

# JAHRESBERICHT 2020

## INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	5
Zeitleiste 2020	6
Institutsprofil	8
<b>Forschung &amp; Entwicklung</b>	<b>10</b>
Materialbearbeitung und Bearbeitungssysteme	12
Optische Messtechnik und optoelektronische Systeme	32
<b>Zahlen &amp; Fakten</b>	<b>46</b>
Organigramm	48
Beirat	50
Mittelgeber	51
Personal	51
Kooperationen	52
Ausstattung	54
Mitgliedschaften	56
Veranstaltungen	58
Ehrungen und Auszeichnungen	60
Bachelor, Master, Dissertationen	61
Patente	62
Bewilligte Projekte Publikationen	63
	64
Impressum	70



## LIEBE LESERIN, LIEBER LESER!

2020 war ein in jeder Hinsicht besonderes Jahr für uns alle. Erstmals wurden am BIAS im Zuge der Pandemie-Bekämpfung die Maschinen heruntergefahren, unsere Mitarbeiter nach Hause geschickt, musste jeder seinen Alltag vollkommen umstrukturieren und sich den ständig wechselnden Vorgaben anpassen.

Die 121. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik wurde auf den Herbst 2021 verschoben, das Bremer Wissenschaftsjahr „Phänomenal 2020“ fand unter erschwerten Bedingungen weitgehend online statt und das 12. Laser Anwender Forum LAF musste kurz vor der geplanten Veranstaltung im November wegen massiv steigender Infektionszahlen verschoben werden. Dieses Zugpferd der BIAS-Veranstaltungen wird nun erst am 23./24. November 2022 in Bremen stattfinden. Trotzdem konnten wir einige Projekte vorantreiben und hier gute Ergebnisse erzielen. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle allen Partnerinnen und Partnern sowie unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die ihr Möglichstes getan haben, um von Zuhause, in kurzen Aufenthalten am BIAS und in vielen online-Konferenzen ihre Arbeit voranzutreiben und trotz widriger Umstände hervorragende Ergebnisse erzielen konnten: Anfang des Jahres konnte die Heißrisanfälligkeit durch mechanische Anregung reduziert werden, durch eine neue Bearbeitungsstrategie die Prozessgeschwindigkeit deutlich erhöht, erste Messungen von Asphären in Reflexion wurden erfolgreich absolviert und auch die Zusammenarbeit mit der Industrie wurde trotz der Beschränkungen vorangetrieben, so dass im Sommer laserstrahl-dispergierte Werkzeuge für den industriellen Einsatz erprobt wurden. Auch Projektabschlüsse gelangen wie im August das Laserlöten von PKW-Heckklappen, bei dem durch Drahtoszillation eine hervorragende Steigerung der optischen Nahtqualität erzielt werden konnte.

Ein Jahr Covid-19 liegt nun hinter uns und wir haben die ersten Hürden zusammen mit Ihnen meistern können. Wir bedanken uns für das Vertrauen, das Sie uns im zurückliegenden Jahr entgegengebracht haben und freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit und wünschen Ihnen persönlich: bleiben Sie gesund!

Ihre Geschäftsführung

**Prof. Dr.-Ing.  
Frank Vollertsen**

Geschäftsführer  
Materialbearbeitung und  
Bearbeitungssysteme

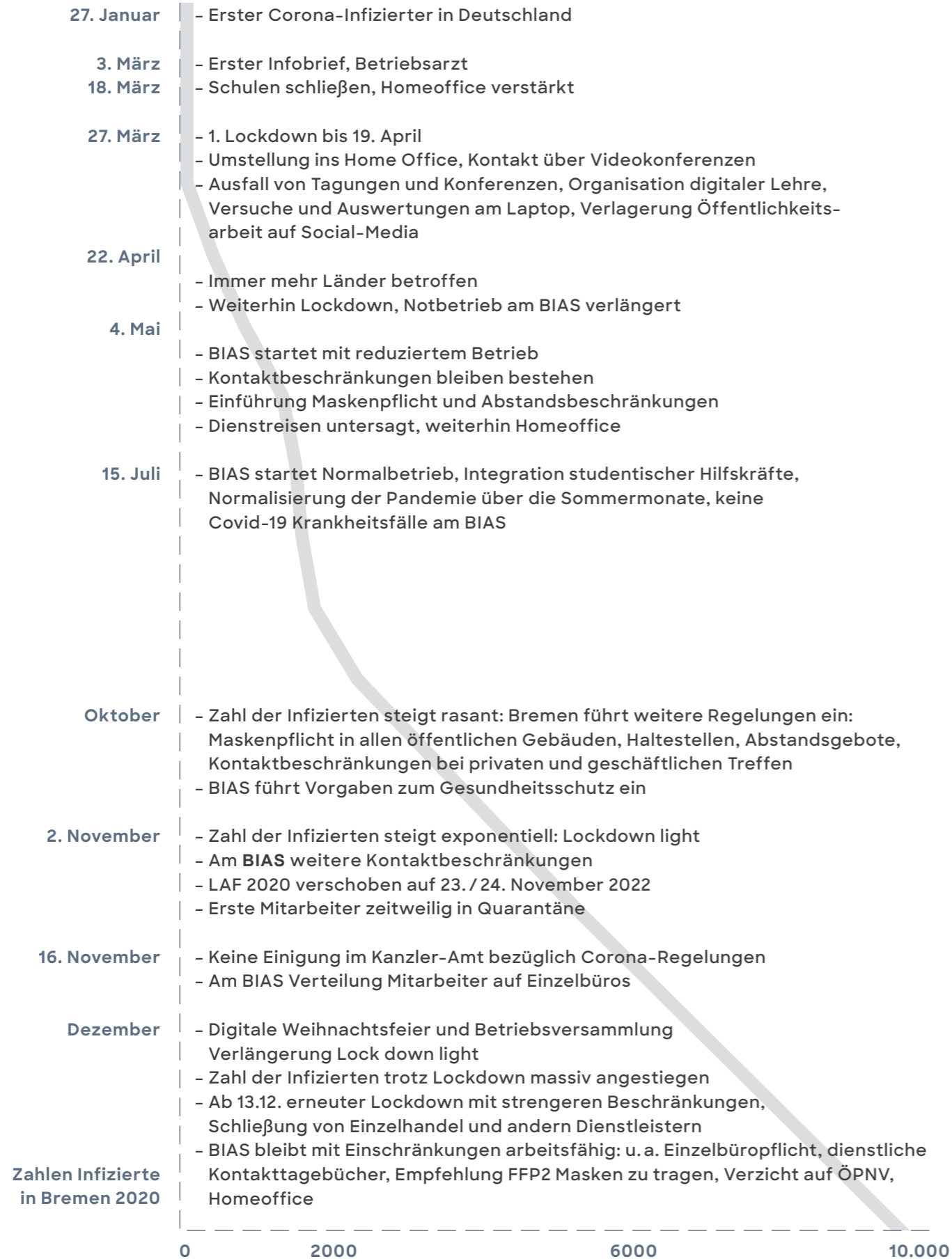
**Prof. Dr. rer. nat.  
Ralf B. Bergmann**

Geschäftsführer  
Optische Messtechnik und  
optoelektronische Systeme

**Claudia Prang  
Dipl.-Kauffrau und M.Sc.  
Wirtschaftspsychologie**

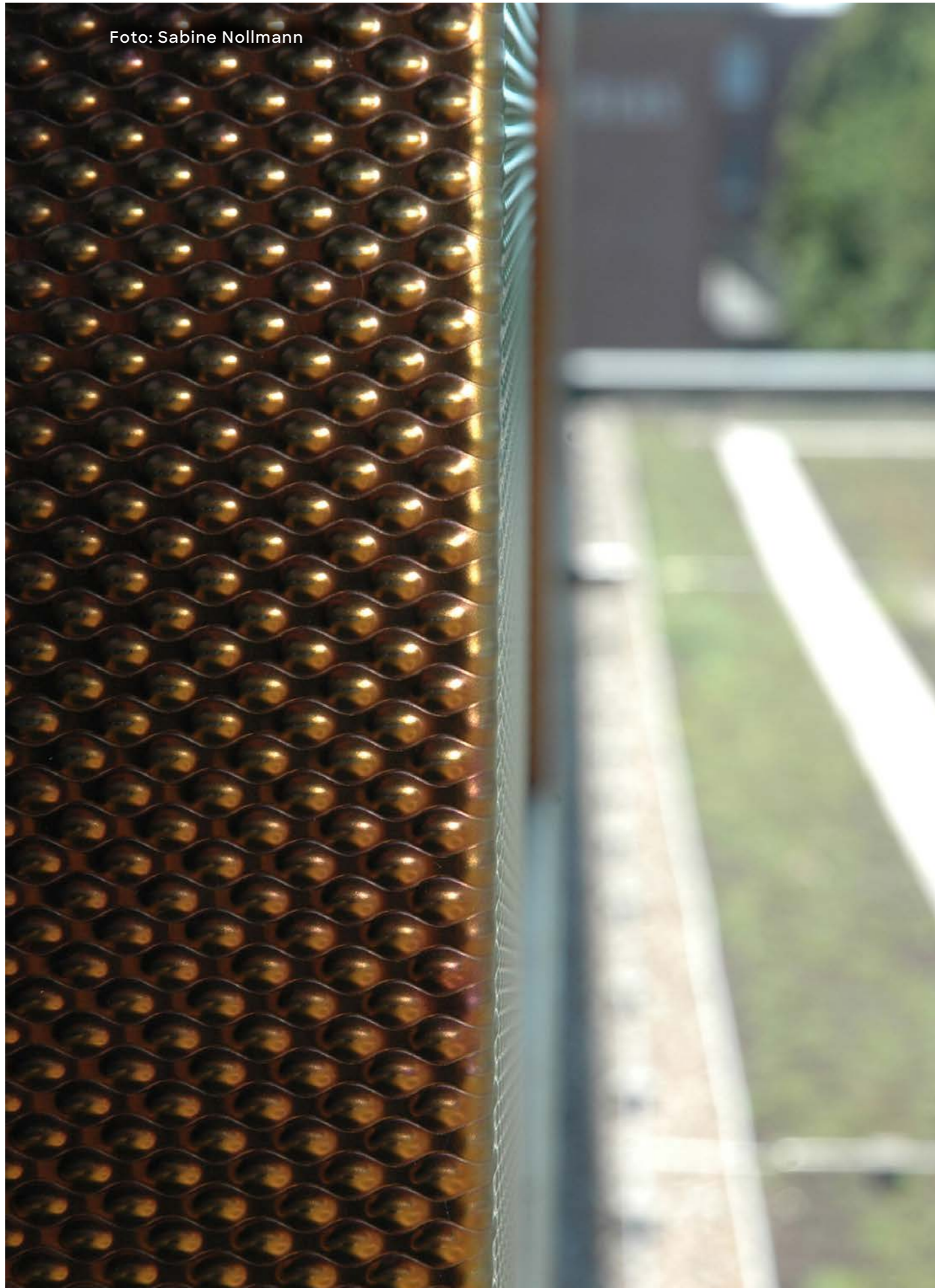
kommissarische  
Verwaltungsleitung

Informationen zu Corona



Das Corona-Jahr 2020 am BIAS

Heißbrissanfälligkeit durch mechanische Anregung reduziert	Januar	
Prozessgeschwindigkeit durch optimierte Bearbeitungsstrategie um den Faktor 80 erhöht	April / Mai	
Erste Messung von Asphären in Reflexion mit MARs	30. Juni	
Industrielle Erprobung laserstrahl-dispergierter Werkzeuge	Juni / Juli	
Projektabschluss: Steigerung der optischen Nahtqualität durch Drahtoszillation beim Laserlöten von PKW-Heckklappen demonstriert	August	
Erste Messung mit Gamma-Profilometrie	30. Sept	
Erstmals Optik zum Schweißen mit dreidimensionaler Spotverschiebung zweier Laserstrahlen einsatzbereit	November	
Korrelation akustischer Prozessemissionen mit der Einschweißtiefe	Dezember	



## INSTITUTSPROFIL

Das BIAS versteht sich als unabhängiger Forschungs- und Entwicklungspartner für Laseranwendungen und optische Messtechnik. Ziel ist der Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse und Entwicklungen in die wirtschaftliche Anwendung. Seit dem Jahr 1985 ist der Verein zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in der Freien Hansestadt Bremen e. V. (VFWF) Gesellschafter des BIAS. Der VFWF besteht aus Mitgliedern des für Wissenschaft zuständigen Fachressorts der Freien Hansestadt Bremen und der Universität Bremen. Aufgabe des VFWF ist die Förderung und Verbesserung der Forschungsinfrastruktur sowie die Weiterentwicklung des außeruniversitären Forschungspotenzials in Bremen.

Das BIAS unterstützt seine angestellten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter anderem bei ihrer Promotion. Regelmäßige Fortbildungen, wissenschaftliche Konferenzen sowie (internationale) Austauschprogramme werden allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern angeboten. Das BIAS legt Wert auf eine geschlechtsunabhängige berufliche Gleichstellung.

„Materialbearbeitung und Bearbeitungssysteme (MBS)“ unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen untersucht die vielfältigen Wechselwirkungen von Prozessen und Werkstoffen, um darauf aufbauend Prozesse und Prozessketten zu gestalten sowie geeignete Systemtechnik zu entwickeln, mit der dann die neuen oder verbesserten Prozesse zur Anwendung kommen. Mit Laserstrahlen und Lichtbögen als Energieträger werden Prozesse aus allen Kategorien der DIN 8580, vom Fügen durch Löten bis zum Beschichten durch Laserpulverauftragschweißen erforscht und zum Kundennutzen weiterentwickelt.

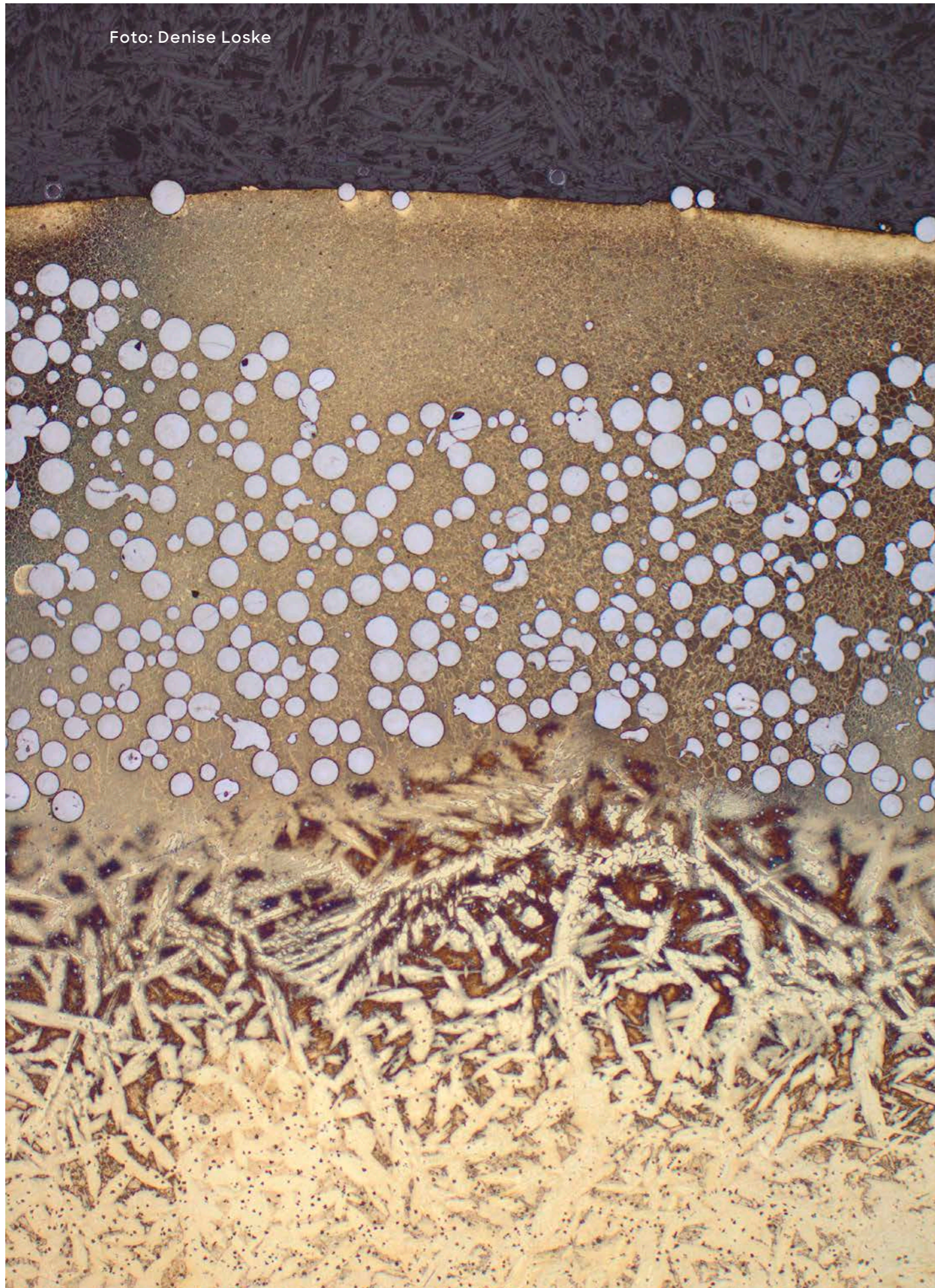
Im Fachbereich 04 Produktionstechnik hat Prof. Vollertsen eine Professur für Schweißtechnik und verwandte Verfahren an der Universität Bremen und bietet Studierenden die Möglichkeiten am BIAS Projekt- oder Abschlussarbeiten anzufertigen. Prof. Bergmann ist ebenfalls als Professor mit dem Fachgebiet Angewandte Optik an der Universität Bremen tätig und doziert im Fachbereich 01 Physik / Elektrotechnik. Auch in seinem Geschäftsbereich können Arbeiten für Studienabschlüsse durchgeführt werden.

Die Abteilung „Optische Messtechnik und Optoelektronische Systeme (OMOS)“ unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Ralf B. Bergmann arbeitet an photonischen Zukunftstechnologien. Die Schwerpunkte liegen im Bereich der optischen Messtechnik und optoelektronischer Systeme hauptsächlich für industrielle Anwendungen sowie Konzepte für die 3D-Bilderzeugung und Informationsverarbeitung. Im Rahmen der Forschungsaktivitäten werden nicht nur Konzepte, sondern auch praxistaugliche Messgeräte und praxisnahe Prototypen optischer bzw. optoelektronischer Systeme und Technologien realisiert. Zur Umsetzung kann auf eine umfangreiche Laborausstattung im optischen Bereich sowie auf Nanostrukturierungstechniken für photonische Strukturen, THz- und Röntgentechniken zurückgegriffen werden.

Unterstützt werden die wissenschaftlichen Bereiche durch die Abteilung „Finanzen, Organisation, Verwaltung“ (FOV), die im Jahr 2020 kommissarisch von Claudia Prang geleitet wurde. Insgesamt sind neun Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für den FOV Bereich tätig (siehe Teil II Personal). Verwaltet wurde im Jahr 2020 ein Umsatz in Höhe von 6.765 T€. Dieser Umsatz setzt sich aus einem Mix der öffentlichen und privaten Mittelgeber zusammen. Das Land Bremen sichert hierbei einen wesentlichen Teil der Infrastrukturkosten ab (siehe Teil II Mittelgeber).



