vorherzusagen. Das Modellieren verknüpft dabei Laserprozessparameter, realisierte Oberflächentextur und makroskopisch-messbare Wirkung zu einer effizienten Prozesskette. Die IWS-Wissenschaftler verwenden verschiedene Algorithmen des maschinellen Lernens sowie weiterführende Deep-Learning-Ansätze insbesondere für noch unbekannte Materialien, um Korrelationen zwischen Struktur und Oberflächenfunktion zu identifizieren. Auf diese Weise lassen sich in immer kürzerer Zeit erste Abschätzungen der finalen Oberflächenfunktion treffen, sodass sich der Entwicklungsaufwand von Oberflächenstrukturen stark verringert und eine erste Einschätzung der erzielbaren Verbesserungen vor Beginn des Lasertexturierungsprozesses möglich wird.

HIGHLIGHT

How lotus effect and sharkskin become predictable

For several years now, functional laser surface texturing has been developing into a powerful tool. Surface properties on parts and components can be adapted in this way. Today, this includes self-cleaning surfaces with improved wettability, efficient motor components with optimized tribological properties and functional implants with increased biocompatibility. As the performance of functional laser surface texturing increases, the prediction of resulting surface properties becomes increasingly important in order to shorten development times. This requires advanced approaches to predict complex surface functions – the so-called predictive modeling. Researchers at Fraunhofer IWS are developing predictive models with respect to functional laser surface texturing using selected laser-based manufacturing processes. They focus on the development of basic concepts for predicting surface properties such as roughness and wettability by means of AI learning approaches and statistical methods. The method combines laser process parameters, realized surface structures and macroscopically measurable effects into an efficient process chain. The IWS scientists use different Machine Learning algorithms and advanced Deep Learning approaches, especially for unknown materials, to identify correlations between structure and surface function. In this way, initial estimates of the final surface function are possible in ever shorter time, so that development efforts for surface structures significantly decreases and an initial assessment of achievable improvements is provided before starting the laser texturing process.

OPTIMALE INTEGRATION VON ANALYSESYSTEMEN IN DEN LABORALLTAG MIT SILA

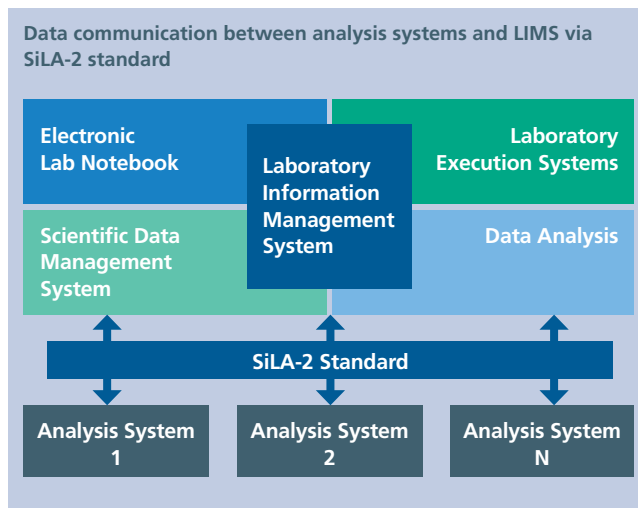
SILA FOR OPTIMUM INTEGRATION OF ANALYSIS SYSTEMS IN EVERYDAY LABORATORY WORK

Depending on the complex nature of analyses, numerous work steps have to be carried out in modern laboratories and the data from various analysis systems have to be processed, combined and documented. The analyzing systems developed at Fraunhofer IWS support the SiLA-2 standard and are therefore SiLA-ready for optimal integration of novel devices into labs with modern laboratory information management systems.

Novel analysis systems alone do not make a modern laboratory. When it comes to the acquisition, analysis, storage and monitoring of laboratory data, Laboratory Information Management Systems (LIMS) are the backbone of modern labs. The demand for advanced data management solutions is growing in line with constantly changing requirements. This results in modern, flexible LIMS, which include scientific data management systems, laboratory execution systems, electronic lab notebooks and data analysis systems with Artificial Intelligence. An efficient but universal data management standard is required for an optimal integration of novel analysis systems. Organizations such as Standardization in Lab Automation (SiLA) and the International Consortium for Innovation and Quality in Pharmaceutical Development are focusing considerable efforts on introducing new interfaces and data management standards. The SiLA-2 standard offers fast, easy integration and interoperability in laboratories. The universal networking control platform developed at Fraunhofer IWS is already being used successfully in modern laboratories to operate complex analysis systems for basic medical research, substance testing and personalized medicine. Thanks

Im modernen Laboralltag müssen je nach Komplexität der Untersuchung zahlreiche Arbeitsschritte durchgeführt und Daten aus verschiedenen Analysesystemen verarbeitet, kombiniert und dokumentiert werden. Für eine optimale Integration neuer Geräte in Labore mit modernen Labor-Informations-Management-Systemen unterstützen die am Fraunhofer IWS entwickelten Analysesysteme den SiLA-2-Standard und sind damit SiLA-ready.

Neue Analysesysteme allein ergeben noch kein modernes Labor. Labor-Informations-Management-Systeme (LIMS) bilden als Software zur Erfassung, Analyse, Speicherung und Überwachung von Labordaten das Rückgrat moderner Labore. Mit den sich stetig ändernden Anforderungen wächst die Nachfrage nach fortschrittlichen Datenmanagementlösungen. Daraus resultieren moderne, flexible LIMS, die wissenschaftliche Datenmanagement-





systeme, Laborausführungssysteme, elektronische Laborbücher und Datenanalysesysteme mit künstlicher Intelligenz beinhalten. Für eine optimale Integration neuer Analysesysteme ist ein leistungsfähiger, aber universeller Datenmanagementstandard erforderlich. Verbände, wie Standardization in Lab Automation (SiLA) und das International Consortium for Innovation and Quality in Pharmaceutical Development, unternehmen erhebliche Anstrengungen, um neue Schnittstellen und Datenmanagementstandards einzuführen. Der SiLA-2-Standard steht für schnelle, einfache Integration und Interoperabilität im Labor. Die am Fraunhofer IWS entwickelte universelle, vernetzbare Steuerungsplattform wird bereits erfolgreich in modernen Laboren zum Betreiben komplexer Analysesysteme für die medizinische Grundlagenforschung, Substanztestung und personalisierte Medizin eingesetzt. Mit der erfolgreichen Umsetzung des SiLA-2-Standards lassen sich die am IWS entwickelten Analysesysteme schnell und effektiv mit modernen LIMS, die ebenfalls SiLA-ready sind, koppeln und in den Laboralltag integrieren. Die erste erfolgreiche Überführung erfolgte mit den am IWS entwickelten und etablierten Mikrosystemen für künstliche Nieren- und Herzsysteme.

to the successful implementation of the SiLA-2 standard, IWS analysis systems can be quickly and effectively linked to modern SiLA-ready LIMS and integrated into everyday laboratory work. The first successful transfer was achieved with the microsystems for artificial kidney and heart systems developed and established at Fraunhofer IWS.

1 Thanks to SiLA-2, novel analysis systems can be perfectly integrated into a modern laboratory infrastructure.

CONTACT

Dr. Frank Sonntag
 Micro- and Biosystems Engineering
 +49 351 83391-3259
 frank.sonntag@iws.fraunhofer.de



OBERFLÄCHEN GROSSFLÄCHIG MIT LASER-INTERFERENZ FUNKTIONALISIEREN

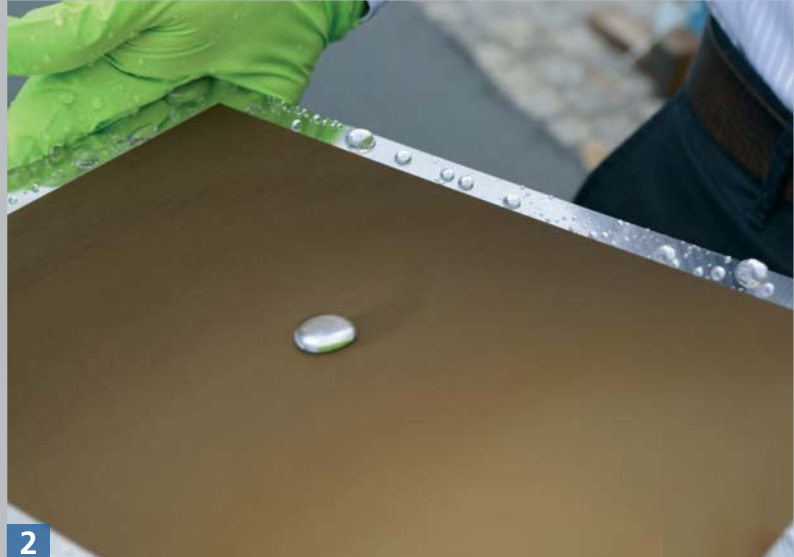
LARGE-AREA SURFACE FUNCTIONALIZATION BY LASER INTERFERENCE

Technical surface functionalization with micro- and nanometer structures is one of the key technologies of the 21st century. These bio-inspired structures, mostly adapted from nature, lead to better biocompatibility of implants, less friction in motors and self-cleaning effects on surfaces exposed to dirt. The efficient fabrication of these structures has long been a technical challenge.

Direct laser interference patterning has developed into a flexible and industry-oriented tool for fabricating targeted surface topographies. The technology, abbreviated "DLIP", short for "Direct Laser Interference Patterning", exhibits its particular strength especially in large-area surface structuring: scalability with constant structure resolution. Fraunhofer IWS scientists are therefore developing technical solutions, process parameters and specific functionalities enabling users to find exactly the required solutions. DLIP splits a coherent, pulsed laser beam into two or more beams and superimposes them on the component surface in a controlled manner. The result is an interference effect that generates highly complex structural patterns on metals, polymers, ceramics and coatings in a single process step. The technical implementation of the DLIP process for industrial application is realized in compact and easily integrated processing modules. Two application-specific approaches can be applied for processing large areas to generate surface structures. On the one hand, structures with constant parameters (e.g. line structure period of ten micrometers) can be generated on surfaces with area rates of currently up to $0.9\text{m}^2\text{min}^{-1}$. Surface functionalities such as wettability

Das Funktionalisieren technischer Oberflächen mit Mikro- und Nanometerstrukturen ist ein Innovationsträger des 21. Jahrhunderts. Diese meist aus der Natur adaptierten, bioinspirierten Strukturen führen zu mehr Biokompatibilität von Implantaten, weniger Reibung in Motoren und selbstreinigenden Effekten auf schmutz anfälligen Oberflächen. Das effiziente Herstellen dieser Strukturen war lange Zeit eine technische Herausforderung.

