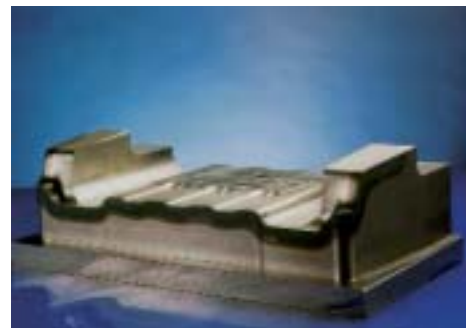
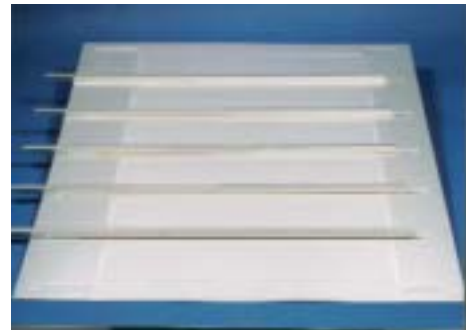




Fraunhofer Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Jahresbericht 2001

10 Jahre Fraunhofer IWS in Dresden · 1992-2002 · 10 Jahre Fraunhofer IWS



Internet: www.iws.fraunhofer.de

Jahresbericht 2001



Das Jahr 2001 war für das IWS ein ganz besonderes Jahr mit vielen Höhepunkten. So wie das alte Jahrtausend endete, so hat das neue begonnen: mit einem Auftragsboom im Bereich der Laser- und Oberflächentechnik. Dies ist um so interessanter, da die Gesamtkonjunktur in Deutschland deutlich hinter den Erwartungen zurückblieb. Von Unternehmensberatern, Banken und bedeutenden Managern wurde und wird vielfach behauptet, dass ein Wachstum nur in den "Zukunftstechnologien" und nicht in der so genannten "old economy" erfolgen wird. Wie häufig im Leben, dürfte die Wahrheit zwischen den Extremen liegen. Und hier ist offensichtlich die Laser- und Oberflächentechnik einzuordnen, womit das herausragende wirtschaftliche Ergebnis des IWS zu begründen ist.

Nach dem starken Wachstum der letzten Jahre ist es uns gelungen, 2001 ein überproportionales Wachstum zu erzielen. Die Gesamterträge sowie die Industrieerträge stiegen um ca. 20%.

Das IWS hat im Jahr 2001 ein internationales Technologieaudit durchgeführt. Dabei wurde die Entwicklung betrachtet und eine sich daraus ergebende Strategie für die nächsten Jahre diskutiert. Alle Auditoren lobten die positive Entwicklung und die strategische Ausrichtung des IWS und ermutigten uns, den eingeschlagenen Weg weiter zu verfolgen. Darüber hinaus bekamen wir Anregungen für neue, zusätzliche Arbeitsrichtungen, welche wir bereits aufgegriffen haben.

Einen Höhepunkt des Jahres 2001 bildete die Verleihung des US-amerikanischen R&D 100 Award für die Entwicklung unseres laserakustischen Messplatzes. Diese jährliche Auszeichnung erhalten die einhundert weltweit besten Entwicklungen auf den verschiedensten Forschungsgebieten.

Weitere wissenschaftliche und technologische Highlights finden Sie auf den folgenden Seiten unseres Jahresberichtes.

Das IWS hat mit dem Jahr 2001 nunmehr das zehnte Jahr in der Fraunhofer-Gesellschaft abgeschlossen und insbesondere in den letzten fünf Jahren eine positive Entwicklung genommen. Unser vorrangiges Ziel ist es nun, das schnelle Wachstum der letzten Jahre zu konsolidieren, zumal ein weiteres personelles Wachstum erst mit Fertigstellung unseres Anbaus erfolgen kann.

Dresden, Januar 2002

Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Beyer





Fraunhofer-Institut
für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Winterbergstr. 28
01277 Dresden

Telefon: 0351 / 2583 324
Fax: 0351 / 2583 300

E-mail: info@iws.fraunhofer.de
Internet: www.iws.fraunhofer.de

Vorwort	3
Inhalt	5
Highlights des IWS im Jahr 2001	6
Das Institut im Profil	8
Kurzporträt	8
Organisation und Ansprechpartner	10
Anbindung an die TU Dresden	11
Zentren und externe Projektgruppen	12
Ausstattung des Institutes	16
Das Institut in Zahlen	18
Die Fraunhofer-Gesellschaft auf einen Blick	20
Kuratorium und Gremien	21
FuE-Angebot	22
Röntgen- und EUV-Optik	22
Dünnschichttechnologie	30
Thermische Beschichtungsverfahren	44
Füge- und Randschichttechnologien	54
Laserabtragen und -trennen	66
Namen, Daten und Ereignisse	74
Diplomarbeiten und Dissertationen	74
Vorlesungen und Mitarbeit in Gremien	75
Messebeteiligungen	76
Besondere Ereignisse	78
Preise des IWS 2001	78
Patente	79
Veröffentlichungen	80
Tagungsvorträge	83
Informationsservice	88
Kontaktadressen und Anfahrt	89
Impressum	90



LAWave® erhält den R&D 100 Award

Für die gemeinsame Entwicklung und Markteinführung des laserakustischen Prüfverfahrens LAWave® erhielten Forscher des Fraunhofer Centers for Surface and Laser Processing CSLP in den USA und des Fraunhofer IWS in Dresden den renommierten „R&D 100 Award“. Die Auszeichnung wurde am 4. Oktober 2001 auf einem Meeting im Museum of Science and Technology in Chicago überreicht und würdigt den Beitrag im Bereich der angewandten Nanotechnologie.



Verleihung des "R&D 100 Award" am 4.10.2001 im Museum of Science and Technology in Chicago

Neuer Weltrekord

Dem IWS ist es gelungen, EUV-Spiegel (MoSi) mit einer Reflektivität von 71,4 % herzustellen. Dieser Wert stellt weltweit einen bisher unerreichten Spitzenwert dar. EUV-Spiegel werden zukünftig für die Lithographie benötigt. Sie sind ein Beispiel für angewandte Nanotechnologie.

IWS stellt 2002 den Präsidenten des Laser Institutes of America (LIA)

Die größte Laservereinigung der Welt hat Prof. Beyer für 2002 zum Präsidenten gewählt. Damit wird erstmalig ein nicht amerikanischer Bürger den Vorsitz des LIA übernehmen.

Lasertronic®

Als richtungsweisend für den Lasereinsatz im Karosseriebau werden unsere Arbeiten im Bereich der schnellen Strahlableitung bezeichnet. Da es sich hierbei um ein Zusammenwirken von Laser, Elektronik und Informationsverarbeitung handelt, haben wir den Begriff "lasertronic®" geprägt.



Roboter mit Hochleistungs-Strahlableitungssystem



CD Laserlexikon

Laserlexikon

Das IWS hat ein multimediasiertes Laserlexikon entwickelt. Dieses wird in Form einer CD angeboten. Die Zielgruppe sind Studenten, Techniker und Ingenieure. Das Lexikon wurde erstmals auf der Laser-Messe in München vorgestellt.



Hervorragendes Technologieaudit

Das Fraunhofer IWS in Dresden unterzog sich im Januar 2001 als drittes Institut der Fraunhofer-Gesellschaft einem Technologie-Audit. Alte und neue Geschäftsfelder wurden gründlich auf ihre Markttauglichkeit und die Zukunftsperspektiven hin abgeklopft und mit den Kernkompetenzen des Instituts gegengecheckt.

Alle Auditoren kamen zu der Überzeugung:

- Das IWS hat eine herausragende Entwicklung vollzogen. Die F&E-Gebiete sind zukunftsorientiert, Kompetenz, Management und Ausstattung sind sehr gut.
- Nach Aussage der Auditoren ist das IWS in einigen Bereichen weltweit führend.

Auditoren:

- Dr. G. Barbezat**
(Sulzer Metco Holding, Schweiz)
- Dr. U. Brinkmann**
(Zeitschrift LaserOpto)
- Dr. E.-J. Drewes**
(ThyssenKrupp Stahl AG)
- Prof. Dr.-Ing. H. Flegel**
(DaimlerChrysler AG)
- Dr. W. Fleischer**
(Bodycote Coating Centrum, Holland)
- Dr. T. Krug**
(Metaplas Ionon)
- Prof. Dr. M. F. Modest**
(Penn State University, USA)
- Prof. Dr. W. Pompe**
(TU Dresden)
- Prof. Dr. H. K. Pulker**
(Universität Innsbruck, Österreich)
- Prof. Dr. H. Welling**
(Laser Zentrum Hannover e. V.)
- Dr. R. Wollermann-Windgasse**
(Trumpf GmbH & Co.)

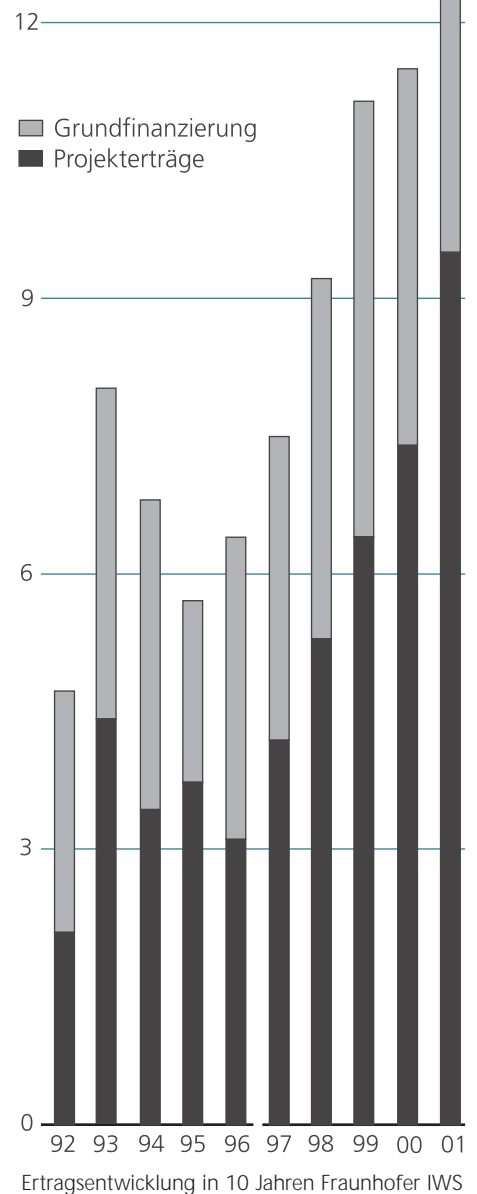


Leitungsteam des Fraunhofer IWS
(v.l.n.r.: Dr. Nowotny, Dr. Wilhelm, Dr. Morgenthal, Prof. Beyer, Dr. Leson, Prof. Brenner, Dr. Schultrich, Prof. Günther)

10 Jahre IWS

1991 ist das IWS aus der Akademie der Wissenschaften hervorgegangen und ist besonders in den letzten Jahren stark gewachsen. Im Jahr 2001 konnte das zweistellige Wachstum der letzten Jahre fortgesetzt werden.

Gesamthaushalt inklusive strategische Investitionen (in Mio. €)



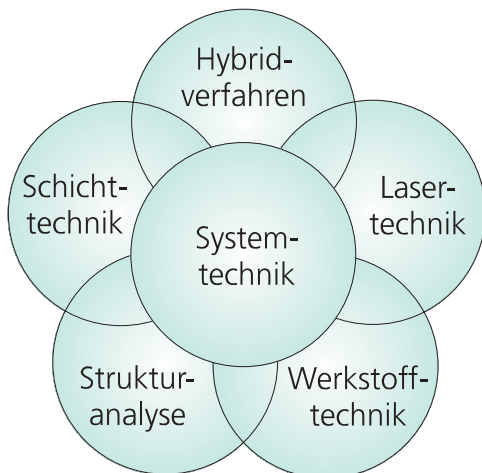


Kurzporträt

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik betreibt anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung auf den Gebieten der Laser- und Oberflächentechnik.

Schwerpunkte sind:

- das Laserstrahlfügen, -trennen und -abtragen,
- die Oberflächenbehandlung sowie
- das Aufbringen von dünnen Schichten zur Vergütung von Oberflächen.



Hauptarbeitsgebiete des Fraunhofer IWS, welche es uns erlauben, Ihnen Problemlösungen aus einer Hand anzubieten

Eine Besonderheit des Fraunhofer IWS sind die Erfahrungen in der Strahl- und Schichttechnik in Kombination mit fundiertem Werkstoff-Know-how, verbunden mit der Möglichkeit einer umfassenden Werkstoffcharakterisierung. Um Ihnen optimierte Lösungen anbieten zu können, beschäftigen wir uns neben der Strahltechnik auch mit alternativen Techniken. Dies führt zu sogenannten *Hybridverfahren*, bei denen die Vorteile der Lasertechnik mit den besonderen Eigenschaften anderer Verfahren zu einer kostengünstigen Lösung kombiniert werden.

Durch die enge Zusammenarbeit mit Anlagen- und Systemanbietern können wir unseren Kunden *Problemlösungen aus einer Hand* anbieten. Diese beruhen auf neuartigen Konzepten. Als Basis hierfür dient die Gesamtbetrachtung des Bearbeitungssystems, des Verfahrens sowie des Bauteilverhaltens. Die Ausstattung des Fraunhofer IWS erlaubt es uns, Ihre Anfragen mit modernster Anlagentechnik zu bearbeiten. Darüber hinaus ist es uns möglich, Pilotanlagen zu installieren und die erarbeiteten Problemlösungen an Null-Serien zu erproben.

Lasertechnik

- Laserstrahlhärten, -umschmelzen und -auftragschweißen
- Laseroberflächenveredelung mit Zusatzwerkstoffen (Legieren, Dispergieren)
- Reparaturbeschichten
- Rapid-Prototyping-Verfahren
- Laserstrahlschweißen und -löten
- Laserstrahlschneiden und -trennen
- Abtragen und Reinigen (für restauratorische und technische Zwecke)
- Laserfeinbearbeitung
- Mikrostrukturieren, Gravieren und Markieren

Schichttechnik

- Dünnschichttechniken auf der Basis von Laser-, Vakuumbogen-, Sputter-, CVD- und Elektronenstrahlverfahren
- Schichtsysteme und Verfahren zur Beschichtung mit karbidischen, nitridischen und oxidischen Hartstoffen
- Beschichtungen mit superhartem amorphen Kohlenstoff
- Nanometer-Multischichten für röntgenoptische Komponenten
- Atmosphärendruck-Laser-CVD und Atmosphärendruck-Plasma-CVD
- Plasmaspritzen



Hybridverfahren

- Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen härtbarer Stähle
- Plasmaunterstützte Laserstrahlbearbeitung (Schweißen, Schmelzen)
- Laserunterstütztes Plasmaspritzen
- Abscheidung dünner Schichten durch Kombinationen von Laser-, Vakuumbogen-, Elektronenstrahl- und CVD-Verfahren
- Modellierung von Kurzzeit-Wärmebehandlungsprozessen

Werkstofftechnik

- Charakterisierung von strahlentechnologisch behandelten Werkstoffen und Bauteilen
- Verschleiß- und Ermüdungstests
- Mechanische, tribologische und optische Schichteigenschaften
- Bestimmung der Thermoschockfestigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit von Keramiken
- Schadensfallanalysen

Strukturanalyse

- Metallographische Gefügecharakterisierung
- Strukturbestimmung mittels Elektronenmikroskopie (REM, TEM)
- Charakterisierung von Oberflächeneigenschaften mit optischer Spektroskopie

Systemtechnik

- Entwicklung von Systemkomponenten, u. a. High-Speed-Strahlbewegung, flexible Strahlformung und Schweißnahtsensorik
- Prozesstechnische Optimierung von Laserbearbeitungsanlagen
- Prozessdiagnostik für PVD- und CVD-Verfahren

Angebot

Problemlösungen aus einer Hand:
Wir bieten Ihnen unsere Dienstleistungen auf folgenden Gebieten an:

- Beratungen,
- Machbarkeitsstudien,
- Durchführung von FuE-Arbeiten,
- Verfahrenserprobungen,
- Systementwicklungen, zusammen mit unseren Partnern,
- Aufbau und Betrieb von Pilotanlagen,
- Werkstoff- und Bauteilprüfung,
- Schadensfallanalysen sowie die
- Ausbildung von Wissenschaftlern, Ingenieuren, Anlagenbedienern und Laboranten.

Verträge

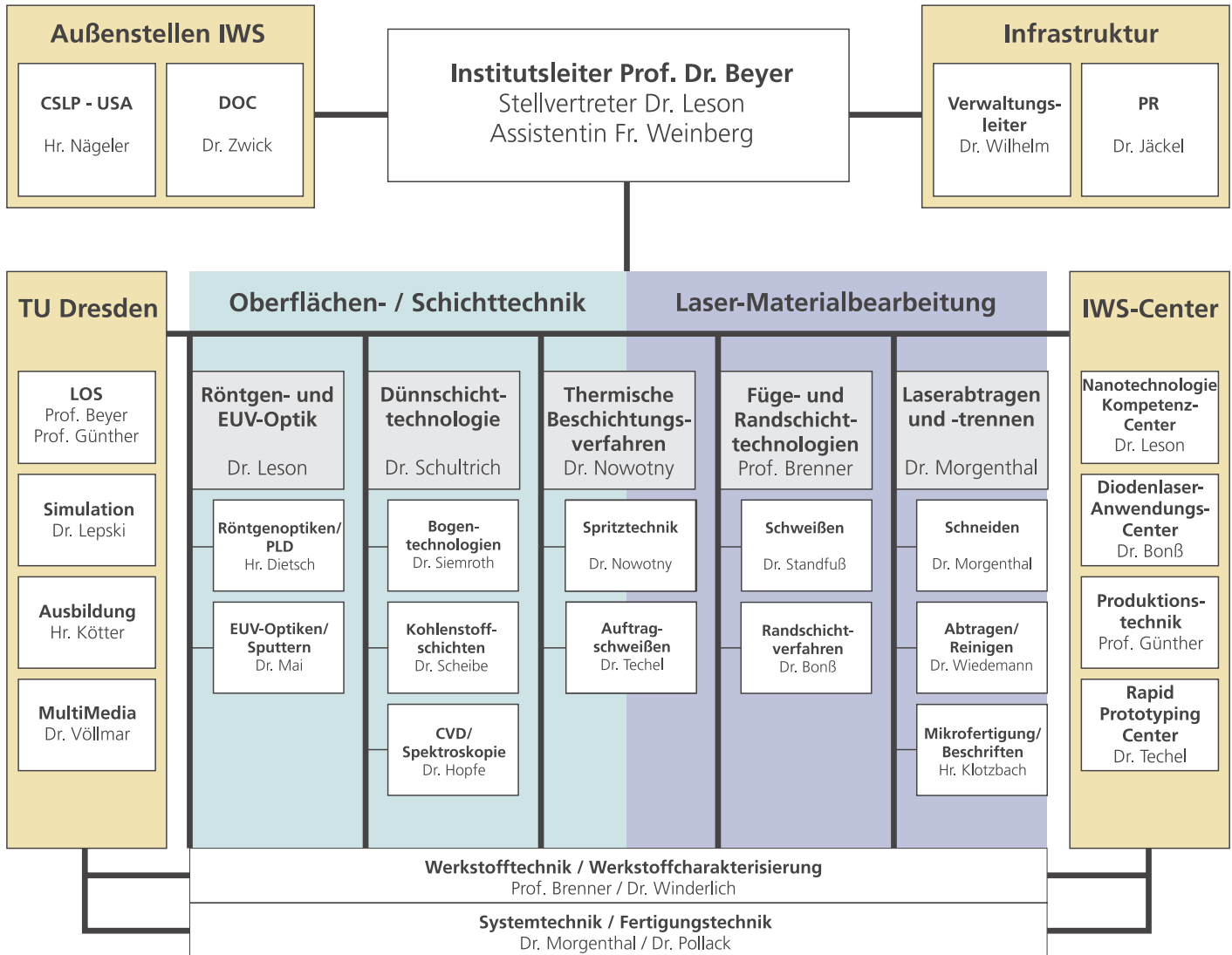
Das Fraunhofer IWS bietet Ihnen Dienstleistungs- sowie Werkverträge an und garantiert Ihnen bei Bedarf strikte Vertraulichkeit.

Geschäftsfelder	Kernarbeitsgebiete				
	Laser-Bearb.verfahren	Beschichtungsverfahren	Werkstofftechn./Analytik	Simulationstechnik	Systemtechnik
Fügen	■		■	■	□
Trennen	■				□
Oberflächentechnik					
Abtragen / Reinigen	■		■	■	□
Verschleißschutz	■	■	■	■	□
Reparatur	■				□
Reibungsminderung		■	■		□
Oxidationsschutz	■	■	■		□
Funktionsschichten		■	■		□
Mikrotechnik	■	■	■		□
Optik					
Röntgen-, EUV-Spiegel		■	■	■	□
IR-Optik		■	■	■	
Prototyping	■		■		□
Prozess-Monitoring	■	■			□

Internet: www.iws.fraunhofer.de



Organisation und Ansprechpartner



Abteilungen

Das IWS ist in 5 thematisch unabhängige Abteilungen mit je 2 - 3 Arbeitsgruppen gegliedert. Die Bereiche Werkstofftechnik / Werkstoffcharakterisierung und Systemtechnik / Fertigungstechnik sind abteilungsübergreifend organisiert.

Außenstellen

Um in den USA präsent zu sein, betreibt das IWS ein Center for Surface and Laser Processing (CSLP). Im Dortmunder OberflächenCentrum (DOC) ist das IWS mit einer eigenen Projektgruppe aktiv, die eng mit den Mitarbeitern der ThyssenKrupp Stahl AG kooperiert. Der direkte Zugriff auf das Know-how und die enge Zusammenarbeit mit dem IWS bilden eine solide Basis für diese Aktivitäten.

Center

Zu aktuellen FuE-Themen und besonderen Entwicklungsschwerpunkten hat das IWS mehrere Center eingerichtet, in denen die Aktivitäten abteilungsübergreifend gebündelt werden.



Anbindung an die TU Dresden

Lehrstuhl für Oberflächentechnik und Schichttechnologie

2001 waren am Lehrstuhl 48 Mitarbeiter beschäftigt. Die Drittmittelträge lagen zwischen 1,7 und 2 Mio. €.

Folgende Vorlesungen wurden angeboten:

- Lasersystemtechnik (Prof. Beyer)
- Fertigungstechnik II, Teil 3 (Prof. Beyer)
- Schichttechnologien (Dr. Schultrich, Prof. Beyer)
- Oberflächentechnik/Nanotechnologie (Dr. Leson, Prof. Beyer)
- Lasertechnology an der Bradley University, USA (Prof. Beyer)

Die Vorlesungen sind auf Basis von Multimedia-Techniken aufgebaut. Dabei werden Animationen, Prozess- und Anlagensimulationen sowie Videospots integriert. Die Vorlesungen werden den Studenten als CD zur Verfügung gestellt. Zur Lasertechnik wird fernerhin ein multimedialisiertes Lexikon als CD angeboten.



CD zur Vorlesung Lasersystemtechnik

Kooperation Fraunhofer IWS - TU Dresden

Durch eine Kooperationsvereinbarung ist die Zusammenarbeit zwischen dem IWS und der TU Dresden geregelt. Auf Basis einer gemeinsamen Berufung wird der Lehrstuhl und das Fraunhofer IWS in Personalunion durch Prof. Beyer geleitet. Hierbei gilt folgende Aufgabenteilung: Forschung und Lehre werden schwerpunktmäßig am Lehrstuhl, die angewandte Forschung und Entwicklung am IWS durchgeführt. Dabei sind IWS-Mitarbeiter in die Arbeiten des Lehrstuhls und TU-Mitarbeiter ins IWS eingebunden. Letztlich stellen IWS und Lehrstuhl eine Einheit mit unterschiedlichen Schwerpunkten dar.

Vorteile für das IWS:

- kostengünstige Grundlagenforschung
- Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern für das IWS
- Zugang zu wissenschaftlichen Hilfskräften

Vorteile für die TU:

- F&E - Einbindung in Industrieprojekte
- Integration neuester F&E-Ergebnisse in die Lehre
- Ausbildung von Studenten an modernstem Equipment



CD Laserlexikon

Lehrstuhl Oberflächentechnik und Schichttechnologien

Leiter: Prof. Dr. Beyer
Stellvertreter: Prof. Dr. Günther

Lasertechnik

Schichttechnologien

Mech. Oberflächentechnik

Therm. Oberflächentechnik

Hybride Verfahren



Laser-Produktionsanlage



Zentren und externe Projektgruppen des Fraunhofer IWS

Nanotechnologie-Kompetenz-zentrum "Ultradünne funktionale Schichten"

Die Nanotechnologie gehört zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Bereits heute gibt es marktreife Produkte: Festplatten und Lesköpfe für die Datenspeicherung, die mit wenigen Nanometer dünnen Schichten überzogen sind, oder Rastertunnelmikroskope, die die Welt der Atome und Moleküle sichtbar werden lassen, sind nur zwei Beispiele. Ultradünne Schichten sind dabei ein Schlüsselement der Nanotechnologie. Ihr Einsatzbereich reicht von der Mikroelektronik und Optik über die Medizin bis hin zu Verschleißschutzschichten.

Zur konsequenten Erschließung dieser industriellen Anwendungsmöglichkeiten haben 44 Unternehmen, 10 Hochschulinstitute, 21 außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und 5 Verbände ihr Know-how gebündelt und sich im September 1998 zu einem Netzwerk zusammengeschlossen. Die Koordination dieses Netzwerkes, das vom Bundesforschungsministerium als bundesweites Kompetenzzentrum für den Bereich ultradünne funktionale Schichten ausgezeichnet wurde, liegt beim Fraunhofer IWS. An technologischem Know-how bringt das IWS beispielsweise seine Kompetenz auf dem Gebiet der Röntgenoptiken ein.



Im Rahmen des Nanotechnologie-Kompetenz-zentrums werden in einem großen BMBF-geförderten Verbundprojekt neue Technologien zur Beschichtung von Festplatten unter industriellen Bedingungen erprobt



Arbeitskreise des Nanotechnologie-Kompetenz-zentrums

Anwendungszentrum Hochleistungs-Diodenlaser

Das Fraunhofer IWS hat ein Hochleistungs-Diodenlaser-Anwendungszentrum eingerichtet, in welchem es mit führenden Laser- und Anlagenherstellern zusammenarbeitet, um Kunden optimale Problemlösungen anbieten zu können.

Auf Grund ihres vergleichsweise hohen Wirkungsgrades von etwa 50 % und ihrer sehr kompakten Bauweise sind Hochleistungs-Diodenlaser ideale Werkzeuge für das lokale verzugsarme Härten oder Beschichten. Das Schweißen von Blechen bis 1 mm Dicke ist schneller und mit höherer Schweißnahtqualität zu realisieren als mit konventionellen Schweißtechniken. Infolge zahlreicher Kundenforderungen der letzten Jahre entstanden spezielle Softwareprodukte wie Postprozessoren und oberflächentemperaturgeführte Laserleistungsregelungen, die die Anwendung der Hochleistungs-Diodenlaser für die Oberflächentechnik und Randschichtveredelung vereinfacht und prozesssicher gestalten.

Das Anwendungszentrum ist in der Lage, Bearbeitungsaufgaben mit führendem Know-how und den neuesten Diodenlasersystemen zu lösen.



Besichtigung einer Anlage zum Härten mit integriertem HLDL in der Laserhalle des IWS während des Workshops "Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern"



Produktionstechnisches Zentrum

Die Bündelung der Arbeiten des IWS und der Technischen Universität Dresden erfolgt in Forschung, Entwicklung und Anwendung produktionstechnischer Leistungen von der Verfahrensentwicklung bis hin zur Prozessgestaltung von Fertigungsabläufen.

Arbeitsschwerpunkte:

- Verfahrensentwicklungen im konventionellen und Hochgeschwindigkeitsbereich sowie Entwicklung von Hybridverfahren
- Machbarkeits- und Betriebsanalysen, Studien (Produkte, Fertigungsverfahren, Fertigungsprozesse, technologische und logistische Prozessketten)
- Materialfluss- und Produktionssimulation
- 3D-Visualisierung und Animation von Produkten, Produktionsketten und Produktionssystemen



Strahltechnologie:
Wasserstrahl-Abrasiv-Schneidanlage

Rapid-Prototyping-Zentrum

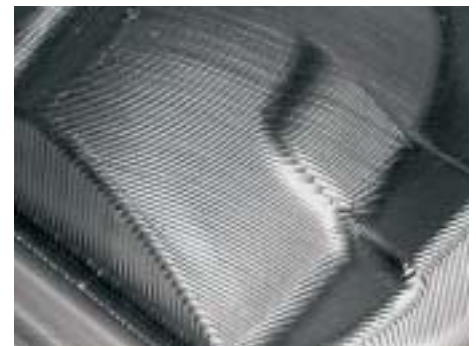
Time to market, die Zeit von der Idee bis zur Vermarktung eines neuen Produktes kann über Erfolg und Misserfolg entscheiden. Aus diesem Grund beschäftigt sich das IWS seit Jahren mit dem Rapid Prototyping und Rapid Tooling.

Am IWS sind verschiedene Prototyping-Anlagen installiert. Hierzu gehört die gesamte Fertigungskette von der 3D-Modellierung und Datenbearbeitung über die Konturerfassung, die unterschiedlichen Herstellungsverfahren (wie Laserstrahlgenerieren und Laserstrahlsintern) bis hin zum Laminated Object Manufacturing (LOM) mit Stahlblech und die Endbearbeitung (fräsen, beschichten, vermessen) der Werkzeuge.

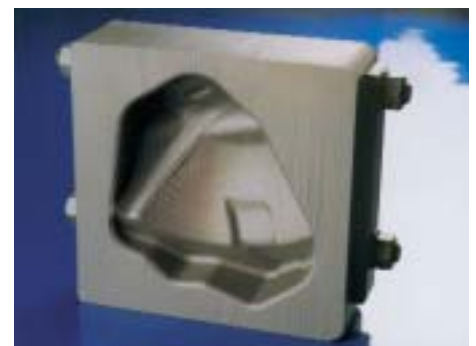
Mit Hilfe des Metall-LOM als Rapid-Tooling-Verfahren können Werkzeuge in einem Bruchteil der bisher benötigten Zeit hergestellt werden.



Laserintegriertes CNC-Fräszentrum



Oberfläche eines durch Metall-LOM hergestellten Werkzeugs



Lamellierter Rohling eines Prägewerkzeugs



Industrielle Projektgruppe im Dortmundener OberflächenCentrum (DOC) der ThyssenKrupp Stahl AG



Dr. Axel Zwick
Leiter der Projektgruppe am DOC in Dortmund



Gebäude des Dortmundener OberflächenCentrums

Im Dezember 2000 wurde das Dortmundener OberflächenCentrum der ThyssenKrupp Stahl AG (TKS) eingeweiht. Das IWS beteiligt sich mit einer industriellen Projektgruppe am DOC. In einer eigenen Technikumshalle von 1000 m² hat das IWS modernstes Equipment installiert. Hierzu gehört eine Großbeschichtungsanlage zum Korrosions- und Verschleißschutz. Unter anderem ist es damit zum ersten Mal möglich, die am IWS entwickelten Diamor[®]-Schichtsysteme auf Bauteilgrößen bis zu 1 m Durchmesser und einer Höhe von 1 m zu übertragen. Darüber hinaus hat das IWS am DOC

eine Plasmaspritz- und Beschichtungsanlage installiert, in welcher das neuartige laserunterstützte Spritzen erprobt wird.

Die IWS-Mitarbeiter verfügen über einen weltweit einmaligen, mobilen 4 kW-Nd:YAG-Laser, mit dessen Hilfe es möglich ist, Verfahrensentwicklungen aber auch "Trouble shooting" direkt beim Industriekunden zu realisieren. Mit Hilfe von 75 m langen Lichtleitkabeln können an Anlagen der Industriekunden nahezu alle Lasermaterialbearbeitungsprozesse inklusive Hybridschweißprozesse (MIG-Verfahren) durchgeführt werden. Desweiteren ist ein 5-Achs-Bearbeitungssystem für die 3D-Lasermaterialbearbeitung in Dortmund installiert.

Die enge Zusammenarbeit der Wissenschaftler und Ingenieure des Fraunhofer IWS mit TKS-Mitarbeitern ermöglicht innovative und anwendungsorientierte Lösungen und Verfahrensansätze für die Töchter des ThyssenKrupp-Konzerns, deren Kunden und weitere Interessenten.





Fraunhofer Center for Surface and Laser Processing (CSLP)



Stephan Nägeler
Direktor
CSLP / USA

Am 4. Oktober 2001 erhielten Forscher des Fraunhofer Centers for Surface and Laser Processing CSLP in den USA und des Fraunhofer IWS in Dresden den renommierten "R&D 100 Award" für die gemeinsame Entwicklung und Markteinführung des laserakustischen Prüfverfahrens LAwave®. Das in mehr als fünfzehnjähriger Arbeit von Dr. Dieter Schneider und Dr. Thomas Schwarz bis zur Marktreife entwickelte Gerät ist weltweit das einzige kommerzielle Prüfsystem auf der Basis der Laserakustik. Der größte Teil der verkauften Anlagen geht dabei in den Export. Seit kurzem wird der Vertrieb in den USA durch die Zusammenarbeit mit einem eingeführten amerikanischen Unternehmen unterstützt.

Die Entwicklung und Vermarktung des LAwave®-Messplatzes ist nur ein Beispiel, bei dem es gleichermaßen um die Vermarktung von vorhandenem Know-how sowie um das Erwerben neuen Know-hows geht.

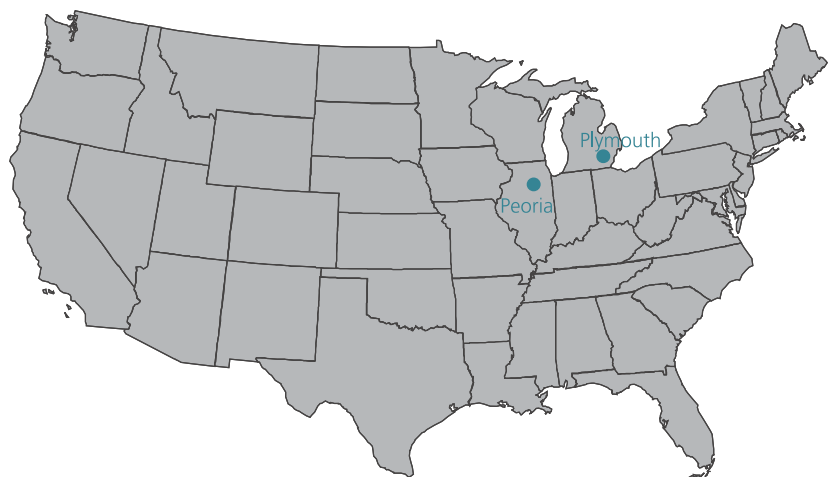
Um diesen Zielen gerecht werden zu können, betreibt das IWS unter dem Dach von Fraunhofer USA ein Center for Surface and Laser Processing. Dieses Center ist in Peoria, Illinois, zu Hause und in den Räumen der Bradley University untergebracht. Das Center besitzt eine industrielle Projektgruppe bei der Firma Rofin-Sinar in Plymouth,

Michigan. Die enge Zusammenarbeit unserer Wissenschaftler und Ingenieure mit Rofin-Sinar-Mitarbeitern garantiert innovative Lösungen für die Kunden der Firma Rofin-Sinar.

Die verstärkte Zusammenarbeit zwischen der Bradley University und dem Fraunhofer Center dokumentiert sich auch in einem Studenten-Austausch-Programm. Im Rahmen des Programms haben Studenten die Möglichkeit, internationale Erfahrungen bei Arbeit und Bildung zu sammeln.



Im Jahr 2001 erhält erstmals ein Institut der Fraunhofer-Gesellschaft den "R&D 100 Award"





Ausstattung des Institutes

Laserstrahlquellen

20 kW-CO₂-Laser (HF-angeregt)

mehrere 6 kW-CO₂-Laser (HF-angeregt)

mehrere CO₂-Slab-Laser, 2 bis 3,5 kW, (HF-angeregt, Strahlkennzahl K > 0,8)

mehrere Nd:YAG-Laser bis 4 kW-cw und 1 kW-pm-Laser

Nd:YAG-Lasersysteme mit Pulslängen im ms-, ns- und ps-Bereich für die Feinbearbeitung

mehrere Hochleistungs-Diodenlaser, 1,4 bis 2,5 kW

Hochleistungs-Diodenlasersystem (gepulst, fasergekoppelt), > 10⁵ W cm⁻²

TEA-CO₂-Laser

Excimerlaser

gepulster Nd:YAG-Laser mit OPO

Handlingsysteme

Portalanlagen mit 5-CNC-Achsen (plus externer Drehachse), Arbeitsraum 4000 · 3000 · 1500 mm³, mit CO₂-Laserstrahlquellen 2,5 bis 20 kW

CNC-Laser-Bearbeitungsanlagen mit 8 Achsen, Geschwindigkeiten bis 20 m min⁻¹, Arbeitsraum 2400 · 1800 · 600 mm³, mit CO₂-Laserstrahlquellen 2,5 bis 6 kW

Laserinduktions-Hybridanlage mit 5 Achsen (6 kW- oder 20 kW-CO₂-Laser, 80 kW-MF-Induktionsgenerator)

Präzisionsanlagen (Genauigkeitsklasse 5 µm) mit 5 bzw. 4 CNC-Achsen, mit CO₂-Laserstrahlquelle bis 6 kW

CO₂-Nd:YAG-Kombinationsanlage (2 bzw. 3 kW) mit 4 CNC-Achsen für Präzisionsbeschichtung

Schneidmaschine mit Linearantrieben bis 200 m min⁻¹ Vorschub und CO₂-Laserstrahlquelle bis 3,5 kW

universelle Excimer-Laser-Mikrostrukturierungsanlage

Beschichtungsanlagen

Laser-PVD-Beschichtungsanlagen (Nd:YAG-, Excimer-, TEA-CO₂-Laser) im Hochvakuum- und Ultrahochvakuumbereich

Anlagen zur Beschichtung mittels Vakuumbogen (Laser-Arc, gepulster Hochstrombogen, Gleichstrombogen, Magnetfilter)

Laser-CVD-Anlage mit 6 kW-CO₂-Laser und Lampen-CVD-Anlage (24 kW) zur Faserbeschichtung

Atmosphärendruck-Plasma-CVD-Anlagen (6 kW Mikrowelle, 30 kW dc-Arc)

6" -Cluster-Tool-Anlage zur Kombination von Großflächen-PLD und Magneton-Sputterverfahren

Kombinations-Beschichtungsanlage (Elektronenstrahl (40 kW) und Hochstrombogen)

Plasmaspritzenanlagen

Spezielle Komponenten

statische und flexible dynamische Strahlformungssysteme für Laserleistungen bis 10 kW

Pulverförderer und Spezialausrüstungen zum richtungsunabhängigen Laserstrahlbeschichten sowie Temperaturmesssystem zur geregelten Prozessführung



Blick in die Technikumshalle des IWS



Hochgeschwindigkeits-Laserschneidmaschine



Atmosphärische Plasmaspritzenanlage mit Laserkopplung



CNC- bzw. sensorgesteuerter Drahtförderer für das Laserschweißen

SCOUT-Sensorsystem für die 3D-Geometrieerfassung (automatisches teach-in) zur Laserbearbeitung von Bauteilen (On- und Offline-Konturverfolgung)

Strahldiagnosesysteme für CO₂- und Nd:YAG-Laser

UV/VIS-, FTIR- und NIR-Diodenlaser-Spektrometersysteme zur Diagnostik von Prozessgasen und -plasma

Messtechnik zur Kurzzeit-Prozessanalyse (4-Kanal-Hochgeschwindigkeits-Bildverstärkerkamera)

Spezielle Bearbeitungsanlagen

mobiler 4 kW-Nd:YAG-Laser im Container

Rapid-Prototyping-Anlage zum Lasersintern

transportabler Nd:YAG-Laser mit 5 · 10⁷ Watt Pulsspitzenleistung (Pulsdauer 6 ns, max. Pulsfrequenz 20 Hz) mit Gelenkarm-Strahlübertragung und Zoomoptik (Art-Light NL 102) für Reinigungsarbeiten im Außeneinsatz

durchstimmbares Laserbearbeitungssystem (Wellenlänge 400 ... 2000 nm, > 100 mJ) mit flexiblem Strahlarm und CNC-Bauteilbewegung für das Abtragen dünner Schichten

Laserbearbeitungsstation mit Industrieroboter und CO₂-Slab-Laser

Laserintegriertes CNC-Fräszentrum zum Generieren und Reparieren

Messgeräte

Ausrüstung zur Gefügeanalyse einschließlich:

- Metallographie
- analytischer Transmissionselektronenmikroskopie
- analytischer Rasterelektronenmikroskopie
- entsprechender Präparationstechnik

Ausrüstung zur Werkstoffprüfung:

- servohydraulische Prüfmaschine,
- mechanische Zug- / Druck-Prüfmaschine
- Kerbschlagpendel
- Härteprüfautomat
- rechnergestütztes Mikrohärteprüfsystem
- Resonanzermüdungsapparatur
- Flachbiege-Torsions-Maschine

Laserakustik-Messsysteme zur Bestimmung des E-Moduls von Schichten

Laserschock-Messsystem mit Hochgeschwindigkeitspyrometer

Ausrüstung zur Oberflächen- und Schichtanalyse:

- vollautomatisches Spektralellipsometer (270 - 1700 nm)
- UV-VIS-Spektrometer
- Raman-Mikrospektrometer
- FTIR-Spektrometer, FTIR-Mikroskop
- registrierendes Eindruckmessgerät
- Scratchtester
- Rauheitsmessgerät
- Tribometer
- Röntgenfluoreszenz-Schichtdickenmessgerät
- Flächenwiderstandsmessgerät

Röntgendiffraktometer (CuK α)

Röntgendiffraktometer (MoK α)

optisches 3D-Koordinatenmesssystem



Laserakustik-Meßplatz LAwave® zur zerstörungsfreien Bestimmung der Eigenschaften dünner Schichten, in den USA mit dem "R&D 100 Award 2001" ausgezeichnet



Laser-Arco® - die Technologie zur Abscheidung von Diamor®

Gesamtmitarbeiter

Aufgrund einer Kooperationsvereinbarung zwischen der TU Dresden und dem Fraunhofer IWS sind der Lehrstuhl für Oberflächentechnik und Schichttechnologie (Prof. Beyer) und das IWS miteinander verbunden. Eine Reihe von Mitarbeitern des Lehrstuhls arbeitet in einer Vielzahl von Projekten eng mit den IWS-Mitarbeitern zusammen. Dabei werden in der Regel die Forschungs- und Grundlagenarbeiten an der TU und die anwendungsbezogenen Verfahrensentwicklungen und systemtechnischen Arbeiten am IWS durchgeführt.