FORSCHUNG UND  
ENTWICKLUNG



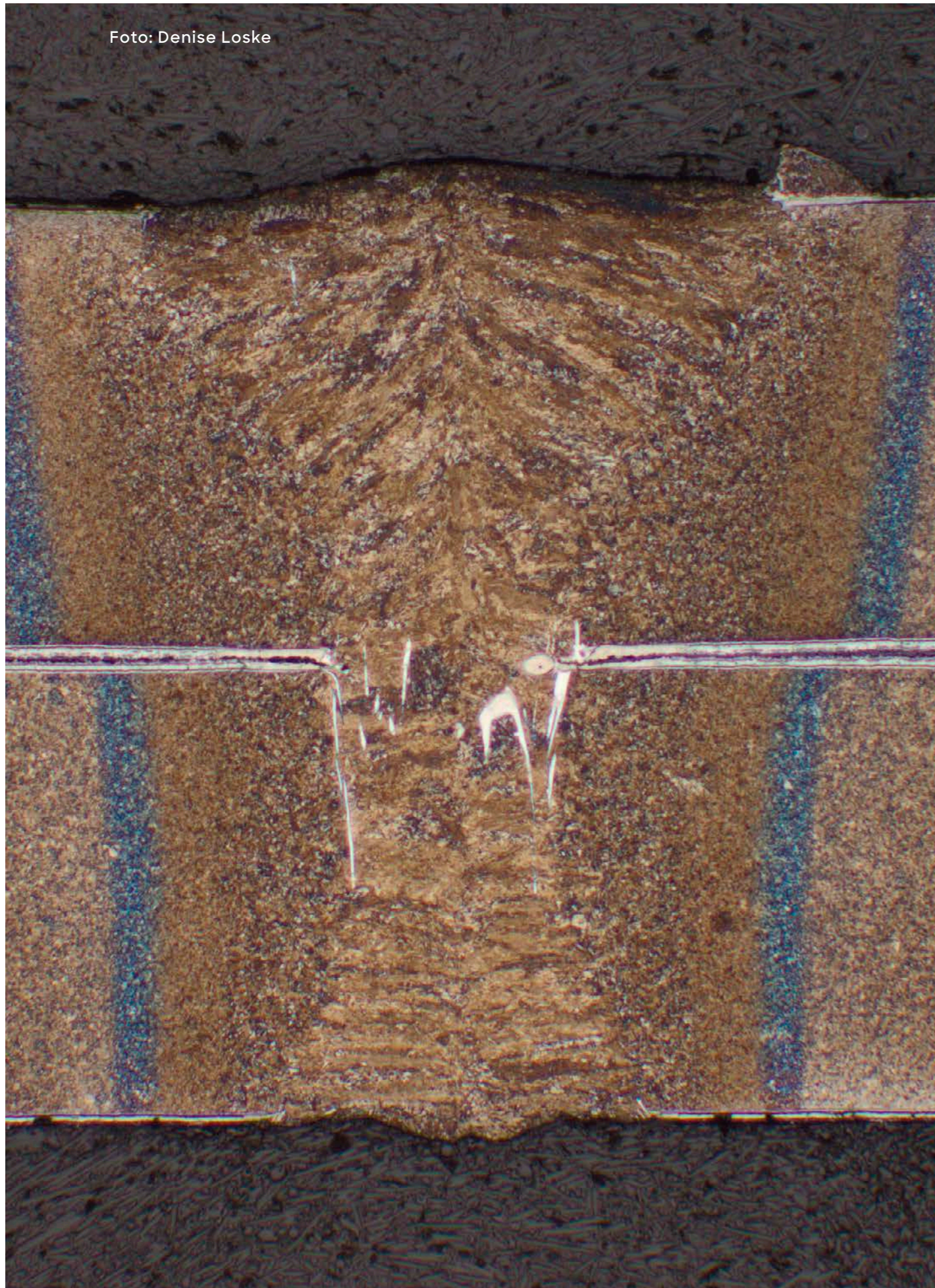
## GESCHÄFTSBEREICH MATERIALBEARBEITUNG UND BEARBEITUNGSSYSTEME

Über das Verständnis der vielfältigen Wechselwirkung von Prozessen und Werkstoffen wollen wir im Rahmen unserer Mission „Wissen schafft Wirtschaft“ das Leben der Menschen sicherer, gesünder und angenehmer machen. Die bewährten Methoden der numerischen Simulation, analytischen Modellbildung und dem Experiment helfen uns, die Hürden auf dem Weg zum Ziel zu überwinden. Bei den meisten experimentellen Arbeiten kommen Photonen als Energieträger zum Einsatz, daneben auch Lichtbögen oder Plasmastrahlen. Der Schlüssel zum Erfolg ist insbesondere bei der Lasermaterialbearbeitung die örtliche und zeitliche Verteilung der Energie, die zu verschiedenen Prozessen führt, bei denen Wärmeleitung, Umwandlungen im festen Zustand, Schmelzen und Verdampfen in unterschiedlichem Ausmaß eine Rolle spielen. Dabei werden im Geschäftsbereich Materialbearbeitung und Bearbeitungssysteme vorrangig Metalle bearbeitet, die vorwiegend als Konstruktionswerkstoff, aber auch als Funktionswerkstoff zum Einsatz kommen. Neben der Messung und Regelung der Prozessparameter werden die Ergebnisse bezüglich des Gefüges, der mechanischen Eigenschaften einschließlich der Verschleiß- oder Schwingfestigkeit und der Geometrie, z.B. hinsichtlich der Oberflächenstruktur oder des Verzugs, analysiert.

Die Anwendung des Wissens ist ein zentrales Ziel des Geschäftsbereichs. Dies erfolgt durch direkte Kooperation mit Partnern aus der Industrie und den Transfer über Köpfe. Diese Zusammenarbeit erfolgt nicht nur deutschlandweit, sondern auch international.

In 2020 hat sich der Themenkomplex „Wasserstoff“ als ein Querschnittsthema durch die Abteilungen sehr dynamisch entwickelt. Die anwendungsgerechte Verarbeitung unterschiedlicher metallischer Werkstoffe für die Gewinnung, den Transport und die Umsetzung von Wasserstoff in Energie erfordert Forschung in verschiedenen Bereichen des Fügens, Beschichtens und Strukturierens.

Daneben war die additive Fertigung weiterhin ein dominantes Thema. Hier konnten wichtige Fortschritte bei der Erzeugung hybrider metallischer Strukturen gewonnen werden. Beim Fügen waren die Arbeiten mit den OCT-Systemen zwar erfolgreich und ermöglichten den Aufbau von geregelten Prozessen z.B. bei verdeckten T-Stößen, dennoch stellen die hohen Kosten für solche Systeme in geometrisch einfacheren Fällen einen Hemmschuh für die Anwendung dar. Daher sind die Erfolge mit den alternativen Messtechniken, um die Einschweißtiefe im Prozess zu messen, umso erfreulicher. Auch im Bereich der Mikrotechnik, beim Polieren und Strukturieren konnten auf der Basis von grundlegenden Erkenntnissen zur Prozesssignatur Prozessskalierungen abgeleitet werden, mit denen die Flächenraten um zwei Größenordnungen erhöht werden konnten, was die Anwendung des laserchemischen Polierens wirtschaftlicher werden lässt.



## ABTEILUNG FÜGE- UND PULVERBETTVERFAHREN

Die Abteilung beschäftigt sich unter der Leitung von Peer Woizeschke mit der Nutzung des Werkzeugs Laserstrahl zum Fügen und zur additiven Fertigung. In ihren Arbeiten von der Grundlagenforschung über die Prozessentwicklung, die Optimierung bauteilindividueller Prozessparameter, die Fertigung von Funktionsmustern oder Kleinserien bis zur Umsetzung / Erprobung beim Kunden setzt die Arbeitsgruppe eine Vielzahl an Laserstrahlquellen, Bearbeitungssystemen, Prozessbeobachtungstechnologien und Analysemethoden ein. Die Qualifizierung erfolgt anhand mechanisch-technologischer Prüfungen und metallographischer Analysen. Die experimentellen Versuchsreihen werden bei Bedarf durch thermo-mechanische oder fluiddynamische numerische Simulationen unterstützt.

### Forschungsthemen

- Laserschweißen
- Laserlöten
- Fügen hybrider Verbindungen
- Pulverbettprozesse (Additive Fertigung mittels LPBF)

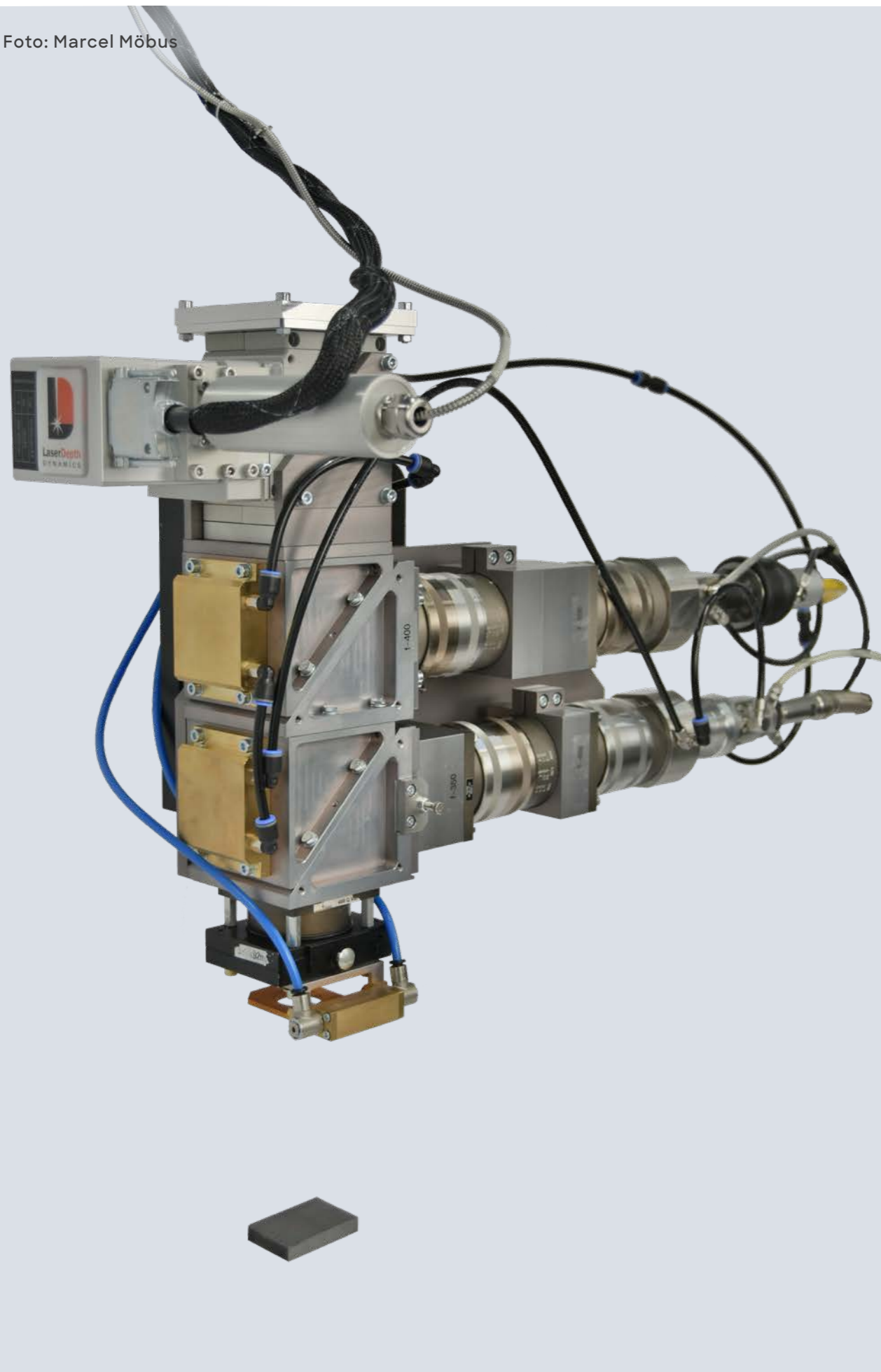


### Leitung

ppa. Dr.-Ing. Peer Woizeschke  
Stellvertretender Institutsleiter  
Geschäftsbereich MBS (Prokurist)

Abteilungsleiter und Principle Investigator Füge- und Pulverbettverfahren

Tel +49 421 218 58029  
woizeschke@bias.de



## SICHTNAHTQUALITÄT LASERSTRAHLGEFÜGTER SCHWEISS- UND LÖTNÄHTE

Beim laserstrahlbasierten Fügen ist zum einen insbesondere das Laserstrahllöten sowie das verwandte Wärmeleitungsschweißen für hohe Oberflächenqualitäten der Nähte bekannt. Vergleichsweise wärmearm erzeugte Löt­nähte werden daher seit vielen Jahren im Karosseriebau eingesetzt, und zwar auch und vor allem dort, wo die Nähte für die Kunden / Nutzer später sichtbar sind, zum Beispiel an den mehrteiligen Heckklappen moderner PKW. Das Erreichen dieser sogenannten Sichtnahtqualität wird dabei immer wieder vor neue Herausforderungen gestellt. So führten und führen wirtschaftliche Ziele, prozessketten-orientierte Anforderungen bzw. Vorteile oder werkstofftechnische Weiterentwicklungen beispielsweise zu Änderungen bei der favorisierten Verzinkung der im Fahrzeugbau verwendeten Stahlbleche. Wir entwickeln daher unsere Prozesse stetig weiter, um fortwährend effiziente, zuverlässige Verfahren für höchste Nahtqualitäten anzubieten. Nach Verbesserungen bei der Laserstrahlführung zur Vorwärmung der Fügepartner mittels Reflexionsnutzung stand beim Laserlöten im Jahr 2020 in der Grundlagenforschung die Nutzung des Tiefschweißeffektes zur Erhöhung der Prozesseffizienz und in der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung die Drahtförderung im Mittelpunkt. Der Einsatz einer Drahtoszillation zur Steigerung der Nahtkantenqualität beim Löten feuerverzinkter Stahlbleche im Bördelstoß wurde über die Prozessentwicklung bis zur Funktionsmusterfertigung umgesetzt. Für die industrielle Anwendung ist einzig der Austausch der Drahtfördereinheit erforderlich; entsprechende Systeme sind am Markt verfügbar.

Neben dem Laserlöten und Wärmeleitungsschweißen kann die Nahtqualität beim laserstrahlbasierten Fügen allerdings zum anderen auch beim Tiefschweißen, d. h. bei der Ausnutzung der Bildung eines Keyholes (Dampfkapsillare) für hohe Prozesseffizienzen, erheblich gesteigert werden, und dies bei gleichzeitig hoher Spaltüberbrückbarkeit des Prozesses. Das sogenannte „Buttonhole Welding“ mit Strahloszillation und Zusatzdrahtzuführung basiert dabei auf der Erzeugung einer stabilen Schmelzbadkavität (Loch) direkt hinter dem Laserstrahl. Strömungssimulationen zeigten dabei die wesentlichen Einflussfaktoren und Ursache-Wirkung-Beziehungen auf. Das Buttonhole führt zur Dämpfung der durch den oszillierenden fokussierten Laserstrahl induzierten Schwingungen und somit zu einem ruhigeren Schmelzbad hinter der Kavität, was der Grund für die erhöhte Nahtoberflächenqualität dieses Verfahrens ist. Die prägnanteste Schwingungsfrequenz an der Schmelzbadoberfläche ist dabei die doppelte Oszillationsfrequenz, d. h. die sog. Chopping Frequency, die das „Schneiden“ des Drahtes durch den Laserstrahl beschreibt.



Foto: Thorsten Mattulat

## KEYHOLEBETRACHTUNG UND FUNKTIONALE ENERGIEVERTEILUNG

Beim Laserstrahl-tiefschweißen, dem Laserschweißverfahren für schmale, tiefe Nähte (hohe Aspektverhältnisse) mit im Vergleich zu anderen Fügeverfahren geringen Wärmeeinträgen in die Bauteile bei hohen Einschweiß-tiefen, spielt das Keyhole als charakteristische Dampfkapillare die zentrale Rolle. Das Keyhole erlaubt die Absorption der Laserstrahlung tief im Material und die hohen Einkoppelgrade (gesamte Absorption von Laserenergie im Werkstück). Doch die tiefe, schmale Dampfkapillare mit hoher Prozess-dynamik birgt gleichzeitig die höchste Herausforderung, denn u. a. können Verengungen im oberen oder mittleren Bereich zu Auswürfen (Blow-Outs), Ausbeulungen am Keyholegrund zu Poren oder hohe Dampfströmungen zu Spritzern führen.

Die Form und das Verhalten bzw. die Stabilität des Keyholes wird dabei wesentlich von der Intensitätsverteilung im Laserstrahl beeinflusst. Über die Beobachtung des Keyholeverhaltens, beispielsweise mittels Hochgeschwin-digkeitsvideographie der Keyholeöffnung, Thermographie an den Schmelz-badoberflächen oder der OCT Messung im Keyhole (Optische Kohärenztomographie), sollen Zusammenhänge verstanden und in Zukunft das gezielte Auslegen von Laserstrahlen möglich werden. Neben ersten Messungen der Temperatur nahe der Keyholefrontwand fokussierten die Arbeiten auf der Umsetzung von Versuchseinrichtungen zur Strahlformung. So wurde eine spezielle Optik zur Kombination zweier Laserstrahlquellen (Scheiben-, Multi-Mode-Faser- oder Single-Mode-Faserlaser) aufgebaut, welche die dreidimensionale Anpassung der Intensitätsverteilung durch laterale und koaxiale Verschiebungen der Laserstrahlen zueinander erlaubt.

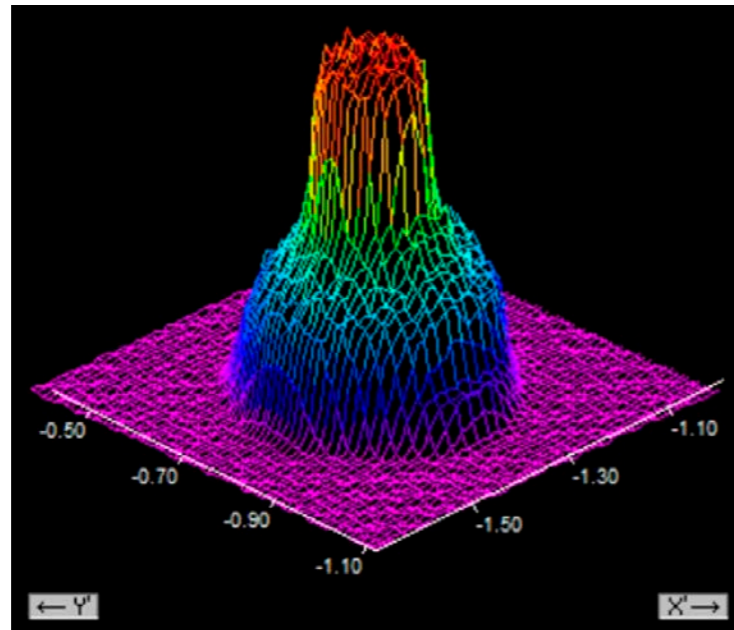


Foto: Marcel Möbus

Die modernen Laserstrahlquellen, insbesondere Single-Mode-Faserlaser, ermöglichen durch die kleinen Fokusdurchmesser im Bereich von  $15\ \mu\text{m}$  das Tiefschweißen nicht nur im Makrobereich an Blechen, sondern ebenfalls im Mikrobereich, d. h. im Fall von Metallfolien. So können Stahl- oder Aluminiumfolien mit Dicken bis hinunter zu  $10\ \mu\text{m}$  geschweißt werden. Entscheidend ist im Mikrobereich dabei, noch mehr als im Makrobereich, das Sicherstellen geeigneter Spaltmaße. Einige Mikrometer Spalt sind bei Blechen im Über-lappstoß ein technischer Nullspalt, bei Folien jedoch ggf. die halbe Material-dicke. Untersuchungen zeigten allerdings, dass die Schmelzbadströmungen sogar die Überbrückung vergleichsweise großer Spaltmaße ( $>80\%$ ) beim Tiefschweißen von Aluminiumfolien erlaubt. Das Verständnis über die Ab-hängigkeit des Wärmeeintrags von der Keyholelänge ermöglicht dabei von außen die Detektion des verdeckten tatsächlich vorliegenden Spaltes an-hand der einfach zu messenden Schmelzbadbreite.