Das direkte Laserinterferenzstrukturieren hat sich zu einem flexiblen und industrienahen Werkzeug zum Herstellen gezielter Oberflächentopographien entwickelt. Die Technologie mit dem Kürzel »DLIP«, kurz für das englische »Direct Laser Interference Patterning«, spielt ihre besondere Stärke insbesondere im großflächigen Oberflächenstrukturieren aus: die Skalierbarkeit bei gleichbleibender Strukturauflösung. Damit dies möglich wird, entwickeln Wissenschaftler des Fraunhofer IWS technische Lösungen, Prozessparameter und spezifische Funktionalitäten, die den Anwendern genau diejenigen Lösungen ermöglichen, die sie benötigen. Das Laserinterferenzstrukturieren teilt einen kohärenten, gepulsten Laserstrahl in zwei oder mehr Strahlen auf und überlagert diese wieder kontrolliert auf der Bauteiloberfläche. Der resultierende Interferenzeffekt erzeugt hochkomplexe Strukturmuster auf Metallen, Polymeren, Keramiken und Beschichtungen in einem Prozessschritt. Die technische Umsetzung des DLIP-Verfahrens zur industriellen Nutzung erfolgt in Form kompakter und einfach integrierbarer Bearbeitungsmodule. Zwei anwendungsspezifische Ansätze kommen zum Bearbeiten großer Flächen zum Erzeugen von Oberflächenstrukturen infrage. Einerseits lassen sich Strukturen



mit konstanten Strukturparametern (z. B. Linienstrukturperiode von zehn Mikrometern) mit Flächenraten von derzeit bis zu $0,9\text{m}^2\text{min}^{-1}$ auf Oberflächen herstellen. Die Oberflächenfunktionalitäten, wie Benetzbarkeit und Dekoration, hängen von den individuellen Nano- und Mikrometermerkmalen ab. Das Fraunhofer IWS arbeitet an speziellen Optiken, mit denen sich diese Strukturparameter automatisiert vor oder sogar während des Strukturierungsprozesses ändern lassen. Dadurch werden hochflexible Strukturkombinationen mit Flächenraten von perspektivisch bis zu $300\text{cm}^2\text{min}^{-1}$ und höher möglich. Infolgedessen sind großflächige Mikrostrukturierungen von beispielsweise 300 Quadratmillimetern für dekorative oder hydrophobe Anwendungen möglich. Vormalig undenkbar rücken damit Oberflächenfunktionalisierungen also in den Bereich des technisch Machbaren. Die geringen Prozesszeiten, die hohe Flexibilität in der Strukturzeugung und die prinzipiell einfache Integrierbarkeit in bestehende Anlagentechnik stellen dabei die Weichen für einen deutlichen Zugewinn an unternehmerischer Wettbewerbsfähigkeit. Folglich lassen sich neue und maßgeschneiderte Funktionalitäten auch in technologischen Bereichen erschließen, die von bestehenden Oberflächentechnologien bisher nicht profitieren.

and decorative properties depend on individual nano- and micrometer characteristics. Fraunhofer IWS is developing special optics with which these structure parameters can be changed automatically before or even during the patterning process. This enables highly flexible structuring combinations with area rates of $300\text{cm}^2\text{min}^{-1}$ and higher. As a result, large-area microstructuring of 300 square millimeters, for example, is possible for decorative or hydrophobic applications. Previously unthinkable, surface functionalizations are now moving into a technically conceivable category. Short process times, high flexibility in structure generation and simple integration into existing machine systems set the course for a significant increase in entrepreneurial competitiveness. As a result, new and tailor-made functionalities can also be developed in technological areas that have not yet benefited from existing surface technologies.

- 1 *Large-scale decorative surface patterning with structures around $1\ \mu\text{m}$, realized on approx. $200\text{mm} \times 300\text{mm}$.*
- 2 *Waterdrop on a hydrophobic large-scale surface structure sized approximately $200\text{mm} \times 300\text{mm}$.*

CONTACT

Alfredo Aguilar
 Surface Functionalization
 +49 351 83391-3083
alfredo.aguilar@iws.fraunhofer.de



TECHNOLOGIEHOCHZEIT FÜR MINIMALE REIBUNG UND VERSCHLEISS

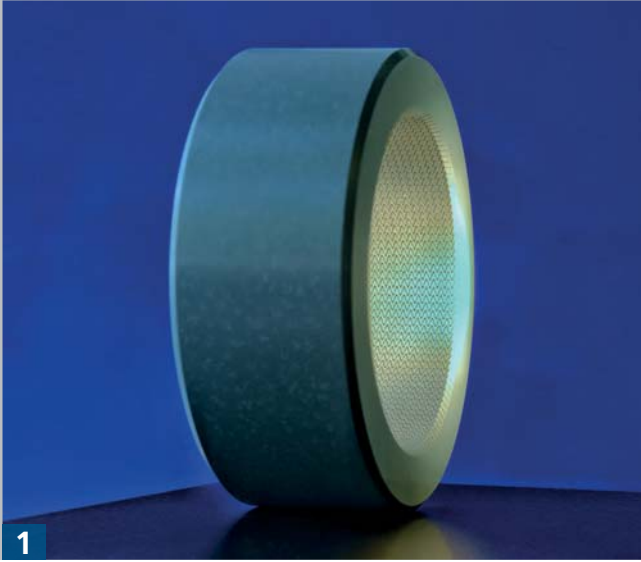
COMBINING TECHNOLOGIES FOR MINIMAL FRICTION AND WEAR

“Friction generates heat, but also progress.” This maxim, once defined by a German politician, also drives the Fraunhofer IWS’s micromaterial processing department. The aim is to achieve significant consumption reduction effects in individual mobility, logistics and mechanical engineering through lower coefficients of friction and lower wear. The project focuses on both individual technologies and process combinations.

There is a wide scientific-technical consensus on friction losses: about 23 percent of global primary energy consumption is lost. Potential engine savings of approximately 30 percent are realistic for automotive locomotion and goods logistics by road and rail. In the case of heavy machinery, focus concentrates more on wear, an issue manufacturers and users have so far solved by frequently “relubricating” bearings. Therefore, one of the Fraunhofer researcher’s goals is to offer the lubricant between the two friction partners a “most pleasant stay” in the contact area in order to achieve a maximum in friction and wear reduction. The process of short-pulsed laser microstructuring holds excellent potential. With tightly focused laser radiation, even the smallest surface structures can be generated, resulting in long lubricant residence times, aquaplaning-like floating effects, or reservoirs for the storage of abrasive material. Extremely short laser pulses lead to the lowest possible thermal load on the components and to new approaches for advantageously applicable materials; at the same time, skilled process control avoids disturbing effects such as burr formation, strong oxidation, hardening or chipping. Using piston rings

»Reibung erzeugt Hitze, aber auch Fortschritt«, so definierte ein deutscher Politiker für sein Ressort die Motivation, die am Fraunhofer IWS auch die Arbeitsrichtung Mikromaterialbearbeiten antreibt. Ziel ist es, in Individualmobilität, Logistik und Maschinenbau deutliche Verbrauchsminderungseffekte durch niedrigere Reibwerte und geringeren Verschleiß zu erzielen. Dies wird sowohl mit Einzeltechnologien als auch mit Verfahrenskombination avisiert.

Über Reibungsverluste besteht weitgehend wissenschaftlich-technischer Konsens: Etwa 23 Prozent des globalen Primärenergieverbrauchs gehen dafür verloren. Bei der automobilen Fortbewegung und der Warenlogistik auf Straße und Schiene sind Einsparpotenziale im Motor von ca. 30 Prozent realistisch. Bei Schwermaschinen liegt der Fokus eher auf dem Verschleiß, dem Hersteller und Anwender bisher mit häufigem »Nachschmieren« der Lager begegnen. Deshalb gehört es zu den Forschungszielen des Fraunhofer IWS, dem meist weniger betrachteten Faktor im tribologischen Gesamtsystem – dem Schmiermittel zwischen beiden Reibpartnern – den Aufenthalt im Kontaktbereich »möglichst angenehm« zu gestalten und so seine reibungsmindernde und verschleißverringende Wirkung zu maximieren. Das Verfahren der kurzgepulsten Lasermikrostrukturierung bietet hier hervorragende Potenziale. Mit stark fokussierter Laserstrahlung lassen sich auch kleinste oberflächliche Strukturen erzeugen, die in hohen Verbleibensdauern von Schmiermitteln, in Aquaplaning-ähnlichen Aufschwimmeffekten oder in Aufnahmereservoirs für abgeriebenes Material resultieren. Äußerst kurze Laserpulse führen zu geringstmöglicher Wärmebelastung der Bauteile und zu neuen Denkansätzen für



vorteilhaft einsetzbare Materialien; gleichzeitig vermeidet eine geschickte Prozessführung störende Effekte wie Gratbildung, starke Oxidation, Aufhärtung oder Abplatzungen. Am Beispiel von Kolbenringen und Ventiltriebkomponenten zeigten Forscher am Fraunhofer IWS, dass sich gratfreie, hochpräzise Strukturgeometrien bis minimal ca. 2 (lateral) und 0,1 Mikrometer (Strukturtiefe) reproduzierbar generieren lassen. Für neuartige, hochdichte keramische Lagerschalen, die für höchste Beanspruchung in Schwermaschinen vorgesehen sind, haben sie eine Lasertechnologie zum Erzeugen innenliegender Mikrostrukturen entwickelt und positiv getestet. Einen weiteren großen Schritt geht das IWS mit der Kombination der Einzelverfahren »Mikrostrukturieren« und »Hartstoffbeschichten«: Im BMWi-geförderten Verbundvorhaben »Prometheus« wird derzeit erforscht, in welchem Maß tribologisch wirksame Oberflächenstrukturen zusammen mit reibungsmindernden, verschleißfesten diamantähnlichen Schichten zu Einsparpotenzialen im Motor führen. Die Untersuchungen gehen deutlich über die Ermittlung von Grundlagenzusammenhängen hinaus und finden an Realbauteilen statt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass sich auf spezifisch designten Mikrostrukturen angepasste Hartstoffschichten abscheiden lassen, ohne die mikroskaligen Geometrien zu verändern.

and valve train components as examples, researchers at Fraunhofer IWS demonstrated that burr-free, high-precision structural geometries can be reproducibly generated down to a minimum of approx. 2 (lateral) and 0.1 micrometers (structural depth). The scientists have developed and positively tested a laser technology for the generation of inside-wall microstructures for innovative, high-density ceramic bearings, which are designed for the highest loads in heavy machinery. IWS researchers are taking a further major step by combining the individual technologies "microstructuring" and "hard material coating": The BMWi-funded joint project "Prometheus" is currently researching the extent to which tribologically effective surface structures together with friction-reducing, wear-resistant diamond-like coatings lead to potential savings in the engine. Studies clearly go beyond the determination of basic correlations and are performed on real components. The results so far show that hard coatings adapted to specifically designed microstructures can be deposited without changing the microscale geometries.