Die Mitarbeiter teilen sich 2001 wie folgt auf:

Mitarbeiter im Fraunhofer IWS

Stammpersonal
 - Wissenschaftler 68
 - Technische Angestellte 34
 - Verwaltungsangestellte 8

Lehrlinge 10

Wissenschaftliche Hilfskräfte 60

Gesamt 180

Mitarbeiter am Lehrstuhl für Oberflächentechnik und Schichttechnologie der TU Dresden

Stammpersonal 40
 - Wissenschaftler 28
 - Technische Angestellte 10
 - Verwaltungsangestellte 2

Wissenschaftliche Hilfskräfte 8

Gesamt 48

Gebäude 5050 m²
 - Technikumshalle 1200 m²
 - Laborräume / Werkstätten 1760 m²
 - Demonstrationslabor 175 m²
 - Büroräume 1550 m²
 - Seminarräume 240 m²
 - Cafeteria 125 m²

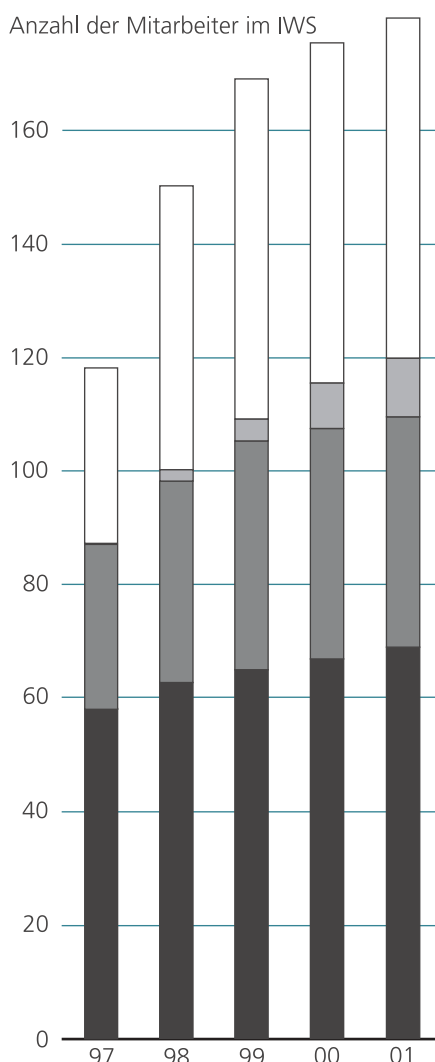
Technikum im DOC (Dortmund) 1100 m²

Gastfirmen im Fraunhofer IWS

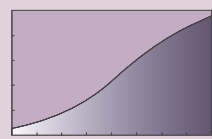
- EFD Induction GmbH Freiburg, Außenstelle Dresden
- ALOtec Angewandte Laser- und Oberflächensystemtechnik GmbH Dresden
- Fraunhofer-Institut für Zerörungsfreie Prüfverfahren IZFP Saarbrücken, Außenstelle Dresden

Externe Projektgruppen des Fraunhofer IWS

- am Fraunhofer Center for Surface and Laser Processing (Plymouth, Michigan, USA und Peoria, Illinois, USA)
- am Dortmunder OberflächenCentrum DOC der ThyssenKrupp Stahl AG



- studentische Hilfskräfte
- Lehrlinge
- Technik / Verwaltung
- Wissenschaftler und Doktoranden



Aufwendungen und Erträge 2001 (vorläufiges Ergebnis*)

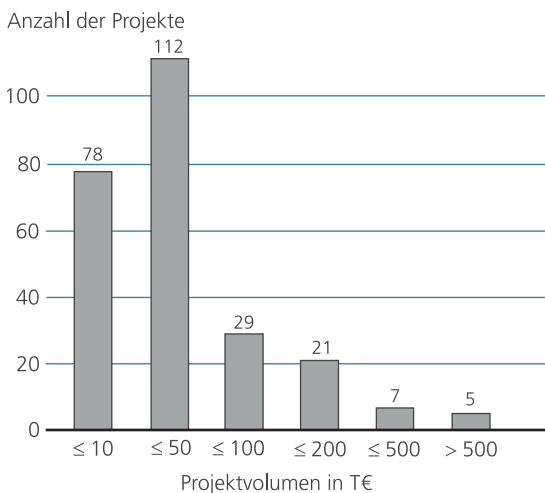
* Nachkalkulation noch nicht erfolgt

	Mio. €	
Aufwendungen Betrieb und Investitionen	12,6	
Betriebshaushalt	10,6	
- Personalaufwendungen	4,9	
- Sachaufwendungen	5,7	
Investitionshaushalt	2,0	
	Mio. €	%
Erträge 2001	12,6	
Erträge Betrieb	10,6	
- Projekterträge aus der Industrie	4,9	46
- Projekterträge durch Bund, Land und EU	3,4	32
- Grundfinanzierung IWS	2,3	22
Erträge Investitionen	2,0	
- Projekterträge aus der Industrie	0,5	
- Projekterträge durch Bund, Land und EU	0,7	
- Grundfinanzierung IWS	0,8	

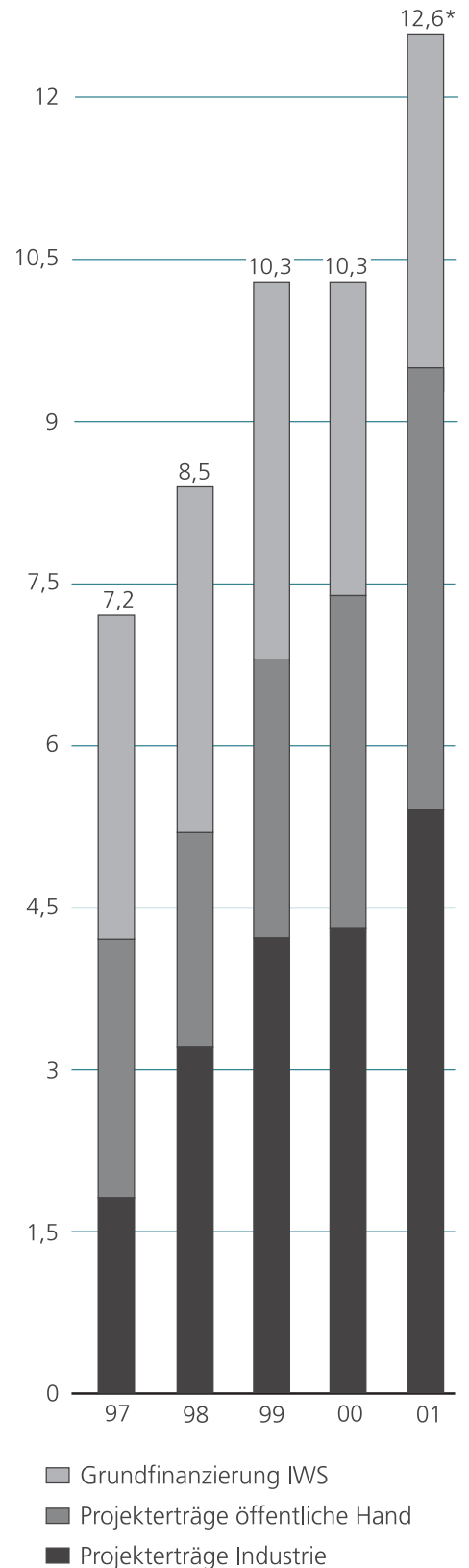
Im Jahr 2001 wurden dem IWS von der Fraunhofer-Gesellschaft zusätzlich strategische Investitionen in Höhe von **1,4 Mio. €** zur Verfügung gestellt.

Projekte

Im Jahr 2001 wurden am IWS 252 Projekte durchgeführt. Die Aufteilung der Projekte nach ihrem finanziellen Volumen ist in der folgenden Grafik dargestellt. So wurden beispielsweise 112 Projekte mit einem finanziellen Volumen von 10 ... 50 T€ bearbeitet.



Erträge im Betriebs- und Investitionshaushalt ohne strategische Investitionen (in Mio. €)



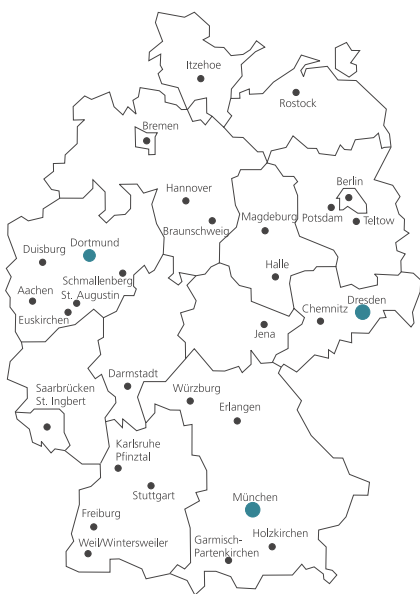


Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft ist die führende Trägerorganisation für Einrichtungen der angewandten Forschung in Europa. Sie betreibt Vertragsforschung für die Industrie, für Dienstleistungsunternehmen und die öffentliche Hand. Für Kunden aus der Wirtschaft werden einsatzreife Lösungen technischer und organisatorischer Probleme rasch und kostengünstig erarbeitet. Im Rahmen der Technologieprogramme der Europäischen Union wirkt die Fraunhofer-Gesellschaft in Industriekonsortien an der Lösung technischer Fragen zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft mit.

Eine weitere wichtige Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft ist die strategische Forschung: Im Auftrag und mit Förderung durch Ministerien und Behörden des Bundes und der Länder werden zukunftsrelevante Forschungsprojekte durchgeführt, die zu Innovationen im öffentlichen Nachfragebereich und in Schlüsseltechnologien beitragen. Dazu gehören die Forschungsgebiete Kommunikation, Energie, Mikroelektronik, Produktion, Verkehr und Umwelt.

Die Globalisierung von Wirtschaft und Forschung macht eine internationale Zusammenarbeit unerlässlich. Niederlassungen der Fraunhofer-Gesellschaft in Europa, in den USA und in Asien sorgen daher für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wirtschaftsräumen.



Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit 56 Forschungseinrichtungen an Standorten in der gesamten Bundesrepublik. Rund 11 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von rund 900 Millionen €. Davon fallen mehr als 800 Millionen € auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft aus Aufträgen der Industrie und öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Ein Drittel wird von Bund und Ländern beigesteuert, um damit den Instituten die Möglichkeit zu geben, Problemlösungen vorzubereiten, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Die Fraunhofer-Wissenschaftler sind auf differenzierte Forschungsaufgaben aus einem breiten Spektrum von Forschungsfeldern spezialisiert. Wenn Systemlösungen gefragt sind, arbeiten mehrere Institute interdisziplinär zusammen.

Mitglieder der 1949 gegründeten und als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft sind namhafte Unternehmen und private Förderer. Von ihnen wird die bedarfsorientierte Entwicklung der Fraunhofer-Gesellschaft mitgestaltet.

Ihren Namen verdankt die Gesellschaft dem als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreichen Münchner Gelehrten Joseph von Fraunhofer (1787-1826).

Kuratorium

Das Kuratorium berät und unterstützt die Organe der Fraunhofer-Gesellschaft sowie die Institutsleitung. Mitglieder des Kuratoriums waren im Berichtszeitraum:

O. Voigt, Prof.
Vorstandsvorsitzender der Windsolar AG,
Vorsitzender des Kuratoriums

K. Arnold, Prof. Dr.
Geschäftsführer der Niles-Simmons Industrieanlagen GmbH

R. Bartl, Dr.
Director Production Planning MB Cars der DaimlerChrysler AG

E.-J. Drewes, Dr.
Leiter Forschung, Zentrales Qualitäts- und Prüfwesen der ThyssenKrupp Stahl AG

H. Ennen, MinR. Dr.
Sachsenbüro Brüssel

P. Lenk, Dr.
Geschäftsführer der von Ardenne Anlagentechnik GmbH

P. Linden, Dr.
Leiter Fertigungstechnik der DaimlerChrysler AG

A. Mehlhorn, Prof. Dr.
Rektor der Technischen Universität Dresden

B. L. Mordike, Prof. Dr.
Technische Universität Clausthal

R. J. Peters, Dr.
Geschäftsführer des VDI-Technologie-zentrums Physikalische Technologien

W. Pompe, Prof. Dr.
Technische Universität Dresden

R. Röhrig, MinR. Dr.
Bundesministerium für Bildung und Forschung

F. Schmidt, MinDir. Dr.
Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst

P. Wirth, Dr.
Vorsitzender der Geschäftsführung der Rofin-Sinar Laser GmbH

Die 11. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 21. Februar 2001 im Fraunhofer IWS Dresden statt.

Institutsleitungsausschuss (ILA)

Der Institutsleitungsausschuss (ILA) berät die Institutsleitung und wirkt bei der Entscheidungsfindung über die Grundzüge der Forschungs- und Geschäftspolitik des Institutes mit.

Mitglieder des ILA sind:

Prof. Dr. E. Beyer	Institutsleiter
Dr. A. Leson	Stellv. Institutsleiter
Dr. S. Wilhelm	Verwaltungsleiter
Prof. Dr. B. Brenner	Abteilungsleiter
Dr. L. Morgenthal	Abteilungsleiter
Dr. S. Nowotny	Abteilungsleiter
Dr. B. Schultrich	Abteilungsleiter

Gäste sind:

Dr. R. Jäckel	PR-Verantwortlicher
Dr. S. Schädlich	QM-Beauftragter
Dr. B. Schöneich	Betriebsrat
Dr. G. Wiedemann	
bzw. Dr. S. Bonß	WTR-Vertreter
Prof. Dr. U. Günther	Lehrstuhlvertreter

Wissenschaftlich-Technischer Rat (WTR)

Der Wissenschaftlich-Technische Rat (WTR) unterstützt und berät Organe der Fraunhofer-Gesellschaft. Ihm gehören die Mitglieder der Institutsleitung und je Institut ein gewählter Vertreter der wissenschaftlich-technischen Mitarbeiter an. Mitglieder des IWS im WTR waren im Berichtszeitraum:

- Prof. Dr. E. Beyer
- Dr. G. Wiedemann (Jan. - März 2001)
- Dr. S. Bonß (März - Dez. 2001)

Verbund Oberflächentechnik und Photonik (VOP)

Das IWS ist Mitglied des Verbundes Oberflächentechnik und Photonik.

Dem Verbund gehören an:

- Fraunhofer FEP Dresden
- Fraunhofer ILT Aachen
- Fraunhofer IOF Jena
- Fraunhofer IPM Freiburg
- Fraunhofer IST Braunschweig
- Fraunhofer IWS Dresden



Dr. Andreas Leson
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 317)



Dipl.-Phys. Reiner Dietsch
Gruppenleiter Röntgenoptiken / PLD
(Tel. 2583 249)



Dr. Hermann Mai
Gruppenleiter EUV-Optiken / Sputtern
(Tel. 2583 248)

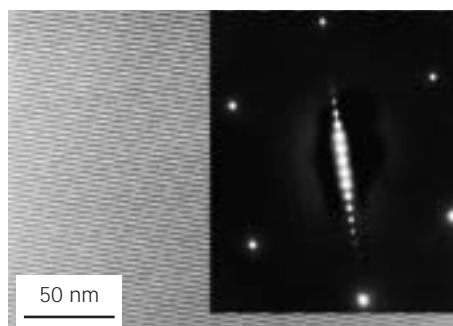
Multischichten für röntgenoptische Anwendungen

Einfach- und Multischichtsysteme, die mittels PLD hergestellt werden, zeichnen sich aus durch:

- höchste Schichtdickengenauigkeit,
- geringste Grenzflächenrauigkeiten,
- außerordentliche chemische Reinheit,
- hohe laterale Homogenität und
- gute Dickenreproduzierbarkeit.

Schichtsysteme unterschiedlicher Materialkombinationen können auf Substraten bis 150 mm Durchmesser mit und ohne Gradient der Periodendicke über die Substratlängsachse abgeschieden werden.

Hauptanwendungsgebiet ist der Einsatz als röntgenoptisches Bauelement zur Strahlformung und Monochromatisierung. Neben der Synthese von Einfach- und Multischichtsystemen (z. B. Ni/C, C/C, W/C) nach Kundenwunsch bieten wir unsere langjährigen Erfahrungen auf dem Gebiet der Präparation, Charakterisierung und Simulation für die Konzeption und Ausstattung strahlformender röntgenoptischer Bauelemente an.



TEM-Aufnahme einer 100-fach-Ni/C-Multischicht für röntgenoptische Anwendungen in einem breiten Energiebereich

Sputterbeschichtung von EUV-Optiken

Interferenzoptiken auf der Basis von Mo/Si-Nanometerschichtsystemen stellen eine zentrale Komponente für Lithographieverfahren der nächsten Generation dar, die für eine Wellenlänge im Bereich von 13,4 nm ausgelegt sind. Um die erforderlichen Reflektivitäten im EUV-Bereich zu erzielen, ist die Abscheidung von Multischichtstapeln mit einer Präzision im Pikometerbereich sowie einer Schichtdickenhomogenität besser als 99,9 % erforderlich. Mit dem Magnetronsputter-Verfahren lassen sich geeignete Multischichten auf ebenen oder gekrümmten superpolierten Substraten bis zu 150 mm Durchmesser abscheiden, die den extremen Anforderungen genügen. Hierzu werden im IWS innovative Lösungen zur Entwicklung großflächiger Mo/Si-Beschichtungen auf strahlformenden Spiegeln und Projektionsoptiken erarbeitet.



Sphärischer Spiegel, beschichtet mit einer Mo/Si-Multischicht



Beispiele aus den Arbeiten 2001

1. Picometer-Präzision - eine neue Qualität der Großflächen-PLD 24
2. Mo-K α -Optiksysteme für Laborröntgenquellen 25
3. Hochreflektierende Röntgenoptiken für den EUV-Spektralbereich 26
4. Innenbeschichtung von Bauteilen mit komplexen Strukturen 28



Verschiedene Präzisions-Röntgenspiegel für die Röntgendiffraktometrie, hergestellt mittels Puls-Laser-Deposition

Picometer-Präzision - eine neue Qualität der Großflächen-PLD

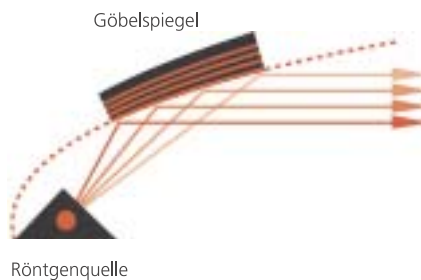


Abb. 1: Prinzip der Strahlformung eines Göbel-Spiegels



Abb. 2: Göbel-Spiegel der 2. Generation (links) und der 3. Generation (rechts)



Abb. 3: UHV-Clustertool-Beschichtungsanlage mit PLD-Modul

Aufgabenstellung

Für strahlformende Röntgenoptiken auf Multilayerbasis ist es notwendig, die Periodendicke des Schichtstapels an jedem Ort der Optik dem Einfallswinkel anzupassen, damit die Bragg'sche Reflexionsbedingung erfüllt ist. In Abb. 1 ist dies schematisch dargestellt. Nur so kann eine hohe Parallelität und Intensität der reflektierten Strahlung gewährleistet werden. Zur Realisierung unterschiedlicher Einfallswinkel wird die Substratoberfläche entweder vor oder nach dem Beschichtungsprozess gezielt gekrümmt. Der Vorteil einer nachfolgenden mechanischen Krümmung (Göbel-Spiegel der 2. Generation) liegt in den geringen Substratkosten. Nachteilig ist, dass dieser Bearbeitungsschritt immer kleine Abweichungen von der Idealoberfläche verursacht, so dass Fehler im Einfallswinkel bei mechanisch gekrümmten Substraten einen Wert von ca. $0,005^\circ$ erreichen, während ideal vorgeschliffene Substrate diesen Fehler bei $0,0005^\circ$ belassen (Göbel-Spiegel der 3. Generation). Dafür stellt die Beschichtung dieser hochwertigen Substrate hohe Ansprüche an die Beschichtungstechnologie, weil durch die vorgegebene präzise Krümmung die Periodendicke gezielt (auf 50 pm genau), ortsgenau und reproduzierbar über allen Perioden eingestellt werden muss.

Lösungsweg

Zur Realisierung der hohen Anforderungen wurde die für die Herstellung von Röntgenoptiken bereits etablierte PLD-Technologie aufskaliert, mit dem Ziel, die Langzeitstabilität und die Reproduzierbarkeit aller wesentlichen Prozessparameter zu erhöhen. Dafür waren Modifikationen des Substrat-

und Targethandlingsystems, der Targetgeometrie und die Weiterentwicklung der Steuerung erforderlich. Abb. 3 zeigt die PLD-Anlage. Ausgehend von stabilen Laserbedingungen für ein optimales Schichtwachstum hinsichtlich des Materialdichtekontrastes und der Grenzflächenrauigkeit ist es nun möglich, mittels der präzisen Steuerung des Substratmanipulators in Synchronisation mit der Targetbewegung die Periodendicke so einzustellen, dass eine großflächige und präzise Abscheidung realisiert werden kann.

Ergebnisse

Auf einem parabolisch vorgekrümmten Spiegel mit einer Länge von 60 mm wurde eine 75-fach Ni/C-Multilayerschicht abgeschieden (Abb. 2 rechts). Dabei wurde der Periodendickengradient über die Länge des Substrates so angepasst, dass der beschichtete Spiegel als Parallelstrahl-optik für Mo-Strahlung eingesetzt werden kann. Die mit Röntgenreflektometrie gemessenen Dickenabweichungen liegen im Toleranzbereich. Damit ist gewährleistet, dass über die gesamte Spiegelfläche die Bragg'sche Reflexionsbedingung erfüllt ist.

Somit ermöglicht die aufskalierte PLD-Technologie je nach Kundenwunsch bzw. Anwendungsfall die Realisierung beider Röntgenspiegelvarianten (Abb. 2), was eine Grundvoraussetzung für die Herstellung anwendungsoptimierter röntgenoptischer Systeme darstellt.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Reiner Dietsch
Tel.: 0351 / 2583 249
reiner.dietsch@iws.fraunhofer.de



Mo-K α -Optiksysteme für Laborröntgenquellen

Aufgabenstellung

Die wachsende Bedeutung der Lebenswissenschaften und der Biotechnologie führen zu einem steigenden Bedarf an leistungsfähiger Primäroptik und Optikkombinationen für die Mo-K α -Strahlung. Die meisten Hersteller von Röntgenanalysegeräten sind zu einem modularen Aufbau ihrer Messsysteme sowohl auf der Primärstrahl- als auch auf der Detektorseite übergegangen, um auf die Vielzahl der analytischen Aufgabenstellungen adäquat reagieren zu können. Daraus ergibt sich für Röntgenoptikhersteller die Forderung, Module zu entwickeln, die pure Mo-K α_1 -Strahlung höchster Parallelität und Intensität an Laborröntgenquellen erzeugen können.

Lösungsweg

Nach den Wirkungsprinzipien der Strahlformung unterscheiden sich Kapillaroptiken von Multischicht- und Kristalloptiken im Akzeptanzwinkel. Kapillaroptiken nutzen den Effekt der Totalreflexion, während bei Kristallen und Multischichten die Interferenz gestreuter Teilstrahlen die Strahlableitung realisiert.

Für Kapillaroptiken ist der Akzeptanzwinkel gleich dem Bereich der Totalreflexion von wenigen Zehntel Grad, in dem z.T. mehr als 90 % der einfallenden Primärstrahlung von der Oberfläche reflektiert werden können. Bragg-Maxima der Multischichtsysteme haben dagegen nur Halbwertsbreiten von wenigen Hundertstel Grad und Kristalloptiken wie der Ge-Channel-Cut reflektieren die einfallende Strahlung nur, wenn der Einfallswinkel bis auf wenige Tausendstel Grad dem durch die Bragg'sche Gleichung gegebenen Sollwinkel entspricht. Interessant ist, dass mit dem Design des Channel-Cut-Monochromators sein

Akzeptanzwinkel in kleinen Grenzen variiert werden kann.

Für die geplante Aufgabenstellung kam daher nur eine Konfiguration aus Standardbaugruppen für Mo-Strahlung am Röntgendiffraktometer D8, bestehend aus Göbel-Spiegel und verschiedenen Ge-022-Channel-Cut-Monochromatoren (CC), in Frage. Verschiedene Designmodifikationen eines Ge-022-Channel-Cuts (CC) wurden mit einem Göbel-Spiegel kombiniert und im Zusammenspiel charakterisiert.

Ergebnisse

Der experimentelle Aufbau besteht in Strahlrichtung betrachtet aus einer Langfeinfokus-Mo-Röntgenröhre (1), einem Mo-Göbel-Spiegel (2) und einem Ge-022-CC (3) mit ihren Gehäusebaugruppen, dem Reflektometrieprobenträger (4) mit Analysator-kristall (5) und einem Szintillationszähler zum Nachweis der Strahlung (Abb. 2).

Über Rockingkurven des Si-(111)-Reflexes sind Strahldivergenz, Monochromasie und Parallelstrahlintensität am Probenort messbar (Abb. 1).

Die erreichte vertikale Divergenz von $\Delta\omega = 0,019^\circ$ (FWHM) des Göbel-Spiegels ist in etwa vergleichbar der Strahldivergenz eines Nd:YAG-Festkörperlasers. Durch den Einsatz des Ge-022-CC ist gleichzeitig die vollständige Unterdrückung der Mo-K α_2 -Strahlung und ein Gewinn an Parallelität zu erkennen. Die gemessene Halbwertsbreite des Si-Reflexes betrug bei einer Intensität von mehr als 10^6 cps nur $\Delta\omega = 0,0025^\circ$. Damit sind die erreichten Strahlparameter unter anderem interessant für die Kleinwinkelstreuung, die Proteinanalyse und spezielle Durchstrahlungsexperimente.

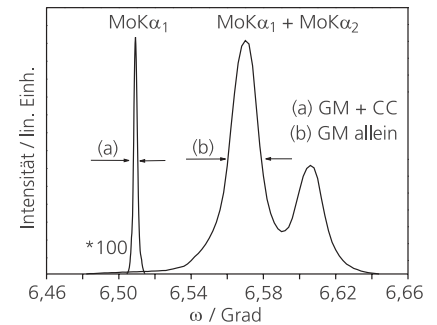


Abb. 1: Messungen der Rockingkurven am Si (111) zeigen die vollständige Unterdrückung der Mo-K α_2 -Strahlung und die deutliche Reduzierung der Divergenz der Parallelstrahlung durch die Kopplung eines Göbel-Spiegels mit einem Kristallmonochromator
a) FWHM: $\Delta\omega = 0,0025^\circ$
b) FWHM: $\Delta\omega = 0,019^\circ$

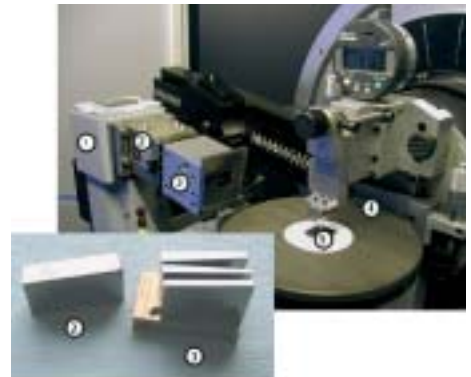


Abb. 2: Ansicht des experimentellen Aufbaus mit den röntgenoptischen Baugruppen:
(1) Langfeinfokus-Mo-Röntgenröhre
(2) Mo-Göbel-Spiegel und Gehäuse
(3) Ge-022-Channel-Cut-Monochromator und Gehäuse
(4) Reflektometrieprobentisch
(5) Probe - Si-Einkristall mit (111)-Orientierung

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Thomas Holz
Tel.: 0351 / 2583 250
thomas.holz@iws.fraunhofer.de

Hochreflektierende Röntgenoptiken für den EUV-Spektralbereich

Aufgabenstellung

Mo/Si-Röntgenspiegel für den EUV-Spektralbereich (**extremes Ultraviolett**) sind für viele Anwendungen von wachsendem Interesse. Die Haupttriebkraft für die Entwicklung und Verbesserung solcher Spiegel ist vor allem die EUV-Lithographie, bei der Strukturen integrierter Schaltkreise von einer Maske auf die Siliziumwafer abgebildet werden. Im Unterschied zur derzeit eingesetzten Photolithographie, bei der transmittierende Linsen zur Strahlformung verwendet werden, ist bei der in das EUV verringerten Arbeitswellenlänge von 13,4 nm der Einsatz von reflektierenden Röntgenoptiken

zwingend notwendig. Neben der Anwendung für die Lithographie gibt es jedoch noch weitere Einsatzfelder von Mo/Si-Multischichten wie:

- Schwarzschildobjektive für die EUV-Spektroskopie,
- Schwarzschildobjektive für die EUV Photoemissions-Mikroskopie,
- EUV-Bandpassfilter an Synchrotronstrahlungsquellen.

In allen Anwendungsfällen kommt folgenden Punkten besondere Bedeutung zu:

- hohe EUV-Reflektivität der Spiegel,
- Homogenität bzw. exakte Gradienten der Schichtdicke über die Spiegeloberfläche,
- höchste Run-to-Run-Reproduzierbarkeit bei der Präparation der Spiegel.



Abb. 1: Blick in die Beschichtungskammer mit zwei aktiven Magnetronsputterquellen der Targetmaterialien Molybdän (rechts) und Silizium (links). Über den Quellen bewegt sich das rotierende Substrat.

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Stefan Braun
Tel.: 0351 / 2583 432
stefan.braun@iws.fraunhofer.de

Lösungsweg

Zur Abscheidung von Mo/Si-Multischichten wird die im IWS verfügbare hochpräzise Magnetronsputtertechnik eingesetzt (Abb. 1). Mit dieser Technik konnten innerhalb sehr kurzer Zeit Ergebnisse erzielt werden, die im internationalen Maßstab Spitzenwerte darstellen.

Die theoretisch mögliche Reflektivität von röntgenoptischen Multischichten kann bei Kenntnis der optischen Parameter des Schichtsystems exakt berechnet werden. Reale Multischichten weisen gegenüber dem mathematischen Idealfall jedoch stets verringerte Reflektivitäten auf. Dies wird im Mo/Si-Multischichtsystem vorwiegend der Tatsache zugeschrieben, dass sich an den Grenzflächen zwischen den Molybdän- und Silizium-Einzelschichten Interdiffusionszonen aus amorphem MoSi_2 ausbilden, die den optischen Kontrast beeinträchtigen und zu einer Verringerung der Reflektivität führen. Durch Diffusions- und Reaktionsbarrierschichten geringster



Dicken und geeigneter Materialien besteht die Möglichkeit, die Ausbildung der MoSi₂-Schichten zu unterdrücken bzw. zu verhindern. Um derartige Beschichtungen durchführen zu können, wurde die Anlagentechnik um zwei weitere Magnetronsputterquellen erweitert. Dies ermöglicht, Multischichtsysteme mit Perioden aus vier voneinander unabhängigen Einzelschichten herzustellen.

Neben der weiteren Steigerung der Reflektivität kommt auch der Abscheidung von präzisen Schichtdickenverläufen eine erhebliche industrielle Bedeutung zu. So ist es für jede der oben genannten Anwendungen unerlässlich, für die jeweilige Arbeitswellenlänge die hohen EUV-Reflektivitäten nicht nur an einem Punkt, sondern homogen auf der gesamten Spiegelfläche zu erreichen. Im IWS konnte durch Optimierung des Zusammenspiels von Beschichtungsparametern und Anlagenkonfiguration auch auf der maximal möglichen Spiegelgröße von 150 mm Durchmesser die Homogenität der Beschichtung deutlich verbessert werden.

Ergebnisse

Durch den Einsatz von Barrierschichten gelang auf Anhieb eine weitere Steigerung der EUV-Reflektivität. Momentan werden folgende Maximalwerte erreicht (Abb. 2):

- 71,4 % bei $\lambda = 12,52 \text{ nm}$, $\alpha = 22,49^\circ$
 - 69,81 % bei $\lambda = 13,42 \text{ nm}$, $\alpha = 1,5^\circ$
- Die gemessenen 71,4 % Reflektivität stellen den höchsten jemals gemessenen Wert für Mo/Si-Röntgenspiegel dar und markieren damit die derzeitige Weltspitzenstellung.

HRTEM-Untersuchungen ergaben, dass durch den Einbau von C- oder B₄C-

Barrierschichten die Ausbildung der typischen Interdiffusionszonen verhindert wird. Dabei ist keine Erhöhung der Grenzflächenrauigkeit nachweisbar. Weiterhin ist die Temperaturstabilität dieser modifizierten Multischichten deutlich höher: während im reinen Mo/Si-System nach 20-minütiger Temperung bei 400 °C der Multischichtstapel fast vollständig zerstört ist, wird bei den mit Barrierschichten versehenen Multischichten nur ein geringfügiger Verlust der Grenzflächenschärfe beobachtet (Abb. 3).

Neben der Amplitude der Peakreflektivität stellt vor allem auch die Homogenität von Periodendicke und Peakreflektivität über das gesamte Substrat hinweg ein wichtiges Kriterium für die Güte einer Röntgenoptik dar. Innerhalb diesen Jahres gelang es, die Aufskalierung von den bisher verwendeten Substratgrößen mit 100 mm auf 150 mm Durchmesser erfolgreich abzuschließen. Die folgenden Spezifikationen werden erreicht:

- Homogenität der EUV-Reflektivität:
 $\sigma < 0,049 \%$ (deutlich innerhalb des Messfehlers von 0,2 %)
- Homogenität der Periodendicke:
 $\sigma < 0,053 \%$, d.h. örtliche Schwankungen der Periodendicke um 3,6 pm (1 pm = 10⁻¹⁰ cm) auf einer Fläche von 113 cm²

Die Herstellung von mehreren aufeinander abgestimmten Spiegeln innerhalb eines optischen Systems wie z.B. der Projektionseinheit bei der EUVL oder Schwarzschildobjektiven erfordert die äußerst reproduzierbare Herstellung der Spiegel. Eine Serie von identisch präparierten Mo/Si-Multischichten lieferte das folgende Resultat:

- Run-to-Run-Reproduzierbarkeit:
 $\sigma_{\text{Periodendicke}} < 0,1 \%$.

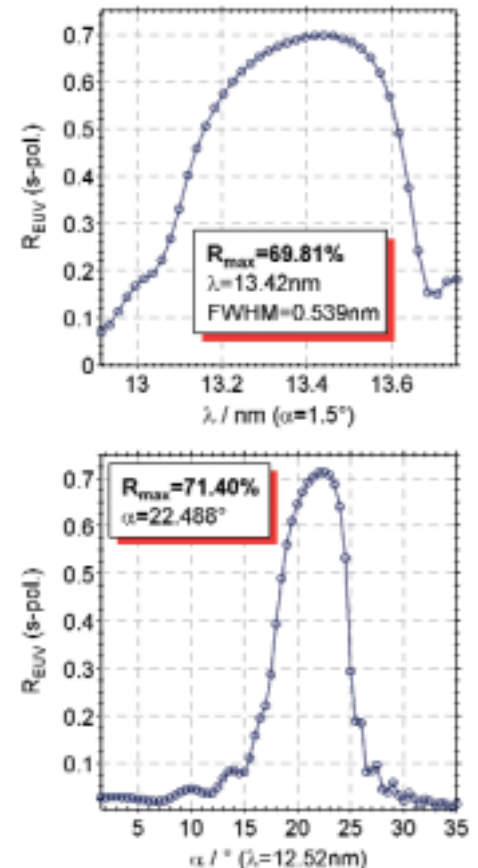


Abb. 2: EUV-Reflektogramme typischer mittels Magnetronsputtertechnik hergestellter Mo/Si-Röntgenspiegel mit integrierten Barrierschichten

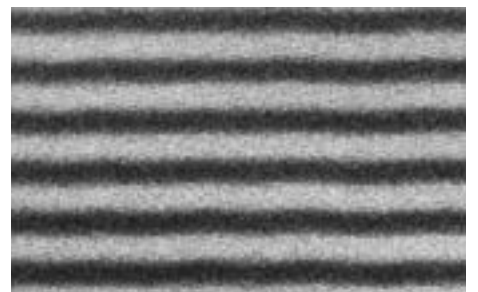


Abb. 3: HRTEM-Aufnahme einer Mo/Si-Multischicht mit Barrierschichten an beiden Grenzflächen nach 20-minütiger Temperung bei 400 °C

Innenbeschichtung von Bauteilen mit komplexen Strukturen

Aufgabenstellung

Die Innenbeschichtung von Bauteilen stellt von jeher für alle klassischen Beschichtungsverfahren eine Herausforderung dar. Die Realisierung homogener Schichteigenschaften über die gesamte zu beschichtende Fläche, insbesondere bei komplexen und schwer zugänglichen Innenstrukturen wie sie z.B. in Antriebsdüsen oder in Verbrennungsräumen und Abgasführungen von Motoren zu finden sind, ist dabei äußerst schwierig.