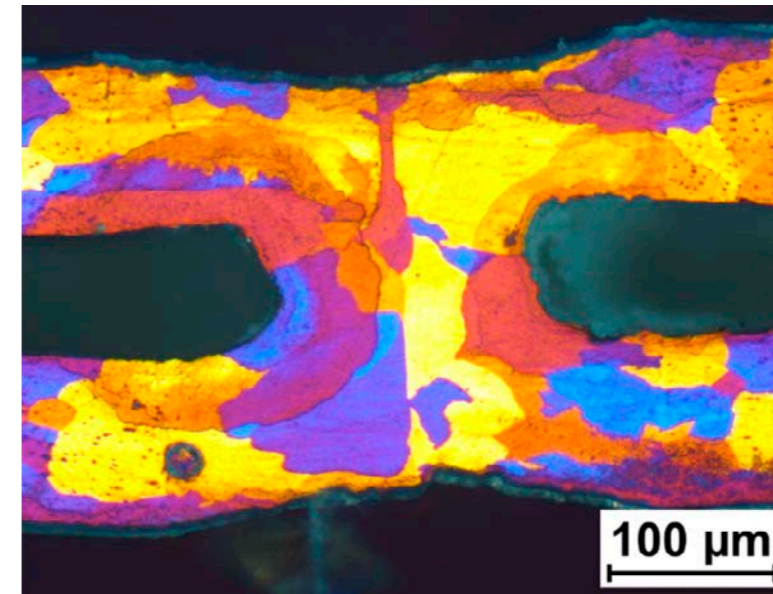


Foto: Metallographie BIAS





## BAUTEILINDIVIDUELLE PROZESSENTWICKLUNG BEI DER ADDITIVEN FERTIGUNG

Die additive Fertigung von Bauteilen mittels Laser Powder Bed Fusion (LPBF oder PBF-LB) stellt dabei neben der Fügetechnik den zweiten Schwerpunkt der Arbeitsgruppe dar, wobei in den FuE-Aktivitäten viele Synergien genutzt werden, um effizient die Ziele zu erreichen. Es gibt bei den Prozessen bzw. bei der Erforschung und Entwicklung der Pulverbettprozesse sowohl Gemeinsamkeiten mit als auch Unterschiede zu den Prozessen des Laserschweißens und -lötens. Während im Jahr 2020 in der Forschung besonders die Entwicklung und Analyse geeigneter Methoden zur Prozessüberwachung Ziel der Arbeiten war, wurde in der direkten Kooperation mit Unternehmen vor allem die bauteilindividuelle Optimierung der Prozessparameter verfolgt.

Bei der Prozessüberwachung startete ein gemeinsames Projekt mit dem Geschäftsbereich Optische Messtechnik und optoelektronische Systeme (OMOS, siehe Seite 45), um die Messtechnik der Streifenprojektion für das Pulverbett-Monitoring nutzbar zu machen. Dabei soll sowohl der Pulverauftrag jeder Lage vor dem Umschmelzvorgang als auch danach jeweils die umgeschmolzenen Bauteilbereiche überwacht werden. Das Messsystem muss ausreichend klein sein und möglichst hochauflösend arbeiten, um in kommerzielle Bauräume integriert werden zu können und lateral und normal zur Bauebene ausreichend präzise Messungen im Mikrometerbereich zu erlauben.

Bauteilindividuelle Entwicklungen adressierten im Bereich der Pulverbettfertigung besonders die Verkürzung der Bauzeit, die Verringerung der Oberflächenrauheit oder die Maximierung der mechanischen Eigenschaften. In Kooperation mit der Gruppe Mikrostrukturierung stand im vergangenen Jahr nach dem eigentlichen 3D-Druck zudem die zusätzliche Nachbearbeitung der Bauteiloberflächen im Fokus. Neben dem Laserpolieren wurde insbesondere das gezielte lokale „Einfärben“ von Designbauteilen betrachtet.

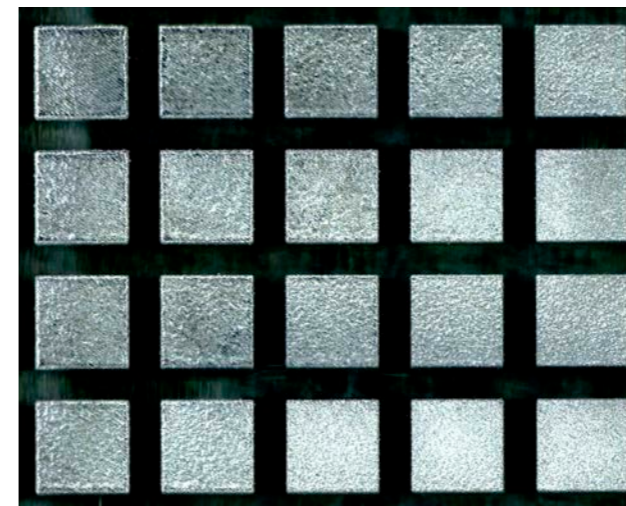


Foto: Sven Müller



## LASERBEARBEITUNG

Die von Dr. Radel geleitete Abteilung Laserbearbeitung beschäftigt sich mit der Erforschung von Technologien zur Produktion und Bearbeitung kleiner Teile und Strukturen. Die Größe der Strukturen liegt hinsichtlich typischer Abmessungen unter 1mm und wird nach unten in der Regel über die Wellenlänge der eingesetzten Laserstrahlung begrenzt. Schwerpunkte liegen in dem Funktionalisieren von Oberflächen, der Nutzung von laserinduzierten Stoßwellen und der laserchemischen Materialbearbeitung. Die Anwendungen liegen dabei z.B. im Bereich der Reduzierung von Reibung und Verschleiß an Werkzeugen und Getriebekomponenten. Zur Verwendung kommen dabei Ultrakurzpulslaser bis cw-Laser. Die zu bearbeitenden Werkstoffe sind vorwiegend Metalle, wobei jedoch auch Kunststoffe und Keramiken bearbeitet werden.



**Dr.-Ing. Tim Radel**  
Abteilungsleiter

Tel +49 421 218 58089  
radel@bias.de

## FUNKTIONALISIEREN VON OBERFLÄCHEN

Mittels Mikrostrukturierungen werden die Oberflächen funktionalisiert. Je nach Anwendung können dabei verschiedene Eigenschaften wie z. B. antibakterielle Eigenschaften oder auch optimierte Reibeigenschaften benötigt werden. Die Reibung während der Umformung wird konventionell durch die Verwendung von mineralölbasierten Schmierstoffen verringert. Aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten sind Alternativen zu mineralölbasierten Schmierstoffen von Interesse. Ziel ist daher, durch eine laserbasierte Prozesskette geeignete Bedingungen zu schaffen, um die mineralölbasierten Schmierstoffe durch wasserbasierte Schmierstoffe zu substituieren. Hier steht die Oberflächenfunktionalisierung der Werkzeuge durch laserinduzierte, periodische Oberflächenstrukturen (LIPSS) im Fokus, wodurch hydrophile Oberflächen erzeugt werden. Diese Oberflächenstrukturen verschleifen bei direktem tribologischen Kontakt jedoch schnell und müssen daher entsprechend geschützt werden. Dazu werden Kavitäten mittels Laserablation erzeugt, die Bodenfläche mittels Laserumschmelzpolieren geglättet, die LIPSS appliziert und das Werkzeug abschließend mittels Laserhärten gehärtet. Damit ist es mit einer Kombination aus verschiedenen gepulsten (Ablation und LIPSS Applikation) und kontinuierlichen (Umschmelzpolieren und Härten) Laserprozessen gelungen, die im Kontakt stehenden Flächen zu härten, dabei die hydrophilen Eigenschaften der vor direktem Kontakt geschützten LIPSS zu erhalten und dabei den Verzug im tolerablen Bereich zu lassen.

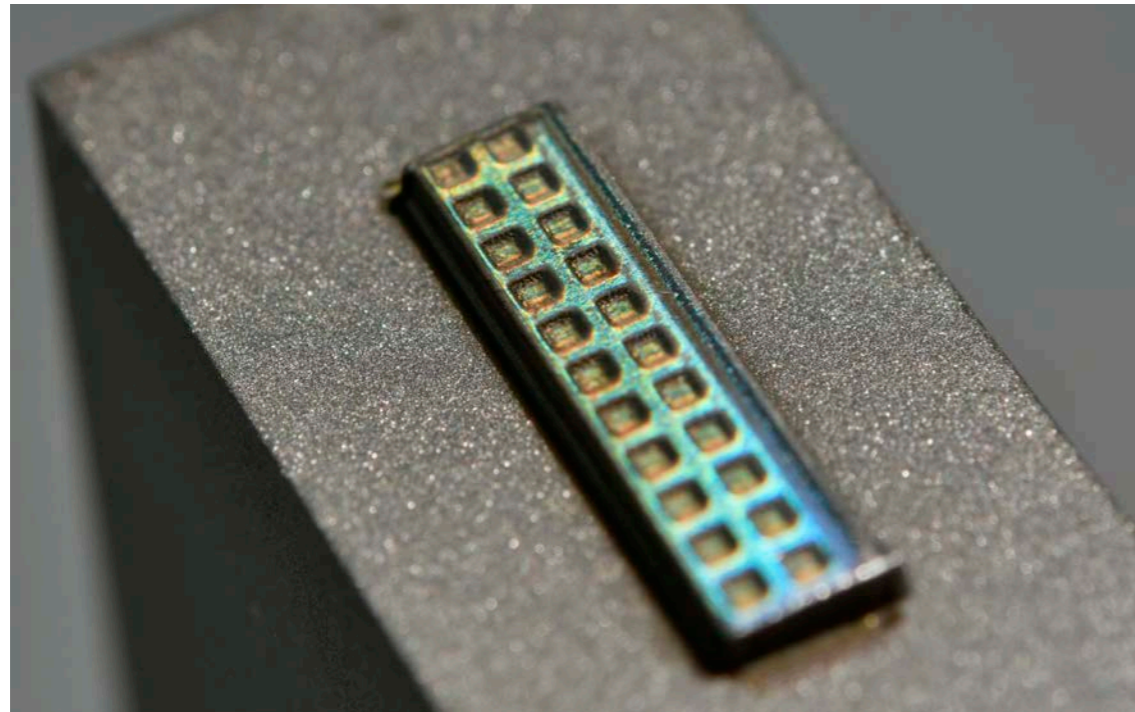


Foto: Andreas Klett

## NUTZUNG LASERINDUZIRTER STOSSWELLEN

Laserinduzierte Stoßwellen sind ein zentrales Thema in der Abteilung Laserbearbeitung. Dabei wird sowohl das industriell etablierte Laser-Shock-Peening erforscht, sowie auch neuartige Prozesse, wie z.B. stoßwellenbasierte Schneid- und Umformprozesse von Folien und auch die stoßwelleninduzierte Härteprüfung. Ziel bei der stoßwelleninduzierten Härteprüfung ist es, eine zeit- und ressourceneffiziente Härteprüfung von metallischen zu ermöglichen. Um laserinduzierten Stoßwellen für messtechnische Anwendungen nutzbar zu machen wurde dazu ein tiefgehendes Verständnis der dabei ablaufenden Mechanismen erarbeitet.

Bei der neu entwickelten Laser-induzierten Stoßwellen-Eindringprüfung (LiSE) wird mit einer Intensität von  $1,5 \text{ GW} / \text{cm}^2$  eine Stoßwelle oberhalb eines kugelförmigen Indenters erzeugt. Die Stoßwelle wird genutzt, um den Indenter impulsartig in eine Probe eindringen zu lassen. Dadurch wird ein Eindruck in der Probe erzeugt, der zur Charakterisierung des Werkstoffs herangezogen wird.

Im ersten Schritt wurden diejenigen Parameter bestimmt, die den größten Einfluss auf die Reproduzierbarkeit des Eindrucks haben. Durch die Bestimmung der für die neuartige Prüfmethode relevanten Kenngrößen konnte die anfangs hohe relative Streuung der übertragenen Kraft von 50 % auf unter 2 % reduziert werden.

Die charakteristischen Werte der Eindrücke (Tiefe, Durchmesser, ...), die sog. Deskriptoren, wurden anschließend mit unterschiedlichen mechanischen Werkstoffkennwerten korreliert. Durch die hohe Reproduzierbarkeit wurden (unabhängig von der Probengröße) starke Korrelationen zwischen den Deskriptoren und den mechanischen Werkstoffkennwerten Härte und Zugfestigkeit nachgewiesen. Durch den Einsatz einer zylindrischen Druckreflexionszelle konnte zusätzlich eine deutliche Erhöhung der Maximalkraft erreicht werden, wodurch es möglich war, an Werkstoffen mit einer Härte bis zu 950 HV1 messbare Eindrücke zu erzeugen.

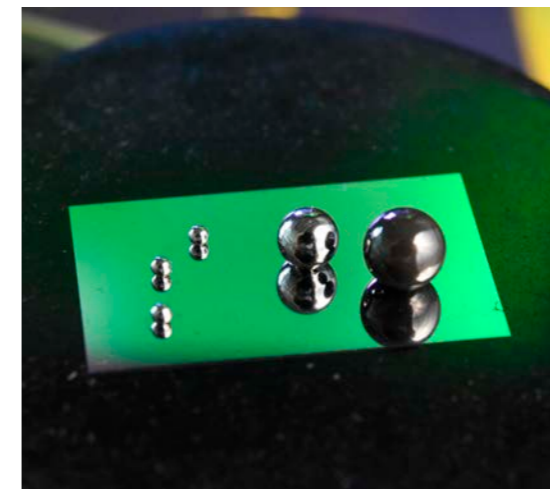
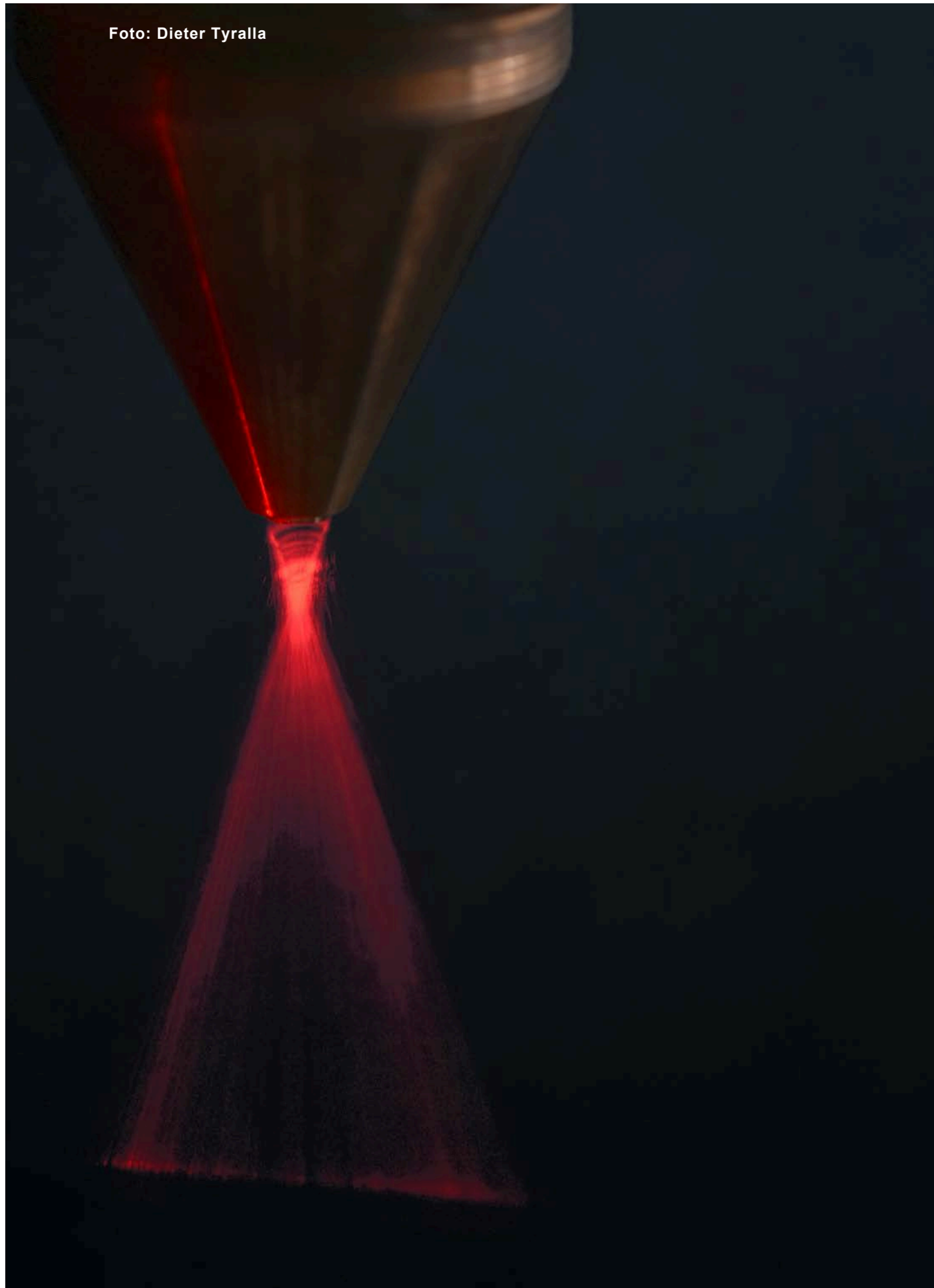


Foto: Andreas Klett



Foto: Andreas Klett



## ABTEILUNG WERKSTOFF- UND PROZESSTECHNIK

Directed Energy Deposition (DED)-Verfahren stehen im Fokus der Abteilung Werkstoff- und Prozesstechnik. Laserbasierte Prozesse wie das Laser-Pulver-Auftragschweißen, das (Heiß-)Draht-Auftragschweißen und das Laser-Dispergieren werden erforscht und weiterentwickelt, aber auch die lichtbogenbasierte additive Fertigung. Neben den prozesstechnischen Aspekten ist die Funktionalisierung von Bauteilen über die Materialeigenschaften Gegenstand der Forschungsarbeit, ebenso die Entwicklung von Systemtechnik und neuartiger Methoden für die Prozessüberwachung und -regelung.