1 Tailored, laser-generated reservoirs for lifetime lubrication in high-performance ceramic bearings.

Funded by



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

FKZ: 03ET1609E

CONTACT

Dipl.-Ing. Thomas Kuntze

Micro Materials Processing

+49 351 83391-3227

thomas.kuntze@iws.fraunhofer.de



WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG

MATERIALS CHARACTERIZATION AND TESTING

Division manager

Prof. Dr. Martina Zimmermann

+49 351 83391-3573

martina.zimmermann@iws.fraunhofer.de



Group manager Materials and Failure Analysis

Dr. Jörg Kaspar

+49 351 83391-3216

joerg.kaspar@iws.fraunhofer.de



Group manager Materials and Component Reliability

Dipl.-Ing. Robert Kühne

+49 351 83391-3156

robert.kuehne@iws.fraunhofer.de



THE FIELD OF EXPERTISE

Intentionally destroying in a controlled process what others have created: IWS material and component testing researchers examine materials down to the smallest detail. In this process, the scientists evaluate material and component quality and suggest ways to optimize manufacturing processes. Comprehensive material knowledge, years of experience in techniques and a wide range of available equipment and devices provide the basis for their research and engineering projects. The service portfolio includes metallographic characterization and electron microscopic analysis of materials and their compounds, from the macro- to the nanoscale. Characteristic properties are determined and strategies are derived in order to be able to design components according to material and operational demands. The scientists assess suitability, select materials, and optimize components for the development and refinement of manufacturing technologies. In addition, they develop, evaluate and modify test methods. Failure and damage analyses are also part of the portfolio.

DAS KOMPETENZFELD

Kontrolliert zerstören, was andere aufgebaut haben: Die Werkstoff- und Bauteilprüfung nimmt das Materialinnere in den Blick und geht selbst dem kleinsten Detail auf den Grund. Auf diese Weise beurteilen die Wissenschaftler die Werkstoff- sowie Bauteilqualität und liefern Hinweise darüber, an welchen Stellen sich Herstellungs- und Bearbeitungsprozesse optimieren lassen. Ein umfassendes Werkstoffwissen, langjährige methodische Erfahrungen und eine umfangreiche Geräteausstattung bilden die Basis für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Zum Leistungsspektrum gehören die metallographische Charakterisierung und die elektronenmikroskopische Analyse von Werkstoffen und deren Verbunden von der Makro- bis zur Nanoskala. Es werden Kennwerte ermittelt und Strategien abgeleitet, um Bauteile werkstoff- und beanspruchungsgerecht auslegen zu können. Für die Neu- und Weiterentwicklungen von Fertigungstechnologien übernehmen die Wissenschaftler Eignungsbewertung, Werkstoffauswahl und Bauteiloptimierung. Darüber hinaus werden Prüfverfahren entwickelt, bewertet oder angepasst. Versagens- und Schadensanalysen runden das Portfolio ab.

HIGHLIGHT

Moderne Screening-Methoden für die prozessbegleitende Werkstoffentwicklung

Eine umfassende und hochauflösende strukturelle Charakterisierung ist unerlässlich, um Werkstoffe und auf ihnen basierende Fertigungsprozesse verbessern zu können. Moderne Methoden der analytischen Elektronenmikroskopie eignen sich hervorragend für den Einsatz bei der produktbezogenen Werkstoffverbesserung, Weiterentwicklung von werkstoffabhängigen Fertigungsprozessen und Qualitätsbeurteilung. So profitiert die aktuelle Forschung und Entwicklung von Hochentropie-Legierungen (HEL) von einer hochwertigen Strukturanalyse mittels Elektronenmikroskopie. HEL sind neuartige metallische Werkstoffe, die sich in ihren Eigenschaften und deren Kombination deutlich von konventionellen Werkstoffen unterscheiden. Sie können z.B. sehr fest sowie gleichzeitig gut verformbar sein und könnten insbesondere bei hohen Einsatztemperaturen genutzt werden. Eine wesentliche Herausforderung für den industriellen Einsatz der neuartigen Werkstoffe stellt derzeit die Legierungsfindung dar. Forscher am Fraunhofer IWS entwickeln und verbessern daher Screening-Instrumente zur Materialsynthese und -charakterisierung. Teilautomatisierte Präparations-, Aufnahme- und Auswerterroutinen für die Rasterelektronenmikroskopie ermöglichen zeitsparende und trotzdem zuverlässige Werkstoffanalysen. Sie beschleunigen damit die Legierungsentwicklung sowie die Synthese mittels additiver Fertigungsverfahren und Beschichtungstechnologien. Üblicherweise lassen sich z.B. auf Hartstoffschichten basierende Metallnitride für den Verschleißschutz von Werkzeugen mittels PVD-Verfahren nur bis zu einer Dicke von zehn Mikrometern abscheiden. Für viele Anwendungen wären aber deutlich dickere Schichten wünschenswert. Mithilfe entwicklungsbegleitender Analysen überwinden IWS-Wissenschaftler bestehende Hemmnisse im Schicht- und Defektwachstum sowie im Eigenspannungsaufbau und ermöglichten es so, Schichten von 100 Mikrometern abzuscheiden.

HIGHLIGHT

Modern screening methods for in-process material development

Comprehensive and high-resolution structural characterization is essential to improve materials and related manufacturing processes. Analytical electron microscopic methods are ideally suited for application in product-related material improvement, further development of material-dependent manufacturing processes and their quality assessment. Thus, current research and development of high-entropy alloys (HEAs) benefits from high-quality structural analysis by means of electron microscopy. HEAs are novel metallic materials that significantly differ from conventional materials in their properties and combination. They can, for example, be very strong and at the same time very ductile, and have great application potential, especially at high operating temperatures. Currently, one of the main challenges for the industrial use of this new class of material is alloy identification. Researchers at Fraunhofer IWS are therefore developing and improving screening instruments for material synthesis and characterization. Semi-automated preparation, recording and evaluation routines for scanning electron microscopy enable time-saving yet reliable material analyses. Usually, for example, metal nitrides based on hard material coatings for tool wear protection can only be deposited up to a thickness of ten micrometers using the PVD process. For many applications, significantly thicker coatings would be desirable. IWS scientists used developmental analyses to overcome existing obstacles in layer and defect growth as well as in residual stress build-up, thus enabling layers of up to 100 micrometers to be deposited.

WERKSTOFFPRÜFUNG FÜR DEN DIGITALEN ZWILLING

MATERIAL TESTING FOR THE DIGITAL TWIN

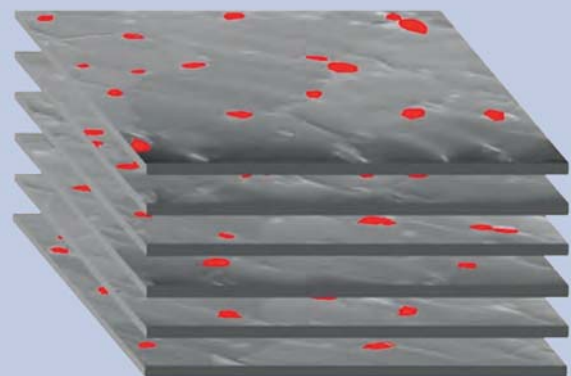
Digital twins for material samples and components include three-dimensional visualizations of material microstructures. Fraunhofer IWS' well-equipped "characterization toolbox" provides the most suitable processes for imaging and analyzing volumes ranging from cubic micrometers to centimeters for almost any problem relating to microstructure, composition, crystal structure or structural defects.

For modern materials and their combinations, such as additive components or coating systems, local microstructural features are linked with process data recorded during production as "digital twins". The aim is to identify process and material conditions critical for component reliability. Interest focuses primarily on construction defects such as pores or cracks, but also on accumulations of non-metallic inclusions, fluctuations in alloy composition, undesired textures of crystal orientations, high residual stresses and others. To obtain a sufficiently large database on the three-dimensional material state, tomographic characterization methods are employed. 3D material characterization includes non-destructive measurements such as X-ray computed tomography (CT) as well as destructive methods such as serial tomography. While X-ray CT is mainly applied for geometry control and defect detection, the serial sectioning technique is used to examine details of the material structure. Layer by layer is ablated and after each step an image of the newly exposed surface is taken or an analysis measurement carried out. The Focused Ion Beam (FIB) technique is a powerful tool for analyses on the microstructural level. The major advantages of this method are the fully automated procedure and the diversity

Digitale Zwillinge für Materialproben und Bauteile beinhalten dreidimensionale Darstellungen von Werkstoff-Mikrostrukturen. Für nahezu jede Fragestellung zu Gefüge, Zusammensetzung, Kristallstruktur oder Baufehlern steht im bestens ausgerüsteten »Charakterisierungs-Werkzeugkasten« des Fraunhofer IWS das passende Verfahren bereit, um Volumina von Kubikmikrometern bis -zentimetern abzubilden und zu analysieren.

Für moderne Werkstoffe und deren Kombinationen, wie additiv gefertigte Bauteile oder Schichtsysteme, werden lokale Merkmale der Mikrostruktur während der Herstellung mit aufgezeichneten Prozessdaten in Form »Digitaler Zwillinge« verknüpft. Das Ziel besteht darin, Prozess- und Materialzustände zu identifizieren, die für die Bauteilzuverlässigkeit kritisch

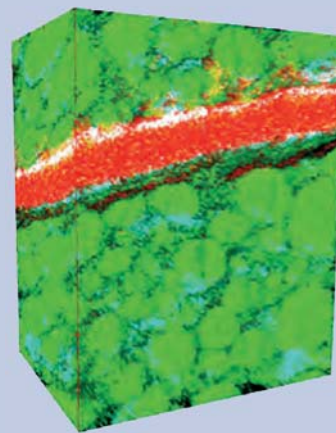
Schematic of the serial section tomography



Procedure for serial cross-section tomography: The material volume under examination is analyzed layer by layer and a 3D image is created from the individual structure images.

sind. In erster Linie stehen Baufehler wie Poren oder Risse, aber auch Häufungen nichtmetallischer Einschlüsse, Schwankungen der Legierungszusammensetzung, unerwünschte Texturen der Kristallorientierungen, hohe Eigenspannungen und andere im Zentrum des Interesses. Eine ausreichend große Datenbasis zum dreidimensionalen Werkstoffzustand wird mittels tomographischer Charakterisierungsmethoden gewonnen. Die 3D-Werkstoffcharakterisierung kennt sowohl zerstörungsfreie Messungen, wie z. B. die Röntgen-Computertomographie (CT), als auch zerstörende Verfahren wie die Serienschritt-Tomographie. Während die Röntgen-CT hauptsächlich für die Geometrie-Kontrolle und die Suche nach Fehlstellen eingesetzt wird, gelingt eine Begutachtung von Details des Werkstoffgefüges mit der Serienschritt-Technik. Dabei wird das interessierende Volumen schichtweise abgetragen und nach jedem Schritt eine Abbildung der neu freigelegten Oberfläche angefertigt oder eine Analysemessung ausgeführt. Ein leistungsfähiges Werkzeug für Untersuchungen auf Mikrostruktur-Ebene ist die Focused-Ion-Beam-Technik (FIB). Die wesentlichen Vorteile dieser Methode bestehen im vollautomatisierten Ablauf sowie in der Vielfalt der gewinnbaren Informationen. Dazu zählen Abbildungen in verschiedenen elektronenmikroskopischen Kontrasten oder Analysen zur chemischen Zusammensetzung und zur Kristallstruktur. Die Analyse erfolgt mit hohen Auflösungen bis in den Bereich von zehn Nanometern für Volumina bis zu Größen von 50x50x50 Kubikmikrometern. Für 3D-Untersuchungen von Materialgebieten, deren Größe dieses Volumen übersteigt, gelingt eine Charakterisierung durch Anfertigung metallographischer Serienschliffe. Mit dieser Technik lassen sich Volumina bis zu Größen von 10x10x10 Kubikmillimetern (und prinzipiell darüber hinaus) in Auflösungen bis zu einem Mikrometer charakterisieren. Passend für eine zu untersuchende Materialprobe oder für ein vorliegendes Bauteil wählen die IWS-Werkstoffexperten die geeignete Tomographiemethode für eine xyz-genaue Bewertung der Eigenschaften aus, um den Digitalen Zwilling entstehen zu lassen.