Derzeit stehen zwei prinzipiell verschiedene Verfahrenstypen für die Innenbeschichtung von Bauteilen zur Verfügung. Zum einen kann das zur Schichtbildung benötigte Material in reiner Form oder in Verbindung mit einem Precursor den Hohlkörper durchströmen oder in diesen eingespritzt werden und sich dabei auf den Innenwänden abscheiden. Dieser Verfahrenstyp gestattet die Innenbeschichtung von Bauteilen mit geringem Durchmesser. Der Materialfluss verändert sich jedoch mit der Entfernung von seinem Ursprung, was starke Inhomogenitäten der Beschichtung bewirkt. Der zweite Verfahrenstyp umfasst PVD-Verfahren, bei denen zwischen dem als Innenelektrode wirkenden Target und einer Gegenelektrode eine Entladung angeregt wird. Dabei können homogenere Schichten abgeschieden werden, wobei jedoch bestimmte Mindestabmessungen des Bauteilinnenraumes erforderlich sind. Bei direkter Verwendung der zu beschichtenden Innenwand als Gegenelektrode spielen zusätzlich Leitfähigkeitsanforderungen eine Rolle.

Lösungsweg

Das am Fraunhofer IWS Dresden entwickelte Verfahren zur Innenwandbeschichtung unter Verwendung der Puls Laser Deposition (PLD) erlaubt es, in Hohlkörpern mit Innendurchmessern ab 7 mm und komplexen Geometrien auf den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneiderte Schichtsysteme hinsichtlich Schichtdickenverteilung und -struktur aufzubringen (Abb. 1).

Mittels eines gütegeschalteten Festkörperlaser werden ns-Impulse sehr hoher Leistungsdichte ($> 10^8 \text{ W cm}^{-2}$) erzeugt, deren Einwirkung auf die Targetoberfläche einen Ablationsprozess induziert. Der resultierende, hochenergetische Teilchenstrom bildet auf dem Schichtträger eine dichte, mikrokristalline oder amorphe Schicht mit einer extrem glatten Oberfläche. Charakteristische Eigenschaften des PLD-Prozesses sind eine geringe Erwärmung der Substratoberfläche während der Beschichtung, eine hohe Reproduzierbarkeit und Schichthomogenität sowie eine erreichbare Dickenpräzision bis in den sub-nm-Bereich.

Zur Erhöhung der Abscheiderate wird zusätzlich ein im gepulsten cw-Mode arbeitender Festkörperlaser mit Impulsdauern im μs - bis ms -Bereich eingesetzt, welcher eine intensive Materialverdampfung bewirkt. Durch die bei diesem Prozess auftretenden niedrigeren Teilchenenergien können wesentlich spannungsärmere, kolumnare Schichtstrukturen erzeugt werden.

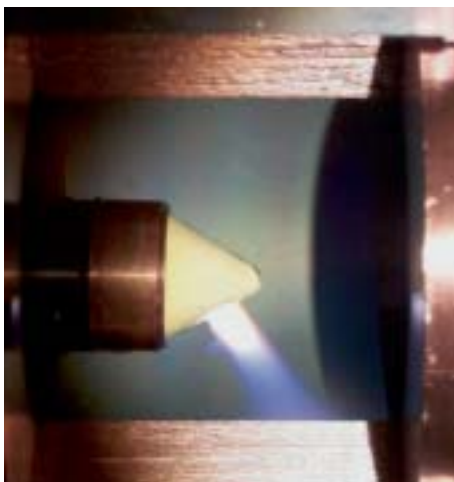
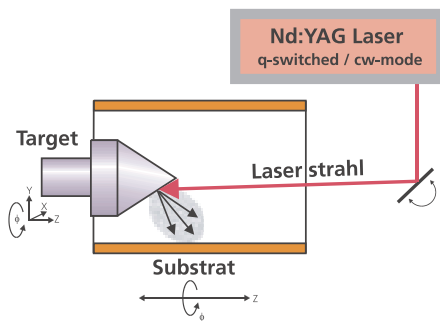


Abb. 1: Schematische Darstellung (oben) und Prozessfoto (unten) der Innenrohr-PLD

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Peter Gawlitza
Tel.: 0351 / 2583 431
peter.gawlitza@iws.fraunhofer.de



Für die homogene Beschichtung komplexer Innengeometrien und für die Fixierung eines bestimmten, für die Ausbildung von Schichtstruktur und -eigenschaften maßgebenden Target-Substrat-Abstandes, ist die Einstellung eines definierten Bewegungsregimes von Laserstrahl, Target und Substrat von großer Wichtigkeit. Bei Kenntnis der Richtungscharakteristik der schichtbildenden Teilchenströme kann die entstehende Dickenverteilung durch Simulation vorausgesagt und so der Bewegungsablauf im Vorfeld optimiert werden. Abb. 2 zeigt exemplarisch einen Vergleich von simulierter und experimentell bestimmter Dickenverteilung einer ZrO_2 -Beschichtung auf einer Si-Streifenprobe.

Ergebnisse

Der hier vorgestellte Prozess der Laserverdampfung in Kombination mit der Laserablation stellt eine neue Herangehensweise dar, die speziell für die Innenrohrbeschichtung neue Anwendungsmöglichkeiten erschließt.

Die Erzeugung von ZrO_2 -Wärmedämmschichten (WDS) für Raketenbrennkammern ist die derzeit erfolgreichste Anwendung dieses Verfahrens am IWS. Die Beschichtungen solcher Kammern sind extremen Druck- und Temperaturbedingungen ausgesetzt und sollen den Schutz des Grundwerkstoffes vor Überhitzung, plastischer Verformung sowie vor oxidativen Angriffen der Brenngasatmosphäre gewährleisten.

Das aus diesen Anforderungen abgeleitete Schichtsystem besteht aus einem amorphen Bondcoat mit metallischer Grundschicht, Haftvermittler- und Übergangsschicht sowie der mittels Laserverdampfung abgeschiedenen, kolumnar gewachsenen und lamellar geschichteten ZrO_2 -Wirk-schicht (Abb. 3). Diese weist die für die Thermoschockbeständigkeit notwendigen Poren und Mikrorisse auf, wohingegen die amorphen Teilschichten die Anbindung und Abdichtung des WDS-Systems zum Substrat realisieren. Die in Abb. 3 deutlich sichtbare lamellare Struktur trägt aufgrund ihrer im Vergleich zur kompakten Schicht geringeren Festigkeit der Lamellengrenzflächen zur Umlenkung von Vertikalkissen und damit zur Erhöhung der effektiven Bruchzähigkeit des gesamten Schichtstapels bei. Durch die Steuerung der WDS-Mikrostruktur über die Verteilung der Lamellengrenzflächen (äquidistant oder gradiert) ist die Abscheidung für den jeweiligen im Bauteil vorliegenden Spannungszustand maßgeschneiderter Wärmedämmschichten möglich.

Mit dem beschriebenen Verfahren wurden neben zylindrischen Bauteilen auch Laval-Düsen beschichtet. Die dabei erreichte Abweichung der Sollschichtdicke lag deutlich unter 5 %, wobei abhängig von der thermischen Belastung längs der Düsenkontur ein Dickengradient eingestellt wurde. Die so beschichteten Module konnten ihre Funktionsfähigkeit in einem Test unter einsatznahen Bedingungen nachweisen.

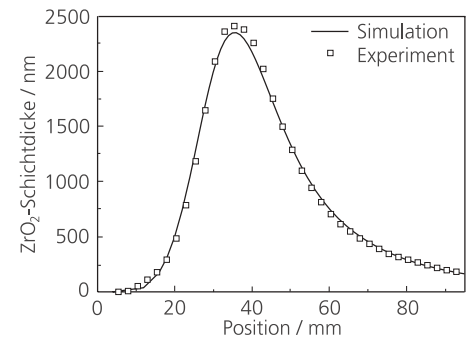


Abb. 2: Vergleich der simulierten und experimentell erzielten Dicke einer ZrO_2 -Schicht, abgeschieden auf einer Si-Streifenprobe auf der Innenwand eines Zylinders

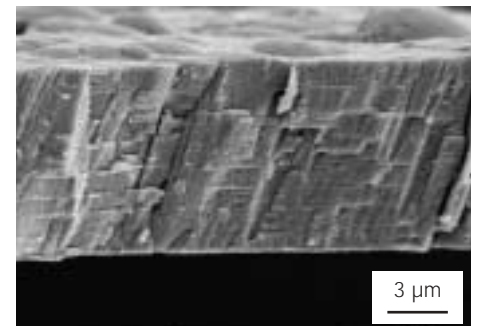


Abb. 3: REM-Aufnahme des Querschnitts einer mittels Innenrohr-PLD erzeugten Wärmedämmschicht



Abb. 4: Ariane-Rakete: Anwendungspotenzial des Verfahrens in Raketentriebwerken (Foto: Arianespace)



Dr. Bernd Schultrich
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 403)



Dr. Peter Siemroth
Gruppenleiter Bogentechnologien
(Tel. 2583 409)



Dr. Hans-Joachim Scheibe
Gruppenleiter Kohlenstoffschichten
(Tel. 2583 408)

Beschichtung und Oberflächenmodifizierung mittels Bogentechnologien

Bogenentladungen als Quelle energiereicher Dampfstrahlen werden umfassend bei der industriellen Hartstoffbeschichtung von Werkzeugen genutzt. Mit ihnen lassen sich ausgezeichnete Schicht- und Oberflächeneigenschaften erzielen. Feste Haftungen werden bereits bei niedrigen Abscheidetemperaturen erreicht. Andere aussichtsreiche Anwendungen (z.B. Bauteilbeschichtung, Oberflächenaktivierung für haftfeste Klebverbindungen) bieten für die Bogen-technologie weiteres Entwicklungspotenzial.

Ausgehend von langjährigen Erfahrungen mit Grundprozessen und Anwendungen der Bogenverfahren und unter Nutzung moderner Pulstechniken werden im IWS innovative Lösungen für ein breites Anwendungsspektrum von ultradünnen Schutzschichten bis zu aktivierten Großflächenbeschichtungen erarbeitet.

Superharte Kohlenstoffbeschichtungen für Gleitteile und Verschleißschutz

Grundlage der Schichtentwicklung ist die lasergesteuerte Vakuumbogenverdampfung (Laser-Arco®), die die Abscheidung von amorphem Kohlenstoff ohne Wasserstoff und mit hoher Teilchenenergie erlaubt.

Auf der Basis der Laser-Arc-Technologie bieten wir Beschichtungen mit superhartem, amorphem Kohlenstoff (Diamor®) an:

- mit einer Dicke bis zu einigen μm ,
- mit einstellbaren Härten zwischen 20 und 75 GPa,
- mit niedrigem Reibungskoeffizienten (für tribologische Anwendungen geeignet),
- mit hohem Korrosionswiderstand,
- als glatte und nahezu strukturlose Schichten auf unterschiedlichsten Basismaterialien,
- bei Beschichtungstemperaturen unter 100 °C (deshalb auch für temperaturempfindliche Materialien und Bauteile geeignet).



Arc-Beschichtung von temperaturempfindlichen Fasern



Diamor®-beschichtete Form- und Führungsrolle aus Stahl



Dr. Volkmar Hopfe
Gruppenleiter CVD / Spektroskopie
(Tel. 2583 402)

CVD-Beschichtung bei Atmosphärendruck mittels plasma- und laseraktivierter Hybridverfahren; Prozesskontrolle

Für die Integration in technologische Ketten (z.B. bei der kontinuierlichen Beschichtung von Bändern) sind Atmosphärendruckverfahren besonders geeignet. Durch Plasma- oder Laseraktivierung werden die Abscheidetemperaturen abgesenkt u. / o. die Depositionsraten gesteigert. So können temperaturempfindliche Materialien (wie bestimmte Stähle, Gläser, Kunststoffe) beschichtet werden. Das IWS entwickelt anwendungsspezifische Technologien (einschließlich Prozesskontrollsysteme und in-line-Reaktortechnik). Zur Prozesskontrolle u.a. in CVD-Anlagen werden optisch-spektroskopische Sensorverfahren speziell für die Überwachung reaktiver und aggressiver Gasatmosphären bei hohen Temperaturen entwickelt. Für kundenspezifische Lösungen zur kontinuierlichen Überwachung der chemischen Zusammensetzung und Konzentration von Gasgemischen nutzt das IWS die FTIR- oder NIR-Diodenlaser-Spektroskopie.



Arc-Jet-CVD-Reaktor während der Beschichtung von Edelstahl

Beispiele aus den Arbeiten 2001

1. Plasmafeinreinigung von Stahlband als Vorbehandlung zur PVD-Beschichtung 32
2. Superharte Kohlenstoffschichten als Nanoschutzschichten für Magnetspeicherplatten 33
3. Abscheidung von Diamor®-Schichten an einer industriellen PVD-Anlage mit neuentwickeltem Laser-Arco®-Beschichtungsmodul 34
4. Diamor®-Schichten für die Hochgeschwindigkeits-Trockenbearbeitung von Leichtmetallen und die Präzisionsbearbeitung von Buntmetallen 36
5. Spektroskopische Charakterisierung mittels Plasma-AP-CVD beschichteter Oberflächen 38
6. Plasmachemische Beschichtungen bei Atmosphärendruck 40
7. Quantitative mechanische Bewertung von Fotolackschichten für die Sub-100 nm-Strukturierung in der Halbleiterindustrie 42
8. Simulation der Bogenbeschichtung 43

Plasmafeinreinigung von Stahlband als Vorbehandlung zur PVD-Beschichtung

Aufgabenstellung

Stahlbandmaterialien, wie sie in der Automobil- oder Hausgeräteindustrie Verwendung finden, werden zunehmend bereits vom Stahlproduzenten mit Oberflächenveredelungen versehen. Um dieser Herausforderung gerecht zu werden, wurde am Dortmunder OberflächenCentrum (DOC) eine Bandbeschichtungsanlage zur Entwicklung und Erprobung von neuartigen Schichtsystemen auf der Basis innovativer physikalischer und plasma-chemischer Beschichtungsmethoden (PVD und CVD) aufgebaut und in Betrieb genommen.

Die PVD-Beschichtung von Stahlband erfordert eine intensive plasmagestützte Reinigung unter Vakuumbedingungen als Voraussetzung für eine optimale Schichthaftung. An der Bandbeschichtungsanlage des DOC war in Zusammenarbeit mit der Firma von Ardenne Anlagentechnik Dresden eine Station zur Plasmafeinreinigung zu entwickeln, zu installieren und zu erproben.



Abb. 1: Technikumshalle des DOC mit Bandversuchsanlage



Abb. 2: Modul zur bogengestützten Plasmareinigung

Lösungsweg

Für die Entwicklung der Station zur Plasmafeinreinigung wurden erprobte Reinigungsprozesse für Batch-Beschichtungsanlagen für die Bedingungen eines kontinuierlichen Betriebes weiterentwickelt und entsprechende Reinigungsmodule gebaut. Das Fraunhofer IWS entwickelte ein Modul zur bogengestützten Plasmareinigung, das eine Weiterentwicklung des bewährten AEGD-Verfahrens (AEGD: Arc-Enhanced Glow Discharge, Firma Metaplas-Ionon) darstellt. Dieses Verfahren zeichnet sich insbesondere durch hohe Abtragsraten und geringe Arcneigung aus. Dieses Modul wurde gemeinsam mit dem inversen Sputter-ätzer der Firma von Ardenne Anlagentechnik zu einer kompletten Station zur Plasmafeinreinigung zusammengefasst. Die Ätzmodule sind an Walzen zur Führung des Stahlbandes angebracht. Sie enthalten bogengestützte Ätzer bzw. inverse Sputter-ätzer, die gemeinsam oder unabhängig voneinander betrieben werden können.

Ergebnisse

Die Station zur Plasmafeinreinigung wurde im ersten Halbjahr 2001 in Betrieb genommen. Die insgesamt zur Verfügung stehende Ätzleistung beträgt momentan 28 kW (in der letzten Ausbaustufe dann ca. 40 kW). Damit konnten bei Bandgeschwindigkeiten von bis zu 60 m min^{-1} Abträge von bis zu 50 nm nachgewiesen werden.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Otmar Zimmer
Tel.: 0351 / 2583 257
otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de



Superharte Kohlenstoffschichten als Nanoschutzschichten für Magnetspeicherplatten

Aufgabenstellung

Magnetische Festplattenspeicher dominieren bis heute die Speichertechnologie. Die Speicherdichte verdoppelt sich aller 1,5 Jahre, was u. a. auch durch immer kleinere Abstände zwischen der magnetischen Speicherschicht und dem Schreib-Lese-Kopf ermöglicht wird. Um die für 2010 anvisierte Speicherdichte von 100 Gbit in⁻² zu erreichen, muss dieser Abstand von gegenwärtig 40 nm auf 5 - 10 nm verringert werden. Dafür darf die Deckschicht, die vor Verschleiß und Korrosion schützt, nicht dicker als 2 - 3 nm sein. Untersuchungen zeigten, dass die Schutzwirkung durch die gegenwärtig verwendeten magnetrongesputterten Kohlenstoffnitridfilme in diesem Schichtdickenbereich nicht mehr gewährleistet ist. Eine aussichtsreiche Alternative ist die Vakuumbogenbeschichtung.

Lösungsweg

Der Vorteil des Vakuumbogens liegt in einem gegenüber den herkömmlichen Sputterverfahren grundsätzlich anderen Mechanismus des Schichtwachstums. Die bogenerzeugten hochenergetischen Teilchen dringen in die obersten Atomlagen ein und bilden auf diese Weise eine eng mit der Unterlage verzahnte, dichte und glatte Schicht. Neben diesem Plasma werden aber auch kleinste Partikel, sogenannte Droplets, emittiert. Durch magnetische Führung des Plasmas können diese entfernt werden. Laborversuche zeigten, dass mit der am IWS entwickelten gefilterten Pulsbogenquelle amorphe Kohlenstoffschichten abgeschieden werden können, die noch bei einer Dicke von 2 bis 3 nm ausrei-

chend dicht, hart und korrosionsstabil sind, sowie extreme Glattheit, geringen Reibungskoeffizienten und gute chemische Beständigkeit aufweisen. Nach der Laborerprobung muss nun dieses Beschichtungsverfahren in die industrielle Praxis überführt werden.

Ergebnisse

Im Rahmen eines gegenwärtig laufenden BMBF-Projektes wurde die im IWS entwickelte HCA-Versuchsquelle zu einer modularen Plasmaquelle weiterentwickelt und in eine industriellen Festplatten-Beschichtungsanlage des Partners IBM implementiert. Die bisherigen Ergebnisse zeigten, dass eine harte Kohlenstoffschicht von 2 nm in weniger als einer Sekunde abgeschieden wird. Sie ordnet sich damit in die Taktzeit der Anlage ein. Die magnetischen Eigenschaften der Speicherschicht werden nicht beeinträchtigt. Die Schichten sind nicht nur frei von Partikeln, sondern auch extrem glatt. Die RMS-Rauheit liegt im Bereich von 0,1 nm. Durch die amorphe und zugleich dichte Struktur sind auch dünnste Kohlenstoffschichten korrosionsbeständig und können die magnetischen Schichten vor aggressiven Medien schützen, wie durch relevante Korrosionstest des Partners bestätigt wurde. Im Vergleich zu den gesputterten Referenzschichten sind auch Reibwert und Verschleiß deutlich geringer. Hauptaufgabe für die weitere Entwicklung ist die Qualifizierung der Quelle für den industriellen Dauerbetrieb.

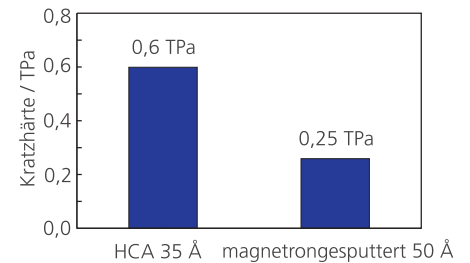


Abb. 1: Kratzhärte von HCA-Schichten im Vergleich zu magnetrongesputterten Referenzschichten



Abb. 2: IBM Microdrive, das kleinste derzeit im Handel befindliche Laufwerk, hat eine Kapazität von 1 GB, wiegt nur 16 g und ist nur 42,8 · 36,4 · 5 mm³ groß. Seine Speicherdichte beträgt 15,2 Gbit in⁻².

Ansprechpartner

Dr. Peter Siemroth
Tel.: 0351 / 2583 409
peter.siemroth@iws.fraunhofer.de

Abscheidung von Diamor[®]-Schichten an einer industriellen PVD-Anlage mit neuentwickeltem Laser-Arco[®]-Beschichtungsmodul

Aufgabenstellung

Die am Fraunhofer IWS Dresden entwickelten superharten amorphen Kohlenstoffschichten (Diamor[®]) haben sich als verschleißbeständige, reibungsarme Schutzschichten bei einer Vielzahl von Werkzeugen und Komponenten unter industriellen Einsatzbedingungen bewährt. Durch ihre Kombination von sehr hoher Härte (40 bis 60 GPa) mit exzellenten Gleiteigenschaften, die insbesondere unter Minimalmengenschmierung bzw. bei vollständigem Verzicht auf Kühl- und Schmierstoffe zum Tragen kommen, erlauben diese neuartigen Schichten die Lösung vielfältiger tribologischer Probleme. Die Aufgabe besteht nun darin, durch Umsetzung auf eine industrielle Anlagentechnik die Wirtschaftlichkeit der Diamor[®]-Beschichtung zu demonstrieren und zugleich die wachsende Nachfrage nach Diamor[®]-Beschichtungen zu befriedigen.

Dabei sollen schrittweise folgende Zielstellungen erreicht werden:

- Reproduzierung der unter Laborbedingungen optimierten Schichteigenschaften unter den Bedingungen der Serienfertigung mit relevanten Beschichtungsraten,
- Übertragung der unter Laborbedingungen optimierten Schichteigenschaften auf größere Bauteilabmessungen und -flächen,
- Kombination der Abscheidung von konventionellen Hartstoffen und von Diamor[®]-Schichten in der gleichen Anlagentechnik.

Lösungsweg

Durch die Beteiligung des IWS am Dortmunder OberflächenCentrum (DOC) des ThyssenKrupp-Konzerns ergab sich die Möglichkeit, ein speziell entwickeltes Anlagenkonzept zur Diamor[®]-Abscheidung mit einer modifizierten industriellen Anlagentechnik für die konventionelle Hartstoffbeschichtung (TiN, TiAlN, ZrN, CrN u.a.) zu realisieren.

Dabei wurde von einem modularen Aufbau ausgegangen, der die Nachrüstung konventioneller Beschichtungsanlagen mit einem Laser-Arc-Modul erlaubt. Die Laser-Arco[®]-Quelle, bestehend aus einer walzenförmigen Graphitkathode, wurde in einer separaten Quellenkammer angeordnet, die durch eine rechteckige Flanschöffnung mit einer Standard-PVD-Anlage verknüpft werden kann. In diesem Laser-Arc-Modul (LAM) wurden alle wesentlichen technologischen Komponenten für die Diamor[®]-Beschichtung integriert und mit der erforderlichen Laserstrahlführung und Impulsstromquelle kombiniert. So entstand eine in sich geschlossene technologische Komponente mit entsprechender Prozesssteuerung.

Dieser Lösungsweg (Abb. 1) bietet folgende Vorteile:

- Wesentliche Komponenten (z.B. Substrathalter, Planetary) und technologische Standardprozesse der Basis-PVD-Anlage (Vakuumerzeugung, Plasmareinigung, Gasdosierung, Prozesssteuerung u.a.) stehen unverändert bzw. angepasst auch für die Diamor[®]-Beschichtung zur Verfügung.
- Standardprozesse der konventionellen Hartstoffbeschichtung können beliebig mit der Diamor[®]-Beschichtung kombiniert werden.

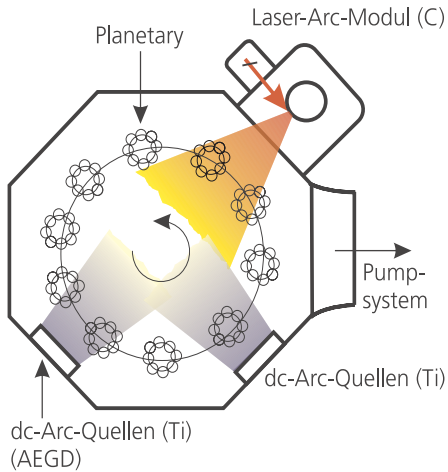


Abb. 1: Anlagenkombination, bestehend aus konventioneller Hartstoffbeschichtung und Diamor-Beschichtung

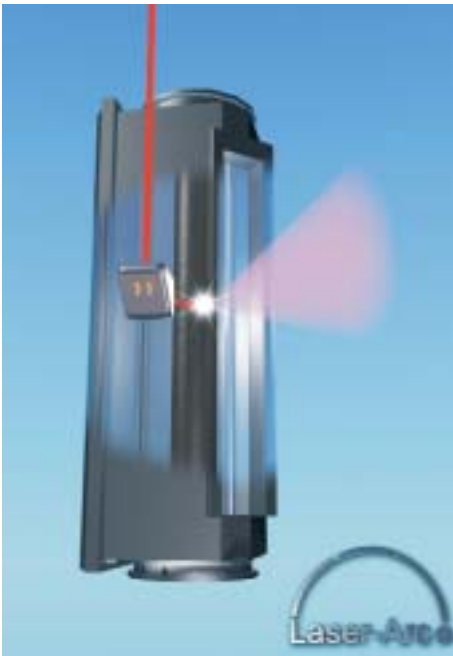


Abb. 2: Anflanscharer Laser-Arc-Modul

Ansprechpartner

Dr. Thomas Stucky
Tel.: 0231 / 8443 888
thomas.stucky@iws.fraunhofer.de



Ergebnisse

Im Dortmunder OberflächenCentrum wurde eine Standard-PVD-Anlage MZR 373 der Firma Metaplas Ionon (Abb. 3) installiert. Diese PVD-Anlage besitzt eine Kammer mit einem Nutzdurchmesser von 1200 mm und einer Nutzhöhe von 1200 mm. Der Substratteller ist für eine Tragkraft von 2000 kg ausgelegt. Er kann wahlweise mit einem Planetary mit Dreifachrotation für die Serienbeschichtung von bis zu 1500 kleineren, rotationssymmetrischen Teilen (z.B. Bohrer) versehen werden oder ein entsprechend großes Bauteil (z.B. Umformwerkzeug) aufnehmen.

Die Anlage verfügt über zwölf dc-Arc-Quellen, die mit Titan-Kathoden bestückt sind, so dass z.B. Titan- oder Titanitridschichten mit der Standardtechnologie abgeschieden werden können. Zur Gewährleistung einer homogenen Beschichtung für eine Bauteilhöhe von 1200 mm sind die jeweils sechs Arc-Quellen, auf einem Rechteckflansch übereinander angeordnet. Zwei der vier jeweils um 90° versetzten Flanschpositionen sind mit den entsprechenden Arc-Quellen zur Erreichung der erforderlichen Beschichtungsrate ausgerüstet (Abb. 1). Zur intensiven Bauteilreinigung mittels Plasma wird die AEGD-Technologie (Arc enhanced glow discharge) von Metaplas Ionon eingesetzt, wobei als Plasma-Quellen sechs der dc-Arc-Quellen mit entsprechender Blendenanordnung verwendet werden.

Der Laser-Arc-Modul (LAM) wurde an der Rückseite der Kammer angebracht. Die Graphit-Kathode mit einer Länge von 1200 mm wird während der Plasmapehandlung und dc-Arc-Beschichtung durch eine in der LAM-Kammer angeordnete Blende vor Verunreinigung geschützt. Abb. 4 zeigt die Rückseite der Anlage mit dem Laser-Arc-Modul.

Das LAM wurde in enger Zusammenarbeit mit der Inovap GmbH entwickelt, wobei Inovap die Detailkonstruktion und die Fertigung der Kammer sowie die Realisierung der Steuerung übernahm. Der für das Zünden des Bogens benötigte Laser ist ein gütegeschalteter Nd:YAG-Laser von Rofin-Sinar. Die zum Betrieb des Bogens nötige Stromversorgung wurde von der Firma Surface nach Spezifikationen des IWS entwickelt und gebaut.

Steuerungstechnisch wurde die LAM-Steuerung so in die Steuerung der Basisanlage integriert, dass die Diamor®-Abscheidung in beliebiger Wiederholung in einem automatischen Prozessablauf der Basisanlage einbezogen werden kann. Im Rahmen der apparativen Erprobung wurde gezeigt, dass das physikalische Wirkprinzip des Laser-Arc®-Prozesses auf das LAM umgesetzt und damit auf das Niveau industrieller Großanlagen hochskaliert werden konnte. Die gemessenen Eigenschaften der Diamor®-Schichten (E-Modul: 490 GPa) entsprechen denen der Labortechnologie.

Die nächste Aufgabe besteht darin, die mit der neuen Anlagentechnik bestehenden Möglichkeiten zur kombinierten Abscheidung von konventionellen Hartstoff- und Diamor®-Schichten zu nutzen.



Abb. 3: PVD-Anlage MZR 373 der Firma Metaplas Ionon (Frontansicht)



Abb. 4: PVD-Anlage MZR 373 mit installiertem Laser-Arc-Modul (Rückseite)

Diamor[®]-Schichten für die Hochgeschwindigkeits-Trockenbearbeitung von Leichtmetallen und die Präzisionsbearbeitung von Buntmetallen

Aufgabenstellung

Angesichts des wachsenden Einsatzes von Leichtmetallen in der Flugzeug- und Fahrzeugbranche werden intensive Bemühungen unternommen, die Zeiten für die spanende Bearbeitung bei gleichzeitiger Gewährleistung einer hohen Oberflächengüte zu verkürzen. Dabei soll aus Umweltaspekten und Kostengründen möglichst auf den Einsatz von Kühl- und Schmierstoffen verzichtet werden.

Dazu stehen zunehmend hochproduktive CNC-gesteuerte Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungsmaschinen zur Verfügung, auf denen Vorschubgeschwindigkeiten bis zu 300 m min^{-1} erreicht werden können. Unter derartigen Einsatzbedingungen sind die Werkzeuge extremen Belastungen ausgesetzt. Ihre Standzeit bestimmt entscheidend Stabilität und Effizienz dieser neuen Generation von Zerspansmaschinen. Die Geometrie und Schneidenform wird dazu den veränderten Einsatzbedingungen angepasst, um eine optimale Spanform und Spanabführung zu gewährleisten. Insbesondere muss bei Verzicht bzw. Reduzierung der Kühl- und Schmierstoffe der Gefahr von Kaltverschweißungen entgegengewirkt werden. Neben der Verschleißbeständigkeit der Werkzeuge ist deshalb ihr Adhäsions- und Gleitverhalten gegenüber dem zu bearbeitenden Werkstoff von entscheidender Bedeutung.



Abb. 1: Diamor[®]-beschichtete Fräser



Abb. 2: Diamor[®]-beschichtete Wendeschneidplatten zum Präzisionsbearbeiten von Messing

Lösungsweg

Eine aussichtsreiche Lösung stellt die Beschichtung derartiger Werkzeuge mit superharten, amorphen Kohlenstoffschichten (Diamor[®]) dar, da sie neben einer hohen Härte ($> 40 \text{ GPa}$) und Verschleißbeständigkeit hervorragende Gleiteigenschaften (Reibkoeffizient $< 0,15$ trocken gegen Metall) besitzen.

Im IWS werden derartige Kohlenstoffschichten mit gepulsten Vakuumbogen-Verfahren wie dem laser-gesteuerten Vakuumbogen (Laser-Arco[®]) und dem Hochstrombogen (HCA) abgetrennt. Dazu wurde eine industriell einsetzbare Anlagentechnik entwickelt. Auf einer Modulkonzeption aufgebaut, kann sie in herkömmliche Hartstoffbeschichtungsanlagen integriert werden. Die Laser-Arc-Quelle ist eine lasergeführte Linienquelle, die eine gezielte Beschichtung von Werkzeugen auf den erforderlichen Funktionsflächen ermöglicht.

Da zur Schichtabscheidung das energiereiche Kohlenstoffplasma von Bogenentladungen verwendet wird, sind zum Erreichen hochwertiger Schichtqualitäten keine erhöhten Bauteiltemperaturen notwendig oder zweckmäßig. Trotz dieser Niedrigtemperaturabscheidung weisen die Diamor[®]-Schichten eine hohe Haftfestigkeit zum Substratmaterial auf.

Ansprechpartner

Dr. Hans-Joachim Scheibe
Tel.: 0351 / 2583 408
hans-joachim.scheibe@iws.fraunhofer.de



Durch geeignete technologische Führung des Abscheideprozesses wird ein nanostrukturierter bzw. Vielfachschichtaufbau im Nanometermaßstab realisiert, der zu geringen Eigenspannungen von ca. 1 GPa und einer hohen Elastizität der Schicht führt. Bei der sehr hohen Härte reichen gewöhnlich bereits Schichtdicken von ca. 1 μm aus. Bei derartig dünnen Schichten treten keine Kantenverrundungen an den Schneiden auf. Die Schärfe des Werkzeuges wird deshalb durch die Beschichtung nicht beeinträchtigt. Die folgenden Ergebnisse demonstrieren das Anwendungspotenzial der Diamor[®]-Schichten bei der Bearbeitung von Leicht- und Buntmetallen.

Ergebnisse

Auf Fräsern (Abb. 1) und Bohrern (Johnson Carbide Products Inc. USA) wurden zusammen mit dem Fraunhofer Center for Surface and Laser Processing (USA) Diamor[®]-Schichten (Dicke ca. 1 μm) mit dem Laser-Arco[®]-Verfahren abgeschieden. Entsprechende Beschichtungen wurden auch an den Schneidkanten von Wendschneidplatten vorgenommen.

Die beschichteten Wendschneidplatten (Abb. 2) wurden bei der Präzisionsbearbeitung von Messing mit konventionellen Drehmaschinen ohne Kühl- und Schmierstoffe eingesetzt. Im Vergleich der bearbeiteten Werkstückoberflächen mit und ohne Diamor[®]-Schicht wurde eine deutlich Qualitätssteigerung (geringere Rauheit) bei der Bearbeitung mit Diamor[®]-beschichteten Werkzeugen festgestellt. Im Bearbeitungsprozess selbst wurde ein wesentlich verbesserter Spanbruch und ein besseres Abgleiten der überwiegend kurzen Späne beobachtet.

Die Diamor[®]-beschichteten Bohrer (Durchmesser 10 mm) wurden auf einer Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungsmaschine (Chiron FZ 28 L) im Fraunhofer Center for Manufacturing Innovation (USA) im Vergleich zu AlTiN beschichteten Bohrern getestet. Als Material wurde Al 6061, die am häufigsten im Flugzeugbau verwendete Al-Legierung, eingesetzt.

Es wurden 10 mm tiefe Löcher mit einer Vorschubgeschwindigkeit ($v_c = 180 \text{ m min}^{-1}$) und einem Vorschub ($f = 0,3 \text{ mm}$) ohne Kühl- und Schmierstoffe gebohrt. Während die AlTiN-beschichteten Bohrer nach einer Bearbeitungslänge von ca. 8 m bereits versagen, erzielen die Diamor[®]-beschichteten Bohrer die dreifache Bearbeitungslänge (25 m) ohne Verschleißerscheinungen zu zeigen (Abb. 3). Beobachtungen des Spanverhaltens ergaben, dass bei der Aluminium-Zerspanung bei Einsatz Diamor[®]-beschichteter Bohrer wesentlich kürzere Späne (Abb. 4a) erzeugt werden als bei unbeschichteten Bohrern (Abb. 4b).

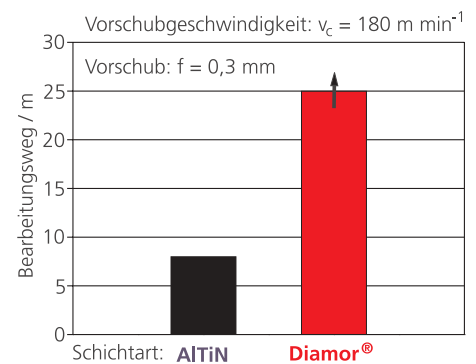


Abb. 3: Vergleich der Standzeiten von AlTiN- und Diamor[®]-beschichteten Bohrern beim Hochgeschwindigkeits-Bohren von Al 6061

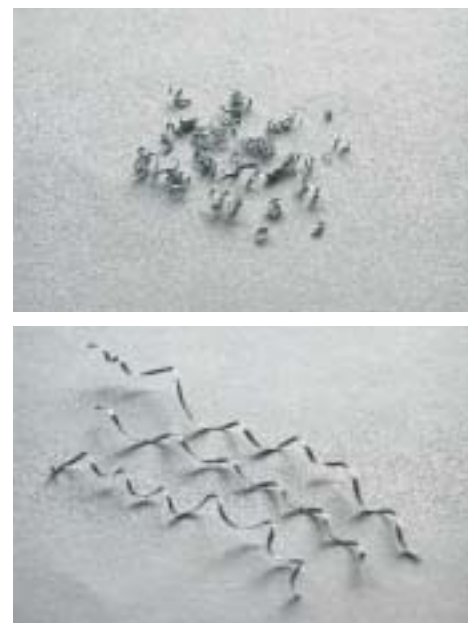


Abb. 4: Spanverhalten beim Bohren von Al mit Diamor[®]-beschichtetem Bohrer (oberes Bild, 4a) und mit unbeschichtetem Bohrer (unteres Bild, 4b)

Spektroskopische Charakterisierung mittels Plasma-AP-CVD beschichteter Oberflächen

Aufgabenstellung

Zur kostengünstigen Großflächen-Beschichtung von Bandmaterialien werden im IWS neuartige plasmachemische Beschichtungsverfahren (PE-AP-CVD) entwickelt, die bei Atmosphärendruck in kontinuierlichen Durchlaufreaktoren realisiert werden. Als Schichtmaterialien stehen derzeit keramische (oxidische, nitridische oder carbidische) Funktionsschichten mit korrosionshemmenden, mechanischen sowie speziellen optischen und / oder elektrischen Eigenschaften im Vordergrund.

Die Charakterisierung der optischen Eigenschaften der Schichten bildet damit ein wichtiges Element der Qualitätssicherung. Zur Entwicklung und Optimierung neuer Beschichtungstechnologien sind weiterhin Korrelationen zwischen Schichtstruktur und Prozessparametern erforderlich, die ebenfalls von der optischen Schicht- und Oberflächenspektroskopie bereitgestellt werden können. Mittels Mikrowellen-Plasma-CVD und gasförmigen elementorganischen Precursoren wurden SiO_2 -Schichten auf Edelstahl- bzw. Floatglas-Oberflächen abgeschieden, deren Struktur charakterisiert werden sollte.