### Forschungsthemen

- Auftragschweißen
- Dispergieren
- 3D Pulverauftragschweißen
- Drahtbasierter 3D-Druck



**Leitung**  
**Dr.-Ing. Thomas Seefeld**  
Abteilungsleiter  
Werkstoff- u. Prozesstechnik

Tel +49 421 21858040  
seefeld@bias.de



**M.Sc. Annika Bohlen**  
Gruppenleiterin  
DED-Verfahren

Tel +49 421 21858110  
bohlen@bias.de



## MONITORING BEIM DRAHTBASIERTEM 3D-DRUCK

Bei der drahtbasierten additiven Fertigung von Titanteilen mittels Lichtbogen (WAAM: Wire Arc Additive Manufacturing) konnte die Überwachung der Schmelzbadgröße mittels thermographischer Beobachtung gezeigt und das Erreichen der Materialanforderungen nach Luftfahrtnorm nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurde die Schutzgasatmosphäre in der Schutzgaskammer gezielt durch Zugabe von purem Sauerstoff variiert. Der Einfluss auf die Festigkeit des Materials war geringer als bisher vermutet, und die Materialanforderungen aus der Luftfahrt konnten bei einer Schutzgasatmosphäre mit bis zu 6000 ppm Sauerstoff gewährleistet werden.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-020-00892-5>



## CHARAKTERISIERUNG DES PULVERSTRAHLS

Beim Laser-Pulver-Auftragschweißen spielt nicht nur die Kaustik des Laserstrahl eine bedeutende Rolle, sondern auch die des Pulverstrahls. High-speed-Aufnahmen bilden die Grundlage für das Verständnis der Gasstrom-Pulverpartikel- und Partikel-Partikel-Interaktion. Erkenntnisse konnten gewonnen werden über die Eigenschaften und die Ausbreitung der Strömung innerhalb der Prozesszone. Dies hilft, den Pulverstrom zu charakterisieren und mittels eines eigens dafür entwickelten Messsystems dauerhaft dessen Eigenschaften zu überwachen. Eventuelle Unregelmäßigkeiten, die beispielsweise auf eine Beschädigung der Düse zurückzuführen sind, werden frühzeitig erkannt und können behoben werden, bevor die Qualität der Schweißungen nachlässt.

## KORRELATION AKUSTISCHER SIGNALE ZUR EINSCHWEISSTIEFE

Neue Möglichkeiten der Prozessüberwachung bietet die Auswertung der akustischen Prozessemissionen, deren Signale dank leistungsfähiger Sensoren immer höhere Frequenzbänder für die Datenanalyse zur Verfügung stellen und Rückschlüsse über Schmelzbadgrößen, Einschweißstiefen oder Prozessstabilität erlauben. Diesbezüglich konnte eine klare Korrelation der Frequenzamplitude bestimmter Frequenzbänder mit der in-situ-Einschweißstiefenmessung mittels OCT nachgewiesen werden.

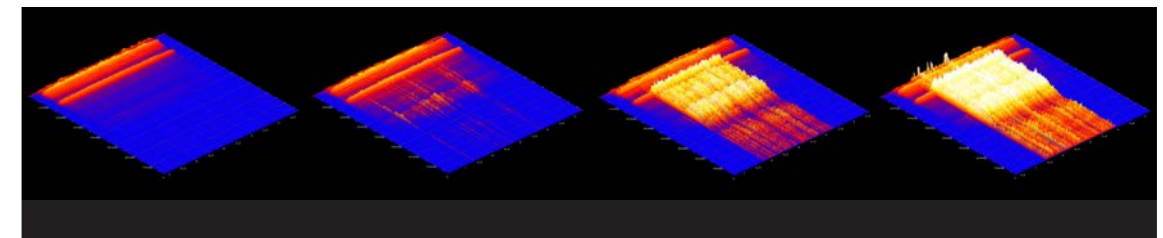
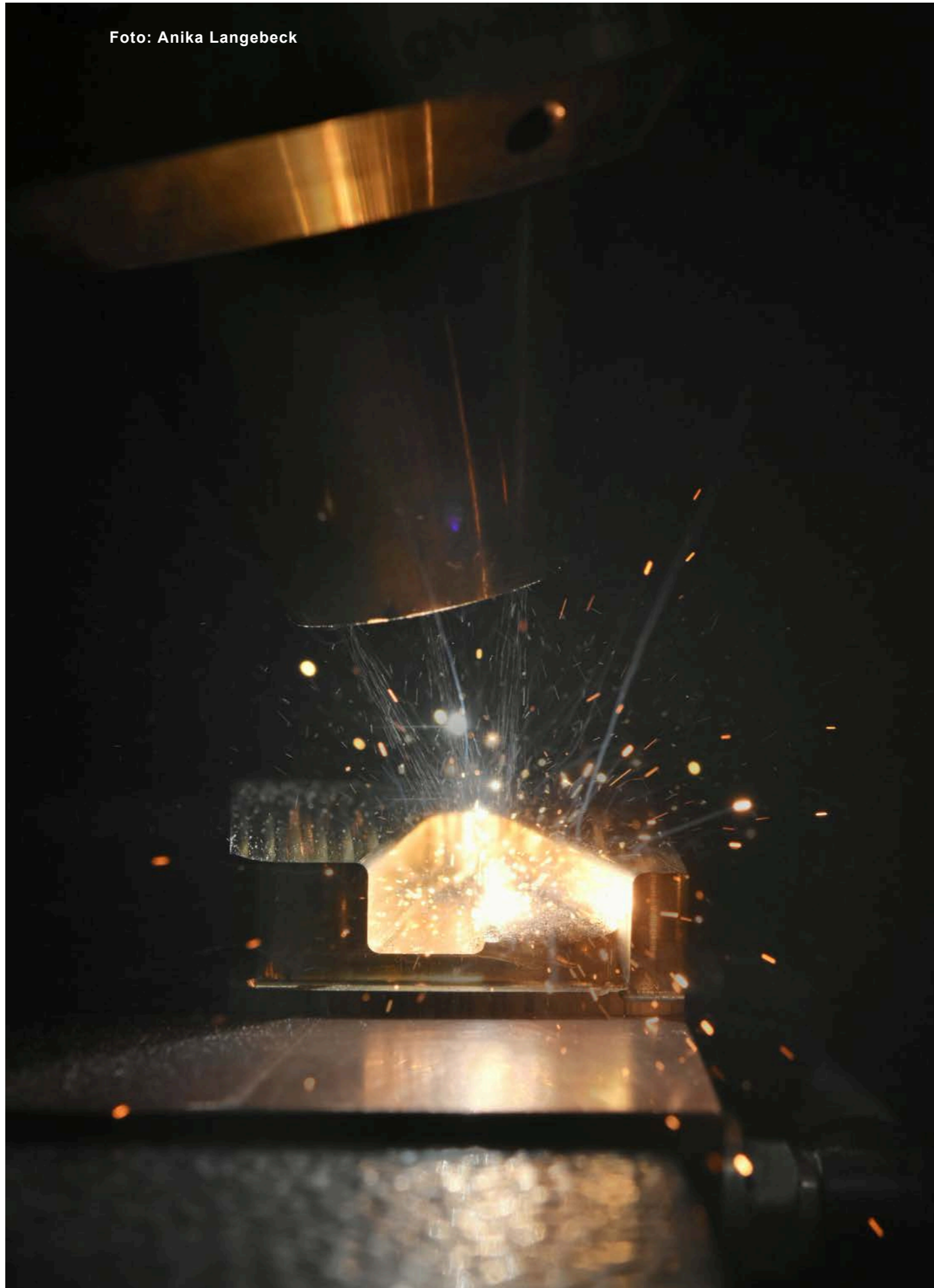


Foto: Dieter Tyralla



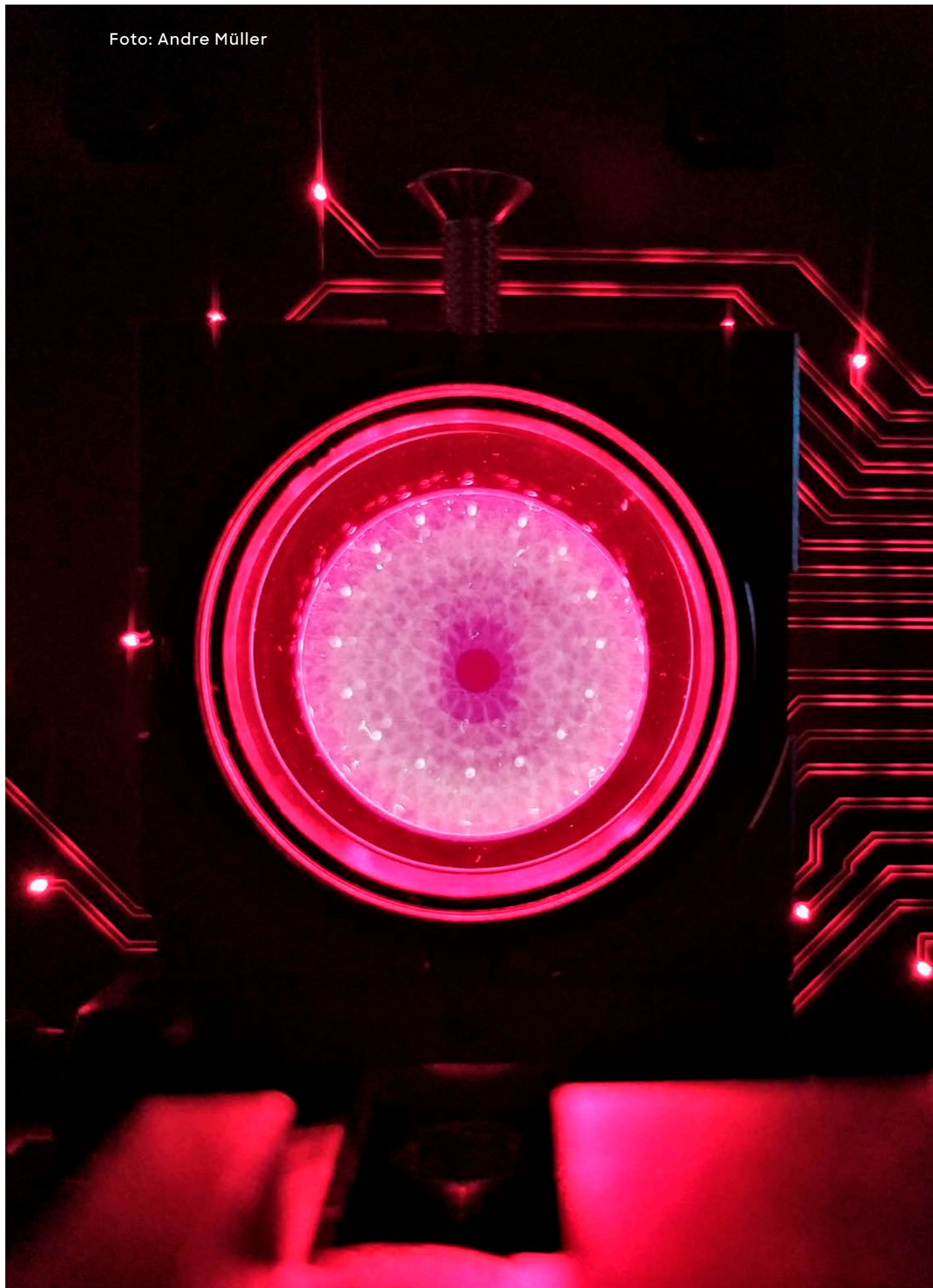
## ERGEBNISTRANSFER UND INDUSTRIELLE ERPROBUNG BEI DED-ANWENDUNGEN

Mit verschiedenen Industriepartnern werden derzeit laserdispergierte Hartpartikelverstärkungen für Werkzeuge und Bauteile entwickelt und erprobt. Von kleineren Teilen wie Spritzgussformen und Druckgusskolben bis hin zu Großwälzlagern und Walzen gibt es zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten. Aktuell werden Druckgusskolben aus Kupferlegierungen mit Hartpartikelverstärkung im industriellen Umfeld untersucht. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der Kupferlegierung werden kurze Prozesszeiten im Druckguss ermöglicht. Die Verstärkung der Kolben mit Wolframschmelzkarbid soll die Standzeit verlängern. Über eine geeignete Anpassung der Prozessparameter konnten neben großen Flächen auch geometrisch komplexe und kleine Flächen von wenigen cm<sup>2</sup> mit einer MMC-Schicht endkonturnah ausgestattet und beim Industriepartner eingesetzt werden.

Durch die Verwendung eines Laserstrahl-Oszillators beim Laserauftragsschweißen mit Heißdraht kann eine bedarfsgerechte Verteilung der Laserleistung in der Prozesszone realisiert werden, die einen Prozess mit hoher Abschmelzleistung und geringem Aufmischungsgrad ermöglicht. Dieser neue Ansatz der Prozessführung wurde am Beispiel der Reparaturschweißung großer Wellen erfolgreich in die Industrie übertragen.



Foto: Dieter Tyralla



## OPTISCHE MESSTECHNIK UND OPTOELEKTRONISCHE SYSTEME (OMOS)

Die Faszination der Umsetzung physikalischer Ideen in nutzbringende Anwendungen führt im Geschäftsbereich „Optische Messtechnik und optoelektronische Systeme“ immer wieder zu neuen Konzepten. Dabei arbeiten wir an photonischen Zukunftstechnologien und fokussieren uns auf Themen, die im weitesten Sinne der nachhaltigen Verbesserung der Lebensqualität dienen. Licht ist dabei für viele Anwendungen nützlich, wie der Gewinnung oder der Darstellung von Informationen z.B. bei der Formmessung in der Produktion oder für 3D-Displays. Dabei spielt die Lichtformung durch photonische Mikro- und Nanostrukturen eine immer größere Rolle.

Wir erforschen und entwickeln optische bzw. optoelektronische Systeme und Technologien und bringen sie in die Anwendung. Dabei spielen industrielle Anwendungen eine besondere Rolle. Denn das, was man nicht messen kann, kann man auch nicht zuverlässig und sicher produzieren. Und hier konzentrieren wir uns auf Systeme, die - möglichst gleichzeitig - hochgenau, schnell und robust sind und zudem auch mit komplexen Objekten und schwierigen Messsituationen umgehen können.

Der Bereich gliedert sich in drei Arbeitsgruppen und ein Kompetenzzentrum

### Gruppe kohärente Optik und Nano-Photonik

Die Gruppe vereint alle Kompetenzen von der physikalischen Beschreibung der Wellenausbreitung über die Simulation und Herstellung optoelektronischer Systeme u. A. mittels mikro- und Nanostrukturen sowie der Charakterisierung dieser Systeme bis hin zum industrietauglichen Prototypenbau von Messsystemen. Dabei hat sich die Nutzung der sogenannten Kohärenzfunktion des Lichtes als mächtiges Werkzeug erwiesen. Anwendungen liegen vor allem in der Produktionsmesstechnik und bei Messsystemen für besondere Anwendungen.

### Gruppe geometrische Messtechnik

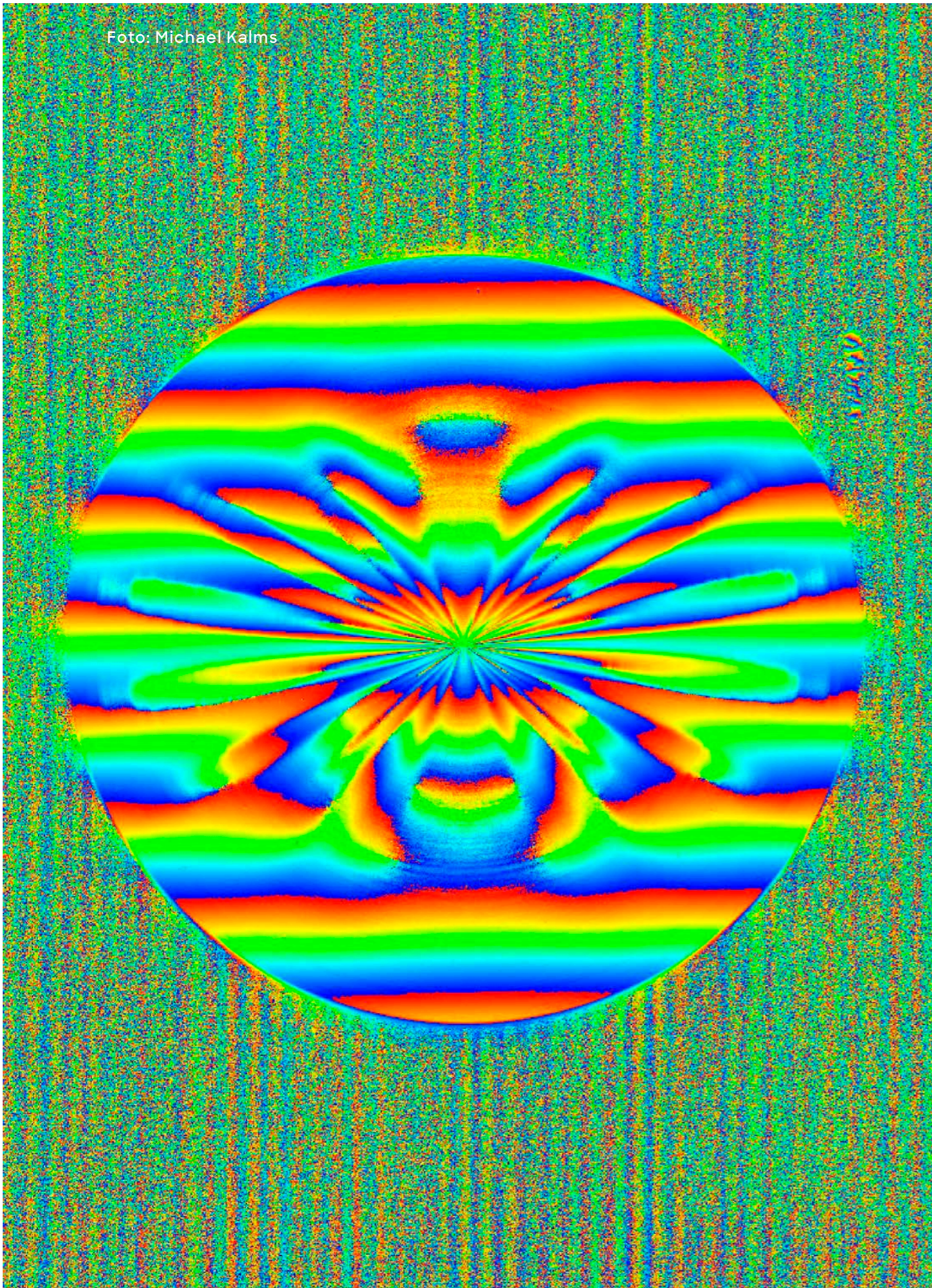
Bei der optisch-flächenhaften Erfassung der 3D-Koordinaten von Objekten werden Genauigkeiten in derselben Größenordnung wie mit punktwisen Abtastverfahren erreicht, allerdings bei erheblich geringerer Messzeit und hoher Ortsauflösung. Kernkompetenz ist die Entwicklung genauer und robuster Mess- und Prüfverfahren auf der Basis der aktiven, inkohärenten Lichtkodierung.

### Gruppe zerstörungsfreie Prüfung

Der Schwerpunkt liegt hier in der Qualitätssicherung im Bereich der Materialprüfung zur Entwicklung berührungsloser, zerstörungsfreier Prüfverfahren. Kernkompetenzen sind die Laserultraschall-Technik, die Scherografie und die Röntgen-Computertomographie (CT).

### Kompetenzzentrum „Optische Messtechnik und optoelektronische Systeme“ zur Bearbeitung von Industrieaufträgen

Neben der Direktbeauftragung und der Bearbeitung von Dienstleistungen vor allem im Bereich der Röntgen-CT sind besonders projektgeförderte gemeinsame Aktivitäten mit Industriepartnern interessant, um komplexe bzw. neuartige Messsysteme zu entwickeln und in die Anwendung zu bringen.