3D element distribution in an electrode stack



Al - Aluminum
O - Oxygen
C - Carbon

10 μ m

Distribution of components of a battery electrode: aluminum foil, carbon and metal oxides

of obtainable information. Such data include images in various electron microscopic contrasts or analyses of the chemical composition and crystal structure. High resolution analysis is performed down to ten nanometers for volumes up to 50x50x50 cubic micrometers. For 3D investigations of material areas whose size exceeds this volume, metallographic serial sections can be used for characterization. With this technique, volumes of up to 10x10x10 cubic millimeters (and in principle beyond) can be characterized in resolutions down to one micrometer. Suitable for a material sample or a component to be examined, the IWS material experts select the appropriate tomography method for a xyz-exact property and structure evaluation in order to generate the digital twin.

CONTACT

Dr. Jörg Bretschneider

Materials and Failure Analysis

+49 351 83391-3217

joerg.bretschneider@iws.fraunhofer.de



DEFINIERTES RISSWACHSTUM IN SCHALLGESCHWINDIGKEIT

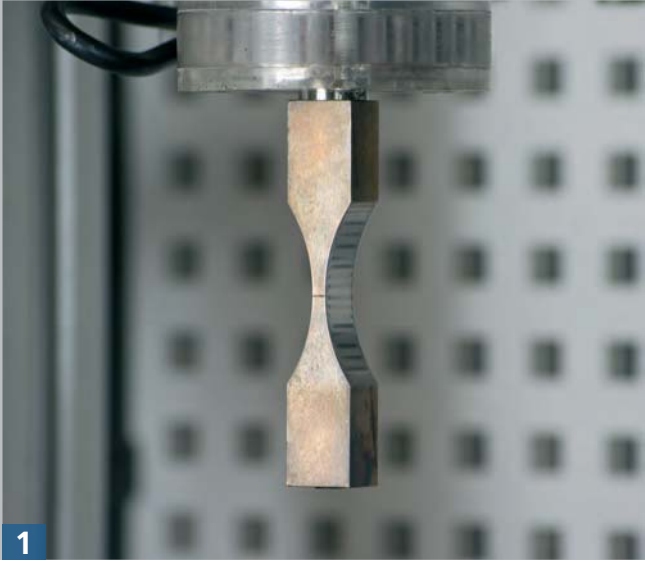
FATIGUE CRACK GROWTH IN ULTRASOUND VELOCITY

In many technical applications, understanding fatigue crack growth behavior is the basis for safe component design. In the aerospace industry in particular, structural service life calculations are often based on damage tolerance. In order to reduce the experimental effort involved in these complex tests, Fraunhofer IWS researchers have developed a new methodology.

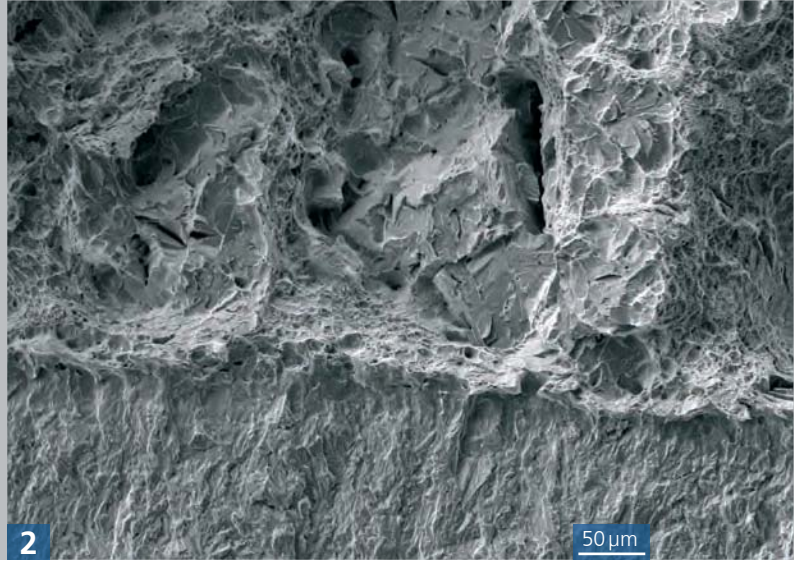
Innovations in manufacturing technology and novel metallic material concepts call for ongoing developments in materials testing. In many cases, the time-consuming determination of characteristic values is responsible for their postponed integration into the development process. Against this background, Fraunhofer IWS researchers have developed a hybrid test procedure that significantly accelerates the experimental analysis of fatigue crack growth in metallic materials. The fatigue crack propagation of metals is typically analyzed according to ASTM E647 at test frequencies of up to 100 hertz. Ultrasonic fatigue testing technology was applied as part of specific experimental investigations. This technology allows the cyclic loading to be applied at a frequency of 20 kilohertz. Due to technical conditions, this testing technique is particularly advantageous in the phases of crack initiation and stable crack growth. Subsequently, the test should be continued using conventional fatigue testing technology right up to the start of unstable crack growth. A combination of modern test technologies proves to deliver valid test results and shortens the duration of crack growth tests from several days to a few hours.

Kenntnisse über das Wachstumsverhalten von Ermüdungsrissen sind auf vielen technischen Anwendungsgebieten die Grundlage für eine sichere Bauteilauslegung. Insbesondere in der Luft- und Raumfahrtindustrie basiert die strukturelle Lebensdauerberechnung vielfach auf der sogenannten Schadenstoleranz. Um den experimentellen Aufwand dieser komplexen Versuche zu reduzieren, haben Mitarbeiter des Fraunhofer IWS eine neue Methodik entwickelt.

Innovationen in der Fertigungstechnik und neuartige metallische Werkstoffkonzepte verlangen nach stetigen Weiterentwicklungen in der Werkstoffprüfung. Vielfach führt der zeitliche Aufwand bei der Kennwertermittlung dazu, dass diese im Entwicklungsprozess erst spät betrachtet werden. Vor diesem Hintergrund haben Forscher des Fraunhofer IWS eine hybride Versuchsführung entwickelt, mit der sich die experimentelle Analyse des Ermüdungsrisswachstums von metallischen Werkstoffen deutlich beschleunigen lässt. Die Ermüdungsrissausbreitung von Metallen wird typischerweise nach der Norm ASTM E647 bei Prüffrequenzen bis zu 100 Hertz untersucht. Im Rahmen gezielter Versuchsreihen kam die Ultraschallermüdungsprüftechnik zum Einsatz, mit der sich die zyklische Belastung mit einer Frequenz von 20 Kilohertz aufbringen lässt. Aufgrund der technischen Randbedingungen spielt diese Prüftechnik vorwiegend in den Phasen der Rissentstehung und des stabilen Risswachstums ihre Vorteile aus. Anschließend sollte der Versuch mittels konventioneller Ermüdungsprüftechnik bis zum Einsetzen des instabilen Risswachstums weitergeführt werden. Mithilfe dieser gezielten Verknüpfung moderner Prüftechnologien können nachweislich valide Prüfergebnisse erzielt werden.



1

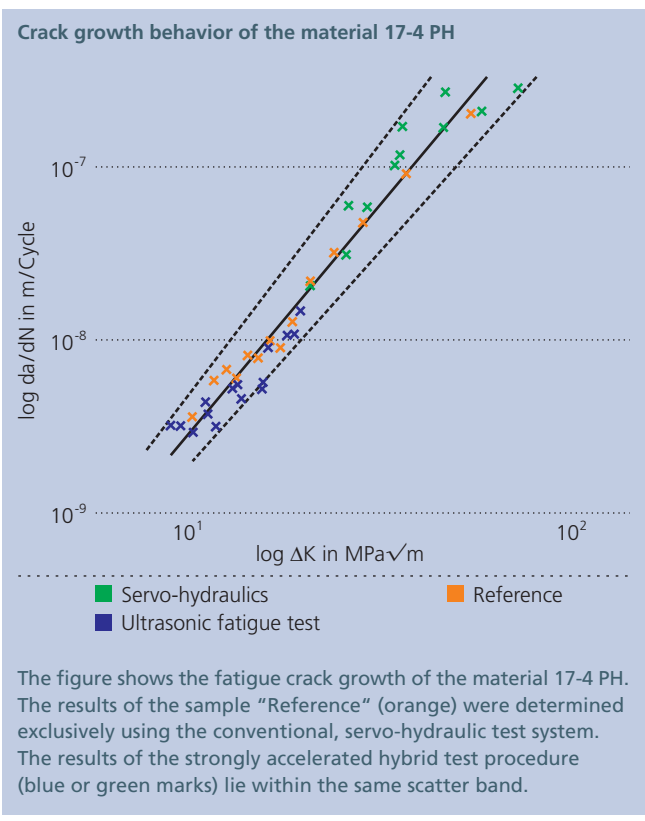


2

50 μm


Zudem ist es möglich, die Dauer der Risswachstumsversuche von mehreren Tagen auf wenige Stunden zu verkürzen. Die entwickelte hybride Versuchsführung bietet somit eine neuartige, zeiteffektive und verlässliche Möglichkeit zur experimentellen Analyse des Ermüdungsrisswachstumsverhaltens metallischer Werkstoffe.