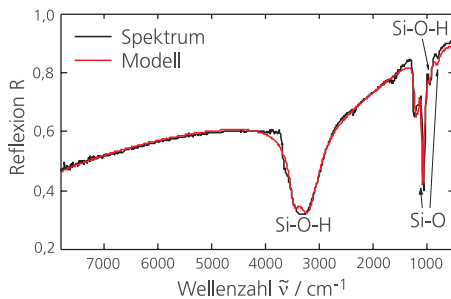


Abb. 1: FTIR-Reflexionsspektrum einer SiO_2 -Schicht auf Edelstahl (Einfallswinkel 5° , unpolarisierte Strahlung)

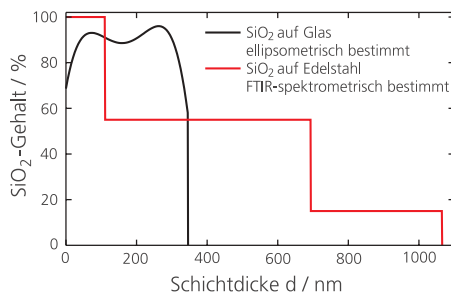


Abb. 2: Tiefenprofil des SiO_2 -Gehalts einer SiO_2 -Schicht auf Edelstahl bzw. Floatglas (gleiche Abscheidebedingungen), im optischen Modell wird der fehlende Anteil zu 100 % durch luftgefüllte Poren ($n = 1$, $k = 0$) beschrieben

Lösungsweg

Spektroskopische Ellipsometrie (270 nm - 1,7 μm) und FTIR-Reflexionsspektroskopie (0,8 μm - 200 μm) sind zwei sich ideal ergänzende Methoden zur Untersuchung der Struktur und Zusammensetzung von Schichten und Schichtsystemen. FTIR-Spektren liefern Informationen zur Netzwerkstruktur, zu den Bindungsverhältnissen und zur Zusammensetzung der Probe. Unter Hinzuziehung optischer Modelle und Spektrenmodellierungen können gleichzeitig Aussagen zur chemischen Bindung, zur Phasenzusammensetzung, zu den optischen Eigenschaften, zur Schichtdicke und zur Schichtmorphologie gewonnen werden.

Mittels spektroskopischer Ellipsometrie werden wellenlängenabhängige optische Materialfunktionen wie Brechungsindex n und Absorptionskoeffizient k im UV-VIS-NIR-Gebiet gewonnen. Die Auswertung der optischen Materialdaten ergibt Aussagen zum Schichtaufbau und zu festkörperphysikalischen Kenngrößen wie Bandlücke, Elektronenbeweglichkeit und Defektniveaus. Auch hier besteht die Notwendigkeit des Einsatzes adäquater optischer Modelle des Schichtsystems, da die gewünschten Materialcharakteristika aus den spektroskopischen Primärinformationen nicht elementar ableitbar sind.

Auf dem diffizilen Gebiet der optischen Spektrenmodellierung verfügt das IWS über eine langjährige Kompetenz, die erhebliche Vorteile für seine

Ansprechpartner

Dr. Volkmar Hopfe
Tel.: 0351 / 2583 402
volkmar.hopfe@iws.fraunhofer.de



Projektpartner und Auftraggeber bietet. Das schließt die Charakterisierung komplizierter Schichtsysteme ebenso ein wie die Weiterentwicklung der vielfältigen optischen Modelle und der Spektrensimulations-Algorithmen, und die Entwicklung anwendungsorientierter Softwarepakete.

Ergebnisse

Abb. 1 zeigt ein FTIR-Reflexionsspektrum einer mittels Mikrowellen-Plasma-CVD auf Edelstahl abgeschiedenen SiO_2 -Schicht. Leicht erkennbar sind Banden, die von Si-O- und Si-O-H-Schwingungen stammen. Die tiefergehende Interpretation der Si-O-Banden hinsichtlich chemischer Bindung im Netzwerk oder Phasenbestand erfordern dagegen den Einsatz optischer Modelle. Nach Prüfung mehrerer Ansätze wurde die höchste Anpassgüte des modellierten Spektrums an das gemessene für eine Gradientenschicht gefunden, in der luftgefüllte Poren in amorphem SiO_2 eine tiefenabhängige Verteilung aufweisen. Dazu wurde das Reflexionsspektrum über ein Multischichtmodell approximiert, welches die Änderung der SiO_2 -Schicht mit dem fortschreitenden Schichtwachstum beschreibt. Die poröse Schichtstruktur wird über ein Effektiv-Medien-Modell der dielektrischen Funktion auf Grundlage einer Mischung von Poren ($n = 1$, $k = 0$) und SiO_2 beschrieben. Es zeigt sich, dass sich auf dem Substrat zunächst eine kompakte SiO_2 -Schicht ausbildet, die mit zunehmender Schichtdicke optisch dünner wird, d. h. es werden zunehmend Hohlräume eingebaut - die Schicht wird lockerer (Abb. 2). Mit

Zunahme der Schichtdicke ändert sich außerdem die Porenstruktur (Abb. 3).

Eine parallel auf Flachglas (Floatglas) abgeschiedene SiO_2 -Schicht wurde mit spektroskopischer Ellipsometrie untersucht. Die Auswertung mit einem Gradientenmodell, ebenfalls auf Grundlage eines Effektiv-Medien-Modells, liefert einen schichtdickenabhängigen SiO_2 -Gehalt, der sich deutlich von dem Schichtaufbau auf Edelstahl-Oberflächen unterscheidet. Ausgehend von einer im Übergangsbereich zum Floatglas bestehenden Mischschicht wird mit zunehmender Schichtdicke die Schicht schnell optisch kompakter und erreicht eine optische Dichte vergleichbar mit der des Quarzglas (Abb. 2 und 4).

Durch Tiefenprofilanalyse mittels optischer Spektroskopie konnten die Unterschiede des Schichtwachstums auf verschiedenen Substraten nachgewiesen werden. Die optische Spektroskopie ist als zerstörungsfreie, keinerlei Präparationsaufwand verursachende Methode der Schichtcharakterisierung ein ideales Werkzeug für die Verfahrensentwicklung, Prozessoptimierung und Qualitätskontrolle.

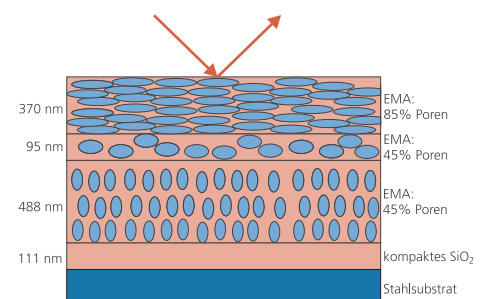


Abb. 3: Optisches Modell für die Simulation des FTIR-Reflexionsspektrums von Abb. 1 (EMA-Effective Medium Approximation)

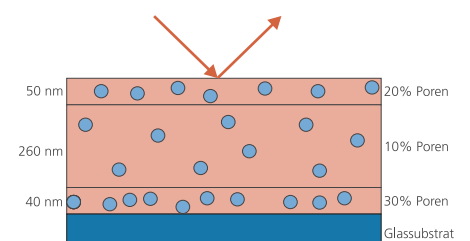


Abb. 4: Optisches Modell für die ellipsometrische Auswertung mit einem Gradientenmodell

Plasmachemische Beschichtungen bei Atmosphärendruck

Aufgabenstellung

Es besteht ein wachsender industrieller Bedarf zur Einführung wirtschaftlicher Technologien zur Großflächen-Beschichtung von temperaturempfindlichen Materialien wie Sonderstählen, Gläsern oder Kunststoffen mit hochwertigen Funktionsschichten, die spezielle mechanische, elektrische oder optische Eigenschaften aufweisen.

Beispiele sind:

- selektiv reflektierende Fenster zur Klimaregelung in Fahrzeugen,
- solar(photo)katalytisch selbstreinigende Glasoberflächen für Gebäudefassaden,
- kratzfeste / transparente Kunststoffoberflächen,
- Diffusionsbarrieren auf Lebensmittel-Verpackungsfolien,
- Stahlbleche mit umformtolerantem Oberflächenfinish,
- transparente, elektrisch leitende Schichten für Flachdisplays und Solarzellen.

In allen Fällen müssen auf Massenprodukten dünne Schichten, oft auch Schichtkombinationen, mit hohem Material-Durchsatz kostengünstig aufgebracht werden. Dafür werden PVD-Technologien (physical vapour deposition), aus Kostengründen und wegen überlegener Schichteigenschaften zunehmend aber auch CVD-Technologien (chemical vapour deposition) eingesetzt. Deren Einsatz ist aber bisher auf die Beschichtung temperaturstabiler Materialien beschränkt, beispielsweise beim thermischen CVD auf $> 600\text{ °C}$. Für temperaturempfindliche Materialien stehen bisher nur kostenintensivere Vakuumprozesse (PVD, Plasma-CVD) zur Verfügung.

Plasma-CVD Verfahren werden in vielen Industriezweigen angewandt, bisher aber ausschließlich im Unterdruck-Bereich. Die dazu notwendigen

Vakuumanlagen führen zu erhöhten Investitions- und Betriebskosten, und schränken die Integrationsfähigkeit der Beschichtungstechnologie in Fließprozesse erheblich ein. Die Einführung von kontinuierlichen, bei Atmosphärendruck einsetzbaren CVD-Verfahren wird deshalb weltweit als Entwicklungsziel und technologischer Meilenstein gesehen.

Aufgabenstellung und wesentliche Herausforderung besteht in der Entwicklung von kostengünstigen, skalierbaren Atmosphärendruck-Plasma-CVD-Prozessen (PE-AP-CVD), die zur Hochratebeschichtung von temperaturempfindlichen Materialien eingesetzt werden können. Dazu werden im IWS neuartige plasmachemische Hybridverfahren entwickelt.

Lösungsweg

Beim Plasma-CVD werden die zur Beschichtung eingesetzten Elementträger-Verbindungen (Precursoren) durch Plasmaaktivierung in hochreaktive gasförmige Intermediate umgewandelt, die zur Oberfläche diffundieren und dort die Schicht bilden. Da die Precursoraktivierung in der Gasphase teilweise räumlich getrennt vom Substrat erfolgt, wird das Beschichtungsgut thermisch nur geringfügig belastet.

Für die Precursor-Aktivierung kommen im IWS als Plasmaquellen sowohl nichtthermische Mikrowellenquellen als auch thermische DC-Arc-Quellen zum Einsatz. Vorteil der nichtthermischen Quellen ist die extrem hohe Precursoraktivierung bei gleichzeitig moderater, substratschonender Gas-Temperatur (Abb. 1). Die thermischen DC-Arc-Quellen zeichnen sich dagegen durch eine sehr hohe Leistungsdichte aus. In der Plasmazone herrschen Temperaturen von $> 10\ 000\text{ °C}$, die zu hohen Depositionsraten und besonderen Schichteigenschaften führen.

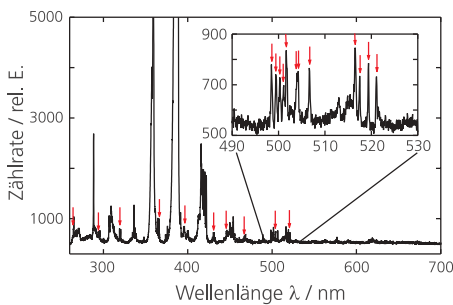


Abb. 1: Optisches Emissionsspektrum (in Substratnähe) eines Remote-Mikrowellen-AP-CVD-Plasmas zur TiO_2 -Beschichtung; der nichtthermische Charakter des Plasmas zeigt sich durch das Auftreten von Atom-Emissionslinien (Pfeile) bei einer mittleren Gastemperatur von nur wenigen hundert Grad

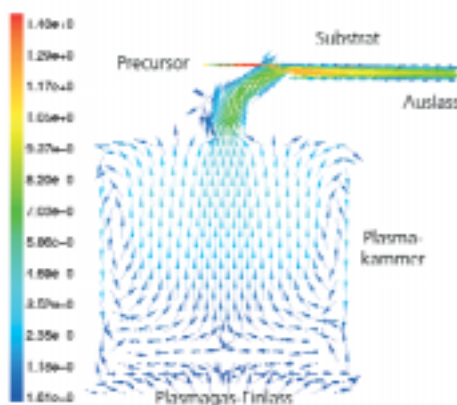


Abb. 2: Thermofluidynamische Modellierung eines Mikrowellen-AP-CVD-Reaktors: Trajektorien der Gasbewegung in der Plasmakammer und in Substratnähe

Ansprechpartner

Dr. Volkmar Hopfe
Tel.: 0351 / 2583 402
volkmar.hopfe@iws.fraunhofer.de



Im Vergleich zu den in der Industrie zunehmend Anwendung findenden Flammen-CVD-Verfahren ist die damit erzielbare Aktivierung wesentlich höher, beliebige Precursoren sind einsetzbar und damit können auch sauerstofffreie Schichten abgeschieden werden.

Zur Gewährleistung der Langzeitstabilität der Beschichtungsanlage ist die Plasma-Erzeugungszone von der Beschichtungszone räumlich getrennt (remote activation). Die Plasmaquelle wird von einem Trägergas schnell durchströmt, wodurch die im Plasmavolumen erzeugten aktivierten Spezies in Richtung Substratoberfläche ausgetragen und dort mit den Precursoren vermischt werden. Das zu beschichtende Material wird beispielsweise in Form von Bändern, Folien oder auf Transportketten geführten Stückgütern kontinuierlich über den Reaktorkopf bewegt. Obwohl es sich um "offene" Durchlaufreaktoren handelt, können mit dem Verfahren wahlweise oxidische und nichtoxidische Schichtmaterialien abgeschieden werden. Für sauerstofffreie Beschichtungen werden die Substrate über Gas-Schleusen "freischwebend" durch den Reaktor bewegt. Das Beschichtungsgut kommt dabei nur mit Gasströmen in Berührung, nicht mit den Wänden des Reaktors, so dass Schicht-Kontaminationen minimiert werden.

Um gleichmäßige Schichten mit hoher Depositionsrate abscheiden zu können, werden extreme Anforderungen an die strömungsdynamische Auslegung der Reaktoren gestellt. Zur Rationalisierung der aufwändigen Entwicklungsarbeit werden deshalb umfangreiche thermofluiddynamische Modellrechnungen durchgeführt. Sie erwiesen sich als wirkungsvolles Werkzeug beim Reaktordesign und bei der Verfahrensoptimierung (Abb. 2). Beim Entwurf neuer CVD-Reaktoren werden beispielsweise die Precursorgas- und Plasmagas-

Düsenköpfe optimiert. Nach Erstellung des komplexen Reaktormodells werden Prozessbedingungen wie Depositionsraten und Beschichtungsprofile berechnet und mit den experimentell ermittelten Schichtprofilen verglichen. Diese Ergebnisse dienen der Modellverbesserung und -validierung sowie zur Abschätzung der Leistungsgrenzen der neuen Verfahren.

Ergebnisse

Derzeit werden im IWS die neuen Atmosphärendruck-Plasma-CVD-Verfahren zur Abscheidung dünner keramischer (oxidischer, nitridischer, carbidischer) Funktionsschichten auf temperaturempfindlichen Materialien weiterentwickelt. Ziel ist die großflächige kontinuierliche Abscheidung von speziellen Funktionsschichten mit korrosionshemmenden, verschleißmindernden sowie optischen, katalytischen oder elektrischen Eigenschaften. Mittels Mikrowellen-AP-CVD (Abb. 3) und DC-ArcJet-CVD (Abb. 4) wurden beispielsweise SiO_2 - und TiO_2 -Schichten auf Edelstahl-, Glas- und Kunststoff-Oberflächen mit Depositionsraten von derzeit bis zu 80 nm s^{-1} abgeschieden. In Abhängigkeit von den Depositionsparametern weisen sie eine amorphe oder mikrokristalline Struktur auf, die der vergleichbarer kompakter Materialien entspricht. Die Schichtmorphologie wird ebenfalls wesentlich vom gewählten Precursor und den Depositionsparametern aber auch vom Substratmaterial beeinflusst (vgl. Beitrag S. 38).



Abb. 3: Mikrowellen-AP-CVD-Anlage zur quasi-kontinuierlichen Beschichtung (6 kW-Quelle)



Abb. 4: ArcJet-CVD-Anlage zur quasi-kontinuierlichen Beschichtung (30 kW DC-Arc-Quelle)

Quantitative mechanische Bewertung von Fotolackschichten für die Sub-100 nm-Strukturierung in der Halbleiterindustrie

Aufgabenstellung

Die Strukturierung der Silizium-Wafer mittels Photolithographie ist der Schlüssel zur immer weiteren Miniaturisierung in der Mikroelektronik. Die erreichbaren Grenzen werden durch das Auflösungsvermögen der optischen Abbildung und durch die Eigenschaften des Fotolacks bestimmt. Der Fotolack muss dabei die filigranen Strukturen trotz der im Polymer ablaufenden starken Materialveränderungen bewahren.

Am IBM Watson Research Center in New York werden derartige polymerische Filme für die Mikroelektronik des Sub-100 nm-Bereiches entwickelt. In die Photolack-Schichten von ca. 1 µm Dicke müssen dabei Bilder mit Linienbreiten von nur 50 - 100 nm durch das lithographische Verfahren übertragen werden. Bei solch fragilen Stegen mit Aspektverhältnissen > 10 ist es nicht verwunderlich, dass nach dem Belichten des Fotolackes die verbleibenden Fotolacklinien während des Entwicklungsprozesses häufig kollabierten. Als Ursache wurde die Kombination von ungleichmäßigen Oberflächenspannungen, die beim Verdampfen von in der Entwicklerlösung enthaltenem Wasser entstehen, mit der geringen Steifigkeit der Polymerfilme vermutet.

Der die Steifigkeit charakterisierende Elastizitätsmodul stellt damit eine Schlüsselgröße für die erforderliche Verfahrensoptimierung dar. Der E-Modul ist zugleich eine Basisgröße für die bei der Prozessentwicklung benutzte Modellierungssoftware. Damit ergab sich die Aufgabenstellung, die Elastizitätsmoduli dieser dünnen und relativ weichen Schichten zu bestimmen. Konventionelle Indenter-Methoden erwiesen sich hierfür als nicht geeignet.

Lösungsweg

Zur Messung der E-Moduli wurde vom Fraunhofer CSLP in Peoria das am IWS entwickelte LAwave[®]-Verfahren eingesetzt. Gegenüber konventionellen Techniken zeichnet es sich insbesondere dadurch aus, daß es zerstörungsfrei auch ultradünne Schichten vermessen kann. Dies geschieht durch die Auswertung der Ausbreitung von akustischen Oberflächenwellen, die durch kurze, lokalisierte Laserpulse erzeugt werden. Das Verfahren misst schnell und zuverlässig und hat sich u.a. bei unterschiedlichen Charakterisierungsproblemen von Wafer-Oberflächen für die Halbleiterindustrie bewährt. So wurde es erfolgreich zur Bewertung von hochporösen low-K SiO₂-Xerogel Filmen (mit Porositäten um 40% und E-Moduli < 4 GPa) eingesetzt.

Ergebnisse

Ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 1 dargestellt. Die Experimente ergaben, dass sich die vermessenen Filme in zwei Gruppen einteilen lassen; eine Gruppe mit dem niedrigerem Elastizitätsmodul im Bereich von $(3,1 \pm 0,6)$ GPa und eine Gruppe mit dem höheren Modul von $(4,9 \pm 0,4)$ GPa. Die polymerischen Filme mit den höheren Moduli basierten auf einem speziellen Abscheidungsprozeß, der die bessere Steifigkeit durch zusätzliche Wasserstoffbindungen zwischen den Kohlenstoffketten erzeugt.

Die IBM-Wissenschaftler erhielten damit eine sichere Basis für ihre weiteren technologischen Entwicklungen. Dieser Anwendungsfall demonstriert die Vielseitigkeit der laserakustischen Methode, die sowohl zur Prüfung superharter Schichten (z.B. diamantartiger Kohlenstoffschichten) wie auch für extrem weiche Schichten gleichermaßen geeignet ist.

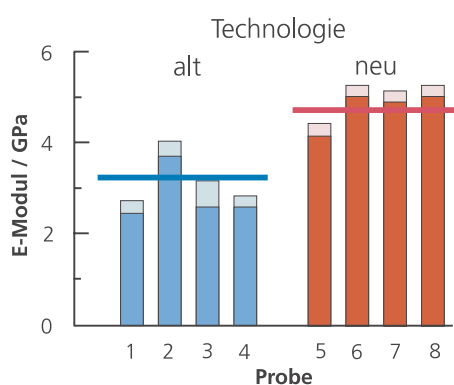


Abb. 1: E-Moduli von Fotolackschichten

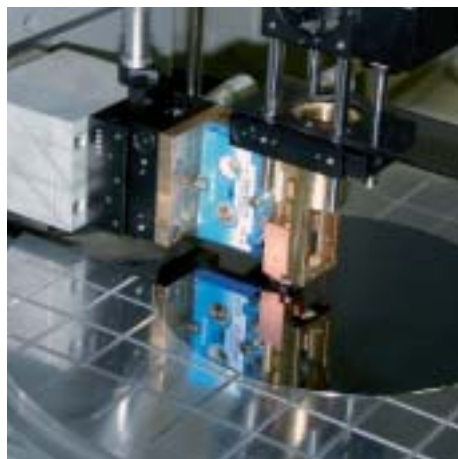


Abb. 2: Laserakustische Prüfung von beschichteten Wafern

Ansprechpartner

Dr. Thomas Schülke
Tel.: 1 / 309 / 999 5887
tschuelke@fraunhofer.org



Simulation der Bogenbeschichtung

Aufgabenstellung

Die Herstellung von komplexen Oberflächenbeschichtungen in industriellen Beschichtungsanlagen wird durch eine Vielzahl von Verfahrens- und Geräteparametern bestimmt. Zur Unterstützung der Bogenbeschichtungstechnologien wird im Rahmen des Verbundprojektes SIMKOPP das Programmsystem SIMCOAT entwickelt. Die Software soll unter Produktionsbedingungen zur Vorausbestimmung der zu erwartenden Schichtparameter ohne aufwändige Vorversuchsreihen und ohne Belastung der realen Anlagen dienen.

Lösungsweg

Ausgehend von der Kinematik der Bauteilbewegung und der Beschichtungsquellen während des Beschichtungsvorganges sowie der Simulation der physikalischen Vorgänge der Schichtbildung werden virtuelle Anlagen konstruiert. Es können ebene Proben auf Drehtellern und programmgesteuerten Tischen oder komplexe Bauteile in planetengetriebenen Beschichtungsbehältern simuliert werden. Für die Plasmaquellen sind bewegungsgesteuerte Laser-Arc-Quellen und Plasmen von Bogenquellen mit variablen Parametern vorgesehen. Physikalische und technische Eigenschaften sind durch frei wählbare Parametersätze einstellbar. Für die Verteilung der Bauteile in der Anlage sind reale Bestückungslisten zu verwenden.

Der Anwender kann selbstständig am PC durch Zugriff auf die Software seine spezielle Anlagenkonfiguration aufbauen und die Geometrie seiner Bauteile vorgeben. Die Simulation gestattet ihm die Berechnung der voraussichtlichen Schichteigenschaften bei einer parametrisch vorzugebenden Technologie. Als Ergebnis erhält man für jedes Oberflächensegment ein Multischichtsystem, dessen Einzelschichten durch Dicke, Dichte und Strukturparameter (Elastizitätsmodul, optische und elektrische Kennwerte) charakterisiert werden. In einem sehr komfortablen Darstellungstool kann das Ergebnis bewertet werden, wodurch die Optimierung des Vorganges mit minimalem Aufwand ermöglicht wird.

Ergebnisse

Die Simulationen sind gegenwärtig für die Kohlenstoff-Beschichtung mit dem Laser-Arc-Verfahren für ebene Substrate und für 3D-Bauteile realisiert. Die Geometrie der Bauteile kann als vrml-Datei eingegeben werden. Die Simulation der TiN-Beschichtung mit dem dc-Vakuumbogen ist in Bearbeitung.



Abb. 1: Programm-Oberfläche für Programm SIMCOAT-2D

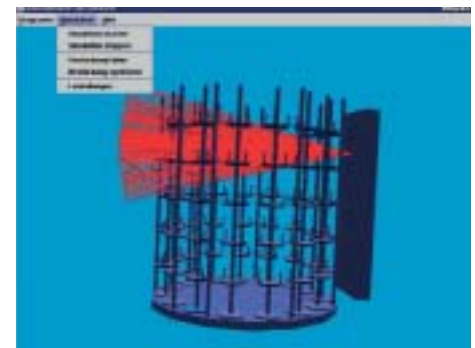


Abb. 2: Bauteilanordnung im Programm SIMCOAT-3D

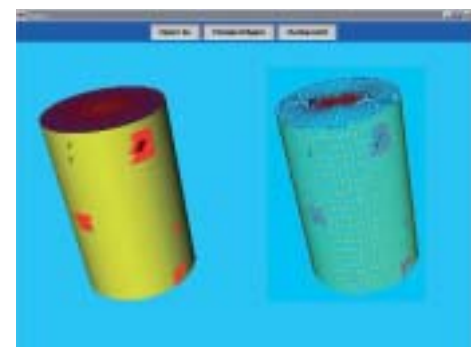


Abb. 3: Visualisierung der Schichtbildung in der Startphase auf einem Zylinder (rechts die verwendete Polygonstruktur der Zylinderoberfläche)

Ansprechpartner

Dr. Siegfried Völlmar
Tel.: 0351 / 2583 434
siegfried.voellmar@iws.fraunhofer.de



Dr. Steffen Nowotny
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 241)



Dr. Steffen Nowotny
Gruppenleiter Spritztechnik
(Tel. 2583 241)



Dr. Anja Techel
Gruppenleiterin Auftragschweißen
(Tel. 2583 255)

Oberflächenschutz

Zum Beschichten von Bauteilen aus Stahl, Leichtmetallen oder anderen Werkstoffen mit Metallen, Hartstoffen und Keramik stehen im IWS das Plasma- und Flamspritzen, das Plasma-Pulver- und Laserstrahl-Auftragschweißen sowie das Laser-Legieren und -Dispergieren zur Verfügung.

Hochleistungs-Hybridtechnologien in der Kombination von Laser-, Plasma- und Induktionsverfahren stellen darüber hinaus produktive Ergänzungen dar.

Auf der Grundlage moderner Systemtechnik umfasst das Angebotsspektrum:

- die Konzeption beanspruchungsgerechter Schichtsysteme,
- die Verfahrensentwicklung von den Grundlagen bis zum Beschichten von Musterbauteilen,
- die Entwicklung und Fertigung von systemtechnischen Komponenten und die Mitwirkung bei der Systemintegration sowie
- die Unterstützung des Anwenders bei der Technologieeinführung.

Reparieren und Generieren

Zur Reparatur von Bauteilen, Formen und Werkzeugen und zur schnellen Prototypfertigung stehen das Laserstrahl- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen, das Selektive Lasersintern und verschiedene Laser-Plasma-Kombinationen zur Verfügung. Je nach Verfahren können entweder gezielt poröse oder 100 % dichte Schichten und 3D-Strukturen aus Metallegierungen oder Keramik erzeugt werden. Für alle Technologien ist die geschlossene Prozesskette von der Digitalisierung und Datenaufbereitung bis zur Endbearbeitung nutzbar. Für diese Anwendungsfelder bieten wir an:

- schnelle und flexible Bauteil-Digitalisierung und Datenbearbeitung,
- präzise Reparatur von Bauteilen und Werkzeugen, auch mit komplexer Form,
- Fertigung von metallischen und keramischen Mustern und Prototypen direkt aus den CAD-Daten des Auftraggebers,
- systemtechnische Komponenten und Unterstützung bei der Fertigungseinführung.



Vakuum-Plasmaspritzanlage



Modulare Laser-Beschichtungseinheit



Beispiele aus den Arbeiten 2001

1. Herstellung keramischer Schichten durch laserbasierte Fertigungsverfahren 46
2. Laser-Fräszentrum zur Komplettbearbeitung 48
3. Flexible Fertigung großformatiger Werkzeuge mit seriennahen Eigenschaften 50
4. Simulation des Laser-Pulver-Auftragschweißens 52



Auftragschweißen im Laser-Fräszentrum

Herstellung keramischer Schichten durch laserbasierte Fertigungsverfahren

Aufgabenstellung

Schichtsysteme aus Oxidkeramik finden ihren Einsatz bei thermischer und elektrischer Isolation sowie beim Verschleißschutz. Typische Grundwerkstoffe sind Nickellegierungen oder Leichtbauwerkstoffe auf der Basis von Aluminium oder Titan für Anwendungen im Triebwerks-, Turbinen- oder Automobilbereich. Das heute eingeführte Beschichtungsverfahren ist das Plasmaspritzen. Es zeichnet sich vor allem durch hohe Auftragraten, eine geringe thermische Bauteilbelastung sowie ein sehr großes Spektrum verarbeitbarer Werkstoffe aus und wird überwiegend bei großflächigen Beschichtungen eingesetzt. Die bestehenden und den Einsatz beschränken Defizite betreffen die aufwändige Haftgrundvorbereitung, die begrenzte Haftfestigkeit, teilweise die Porosität / Schichtfestigkeit sowie den erhöhten Aufwand bei geometrisch komplexen und partiellen Beschichtungen. Ergänzende Fertigungsverfahren sollen den Einsatz keramischer Schichten in solchen Einsatzfeldern wirtschaftlich attraktiver gestalten oder technisch und eigenschaftsbezogen möglich machen, die dem Plasmaspritzen nicht oder nur mit Einschränkungen zugänglich sind.

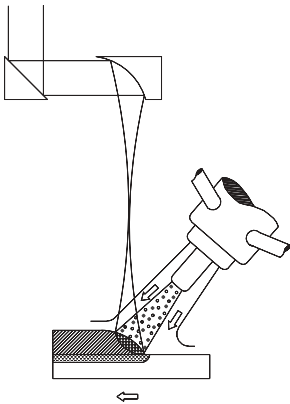


Abb. 1: Prinzipskizze des Laserstrahl-Auftragschweißens mit seitlicher Pulverzufuhr

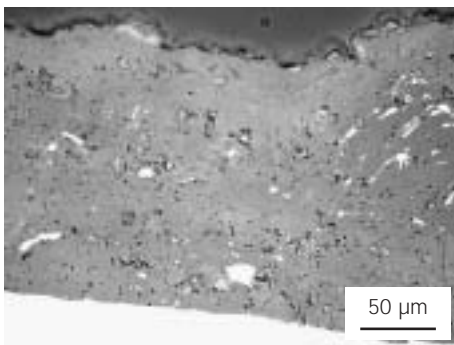


Abb. 2: Querschliff einer hybridgespritzten Schicht aus $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (97:3) auf Ni-Basis-Legierung

Ansprechpartner

Dr. Steffen Nowotny
Tel.: 0351 / 2583 241
steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de

Lösungsweg

Die Hybridtechnologie des Laser / Plasma-Beschichtens verfolgt das Ziel, den flächenhaften Charakter und die hohe Produktivität des Plasmaspritzens beizubehalten, jedoch den Aufwand für die Haftgrundvorbereitung zu verringern und dichtere Schichten zu erzielen. Die Technologie ist einstufig und beruht auf einer Funktionsaufteilung der Energiequellen. Der Plasmabogen schmilzt effizient das Keramikpulver vollständig auf und liefert dem laserinduzierten Schmelzbad auf der Bauteiloberfläche bereits flüssigen Zusatzwerkstoff. Der Laserstrahl hält die Spritzteilchen auf Schmelztemperatur und verringert die Abkühlrate der flüssigen Teilchen beim Auftreffen auf das Substrat. Über ein gleichzeitig geringfügiges Anschmelzen des Grundwerkstoffs werden dadurch Diffusionsprozesse, chemische Reaktionen und Phasenbildungen als maßgebliche Haftmechanismen ermöglicht.

Zum Erzielen präziser, lokal begrenzter und dichter Keramiksichten wird das einstufige Laser-Beschichten mit koaxialer oder seitlicher Pulverdüse eingesetzt. Der Laserstrahl erzeugt aus den zugeführten Pulverteilchen ein Keramik-Schmelzbad auf der Bauteiloberfläche. Durch Wärmeleitung aus diesem Schmelzbad wird das Grundmaterial ebenfalls geringfügig angeschmolzen, und durch Wärmeableitung in das kältere Substrat erstarrt die Schmelze definiert. Es entstehen genaue, spurförmige keramische Beschichtungen.

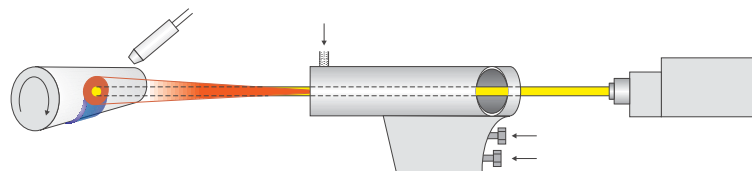


Abb. 3: Prinzipskizze des Laser / Plasma-Hybridbeschichtens mit laserintegriertem Spritzbrenner



Ergebnisse

Laser / Plasma-Hybridtechnologie

Für Anwendungen im Triebwerksbau wurden Schichten aus $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (97:3) auf eine Luftfahrtlegierung auf Nickelbasis aufgetragen. Als Strahlquellen sind ein Plasma-Spritzbrenner mit 30 kW Leistung und ein 1,2 kW-Nd:YAG-Laser kombiniert worden. Wie Abb. 2 zeigt, ist das Gefüge weitgehend dicht und aufgrund des gegenüber dem reinen Plasmaspritzen veränderten Schichtbildungsvorgangs durch metallische Einschlüsse aus dem Grundmaterial gekennzeichnet. Die Haftfestigkeitsuntersuchungen nach DIN EN 582 zeigen, daß mit Einsatz der Hybridtechnologie die übliche Haftgrundvorbereitung, die mit Korund-Strahlen und zusätzlichem Spritzen einer metallischen Haftschrift stets aufwändig ist, entfallen kann. Gegenüber ohne Haftschrift gespritzten Schichten auf gestrahltem Untergrund steigt die Haftfestigkeit auf fast 300 % und erreicht etwa 76 % der mit voller Haftgrundvorbereitung und unter optimalen Bedingungen gespritzten Schichten. Die Ergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchungen sind in Abb. 4 zusammengefaßt.

Einstufiges Laserbeschichten

Zum Oberflächenschutz von Motoren-Bauteilen und Flugzeugkomponenten sind Al- und Ti-Substrate mit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ beschichtet worden. Als Pulver können handelsübliche Spritzpulver im Korngrößenbereich zwischen 45 und 90 μm verwendet werden. Als Strahlquelle für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde ein 6 kW- CO_2 -Laser verwendet, es liegen zusätzlich auch positive Ergebnisse mit Hochleistungs-Diodenlasern vor.

Das typische Erstarrungsgefüge ist durch eine vollständig dichte, feinkristalline Struktur gekennzeichnet. Aufgrund der gegenüber dem Plasmaspritzen wesentlich geringeren Abkühlgeschwindigkeit ist die Hauptphase wunschgemäß $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. In den Korngrenzen finden sich Al-Ti-O-Phasen, wie zum Beispiel Al_2TiO_5 . Wie bei den hybridgespritzten Schichten kann auch beim Laser-Beschichten auf das Korund-Strahlen verzichtet werden. Wie Abb. 5 zeigt, werden sogar um mehr als zweifach höhere Haftfestigkeiten gegenüber gespritzten Schichten erreicht. Die Ursachen für diesen Effekt sind die vergleichsweise lange Schmelzbadlebensdauer, die geringe Abkühlrate und die damit verbunden ablaufenden Wechselwirkungsprozesse zwischen Keramikschicht und Metallsubstrat.

Anwendungsbeispiele

Abb. 6 zeigt einige Anwendungsbeispiele von keramischen Schichten auf Titan- und Aluminium-Substraten in Form von Innen- und Außenbeschichtungen auf Komponenten aus den Bereichen des Automobil-, Flugzeug- und Maschinenbaus.

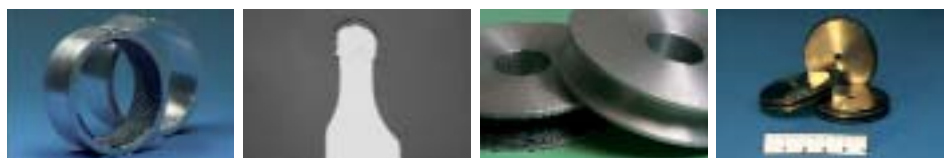


Abb. 6: Anwendungsbeispiele von keramischen Schichten für Motoren-, Triebwerks- und Maschinenkomponenten

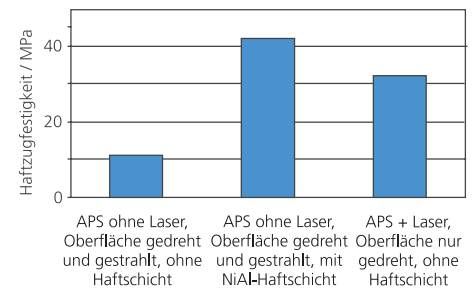


Abb. 4: Haftfestigkeitswerte von Keramikschichten $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (97:3) auf Ni in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren, Prüfprinzip: DIN EN 582

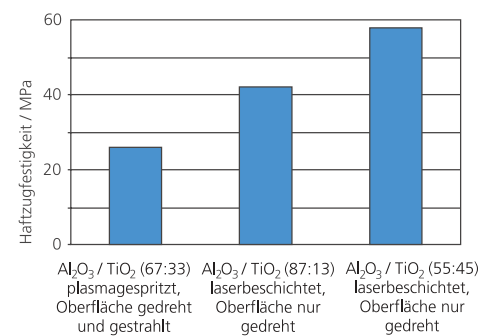


Abb. 5: Haftfestigkeiten von gespritzten und laserbeschichteten Keramikschichten Prüfprinzip: Fraunhofer IWS, Zugversuch für auftraggeschweißte Schichten

Laser-Fräszentrum zur Komplettbearbeitung

Aufgabenstellung

Präzise Reparaturen und schnelle Geometrieänderungen von Werkzeugen, Formen und Bauteilen sowie das direkte Generieren von Werkzeug-Aktivteilen sind gegenwärtig die wichtigsten Anwendungsgebiete des Laserstrahl-Auftragschweißens. Die Prozesskette umfasst hierbei den CAD-Datenimport, die 3D-Geometriemodellierung, die CNC-Programmierung, den Werkstoffaufbau und die Endbearbeitung. Üblicherweise werden die einzelnen Fertigungsschritte auf unterschiedlichen Arbeitsstationen und Werkzeugmaschinen durchgeführt. Der sich bei dieser Verfahrensweise ergebende Aufwand für Logistik und mehrfache Werkstückjustage sowie getrennte CNC-Programmierung für Laser- und Endbearbeitung übersteigt vielfach den Aufwand für den eigentlichen Materialersatz. Die Wirtschaftlichkeit des Laserverfahrens wird mithin beeinträchtigt, und wichtige Anwendungspotenziale des ansonsten vorteilhaften Verfahrens werden nicht erschlossen.