## GEOMETRISCHE MESSTECHNIK

Die Arbeitsgruppe Geometrische Messtechnik arbeitet an der optischen und damit berührungslosen, flächenhaften Erfassung der 3D-Koordinaten von Objekten. Es werden Genauigkeiten in derselben Größenordnung wie mit punktwisen Abtastverfahren erreicht, allerdings bei erheblich geringerer Messzeit und sehr hoher Ortsauflösung. Die Kernkompetenz liegt in der Entwicklung von Mess- und Prüfverfahren auf der Basis der inkohärenten Lichtkodierung. Die Methode der Streifenprojektion ist für streuende (matt) Oberflächen geeignet. Die perspektivische Verzerrung von projizierten Lichtmustern durch die Objektgestalt wird in einen hochgenauen Datensatz der 3D-Koordinaten transformiert. Das Prinzip ist vom Zentimeter- bis zum Meterbereich skalierbar und die Tiefenauflösung liegt je nach Messfeldgröße zwischen  $1\mu\text{m}$  und  $100\mu\text{m}$ . Die Methode der Deflektometrie ist, im Gegensatz zur Streifenprojektion, für reflektierende (spiegelnde) Oberflächen geeignet. Hier wird ebenfalls eine Folge von Streifenmustern aufgenommen, die am Werkstück wie an einem Spiegel reflektiert werden. Die Verzerrungen geben Aufschluss über die lokale Neigung der Oberfläche, aus der Daten wie Form und Krümmung bestimmt werden können. Die nebenstehende Abbildung zeigt das Phasenbild einer deflektometrischen Messung einer freigeformten spiegelnden Oberfläche mit einem Durchmesser von 40 mm aus einem Diamantdrehprozess.

### Forschungsthemen

#### Deflektometrie (Streifenreflexion)

- Hochgenaue Bestimmung von lokaler Neigung und Krümmung spiegelnder Oberflächen
- Hochgenaue Formmessung durch Erforschung und Minimierung der Beiträge der einzelnen Komponenten der Messung (Kamera, Display, Objekt) zur Messunsicherheit.
- Messsysteme für die industrielle Anwendung

#### Streifenprojektionstechnik

- Hochgenaue, kontaktlose Erfassung der Oberflächenform für einen großen Skalenbereich ( $1\text{cm}^2 \dots 100\text{m}^2$ )
- Messsysteme für extreme Aufgaben in der Produktionsmesstechnik

#### Generische Kamerakalibrierung

- Neue Methoden für die Sichtstrahlkalibrierung
- Multi-Aperturkalibrierung

### Leitung

Michael Kalms

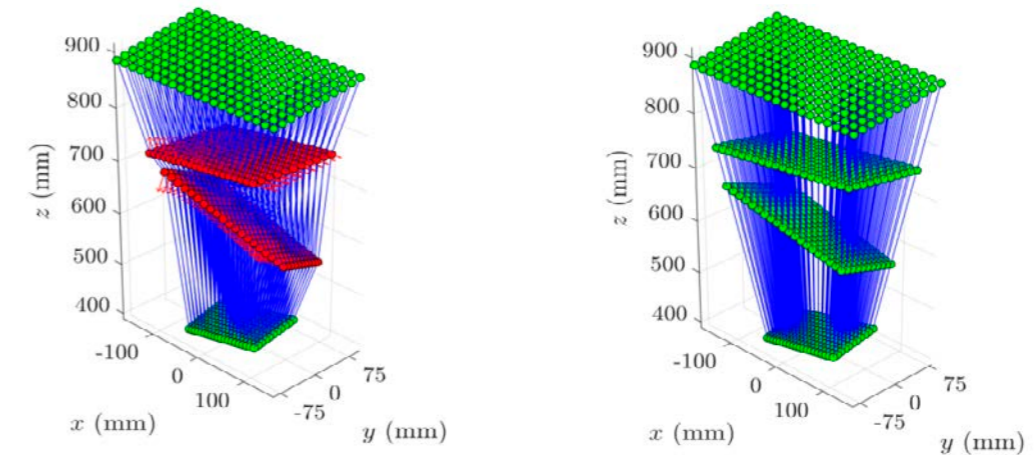
Tel +49 421 218 58023  
Kalms@bias.de

## KAMERAKALIBRIERUNG FÜR HOCHGENAUE 3D-KOORDINATENMESSUNG

Die Kamerakalibrierung für die 3D-Koordinatenmessung und -prüfung ist grundlegend für die Messgenauigkeit. Eine präzise und zugleich robuste Kalibrierung von Bildsensoren bietet die sogenannte Sichtstrahlkalibrierung. Es handelt sich dabei um eine modellfreie Zuordnung von unabhängigen Halbgeraden, die für jedes Pixel des Bildsensors ermittelt werden. Diese Beschreibung von optischen Systemen ist im Vergleich zu photogrammetrischen Methoden genauer und gleichzeitig flexibler. Außerdem ermöglicht dieser generische Ansatz die Bestimmung von hochfrequenten Verzeichnungen, was besonders für Messsysteme mit hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit von Vorteil ist. Diese Art der Kalibrierung wird am BIAS seit Jahren erforscht und konsequent weiterentwickelt.

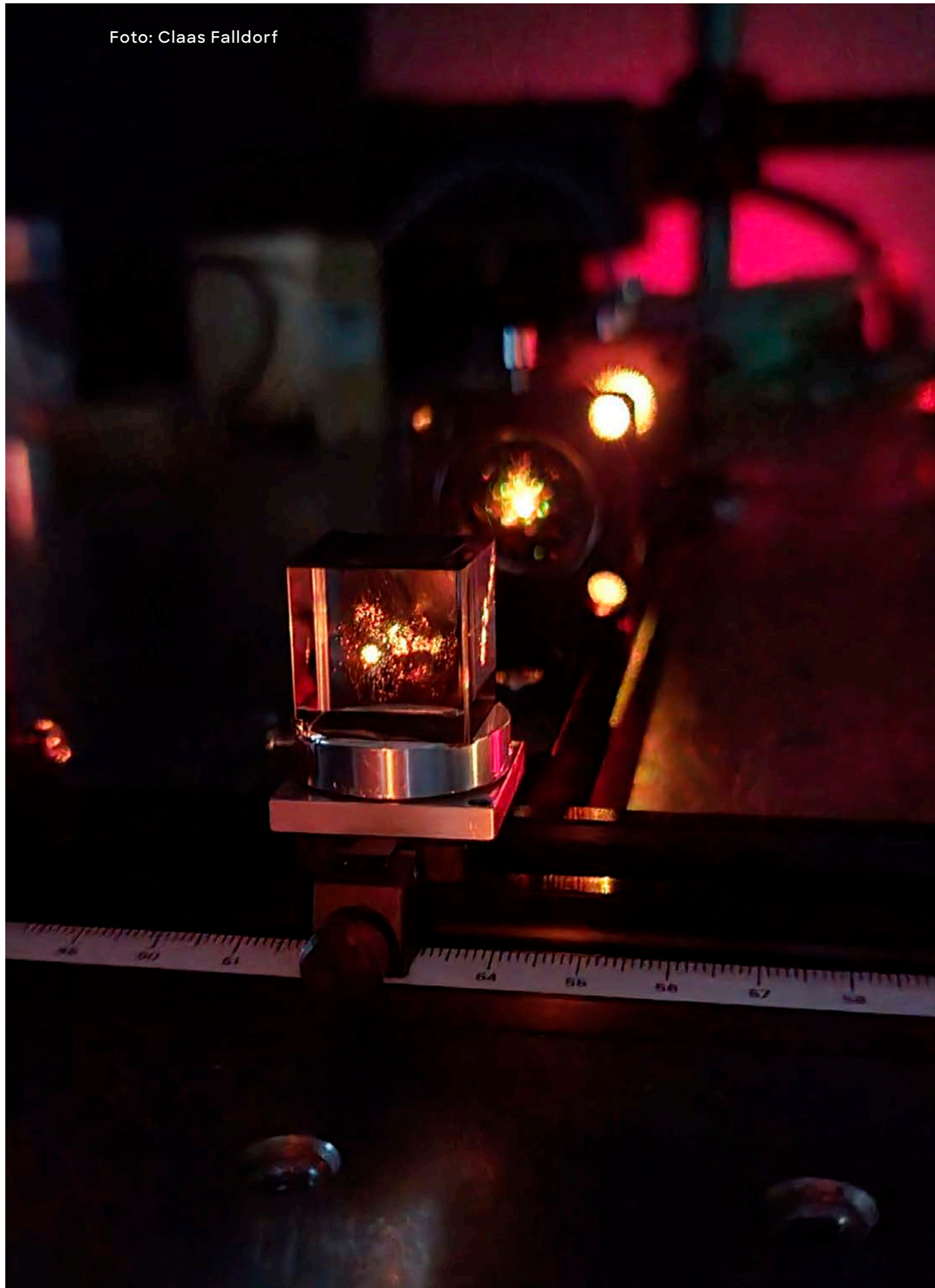
Zur Berechnung der Sichtstrahlen für alle Pixelelemente benötigt man zahlreiche Bilder von Referenzmonitoren, die in unterschiedlichen Positionen aufgenommen werden. Dies erzeugt große Datenmengen und folglich eine zeitaufwändige Auswertung für die Durchführung der Kalibrierung. Im DFG-finanzierten Projekt „KaSiFo“ (Projekt-Nr. 418992697) wird ein neues Verfahren entwickelt, bei dem anstelle von Sichtstrahlen sogenannte „Sichtfäden“ verwendet werden. Das folgende Bild zeigt das Ergebnis einer Simulation mithilfe dieser Methode. Ein Sichtfaden wird als das Liniensegment definiert, das zwei korrespondierende Punkte benachbarter Monitore verbindet. Die Referenzpunkte der Monitore sind durch rote und grüne Punkte veranschaulicht.

Dabei wurden effiziente Methoden der Kalibrierung entwickelt, wie z. B. Efficient vision ray calibration of multi-camera systems, JONAS BARTSCH, YANN SPERLING, AND RALF B. BERGMANN, Optics Express 29 (11), 17125 - 17139 (2021) <https://doi.org/10.1364/OE.424337>.



Quelle: Shishir Gauchan  
(unveröffentlicht)

Aufgrund der anfänglich ungenauen Annahme der Monitorpositionen und damit der Korrespondenzpunkte (rot markiert), verlaufen die Sichtfäden nicht geradlinig, sondern nehmen unregelmäßige Wege im Raum ein, siehe das linke Teilbild. Anhand der Geometrie der Sichtfäden werden nun „Kräfte“ (rote Pfeile an den roten Punkten) und „Drehmomente“ an jedem Referenzpunkt bestimmt. Die berechnete Kraft und das Drehmoment verändern dann den „Massenschwerpunkt“ des virtuellen Monitors. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis die Abweichung von der optimalen Lage der Referenzpunkte im Messvolumen ein Minimum erreicht, siehe rechtes Teilbild. Sichtfäden werden somit in Sichtstrahlen überführt. Dieses Verfahren löst schrittweise ein Minimierungsproblem und wird als direkte Optimierung bezeichnet, da jede Korrektur näher an die Lösung führt. Diese derzeit untersuchte neue Art der Kalibrierung soll in kürzerer Zeit präzisere Ergebnisse als bisherige Verfahren liefern.



## KOHÄRENTE OPTIK UND NANOPHOTONIK

Die Arbeitsgruppe Kohärente Optik und Nanophotonik erforscht innovative Ansätze, sowohl zur Messung als auch zur Synthese von elektromagnetischen Wellenfeldern in einem breiten Spektralbereich, beginnend bei Terahertzstrahlung bis ins nahe Ultraviolett. Eine wesentliche Motivation ist hierbei die Entwicklung robuster und gleichzeitig präziser Methoden zur Wellenfelderfassung, die die Grundlage für industrietaugliche Messsysteme zur dreidimensionalen Form- und Verformungsmessung bilden. Ein weiteres Ziel ist das Design beugender oder brechender optischer Elemente zur Lichtformung und zur Sensorik. Hierfür stehen Verfahren wie die Nanostrukturierung auf Basis von Zwei-Photonenpolymerisation, ein Focused Ion Beam System und die Elektronenstrahlolithografie zur Verfügung. Die Anwendungen liegen hier einerseits in der Sensorik für Medizin, Biologie und Chemie, sowie andererseits im Bereich der holografischen Techniken zur Speicherung von Informationen, zur Schaffung von Sicherheitsmerkmalen oder auch zur Darstellung dreidimensionaler Szenen. Die Kernkompetenz und die Stärke der Gruppe ist die Kombination zwischen kohärenter Optik, Mikro- und Nanostrukturierung, sowie Verfahren aus dem Bereich der Signaltheorie. Die nebenstehende Abbildung zeigt eine Aufnahme eines Zweiwellenlängen-Interferometers.

### Forschungsthemen

#### Hochpräzise kohärente Messtechnik

- Hochgenaue Formerfassung von Freiformflächen, insb. Asphären, auf Basis der Kohärenzfunktion
- Schnelle 3D-Messung komplexer Geometrien (Rundummessung)
- Mechanisch robuste quantitative Phasenkontrastmikroskopie, Formerfassung und Terahertz-Imaging auf Basis von Computational Shear-Interferometry (CoSI)

#### Diffraktiv-optische / Nano-photonische (Sensor-) Systeme

- Hochauflösende Mikroskopie mittels diffraktiv-optischer Elemente
- Chemische, biologische oder medizinische Sensorik

#### 3D Wiedergabe Systeme

- 3D-Wiedergabe auf Basis von Wellenfeldsynthese
- Holografische Wiedergabesysteme

### Leitung

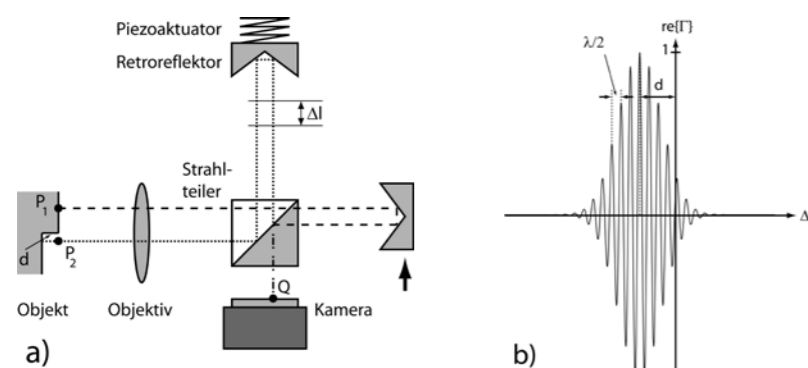
Dr. rer. nat. Claas Falldorf

Tel +49 421 218 58013

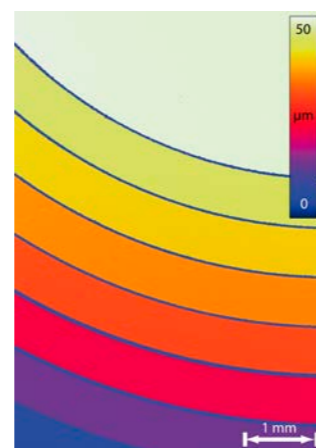
falldorf@bias.de

## MESSUNG VON OBERFLÄCHENPROFILIEN AUF BASIS DER KOHÄRENZFUNKTION

Das DFG-Vorhaben  $\Gamma$ -Profilometrie (Projektnummer 265388903) bearbeitet eine neue Messtechnik zur Formfassung. Die Technik basiert auf der raum-zeitlichen Abtastung der Kohärenzfunktion  $\Gamma$  von partiell kohärentem Licht, das an der Prüflingsoberfläche reflektiert bzw. gestreut wurde. Eine Referenzwelle ist hierbei nicht erforderlich, was das Verfahren robust gegenüber mechanischen Schwingungen macht. Durch die eingeschränkte zeitliche Kohärenz sind, ähnlich wie bei der Weißlichtinterferometrie, Messungen über ausgedehnte Eindeutigkeitsbereiche mit Messunsicherheiten deutlich im sub- $\mu\text{m}$ -Bereich möglich. Der besondere Vorzug des Verfahrens liegt darin, dass es durch seine Robustheit gegenüber Vibrationen ohne mechanische Entkopplung im industrienahen Umfeld eingesetzt werden kann. Die folgende Abbildung verdeutlicht das Konzept der  $\Gamma$ -Profilometrie. Teilbild (a) zeigt eine Versuchsanordnung aus der Scher-Interferometrie und ein stufenförmiges Objekt mit der Stufenhöhe  $d$ . Das Objekt wird durch eine Objektivlinse über das Michelson-Interferometer auf die Kamera abgebildet. Das Scher-Interferometer überlagert jeweils Licht von zwei, durch eine sogenannte Scherung getrennte Orte in der Objektebene auf der Kamera. Als Beispiel dienen die Punkte  $P_1$  und  $P_2$ , die in dem Punkt  $Q$  auf der Kamera überlagert werden, und durch Auswertung des Interferenzmusters eine Analyse der Kohärenzfunktion ermöglichen. Durch Variation des Abstands von  $P_1$  und  $P_2$  wird hierbei eine räumliche Abtastung realisiert, während die Einstellung des Abstandes  $\Delta l$  eine zeitliche Verschiebung ermöglicht. Nutzt man nun eine Lichtquelle mit begrenzter zeitlicher Kohärenz als Beleuchtung, dann lässt sich die Stufenhöhe anhand der Verschiebung des Maximums von  $\Gamma$  in zeitlicher Richtung ermitteln, siehe Teilbild (b).



Führt man Messungen mit vielen Scherungen durch, dann kann man aus den auf diese Weise gemessenen finiten Differenzen numerisch eine Oberflächenform rekonstruieren. Die rechts stehende Abbildung zeigt beispielhaft das Messergebnis für ein reflektierendes Stufenprofil mit einer RMS-Messunsicherheit von ca. 200 nm.



## INTERFEROMETRISCHE ASPHÄREN- UND FREIFORM-MESSTECHNIK MIT VIELEN LICHTQUELLEN

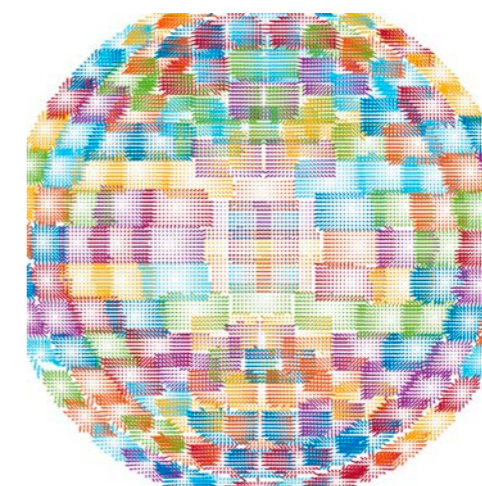
Mit steigender Herstellungsgenauigkeit von Präzisionsbauteilen steigt ebenfalls der Bedarf an immer genaueren Messmethoden zur Qualitätssicherung. Diese Methoden sollen auf der einen Seite robust genug sein, um im Produktionsumfeld eingesetzt werden zu können und zugleich flexibel an sich schnell verändernde Messaufgaben anpassbar sein. Asphärische oder Freiform-Optiken werden eingesetzt, um in optischen Systemen (z. B. Objektiven) Aberrationen zu reduzieren und gleichzeitig mit einer geringen Anzahl an optischen Elementen eine hohe optische Qualität zu erzielen. Eine entsprechend genaue und berührungslose Formmesstechnik ist dabei der Schlüssel für den Einsatz und die Anwendung der präzisionsbearbeiteten Oberflächen.