- 1 *Ultrasonic fatigue testing system with built-in specimen to analyze the fatigue crack growth behavior at a test frequency of 20,000 hertz.*
- 2 *Fracture surface examined by scanning electron microscopy: Upon reaching a critical stress state, the failure mechanism of the material changes abruptly.*



CONTACT

Dipl.-Ing. Robert Kühne
 Materials and Component Reliability
 +49 351 83391-3156
 robert.kuehne@iws.fraunhofer.de



OPTISCHE MESSTECHNIK UND OBERFLÄCHENTECHNOLOGIEN

OPTICAL METROLOGY AND SURFACE TECHNOLOGIES

Head

Prof. Dr. Peter Hartmann

+49 375 536 1538

peter.hartmann@iws.fraunhofer.de



Optical Process Control and Fiber Technologies

M. Eng. Tobias Baselt

+49 375 536-1970

tobias.baselt@iws.fraunhofer.de



Surface Metrology and Image Processing

Dipl.-Ing. Christopher Taudt

+49 375 536-1972

christopher.taudt@iws.fraunhofer.de

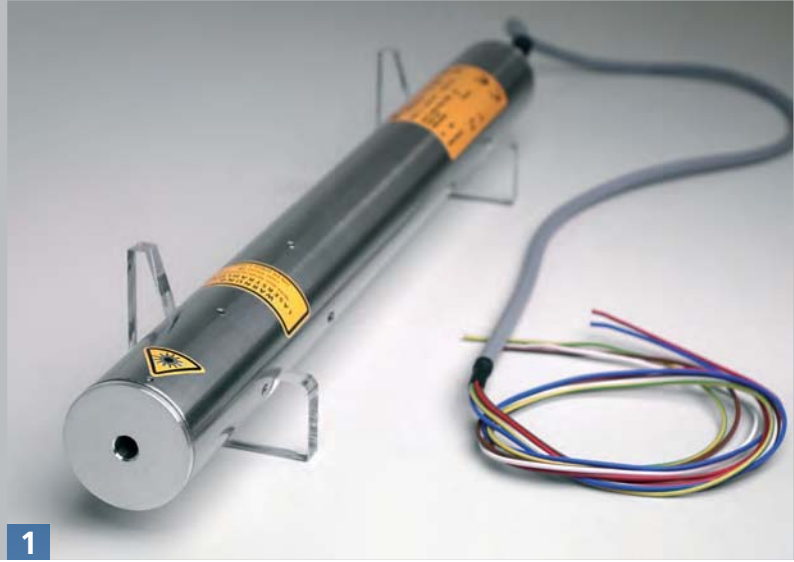


THE BUSINESS UNIT

The scientists at Fraunhofer AZOM are researching and developing the latest approaches in optical metrology, image processing, process control and surface characterization. They focus on transferring research results quickly and directly into application-specific solutions for industrial processes. To this end, AZOM offers research services such as development and testing of industry-compatible optical measurement methods for various fields of technology. It provides the interface between applied science and industry in the fields of medical technology, automotive engineering, mechanical engineering and semiconductor technology. In optical metrology and process integration, the research spectrum is based on three pillars: service measurements, industrial integration of established technologies and the development of novel measurement methods. Thus, AZOM scientists develop concepts for complex industrial optical measurement methods and system components, characterize surfaces, engineer user-specific sensors and actuators, and offer non-destructive monitoring of processes and components. In the field of laser-based surface technologies, industrial integration and process development constitute the pillars of the service portfolio. In particular, AZOM develops electronic control systems, complex application-specific software solutions and optical system components such as light sources for metrology as well as fiber-based sub-assemblies in combination with free beam elements. In addition, AZOM solves individual problems not yet solvable with the standard technology currently available on the market.

DAS GESCHÄFTSFELD

Die Wissenschaftler des Fraunhofer AZOM erforschen und entwickeln neueste Ansätze der optischen Messtechnik, Bildverarbeitung, Prozesskontrolle und Oberflächencharakterisierung. Ziel ist es, die Forschungsergebnisse schnell und direkt in applikationsspezifische Anwendungslösungen für industrielle Prozesse zu transferieren. Dafür bietet das AZOM Forschungsleistungen, wie die Entwicklung und Erprobung industrietauglicher optischer Messverfahren für unterschiedliche Technologiefelder. Es bildet die Schnittstelle zwischen angewandter Wissenschaft und Industrie in den Feldern Medizintechnik, Kraftfahrzeugtechnik, Maschinenbau und Halbleitertechnologie. In der optischen Messtechnik und Prozessintegration basiert das Forschungsspektrum auf den drei Säulen Auftragsmessungen, Industrieintegration etablierter Technologien und Messverfahrensentwicklung. So konzeptionieren die Wissenschaftler komplexe industrietaugliche optische Messverfahren und Systemkomponenten, charakterisieren Oberflächen, entwickeln anwenderspezifische Sensorik sowie Aktorik und bieten zerstörungsfreies Monitoring von Prozessen und Bauteilen. Auf dem Gebiet der laserbasierten Oberflächentechnologien bilden Industrieintegration und Verfahrensentwicklung die Pfeiler des Leistungsspektrums. Dabei entwickelt das AZOM insbesondere elektronische Steuerungen, komplexe applikationsspezifische Softwarelösungen und optische Systemkomponenten, wie Messlichtquellen sowie faserbasierte Baugruppen in Kombination mit Freistrahlelementen. Ergänzend bietet das AZOM Antworten auf individuelle Problemstellungen, die mit der am Markt erhältlichen Standardtechnik noch nicht zu lösen sind.



HIGHLIGHT

Stabile laserdiodenbasierte Alignmentlichtquelle

Die Fertigung moderner Halbleiterbauelemente erfordert viele komplexe Prozessschritte, die unterschiedliche Anlagen realisieren. Bei jeder Übergabe eines Wafers auf eine andere Anlage müssen beide Koordinatensysteme in Bezug gebracht werden. Der Wafer weist dafür Marken auf, die eindeutig erkannt werden müssen. Dieser Prozess, das sogenannte Alignment, nutzt spezielle Lichtquellen und Kameras. Besonders häufig werden Helium-Neon-Laser (HeNe) eingesetzt, die sich aufgrund ihrer hervorragenden Strahleigenschaften für diese Zwecke eignen. Allerdings verfügen diese Lichtquellen aufgrund des durchgängigen Betriebs über eine stark begrenzte Lebensdauer. Das Fraunhofer-Anwendungszentrum für Optische Messtechnik und Oberflächentechnologien AZOM hat in diesem Zusammenhang eine Substitutionslösung entwickelt, die auf Basis eines Diodenlasers die Lebensdauer bei vergleichbarer optischer Qualität um den Faktor 1000 steigert. Diese Innovation lässt sich in einer Vielzahl von Prozessierungsanlagen einsetzen und wurde mit dem mittelständischen Unternehmen LEC in die Industrie überführt. Dafür kombinierten beide Partner ihre Kompetenzen in den Disziplinen optische Messtechnik, Elektronik- sowie Systemkomponentenentwicklung. In der ersten Entwicklungsstufe arbeitet der Alignmentlaser bei einer Wellenlänge von 635 Nanometern und wird durch die jeweilige Anlage getriggert. Der Laser und seine Ansteuerung nutzen ein Gehäuse mit identischem Formfaktor bestehender HeNe-Systeme. Damit ist ein turnusgemäßer Austausch am Lebensdauerende der Lichtquelle ohne weitere Schulung des Personals oder Anpassungen an der Anlage möglich. LEC entwickelte den Alignmentlaser zu einem Produkt weiter und etablierte ihn in der Halbleiterindustrie. In einer weiteren Entwicklungsstufe wird das AZOM gemeinsam mit LEC eine Alignmentlichtquelle entwickeln, die den industriellen Anforderungen nach einer Bandbreite unterschiedlicher frei ansteuerbarer Wellenlängen gerecht wird. Dazu bringt die Außenstelle des Fraunhofer IWS ihre Kernkompetenzen ein, wie etwa die faseroptische Kopplung von Lichtquellen sowie deren Steuerung.

HIGHLIGHT

Stable laser diode-based alignment light source

The production of modern semiconductor components requires many complex process steps, which are realized by different machines. Each time a wafer is transferred to another machine, both coordinate systems must be aligned. For this purpose, the wafer has specific features that must be clearly identified. This process, called alignment, employs special light sources and cameras. In particular, helium neon lasers (HeNe) are being used frequently, as they are qualified for this purpose due to their excellent beam properties. However, these light sources have a very limited service life due to their continuous operation. In this context, the Fraunhofer Application Center for Optical Measurement and Surface Technologies AZOM has developed a substitute solution based on a diode laser increasing the service life by a factor of 1,000 while delivering comparable optical quality. This innovation can be used in numerous processing systems and has been implemented into industry together with the medium-sized company LEC. The two partners pooled their expertise in optical metrology, electronics and system component development. In the first development stage, the alignment laser operates at a wavelength of 635 nanometers and is triggered by the respective system. The laser and its control system operate in a housing with an identical form factor of existing HeNe systems. Regular replacement at the end of the light source's service life is thus possible without further staff training or adjustments to the system. LEC further developed the alignment laser into a product and established it into the semiconductor industry. In a future development stage, AZOM and LEC will jointly develop an alignment light source that meets industrial requirements for a range of different freely controllable wavelengths. In this context, the Fraunhofer IWS branch office contributes its core competencies such as the fiber-optic coupling of light sources and their control.

1 Together with its partner LEC, Fraunhofer AZOM introduced an alignment light source into industrial processes.

ZERSTÖRUNGSFREIE BAUTEILPRÜFUNG FÜR LKW-BREMSANLAGEN

NON-DESTRUCTIVE COMPONENT TESTING FOR TRUCK BRAKE SYSTEMS

The Fraunhofer Application Center for Optical Metrology and Surface Technologies AZOM and University of Applied Sciences Zwickau are jointly developing a new fiber-based plasma analysis method.

Non-destructive testing can prevent accidents that endanger human life and cause serious material damage. In many components and units, any change in the material composition has serious impacts on their mechanical properties. In addition, component quality, safety and reliability are often reduced. Such changes can have a negative effect on long-term material durability, if metal components are machined at high temperatures. As long as the material is not analyzed during production, a subsequent quality inspection of hard-to-reach, permanently installed components sometimes proves even impossible. However, manufacturers of aluminum air tanks require appropriate analysis solutions which enable non-destructive component testing, especially in cavities, with an optimum cost-benefit ratio. Non-destructive quality testing of welds in air tanks for truck brake systems poses a particular challenge. They are often cut or inflated to analyze the weld quality. Scientists at Fraunhofer AZOM and WHZ are working together with companies such as Lasertechnik Berlin GmbH to develop a non-destructive process for analyzing difficult-to-access areas. High time and cost savings can be expected due to the fast and virtually non-destructive on-site element analysis of components.