Lösungsweg

Zur Verringerung von Fertigungszeit und -kosten ist unter der Maßgabe weitestgehender Datendurchgängigkeit eine Komplettbearbeitungsmaschine auf der Basis eines CNC-Fräszentrums aufgebaut worden. In diese Bearbeitungsanlage wurden alle zur Umsetzung der geschlossenen Prozesskette erforderlichen Komponenten integriert und durch eigens entwickelte Software miteinander verkettet. Im Ergebnis kann der gesamte Fertigungsprozess konsequent in einer Maschine und in einer unveränderten Aufspannung und Justage des Werkstücks ausgeführt werden.

Ergebnisse

Digitalisier- und Programmiersystem

Basis für die 3D-Modellierung, Datenbearbeitung und Programmierung ist das System DCAMnc für die Laser/Fräskombination. DCAM ist ein Softwarepaket, das aus verschiedenen Tools besteht und mit dem die Fertigungsvorbereitung, der Bauprozess und die Endbearbeitung auf der Basis einheitlicher Daten organisiert und gesteuert werden.

Zur schnellen Erfassung von dreidimensional geformten Oberflächen wird DCAMscan verwendet. Durch einen preiswerten Fünffachs-Tastarm (Abb. 1) wird zum Beispiel die Ist-Kontur eines beschädigten Werkzeugs aufgenommen und in ein 3D-Datenfile umgewandelt. Die hierdurch erzeugten Daten bilden die Grundlage für alle weiteren Prozessschritte. In der einfachsten Variante verfügt das taktile System über eine Aufnahmegenaugigkeit von etwa 0,2 mm und einen Arbeitsradius von 1 800 mm. Für höhere Genauigkeitsanforderungen ist das System auch zu weiteren kommerziell verfügbaren Digitalisierern kompatibel.

Durch DCAMcad wird ein 3D-Modell des zu generierenden Werkstoffvolumens erzeugt (Abb. 2). Hierfür können entweder CAD-Daten in den Formaten DXF, SAT, IGES oder HPGL importiert oder die mittels DCAMscan erfassten Daten weiterverarbeitet werden. Durch ein Zerlegen des CAD-Modells in horizontale Ebenen ("slicen") werden die einzelnen Lagen für den späteren Bauprozess vorgegeben. Das System unterstützt außerdem die Festlegung einer optimierten Baustrategie, aufgeteilt in Schweißungen zur Konturerzeugung und Flächenfüllung.



Abb. 1: Digitalisiersystem DCAMnc mit manuellem Tastarm (NCSoft Wagner, Schwerin)



Abb. 2: CAD-Modell eines Spritzguss-Formeneinsatzes



Abb. 3: Spritzguss-Formeneinsatz, lasergeneriert (hinten) und fertigbearbeitet (vorn)

Ansprechpartner

Dr. Steffen Nowotny
Tel.: 0351 / 2583 241
steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de



Für die Laser/Fräskombination erzeugen schließlich spezielle Postprozessoren unter DCAMcam die CNC-Programme für beide Verfahrensschritte.

Bauprozess

Für das Auftragschweißen wurde die Fokussieroptik eines 3 kW-Nd:YAG-Lasers mit einem Koaxial-Auftragschweißkopf kombiniert und an die z-Achse des Fräszentrums montiert. Die Koaxial-Düse ist eine weiterentwickelte Version kleinerer Bauart mit variablen und austauschbaren Düsen spitzen. Die kürzeste Düsenbauform ist speziell für die Kopplung mit Diodenlasern ausgelegt. Der minimale Fokusabstand beträgt hier 70 mm. Durch Multilagenschweißung können fehlerfreie Strukturen aus Ni- und Co-Basis-Legierungen, Stählen und Leichtmetallen (Ti, Al in Argon-Atmosphäre) erzeugt werden. Abb. 4 zeigt exemplarisch die Struktur eines Materialaufbaus aus Stellite 21. Die Fertigungstoleranzen des generierten Rohteils sind pulver- und parameterabhängig und betragen typischerweise +0,3 bis +0,6 mm.

Laser-Fräszentrum

Die Basis der integrierten Fertigungslösung ist ein 3-Achs-CNC-Fräszentrum mit 40,5" · 20" Maschinentisch und 30" · 20" · 27,5" x-, y- und z-Achsen (Abb. 5). Die maximale Spindeldrehzahl beträgt 10 000 U min⁻¹. Alle Prozessschritte sind softwareseitig verkettet, und die systemtechnischen Komponenten sind über Schnittstellen zu zwei Lasern (Nd:YAG und Diode), zu zwei Pulverförderlinien und zum DCAM-System miteinander verbunden. Ausserdem verfügt die Anlage über eine Schnittstelle zu einem Plasma-Pulver-System (PTA) zur Steigerung der Prozesseffizienz bei größervolumigen Auftragschweißungen.

Abb. 3 zeigt den auf der Basis des CAD-Modells (Abb. 2) gefertigten Formeneinsatz für eine Anwendung aus dem Automobilbereich. Das Rohteil hat ein Übermaß von 0,6 mm, von dem aus die Endkontur mit einem beschichteten Hartmetallfräser und ohne Kühl- und Schmiermittel gefräst wurde. Die gewählte teilbearbeitete Ansicht zeigt anschaulich den Vergleich zwischen dem lasergenerierten und dem endbearbeiteten Zustand.

Neben dem Auftragschweißen / Fräsen kann das Bearbeitungszentrum ohne weiteres auch für weitere Laser-Verfahrensvarianten eingesetzt werden. Eine praktikable Möglichkeit besteht darin, Funktionsflächen fertigzubearbeiten und anschließend in der gleichen Einspannung mit dem Laser zu härten.

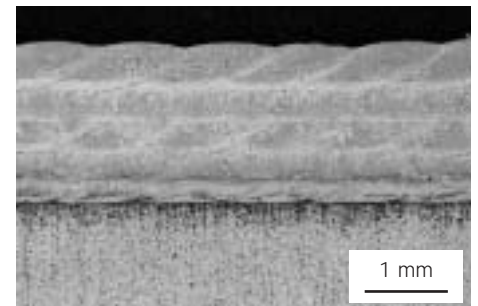


Abb. 4: Querschliff eines Vielspur-Aufbaus aus Stellite 21, Härte: 35 HRC



Abb. 5: 3-Achs-Laser-Fräszentrum

Flexible Fertigung großformatiger Werkzeuge mit seriennahen Eigenschaften

Aufgabenstellung

Ziel des vom BMBF geförderten Forschungsprojektes "Melato" ist die Entwicklung und Qualifizierung einer neuen Prozesskette zur schnellen Fertigung von komplex geformten Werkzeugen mit Kantenlängen von bis zu 1500 mm. Die Fertigungszeit soll von derzeit etwa 12 Wochen auf eine Woche verkürzt werden. Oberflächen-güte und Standfestigkeit der Werkzeuge sollen anwendungs- und stückzahl-angepasst sein, so dass ein kosten-günstiger Produktionsablauf aus der Abstimmung von Anforderungsprofil, Werkstoff, Prozessparametern und Fertigungsaufwand erreicht wird.



Abb. 1: 3D-CAD-Modell eines Prägewerkzeugs (Stempel)



Abb. 2: In Ebenen zerlegtes Modell aus Abb. 1

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Thomas Himmer
Tel.: 0351 / 2583 202
thomas.himmer@iws.fraunhofer.de

Lösungsweg

Das FuE-Ziel soll mittels einer durchgängigen Automatisierungslösung für das Schneiden, Paketieren und Fügen von Stahlblech-Ausschnitten nach dem Prinzip des LOM-Verfahrens (Laminated Object Manufacturing) erreicht werden. Die gewünschten Gebrauchseigenschaften werden durch die spanende Endbearbeitung und thermische Oberflächenbehandlung der laminierten Werkzeuge eingestellt. Die Nutzung und Integration verschiedener laserbasierter Verfahren (Laserschneiden, -schweißen, Auftragschweißen, Metallspritzen) ermöglicht eine hohe Flexibilität des Fertigungsablaufs und eine schnelle geometrische Modifizierbarkeit der Werkzeuge. Die qualifizierte Prozesskette soll schließlich zum Projektende in Form eines Demonstrator-Fertigungszentrums dargestellt werden.

Ergebnisse

Zum aktuellen Bearbeitungsstand des Vorhabens werden die Grundlagen der im folgenden dargestellten Prozessschritte beherrscht, und erste Werkzeuge können gefertigt werden.

CAD-Daten-Import und -Verarbeitung

Als Ausgangsinformationen dienen 3D-CAD-Daten in den gängigen Schnittstellenformaten (VDA, IGES, STL), die in das CAD/CAM-System eingelesen werden und das 3D-Modell



Abb. 3: Fräsbearbeitung eines Werkzeug-Rohlings



des zu fertigenden Werkzeugs darstellen (Abb. 1). Analog der meisten anderen RP-Verfahren wird dieses CAD-Modell in Ebenen (Querschnitte) zerlegt (Abb. 2). Unter Nutzung spezieller Tools der CAM-Software werden die Querschnitte unter der Maßgabe optimierter Werkstoffausnutzung auf einer Blechtafel verteilt. Die Größe der Blechtafel und der Abstand der Einzelquerschnitte zueinander sind frei wählbar. Zusätzlich können die Schichten beschriftet werden.

Bauprozess

Die Einzelquerschnitte werden durch Laser-Schneiden ausgeschnitten und mit einer geeigneten Technologie gefügt. Zum Erzielen ausreichender Festigkeit, hoher Maßhaltigkeit und von geringstem Verzug sowie unter Beachtung wirtschaftlicher Aspekte werden hierfür die Fügevarianten

- Schweißen,
- Löten,
- Kleben,
- Schrauben,
- Verstiften sowie
- Kombinationen von Einzelverfahren untersucht und Vorzugsvarianten entsprechend der genannten Optimierungskriterien ermittelt.

Endbearbeitung und Oberflächenveredlung

Im Anschluss an die Fertigung des Werkzeugrohlings erfolgen die Endbearbeitung und Oberflächenveredlung, um je nach Beanspruchung und Soll-

Stückzahl die erforderlichen Genauigkeiten und Oberflächeneigenschaften einzustellen. Zur Zeit- und Kostenersparnis wird hierbei konsequent nach dem Grundsatz verfahren, nur die unbedingt notwendige Präzision und Verschleißfestigkeit einzustellen. Der dazu erforderliche Handlungsspielraum ergibt sich aus der Verfügbarkeit und Kombination des

- FräSENS mit unterschiedlichen Werkzeugen und Schnittwerten (Abb. 3),
- und der thermischen Oberflächenbehandlungsverfahren
- Laser-Pulver-Auftragschweißen,
- Plasma-Pulver-Auftragschweißen und
- Plasmaspritzen ohne und mit Laserunterstützung.

In Abb. 4 sind beispielhaft die Hälften eines fertigen, lamellierten Rohlings eines Umformwerkzeugs dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein Prägewerkzeug mit den Gesamt-Abmessungen von 450 mm · 450 mm · 140 mm (Abb. 5).

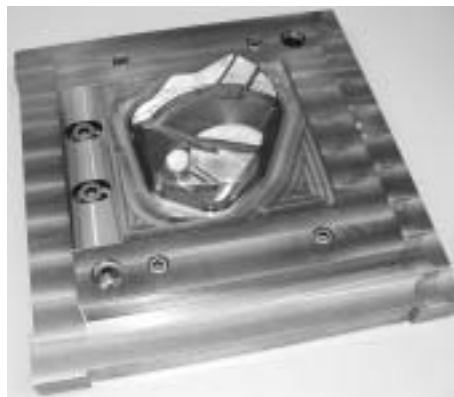


Abb. 5: Komplett montiertes Werkzeug

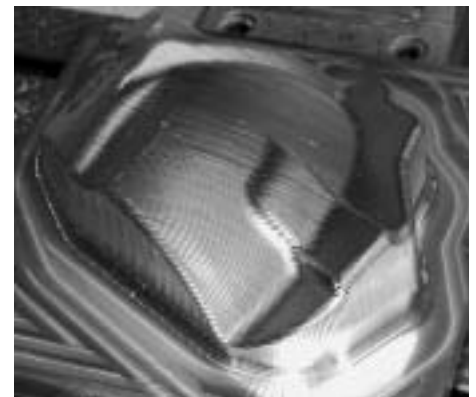


Abb. 4: Teilbearbeitete Hälften eines Prägewerkzeugs, oben: Matrize, unten: Stempel

Simulation des Laser-Pulver-Auftragschweißens

Aufgabenstellung

Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes zur Prozess-Simulation komplexer oberflächentechnischer Produktionsprozesse (SIMKOPP) wird bis Mitte 2002 das Programmsystem LAVA zur Simulation des Laser-Pulver-Auftragschweißens entwickelt. Vorgesehen ist eine "virtuelle Beschichtungsanlage", die den industriellen Beschichtungsprozess von den Maschinenstellgrößen bis zum Bearbeitungsergebnis simuliert. Unter letzterem werden die erzielte Schmelzraupengeometrie, das Temperaturfeld in der Prozesszone und alle daraus ableitbaren Schlussfolgerungen über Beschichtungsrate, Energieverbrauch, Pulvernutzungsgrad, Anbindefehler, unerwünschte Substrataufschmelzung usw. verstanden. Mit dieser virtuellen Anlage sollen in der Produktionsvorbereitung Bearbeitungsergebnisse vorausberechnet werden, ohne die reale Anlage zu belasten, um die Prozessführung zu optimieren und gleichzeitig Betriebskosten zu sparen.

Lösungsweg

Beim Laser-Pulver-Auftragschweißen wird der pulverförmige Zusatzwerkstoff durch eine Düse auf das Substrat gebracht, wobei er vom Laserstrahl erst vorgewärmt und spätestens nach dem Eintauchen in das Schmelzbad aufgeschmolzen wird. Dabei darf das Substrat nur leicht angeschmolzen werden, um einerseits eine gute metallurgische Anbindung der Schicht zu gewährleisten, andererseits aber eine Verschlechterung der Schichteigen-

schaften durch Aufmischung mit dem Substratwerkstoff zu vermeiden. Das stellt hohe Anforderungen an das Temperaturfeld, dessen Berechnung folglich Hauptaufgabe der Software ist. Zu simulieren sind dazu:

- die Wechselwirkung der Teilchen mit dem Laserstrahl vor dem Eintauchen und
- der Masse- und Wärmetransport im Schmelzbad, der die Schichtgeometrie und -haftung und den Grad der Substratanschmelzung bestimmt.

Die selbstkonsistente Simulation des Schichtbildungsprozesses erfordert Strömungs- und Temperaturfeldberechnungen in einem Schmelzbad mit einer bewegten Erstarrungsfront und einer freien Oberfläche, an der Masse und Energie durch vorgewärmte Pulverteilchen und Laserstrahlung zugeführt werden. Zur Vermeidung zeitaufwändiger numerischer Rechnungen wird für die Schmelzbadgeometrie ein plausibler Ansatz mit freien Parametern gemacht, der der dominierenden Rolle der Oberflächenspannung gerecht wird. Wesentlichen Einfluss auf die Temperaturverteilung hat auch die Marangoni-Strömung, eine durch die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung verursachte Oberflächenströmung. Sie wird - in Abhängigkeit vom Temperaturfeld - näherungsweise analytisch berechnet. Damit ergibt sich eine (temperaturabhängige) Verteilung von Wärmequellen an der Schmelzbadoberfläche, aus der das Temperaturfeld mit Hilfe der so-

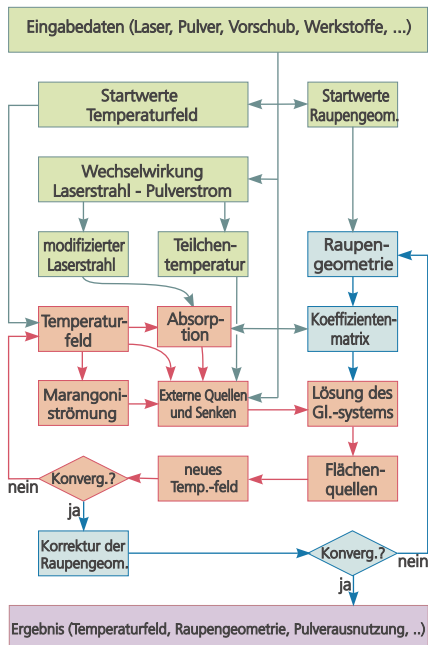


Abb. 1: Flussdiagramm zur Prozess-Simulation des Laser-Pulver-Auftragschweißens: Im inneren Iterationszyklus (rot) wird das strömungsabhängige Temperaturfeld berechnet, im äußeren Zyklus (blau) die Schmelzbadgeometrie angepasst

Ansprechpartner

Dr. Dietrich Lepski
Tel.: 0351 / 2583 222
dietrich.lepski@iws.fraunhofer.de



nannten Rosenthal-Lösung der Wärmeleitungsgleichung halbanalytisch mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand berechnet werden kann. Wegen der wechselseitigen Abhängigkeit von Temperaturfeld, Strömung und Schmelzbadgeometrie ist dies dennoch eine hochgradig nichtlineare Aufgabe, die in einem zweifach geschachtelten Iterationsprozess zu lösen ist. Abb. 1 zeigt das zugehörige Fluss-Schema.

Ergebnisse

Die Programmentwicklung ist noch nicht abgeschlossen. Erste Ergebnisse liegen aber bereits vor und beweisen die Funktionsfähigkeit des Konzepts. So zeigt Abb. 2 an einem Beispiel die Temperatur der Pulverteilchen vor dem Eintauchen und die Energieverluste durch Streuung als Funktionen der Teilchengröße: Sobald die Laserleistung P ausreicht, die kleineren Teilchen zu verdampfen, kommt es zu einer instabilen Verstärkung der Laserstrahlabsorption, was schon bei geringem Leistungsanstieg unerwünschte Aufmischungen mit dem Substratwerkstoff und Porenbildung verursachen kann, insbesondere bei erhöhtem Feinanteil des Pulvers (Abb. 3).

Durch die Simulation der Erwärmung der Pulverteilchen vor dem Eintauchen in das Schmelzbad und die Berechnung des Temperaturfeldes im Bereich des Schweißbraupenkopfes lassen sich die Bedingungen für den Eintritt dieses unerwünschten Effektes vorausbestimmen und die erforderlichen Maßnahmen ableiten.

Das Programm ermöglicht die Ermittlung von Tendenzen bei Variation der Prozessparameter und kann somit das Prozessverständnis verbessern und die Weiterentwicklung des Verfahrens erleichtern. Die Software lässt sich auch als Ausgangsbasis für weiterführende Rechnungen verwenden, z. B. zur Bestimmung und Minimierung der beim Auftragschweißen entstehenden mechanischen Spannungen und Deformationen, die zu Rissbildung und Schichtablösung sowie zum Bauteilverzug führen können.

Nach Abschluss der gegenwärtig laufenden Programmentwicklung soll sich eine Test- und Konsolidierungsphase anschließen, in der mit Unterstützung interessierter Unternehmen die Software an die Bedingungen weiterer Beschichtungsanlagen angepasst, die Palette der verfügbaren Substratmodelle (Bauteilgeometrie) erweitert und empirische Parameter durch Vergleich mit experimentellen Tests bestimmt werden sollen.

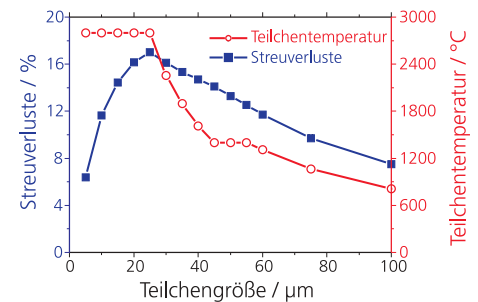


Abb. 2: Teilchentemperatur vor dem Eintauchen und Streuverluste über der Teilchengröße

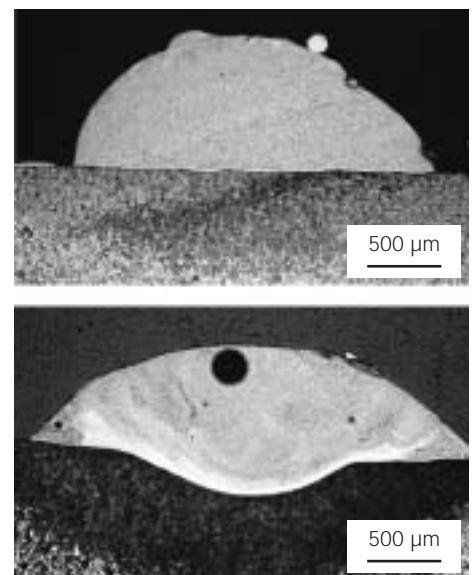


Abb. 3: Schweißbraunen einer NiCrBSi-Legierung auf dem Stahl 20MnCr5 bei 700 W (oben) und 800 W Laserleistung (unten) bei erhöhtem Feinanteil des Pulvers



Prof. Dr. Berndt Brenner
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 207)



Dr. Steffen Bonß
Gruppenleiter Randschichtverfahren
(Tel. 2583 201)



Dr. Jens Standfuß
Gruppenleiter Schweißen
(Tel. 2583 212)

Technologien zum beanspruchungsgerechten Härten von Stählen mittels Laser und / oder Induktion

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

- Entwicklung von Randschichthärtetechnologien mit Hochleistungs-Diodenlasern, CO₂-Lasern, Nd:YAG-Lasern und / oder Induktion,
- Randschichtveredelung von Entwicklungs- und Prototypmustern.



Härten der Greiferkurve einer Druckmaschine mit Hochleistungs-Diodenlaser

Schweißen schwer schweißbarer Werkstoffe

Das Laserstrahlschweißen ist ein modernes Schweißverfahren, das einen breitgefächerten industriellen Einsatz, insbesondere in der Massenfertigung, gefunden hat. Vorwiegend werden jedoch nur Werkstoffe mit geringem Kohlenstoffgehalt geschweißt. Einen neuen Zugang zur Herstellung rissfreier Verbindungsschweißungen an härtbaren Stählen, Austeniten, Al- und Sonderlegierungen sowie an Bauteilen mit eingeschränktem Formänderungsvermögen ermöglicht das im IWS entwickelte Laserstrahlschweißen mit integrierter Wärmebehandlung. Auf der Basis eines umfangreichen metallphysikalischen Hintergrundwissens und einer unikalenen Laserschweißanlage mit integrierter Wärmebehandlung bieten wir an:

- Entwicklung von Schweißtechnologien,
- Prototypschweißungen,
- Verfahrens- und Anlagenoptimierung,
- Ausarbeitung von Schweißanweisungen.



Laserstrahlschweißen eines Schaltrades für PKW-Handschatgetriebe, 16MnCr5 einsetzgehärtet

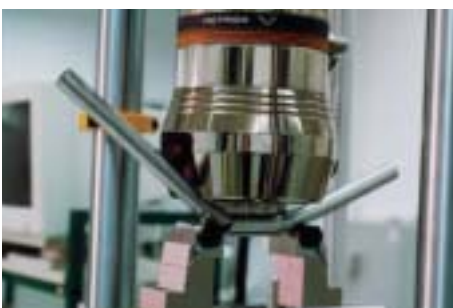


Dr. Bernd Winderlich
Gruppenleiter Werkstofftechnik /
Werkstoffcharakterisierung
(Tel. 2583 224)

Komplexe Werkstoff- und Bauteil- charakterisierung

Die Beherrschung moderner Füge- und Randschichtverfahren erfordert Kenntnisse von den ablaufenden strukturellen Änderungen bis zu den resultierenden Bauteileigenschaften. Auf der Basis langjähriger Erfahrungen und einer umfangreichen, modernen Geräteausrüstung auf dem Gebiet der strukturellen, mikroanalytischen und mechanischen Werkstoffcharakterisierung bieten wir an:

- metallographische, elektronenmikroskopische (REM, TEM) und mikroanalytische (EDX) Charakterisierung der Realstruktur von Metallen, Keramiken und Werkstoffverbunden
- Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die Bauteilauslegung und Qualitätssicherung
- Eigenschaftsbewertung von randschichtbehandelten und geschweißten Bauteilen
- Strategien zur werkstoff- und beanspruchungsgerechten Bauteilgestaltung
- Aufklärung von Schadensfällen



Prüfung von PKW-Scheibenwischergestängen aus Aluminium

Beispiele aus den Arbeiten 2001

1. Laserstrahlschweißen von Flugzeug-Rumpfstrukturen	56
2. Rissfreies Laserstrahlschweißen von Stahl/Eisenguss-Verbindungen	57
3. Innovativer Leichtbau durch Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen	58
4. Porenarmes Verbindungsschweißen von verzinkten Blechen im Überlappstoß	59
5. Verbesserung der Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Bleche aus Feinkornbaustählen durch lokales Anlassen	60
6. Anlasszonenfreies Härten mittels Hochleistungs-Diodenlaser	61
7. Verbesserung der Schwingfestigkeit von Laserschweißverbindungen aus Automatenstahl	62
8. Strukturcharakterisierung lasergasnitrierter Titanlegierungen	63
9. TEM-Untersuchung des Ausscheidungsverhaltens ausscheidungshärtbarer martensitischer Stähle	64
10. Qualitätssicherung von Wärmedämmschichten durch Thermoschocktests	65

Laserstrahlschweißen von Flugzeug-Rumpfstrukturen

Aufgabenstellung

Die europäische Luftfahrtindustrie ist zum Erhalt ihrer Wettbewerbsfähigkeit bestrebt, die Leistungsfähigkeit und Umweltverträglichkeit für Passagierflugzeuge zu verbessern und deren Herstellungskosten zu senken. Innerhalb der Fertigungskette kommt insbesondere neuen Fügeverfahren eine Schlüsselrolle zu, da das Nieten als dominierende Verbindungstechnik am Ende seiner Entwicklungsmöglichkeiten steht. Demgegenüber hat sich das Laserstrahlschweißen zum Fügen spezieller Aluminiumlegierungen als aussichtsreiche Alternative herauskristallisiert und wird deshalb bei der Fertigung von A318-Rümpfen eingesetzt. Um die Vorteile des Verfahrens voll auszunutzen, ist es erforderlich, eine breite Palette von Fügeverbindungen zu realisieren, die verfahrens- und anlagentechnische Weiterentwicklungen bedingen. Vor diesem Hintergrund soll ein umfassendes Versuchsprogramm die Entwicklungsaktivitäten des Auftraggebers unterstützen und begleiten.

Lösungsweg

Am IWS wurde eine bestehende CNC-gesteuerte Laserbearbeitungsanlage so umgerüstet, dass in der Dicke variierende Blechelemente (Panels) durch Schweißen mit linearen Verstärkungselementen (Stringern) im T-Stoß verbunden werden können (s. Abb. 1). Eine Besonderheit ist dabei das beidseitig gleichzeitige Schweißen mit zwei separaten Laserquellen. Hierfür wurden zwei CO₂-Laser so installiert und eingebunden, dass sich beide Strahlen in einem gemeinsamen Brennpunkt

fokussieren und im Raum bewegen lassen. Durch eine im Schweißkopf integrierte Führung wird der Stringer positioniert und die Lage der Laserspots relativ zur Fugestelle im Stoß auf dem Panel garantiert.

Ergebnisse

In Tests zum beidseitig gleichzeitigen Schweißen von Versuchsproben und Testpanels konnte die volle Funktionalität der Anlage nachgewiesen und die Übertragbarkeit der Schweißparameter auf die Serienanlage bei Airbus Deutschland sichergestellt werden. Als Ergebnis liegen für unterschiedliche Blechstärken, Stringerabmessungen, Haut-Stringer-Kombinationen und Werkstoffe optimierte Schweißparameter und Schweißverfahrensanweisungen vor, die porenarme, rissfreie Nähte mit einem Nahtflankenwinkel im vorgegebenen Wertebereich gestatten (Abb. 2) und die den strengen Qualitätskriterien der Luftfahrtindustrie genügen. Die Einhaltung der wichtigsten Prozessparameter wird online überwacht. Gegenwärtig werden die geschweißten Panels (Abb. 3) beim Auftraggeber bzw. bei der IMA GmbH Dresden ausführlichen statischen und zyklischen Tests unterworfen.

Parallel dazu werden Strategien entwickelt und verfahrenstechnisch umgesetzt, um die mechanische Belastbarkeit der Schweißnaht durch neu zu entwickelnde Schweißzusatzwerkstoffe zu erhöhen, durch spezielle geometrische Auslegungen die Schadenstoleranz der geschweißten Panels zu verbessern und durch prozessbegleitende Maßnahmen den Verzug zu verringern.



Abb. 1: Gantry-Laserschweißportal zum beidseitig gleichzeitigen Schweißen von Flugzeug-Panels

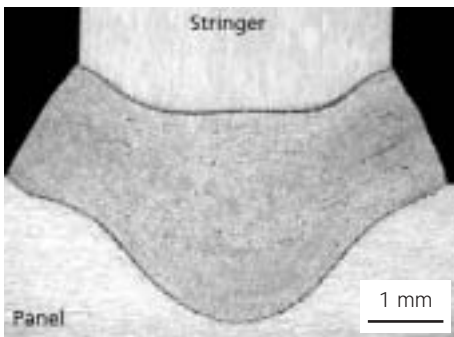


Abb. 2: Querschliff einer beidseitig gleichzeitig geschweißten Panel-Stringer-Verbindung im T-Stoß



Abb. 3: Komplett geschweißtes Flugzeug-Testpanel

Ansprechpartner

Dr. Jens Standfuß
Tel.: 0351 / 2583 212
jens.standfuss@iws.fraunhofer.de



Rissfreies Laserstrahlschweißen von Stahl/Eisenguss-Verbindungen



Aufgabenstellung

Gusseisen mit Kugelgraphit ist ein moderner Konstruktionswerkstoff, der durch sein wirtschaftliches Herstellungsverfahren, seine gute Vergießbarkeit und gutes Formfüllungsvermögen eine Vielzahl von Konstruktionen ermöglicht. Für viele Anwendungen sind die mechanische Festigkeit unter statischer und zyklischer Belastung, das Dämpfungsvermögen sowie die Möglichkeiten einer thermischen Randschichthärtung des Gusseisens mit Kugelgraphit von Vorteil. Eine Verbreiterung der Anwendungspalette ist durch das Fügen von Gusseisenteilen und Stahlbauteilen zu erwarten. Hierzu wurden die Möglichkeiten des Laserinduktionsschweißens sowie das Laserstrahlschweißen mit werkstoffangepasstem Zusatzwerkstoff untersucht. Die Umsetzung der Ergebnisse erfolgte am Beispiel der Verbindung von einsetzgehärtetem Tellerrad mit dem gusseisernen Ausgleichsgetriebe für ein PKW-Differentialgetriebe.

Lösungsweg

Die Untersuchungen zum Laserinduktionsschweißen erfolgten an den Gusswerkstoffen GGG40 und GGG60 als artgleiche Schweißungen sowie in Kombination mit den Stählen StE690 und 42CrMo4. Die Schweißversuche an Werkstoffproben mit einer Wandstärke von 6 mm erfolgten mit einem 6 kW-CO₂-Laser, für die prozessintegrierte induktive Vorwärmung wurde ein 80 kW-MF-Induktionsgenerator verwendet. Die Charakterisierung der Schweißnahtqualität erfolgte an metallographischen Querschliffen sowie durch Härtemessungen.

Ergebnisse

Die Untersuchungen zum Laserinduktionsschweißen mit unterschiedlichen Vorwärmtemperaturen ergaben, dass für alle untersuchten artgleichen Gussverbindungen und Werkstoffkombinationen Parameter für das prozesssichere und rissfreie Laserstrahlschweißen ohne die Verwendung von Zusatzwerkstoff existieren. Alternativ kann bei höheren Zähigkeitsanforderungen die Rissbildung auch durch einen werkstoffangepassten Schweißzusatzwerkstoff verhindert werden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgte die Entwicklung eines Laserstrahlschweißverfahrens für das Verschweißen einsetzgehärteter Tellerräder mit den gusseisernen Ausgleichsgetrieben. Der für eine hinreichende Duktilität des Schweißgutes notwendige Restaustenitanteil wurde über einen werkstoffangepassten Zusatzdraht sowie über ein ausreichend hohes C-Angebot auf Seite des einsetzgehärteten Tellerrades durch die hochkohlenstoffhaltige Einsatzhärtungsschicht gewährleistet. Dies führte zu rissfreien und zyklisch hochbelastbaren Schweißverbindungen (Abb. 1). Die mittels Laserstrahlschweißen mit werkstoffangepasstem Zusatzdraht hergestellten Prototypen (Abb. 2) wurden in Prüfstandsläufen und in Fahrzeugversuchen beim industriellen Auftraggeber erfolgreich getestet und stehen vor der Serieneinführung.

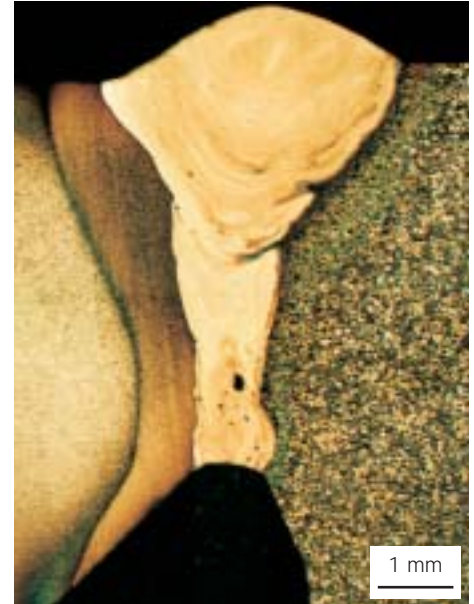


Abb. 1: Nahtausbildung beim Laserstrahlschweißen von einsetzgehärtetem Stahl mit Gusseisen bei Verwendung eines werkstoffangepassten Zusatzdrahtes



Abb. 2: Laserstrahlgelgeschweißtes Differentialgetriebe (Verbindung von einsetzgehärtetem Tellerrad mit gusseisernem Ausgleichsgetriebe)

Ansprechpartner

Dr. Jens Standfuß
Tel.: 0351 / 2583 212
jens.standfuss@iws.fraunhofer.de

Innovativer Leichtbau durch Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen

Aufgabenstellung

Basierend auf der geringen Dichte von ca. $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ haben Magnesiumlegierungen ein großes Potenzial für Leichtbauanwendungen. Sie übertreffen zum Teil die spezifischen Festigkeiten von Aluminium, Titan und Stahl. Ungeachtet dieser Vorzüge kam die Anwendung von Magnesium nach kurzer Euphorie 1945 wieder zum Erliegen. Mit der Verfügbarkeit von wirksameren Korrosionsschutzschichten werden Magnesiumlegierungen im Zuge der Leichtbaubestrebungen im Transportwesen wieder interessant.

Für die Herstellung dynamisch hochbeanspruchter Fahrzeugkomponenten in Leichtbauweise eignet sich beispielsweise die Magnesiumknetlegierung ZK60. Obwohl diese Legierung gut gießbar ist, besteht die Notwendigkeit, komplexe dreidimensionale Bauteile zu schweißen. In der konventionellen Schweißtechnik gilt jedoch die genannte Legierung auf Grund einer ausgesprochenen Heißbrissneigung als nicht schweißbar. Es wurde deshalb untersucht, inwiefern ein Laser-basierendes Fügeverfahren zum Schmelzschweißen von ZK60 einsetzbar ist und welche mechanischen Eigenschaften die erhaltenen Schweißverbindungen aufweisen.

Lösungsweg

Aus Erfahrungen mit anderen Leichtbaumaterialien und -komponenten fiel eine erste Vorauswahl unter den verfügbaren Laserquellen auf den CO_2 -Laser. Bei diesem Typ lassen sich hohe Energiedichten und ausgezeichnete Strahlqualitäten realisieren, was für das Schweißen von Magnesium- und Aluminiumlegierungen von großer Bedeutung ist.

Das CO_2 -Laserstrahlschweißen wurde sowohl allein wie auch als sogenanntes Hybrid- bzw. Kombiverfahren für die Schweißbarkeitsuntersuchungen angewendet. Hierbei wird der Laserstrahl mit verschiedenen weiteren Wärmequellen gekoppelt, um gezielt auf die Erstarrungs- und Abkühlungsbedingungen im Schweißgut Einfluss zu nehmen. Es wurden I-Stoß-Verbindungen an stranggepressten Profilen geschweißt und visuell, metallographisch und mechanisch charakterisiert.

Ergebnisse

Unter Einsatz eines CO_2 -Slab-Lasers wurden in ZK60 zufriedenstellende Nahtqualitäten bei großer Einschweißtiefe erzielt. Die Streckenenergie des verwendeten Schweißverfahrens ist entscheidend für die Unterdrückung von Heißbrissen.

Den industriellen Anforderungen genügende Nahtqualitäten (Abb. 1) konnten unter Einsatz eines CO_2 -Slab-Lasers höchster Strahlqualität erreicht werden. Damit lässt sich die Heißbrissneigung ab einer Grenzintensität unterdrücken.

Das mit dem beschriebenen Verfahren erzeugte feinkörnige, rissfreie Nahtgefüge ist in Abb. 2 dargestellt. Fehlerfreie Schweißverbindungen besitzen darüber hinaus sehr gute mechanische Festigkeiten.

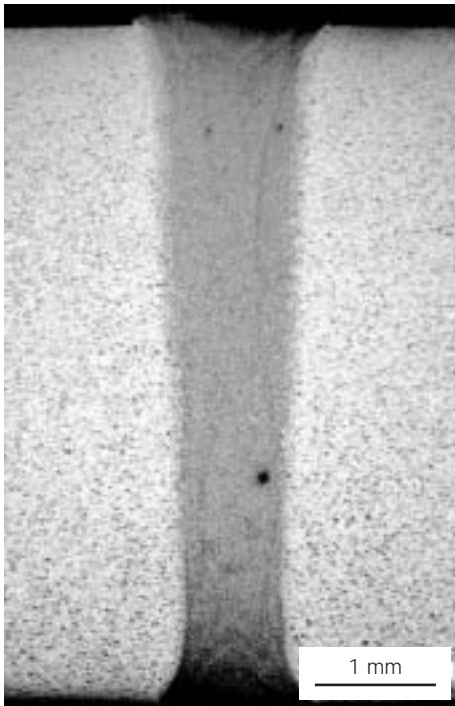


Abb. 1: CO_2 -Laserschweißnaht in der Magnesiumlegierung ZK60 mit Nahtbreite kleiner 1 mm und einer für Leichtmetalle verhältnismäßig großen Einschweißtiefe von 5 mm.

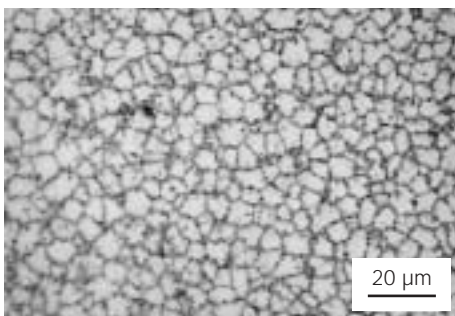


Abb. 2: Feinkörniges, rissfreies Mikrogefüge in der Schmelzzone

Ansprechpartner

Dr. Knut Barthel
Tel.: 0351 / 2583 151
knut.barthel@iws.fraunhofer.de



Porenarmes Verbindungsschweißen von verzinkten Blechen im Überlappstoß

Aufgabenstellung

Das Verbinden von verzinkten Feinblechen im Überlappstoß ist eine der aktuellen Herausforderungen bei der Herstellung von Karosserien in der Automobilindustrie. Durch das bereits bei 900 °C verdampfende Zink werden insbesondere beim Laserstrahlschweißen im Überlapp Schmelzauswürfe und Poren generiert, die die Festigkeit der Schweißnaht negativ beeinflussen. Es werden weltweit Möglichkeiten gesucht, den hocheffektiven Laserstrahlschweißprozess für solche Verbindungen zu qualifizieren und Poren und Auswürfe zu vermeiden.