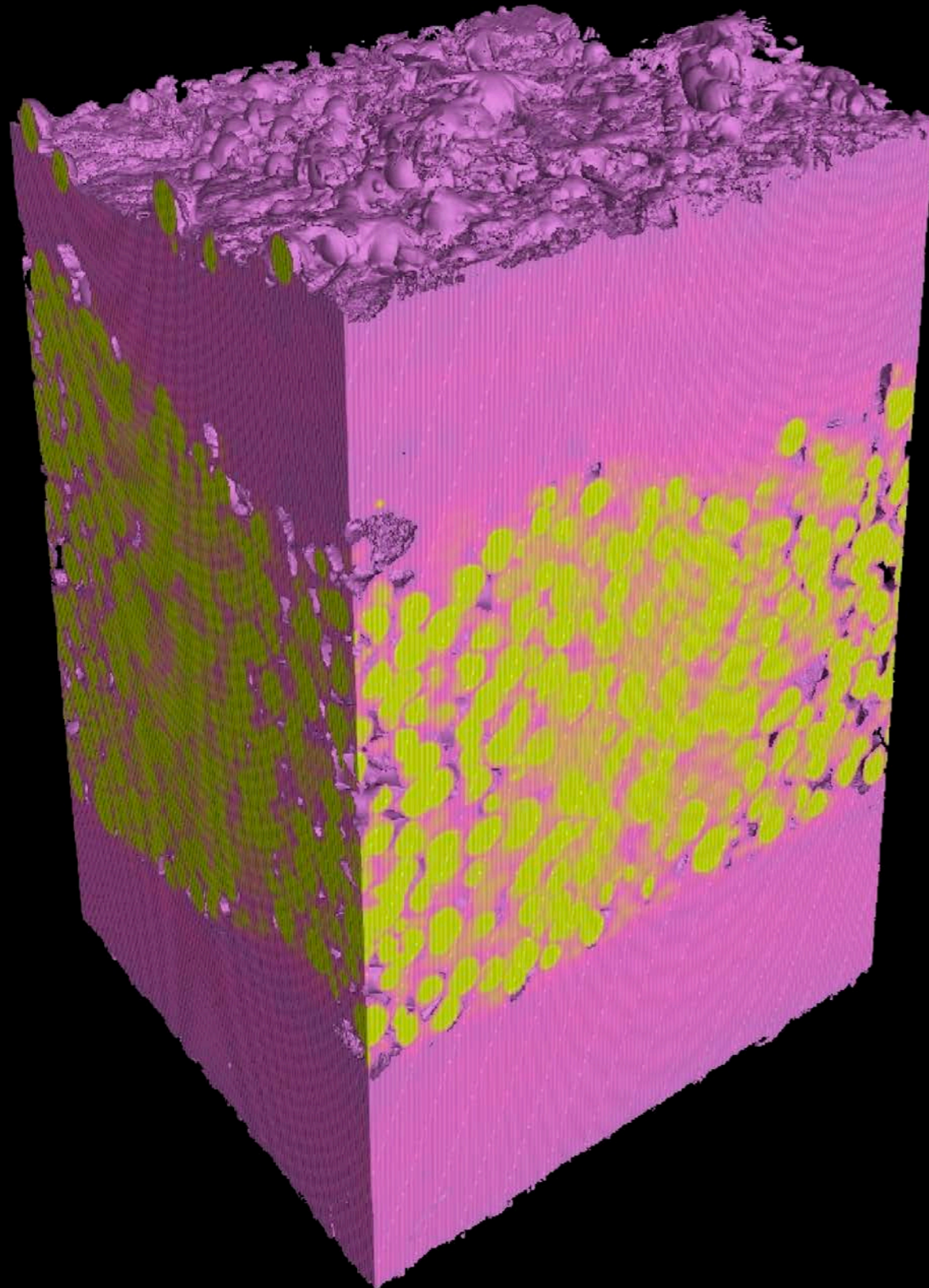
Ein am BIAS hierzu entwickelter neuer Ansatz zur optischen Formbestimmung von Asphären und Freiformflächen basiert auf der Messung der räumlichen Kohärenzfunktion mittels Scher-Interferometrie. Die wichtigsten Vorteile dieses Verfahrens bestehen darin, dass mehrere teilkohärente Lichtquellen gleichzeitig verwendet werden können, so dass sich die Eingangswellenfronten flexibel an die Prüflingsgeometrie anpassen lassen. Zudem ist das Verfahren aufgrund der Common-Path-Architektur unempfindlich gegenüber mechanischen Störungen. Wegen der Kombination von multiplen Beleuchtungsaperturen mit der Scher-Interferometrie wird die Methode als Multiple Aperture Shear Interferometry (MARs) bezeichnet.

Unter Verwendung von mehr als 150 unabhängigen LEDs können asphärische Linsen mit verschiedenen globalen Krümmungsradien flexibel am gleichen Messaufbau geprüft werden. Hierzu werden die in der Prüflingsoberfläche reflektierten Wellenfelder scher-interferometrisch vermessen. Durch eine Überführung der Messergebnisse in die lokal jeweils dominierenden Wellenvektoren, können die unabhängigen Wellenfelder wie im unten gezeigten Beispiel getrennt und den entsprechenden Wellenfeldern zugeordnet werden. Ein Optimierungsverfahren rekonstruiert anschließend die Prüflingsoberfläche, an der die gemessenen Wellenvektorverteilungen reflektiert wurden.

A. F. Müller, C. Falldorf, M. Lotzgeselle, G. Ehret, R. B. Bergmann: Multiple Aperture Shear-Interferometry (MARs): a solution to the aperture problem for the form measurement of aspheric surfaces. *Optics Express* 28, 23 34677-34691 (2020)

<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-23-34677&id=442116>





## ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFTECHNIK

Die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) am BIAS dient der Erforschung und Entwicklung neuer Methoden zur Qualitätssicherung mit dem Schwerpunkt im Bereich der kontaktlosen Materialprüfung. Dies können Methoden der laserbasierten Ultraschalltechnik aber auch optische Flächenmesstechniken sein. Dabei werden die Grundlagen für industriell einsetzbare Systeme geschaffen. Ein neues Arbeitsfeld bildet die Untersuchung von Methoden zur Prozessbeobachtung bei den additiven Fertigungstechniken. Das Augenmerk liegt dabei besonders auf den generativ arbeitenden Laser-Schmelzverfahren. Am BIAS werden dafür Methoden für das inline-Monitoring entwickelt und untersucht, die Materialfehler schon innerhalb des Prozesses aufdecken. Die Entwicklung neuer Methoden der ZfP wird dabei durch etablierte konventionelle Verfahren wie zum Beispiel die Röntgen-Computertomografie (R-CT) und die Röntgenmikroskopie abgesichert. Diese Methoden stehen auch für wissenschaftlich-technische Materialuntersuchungen zur Verfügung. Die nebenstehende Abbildung zeigt das R-CT Ergebnis einer Probe aus Aluminiumbronze ( $\text{CuAl10Ni5Fe4}$ ) mit einer Größe von etwa  $1\text{mm}^3$  mit Hartpartikeln aus Wolframschmelzcarbid einer Größe von  $45\text{ }\mu\text{m}$  bis  $106\text{ }\mu\text{m}$ . Die Analyse mittels Röntgen-Computertomografie gibt Aufschluss darüber, wie die Hartpartikel in der Probe verteilt sind.

### Forschungsthemen

#### Dimensionelle in-Prozess Messtechnik für 3D Laserdruckverfahren

- Entwicklung und Erforschung von Prüfeinrichtungen für die hochpräzise dimensionelle Erfassung des schichtweisen Lagenaufbaus beim PBF-LB / M Verfahren (Laser-based Powder Bed Fusion of Metals).

#### Strukturfunktion

- Erforschung einer neuen Methode zur Gewinnung detaillierter Strukturinformationen optisch erfasster technischer Oberflächen.

#### Laserbasierter Ultraschall

- Kontaktfreie Anregung und Detektion gezielt angeregter Ultraschallmoden mit Lasertechnik zur Werkstoffprüfung.

#### Röntgen-Computertomografie

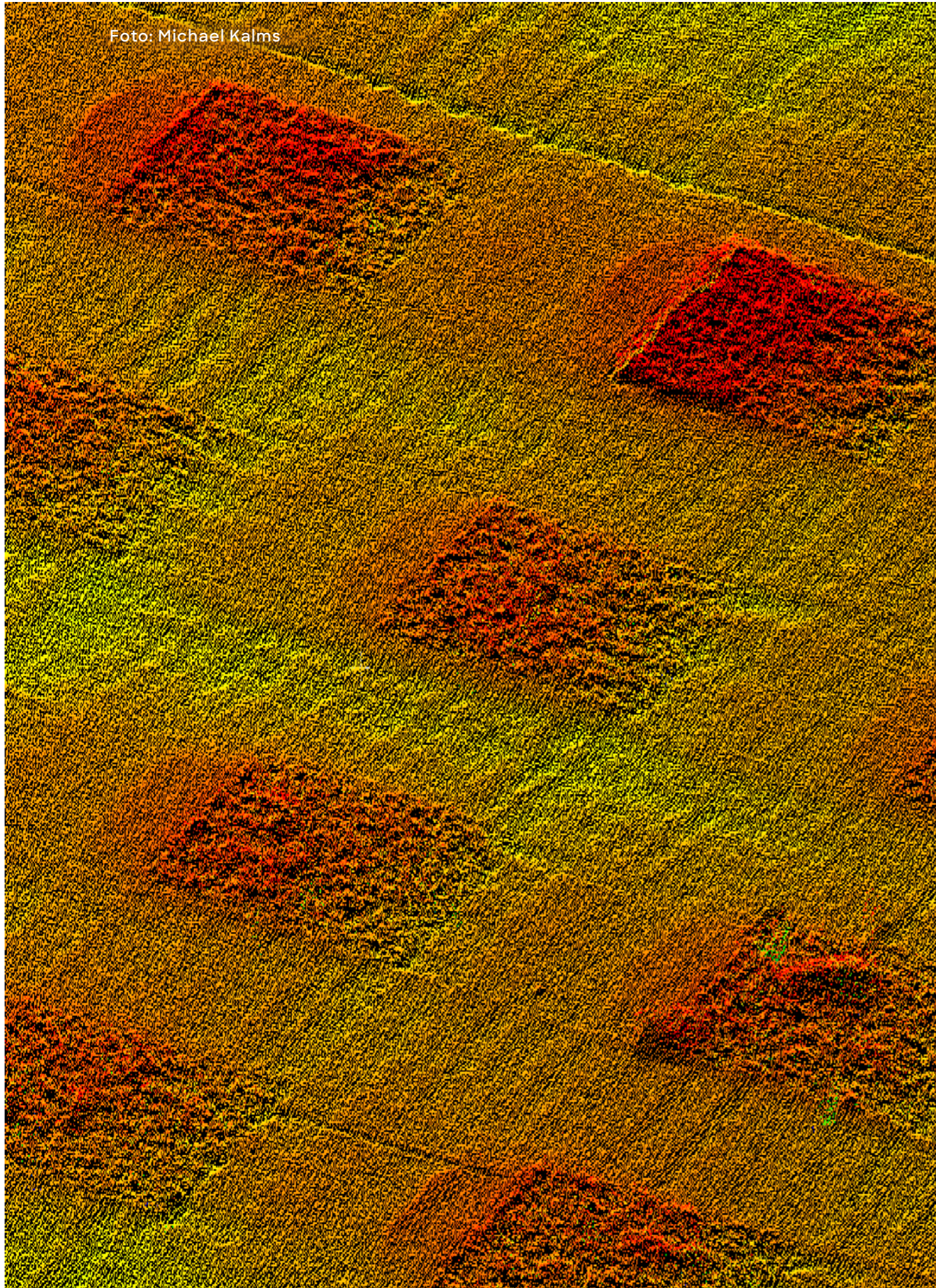
- Mikro- und Nanostrukturanalysen für Auftragsarbeiten aus der Industrie und zur Unterstützung der materialwissenschaftlichen Forschung.

### Leitung

Michael Kalms

Tel +49 421 218 58023

kalms@bias.de



## HOCHPRÄZISE, DIMENSIONELLE ERFASSUNG DES SCHICHTWEISEN LAGENAUFBAUS METALLISCHER STRUKTUREN BEIM LASER-BASIERTEN PULVERBETTVERFAHREN

Im AiF geförderten IGF-Vorhaben „Hochpräzises dimensionelles Erfassen des schichtweisen Lagenaufbaus beim PBF-LB / M Verfahren“ (Laser-based Powder Bed Fusion of Metals) Nr. 21178 N wird das dimensionelle Monitoring beim pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen weiter erforscht und einsetzbar gemacht. Das Projekt ist innerhalb der DVS-Forschung im Fachausschuss 13 angesiedelt. Es zielt auf eine Verbesserung der Herstellung metallischer Bauteile mit additiven Techniken zur Erreichung bzw. Einhaltung höchster Qualitätsansprüche. Durch die hohe Messgenauigkeit der Streifenprojektion von  $< 10 \mu\text{m}$  in Baurichtung (z-Koordinate) besteht die Möglichkeit, Einflüsse auf den Prozess, wie z.B. durch fehlerhaften Pulverauftrag, als auch geometrische Abweichungen des gefertigten Bauteils, z.B. Fehlstellen oder Verzug in jeder Lage lokal im gesamten Baufeld im Prozess zu erfassen.

Die präzise Auslegung der Messtechnik für die Prüfaufgabe ist ein Schlüsselement des Projekts. Dabei muss das Messsystem die flächige Erfassung von 3D-Geometriedaten mit strukturierter Beleuchtung bei höchster Genauigkeit innerhalb des Bauraums einer laserbasierten Druckschmelzvorrichtung ermöglichen. Das System muss zudem im Hinblick auf vertretbare Kosten für spätere Anwender entwickelt werden. Das BIAS kann dabei auf langjährige Erfahrung und neu erforschte Kalibriermethoden zurückgreifen.

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist die Bestimmung einer Korrelation der Messdaten zur Qualität von Pulverauftrag (Verteilung) und Konsolidierung (innerer und äußerer Bauteilzustand). Dabei ist die Grundidee, dass die Höhenverteilung der erstarrten Konsolidierung Aufschluss über die Qualität innerhalb der aktuellen Lage gibt. Dafür müssen Geometriedaten mit einer Auflösung von  $35 \mu\text{m}$  in x und y-Richtung gemessen werden. Das rechte Bild zeigt das CAD Modell für das Messsystem relativ zur Bauplatte des Laserdrucksystems (graue untere Fläche). Die Tiefe der Messeinrichtung im Bauraum misst weniger als 10 cm einschließlich einer passgenauen Schutzabdeckung (im Bild nicht gezeigt). Die überlagernden blau dargestellten Sichtbereiche jeder Kamera können adaptiv Messfelder von  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  bis  $28 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$  erfassen.

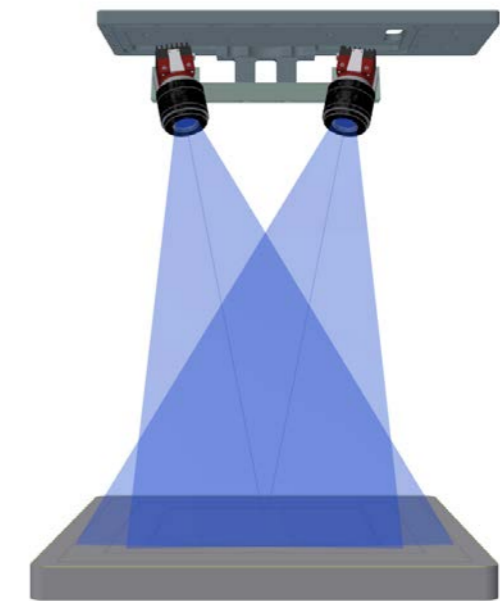


Foto: Reiner Klattenhoff

Das Bild links zeigt ein Ergebnis der dimensionellen Messung mit strukturierter Beleuchtung beim PBF-LB / M Verfahren. Die rot angefärbten Felder sind  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  große Quaderstrukturen fehlerhafter Qualität als Folge nicht optimal eingestellter Prozessparameter.



## ZAHLEN & FAKTEN

Geschäftsführung

**Materialbearbeitung & Bearbeitungssysteme (MBS)**  
Prof. Dr. F. Vollertsen

**Füge- & Pulverbettverfahren (A)**  
Dr. P. Woizeschke

**Koordinator Industrieprojekte (F)**  
P. Gerken

**Laserbearbeitung (A)**  
Dr. T. Radel

**Mikrofertigung (G)**  
Dr. T. Radel

**Mikrostrukturierung (G)**  
Dr. T. Radel

**Werkstoff- & Schweißtechnik (A)**  
Dr. T. Seefeld

**DED Verfahren (G)**  
A. Bohlen

**Metallographie (G)**  
Dr. T. Seefeld

**Werkstatt & Fertigung (G)**  
Dr. T. Seefeld

**Finanzen, Organisation & Verwaltung (FOV)**  
C. Prang

**Assistenz (F)**

**Datenverarbeitung (F)**

**Gebäudemanagement & Logistik (F)**

**Öffentlichkeitsarbeit (F)**

**Personalverwaltung (F)**

**Projektcontrolling (F)**

**Rechnungswesen (F)**

**Optische Messtechnik & Optoelektronische Systeme (OMOS)**  
Prof. Dr. R. Bergmann

**Geometrische Messtechnik (G)**  
M. Kalms

**Kohärente Optik & Nano-Photonik (G)**  
Dr. C. Falldorf

**Zerstörungsfreie Prüfung (G)**  
M. Kalms

**Kompetenz und Demonstrationszentrum Optische Messtechnik (F)**

(A) = Abteilung  
(G) = Gruppe  
(F) = Funktion

Stand: 01.08.2020

## WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT

### Vorsitzender

Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier,  
Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung – BAM, Berlin

### Stellvertretende Vorsitzende

Frau Susanne Szczesny-Oßing,  
EWM AG, Mündersbach

### Weitere Mitglieder

Prof. Dr.-Ing. Silke H. Christiansen,  
Helmholtz-Zentrum für Materialien und Energie, Berlin

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Lehmann,  
Universität Kassel, Kassel

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt,  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

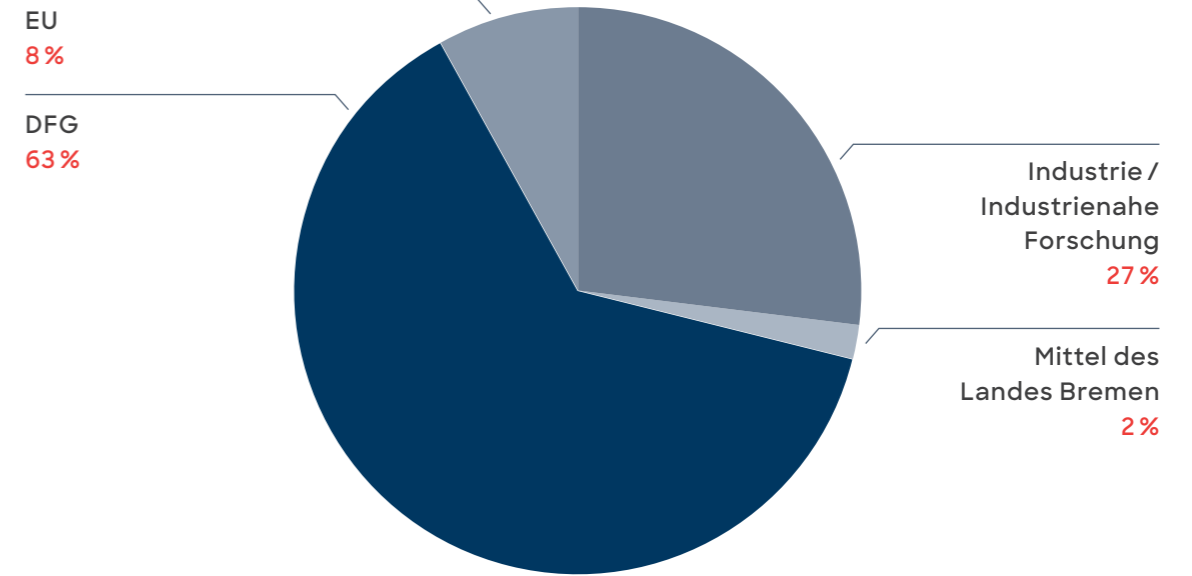
Prof. Dr.-Ing. Emil Schubert,  
Alexander Binzel Schweißtechnik GmbH & Co KG, Buseck