Das Fraunhofer-Anwendungszentrum für Optische Messtechnik und Oberflächentechnologien AZOM und die Westsächsische Hochschule Zwickau (WHZ) entwickeln gemeinsam ein neues faserbasiertes Plasmaanalyseverfahren.

Die zerstörungsfreie Prüfung kann Unfälle mit Gefährdung von Menschenleben und schweren Sachschäden vermeiden. In vielen Bauteilen und Baugruppen haben Veränderungen der stofflichen Zusammensetzung gravierende Auswirkungen auf deren mechanischen Eigenschaften. Häufig vermindern sich dazu Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bauteilen. Bei der Bearbeitung metallischer Komponenten unter hohen Temperaturen können sich derartige Veränderungen nachteilig auf die langfristige Materialbeständigkeit auswirken.

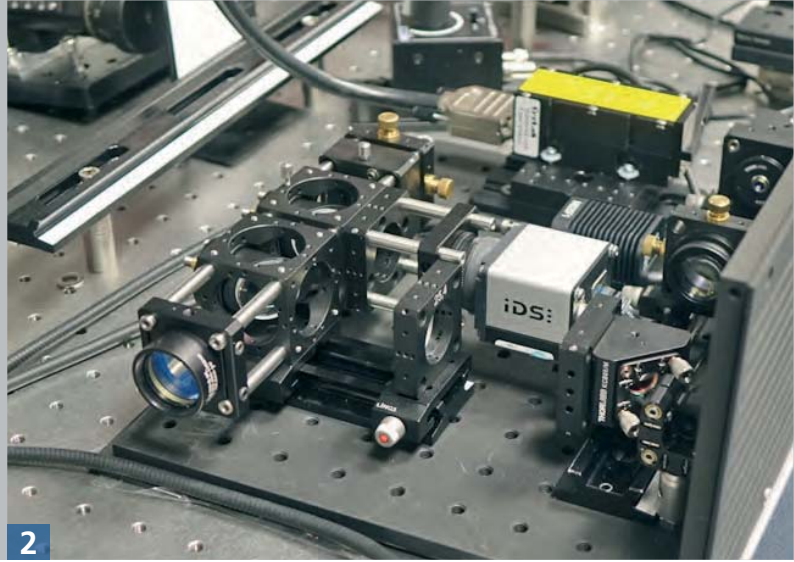
Air reservoir for truck brake systems



Weld seams of an air reservoir for truck brake systems, which can be analyzed with the AZOM measuring system.



1



2

Sofern das Material nicht herstellungsbegleitend analysiert wird, ist eine nachträgliche Qualitätsprüfung schwer zugänglicher, fest verbauter Bauteile mitunter gar nicht möglich. Hersteller von Aluminium-Druckluftbehältern fordern jedoch geeignete Analyselösungen, die vor allem in Hohlräumen eine zerstörungsfreie Bauteilprüfung mit optimalem Kosten-Nutzen-Verhältnis ermöglichen. Eine Herausforderung stellt die zerstörungsfreie Qualitätsprüfung von Schweißnähten in Luftbehältern für LKW-Bremsanlagen dar. Oft werden diese zerschnitten oder aufgeblasen, um die Qualität der Schweißnähte zu untersuchen. Wissenschaftler des Fraunhofer AZOM und der WHZ arbeiten gemeinsam mit Unternehmen, wie etwa der Lasertechnik Berlin GmbH, an einem zerstörungsfreien Verfahren zur Analyse von schwer zugänglichen Räumen. Durch die schnelle und quasi-zerstörungsfreie Vor-Ort-Elementanalytik von Bauteilen ist mit einem hohen Zeit- und Kosteneinsparpotenzial zu rechnen.

- 1 *The inspection of safety-relevant components, for example on trucks, is one field of application for the newly developed plasma analysis method.*
- 2 *Experimental setup for the investigation of weld seams in air reservoirs of brake cylinders.*

The research project is funded by the Saxon State Ministry for Higher Education, Research and the Arts.

Funded by



FKZ: 4-7544.10/7/3

CONTACT

M. Eng. Tobias Baselt

Optical Process Control and Fiber Technologies

+49 375 536-1970

tobias.baselt@iws.fraunhofer.de





ZENTREN UND NETZWERKE

CENTERS AND NETWORKS

KOOPERATIONSPARTNER
COOPERATION PARTNERS

ZENTREN
CENTERS

AUSSENSTELLEN
BRANCHES

NETZWERKE
NETWORKS

IMPRESSUM
EDITORIAL NOTES

KOOPERATIONSPARTNER

COOPERATION PARTNERS



CENTER FOR COATINGS AND DIAMOND TECHNOLOGIES CCD

Staying competitive in today's economic situation calls for innovative products and manufacturing solutions. In particular, the Fraunhofer CCD's projects address coating and technology solutions that combine expertise in processes, materials and systems engineering with scientific excellence, quality and project management. The services involve material coating and testing for customer applications, research and development projects for product development, consultation and engineering services and material characterizations, as well as system development, integration, installation and support. The Fraunhofer Center for Coatings and Diamond Technologies CCD is located in East Lansing, Michigan, on the campus of the Michigan State University MSU. For many years, IWS scientists have been cooperating with Fraunhofer CCD and MSU in the fields of thin layer and diamond technology.

CENTER FOR COATINGS AND DIAMOND TECHNOLOGIES CCD

In der heutigen Wirtschaftslage kompetitiv zu bleiben, erfordert innovative Produkte und Herstellungslösungen. Im Speziellen zielen die Projekte des Fraunhofer CCD auf Beschichtungs- und Technologielösungen ab, die Prozesse, Materialien und systemtechnisches Know-how mit wissenschaftlicher Exzellenz, Qualitäts- und Projektmanagement in Einklang bringen. Das Angebot umfasst das Beschichten und Testen von Materialien für Kundenanwendungen, Forschungs- und Entwicklungsprojekte für die Produktentwicklung, Beratungs- und Ingenieursleistungen, Materialcharakterisierungen sowie Systementwicklung, -integration, -installation und Support. Das Fraunhofer-Center for Coatings and Diamond Technologies CCD befindet sich in East Lansing, Michigan, auf dem Campus der Michigan State University (MSU). Seit vielen Jahren arbeitet das Fraunhofer IWS mit dem Fraunhofer CCD und der MSU auf den Forschungsfeldern Dünnschicht- und Diamanttechnik zusammen.

CONTACT: Prof. John Albrecht, +1 517 432-8709, jalbrech@msu.edu

CENTER FOR LASER APPLICATIONS CLA

The Fraunhofer Center for Laser Applications CLA is the result of focusing all laser research activities of Fraunhofer USA in a joint center. Since 1994, this center has been developing new laser applications in the United States for a wide variety of industrial users. With its expertise in laser processing of materials and its state-of-the-art laser systems, Fraunhofer CLA provides support in the process solutions development for customized use. Its activities focus on providing laser technologies and systems. The center provides a wide range of laser processes, including welding, cutting, drilling, coating, heat treatment, surface marking and patterning, as well as additive manufacturing. Another special field is systems development for process monitoring and control.

CENTER FOR LASER APPLICATIONS CLA

Das Fraunhofer-Center for Laser Applications CLA ist das Ergebnis der Bündelung aller Laser-Aktivitäten von Fraunhofer USA in einem gemeinsamen Zentrum. Seit 1994 entwickelt dieses in den Vereinigten Staaten neue Laserapplikationen für eine große Vielfalt an industriellen Anwendern. Mit seiner Expertise auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung und seinen Laseranlagen auf dem neuesten Stand der Technik unterstützt das Fraunhofer CLA dabei, Prozesslösungen für den individuellen Nutzen zu entwickeln. Im Mittelpunkt der Aktivitäten steht die Bereitstellung von Lasertechnologien und -systemen. Das Center bietet eine breite Palette von Laserprozessen einschließlich Schweißen, Schneiden, Bohren, Beschichten, Wärmebehandeln, Oberflächen markieren und -strukturieren sowie additiver



2



3

ZENTREN UND NETZWERKE

CENTERS AND NETWORKS

Fertigung. Ein weiteres Spezialgebiet ist die Entwicklung von Systemtechnik zur Prozessüberwachung und -steuerung. Außerdem entwickeln die Forscher am Fraunhofer CLA Bearbeitungsköpfe zum Auftragschweißen und Generieren. Das CLA befindet sich in Plymouth, Michigan, in der Nähe von Detroit.

The researchers at Fraunhofer CLA also develop processing heads for build-up welding and additive manufacturing. The CLA is located in Plymouth, Michigan, close to Detroit.

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

FRAUNHOFER PROJECT CENTER – WROCLAW CENTER OF EXCELLENCE FOR MANUFACTURING

In Partnerschaft mit der Wrocław University of Technology gegründet erweitert das »Fraunhofer Project Center for Laser Integrated Manufacturing« das Kooperationsnetzwerk des Fraunhofer IWS nach Osteuropa und nimmt eine Vorreiterrolle in der deutsch-polnischen Zusammenarbeit ein. Die wichtigsten Zielstellungen der Kooperation bestehen einerseits in der Auftragsforschung und in Entwicklungen für polnische Industriekunden. Andererseits treiben die Kooperationspartner den Ausbau des Center-Ausbildungsangebots voran und fördern den grenzüberschreitenden wissenschaftlichen Austausch. Am Fraunhofer Project Center in Wrocław wird an neuen Methoden und Technologien für optische Messungen und Oberflächeninspektionen an schwierig zu qualifizierenden Bauteilen gearbeitet. Die Aktivitäten im Reverse Engineering sind eng verknüpft mit der Digitalisierung physischer Objekte und der Erstellung von 3D-Computermodellen. Außerdem besteht in der Lasermaterialbearbeitung sowie dem Rapid Prototyping und Rapid Tooling ein enger Austausch mit dem Kompetenzfeld Materialprüfung des Fraunhofer IWS.

FRAUNHOFER PROJECT CENTER – WROCLAW CENTER OF EXCELLENCE FOR MANUFACTURING

Founded in partnership with the Wrocław University of Technology, the Fraunhofer Project Center for Laser-Integrated Manufacturing expands Fraunhofer IWS' cooperation network to Eastern Europe and plays a pioneering role in Polish-German cooperation. The objectives in the cooperation prioritize contract research as well as development and engineering services for Polish industrial customers. Furthermore, the cooperation partners also expand the center's training programs and contribute to transnational scientific exchange. The researchers at the Fraunhofer Project Center in Wrocław are working on new methods and technologies for optical measurements and surface inspections of components that are difficult to refine. Reverse Engineering activities are closely linked with physical objects digitization and 3D computer model creation. In addition, Wrocław's scientists research laser materials processing, rapid prototyping and tooling, exchanging approaches and findings with the researchers in the Material Testing unit Fraunhofer IWS.