Lösungsweg

Zur Lösung dieses Problems hat das Fraunhofer IWS Dresden bereits vor zwei Jahren erste erfolgversprechende Versuche durchgeführt. Ein Hochleistungs-Diodenlaser wird simultan mit dem den eigentlichen Schweißprozess ausführenden CO₂-Laser eingesetzt. Der großflächiger und mit deutlich geringerer Intensität als der CO₂-Laser wirkende Hochleistungs-Diodenlaser führt zu einer Vergrößerung des Schmelzbades im Bereich der Nahtoberseite. Die Schmelzbadlebensdauer wird verlängert. Dadurch kann der Zinkdampf einfacher entweichen, ohne das große Mengen Schmelze ausgeworfen werden.

Ergebnisse

In einer Reihe von systematischen Untersuchungen wurde das Verständnis für diesen Hybridschweißprozess erweitert. Die hier vorgestellten aktuellen Ergebnisse wurden bei einer Schweißgeschwindigkeit von 6 m min⁻¹ realisiert. Durch thermographische Aufnahmen wurde die positive Wirkung des Hochleistungs-Diodenlasers gezeigt und der Wirkmechanismus untersucht. Beim Schweißen mit dem sehr gut fokussierten CO₂-Laser tritt Zinkdampf nach Abkühlung der Nahtoberfläche unter hohem Druck aus und wirft Schmelze aus (siehe Abb. 1a).

Durch die zusätzliche Energie des Hochleistungs-Diodenlasers kann die Nahtoberseite länger flüssig gehalten werden (siehe Abb. 1b). Der Zinkdampf tritt leichter aus, baut keinen hohen Druck auf und Poren und Schmelzauswürfe werden extrem reduziert (vgl. Abb. 1c und 1d). Die in der Thermographie gesehenen heißen Punkte können unmittelbar mit den Schmelzauswürfen korreliert werden. Als Ergebnis der Untersuchungen kann das Hybridschweißen mit CO₂- und Hochleistungsdiodenlaser beim Überlappstoß verzinkter Bleche mit hohen Schweißgeschwindigkeiten als stabiler Prozess eingesetzt werden.

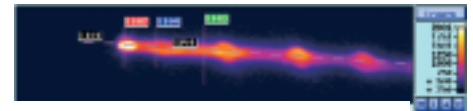


Abb. 1a: Thermographische Aufnahme, nur CO₂-Laser

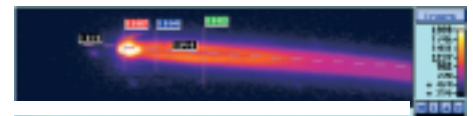


Abb. 1b: Thermographische Aufnahme, Hybridschweißen

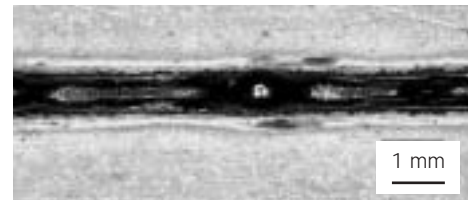


Abb. 1c: Nahtoberfläche, nur CO₂-Laser

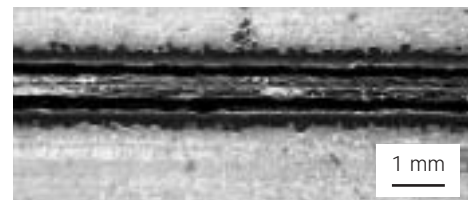


Abb. 1d: Nahtoberfläche, Hybridschweißen

- Abb. 1: Schweißen von verzinktem Blech im Überlapp:
- Blechdicke 0,8 mm, elektrogalvanisiert
 - Dicke der Zn-Schicht 8,4 µm
 - CO₂-Laser: Rofin DC035, 3,5 kW
 - HLDL: Rofin DL020, 1,7 kW,
 - Position HLDL: mittig über CO₂-Laserspot

Ansprechpartner

Dr. Steffen Bonß
Tel.: 0351 / 2583 201
steffen.bonss@iws.fraunhofer.de

Verbesserung der Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Bleche aus Feinkornbaustählen durch lokales Anlassen

Aufgabenstellung

Der Einsatz höchstfester Feinkornbaustähle (u.a. TRIP-Stähle) wird zukünftig insbesondere im Automobilbau zunehmen. Dadurch können Karosserien aus Stahlblech deutlich leichter als bisher hergestellt werden. Dies wird von einigen Automobilherstellern als Alternative zum Einsatz von Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium oder Magnesium betrachtet.

Das hocheffektive Laserstrahlschweißen soll in der Karosserieherstellung herkömmliche Fügeverfahren wie z.B. das Punktschweißen mehr und mehr ablösen. Bei den derzeit im Serieneinsatz befindlichen Blechqualitäten ist der Laser besonders bei der Herstellung von maßgeschneiderten Platinen (Tailored Blanks) nicht mehr wegzudenken. Das Laserstrahlschweißen von TRIP-Stählen jedoch ist mit einem Aufhärten der Schweißnaht verbunden. Dies reduziert die Umformbarkeit solcher Platinen.

Ergebnisse

Für erste Versuche zur lokalen Wärmebehandlung wurde ein 1,5 kW-Hochleistungs-Diodenlaser mit einer Standardoptik verwendet. Die Oberflächentemperatur wurde durch das im Fraunhofer IWS Dresden für das Laserstrahlhärten entwickelte temperaturgeführte Laserleistungsregelsystem lasertronic® LompocPro auf verschiedenen Temperaturen konstant gehalten. Da der Prozess eine gewisse Einwirkzeit benötigt, werden bei 1,6 mm dicken Blechen mit einer Standardoptik nur Vorschubgeschwindigkeiten von 100 mm min^{-1} erreicht. Gegenüber der Schweißgeschwindigkeit von 4000 mm min^{-1} ist das zu gering und würde einen effektiven Fertigungsprozess behindern. Da jedoch nur 250 W Laserleistung für dieses Beispiel benötigt wurden, besteht die Möglichkeit, durch optimierte Strahlformung und dadurch bessere Ausnutzung einer verfügbaren Laserleistung von bis zu 4 kW diese Geschwindigkeit erheblich zu steigern.

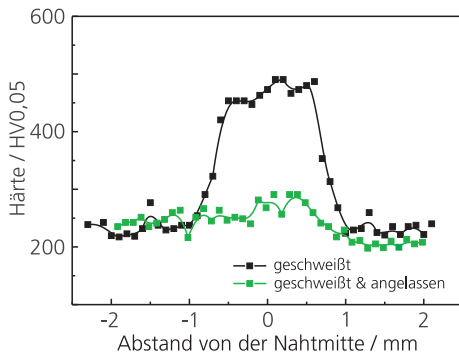


Abb. 1: Mikrohärtemessungen laserstrahlgeschweißter Nähte, Material TRIP RA/K 40/70, vor und nach der lokalen Wärmebehandlung, Wärmebehandlung mit 250 W und 100 mm min^{-1} , Laserspotgröße $2 \cdot 4 \text{ mm}^2$



Abb. 2: Laserstrahlgeschweißte Stahlbleche TRIP RA/K 40/70, vor und nach der lokalen Wärmebehandlung

Lösungsweg

Um eine bessere Umformbarkeit zu erreichen, wird mit einem Hochleistungs-Diodenlaser die Schweißnaht wärmebehandelt. Dadurch werden die Härte in der Naht reduziert und Spannungen abgebaut. Das Laserstrahlschweißen von verzinkten Feinblechen wird dergestalt durchgeführt, daß die Naht so schmal ist, daß die Fernwirkung des Zinks noch einen ausreichenden Korrosionsschutz gewährt. Die Wärmebehandlung muß deshalb so geführt werden, daß keine weitere Schädigung der Zinkschicht auftritt.

Weiteres Steigerungspotenzial ergibt sich, wenn man die Wärmebehandlung unmittelbar an das Schweißen anschließt. Die in der Naht befindliche Restwärme reduziert die für die Wärmebehandlung notwendige Leistungsdichte. Zukünftig lassen sich mit dieser Technologie besser verformbare Tailored Blanks aus höchstfesten Stählen herstellen.

Ansprechpartner

Dr. Steffen Bonß
Tel.: 0351 / 2583 201
steffen.bonss@iws.fraunhofer.de



Anlasszonenfreies Härten mittels Hochleistungs-Diodenlaser

Aufgabenstellung

Das Randschichthärten mittels Hochleistungs-Diodenlaser findet auf Grund seiner Vorteile, wie geringem Wärmeintrag und daraus resultierend geringem Verzug, der guten Beherrschung des Einhärtetiefenbereiches von 0,1 bis 1,0 mm und der besseren Zugänglichkeit von kleinen Bohrungen, Kerben und Löchern zunehmend Eingang in die Produktion. Wie bei jedem Strahlhärtingsverfahren, bei dem die Härtingzonen spurweise im Vorschub erzeugt werden, entstehen beim Härten von rotationssymmetrischen Bauteilen durch die erneute Temperaturbeaufschlagung beim Erreichen des Spuranfanges hoch angelassene, weiche Zonen. Bei Ermüdungs- oder Verschleißbelastungen mit hohen lokalen Beanspruchungen wirken diese Anlasszonen eigenschaftverschlechternd. Ziel der Arbeiten war es deshalb, praktikable Verfahren zum anlasszonenfreien Randschichthärten von rotationssymmetrischen Teilen kleinerer Durchmesser zu entwickeln.

Lösungsweg

Die Lösung besteht darin, das Bauteil mit einer solch hohen Geschwindigkeit rotieren zu lassen, dass sich der Spurumfang beim Schließen des Härtingringes noch nicht auf die Martensit-Starttemperatur abgekühlt hat. Bei weiter erhöhter Rotationsgeschwindigkeit entsteht ein austenitisierter Ring mit nahezu gleicher Temperatur entlang des Umfangs, der durch einfaches

Abschalten des Lasers (Standhärting, s. Abb. 1) oder durch zusätzliches Verfahren des Bauteiles in einer Richtung senkrecht zur Rotationsrichtung (Vorschubhärting, s. Abb. 2) abgeschreckt werden kann. Die einzustellenden Prozessparameter und der maximal nutzbare Bauteildurchmesser hängen sehr stark vom Umwandlungsverhalten des Stahles und seinen thermophysikalischen Eigenschaften ab und können mit Hilfe des Programmsystems GEOPT voroptimiert werden.

Durch Verwendung des Temperaturregelsystems lasertronic® LompocPro kann die Härtetemperatur auf bis zu ± 5 K genau eingestellt werden und damit der Einfluss der mit der Behandlungsdauer u. U. auftretenden zunehmenden Bauteilaufheizung kompensiert werden.

Ergebnisse

Damit steht ein effektives Härteverfahren für das beanspruchungsgerechte Randschichthärten für eine Vielzahl von rotationssymmetrischen Teilen zur Verfügung. Mit diesem Verfahren können Kreisflächen, Kreisringe, Kreissektoren, Zylinder- oder Kegelflächen, Ringnuten, Wellen, Dichtringsitze o. ä. anlasszonenfrei schnell und verzugsarm gehärtet werden. Die Eignung des Verfahrens wurde an mehreren Applikationen wie z. B. Magnetventilen, Hydraulikventilen, Wellen, Zentrierspitzen u. ä. nachgewiesen.



Abb. 1: Anlasszonenfreies Laserstrahlhärten einer verschleißbelasteten Kreisringfläche (Standhärting)



Abb. 2: Anlasszonenfreies Laserstrahlhärten an einem kegelförmigen Ventileinsatz für Hydraulikventile (Vorschubhärting)

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Marko Seifert
Tel.: 0351 / 2583 204
marko.seifert@iws.fraunhofer.de

Verbesserung der Schwingfestigkeit von Laserschweißverbindungen aus Automatenstahl

Aufgabenstellung

Die Verknüpfung der hervorragenden Zerspanbarkeit von Automatenstählen mit wirtschaftlich effizienten Fügeverfahren stellt eine anspruchsvolle Zielstellung dar. Aussagen zur eingeschränkten Schweißbeignung von Automatenstählen infolge von Heißrissegefahr resultieren im wesentlichen aus Erfahrungen der konventionellen Schweißtechnik. Da es sich bei diesen Stählen gewissermaßen um absichtlich verunreinigte und versprödete Werkstoffe handelt, sind die Festigkeits- und Verformungskennwerte, insbesondere die Schwingfestigkeit, nicht sehr hoch. Das Schweißen stellt einen zusätzlichen Eingriff dar, der sich sehr nachteilig auf die Schwingfestigkeit auswirken kann. Die Eindämmung von Heißrissen und Poren ist deshalb eine vorrangige Forderung an das Schweißverfahren.

Lösungsweg

Die komplexe Wechselwirkung spannungsmechanischer und schmelzmetallurgischer Faktoren der Heißrissbildung eröffnet eine Vielzahl von Eingriffsmöglichkeiten zu deren Eindämmung. Besondere Chancen haben Verfahren, welche eine möglichst weitgehende Entkopplung beider Einfluss-

faktoren ermöglichen. Die beiden unabhängig voneinander steuerbaren Wärmequellen Laser und Induktion erscheinen dafür hervorragend geeignet.

Untersucht wurden sowohl lasergeschweißte als auch mit induktiver Vorwärmung lasergeschweißte Verbindungen aus dem Stahl 9SMnPb28. Zur Beurteilung des Einflusses von inneren Nahtdefekten, insbesondere Heißrissen, auf die Schwingfestigkeit der Schweißverbindungen wurden Proben mit blecheben überschlifffener Naht im Wöhlerversuch bis zu einer Grenzlastspielzahl $N_G = 2 \cdot 10^6$ (bei $R = 0$) getestet.

Ergebnisse

An den herkömmlich lasergeschweißten Proben treten typische Heißrisse entlang der Nahtmitte auf, welche auch den Ausgangspunkt für den Ermüdungsbruch bilden (Abb. 1). Die mit induktiver Vorwärmung geschweißten Proben sind rissfrei und zeigen in der Naht eine homogene Härteverteilung mit geringer Aufhärtung gegenüber dem Grundwerkstoff (Abb. 2). Sie erreichen wesentlich höhere Schwingfestigkeitskennwerte als die ohne Vorwärmung geschweißten Proben und sind hinsichtlich ihrer zyklischen Belastbarkeit dem ungeschweißten Grundwerkstoff nahezu gleichwertig (Abb. 3). Dies findet seinen Ausdruck auch darin, dass der Ermüdungsbruch bevorzugt außerhalb der Naht im Grundwerkstoff stattfindet. Die Chancen und Grenzen des induktiv unterstützten Laserstrahlschweißens für die Verbesserung der Schwingfestigkeit von geschweißten Bauteilen aus Automatenstählen liegen in der Beherrschung eines engen Prozessfensters beim Schweißen.

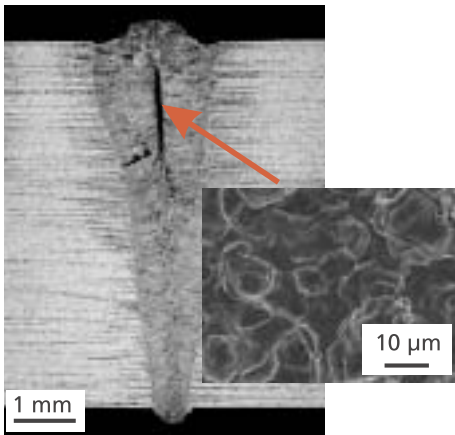


Abb. 1: Schweißnaht nach herkömmlichem Laserstrahlschweißen, Detail: REM-Aufnahme der Oberfläche des Erstarungsrisse, freigelegt durch Ermüdungsbruch senkrecht zur Schlifffebene

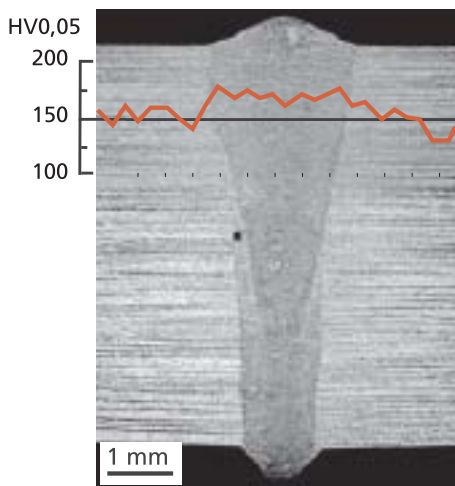


Abb. 2: Schweißnaht nach induktiv unterstütztem Laserstrahlschweißen, Härteverteilung

Ansprechpartner

Dr. Bernd Winderlich
Tel.: 0351 / 2583 224
bernd.winderlich@iws.fraunhofer.de

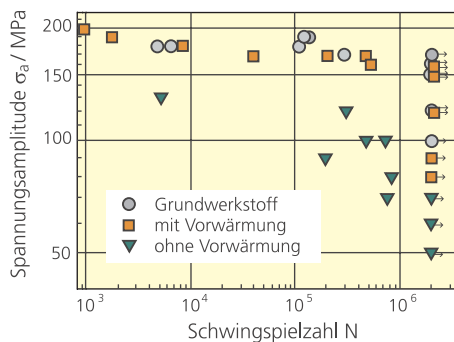


Abb. 3: Wöhlerschaubild - blecheben bearbeitete Laserschweißverbindungen mit und ohne Vorwärmung, Grundwerkstoff 9SMnPb28



Strukturcharakterisierung lasergasnitrierter Titanlegierungen

Aufgabenstellung

Das Lasergasnitrieren von Titanwerkstoffen bietet Möglichkeiten für die Verbesserung ihrer in der Regel unzureichenden Beständigkeit gegen Gleit-, Abrasiv-, und Oszillationsverschleiß. Die industrielle Anwendbarkeit dieses Verfahrens für zyklisch beanspruchte Teile wird allerdings stark eingeschränkt oder verhindert, weil durch das Lasernitrieren bei höheren Stickstoffgehalten Rissbildung und ein starker Abfall der Dauerschwingfestigkeit hervorgerufen werden. Die zugrundeliegenden mikrostrukturellen Ursachen und deren Zusammenwirken mit spannungsmechanischen Einflussfaktoren sind bisher nicht geklärt. Weiterhin wurden die sich ausbildenden Gefüge und Realstrukturen bisher nur unzureichend erforscht. Aus diesem Grund werden im Rahmen eines DFG-Projektes die sich beim Lasergasnitrieren in Abhängigkeit von den eingestellten Prozessparametern ausbildenden Gefüge und Mikrostrukturen durch den Einsatz sich gegenseitig ergänzender strukturanalytischer Methoden (LM, REM, TEM, EDX) detailliert untersucht.

Lösungsweg

Zur vergleichenden Charakterisierung wurden von den mit unterschiedlichen Prozessparametern lasernitrierten Titanproben zunächst metallographische Querschliffe hergestellt, die im Lichtmikroskop untersucht wurden. Aufgrund ihrer zum Teil submikroskopischen Abmessungen können die entstehenden Erstarrungs- und Umwandlungsstrukturen jedoch nur durch den Einsatz der Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie hinreichend charakterisiert werden. Um die am

REM und TEM verfügbaren hochauflösenden Abbildungs-, Beugungs- und Analyseverfahren einsetzen zu können, wurden sowohl elektrolytische als auch ionenstrahlgestützte Präparationsverfahren zur Herstellung artefaktfreier Präparate erarbeitet.

Ergebnisse

Am Beispiel einer mit einem Stickstoffanteil von 20 % im Prozessgas lasernitrierten ($\alpha+\beta$)-Titanlegierung (Ti6Al4V) wird hier gezeigt, dass nur durch den gleichzeitigen Einsatz unterschiedlicher Untersuchungstechniken ein umfassendes Verständnis über die ablaufenden mikrostrukturellen Prozesse erzielt werden kann. In der lichtmikroskopischen Übersichtsaufnahme (Abb. 1) erkennt man als wesentliches Merkmal der Erstarrungsstruktur die Korngrenzen der ursprünglichen β -Körner. Aus REM-Untersuchungen ionenpolierter Querschliffe (Abb. 2) geht hervor, dass bei der Abkühlung aus der bei hohen Temperaturen stabilen β -Phase feiner, platten- bzw. nadelförmiger α' -Martensit entsteht. Durch Hell- und Dunkelfeldabbildungen, Elektronenbeugung und EDX-Untersuchungen im TEM konnte nachgewiesen werden, dass sich an den Grenzen des α' -Martensits β -Titan bzw. ein feindisperses Gemisch aus α' - und β -Titan anlagert (vgl. Abb. 3) und dass sich bereits einige globulare TiN-Partikel mit hexagonaler Struktur bilden.

Auf Grundlage dieser und weiterer mikrostruktureller Erkenntnisse gelang es, die Grenzhärte, bis zu der mikrorissfreie Schichten hergestellt werden können, anzuheben.

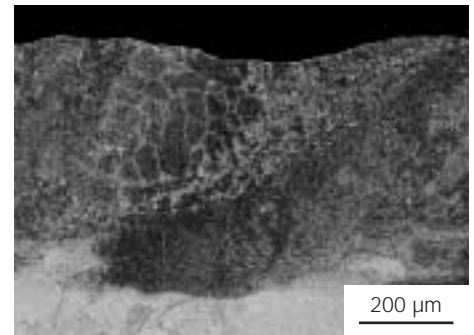


Abb. 1: Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme eines metallographischen Schliffes, der einen Querschnitt durch eine lasernitrierte Titanprobe darstellt.

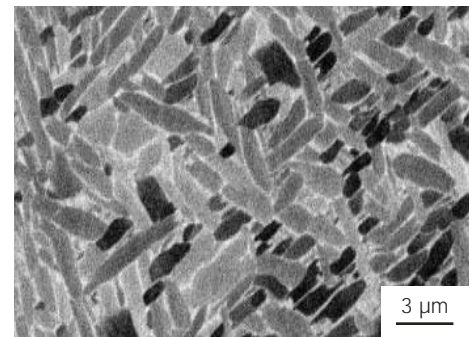


Abb. 2: REM-Detailaufnahme des martensitischen Gefüges innerhalb der lasernitrierten Schicht (Material- und Orientierungskontrast)

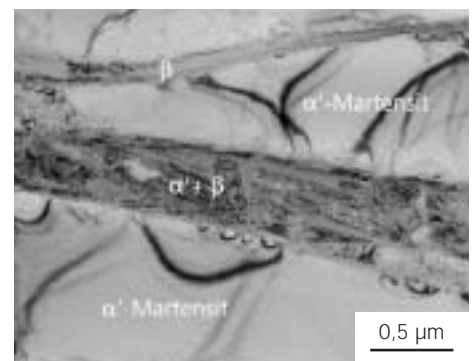


Abb. 3: TEM-Hellfeldaufnahme zur Darstellung der Realstruktur innerhalb der lasernitrierten Schicht
Detailaufnahmen der Grenzen zwischen den α' -Martensit-Bereichen

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Jörg Kaspar
Tel.: 0351 / 2583 216
joerg.kaspar@iws.fraunhofer.de

TEM-Untersuchung des Ausscheidungsverhaltens ausscheidungs-härtbarer martensitischer Stähle

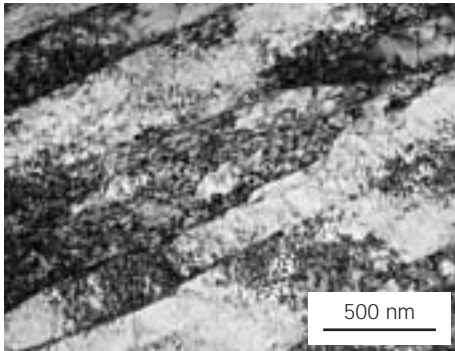


Abb. 1: TEM-Aufnahme des nach dem Laserrandschichtlösungsglühens entstandenen martensitischen Gefüges

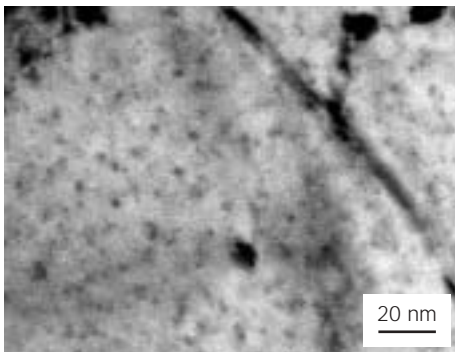


Abb. 2: TEM-Aufnahme der Ausscheidungsanordnung, die nach dem Laserlösungsglühens und der Auslagerung bei 480 °C entstanden ist. Beachte die homogene Keimbildung sehr kleiner Teilchen

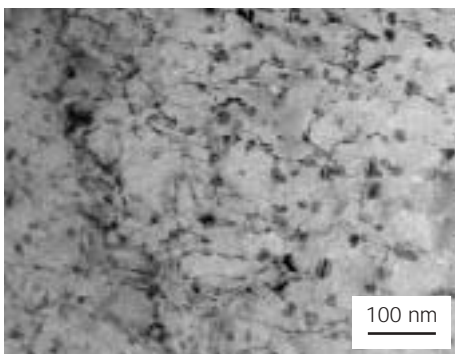


Abb. 3: TEM-Aufnahme der Mikrostruktur der laserbehandelten Randschicht nach Auslagerung bei 550 °C. Beachte die bevorzugte Bildung von kohärenten Ausscheidungen an Versetzungen

Aufgabenstellung

Ausscheidungshärtbare CrNi-Stähle erlauben bei geeigneter Wahl der Zusammensetzung und Wärmebehandlung die Realisierung eines breiten Eigenschaftsspektrums, insbesondere die Kombination von hoher Härte mit ausreichender Zähigkeit.

Nach einem im Fraunhofer IWS Dresden entwickelten Verfahren wird zur selektiven Erzeugung verschleißbeständiger Randschichten die Lösungsglühung mit einem Laser durchgeführt. An dem Stahl X5CrNiCuNb16.4 konnte gezeigt werden, dass mit dem Laserrandschichtlösungsglühens und anschließender Auslagerung bei relativ niedrigen Temperaturen höhere Härten als mit der konventionellen Wärmebehandlung erzielbar sind. Die Ursachen für diesen interessanten Effekt konnten mittels Metallographie und REM nicht aufgeklärt werden. Deshalb sollte die Mikrostruktur, die sich in der Randschicht nach unterschiedlicher Behandlung gebildet hat, unter Einsatz hochauflösender Abbildungs-, Beugungs- und Analysemethoden im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) näher untersucht werden.

Lösungsweg

Aus der Randschicht der laser- und wärmebehandelten Stahlproben wurden Scheibchen für die TEM-Untersuchung herausgetrennt und beidseitig elektrolytisch abgedünnt. Die TEM-Untersuchung erfolgte bei 200 kV an einem JEM 2010 TEM/STEM-Elektronenmikroskop, das mit einem EDX-Mikroanalyse-System und einer Multi Scan Camera ausgerüstet ist.

Ergebnisse

Wie am Beispiel der Abb. 1 zu erkennen ist, erzeugt das Laserrandschichtlösungsglühens ein martensitisches Gefüge mit sehr hoher Versetzungsdichte. Die Martensitlatten sind nur etwa 0,2 - 0,4 µm breit. Dieser Zustand ist frei von Ausscheidungen. Während der Auslagerung bei Temperaturen zwischen 450 °C und 550 °C bilden sich im Martensit sehr feine Kupfer-Ausscheidungen, die den weiteren Härteanstieg bewirken. Nach den bisherigen Ergebnissen entstehen zunächst sowohl durch homogene als auch heterogene Keimbildung Ausscheidungen mit Abmessungen unter 5 nm (Abb. 2). Auslagerung bei Temperaturen deutlich oberhalb des Härtemaximums bewirkt die Bildung kohärenter Ausscheidungen mit Abmessungen um 20 nm bevorzugt an Versetzungen und Martensitgrenzen (Abb. 3). Die Vorteile des Laserrandschichtlösungsglühens (höhere Härten, unkonventionell niedrige Auslagerungstemperaturen, Nutzung des Prinzips "harter Rand - zäher Kern") resultieren daher aus den besonderen Eigenschaften des durch schnellere Abkühlung aus dem hochoverhitzten Austenit entstandenen Martensits und der möglichen Erzeugung hochdisperser Ausscheidungsverteilungen. Die erzielten Ergebnisse bieten eine Basis für die weitere Optimierung des Verfahrens und der gewünschten mechanischen Eigenschaften.

Ansprechpartner

Dr. Arnhold Luft
Tel.: 0351 / 2583 206
arnhold.luft@iws.fraunhofer.de



Qualitätssicherung von Wärmedämmschichten durch Thermoschocktests

Aufgabenstellung

In modernen Gasturbinen und anderen thermisch hochbelasteten Komponenten werden Wärmedämmschichten (WDS) eingesetzt, um die Arbeitstemperaturen und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen. Die extremen Temperaturwechsel im Einsatz verursachen infolge unterschiedlicher Wärmedehnung hohe mechanische Schichtbelastungen, die bei Überschreiten der Festigkeit zum Schichtversagen (Schichtabplatzen) führen.

Für zielgerichtete Schichtverbesserungen sind Prüfverfahren notwendig, die die Beanspruchungsgrenzen eines Schichtsystems wirklichkeitsnah bestimmen und außerdem durch gut steuerbare Belastungsführung eine detaillierte Untersuchung der ablaufenden Schädigungsprozesse gestatten.

Lösungsweg

Eine im IWS Dresden aufgebaute Prüf-anordnung realisiert eine wohldefinierte thermozyklische Schichtbeanspruchung durch wiederholte Oberflächenbestrahlung mittels Hochleistungslaser und gleichzeitige messtechnische Erfassung des Temperaturverlaufes mit einem Thermographiesystem bzw. Hochgeschwindigkeitspyrometer. Nach den Tests durchgeführte elektronenmikroskopische Untersuchungen liefern in Kombination mit der bruchmechanischen Analyse der auftretenden Beanspruchungen grundlegende Erkenntnisse über den Prozess des Schichtversagens.

Ergebnisse

Als Anwendungsbeispiel dieser Prüfmethode soll hier die Charakterisierung der Thermozyklischerbeständigkeit einer sehr dünnen, mittels pulsed laser deposition (PLD) hergestellten ZrO_2 -Wärmedämmschicht (Schichtdicke ca. $10\ \mu\text{m}$) vorgestellt werden, die im IWS Dresden für extrem hohe Wärmeströme entwickelt wird.

Die Auftragung der Testergebnisse in Form von Schädigungsdiagrammen ermöglicht eine quantitative Bewertung der Thermozyklischerbeständigkeit von Schichten. Der Vergleich der für beide Schichttypen erhaltenen Schädigungsdiagramme zeigt, dass die Grenzbelastung für das Schichtversagen im Verlauf der bisherigen Schichtentwicklung zu wesentlich höheren Temperaturen verschoben werden konnte.

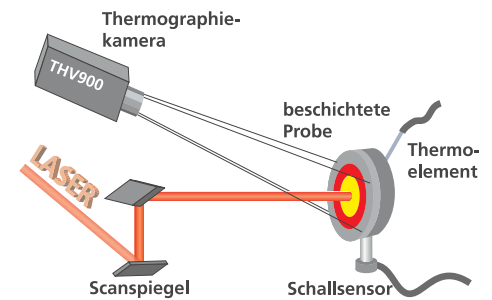


Abb. 1: Schema der laserbasierten Thermo-schock-Prüfanordnung

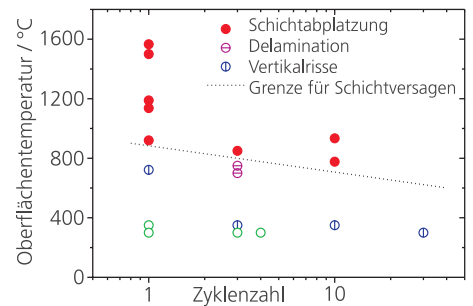


Abb. 2: Schädigungsdiagramm einer PLD-Wärmedämmschicht vom Typ I (früheres Entwicklungsstadium)

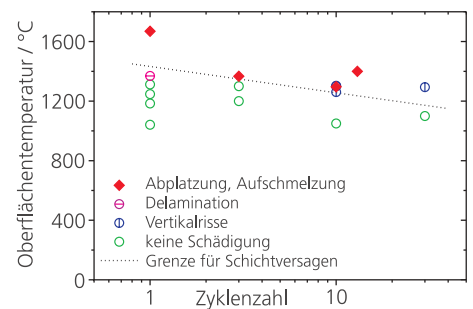


Abb. 3: Schädigungsdiagramm einer PLD-Wärmedämmschicht vom Typ II (aktuelles Entwicklungsstadium)

Ansprechpartner

Dr. Gunter Kirchhoff
Tel.: 0351 / 2583 225
gunter.kirchhoff@iws.fraunhofer.de



Dr. Lothar Morgenthal
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 322)



Dr. Lothar Morgenthal
Gruppenleiter Schneiden
und Systemtechnik
(Tel. 2583 322)

Laserstrahlschneiden

Metallphysikalische, prozess- oder fertigungstechnische Untersuchungen zum Laserstrahlschneiden können mit Lasern unterschiedlicher Strahlleistung und Wellenlänge sowie auf CNC-Bearbeitungsmaschinen für Bauteile mit Abmessungen vom Millimeter- bis in den Meterbereich ausgeführt werden. Schwerpunkt ist das formgenaue 2D-Hochgeschwindigkeitsschneiden im Feinblechbereich mit einer hochdynamischen Schneidmaschine mit Lineardirektantrieben. Für die Ergebniskontrolle und Qualitätssicherung steht neben der Werkstoffcharakterisierung des Hauses ein Flat Part Measurement & Digitizing Scanner System für Teilegrößen bis 1800 mm · 1200 mm zur Verfügung. Dazu bieten wir an:

- Machbarkeitstests, Musterfertigung und FuE-Arbeiten zu allen Varianten des Laserstrahlschneidens an Werkstoffmustern und Bauteilen,
- Technologie- und Systementwicklung, -erprobung, -optimierung,
- Entwicklung von Systemkomponenten für Hochgeschwindigkeitsprozesse, Prozesskontrolle und -regelung.



Laserstrahlgeschnittenes Elektroblech

Systemtechnik / Fertigungstechnik

Das IWS hat sein spezifisches Angebot zur Entwicklung, Erprobung und serienreifen Realisierung verfahrensangepasster Systemlösungen ausgebaut. Die Abteilungen des Hauses bieten an:

- Bearbeitungsoptiken, Strahlablensysteme, Sensorik für die Hochgeschwindigkeits- und Präzisionsbearbeitung sowie zur Prozesskontrolle und -regelung,
- Handlingsysteme, Prozesskontrolle und -regelung für den industriellen Einsatz von Hochleistungs-Diodenlasern zur Oberflächenveredlung,
- Prototypentwicklung von Beschichtungsanlagen bzw. deren Kernmodulen für die PVD-Präzisionsbeschichtung von Stückgut und die kontinuierliche Atmosphärendruck-Band-PVD inklusive Anlagen- und Prozesssteuerung (Software),
- Prozesskontrolle und -regelung für Beschichtungsprozesse,
- Messsysteme zur Schichtcharakterisierung bzw. zerstörungsfreien Bauteilprüfung mittels laserakustischer und spektroskopischer Methoden.



Schweißen der Rohr-Boden-Verbindung am Abgaswärmetauscher unter Nutzung einer Strahlablensoptik



Dr. Günter Wiedemann
Gruppenleiter Abtragen und Reinigen
(Tel. 2583 251)

Abtragen und Reinigen

Das IWS verfügt über eine vielseitige technische Ausrüstung, ein wissenschaftliches Know-how und umfangreiche praktische Erfahrungen zum Einsatz von Lasern für das Abtragen dünner Schichten bzw. Reinigen von Oberflächen im technischen und im restauratorischen Bereich.

Wir bieten an (Arbeiten vor Ort möglich):

- Beratung und Konsultationen, Machbarkeitsstudien,
- technologische Voruntersuchungen einschließlich Anlegen von Musterflächen mittels Excimer-, Nd:YAG- und TEA-CO₂-Laser,
- Durchführung von Applikationsuntersuchungen,
- Strukturaufklärung und Nachweisführung (Metallographie / Petrographie, Spektroskopie, REM / EDX).



Rutschhemmende Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge durch Lasermikrostrukturierung



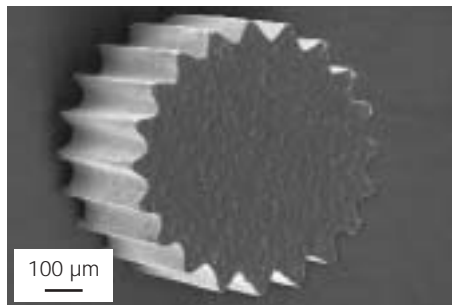
Dipl.-Ing. Udo Klotzbach
Gruppenleiter Mikrofertigung und Beschriften
(Tel. 2583 252)

Mikrostrukturieren mittels Laser

Die Arbeitsgruppe wird durch modernste Ausstattung und fundiertes Know-how dem Trend gerecht, dass der Mikro- und Feinbearbeitung mit Laserstrahlen im Zuge der Miniaturisierung von Funktionselementen im Maschinen-, Anlagen-, Fahrzeug- und Gerätebau eine immer höhere Bedeutung zukommt. Ebenso verlangen die Bio- und Medizintechnik die Herstellung von 3D-Strukturen im Sub-mm-Bereich. Die Werkstoffpalette reicht dabei von den Polymeren, Metallen, Keramiken bis zu quarzitischen und biokompatiblen Werkstoffen.

Wir bieten an:

- Mikrostrukturierung unterschiedlicher Werkstoffe mit Excimer- und Nd:YAG-Lasern zum Zwecke der 3D-Formgebung und Beschriftung,
- Innengravur transparenter Materialien,
- Mikrobohren mit hohen Aspektverhältnissen und unterschiedlichen Bohrungsgeometrien,
- Strukturaufklärung und Nachweisführung.



Mikrobearbeitung von Silizium mittels diodengepumptem Nd:YAG-Laser

Beispiele aus den Arbeiten 2001

1. Lasern "on the fly" macht den Roboter dynamischer und präziser denn je 68
2. Präziser Hochgeschwindigkeits-Laserschnitt 70
3. Laserstrahlabtragen und -reinigen im technischen Bereich 71
4. Mikrobearbeitung von Silizium mit dem frequenzverdreifachten diodengepumpten Nd:YAG-Laser "GATOR UV" 72
5. Laserlexikon - Von Abbildung bis zirkulare Polarisation 73



Lasern "on the fly" macht den Roboter dynamischer und präziser denn je

Aufgabenstellung

Die Motivation für die Kopplung von Bewegungssystemen mit sich ergänzenden Dynamikeigenschaften ergab sich aus der Erfahrung, die mit modernen Hochleistungslasern sehr guter Strahlqualität möglichen Bearbeitungsgeschwindigkeiten, beispielsweise für das Laserschweißen, mit konventionellen Handlingsystemen (Portalanlagen, Roboter) nicht mehr mit der erforderlichen Präzision an realen Bauteilkonturen umsetzen zu können. Bei konventionellen Handlingsystemen begrenzt die zu bewegende Masse der Bearbeitungsoptik bzw. des Bauteils die Dynamik der Vorschub- und Zustellbewegungen und deren Bahngenaugigkeit.