Dr.-Ing. André Walter,  
Airbus Operations GmbH, Bremen

Herrn Christian Wolters,  
Daimler AG, Bremen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch,  
Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT, Bremen

## VERTEILUNG DRITTMITTEL 2020



## PERSONALSTRUKTUR 2020

Mitarbeiter gesamt 93

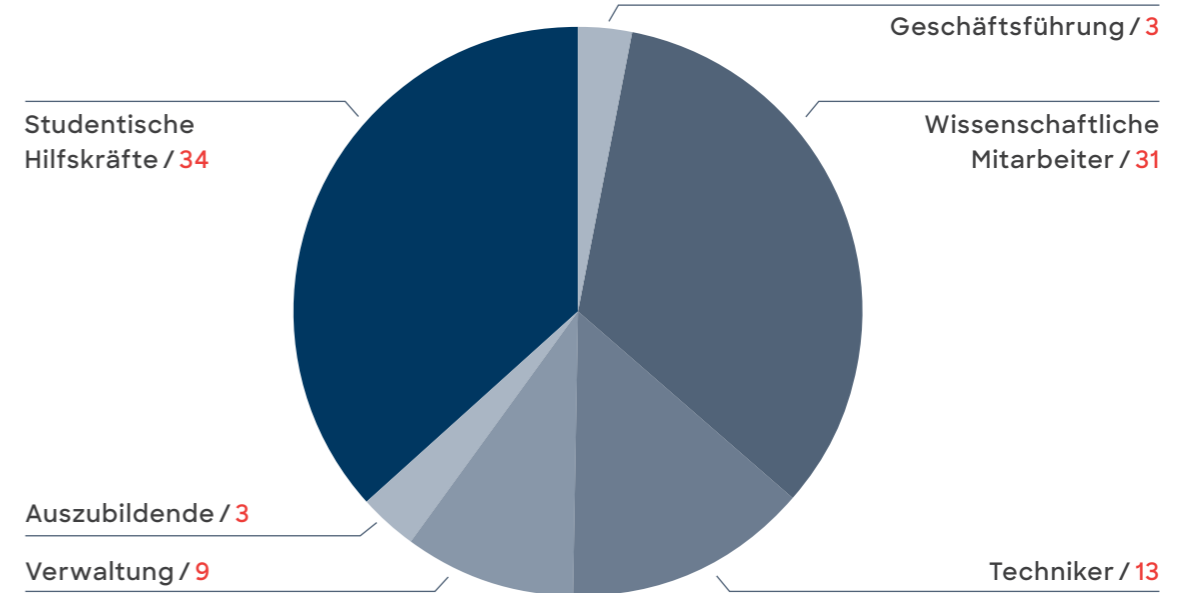




Foto: Andreas Klett

## KOOPERATIONEN

### National

**Aachen**  
RWTH Aachen, Werkzeugmaschinenlabor WZL

**Berlin**  
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

**Braunschweig**  
PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt

**Braunschweig**  
Technische Universität, IPROM - Institut für Produktionsmesstechnik

**Bremen**  
IWT - Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien

**Bremen**  
Universität Bremen

**Hamburg**  
Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT

**Hamburg**  
Technische Universität Hamburg-Harburg

**Lübeck**  
Technische Hochschule

**Marburg**  
Philipps-Universität, FB Physik

### International

**Ägypten**  
Aswan University, Faculty of Science, Assuan

**Spanien**  
Tekniker - Research and Technology Center, Eibar

**USA**  
University of Wisconsin-Madison, Mechanical Engineering, Madison

## AUSSTATTUNG

### Laser

- 12 kW Scheibenlaser
- 8 kW Faserlaser
- 1 kW Single-Mode-Faserlaser
- 300 W Single-Mode-Faserlaser
- 200 W ns-Faserlaser
- 50 W ps-Laser
- 6 J TEA-CO<sub>2</sub>-Laser
- Excimer-Laser
- Rb-Laser
- Ti:Sa-Laser
- Diodenlaser
- Nd: YAG-Laser 16 W

### Bearbeitungsstationen

- Portalanlagen mit bis zu 5-Achsen und Dreh- bzw. Dreh-Kipp-Tisch
- Knickarmroboter-Stationen bis 100 kg Tragkraft
- SLM-Anlage mit 1 kW Faserlaser
- Anlage zum laserchemischen Ätzen
- Diverse Mikropositioniereinheiten
- Metallografie
- Mikroumformungsmaschine MUM

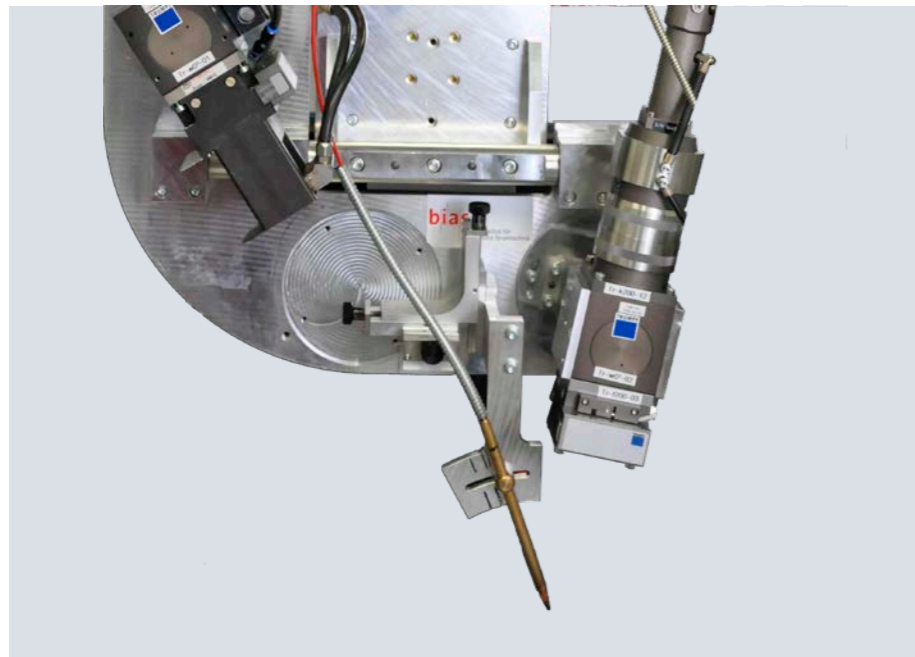


Foto: Christoph Mittelstädt

### Mess- und Prüfeinrichtungen

- Hochauflösende CCD-Kameras
- Kalibriereinrichtung für abbildende Optiken
- 3D Koordinatenmessmaschine (1000 x 700 x 600 mm)
- Röntgen-Computertomograph
- Laserultraschallanlage
- Scherografiesystem
- Streifenprojektion
- Streifenreflexion
- Focused Ion Beam
- Zugprüfmaschine
- Resonanzpulsler
- Kerbschlagwerk
- Kleinlasthärteprüfung (Vickers)
- Optisches Feindehnungsmesssystem
- Temperaturkalibrierstrahler (300 °C bis 1500 °C)

### Bearbeitungsoptiken und Prozess-Sensorik

- Industrielle Schweiß-, Löt- und Beschichtungsköpfe
- Scanner für Scheibenlaser, Single-Mode-Faserlaser, Nd:YAG-Laser und CO<sub>2</sub>-Laser
- Sonderbearbeitungsköpfe
- Strahldiagnose: Fokusmonitor, High Power MicroSpotMonitor, Laserleistungsmessung bis 20 kW
- Hochgeschwindigkeitskamera mit bis zu 96000 F/s
- Transientenrekorder mit 12 Kanälen
- Thermokamera 300 - 3.300 °C
- Quotientenpyrometer-Kamera (PyroCam)
- Triangulationssysteme

### Nano-Struktur-Labor

- Laserlithographiesystem
- Dual Beam SEM und FIB
- PVD-Anlage
- Anlage für das Plasmaätzen
- Spektral-Ellipsometer
- Mikro-Galvanik

## MITGLIEDSCHAFTEN

### Bergmann, Ralf

AHMT - Arbeitskreis der Hochschullehrer für Messtechnik e. V.  
DHV - Deutscher Hochschulverband, stellvertretender Vorsitzender  
des Landesverbandes Bremen  
DGaO - Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik, Vorstandsmitglied  
DPG - Deutsche Physikalische Gesellschaft  
EOS - European Optical Society, EOS Fellow  
JEOS:RP - Journal of the European Optical Society, Associate Editor  
MAPEX - Center for Materials and Processes, Principal Investigator MCB -  
Microsystems Center Bremen, Universität Bremen  
OSA - Optical Society of America, Senior Member  
SPIE - The International Society for Optical Engineering, Senior Member  
WLT - Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik

### Falldorf, Claas

DGaO - Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik  
Michael Kalms  
Fachausschuss Zustandsüberwachung (SHM) der DGZfP  
(Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfrei Prüfung e. V.)  
Kompetenz Centrum Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e. V. (CC UPOB)

### Seefeld, Thomas

HansePhotonik e. V., Leitung Geschäftsstelle  
DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. :  
Fachausschuss 1:  
Schweißmetallurgie und Werkstoffverhalten,  
Fachausschuss 6: Strahlverfahren, Fachausschuss 13: Additive Fertigung

### Vollertsen, Frank

acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften)  
AGU (Arbeitsgemeinschaft Umformtechnik)  
CIRP (International Institution for Production Engineering Research)  
Commission IV und XII der IIW (International Institution of Welding)  
Deutsche Gruppe der IDDRG (International Deep Drawing Research Group)  
DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren)  
LIA (Laser Institute of America)  
VDI (Verein Deutscher Ingenieure)  
WGP (Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik)  
WLT (Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik)

### Woizeschke, Peer

CIRP - Collège International pour la Recherche en Productique,  
Research Affiliate  
DGM - Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e. V., Mitglied in den  
DGM-Fachausschüssen: Hybride Werkstoffe und Strukturen,  
Aluminium, Additive Fertigung  
DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.  
IIW - International Institute of Welding, Commission IV Power beam processes,  
German Delegate Mitglied in den Kommissionen C-IV und C-XVII  
FOSTA, Fachausschuss FAI2 - Fachausschuss für anwendungsnahe Simulation  
in der Fertigung für Schweißen und Wärmebehandlung in Forschung  
und Praxis  
VDI - Verein Deutscher Ingenieure e. V.

### Institutsmitgliedschaften

AVIASPACE Bremen e. V.  
Club of Metal Working  
DGM Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V.  
DVS - Bezirksverband Bremen  
EOS - European Optical Society  
HansePhotonik e. V.  
SPIE - The International Society for Optical Engineering  
WLT - Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik

## VERANSTALTUNGEN

### TMS 2020

24.-27. Februar, San Diego / USA

Nach Abschluss des SPP 1676 - „Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik“ stellte das BIAS gemeinsam mit fünf weiteren Instituten aus diesem Schwerpunktprogramm seine Ergebnisse auf der TMS Konferenz in San Diego im Rahmen des Themenblockes „Advanced Functional and Structural Thin Films and Coatings“ vor. Sechs Jahre lang wurde mit der Vision geforscht, in Zukunft auf den Einsatz von mineralölbasierten Schmierstoffen in der Umformtechnik verzichten zu können.

Dr.-Ing. Thomas Seefeld referierte über die Ergebnisse des Projektes zur „Oberflächenbeschichtung für das schmierstofffreie Tiefziehen hochlegierter rostfreie Stähle“, seine Kollegin Annika Bohlen über den „Einfluss der Oberflächenrauigkeit von polykristallinen CVD-Diamantschichten auf die Trockenreibung auf Aluminium“.

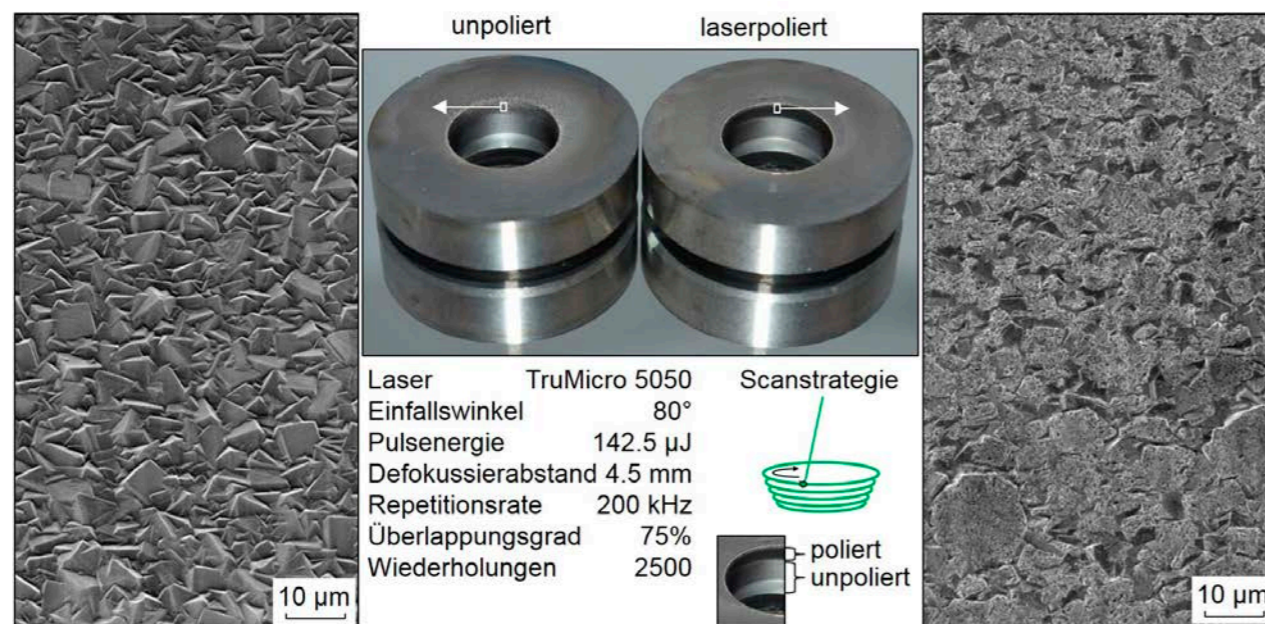


Foto: Markus Prieske

### 121. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO)

Für die vom 02.-06. Juni 2020 geplanten 121. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO) erschien nach der pandemiebedingten Absage ein Tagungsband.

### EOSAM - European Optical Society Annual Meeting

Die EOSAM 2020 fand nicht wie geplant in Porto sondern im September virtuell statt. TOM 6 - Frontiers in Optical Metrology fand unter der Leitung von Prof. Bergmann statt.

### LAF - Laser Anwender Forum

Im Rahmen der sich ausbreitenden Pandemie durch SARS-Covid-19 und der verschärften Regeln zu Veranstaltungen musste das für den November geplante Laser Anwender Forum in Bremen leider verschoben werden.

Das nächste LAF findet am 23. und 24. November 2020 im Congress Centrum Bremen statt. [www.lafbremen.de](http://www.lafbremen.de)



Foto: Jan Meier

## EHRUNGEN UND AUSZEICHNUNGEN

### Stipendium der Stiftung Industrieforschung für Thorsten Winkel

Die Stiftung Industrieforschung unterstützt jährlich bis zu zwanzig industrienahe und anwendungsrelevante Forschungsarbeiten besonders qualifizierter Student\*innen mit einem Stipendium bei der Erstellung ihrer Masterarbeit mit einem Volumen von bis zu 3.000 €. Thorsten Winkel erhielt ein Stipendium für seine Forschungsarbeit zum Laserdispersieren. Er arbeitet in der Gruppe DED-Verfahren der Abteilung Werkstoff- und Prozesstechnik an der Erstellung seiner Masterarbeit zum Laserdispersieren von Wolframschmelzcarbid in Kupferwerkstoffen.



Foto: Andreas Klett

## ABSCHLÜSSE

### Bachelor

#### Prigge, Daniel:

Dreidimensionales Bildwiedergabesystem basierend auf der Synthese sphärischer Wellenfelder

#### Schnoor, Henrik:

Untersuchung der Gültigkeit eines Reibmodells im Mikrobereich

#### Stöckel, Axel:

Laserbasierte Lichtbogenstabilisierung zur Beeinflussung der Spurbreite additiv gefertigter Bauteile

#### Wicht, Mark:

Untersuchung systematischer Fehlereinflüsse in der Multiple Aperture Shear Interferometry (MArS)

#### Wirtz, Christian:

Nutzarbeit bei der laserinduzierten Schockwellen-Eindringprüfung

### Master

#### Müller, André F.:

Möglichkeiten und Grenzen der Multiple Aperture Shear Interferometry

#### Hyra, Andreas:

Objektuntersuchung durch Vermessung der Kohärenzfunktion mittels Scherinterferometrie

### Dissertationen

#### Hagemann, Jan-Hendrik (extern, PTB Braunschweig):

Shearing-Interferometrie mit einer teilkohärenten Multi-Quellen-Beleuchtung zur Formmessung von Optiken

#### Heimsath, Anna (extern, FhG-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg):

Optical efficiency of concentrating solar thermal collectors - Investigation on loss mechanism of solar reflectors

#### Messaoudi, Hamza:

Thermische Bedingungen der laserchemischen Mikrobearbeitung von Metallen

#### Prieske, Markus:

Eignung von CVD-Diamantschichten für die Trockenumformung von Aluminium

#### Radel, Tim:

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen mit Schwingungsüberlagerung

## PATENTE / GEBRAUCHSMUSTER

System zur Bestimmung einer Schweiß- oder Lötgeschwindigkeit, R. Bergmann, M. Szczesny, DE 202018006108U1, Gebrauchsmuster in Deutschland

Kamera zum Bestimmen eines 2D-Wärmebilds sowie System und Prozessregeleinrichtung, Thomy, C. / Tyralla, D. / Schnick, M., Offenlegungsschrift DE 10 2018 133 518.0, Patent Deutschland

Prozessanomalieerfassungssystem für eine dreidimensional-additive Herstellungsvorrichtung, dreidimensional-additive Herstellungsvorrichtung, Verfahren zum Erfassen einer Prozessanomalie für eine dreidimensional-additive Herstellungsvorrichtung, Herstellungsverfahren für ein dreidimensional-additiv hergestelltes Produkt und dreidimensional-additiv hergestelltes Produkt, C. Thomy, H. Köhler, M. Kalms, R. Narita, T. Watanabe, A. Kondou, M. Kitamura, H. Haraguchi, S. Tanigawa, Offenlegungsschrift DE 112017007843 T5 2020.05.07, Patent Deutschland

Internal defect detection system, three-dimensional lamination-shaping device, internal defect detection method, method for manufacturing three-dimensional lamination-shaped article, and three-dimensional lamination-shaped article, C. Thomy, H. Köhler, R. Narita, S. Tanigawa, H. Haraguchi, M. Kitamura, A. Kondou, T. Watanabe, Offenlegungsschrift CN 110650811 A 03.01.2020, Patent China

## BEWILLIGTE PROJEKTE

### **AIF - Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“**

Hochpräzises, dimensionelles Erfassen des schichtweisen Lagenaufbaus beim LBM-Verfahren mit einem neuen Prüfkonzept, DVS 13.3214, 25. März 2020