CONTACT: Prof. Dr. Edward Chlebus, TU Wrocław, +48 71 320 2705, edward.chlebus@pwr.wroc.pl
Prof. Dr. Karol Kozak, +49 351 83391-3717, karol.kozak@iws.fraunhofer.de

- 1 *The Fraunhofer Center for Coatings and Diamond Technologies CCD in East Lansing, Michigan.*
- 2 *The Fraunhofer Center for Laser Applications CLA in Plymouth, Michigan.*
- 3 *The Fraunhofer Project Center for Laser-Integrated Manufacturing in Wrocław, Poland.*

ZENTREN

CENTERS



CENTER FOR ADVANCED MICRO-PHOTONICS (CAMP)

CAMP focusses on laser-based surface modification and patterning processes. The center targets opportunities and challenges in the development of new system, process and measurement solutions. To transfer technologies into industrial processes, the researchers implement every step along the entire process chain. CAMP employs cross-operational approaches ranging from simulation, laser processes and optical measurements to machine learning. The scientists at Fraunhofer IWS and TU Dresden focus on various applications of laser microprocessing and measurement engineering. The center deploys a wide range of current technologies. In 2019, CAMP researchers published more than 37 papers in peer-reviewed journals and 17 further contributions in conference proceedings. 50 talks were given and posters presented, including 7 plenary and invited talks. CAMP members were awarded with various national and international prizes.

CAMP erforscht laserbasierte Oberflächenmodifikations- und Strukturierungsverfahren. Das Zentrum stellt sich den Herausforderungen für die Entwickler neuer System- und Prozesslösungen mit Integration von Messsystemen. Technologien werden von den Forschern entlang der gesamten Prozesskette in industrielle Applikationen überführt. CAMP demonstriert betriebsübergreifende Ansätze von der Simulation über den Laserprozess und optische Messungen bis zum maschinellen Lernen. Die Wissenschaftler des Fraunhofer IWS und der TU Dresden konzentrieren sich auf verschiedene Anwendungen und Technologien für die Lasermikrobearbeitung mit integrierter Messtechnik. Das Zentrum setzt ein breites Spektrum aktueller Technologien ein. Im Jahr 2019 veröffentlichten die CAMP-Forscher mehr als 37 Publikationen in renommierten Zeitschriften sowie 17 weitere Beiträge in Konferenzbänden. 50 Vorträge und Poster präsentierten die Forschungsarbeiten, darunter sieben Plenar- und eingeladene Vorträge. CAMP-Mitglieder wurden mit verschiedenen nationalen und internationalen Preisen ausgezeichnet.

International Summer School "Trends and New Developments in Laser Technology"

Every year CAMP invites students and PhD students to a one-week seminar to learn about basic and applied aspects of laser technology. With more than 50 participants from 13 different countries across all continents, the summer school has earned a reputation for educational training. CAMP will continue to host this international school in 2020.

Apply now: www.iws.fraunhofer.de/summerschool

21st International Symposium on Laser Precision Micro-Manufacturing (LPM 2020)

In 2020 CAMP brings the worldwide number one in the field of laser precision micro-research to Dresden. The most advanced developments are discussed among industry, research and science. Together with the Japan Laser Processing Society (JLPS), Professor Andrés Fabián Lasagni and Dr Udo Klotzbach will host the symposium from 23–26 June, 2020.

Apply now: <http://s.fhg.de/lpm2020>

CONTACT: Dr. Udo Klotzbach, +49 351 83391-3252, udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de
Prof. Dr. Andrés-Fabián Lasagni, +49 351 83391-3007, andres-fabian.lasagni@iws.fraunhofer.de





ZENTRUM BATTERIEFORSCHUNG

Die Batterie der Zukunft steht im Fokus. Fraunhofer IWS und TU Dresden erforschen effiziente Lösungen mit verbesserter Energiedichte für eine Vielzahl von Wachstumsmärkten. Etabliert wurde eine Prozesskette zur Batteriezellfertigung. Neben der klassischen Nassbeschichtung von Batterieelektroden wird daran gearbeitet, Ausgangsmaterialien vollständig lösungsmittelfrei zu freistehenden Elektrodenfilmen zu verarbeiten.

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

CENTER FOR BATTERY RESEARCH

Future batteries are the focus of attention. Researchers at Fraunhofer IWS and TU Dresden are developing efficient solutions with improved energy density for a variety of growth markets. A process chain for battery cell production has been established. In addition to classical battery electrode wet coating, researchers are currently working on a completely solvent-free processing of starting materials into free-standing electrode films.

ADDITIVE MANUFACTURING CENTER DRESDEN

Das Additive Manufacturing Center Dresden (AMCD) ist ein internationales Kompetenzzentrum, an dem verfahrensübergreifend Werkstoff- und Fertigungslösungen für herausfordernde Produkte erarbeitet werden. Es entstand in enger Kooperation zwischen Fraunhofer IWS, TU Dresden und DRESDEN-concept. Die Verfahrenspalette umfasst u. a. Laserauftragschweißen, Selektives Laserstrahl-, Elektronenstrahlschmelzen und 3D-Druck.

CONTACT: Prof. Dr. Frank Brückner, +49 351 83391-3452, frank.brueckner@iws.fraunhofer.de

ADDITIVE MANUFACTURING CENTER DRESDEN

The Additive Manufacturing Center Dresden (AMCD) is an international expertise center which develops cross-procedure material and manufacturing solutions for challenging products. It was established in close cooperation between Fraunhofer IWS, TU Dresden and DRESDEN-concept. The process portfolio includes laser cladding, selective laser beam, electron beam melting and 3D printing.

ZENTRUM TAILORED JOINING

Das Fügen ist eine zentrale Herausforderung der Produktion und ein signifikanter Kostenfaktor. Um wichtige Verbesserungen und Impulse liefern zu können, entstand in Kooperation mit der TU Dresden und weiteren Partnern das fügetechnische Zentrum »Tailored Joining«. Ziel ist es, Anwendern einen Überblick über diverse Fügeverfahren zu geben, direkte Vergleiche zu ermöglichen, Neuentwicklungen kompakt darzustellen und industriebezogene Lösungen aufzeigen.

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

CENTER FOR TAILORED JOINING

Joining is a central challenge in production and a significant cost factor. In order to provide important improvements and impulses, the Tailored Joining technology center was founded in close cooperation with TU Dresden and other partners. The aim is to offer customers an overview of various joining processes, to enable direct comparisons, to present new developments in a compact form and to point out industry-related solutions.

AUSSENSTELLEN

BRANCHES



1



2

FRAUNHOFER PROJECT GROUP AT THE DORTMUNDER OBERFLÄCHENCENTRUM DOC®

The DOC® provides customized coatings for applications in continuous processes on steel strip. Developments focus primarily on improving functions such as corrosion and scratch resistance, electrical conductivity or cleaning properties. The group's activities concentrate on PVD and thermal coating processes as well as laser surface processing. In close cooperation with the project partner ThyssenKrupp, emphasis is being placed on developing conductive, formable carbon coating systems and surfaces.

CONTACT: Dr. Teja Roch, +49 231 844-3894, teja.roch@iws.fraunhofer.de

APPLICATION CENTER FOR OPTICAL METROLOGY AND SURFACE TECHNOLOGIES (AZOM)

The Fraunhofer AZOM bridges the gap between the research expertise of Fraunhofer IWS and the West Saxon University of Applied Sciences Zwickau. The partners address the requirements of the regional economy by implementing the latest research approaches in optical metrology, image processing and biophotonics. The scientists aim to quickly and directly transfer research results into application-specific solutions for industrial processes. The portfolio includes the characterization of almost all surface properties using state-of-the-art equipment from established manufacturers. In addition, AZOM offers developments for individual challenges which cannot be solved using standard commercial technology.

CONTACT: Prof. Dr. Peter Hartmann, +49 171 9066-350, peter.hartmann@iws.fraunhofer.de

PROJEKTGRUPPE DES FRAUNHOFER IWS AM DORTMUNDER OBERFLÄCHENCENTRUM DOC®

Das DOC® steht für maßgeschneiderte Beschichtungen zum Einsatz in kontinuierlichen Verfahren auf Stahlband. Vorrangig zielen dessen Entwicklungen darauf ab, Funktionen, wie Korrosionsbeständigkeit, Kratzfestigkeit, elektrische Leitfähigkeit oder Reinigungseigenschaften, zu verbessern. Die Tätigkeiten der Projektgruppe konzentrieren sich auf die Oberflächenbeschichtung mittels PVD- und thermischer Beschichtungsverfahren sowie die Laserflächenbearbeitung. In enger Kooperation mit dem Projektpartner ThyssenKrupp liegen die Schwerpunkte auf der Entwicklung leitfähiger, umformbarer Kohlenstoffschichtsysteme und Oberflächen.

ANWENDUNGSZENTRUM FÜR OPTISCHE MESSTECHNIK UND OBERFLÄCHENTECHNOLOGIEN AZOM

Das Fraunhofer AZOM baut eine Brücke zwischen den Forschungskompetenzen des Fraunhofer IWS Dresden und der Westsächsischen Hochschule Zwickau. Die Partner verbinden die Anforderungen der regionalen Wirtschaft mit neuesten Forschungsansätzen der optischen Messtechnik, Bildverarbeitung und Biophotonik. Die Wissenschaftler setzen sich zum Ziel, Forschungsergebnisse durch applikationsspezifische Anwendungslösungen schnell und direkt in industrielle Prozesse zu übertragen. Das Leistungsspektrum umfasst Charakterisierungen nahezu aller Oberflächeneigenschaften mit modernsten Geräten etablierter Hersteller. Ergänzend bietet das AZOM Entwicklungen für individuelle Problemstellungen, die mit am Markt erhältlicher Standardtechnik nicht zu lösen sind.

1 Fraunhofer Project Group at the Dortmunder OberflächenCentrum DOC® in Dortmund.

2 The Application Center for Optical Metrology and Surface Technologies AZOM in Zwickau.



DRESDEN-CONCEPT: EINZIGARTIGE FORSCHUNGS- ALLIANZ AUS WISSENSCHAFT UND KULTUR

DRESDEN-CONCEPT: UNIQUE RESEARCH ALLIANCE OF SCIENCE AND CULTURE

In Vorbereitung der Technischen Universität Dresden (TU Dresden) auf die erste Exzellenzinitiative des Bundes schlossen sich 15 Forschungseinrichtungen zu einem Verein zusammen, um bereits bestehende Kooperationen zu stärken. Das Fraunhofer IWS gehörte zu diesen Gründungsinstituten und bringt sich seither aktiv in die Netzwerkarbeit ein. Mit dem Zusammenschluss als DRESDEN-concept e.V. (DDc) glückte die Exzellenzbewerbung, die 2019 bestätigt wurde. DRESDEN-concept steht für »Dresden Research and Education Synergies for the Development of Excellence and Novelty«. Seit der Gründung 2010 hat der Verein seine Mitgliederzahl im Jahr 2020 mehr als verdoppelt und vernetzt Forschende am Standort Dresden interdisziplinär sowie über die Institutsgrenzen hinaus. Die Partner erschließen Synergien in Forschung, Ausbildung, Infrastruktur und Verwaltung. Sie koordinieren die Wissenschaftsstrategie und identifizieren die Gebiete, auf denen Dresden international führt, um hochkarätige Köpfe für die sächsische Landeshauptstadt zu gewinnen. Dank der facettenreichen Forschungsrichtungen sind die DDc-Partner ein lukrativer Arbeitgeber für Absolventen der Dresdner Hochschulen und Menschen aus aller Welt. Zahlreiche Kontakte in die lokale Wissenschaft machen DDc zu einem Ansprechpartner für Politik, Stadt sowie Gesellschaft und somit zu einer strahlkräftigen Marke des gesamten Wissenschaftsstandorts Dresden.