Die nahezu trägheitslose Laserstrahlbewegung durch Strahlablenkoptiken kann diese Grenzen überwinden. Sogenannte Remote-Systeme mit großem Arbeitsfeld ($> 1 \cdot 1 \text{ m}^2$) erfordern eine Strahlfokussierung mit entsprechend großer Brennweite ($f > 1 \text{ m}$). Sie sind deshalb nur mit Lasern sehr guter

Strahlqualität ($K > 0,8$) zu realisieren, um im Fokus noch eine ausreichende Intensität für das Schweißen bereitzustellen. Da die wegen ihrer vorteilhaften Wellenlänge gern eingesetzten Nd:YAG-Leistungslaser diese Strahlqualität bisher noch nicht liefern können, wurde ein kombiniertes Handlingsystem entwickelt, um die Vorteile des Schweißens "on the fly" auch für Nd:YAG-Laser nutzbar zu machen.

Lösungsweg

Im ersten Schritt der Problemlösung wurden für die Leistungsbereiche des Laserschweißens ausgelegte Strahlablenkoptiken (SAO) entwickelt und mit einem 6-Achs-Roboter kombiniert. Dabei wird die Laserstrahlbewegung der Bewegung des Roboters so überlagert, dass durch dieses Arbeiten "on the fly" die hohe Dynamik und Präzision der Laserstrahlbewegung im begrenzten Arbeitsfeld der Strahlablenkoptik praktisch auf den gesamten Arbeitsbereich des Roboters ausgedehnt wird.



Abb. 1: Konturmuster für Steppnahtschweißung



Abb. 2: Bauteilschweißung

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Annett Klotzbach
Tel.: 0351 / 2583 235
annett.klotzbach@iws.fraunhofer.de



Voraussetzung dafür ist eine koordinierte Bewegung des Laserstrahlspots durch beide Achssysteme auf der Bearbeitungskontur. Dies wird durch eine auf die Bearbeitungskontur und die Schweißaufgabe optimierte Bahnplanung der Roboter- und der Strahlbewegung und durch eine entsprechend koordinierte Steuerung für beide Achssysteme erreicht. Optimierungsziele dieser Bahnplanung und -steuerung sind einmal eine hohe Vorschubgeschwindigkeit für das Schweißen im Rahmen der verfügbaren Laserleistung und der geforderten Bahngenauigkeit und zweitens möglichst kurze Positionierzeiten zum Erreichen der Schweißorte, um die Teiletaktzeit zu minimieren.

Ergebnisse

Im Idealfall kann beispielsweise bei getakteten Schweißungen (Steppnaht) eine Lasereinschaltzeit von fast 100% erreicht werden, weil die Strahlablenkoptik den TCP des Laserstrahls innerhalb weniger Millisekunden vom Ende eines Schweißsegmentes zum Startpunkt des nächsten Schweißsegmentes bewegen kann. Gleichzeitig kann so der gleichmäßige Vorschub des Roboters vervielfacht werden, da die kompensierende Bewegung des Laserstrahles mittels der Strahlablenkoptik die notwendige Prozessgeschwindigkeit auf der Steppnaht garantiert. Die hohe Dynamik der Strahlablenkung macht außerdem lokale Schweißkonturen in großer Formenvielfalt möglich.

Überall da, wo Widerstandspunktschweißungen durch das Lasersteppnahtschweißen ersetzt werden sollen, ergibt sich ein hohes Einsparungspotenzial an Positionierzeit zwischen den einzelnen Schweißnahtsegmenten bei gleichzeitig großer Flexibilität in der Gestaltung der Anbindungskonturen.

Doch nicht nur für das Laserstrahlschweißen eröffnen sich damit neue systemtechnische Realisierungsmöglichkeiten. Weitere Anwendungsfelder liegen überall dort, wo mit hoher Prozessgeschwindigkeit Materialien mit dem Laserstrahl bearbeitet werden sollen, beispielsweise beim Trennen und Abtragen an Bauteilen aus Kunststoffen und Verbundwerkstoffen. Sollen dabei räumlich geformte Bauteile bearbeitet werden, kann ein Industrieroboter die grobe Positionierung und Verfahrbewegung der Strahlablenkoptik übernehmen. Die exakte Schnittkontur wird dann durch die präzise und schnelle Bewegung des Laserstrahles mit der Strahlablenkoptik unter Berücksichtigung der jeweiligen Roboterposition bzw. -bewegung erzeugt.



Abb. 3: Strahlablenkensystem am Roboter über Modellbauteil



Abb. 4: Testschweißung an zwei Arbeitsebenen mit einer Vorschubbahn



Präziser Hochgeschwindigkeits-Laserschnitt

Aufgabenstellung

Die Produktivität des Laserstrahlschneidens wird hauptsächlich durch die minimal im Rahmen der Qualitätsparameter (Maß- und Formgenauigkeit, Kantengüte) erreichbare Teiletaktzeit bestimmt. Hauptsächlich begrenzend wirken hier der Laserschneidprozess und die Dynamik der Schneidmaschine. Die am Markt verfügbaren leistungsstarken Schneidlaser mit sehr guter Strahlqualität haben die Grenzen des zu realisierenden Schneidprozesses deutlich erweitert. Neu sind Schneidmaschinen mit Linearantriebstechnik, die Vorschubkonstanz und Konturtreue für deutlich höheren Schneidgeschwindigkeiten als bisher garantieren können. Dabei steht die Frage, welche Antriebsleistungen von Lineardirektantrieben praktisch in höhere Wirtschaftlichkeit umgesetzt werden können.

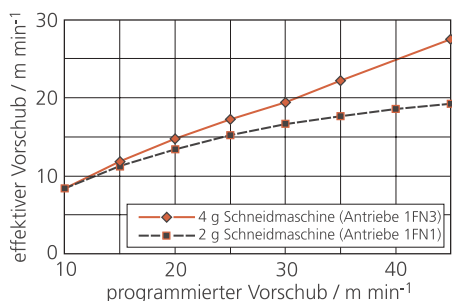


Abb. 1: Einfluss der Antriebsdynamik auf die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit im realen Schneidtest



Abb. 2: Musterkontur für Schneidtest

Lösungsweg

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde der Schneidprozess für eine typische Musterkontur (Abb. 2) aus dem Elektromaschinenbau mit hohen Anforderungen an Maß- und Konturgenauigkeit sowie Kantenqualität auf minimale Teiletaktzeit optimiert. Verglichen wurde das Schneiden mit Lineardirektantrieben der Produktgeneration 1FN1 (Achsvorschub bis 200 m min⁻¹, Beschleunigung 20 m s⁻²) mit der neuen Produktfamilie 1FN3 (Achsvorschub bis 300 m min⁻¹, Beschleunigung 40 m s⁻²) an jeweils speziell für diese Antriebe ausgelegten Schneidmaschinen. Die CNC-Steuerung war an beiden Anlagen eine Sinumerik 840D. In beiden Fällen wurde mit einem CO₂-Laser mit 2,5 kW Maximalleistung gleichen Typs geschnitten.

Ergebnisse

Das Diagramm in Abb. 1 zeigt den experimentell ermittelten Zusammenhang zwischen dem programmierten Bahnvorschub und dem effektiv erreichten Produktionsvorschub, ermittelt aus Konturlänge und Teiletaktzeit. Insbesondere für hohe Bahngeschwindigkeiten, für die im Materialdickenbereich unter 1 mm der Laserschneidprozess durchaus möglich ist, wird der Vorteil der höheren Maschinendynamik deutlich sichtbar. So erforderte der Schnitt der Musterkontur aus Elektroblech der Dicke 0,5 mm bei programmiertem Bahnvorschub von 45 m min⁻¹ auf der 2-g-Schneidmaschine eine um 50 % höhere Teiletaktzeit von 36 Sekunden, statt 24 Sekunden auf der 4-g-Schneidmaschine. Bei einem auf die hohen Antriebskräfte der Lineardirektantriebe abgestimmten Maschinenkonzept kann eine höhere Antriebsdynamik die Produktivität bei gleicher Produktqualität und Produktionssicherheit direkt steigern.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Eduard Pfeiffer
Tel.: 0351 / 2583 238
eduard.pfeiffer@iws.fraunhofer.de



Laserstrahlabtragen und -reinigen im technischen Bereich

Aufgabenstellung

Für Reinigungs- und Abtragsprozesse ergeben sich im Hinblick auf steigende Automatisierung, zunehmende Entsorgungskosten und gewachsenes Umweltbewusstsein neue Anforderungen.

Lösungsweg

Das Laserstrahlreinigen kann sowohl für den lokal begrenzten als auch für den großflächigen Abtrag eingesetzt werden. Weitere Vorzüge sind die berührungslose, prozessmittelfreie und selektive Arbeitsweise. Letzteres ermöglicht eine hohe Prozesssicherheit und ein großes Parameterfenster. Eine wesentliche Bedingung dafür ist eine solche Laserwellenlänge, bei der die Schicht eine deutlich höhere Absorption als der Untergrund aufweist. Auf der anderen Seite kann der Prozess so eingestellt werden, dass für nachfolgende Beschichtungen gleichzeitig eine Modifikation der Oberfläche des Untergrundes, z.B. ein Aufräuen, erfolgt.

Für den Abtrag bzw. die Reinigung wird lediglich die Energie des Laserstrahls genutzt, es sind keine Prozessmittel erforderlich. Das zu entfernende Material wird an der Auftrefffläche des Laserstrahls im wesentlichen verdampft und die Abprodukte müssen lediglich abgesaugt werden.

Ergebnisse

Die Kompetenzen des IWS wurden in zahlreichen Industrie- und öffentlich geförderten Projekten erarbeitet. Besonders viele Erfahrungen wurden auf dem Gebiet der Reinigung von empfindlichen Kulturgütern erworben (Abb. 1). Diese werden unter Einbeziehung

der wirtschaftlichen Anforderungen für Problemstellungen der industriellen Fertigung erfolgreich genutzt.

Aktuelle Beispiele sind:

- Reinigung und Aktivierung von Fügstellen, z.B. vor dem Laserstrahlschweißen, vor flussmittelfreiem Löten und vor dem Kleben;
- Abtrag von Beschichtungen und Korrosionsprodukten, z.B. partielles Abisolieren von Kabeln, Abtrag von Rost mit gleichzeitigem Oberflächenaufräuen zur Haftungsverbesserung für den nachfolgenden Farbauftrag, punktueller Beschichtungsabtrag für die elektrische Kontaktierung, partieller und funktionsgerechter Abtrag von Beschichtungen von ganzflächig beschichteten Bauteilen;
- berührungslose Reinigung in hygiene relevanten Bereichen, z.B. Reinigung von Backblechen (Abb. 2) oder Transportsystemen in der Lebensmittelindustrie.

Entsprechend der Problemvielfalt von Reinigungs- und Abtragsaufgaben umfasst die Geräteausstattung des IWS, abgesehen von der Leistungsskaliierung, alle für die Reinigung und den Abtrag industriell einsetzbaren Gerätetypen im Wellenlängenbereich von 248 nm bis 10,6 μm (Abb. 3).

Neben der Entwicklung von Technologien für den Abtrag bzw. die Reinigung gehören zum Angebotsspektrum u.a. die optische Charakterisierung des Systems abzutragende Schicht / Untergrund für die Auswahl der am besten geeigneten Laserwellenlänge, Konzept und Realisierung problemorientierter Systemlösungen, Bewertung des Reinigungsergebnisses und die Analyse der bei der Bearbeitung entstehenden Abprodukte und damit einhergehenden Auslegung entsprechender Abproduktbeseitigungs- und Behandlungsanlagen.



Abb. 1: Abtrag von Gips-, Schmutz- und Farbresten von einer stark geschädigten Holzoberfläche (oben gereinigt, unten Ausgangszustand)

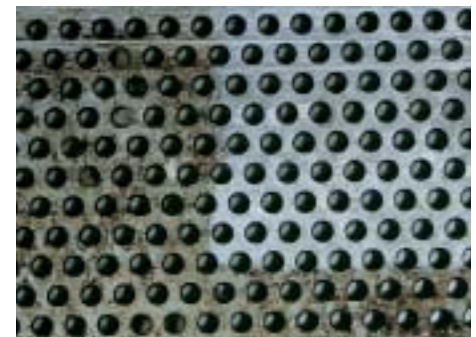


Abb. 2: Laserstrahlreinigen in hygiene relevanten Bereichen, z. B. in der Lebensmittelindustrie am Beispiel des Laserstrahlabtrags von organischen Verschmutzungen von einem Backblech - rechts oben (links und unten vor der Reinigung)



Abb. 3: CO₂-Laserbearbeitungssystem mit x-y-Scanner und Planfeldoptik



Mikrobearbeitung von Silizium mit dem frequenzverdreifachten diodengepumpten Nd:YAG-Laser "GATOR UV"

Aufgabenstellung

In immer mehr Zweigen der Technik und auch der Medizintechnik werden Mikrobauteile aus Silizium eingesetzt. Beispiele sind mikromechanische Sensoren in der Automobilindustrie, mikrofluidische Elemente oder Strahlteiler für Röntgenstrahlung. Die Lasermikrobearbeitung ermöglicht hierfür attraktive zeitsparende Bearbeitungstechnologien, die zwar nicht die extreme Genauigkeit der zeitaufwendigen Ätztechnologie erreichen, deren Genauigkeit aber deutlich besser ist als bei der mechanischen Bearbeitung, beispielsweise durch Sägeprozesse.

Lösungsweg

Besonders die Entwicklung diodengepumpter frequenzvervielfachter Festkörperlaser mit Q-switch ermöglichte es, thermische Prozesse (Aufschmelzerscheinungen), die bisher zu verminderter Strukturgenauigkeiten bei der Laserbearbeitung von Silizium führten, entscheidend zu reduzieren.

Das gelingt einmal durch die mit diesen Lasertypen erreichbaren kurzen Pulsdauern von 15 ns, die den Abfluss von Wärme aus dem Ablationsgebiet und somit thermische Randschädigungen vermindern. Eine weitere Verbesserung der Kantenqualität wird durch den Einsatz von UV-Wellenlängen

erreicht. Diese Wellenlängen werden vom Ablationsplasma weniger stark absorbiert, so dass durch niedrigere Plasmatemperaturen der thermische Einfluss auf die Strukturwände verringert wird. Darüber hinaus lassen sich Laserstrahlen der kurzen UV-Wellenlängen wesentlich besser fokussieren, was beispielsweise zu kleineren Schnittfugenbreiten führt.

Ergebnisse

Das IWS hat gemeinsam mit der Firma Lambda Physik AG den Prototypen einer Mikrostrukturierungsanlage zum Schneiden und Bohren verschiedenster Bauteile aufgebaut. Herzstück der Anlage ist der diodengepumpte Festkörperlaser mit Güteschaltung und Frequenzverdreifachung "GATOR UV", ein stabiler wartungsarmer Industrielaser mit folgenden Strahlparametern:

- Wellenlänge: 355 nm
- Repetitionsrate: 10 kHz
- Pulsdauer: 15 ns
- mittlere Leistung: 3 W
- Strahlqualität: nahe TEM₀₀

Für die Strahlbewegung zur Bearbeitung wird ein UV-Scanner mit Planfeldoptik mit einem Arbeitsfeld von 100 · 100 mm² eingesetzt.

Die kompakte Bauweise des "GATOR UV" erlaubt, die komplette 2,5 D-Mikrostrukturierungsanlage für Schneid- und Bohrbearbeitungen als Tischgerät aufzubauen. Die Abb. 1 und 2 zeigen aus Silizium durch Sublimationsabtrag geschnittene Musterbauteile; Abb. 3 verdeutlicht die erreichbare Schnittkantenqualität.

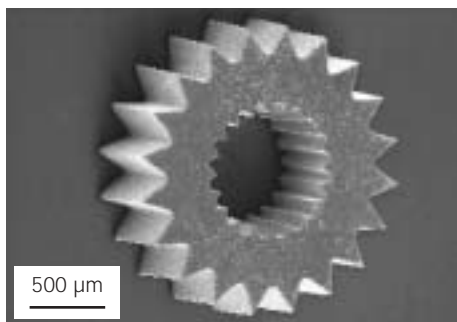


Abb. 1+2: Mittels diodengepumptem Festkörperlaser "GATOR UV" geschnittene Strukturen in Silizium-Wafern

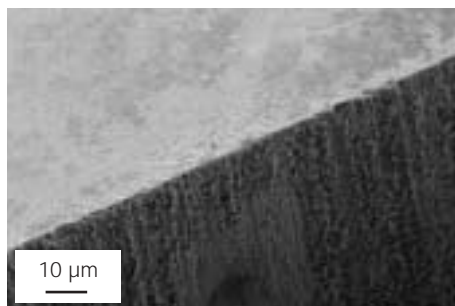


Abb. 3: Ausschnittsvergrößerung der Kante

Ansprechpartner

Dr. Michael Panzner
Tel.: 0351 / 2583 253
michael.panzner@iws.fraunhofer.de



Laserlexikon - Von Abbildung bis zirkulare Polarisation

Aufgabenstellung

Die sich kontinuierlich immer stärker verbreitende Anwendung der Lasertechnik hat den Wunsch nach einem übersichtlichen und informativen Nachschlagewerk bei sehr vielen industriellen Kunden und im Ausbildungsbereich hervorgebracht. Die schnelle Information über die komplizierten räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge und die Visualisierung der in der Regel dem menschlichen Auge verborgenen Prozesse ist nur über graphische Darstellungen und Animationen möglich. Zudem sind Voraussetzungen zu schaffen, der schnell fortschreitenden technischen Weiterentwicklung zu folgen.

Lösungsweg

Auf der Basis eines datenbankgestützten Informationssystems und der Wiedergabe innerhalb der allgemeinverbreiteten Internet-Browser sind die Forderungen nach permanenter Anpassung an die technische Weiterentwicklung optimal umsetzbar. Der Nutzer kann seinen handelsüblichen PC und seinen gewohnten Internet-Browser einsetzen. Die Installation zusätzlicher Programme und weitere Übungsfertigkeiten sind nicht notwendig.

Zu allen Stichworten sind Kurzfassungen, Graphiken und / oder Fotomaterial angefertigt worden. Die Darstellung komplizierter Zusammenhänge gelingt durch Animationen und interaktiv bedienbare 3D-Szenen in sehr plausibler Weise. Die Zielgruppe des Lexikons ist heterogen zusammengesetzt, so dass Probleme der elektromagnetischen Erscheinungen, der Optik im engeren Sinn, physikalische und werkstoffkundliche Fragen, messtechnische Aufgaben, konstruktive Lösungen bis zum produktionstechnischen Einsatz behandelt werden müssen. Interdisziplinäre Informationen werden ohne unexakte Simplifikationen zusammengetragen. Die Information umfasst Erläuterungen von vorerst über 400 Fachbegriffen und einer Vielzahl von Angeboten zu technischen Produkten von Firmen. Die Inhalte sind durch Hyperlinks bzw. Querverweise untereinander verknüpft, eine Suchfunktion erlaubt das schnelle Auffinden von Begriffen. Die Funktionalitäten der Internet-Browser garantieren auch eine selbstständige Rückverfolgung des individuellen Lernpfades.

Ergebnisse

Der aktuelle Stand wird auf einer CD-ROM angeboten, die nach dem jeweiligen Stand aktualisiert wird. Ein Support gewährleistet die Betreuung der Kunden und der firmenspezifischen Angebote. Im Internet ist unter www.laserlexikon.de ein Informations- und Bestellsystem eingerichtet, durch das ein zeitnahes Upgrade ermöglicht wird.



Abb. 1: Begriff: Argon-Laser



Abb. 2: Prinzip der Navigation

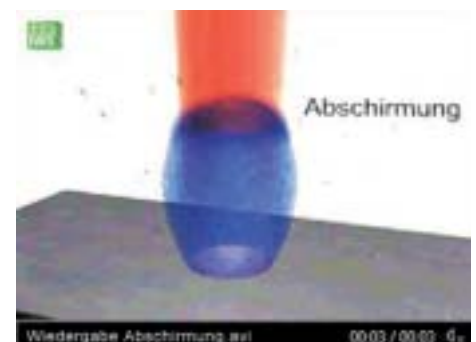


Abb. 3: Plasmaabschirmung als Video

Ansprechpartner

Dr. Siegfried Völlmar
Tel.: 0351 / 2583 434
siegfried.voellmar@iws.fraunhofer.de



Diplomarbeiten

A. Bayerlein
(Technische Universität Dresden)
„Konzept und Beispiellegung zur Primärdatengewinnung für die Schneidteilgestaltung spanender Werkzeuge“

T. Böttger
(Technische Universität Dresden)
„Untersuchungen zur thermischen Stabilität durch Magnetron-Zerstäubung erzeugter Mo/Si-Multischichten“

K. Demmler
(Westfälische Hochschule Zwickau (FH))
„Struktur und Eigenschaften von Ag/Si- und B₄C/Si-nm-Multischichten“

V. Fleischer
(Technische Universität Dresden)
„Bahnplaner für „fliegende“ Laserbearbeitung“

R. Gaertner
(Technische Universität Dresden)
„Technologie- und Marktpotenzialabschätzung der Nanotechnologie in Deutschland“

M. Müller
(Hochschule Mittweida (FH))
„Entwicklung und Konstruktion eines integrierten Bearbeitungskopfes zum induktiv unterstützten Laserrandschichthärten“

D. Römer
(Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Dresden)
„Design und Implementierung einer Java-3D-Simulation für die Beschichtungsanlage“

K. Scholz
(Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH))
„Overlap Welding of Zinc Coated Steel Sheet with Superposition of CO₂ and Diode Laser“

Dissertation

U. Virkus
(Technische Universität Dresden)
„Oberflächengestaltung durch die Verfahrensfolge Spanen/Glattwalzen unter stofflichen, geometrischen und kinematischen Aspekten“



Vorlesungen und Mitarbeit in Gremien

Prof. E. Beyer:

Vorlesung "Fertigungstechnik II, Teil 3" am Institut für Produktionstechnik der Technischen Universität Dresden

Prof. E. Beyer:

Vorlesung "Lasersystemtechnik - Grundlagen und Anwendungen" als Technisches Wahlpflichtfach am Institut für Produktionstechnik der Technischen Universität Dresden

Prof. E. Beyer, Dr. B. Schultrich,
Dr. S. Nowotny:

Vorlesung "Schichttechnologien" als Technisches Wahlpflichtfach am Institut für Produktionstechnik der Technischen Universität Dresden

Prof. E. Beyer, Dr. A. Leson:

Vorlesung "Oberflächentechnik / Nanotechnologie" als Technisches Wahlpflichtfach am Institut für Produktionstechnik der Technischen Universität Dresden

Prof. E. Beyer:

Vorlesung "Lasertechnology" an der Bradley University, USA

Prof. E. Beyer:

Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik WLT e.V.

Prof. E. Beyer:

Laser Institute of America (LIA), Board of Directors

Prof. E. Beyer:

Mitglied des Materialforschungsverbundes Dresden e.V.

Prof. E. Beyer:

Mitglied des Bundesverbandes mittelständische Wirtschaft e.V.

Prof. B. Brenner, Dr. G. Wiedemann:
Vorlesungsreihe und Praktika "Laser in der Materialbearbeitung" im Ergänzungsstudiengang Lasertechnik an der Technischen Fachhochschule Berlin

Prof. B. Brenner:

Fachauschuß 9 der AWT "Randschichtbehandlung und Kurzzeitaustenitisierung"

Prof. B. Brenner:

Mitglied Gutachterausschuss der AiF

Dr. R. Jäckel:

Arbeitskreis "Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen" des Projektes "Bedarfsorientierte Existenzgründungen aus Hochschulen am Beispiel der High-Tech-Region Dresden (Dresden exists)"

Dr. R. Jäckel:

Arbeitskreis "Messe- und Öffentlichkeitsarbeit" des Materialforschungsverbundes Dresden e.V.

Dr. G. Kirchhoff:

Arbeitsausschuss "Schallemissionsanalyse" der DGzFP

A. Kluge:

Sprecher der Rechnerbetreiber in der Fraunhofer-Gesellschaft

Dr. A. Leson:

Mitglied im Vorstandsrat der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Dr. A. Leson:

Sprecher des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums "Ultradünne funktionale Schichten"

Dr. A. Leson:

Kuratoriumsmitglied der Zeitschrift "Vakuum in Forschung und Praxis"

Dr. A. Leson:

Vorsitzender des VDI-Arbeitskreises "Studiengänge in der Nanotechnologie"

Dr. A. Leson:

Mitglied des Lenkungsgremiums des VDI-Kompetenzfeldes Nanotechnik

Dr. S. Nowotny:

Vorlesung "Lasermaterialbearbeitung" im Fachbereich Maschinenbau / Verfahrenstechnik der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Dr. S. Nowotny:

DVS-Arbeitsgruppe V9.2 / AA 15.2 "Laserstrahlschweißen und verwandte Verfahren"

Dr. B. Schultrich, Dr. H.-J. Scheibe,
Dr. A. Leson:

Arbeitskreis Plasmaoberflächentechnologie der DGO

Dr. B. Schultrich:

Vorstandsmitglied der Europäischen Forschungsgesellschaft "Dünne Schichten" e.V.

Dr. A. Techel, Dr. S. Nowotny:

VDI-Arbeitsgruppe "Rapid Prototyping" im VDI-Bezirksverein Dresden

Dr. B. Winderlich:

Arbeitsgruppe "Festigkeit und Konstruktion" des DVS-BV Dresden



Messebeteiligungen

Hannover-Messe Industrie 2001, 23. - 28. April 2001

Der Tradition folgend präsentierte das IWS im Rahmen des Gemeinschaftsstandes "Laser Technology" in Halle 7 auf einer 70 m² großen Fläche neueste Ergebnisse angewandter Forschung auf dem Gebiet der Laser- und Oberflächentechnik. Erstmals waren auf dem Stand des IWS auch Partnerfirmen vertreten. Zusammen mit den Firmen Arnold GmbH & Co. Ravensburg, EFD Induction GmbH Freiburg, ALOtec GmbH Dresden und Prometec GmbH Aachen wurde Ergebnisse gemeinsamer Forschungsprojekte gezeigt.

Schwerpunktmäßig wurden unter dem neuen Warenzeichen "lasertronic®" intelligente Systeme unter Nutzung des Lasers gezeigt. Ein Roboter führte auf der einen Station ein Hochleistungs-Strahlablesystem, welches beispielsweise bei der Fa. Behr GmbH & Co. Stuttgart in der Serienproduktion von Abgaskühlern für Dieselmotoren eingesetzt wird; auf der zweiten Station nahm der Roboter einen im IWS entwickelten modularen Beschichtungskopf auf, der in sich Pulverzufuhr, Diodenlaser-Fasereinkopplung und Strahlfokussierung vereint und unkompliziert in verschiedene Bearbeitungsmaschinen integriert werden kann.

In der "Nanoworld 2001" (Halle 18) wurden im Nanohaus erste Anwendungen der Nanotechnologie im täglichen Leben vorgestellt. Dabei zeigte das Nanotechnologie-Kompetenzzentrum "Ultradünne funktionale Schichten", welches vom IWS koordiniert wird, Anwendungen und Produkte der Nanotechnologie, die von den Mitglie-

dern des Zentrums (insbesondere vom IFW Dresden und von IBM Mainz) zur Verfügung gestellt wurden.

Insgesamt ca. 210 relevante Interessenbekundungen bestätigten die Richtigkeit der Entscheidung, die Präsentationen des IWS auf der Hannover-Messe 2001 zu erweitern.

StoneTec 2001 Nürnberg, 24. - 27. Mai 2001

Auf der 12. Internationalen Fachmesse für Naturstein und Natursteinbearbeitung präsentierte das IWS als Weltneuheit die Technologie sowie eine Anlage zur mobilen rutschhemmenden Ausrüstung polierter Fußböden im verlegten Zustand durch Lasermikrostrukturierung, die auf große Resonanz beim Messepublikum stieß. Außerdem wurden die Aktivitäten auf dem Gebiet des Laserreinigens in Restaurierung und Denkmalpflege vorgestellt.

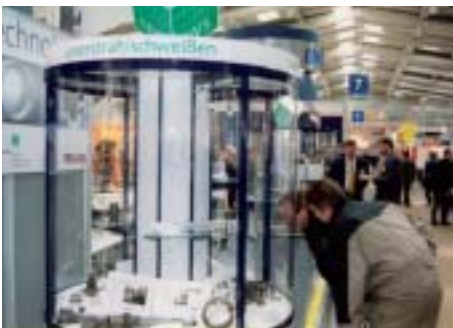
Laser-Messe 2001 München, 18. - 22. Juni 2001

Zusammen mit 6 weiteren Fraunhofer-Instituten präsentierte sich das IWS auf dem 240 m² großen Gemeinschaftsstand, der auch vom IWS koordiniert wurde. Gezeigt wurden neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Lasersystemtechnik, beispielsweise die Hochleistungs-Strahlableskoptiken lasertronic® SAO, die Temperaturregelsysteme für das Laserstrahlhärten lasertronic® LompocPro und die modularen Beschichtungseinheiten lasertronic® LPA.

Zugleich war das IWS auf dem Stand der Lambda Physik AG Göttingen mit der Präsentation einer Mikrostrukturierungsanlage mit frequenzverdreifachtem, diodengepumptem Nd:YAG-Laser vertreten.



Angeregte Diskussionen zur Lasersystemtechnik auf dem Gemeinschaftsstand "Laser Technology", Halle 7 (Hannover-Messe 2001)



Präsentation des Laserstrahlschweißens auf dem Gemeinschaftsstand "Laser Technology", Halle 7 (Hannover-Messe 2001)



Messe Materialica 2001 München, 01. - 04. Oktober 2001

Hervorgegangen aus der Werkstoffwoche präsentierte sich die diesjährige Messe "Materialica 2001" mit dem begleitenden Kongreß "Materials Week" auf dem Münchner Messegelände. Das IWS war durch das Nanotechnologie-Kompetenzzentrum "Ultradünne funktionale Schichten" vertreten, welches zusammen mit zwei anderen Nanotechnologie-Kompetenzzentren erste Ergebnisse angewandter Nanotechnologie präsentierte. Die ausgestellten Exponate wurden von den Mitgliedern des Zentrums bereitgestellt.

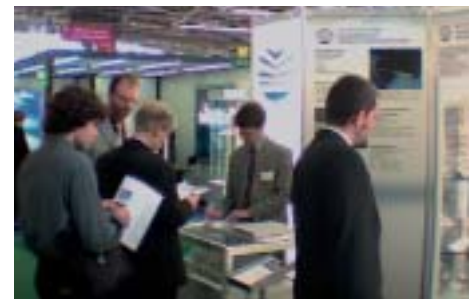
57. Härtereikolloquium Wiesbaden, 10. - 12. Oktober 2001

Das IWS arbeitet sehr eng mit der Firma EFD Induction GmbH Freiburg zusammen. Dies war Anlass für beide Seiten, Arbeiten auf einem gemeinsamen Stand zu präsentieren. In einer Videopräsentation wurde das Laserstrahlhärten mit Hochleistungs-Diodenlasern anhand von verschiedenen Bauteilen vorgestellt.

Messe Euromold 2001 Frankfurt / M., 28. November - 01. Dezember 2001

Im Rahmen eines Fraunhofer-Gemeinschaftsstandes beteiligte sich das IWS zum sechsten Mal an der Branchenmesse zum Formen-, Modell- und Werkzeugbau sowie zur Gießertechnik. Es wurden erstmals Ergebnisse aus dem Projekt "Melato" vorgestellt, welches das Ziel verfolgt, eine neue Prozesskette zur schnellen Fertigung von bis zu 1,5 m Kantenlänge zu entwickeln. Die gezeigten Prägwerkzeuge wurden nach dem Prinzip des LOM-Verfahrens (Laminated Object Manufacturing) hergestellt.

Außerdem wurden Exponate zum 3D-Laser-Auftragschweißen gezeigt, welches zur Reparatur von Werkzeugen und zum Verschleißschutz eingesetzt werden kann. Es konnten viele neue Kontakte zu Anwendern aufgebaut werden.



Angeregte Diskussionen zur Nanotechnologie auf der Messe "Materialica 2001" in München



Besucher im "Nanohaus" des Gemeinschaftsstand "Nanoworld2001", Halle 18 (Hannover-Messe 2001)

Besondere Ereignisse

24. / 25. Januar 2001
Internationales Technologie-Audit im
Fraunhofer IWS Dresden

21. Februar 2001
Sitzung des IWS-Kuratoriums

11. April bis 29. Juli 2001
Ausstellung zum 350. Geburtstag von
Ehrenfried Walther von Tschirnhaus;
das IWS trug durch zahlreiche Beiträge
maßgeblich zum großen Erfolg der
Ausstellung im Dresdener Zwinger bei

4. Oktober 2001
Festveranstaltung zur Verleihung des
R&D 100 Award für die Entwicklung
und Markteinführung des laserakusti-
schen Prüfverfahrens LAwave®

10. Oktober 2001
Unterzeichnung eines Kooperations-
vertrages zwischen der Fachhochschule
Dortmund und dem Fraunhofer IWS
Dresden

27. Oktober 2001
Tag der offenen Tür im Fraunhofer-
Institutszentrum Dresden

6. Dezember 2001
2. Fachsymposium Oberflächentechnik
im Dortmunder OberflächenCentrum
der ThyssenKrupp Stahl AG

Preise des IWS 2001

1. Beste innovative Produktidee zur Er-
öffnung eines neuen Geschäftsfel-
des

Frau Annett Klotzbach
*"High precision laser tool makes
robots more dynamic and flexible"*

2. Beste wissenschaftlich-technische
Leistung

Herr Danny Weißbach
*"Präzisionsbeschichtung vorge-
krümmter Substrate mittels Large
Area PLD"*

3. Beste wissenschaftliche Leistung
eines Nachwuchswissenschaftlers

Herr Veiko Fleischer
*"Entwicklung eines Bahnplanung-
systems für die Überlagerung von
Scanner- und Roboterbewegungen
bei der "fliegenden" Laserbearbei-
tung"*

Herr Gunther Göbel
*"Beitrag zur rechnergestützten Opti-
mierung der Bestrahlungsparameter
beim Laserstrahlhärten"*

Herr Harald Schulz, Herr Michael
Leonhardt
*"Erzeugung hydrophober (wasser-
abweisender) Oberflächen durch die
Kombination eines Oberflächen-
struktur-Effektes mit einem Ober-
flächenenergie-Effekt"*

4. Sonderpreise

Herr Jan Hauptmann
*in Anerkennung seines besonderen
Engagements bei der Vermarktung
eines IWS-Patentes*

Herr Dr. Bernd Schultrich
*in Anerkennung seines besonderen
Engagements im Bereich Aus- und
Weiterbildung*



Viel Interesse und angeregte Diskussionen zum
Tag der offenen Tür



Prof. Kottmann (links) und Prof. Beyer während
der Unterzeichnung des Kooperationsvertrages



Ein Besuchermagnet in der Tschirnhaus-Austel-
lung: die Computersimulation des Brennlin-
senapparates und des Brennsiegels aus dem IWS

Patentanmeldungen

- [P1]** B. Brenner, V. Fux
"Verfahren zur Erzeugung von verschleißbeständigen Randschichten"
 Anmelde-Az.: P 10 137 776.2 - 45
- [P2]** R. Dietsch, T. Holz
"Anordnung für röntgenanalytische Anwendungen"
 Anmelde-Az.: P 10 107 914.1 - 33
- [P3]** T. Holz
"Röntgenoptische Anordnung"
 Anmelde-Az.: PCT / DE 01 / 02 043
- [P4]** A. Lenk, M. Panzner, R. Frenzel, U. Lappan, K. Lunkwitz, D. Scharnweber, S. Schmidt, F. Simon, M. Thieme, H. Worch
"Ultrahydrophobe Oberflächen, Verfahren zu deren Herstellung sowie Verwendung"
 Anmelde-Az.: PCT / DE 01 / 02 167
- [P5]** C.-F. Meyer, H.-J. Scheibe, B. Schultrich, H. Ziegele
"Method and Device for Coating Substrates in a Vacuum"
 Anmelde-Az.: US 09 / 763, 650
- [P6]** C.-F. Meyer, H.-J. Scheibe
"Device and Method for Coating Substrates in a Vacuum"
 Anmelde-Az.: US 09 / 763, 636
- [P7]** L. Morgenthal, D. Pollack, D. Kretzschmar, T. Schwarz, S. Thalheim
"Messanordnung zur simultanen Bestimmung der Tiefe von in Substratoberflächen mittels Energiestrahlung ausgebildeten Bohrungen oder nutenförmigen Einschnitten"
 Anmelde-Az.: P 10 142 206.7
- [P8]** L. Morgenthal, D. Pollack, D. Weißbach, R. Gnann, A. Van Spankeren
"Laseroptisches Element zur Formung eines Laserstrahls"
 Anmelde-Az.: P 10 129 982.6 - 51
- [P9]** B. Schuhmacher, B. Schultrich, O. Zimmer, P. Siemroth, S. Schenk, C. Schwerdt, J. Stahl, D. Wolfhard, G. Grundmeier, M. Kammer, U. Seifert, R. Brisberger, E. Bechem, M. Kretzschmer
"Korrosionsgeschütztes Stahlblech und Verfahren zu seiner Herstellung"
 Anmelde-Az.: PCT / DE 01 / 02 886

- [P10]** H.-J. Weiß
"Verfahren zur Herstellung von hydrophoben bis hydrophilen Oberflächen"
 Anmelde-Az.: P 10 124 076.7

Patenterteilungen

- [P11]** E. Beyer, S. Nowotny
"Method for Applying a Coating by Means of Plasma Spraying While Simultaneously Applying a Continuous Laser Beam"
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 197 386 B1
- [P12]** B. Brenner, S. Bonß, H.-J. Scheibe, H. Ziegele
"Wear Resistance Edge Layer Structure for Titanium or its Alloys Which Can be Subjected to a High Mechanical Load and has a Low Coefficient of Friction, and Method of Producing the Same"
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 231 956 B1
- [P13]** B. Brenner, F. Tietz
"Verfahren zur Erzeugung verschleißbeständiger Randschichten aus ausscheidungshärtbaren Werkstoffen"
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 10 030 433
- [P14]** B. Brenner, A. Wetzig, D. Naunapper, C. Duschek
"Verschleißbeständige Nockenwelle und Verfahren zu ihrer Herstellung"
 Veröffentlichungs-Nr.: EP 925 377 B1
- [P15]** V. Hopfe, G. Leonhardt, A. Techel
"Vorrichtung zum kontinuierlichen gleichmäßigen Überziehen von Endlosfaserbündeln und Verwendung dieser Vorrichtung zum kontinuierlichen, gleichmäßigen Überziehen von Endlosfaserbündeln"
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 4 018 940 C2
- [P16]** L. Morgenthal, D. Pollack, A. Mertz
"Process for Controlling the Laser Beam Intensity Repartition for Processing Element Surfaces"
 Veröffentlichungs-Nr.: EP 698 800 B1, AT 173 968 E
- [P17]** T. Schülke, B. Schultrich, P. Siemroth, N. Urbanky, C. Wenzel, W. Klimes
"Process for the Production of Metallic Coatings on Semiconductor Structures"
 Veröffentlichungs-Nr.: EP 909 341 B1, US 6 274 492 B1