Simulation und experimentelle Validierung von Eigenspannungen in lasergenerierten Composite-Werkstoffen, 21.079 N, 24. Juni 2020

### **DFG - Deutsche Forschungsgemeinschaft**

Stabilisierung der Dampfkapillare durch zusätzliche Intensitätsmaxima entlang der Strahlachse, VO 530 / 129-1, 423364400, 9. Januar 2020

Deflektometrie mit aktiver Displayregistrierung, BE 1924 / 58-1, 444018140, 18. Juni 2020

Strahlformung durch CGHs für optogenetische Anwendungen, BE 1924 / 62-1, 450381965, 4. September 2020

Laserschmelzen im Gesenk, VO 530 / 140-1, 449377606, 4. September 2020

### **EFRE - Europäischer Fonds für regionale Entwicklung**

Robuste und effiziente Prozesse für die laseradditive Fertigung, LURAF03001B, 5. November 2020

## PUBLIKATIONEN 2020

- Agour, M; Falldorf, C; Bergmann, R B: Fast 3D form measurements using a tunable lens profiler based on imaging with LED illumination. *Optics Express* 29, 1 (2020) 385-399
- Agour, M; Falldorf, C; Bergmann, R B: Fast form measurements using a digital micro-mirror device in imaging with partially coherent illumination. *Optics Letters* 45, 22 (2020) 6154-6157
- Agour, M; Falldorf, C; Bergmann, R B: Form profiler based on imaging with spatially partially coherent light. *Proc. of 121 DGaO-Tagung (2020) ISSN: 1614-8436 - urn:nbn:de:0287-2020-A008-4*
- Agour, M; Falldorf, C; Thiemicke, F; Bergmann, R B: Lens-based phase retrieval under spatially partially coherent illumination - Part II: Shape measurements. *Optics and Lasers in Engineering* 139 (2020) 106407
- Bartsch, J; Bergmann, R B: Phasenmessende Deflektometrie mit aktiver Displayregistrierung. *Proc. of 121 DGaO-Tagung (2020) ISSN: 1614-8436 urn:nbn:de:0287-2020-A012-2*
- Beste, L-H; Radel, T; Richter, B; Faue, P.; Pfefferkorn, F. E; Vollertsen, F: Reduction of porosity in near-surface layers of LPBF components by laser polishing. 4th Conference on Laser Polishing (LaP 2020) Sept. 2020, Wisconsin/USA (17.09.20). Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Aachen (online)
- Borchers, F; Clausen, B; Eckert, S; Ehle, L; Epp, J; Harst, S; Hettig, M; Klink, A; Kohls, E; Meyer, H; Meuer, M; Rommes, B; Schneider, S; Strunk, R: Comparison of Different Manufacturing Processes of AISI 4140 Steel with Regard to Surface Modification and Its Influencing Depth. *Metals* 10, 895 (2020) doi:10.3390/met10070895
- Cho, W; Na, S: Impact of Wavelengths of CO<sub>2</sub>, Disk, and Green Lasers on Fusion Zone Shape in Laser Welding of Steel. *Journal of Welding and Joining* 38, 3 (2020) 235-240 (online) doi.org/10.5781/JWJ.2020.38.3.1
- Cho, W; Woizeschke, P: Analysis of molten pool behavior with buttonhole formation in laser keyhole welding of sheet metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 152 (2020) 119528 (online) doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119528
- Czotscher, T; von Hehl, A; Radel, T; Tönjes, A: Correlation between Shock Wave-induced Indentations and Tensile Strength. *Proc. of 23.th International Conference on Material Forming (ESAFORM 2020), Procedia Manufacturing* 47 (2020) 756-760 (online), doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.230
- Ditsche, A; Seefeld, T: Local Laser Particle Fusion: Fusing of Hard Particles for the Reduction of High Contact Pressures in MMC Tool Surfaces. *JOM* 72, 2 (2020) 2488 - 2496
- Dörfert, R; Freiße, H; Tyralla, D; Vollertsen, F: Koaxiale Implementierung einer Temperaturfelderfassung in eine kommerzielle SLM-Anlage. *WOMAG* 4 (2020) 1-2

- Eckert, S; Vollertsen, F: Prozessbeschleunigung beim laserchemischen Polieren. *Laser Magazin* 2 (2020) 20-23
- Epp, J; Dong, J; Meyer, H; Bohlen, A; Fischer, T: Analysis of multiple phase transformations during additive manufacturing of hardenable steel by in-situ X-ray diffraction experiments. *Scripta Materialia* 177 (2020) 27-31
- Falldorf, C; Agour, M; Thiemicke, F; Bergmann, R B: Lens based phase retrieval under spatially partially coherent illumination - Part I: Theory. *Optics and Laser in Engineering* 139 (2020) 106507
- Faue, P.; Richter, B; Klingbeil, K; Beste, L-H; Radel, T; Vollertsen, F; Pfefferkorn, F. E: Influence of trochoid beam path on continuous-wave laser polishing of 316L stainless steel. 4th Conference on Laser Polishing (LaP 2020) Sept. 2020, Wisconsin/USA (16.09.20). Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Aachen (online)
- Fenske, H; Czotscher, T: Tailoring the Pressure Profile of TEA-CO<sub>2</sub> Laser-Induced Shock Waves for Mechanical Forming and Separation Processes. *Lasers Manuf. Mater. Process.* 7, 1 (2020) 1-14 (<https://doi.org/10.1007/s40516-019-00105-y>)
- Halisch, C; Radel, T; Tyralla, D; Seefeld, T: Measuring the melt pool size in a wire arc additive manufacturing process using a high dynamic range two co-located pyrometric cameras. *Welding in the World* (2020) 64:1349-1356 (online)
- Henze, I; Woizeschke, P: Influence of the beam oscillation pattern and oscillation frequency on the temperature field in laser brazing with keyhole formation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 111 (2020) 807-816 (online)
- Kalms, M; Bergmann, R B: Structure function analysis of powder beds in additive manufacturing by laser beam melting. *Additive Manufacturing* 36 (2020) 101396
- Langebeck, A; Bohlen, A; Freiße, H; Vollertsen, F: Additive manufacturing with the lightweight material aluminium alloy EN AW-7075. *Welding in the World* (2020) 64:429-436
- Langebeck, A; Bohlen, A; Rentsch, R; Vollertsen, F: Mechanical Properties of High Strength Aluminum Alloy EN AW-7075 Additively Manufactured by Directed Energy Deposition. *Metals* 10, 579 (2020) doi:10.3390/met10050579
- Langebeck, A; Warneke, P; Bohlen, A; Seefeld, T: Verschleißschutz von Umformwerkzeugen - Anforderungsgerechte Prozessführung beim Laserdispargieren. *WT Werkstatttechnik* 110, 11-12 (2020) 779-783 (online)
- Lotzgeselle, M; Straub, A; Ehret, G; Müller, A F; Falldorf, C; Bergmann, R B: Iterative Bestimmung der Form von Asphären mittels Scher-Interferometrie und inversem Raytracing. *Proc. of 121 DGaO-Tagung (2020) ISSN: 1614-8436 - urn:nbn:de:0287-2020-P009-6*
- Lu, Y; Meyer, H; Radel, T: Multi-cycle phase transformation during laser hardening of AISI 4140. *Proc. of the 11th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2020)*, eds.: M. Schmidt, F. Vollertsen, E. Govekar. *Procedia CIRP* 94, Elsevier B.V. Amsterdam (2020) 919-923 (online)

Mattulat, T; Kügler, H; Vollertsen, F: Investigations on the occurrence of different wetting regimes in laser brazing of zinc-coated steel sheets. *Welding in the World* (2020) doi.org/10.1007/s40194-019-00843-9 (online)

also in: IIW Annual Assembly Com. XVII, Bratislava/Slovakia (2019) Doc. XVII-A-0181-19

Mattulat, T; Woizeschke, P: IGF-Nr. 19.987N: Laserstrahllöten mit oszillierendem Kaltdraht zur Steigerung der Nahtqualität. *DVS CONGRESS - GST Große Schweißtechnische Tagung 2020*, DVS-Berichte Bd. 365. DVS Media GmbH Düsseldorf (2020) 343-348

Mattulat, T; Woizeschke, P: Manipulation of the cyclic wetting process using longitudinal filler wire oscillation in the laser brazing of zinc-coated steel sheets. *Proc. of the 11th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2020)*, eds.: M. Schmidt, F. Vollertsen, E. Govekar. *Procedia CIRP* 94, Elsevier B.V. Amsterdam (2020) 616-621 (online)

Mattulat, T; Woizeschke, P: The influence of the ratio of wire and process velocities on the wetting process in laser brazing. *Production Engineering* 14, 4 (2020) 523-534

Müller, A F; Falldorf, C; Lotzgeselle, M; Ehret, G; Bergmann, R B: Multiple Aperture Shear-Interferometry (MArS): a solution to the aperture problem for the form measurement of aspheric surfaces. *Optics Express* 28, 23 (2020) 34677-34691

Patra, S; Bartsch, J; Sperling, Y; Kalms, M; Bergmann, R B: Modelling the influences of technical surfaces on Phase Measuring Deflectometry. *Proc. of 121 DGaO-Tagung* (2020) ISSN: 1614-8436 - urn:nbn:de:0287-2020-A011-8

Pordzik, R; Woizeschke, P: An Experimental Approach for the Direct Measurement of Temperatures in the Vicinity of the Keyhole Front Wall during Deep-Penetration Laser Welding. *Appl. Sci.* 10 (2020), 3951; doi: 10.3390/app10113951

Prieske, M: Impact of Peak Material Volume of Polycrystalline CVD Diamond Coatings on Dry Friction Against Aluminum. *JOM* 72, 7 (2020) 2497-2503  
Prieske, M; Bohlen, A; Vollertsen, F: Impact of peak material volume of polycrystalline CVD-diamond coatings on dry friction against aluminum. *TMS 2020 Annual Meeting*, San Diego (24.02.2020)

Prieske, M; Börner, R; Berger, T; Kühn, R; Scholz, P; Schubert, A; Müller, R; Vollertsen, F: Dry deep drawing of aluminium for automotive production. *Dry Met. Forming OAJ FPR* 6 (2020) 262-301

Prieske, M; Vollertsen, F: Polished diamond coatings for dry tapering of aluminum. *Dry Met. Forming OAJ FPR* 6 (2020) 334-353

Rathmann, L; Czotscher, T; Radel, T; Vollertsen, F: Investigation on water as lubricant in combination with a structured tool surface in micro metal forming. *Proc. of the International Deep-Drawing Research Group (IDDRG2020)*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 967 (2020) 012005, doi:10.1088/1757-899X/967/1/012005

Rathmann, L; Pordzik, R; Vollertsen, F: Fertigung von Mikrosonden. *UMFORM-technik Blech Rohre Profile* 5 (2020) 32

Rathmann, L; Vollertsen, F: Analysis of the contact length during micrometal forming to establish its efficient measurement method. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing* 8, 2 (2020) 024505-1-5

Rathmann, L; Vollertsen, F: Determination of a contact length dependent friction function in micro metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 286 (2020) 116831 (online)

Schattmann, C; Wilhelmi, P; Schenck, C; Kuhfuß, B; Vollertsen, F: Im Teileverbund zur Taktsteigerung. *Mikroproduktion* 02/20 (2020) 42-44

Simons, M; Radel, T: Der Laser erhöht die Leitfähigkeit. *Mikroproduktion* 1, 20 (2020) 36-37

Simons, M; Radel, T; Kajsaravally, R; Vollertsen, F: Influence of laser-induced bubble formation on laser chemical machining. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology* 10, 2 (2020) 21-33

Simons, M; Radel, T; Shanta, V; Vollertsen, F: Comparison of boiling bubble behavior during laser chemical machining under superatmospheric pressure. *Proc. of the 11th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2020)*, eds.: M. Schmidt, F. Vollertsen, E. Govekar. *Procedia CIRP* 94, Elsevier B.V. Amsterdam (2020) 561-564 (online)

Simons, M; Radel, T; Vollertsen, F: Process window expansion of laser chemical machining by using high pressure. *Material Sciences and Applications* 11, 5 (2020) 296-304

Tyralla, D; Bohlen, A; Seefeld, T: Erhöhung der Abschmelzleistung und der Überzugsqualität für das Laser-Heißdraht-Auftragschweißen durch Strahl-oszillation und temperaturbasierte Regelung. *DVS CONGRESS - GST Große Schweißtechnische Tagung 2020*, DVS-Berichte Bd. 365. DVS Media GmbH Düsseldorf (2020) 524-531

Tyralla, D; Freijße, H; Seefeld, T; Thomy, C; Dreher, M; Schnick, M; Narita, R: Laser hot wire cladding (LHWC) with single and multiple wires for high deposition rates and low dilution. *Welding and Cutting* 19, 3 (2020) 220-226

Tyralla, D; Köhler, H; Seefeld, T; Thomy, C; Vollertsen, F; Narita, R: Simultane Regelung von Überlappungsgrad und Schmelzbadgröße für das Laserstrahl-Pulverauftragschweißen. *Schweißen und Schneiden* 72, 9 (2020) 574-575

Tyralla, D; Köhler, H; Seefeld, T; Thomy, C; Vollertsen, F; Narita, R: Simultaneous Control of the Degree of Overlap and Melt Pool Size for Laser Powder Cladding. *PhotonicsViews* 5 (2020) 12

Tyralla, D; Köhler, H; Thomy, C; Seefeld, T; Narita, R: A multi-parameter control of track geometry and melt pool size for laser metal deposition. *Proc. of the 11th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2020)*, eds.: M. Schmidt, F. Vollertsen, E. Govekar. *Procedia CIRP* 94, Elsevier B.V. Amsterdam (2020) 430-435 (online)

Tyralla, D; Seefeld, T: Advanced Process-Monitoring in Additive Manufacturing. *PhotonicsViews* 3 (2020) 60-63

Tyralla, D; Seefeld, T: Inline-Charakterisierung des Pulverstroms für das Laser-Pulver-Auftragschweißen und die additive Fertigung (LAM). *Werkstoffe und additive Fertigung 2020 (DGM)* online

Tyralla, D; Seefeld, T: Temperature field based closed-loop control of laser hot wire cladding for low dilution. *Proc. of the 11th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2020)*, eds.: M. Schmidt, F. Vollertsen, E. Govekar. *Procedia CIRP 94*, Elsevier B.V. Amsterdam (2020) 451-455 (online)

Tyralla, D; Seefeld, T; Thomy, C: Neuartige Methode zur orts aufgelösten Temperaturmessung mittels konventioneller RGB-Farbkamera. *Proc. of 121 DGoO-Tagung (2020)* ISSN: 1614-8436 - urn:nbn:de:0287-2020-A025-9  
Valentino, T; Radel, T; Vollertsen, F: Hochgeschwindigkeits-Härteprüfung. *mo Magazin für Oberflächentechnik 74, 8/9 (2020)* 48-51

Vetter, K; Lekaj, E; Winkel, T; Freiße, H; Bohlen, A: Rapid heat treatment of spherical steel samples by laser radiation. *laser+photonics (2020)* 72-74  
Vetter, K; Murken, N; Winkel, T; Freiße, H; Bohlen, A; Vollertsen, F: Qualitätssicherung mittels Spektroskopie bei der laserbasierten experimentellen Werkstoffentwicklung. *Werkstoffe in der Fertigung 1 (2020)* 27-20

Warneke, P, Seefeld, T: Wear Resistance of Hard Particle Reinforced Copper Alloys Generated by Laser Melt Injection. *Proc. of the 14th International Conference The A Coatings. Defect and Diffusion Forum, Vol 404*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland (2020) 68-76 (online)

Woizeschke, P; Vollertsen, F: Laser keyhole micro welding of aluminum foils to lap joints even with large gap sizes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology 69 (2020)* 237-240

## PUBLIKATIONEN IM RAHMEN DER ABSCHLUSSVERÖFFENTLICHUNG DES SFB 747

Agour, M; von Freyberg, A; Staar, B; Falldorf, C; Fischer, A; Lütjen, M; Freitag, M; Goch, G; Bergmann, R B: Quality Inspection and Logistic Quality Assurance of Micro Technical Manufacturing Processes. In: *Cold Micro Metal Forming*, eds. F. Vollertsen, B. Kuhfuß, C. Thomy, S. Friedrich, P. Maaß, H.-W. Zoch. Springer Nature Switzerland AG, Cham/CH (2020) 256-274

Mehrafsun, S; Messaoudi, H; Vollertsen, F: Process Behavior in Laser Chemical Machining and Strategies for Industrial Use. In: *Cold Micro Metal Forming*, eds. F. Vollertsen, B. Kuhfuß, C. Thomy, S. Friedrich, P. Maaß, H.-W. Zoch. Springer Nature Switzerland AG, Cham/CH (2020) 180-190

Messaoudi, H; Mikulewitsch, M; Fischer, A; Goch, G; Vollertsen, F: Controlled and Scalable Laser Chemical Removal for the Manufacturing of Micro Forming Tools. In: *Cold Micro Metal Forming*, eds. F. Vollertsen, B. Kuhfuß, C. Thomy, S. Friedrich, P. Maaß, H.-W. Zoch. Springer Nature Switzerland AG, Cham/CH (2020) 155-179

Rathmann, L; Heinrich, L; Vollertsen, F: Influence of Tool Geometry on Process Stability in Micro Metal Forming. In: *Cold Micro Metal Forming*, eds. F. Vollertsen, B. Kuhfuß, C. Thomy, S. Friedrich, P. Maaß, H.-W. Zoch. Springer Nature Switzerland AG, Cham/CH (2020) 73-94

Schattmann, C; Jahn, M; Schmidt, A; Vollertsen, F: Generation of Functional Parts of a Component by Laser-Based Free Form Heading. In: *Cold Micro Metal Forming*, eds. F. Vollertsen, B. Kuhfuß, C. Thomy, S. Friedrich, P. Maaß, H.-W. Zoch. Springer Nature Switzerland AG, Cham/CH (2020) 30-44

Seven, J; Vollertsen, F: Increase of Tool Life in Micro Deep Drawing. In: *Cold Micro Metal Forming*, eds. F. Vollertsen, B. Kuhfuß, C. Thomy, S. Friedrich, P. Maaß, H.-W. Zoch. Springer Nature Switzerland AG, Cham/CH (2020) 136-154  
Vollertsen, F; Kuhfuß, B; Thomy, C; Friedrich, S; Maass, P; Zoch, H: Cold Metal Micro Forming. *Research Report of the Collaborative Research Center "Micro Cold Forming" (SFB 747)*, Bremen, Germany, eds. F. Vollertsen, B. Kuhfuß, C. Thomy, S. Friedrich, P. Maaß, H.-W. Zoch. Springer Nature Switzerland AG, Cham/CH (2020)

---

## IMPRESSUM

### Redaktion

Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen,  
Prof. Dr. rer. nat. Ralf B. Bergmann,  
Dipl.-Kffr. (FH) M.Sc. Claudia Prang  
Mag. Artium Christine Steffens

### Layout

Büro 7 visuelle Kommunikation GmbH

### Druck

Girzig + Gottschalk GmbH

© BIAS Verlag · Bremen, 2021

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form, auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich genannten Sonderfällen – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Titelfoto: Andreas Klett

Fotos Seite 7, von oben nach unten: Tim Radel, Andreas Klett, Andre Müller, Anika Langebeck, Thorsten Mattulat, Marcel Möbus, Dieter Tyralla

---

**BIAS – Bremer Institut für  
angewandte Strahltechnik GmbH**

Klagenfurter Straße 5  
28359 Bremen  
Tel +49 421 218 58000  
Fax +49 421 218 58063

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