Im Jubiläumsjahr sind alle Wissenschaftsinteressierten herzlich eingeladen, sich am 10. Oktober 2020 zur großen DRESDEN-concept-Jubiläumsfeier im Deutschen Hygiene-Museum in kooperativen Projekten zum Anfassen und Verstehen, bei Fachvorträgen etc. in Dresden über die Allianz informieren. Mehr Informationen: www.dresden-concept.de

As part of Technische Universität Dresden's (TU Dresden) preparations for the first federal excellence initiative, 15 research institutions formed an association in order to strengthen already existing cooperations. Fraunhofer IWS was one of these founding institutes and has been actively involved in the network since then. Thanks to this alliance TU Dresden's application for excellence was successfully confirmed in 2019. DRESDEN-concept stands for "Dresden Research and Education Synergies for the Development of Excellence and Novelty". Since its foundation in 2010, the association has more than doubled its membership base and brings together researchers in Dresden from across disciplines. The partners develop synergies in research, education, infrastructure and administration. They coordinate science strategies and identify the fields of research in which Dresden is internationally renowned in order to attract first-class minds to saxon state capital. Thanks to the multifaceted research fields, DDc partners are interesting employers for Dresden's university graduates and experts from all over the world. Numerous connections to the local scientific community ensure that DDc is a valuable contact for politics, the city and society and thus a powerful source of inspiration for Dresden as a science location.

In the anniversary year, all parties interested in science are cordially invited to join the big DRESDEN-concept anniversary celebration in the German Hygiene Museum on 10 October 2020 to experience and understand cooperative projects, to attend lectures, and much more. Further information: www.dresden-concept.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Technische Universität Dresden – founded in 1828 as Technische Bildungsanstalt Dresden – is one of the earliest technical-academic educational institutions in Germany. The consistent competitive orientation of the university includes business-oriented thinking and acting as well as the development of effective partnerships. Since its foundation, Fraunhofer IWS has been working closely with the Saxon university by means of professional and practical exchange. TU Dresden is one of the top universities in Germany and Europe: strong in research, first-class in terms of the variety and quality of study programs, closely linked to culture, economy and society. As a modern university, with its 18 faculties in five departments, it offers a multifaceted scientific spectrum as only few universities in Germany do. It is the largest university in Saxony with 121 courses of study. Its key research areas, biomedicine and bio-engineering, material sciences, information technology, microelectronics, as well as energy and environment, are considered exemplary throughout Germany and Europe. The large TU Dresden campus family consists of about 32,400 students and about 8,300 employees – 600 of which are professors. Since 2012, TUD has been one of the eleven German universities of excellence. At that time, it was successful with four applications: the institutional strategy “The Synergetic University”, the excellence clusters Center for Advancing Electronics Dresden (cfaed) and Center for Regenerative Therapies Dresden (CRTD), and the Graduate School Dresden, International Graduate School for Biomedicine and Bioengineering (DIGSBB). In January 2019, three new Clusters of Excellence have now started their work: PoL: Physics of Life, ct.qmat: Complexity and Topology in Quantum Materials and CeTI: Center for Tactile Internet. Since 1 November 2019, TU Dresden has been receiving permanent funding within the framework of the excellence strategy of the federal and state governments.

Die Technische Universität Dresden – gegründet 1828 als Technische Bildungsanstalt Dresden – gehört zu den ältesten technisch-akademischen Bildungsanstalten Deutschlands. Zur konsequenten Wettbewerbsorientierung der Universität gehören wirtschaftsnahes Denken und Handeln sowie der Ausbau funktionierender Partnerschaften. So entwickeln sich über den fachlichen und praktischen Austausch seit Bestehen des Fraunhofer IWS enge Beziehungen mit der sächsischen Universität. Die TU Dresden ist eine der Spitzenuniversitäten Deutschlands und Europas: stark in der Forschung, erstklassig in der Vielfalt und der Qualität der Studienangebote, eng vernetzt mit Kultur, Wirtschaft und Gesellschaft. Als moderne Universität bietet sie mit ihren 18 Fakultäten in fünf Bereichen ein so breit gefächertes wissenschaftliches Spektrum wie nur wenige Hochschulen in Deutschland. Sie ist die größte Universität Sachsens mit 121 Studiengängen. Ihre Schwerpunkte Biomedizin und Bio-engineering, Materialwissenschaften, Informationstechnik und Mikroelektronik sowie Energie und Umwelt gelten bundes- und europaweit als vorbildlich. Die große Campus-Familie der TU Dresden setzt sich zusammen aus rund 32 400 Studierenden und ca. 8 300 Mitarbeitern – davon 600 Professoren. Seit 2012 gehört die TUD zu den elf deutschen Exzellenz-Universitäten. Sie war damals mit vier Anträgen erfolgreich: Zukunftskonzept »Die Synergetische Universität«, die Exzellenzcluster Center for Advancing Electronics Dresden (cfaed) und Center for Regenerative Therapies Dresden (CRTD) sowie die Graduiertenschule Dresden International Graduate School for Biomedicine and Bioengineering (DIGSBB). Im Januar 2019 haben nun drei neue Exzellenzcluster ihre Arbeit aufgenommen: PoL – Physik des Lebens, ct.qmat – Komplexität und Topologie in Quantenmaterialien und CeTI – Zentrum für Taktiler Internet. Seit 1. November 2019 erhält die TU Dresden eine dauerhafte Förderung im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder.

<https://tu-dresden.de>



Seit 1997 wächst die exzellente Kooperation des Fraunhofer IWS mit der TU Dresden kontinuierlich. Beide Partner verknüpfen breites Grundlagenwissen mit anwendungsorientierter Entwicklung. Entstanden ist ein enger Austausch von Forschenden, Studierenden, Doktoranden und technischer Ausstattung.

The excellent cooperation between Fraunhofer IWS and TU Dresden has been thriving since 1997. Both partners combine profound basic knowledge with application-oriented development. The result is a close exchange of researchers, students, PhD students and technical equipment.



PROF. DR. CHRISTOPH LEYENS

Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Materials Science

Chair of Materials Science



PROF. DR. STEFAN KASKEL

*Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Department of Chemistry and Food Chemistry*

Chair of Inorganic Chemistry



PROF. DR. KAROL KOZAK

*Faculty of Medicine
Clinic for Neurology*

Data Management and Evaluation



PROF. DR. ANDRÉS-FABIÁN LASAGNI

*Faculty of Mechanical Science and Engineering
Institute of Manufacturing Technology*

Chair of Large Area Laser-Based Surface Structuring



PROF. DR. ANDREAS LESON

Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Manufacturing Technology

Nano- and Coating Technology



PROF. DR. MARTINA ZIMMERMANN

*Faculty of Mechanical Science and Engineering
Institute of Materials Science*

Chair of Mechanics of Materials and Failure Analysis



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

**DRESDEN
concept**



DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

FRAUNHOFER GESELLSCHAFT

Research for industrial use lies at the heart of all activities pursued by the Fraunhofer-Gesellschaft. Founded in 1949, the research organization undertakes applied research that drives economic development and serves the wider benefit of society. Its services are solicited by customers and contractual partners in industry, the service sector and public administration.

At present, the Fraunhofer-Gesellschaft maintains 74 institutes and research units. The majority of the more than 28,000 staff are qualified scientists and engineers, who work with an annual research budget of 2.8 billion euros. Of this sum, 2.3 billion euros are generated through contract research. Around 70 percent of the Fraunhofer-Gesellschaft's contract research revenue is derived from contracts with industry and from publicly financed research projects. Around 30 percent is contributed by the German federal and state governments in the form of base funding, enabling the institutes to work ahead on solutions to problems that will not become acutely relevant to industry and society until five or ten years from now.

International collaborations with excellent research partners and innovative companies around the world ensure direct access to regions of the greatest importance to present and future scientific progress and economic development.

With its clearly defined mission of application-oriented research and its focus on future key technologies, the Fraunhofer-Gesellschaft plays a prominent role in the German and European innovation process. Applied research has a knock-on effect that extends beyond the direct benefits perceived by the customer: Through their research and development work, the Fraunhofer Institutes help to reinforce the competitive strength of the economy in their local region, and throughout Germany and Europe.

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 74 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 28.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,8 Milliarden Euro. Davon entfallen 2,3 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent davon erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 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.

Editorial staff and coordination:	Dipl.-Soz. Wiss. Markus Forytta B.Sc. Matti Hilbert
Editing:	Ricarda Nonn Kerstin Zenner René Zenner
English translation:	Claudia Leson
Proofreading:	Martin Zimmermann Lyam Bittar
Printing:	Stoba-Druck GmbH Am Mart 16, 01561 Lampertswalde
Photo credits:	pp. 4, 10, 11, 28, 44, 52, 60, 68, 76 p. 9 p. 25 p. 13 pp. 21, 47 p. 39 right, 41 p. 43 right p. 45 p. 49 p. 51 right p. 55 p. 59 p. 85 left p. 89 p. 92 right p. 92 left p. 95 All other pictures

Address

Fraunhofer-Institut für Werkstoff-
und Strahltechnik IWS Dresden
(Fraunhofer Institute for Material
and Beam Technology IWS)

Winterbergstraße 28
01277 Dresden

www.iws.fraunhofer.de
+49 351 83391-0
+49 351 83391-3300
info@iws.fraunhofer.de

Förstermartin.de, Martin Förster
Shutterstock/IWS Dresden
Fraunhofer IWM
Tobias Ritz
Frank Höhler
ALOTec Dresden
Davide Schultz
Technisches Design/TUD
Fraunhofer IPT
S.K.M. Informatik GmbH
Fraunhofer IOF
Shutterstock
MEV Datenbank/mev.de
Wrocław University of Technology
Helge Gerischer
thyssenkrupp Steel Europe/
Michael Rasche
Lothar Sprenger

Fraunhofer IWS



www.iws.fraunhofer.de