- [P18]** P. Siemroth, B. Schultrich, H. Kleinert, S. Großer
"Verfahren und Vorrichtung zur Modifizierung von metallischen Werkstückoberflächen durch elektrische Entladungen"
 Veröffentlichungs-Nr.: DE 19 637 513 C2
- [P19]** T. Sievers, U. Stürmer, G. Wiedemann
"Process for Producing Non-slip Floor Covering"
 Veröffentlichungs-Nr.: US 6 167 879 B1

- [L01]** E. Beyer
"Survey of Laser Hybrid Processes"
 Lasers in Manufacturing: at Laser Conference 2001 - 15th International Conference on Lasers and Electrooptics in Europe (2001), S. 404 - 415
- [L02]** E. Beyer, L. Morgenthal, B. Brenner
"Laser Hybrid Processes and Laser Remote Welding in Automotive Industry"
 Global Automotive Laser Applications Conference, Erice, Sizilien, Italien (2001), (in Druck)
- [L03]** S. Bonß
"Neue Fertigungskonzepte durch Hochleistungsdiodenlaser"
 Stahl (2001), Heft 3, S. 28 - 30
- [L04]** S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer
"Innovations in Laser Hybrid Technology"
 Industrial Laser Solutions for Manufacturing Bd. 16 (2001), Heft 1, S. 29 - 32
- [L05]** S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer
"Laser Gas Alloying of Titanium - New Possibilities for Severe Wear Loaded Components in Medicine"
 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Bd. 32 (2001), Heft 2, S. 160 - 165
- [L06]** S. Bonß, M. Seifert, B. Brenner, E. Beyer
"Temperaturgeregeltes Randschichthärten mit Hochleistungsdiodenlasern"
 Tagungsband zur 4. Industriefachtagung "Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik" (OWT 01) und zum 4. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) - Schriftenreihe Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen Bd. 7 (2001), S. 309 - 314
- [L07]** S. Bonß, M. Seifert, K. Barthel, B. Brenner, E. Beyer
"New Developments in High Power Diode Laser Welding"
 20th International Congress on Applications of Laser and Electro Optics - ICALEO 2001, CD-proceedings
- [L08]** S. Bonß, M. Seifert, B. Brenner, E. Beyer
"High Precision Heat Treatment with High Power Diode Lasers"
 Lasers in Manufacturing: at Laser Conference 2001 - 15th International Conference on Lasers and Electrooptics in Europe (2001) S. 529 - 539
- [L09]** S. Braun, R. Dietsch, M. Haidl, T. Holz, H. Mai, S. Müllender, R. Scholz
"Mo/Si-Multilayers for EUV Applications Prepared by Pulsed Laser Deposition (PLD)"
 Microelectronic Engineering Bd. 57 - 58 (2001), S. 9 - 15
- [L10]** B. Brenner, S. Bonß, M. Seifert, U. Stamm
"Neuere Entwicklungen zum Strahlschweißen mittels Hochleistungsdiodenlasern"
 5. Konferenz "Strahltechnik" (2001), S. 117 - 125
- [L11]** B. Brenner, J. Standfuß, B. Winderlich
"Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen zum rissfreien Fügen von härtbaren Stählen"
 Schweißen und Schneiden 2001 - Große Schweißtechnische Tagung DVS-Bericht Bd. 216 (2001), S. 289 - 297
- [L12]** S. Carvalho, F. Vaz, L. Rebouta, D. Schneider, A. Cavaleiro, E. Alves
"Elastic Properties of (Ti, Al, Si) N Nanocomposite Films"
 Surface and Coatings Technology Bd. 142-144 (2001) Heft 1 - 3, S. 110 - 116
- [L13]** R. Dietsch, T. Holz, A. Leson, H. Mai, D. Bahr, L. Brügemann, J. Lange, A. Hofmann, F. Pink
"Nanometer-Multischichten für die Röntgenanalytik"
 Vakuum in Forschung und Praxis Bd. 13 (2001), Heft 4, S. 222 - 231
- [L14]** R. Dietsch, T. Holz, D. Weißbach, V. Melov, J. Schreiber, R. Scholz
"Evolution of Stress and Microstructure in Ni/C Multilayers Used as X-Ray Optics in a Wide Energy Range"
 X-Ray Mirrors, Crystals and Multilayers Proc. of the SPIE Bd. 4501 (2001), (in Druck)
- [L15]** W. Grählert, V. Hopfe
"Gesicherte Interpretationen der FTIR-Reflexionsspektren von SiC-CVD-Schichten durch Spektrensimulation"
 Zeitschrift für Metallkunde Bd. 92 (2001), Heft 10, S. 1175 - 1179
- [L16]** J. Hackius, B. Brenner, B. Winderlich, J. Standfuß, E. Beyer, S. Nägeler
"Laserhybridschweißen von Aluminiumlegierungen"
 LaserOpto Bd. 33 (2001), Heft 2, S. 49 - 55
- [L17]** J. Hauptmann, G. Wiedemann
"Lasermikrostrukturierung sorgt für rutschfeste Fußbodenbeläge"
 Maschinenmarkt Bd. 107 (2001), Heft 23, S. 38 - 43
- [L18]** K. Hasche, K. Herrmann, M. Krumrey, G. Ulm, S. Schädlich, W. Frank, M. Procop
"Calibrated Reference Standards for Films in the Nanometer Range"
 2nd International Conference EUSPEN (2001), S. 396 - 399
- [L19]** E. Hensel, S. Bonß, M. Seifert
"Hochleistungs-Diodenlaser zum Härten selektiver Oberflächen"
 Maschinenmarkt Bd. 107 (2001), Heft 16, S. 74 - 76
- [L20]** T. Himmer
"Werkzeugfertigung durch Blechpakettieren - Möglichkeiten und Grenzen heute"
 Tagungsband Workshop "Rapid Tooling: Fakten - Trends - Visionen" (2001)
- [L21]** V. Hopfe, D. W. Sheel, W. Grählert, O. Throl
"NIR Laser Diode and FTIR Bases Process Control for Industrial CVD Reactors"
 Surface and Coatings Technology Bd. 142-144 (2001), Heft 1 - 3, S. 328 - 332
- [L22]** V. Hopfe, D. W. Sheel, D. Raisbeck, J. M. Rivero, W. Grählert, O. Throl, A. M. B. van Mol, C. I. M. A. Spee
"NIR Diode Laser Based Process Control for Industrial CVD Reactors"
 13th European Conference on Chemical Vapor Deposition - EUROCVD 13 (2001), S. Pr3-1153 - Pr3-1159

- [L23]** R. Jäckel
"lasertronic® - Intelligente Systeme unter Nutzung des Lasers"
 wt Werkstattstechnik Bd. 91 (2001), Heft 6, S. 373
- [L24]** J. Kaspar, A. Luft
"Microstructure Formed in Body Centred Cubic Metals by Laser Shock Processing"
 Surface Engineering Bd. 17 (2001), Heft 5, (in Druck)
- [L25]** A. Klotzbach
"High-Precision Laser Tool Makes Robots More Dynamic and Flexible"
 Euro-Materials Bd. 8 (2001), Heft 3, S. 12 - 13
- [L26]** A. Klotzbach, L. Morgenthal, T. Schwarz, E. Beyer
"Laser Processing on the Fly with Systems of Coupled Axes"
 Lasers in Manufacturing: at Laser Conference 2001 - 15th International Conference on Lasers and Electrooptics in Europe (2001), (in Druck)
- [L27]** A. Klotzbach, L. Morgenthal, T. Schwarz, V. Fleischer, E. Beyer
"Laser Welding on the Fly with Coupled Axes Systems"
 The Industrial Laser User (2001) Heft 25, S. 32 - 34
- [L28]** A. Klotzbach, L. Morgenthal, T. Schwarz, V. Fleischer, E. Beyer
"Laser Welding on the Fly with Coupled Axes Systems"
 20th International Congress on Applications of Laser and Electro Optics - ICALEO 2001 (in Druck)
- [L29]** J. Krauser, V. Hoffmann, W. Harneit, M. Waiblinger, N. Stolterfoht, A. Weidinger, C. Trautmann, H. Hofsäss, C. Ronning, B. Schultrich, H. Sturm
"Graphitic Nanowires Embedded in Diamond-Like Carbon Films"
 Euroconference on Electronic Properties of Novel Materials, Molecular Nanostructures (2001) (in Druck)
- [L30]** J. Krauser, A. Weidinger, M. Waiblinger, V. Hoffmann, C. Trautmann, B. Schultrich, H. Hofsäss, C. Ronning
"Conduction Ion Tracks in Diamond-Like Carbon Films"
 6th Applied Diamond Conference / 2nd Frontier Carbon Technology Joint Conference (2001), (in Druck)
- [L31]** A. Krell, S. Schädlich
"Nanoindentation Hardness of Submicrometer Alumina Ceramics"
 Materials Science and Engineering A Bd. A307 (2001), Heft 1 - 2, S. 172 - 181
- [L32]** H.-G. Kusch, T. Heinze, G. Wiedemann
"Hazardous Emissions and Health Risk During Laser Cleaning of Natural Stones"
 Tagungsband Lasers in the Conservation of Artwork - LACONA IV (2001), S. 61 - 64
- [L33]** D. Lepski, H. Eichler, V. Fux, S. Scharek, E. Beyer
"Calculating Temperature Field and Single Track Bead Shape in Laser Cladding with Marangoni Flow Using Rosenthal's Solution"
 Lasers in Manufacturing: at Laser Conference 2001 - 15th International Conference on Lasers and Electrooptics in Europe (2001), S. 167 - 177
- [L34]** A. Leson
"Nanometer-Schichtsysteme für Röntgenoptiken"
 Zweites Fachforum - Nanotechnologie: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung (2001), Tagungsband zur Fachkonferenz, S. 7 - 18
- [L35]** A. Leson, S. Braun, R. Dietsch, T. Holz, M. Mai
"Nanometer Multilayer Coatings for Application in the X-Ray Range"
 Proceedings of the 2nd International Conference "The Coatings in Manufacturing Engineering" (2001)
- [L36]** A. A. Levin, D. C. Meyer, A. Gorbunov, A. Tselev, P. Gawlitza, H. Mai, W. Pompe, P. Paufler
"Comparative Study of Interfaces of Fe-Al Multilayers Prepared by Direct and Crossed-Beam Pulsed Laser Deposition"
 Thin Solid Films Bd. 391 (2001), Heft 1, S. 47 - 56
- [L37]** A. A. Levin, D. C. Meyer, P. Paufler, A. Gorbunov, A. Tselev, P. Gawlitza
"Thermally Stimulated Solid State Reactions in Fe-Al Multilayers Prepared by Pulsed Laser Deposition"
 Journal of Alloys and Compounds Bd. 320 (2001), Heft 1, S. 114 - 125
- [L38]** H. Mai, R. Dietsch, Th. Holz
"Ultrapräzise nm-Schichtstapel als Grundlagen moderner Röntgentechnologien"
 Galvanotechnik Band 92 (2001) Heft 9, S. 2490 - 2503
- [L39]** L. Morgenthal
"Laserschneiden und Verbinden von Blechen"
 Tagungsband Workshop "Rapid Tooling: Fakten - Trends - Visionen" (2001)
- [L40]** S. Nägeler, S. Bonß, K. Barthel, B. Brenner, E. Beyer
"New Developments in High Power Diode Laser Welding"
 9th Annual Automotive Laser Applications Workshop - ALAW 2001 (2001), S. 278 - 302
- [L41]** M. Neuhäuser, H. Hilgers, T. Witke, P. Siemroth
"Superharter Kohlenstoff abgeschieden mit gepulstem Hochstrombogen als Nanoschutzschicht für Magnetspeicherplatten"
 Vakuum in Forschung und Praxis , Bd. 13 (2001), Heft 4, S. 215 - 220
- [L42]** S. Nowotny
"Nachbearbeitung von Blechpaketen - Verbesserung der Oberflächenqualität und Standzeit von Werkzeugen"
 Tagungsband Workshop "Rapid Tooling: Fakten - Trends - Visionen" (2001)
- [L43]** S. Nowotny
"Generieren metallischer Prototypen und Beschichten von Freiformflächen durch 3D-Präzisionsauftragschweißen mit Leistungslasern"
 Tagungsband Workshop "Rapid Tooling: Fakten - Trends - Visionen" (2001)
- [L44]** S. Nowotny
"Industrielle Anwendung der Prozesskette zum LPA"
 Tagungsband Workshop "Rapid Tooling: Fakten - Trends - Visionen" (2001)

- [L45] S. Nowotny, T. Heptner, B. Hommel
"Generieren metallischer Prototypen und Beschichten von Freiformflächen durch 3D-Präzisionsauftragschweißen mit Leistungslasern"
 Informationsbroschüre zum Abschluß des BMBF-Verbundprojekts PROLAS (2001), ISBN 3-8167-6046-5
- [L46] S. Nowotny, S. Scharek, T. Naumann, R. Gnann, T. Heptner, E. Beyer
"Integrated Laser Milling Center for Complete Machining"
 20th International Congress on Applications of Laser and Electron Optics - ICALEO 2001 Bd. 90a (2001), (in Druck)
- [L47] S. Nowotny, S. Scharek, R. Zieris, T. Naumann, E. Beyer
"Hybridtechnologie und Präzisionstechnik zum Laserstrahl-Auftragschweißen"
 LaserOpto Bd. 33 (2001), Heft 1, S. 57 - 60
- [L48] C. Oldenbourg, B. Schick, T. Heinze
"Laser Cleaning Tests on Medieval Wall-Painting in Ireland"
 Tagungsband Lasers in the Conservation of Artwork - LACONA IV (2001), S. 315 - 318
- [L49] H. Ollendorf, T. Schülke, D. Schneider
"Testing the Adhesion of Hard Coatings Including the Non-destructive Technique of Surface Acoustic Waves"
 Adhesion Measurement of Films & Coatings Bd. 2 (2001), S. 49 - 77
- [L50] J. H. Ouyang, S. Nowotny, A. Richter, E. Beyer
"Characterization of Laser Clad Partially-Stabilized ZrO₂ Ceramic Coatings on Steel 16MnCr5"
 Surface and Coatings Technology Bd. 137 (2001), Heft 1, S. 12 - 20
- [L51] J. H. Ouyang, S. Nowotny, A. Richter, E. Beyer
"Laser Cladding of Ytria Partially Stabilized ZrO₂ (YPSZ) Ceramic Coatings on Aluminum Alloys"
 Ceramic International Bd. 27 (2001), Heft 1, S. 15 - 24
- [L52] D. Schneider, B. Schultrich, P. Siemroth, M. Leonhardt, A. Franke
"Characterization of Coatings and Machined Surfaces by Surface Acoustic Waves"
 2nd International Conference "Coatings in Manufacturing Engineering" (2001), S. C4-1 - C4-10
- [L53] D. Schneider
"Lasers Set to Stun with Advanced Surface Analysis"
 Materials World Bd. 9 (2001), Heft 4, S. 11 - 12
- [L54] D. Schneider, B. Schultrich, T. Schwarz
"Laser-Acoustics, a Method for Testing Coatings and Material Surfaces"
 Zeitschrift für Metallkunde Bd. 92 (2001), Heft 9, S. 1046 - 1051
- [L55] B. Schultrich
"Schichthaftung und nm-Grenzflächenengineering"
 Vakuum in Forschung und Praxis Bd. 13 (2001), Heft 1, S. 58 - 60
- [L56] B. Schultrich
"Superharte Schutzschichten durch nm-Schichtdesign"
 Zweites Fachforum - Nanotechnologie: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung (2001), Tagungsband zur Fachkonferenz, S. 39 - 40
- [L57] B. Schultrich
"Licht als Werkzeug - Vom Brennspiegel zum Solarofen und Leistungslaser"
 Ehrenfried Walther von Tschirnhaus (1651-1708) - Experimente mit dem Sonnenfeuer (2001), S. 108 - 113
- [L58] B. Schultrich
"Aktivierte Beschichtung von Kunststoffen: Vorteile und Probleme"
 8. Neues Dresdner Vakuumtechnisches Kolloquium (2000), S. 47 - 54
- [L59] B. Schultrich, H.-J. Scheibe, V. Hopfe
"Lasergestützte physikalische und chemische Dampfphasenabscheidung dünner Schichten"
 LaserOpto Bd. 33 (2001), Heft 2, S. 42 - 48
- [L60] B. Schultrich, C. P. G. Schrauwen
"Dekorative PVD-Beschichtung von Kunststoffen - aktuelle Entwicklungstrends und Perspektiven"
 Jahrbuch Oberflächentechnik Bd. 57 (2001), S. 167 - 180
- [L61] H. Schultrich, B. Schultrich
"TEM-Simulation of Amorphous Carbon Films: Influence of Supercell Packaging"
 Ultramicroscopy Bd. 88 (2001), Heft 2, S. 111 - 125
- [L62] M. Seifert, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer
"Improved Temperature Control for High Precision Heat Treatment with High Power Diode Lasers"
 20th International Congress on Applications of Laser and Electron Optics - ICALEO 2001 (in Druck)
- [L63] P. Siemroth, T. Schülke
"Copper Metallization in Microelectronics Using Filtered Vacuum Arc Deposition - Principles and Technological Development"
 Surface and Coatings Technology Bd. 133 - 134 (2000), Heft 1 - 3, S. 106 - 113
- [L64] G. Sobott, T. Heinze, K. Neumeister, J. Hildenhagen
"Laser Interaction with Polychromy - Laboratory Investigations and On-Site Observations"
 Tagungsband Lasers in the Conservations of Artwork - LACONA IV (2001), S. 151 - 154
- [L65] A. Techel
"Werkstoffe und Strategien für das 3D-Laser-Präzisions-Auftragschweißen"
 Tagungsband Workshop "Rapid Tooling: Fakten - Trends - Visionen" (2001)
- [L66] A. Techel
"Schnelle Werkzeugfertigung durch automatisiertes Metall-LOM und Folgeprozesse"
 Tagungsband Workshop "Rapid Tooling: Fakten - Trends - Visionen" (2001)

- [L67] A. Techel
"Anwendungspotential der neuen Rapid Tooling Prozesskette"
 Tagungsband Workshop "Rapid Tooling: Fakten - Trends - Visionen" (2001)
- [L68] A. Techel, S. Nowotny
"Harte Schichten für leichte Metalle - Laserstrahl-Beschichten und Reparieren von Bauteilen aus Leichtmetall"
 Laser-Praxis (2001), Heft 1, S. 47 - 48
- [L69] A. Techel, S. Nowotny
"Reparieren und Generieren mit Leistungslasern"
 Galvanotechnik Bd. 92 (2001), Heft 5, S. 1248 - 1251
- [L70] S. Thiel, S. Lehnicke, O. Zimmer, S. Piltz
"Abformung von Mikrostrukturen in Glas"
 VDI-Z Bd. 142 (2000), Heft 7, S. 26 - 30
- [L71] V. Vergès-Belmin, G. Wiedemann, L. Weber, M. Cooper, D. Crump, R. Gouverne
"A Review of Health Hazards Linked to the Use of Lasers as Cleaning Tools for Stone Building Components and Artefacts"
 Tagungsband Lasers in the Conservations of Artwork - LACONA IV (2001), S. 263 - 266
- [L72] G. Wiedemann, L. Goretzki, U. Bauer-Bornemann, K. Dickmann, K. Neumeister, H. Seidel, R. Sobott
"Laser Cleaning of Unpainted and Painted Natural Stones: Overview of the Results of a National German Project"
 Tagungsband Lasers in the Conservations of Artwork - LACONA IV (2001), S. 311 - 314
- [L73] G. Wiedemann, P. Haller, A. Wagenführ, E. Beyer
"Umweltgerechte Holzschutzmaßnahmen für den Außenbereich - Stand der Forschung zur Laserbearbeitung von Holzoberflächen"
 Internationales Symposium Holz Innovativ (2001), (in Druck)
- [L74] G. Wiedemann, P. Haller, A. Wagenführ, H. Wust, E. Beyer
"Umweltgerechte Holzschutzmaßnahmen für den Außenbereich - Stand der Forschung zur Laserbearbeitung von Holzoberflächen"
 Weltmesse für Holz - LIGNA 2001 (2001), (in Druck)
- [L75] G. Wiedemann, J. Hauptmann, T. Heinze, A. Kempe, H.-G. Kusch, M. Panzner, H. Wust
"Laserabtragen dünner Deckschichten - eine alternative Reinigungsmethode für die Restaurierung und Denkmalpflege - Möglichkeiten und Grenzen"
 Arbeitsblätter für Restauratoren (2001), Heft 1 - 2, S. 69 - 102
- [L76] B. Winderlich, B. Brenner, J. Standfuß, V. Fux, E. Beyer
"Steigerung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen"
 DVM-Bericht Nr. 128, S. 295 - 305
- [L77] R. Zieris, T. Naumann, S. Nowotny, G. Eckart, U. Füssel, E. Beyer
"Neuheiten beim Laser-Plasma-Hybrid-spritzen"
 9. Workshop Plasmaspritzen (2001), S. 50 - 56
- [L78] R. Zieris, S. Nowotny, E. Beyer
"Erzeugen dichter und flächenhafter Beschichtungen mittels Laser-Plasma-Hybridtechnik"
 Tagungsband zur 4. Industriefachtagung "Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik" (OWT 01) und zum 4. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) - Schriftenreihe Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen Bd. 7 (2001), S. 13 - 17
- [L79] O. Zimmer, J. Vetter, N. Rackwitz, P. Siemroth
"Calculation and Measurement of the Time Dependent Erosion Rate of Electromagnetic Steered Rectangular Arc Cathodes"
 Proceedings of the 28th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (Surface and Coatings Technology) Band 146-147 (2001) Heft 1-3, S. 195 - 200

- [T01]** E. Beyer
"Survey of Laser Hybrid Processes"
 Lasers in Manufacturing: at Laser Conference 2001 - 15th International Conference on Lasers and Electrooptics in Europe, München, 18. - 22. Juni 2001
- [T02]** E. Beyer
"Remote Welding Systems"
 9th Annual Automotive Laser Applications Workshop - ALAW 2001, Dearborn, USA, 14. März 2001
- [T03]** E. Beyer
"Lasertechnik für die Produktion"
 Lehrveranstaltung "Produktion im 21. Jahrhundert", Dresden, 18. Juni 2001
- [T04]** E. Beyer
"Laser Hybrid Processes and Laser Remote Welding in Automotive Industry"
 Global Automotive Laser Applications Conference, Erice, Sizilien, Italien, 03. August 2001
- [T05]** E. Beyer
"Research in Laser Material Processing and Surface Technology"
 Technology Colloquium "New Lasers - New Partners - New Applications", Stuttgart, 30. Oktober 2001
- [T06]** E. Beyer
"Laserhybridverfahren in der Oberflächentechnik"
 DOC-Symposium 2001, Dortmund, 06. Dezember 2001
- [T07]** E. Beyer, P. Haller, A. Wagenführ, G. Wiedemann
"Umweltgerechte Holzschutzmaßnahme für den Außenbereich - Stand der Forschung zur Laserbearbeitung von Holzoberflächen"
 Intern. Symposium Holz Innovativ, Rosenheim, 08. März 2001
- [T08]** E. Beyer, P. Haller, A. Wagenführ, G. Wiedemann, H. Wust
"Umweltgerechte Holzschutzmaßnahme für den Außenbereich - Stand der Forschung zur Laserbearbeitung von Holzoberflächen"
 LIGNA 2001 - Vortragsreihe: Zukunftsweisende Aspekte im Ingenieurholzbau, Hannover, 23. Mai 2001
- [T09]** S. Bonß, M. Seifert, K. Barthel, B. Brenner, E. Beyer
"New Developments in High Power Diode Laser Welding"
 20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2001, Jacksonville, Florida, USA, 15. - 18. Oktober 2001
- [T10]** S. Bonß, M. Seifert, B. Brenner, E. Beyer
"Temperaturgeregeltes Randschichthärten mit Hochleistungsdiodenlasern"
 4. Industriefachtagung "Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik" (OWT 01) und 4. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK), Chemnitz, 20. - 21. September 2001
- [T11]** S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson
"Mo/Si-Multilayers with Different Barrier Layers for Applications as EUV Mirrors"
 Microprocesses and Nanotechnology Conference, Matsue, Japan, 31. Oktober - 02. November 2001
- [T12]** S. Braun, H. Mai, M. Moss, R. Scholz, A. Leson
"Morphology of Mo/Si Multilayers with B₄C and C Barrier Layers"
 EUV Lithographie Workshop, Matsue, Japan, 29. - 31. Oktober 2001
- [T13]** B. Brenner
"Industrial Applications of New Laser Welding Technologies"
 Eröffnung Laser-Centrum VITO, Mol, Belgien, 11. Juni 2001
- [T14]** B. Brenner, S. Bonß, M. Seifert, U. Stamm
"Neuere Entwicklungen zum Strahlschweißen mittels Hochleistungsdiodenlasern"
 5. Konferenz "Strahltechnik" SLV-Halle, 27. - 28. November 2001
- [T15]** B. Brenner, J. Standfuß, B. Winderlich
"Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen zum rissfreien Fügen von härtbaren Stählen"
 Schweißen und Schneiden 2001 - Große Schweißtechnische Tagung, Essen, 11. - 13. September 2001
- [T16]** R. Dietsch, T. Holz, D. Weißbach, R. Scholz
"Large Area PLD of nm-Multilayers"
 COLA 2001, Tsukuba, Japan
- [T17]** G. Ecke, R. Kosiba, J. Liday, R. Dietsch
"Evaluation of AES Depth Profiles of Ultrathin Ni/C Multilayer Structures with Regards to Depth Resolution Effects"
 9. ECASIA 2001, Avignon, Frankreich
- [T18]** T. Himmer
"Werkzeugfertigung durch Blechpaketieren - Möglichkeiten und Grenzen heute"
 Workshop "Rapid Prototyping: Fakten, Trends, Visionen", Fraunhofer IWS Dresden, 20. - 21. März 2001
- [T19]** T. Holz
"Abscheidung von Nanometer-Multischichten und ihre Anwendungen in der Röntgenoptik"
 Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Universität Bonn, Bonn, 19. Januar 2001
- [T20]** V. Hopfe
"Laser-CVD - Status und industrielles Potenzial"
 65. Physikertagung und Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik (AKF) der DPG, Hamburg, 26. - 30. März 2001
- [T21]** A. Klotzbach, L. Morgenthal, T. Schwarz, V. Fleischer, E. Beyer
"Laser Welding on the Fly with Coupled Axes Systems"
 20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2001, Jacksonville, Florida, USA, 15. - 18. Oktober 2001

- [T22] A. Klotzbach, L. Morgenthal, T. Schwarz, E. Beyer
"Laser Processing on the Fly with Systems of Coupled Axes"
 Lasers in Manufacturing: at Laser Conference 2001 - 15th International Conference on Lasers and Electrooptics in Europe, München, 18. - 22. Juni 2001
- [T23] A. Klotzbach, L. Morgenthal, T. Schwarz, E. Beyer
"Laserstrahlschweißen mittels High-Power-Strahlablenkoptiken und integrierter Prozesssensoren"
 Werkstoff-Forum 2001, Hannover
- [T24] H.-G. Kusch, T. Heinze, G. Wiedemann
"Hazardous Emission and Health Risk During Laser Cleaning of Natural Stones"
 LACONA IV - Laser in the Conservation of Artwork, Paris, 11. - 14. September 2001
- [T25] D. Lepski, H. Eichler, V. Fux, S. Scharek, E. Beyer
"Calculating Temperature Field and Single Track Bead Shape in Laser Cladding with Marangoni Flow Using Rosenthal's Solution"
 Lasers in Manufacturing: at Laser Conference 2001 - 15th International Conference on Lasers and Electrooptics in Europe, München, 18. - 22. Juni 2001
- [T26] A. Leson
"Zukünftige Entwicklungen in der Beschichtungstechnologie"
 Institutskolloquium DLR Stuttgart, Stuttgart, 08. März 2001
- [T27] A. Leson
"Nanotechnology - Vision oder Realität"
 Symposium, TFG Venture Capital AG, Berlin, 28. März 2001
- [T28] A. Leson, S. Braun, R. Dietsch, T. Holz, M. Mai
"Nanometer Multilayer Coatings for Application in the X-Ray Range"
 2nd International Conference "The Coatings in Manufacturing Engineering", Hannover, 9. - 10. Mai 2001
- [T29] A. Leson
"F&E-Strategie des Kompetenzzentrums Ultradünne funktionale Schichten"
 BMBF Workshop, Bonn, 16. - 17. Mai 2001
- [T30] A. Leson
"Nanotechnologie-Kompetenzzentrum 'Ultradünne funktionale Schichten' - bisherige Aktivitäten und Ausblick"
 MFD-Mitgliederversammlung, Dresden, 23. Mai 2001
- [T31] A. Leson
"Das Technologie-Audit als Instrument der strategischen Institutsplanung"
 Fraunhofer-Abteilungsleiter-Treffen, Dresden, 29. - 30. Mai 2001
- [T32] A. Leson, S. Braun, R. Dietsch, T. Holz, H. Mai, M. Moss
"Ultrathin Films: Manufacturing and Applications"
 Chinese-German-Symposium, Braunschweig, 05. September 2001
- [T33] A. Leson
"Nanotechnologie in Sachsen - Entwicklungspotential einer neuen Technologie"
 Technologie-Abend des Sächsischen Landtages, Dresden, 20. September 2001
- [T34] A. Leson, H. Mai, P. Gawlitza, T. Sebald
"Nanostructured Thermal Barriers - Tailored Coatings for Extreme Conditions"
 Nano-Workshop auf der "Materials Week", München, 04. Oktober 2001
- [T35] A. Leson, S. Braun, H. Mai, M. Moss, N. Kaiser, S. Yulin, T. Feigl, T. Kuhlmann
"X-Ray Optics and Nanotechnology"
 2. German - Ukrainian Workshop, München, 20. - 21. Oktober 2001
- [T36] A. Leson
"Nanometer-Schichtsysteme für Röntgenoptiken"
 Zweites Fachforum - Nanotechnologie: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung, Würzburg, 23. - 24. Oktober 2001
- [T37] A. Leson
"Nanometer Film Systems - Manufacturing and Applications"
 US/Germany Joint Meeting on Nano-scale Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology MIT, 05. - 06. Dezember 2001
- [T38] A. Leson
"Nanometerschichtsysteme - Herstellung und Einsatzbereiche"
 Fachkonferenz "Aktuelle Anwendungen der Nanotechnologie", Bad Homburg, 12. - 13. Dezember 2001
- [T39] H. Mai, S. Braun
"Zur Präparation und Charakterisierung von röntgenoptisch nutzbaren nm-Multischichten"
 Vortrag am Institut für Physikalische Hochtechnologie, Jena, 19. September 2001
- [T40] S. Nägeler, S. Bonß, K. Barthel, B. Brenner, E. Beyer
"New Developments in High Power Diode Laser Welding"
 9th Annual Automotive Laser Applications Workshop - ALAW 2001, Dearborn, USA, 14. März 2001
- [T41] S. Nowotny
"Generieren metallischer Prototypen mit realen Gebrauchseigenschaften und Werkzeugreparatur durch Laser-Pulver-Auftragschweißen"
 Workshop "Rapid Prototyping: Fakten, Trends, Visionen", Fraunhofer IWS Dresden, 20. - 21. März 2001
- [T42] S. Nowotny
"Laser/Plasma-Hybridtechnik und Laserstrahl-Präzisionsauftragsschweißen zum Erzeugen funktionsangepasster, hochbelastbarer Oberflächenschichten"
 183. Arbeitstagung des DVS-Arbeitskreises Thermisches Spritzen, Technische Universität Dresden, 23. März 2001
- [T43] S. Nowotny
"Laser Rapid Prototyping mit Pulvern Zweites Fachforum Beschichten und Formen mit Pulvern"
 IHK Regensburg, 06. - 07. November 2001
- [T44] S. Nowotny, S. Scharek, T. Naumann, R. Gnann, T. Heptner, E. Beyer
"Integrated Laser Milling Center for Complete Machining"
 20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2001, Jacksonville, Florida, USA, 15. - 18. Oktober 2001

- [T45] S. Nowotny, T. Schülke, A. Techel, E. Beyer
"New Developments and Applications in Laser Build-Up Welding"
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, Session B6-1, San Diego, Florida, 01. - 04. Mai 2001
- [T46] T. Sebald, E. Beyer, P. Gawlitza, A. Leson, H. Mai, M. Bobeth, W. Pompe, R. Reiche
"Funktionell gradierte Wärmedämmschicht für die Innenbeschichtung von Bauteilen mit extremen Wärmeübergang mittels Puls-Laser-Deposition"
 Abschlusskolloquium des DFG-SSP "Gradientenwerkstoffe", Darmstadt, 20. - 21. September 2001
- [T47] M. Seifert, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer
"Improved Temperature Control for High Precision Heat Treatment with High Power Diode Lasers"
 20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2001, Jacksonville, Florida, USA, 15. - 18. Oktober 2001
- [T48] H.-J. Scheibe
"Laser-Arc - Laser-Induced, Pulsed Vacuum Arc Deposition: Process, Technology and Applications"
 The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF 2001, San Diego, USA, 30. April - 04. Mai 2001
- [T49] H.-J. Scheibe
"Neuartige superharte Kohlenstoffschichten (Diamor®) - Beschichtungstechnologien auf der Basis gepulster Vakuumbogenverdampfung (Laser-Arc) - Einsatz bei Trockenbearbeitung, Minimalmengen- und Mangelschmierung - Lasermaterialbearbeitung mit CO₂-, Festkörper-, Excimer- und Hochleistungsdiodenlasern"
 Lehrgang "Werkstoffe und Beschichtungen für Hochleistungswerkzeuge", Dresden, 18. - 19. Oktober 2001
- [T50] H.-J. Scheibe, B. Schultrich
"Harte Kohlenstoffschichten für die Umformung und Zerspanung mit verminderten Schmierstoffeinsatz"
 VDI-Seminar "Bearbeitungsverfahren für rationelle Fertigung", Stuttgart, 19. - 20. November 2001
- [T51] D. Schneider
"Quality Control of Hard Coatings by Laser Acoustic"
 The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF 2001, San Diego, USA, 30. April - 04. Mai 2001
- [T52] D. Schneider
"Laseraustik - LAwave"
 Fraunhofer-Abteilungsleiter-Treffen, Dresden, 29. - 30. Mai 2001
- [T53] D. Schneider, B. Schultrich
"Characterization of Coatings and Machined Surfaces by Ultrasonic Surface Waves"
 The Coatings, Hannover, 09. - 10. Mai 2001
- [T54] D. Schneider, B. Schultrich
"Laser-Akustische Prüfung von Nano-Schichten und Bearbeitungs-Randschichten"
 6. Workshop Nanometer-Schutzschichten - Kompetenzzentrum "Ultradünne funktionale Schichten", Fraunhofer IWS Dresden, 05. - 06. Juli 2001
- [T55] B. Schultrich
"Abscheidung nanostrukturierter Schichten mittels Puls laser und Laser-Arc"
 65. Physikertagung und Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik (AKF) der DPG, Hamburg, 26. - 30. März 2001
- [T56] B. Schultrich
"Subplantation Modelling for Technological Phase Diagram of ta-C Deposition"
 The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF 2001, San Diego, USA, 30. April - 04. Mai 2001
- [T57] B. Schultrich
"Nanostrukturierte und ultradünne Kohlenstoffschichten"
 6. Workshop Nanometer-Schutzschichten - Kompetenzzentrum "Ultradünne funktionale Schichten", Fraunhofer IWS Dresden, 05. - 06. Juli 2001
- [T58] B. Schultrich
"Superharte Schutzschichten durch nm-Design"
 OTTI-Fachforum Nanotechnologie: Die Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts in der industriellen Anwendung Würzburg, 23. - 24. Oktober 2001
- [T59] B. Schultrich, H.-J. Scheibe
"Neue Möglichkeiten zur Trockenbearbeitung durch superharte amorphe Kohlenstoffschichten (Diamor)"
 VDI-Seminar "Trockenbearbeitung", Stuttgart, 26. - 27. Juni 2001
- [T60] B. Schultrich, H.-J. Scheibe
"Superhard Amorphous Carbon Films for Forming and Cutting Tools"
 The Coatings, Hannover, 09. - 10. Mai 2001
- [T61] B. Schultrich, H.-J. Scheibe, P. Siemroth
"Diamor® - Superharte amorphe Kohlenstoffschichten, die neue Generation der Schutzschichten"
 Fraunhofer-Abteilungsleiter-Treffen, Dresden, 29. - 30. Mai 2001
- [T62] B. Schultrich, S. Völlmar
"Von Tschirnhaus' Sonnenofenexperimenten zur Lasermaterialbearbeitung"
 Ehrenfried Walther von Tschirnhaus - Kolloquium zu seinem 350. Geburtstag, Dresden, 10. April 2001
- [T63] H. Schulz, B. Schultrich, H.-J. Scheibe
"Harte Kohlenstoffschichten für die Umformung und Zerspanung mit vermindertem Schmierstoffeinsatz"
 VDI-Seminar "Hochleistungsverfahren für die rationelle Fertigung", Dresden, 10. - 11. Mai 2001
- [T64] T. Schülke
"Diamor Films for Dry Machining"
 The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF 2001, San Diego, USA, 30. April - 04. Mai 2001
- [T65] T. Schülke, H.-J. Scheibe, P. Siemroth, B. Schultrich
"Industrial Laser-Arc Coater for the Deposition of Superhard Amorphous Carbon Films (Diamor)"
 Surface Engineering and Vacuum Metallurgy, San Francisco, USA, 23. Oktober - 02. November 2001

- [T66] T. Schülke, D. Schneider, B. Schultrich
"Non-destructive Testing of Mechanical Properties of Thin Films Below 100 nm with Laser-Acoustic Waves"
 Surface Engineering and Vacuum Metallurgy, San Francisco, USA, 23. Oktober - 02. November 2001
- [T67] P. Siemroth
"Industrial Precision Deposition by Filtered High Current Arc"
 The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF 2001, San Diego, USA, 30. April - 04. Mai 2001
- [T68] J. Standfuß, U. Stamm, B. Brenner, E. Beyer
"Laser Beam Welding of Cast Irons with Hardenable Steels"
 20th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics - ICALEO 2001, Jacksonville, Florida, USA, 15. - 18. Oktober 2001
- [T69] A. Techel
"Werkstoffe und Strategien für das 3D-Laser-Präzisionsauftragschweißen"
 Workshop "Rapid Prototyping: Fakten, Trends, Visionen", Fraunhofer IWS Dresden, 20. - 21. März 2001
- [T70] A. Techel
"Schnelle Werkzeugfertigung durch automatisiertes Metall-LOM und Folgeprozesse"
 Workshop "Rapid Prototyping: Fakten, Trends, Visionen", Fraunhofer IWS Dresden, 20. - 21. März 2001
- [T71] A. Techel
"Anwendungspotential der neuen Rapid Tooling Prozesskette"
 Workshop "Rapid Prototyping: Fakten, Trends, Visionen", Fraunhofer IWS Dresden, 20. - 21. März 2001
- [T72] G. Wiedemann
"Aktuelles zur Gerätetechnik"
 5. Forum Laser in Restaurierung und Denkmalpflege, Nürnberg, 26. - 27. Oktober 2001
- [T73] G. Wiedemann, A. Kempe
"Laserstrahlreinigung in Restaurierung und Denkmalpflege - Grundlagen und Anwendung"
 Fachakademie für Restauratorenausbildung A. R. Goering Institute e. V., München, 20. September 2001
- [T74] G. Wiedemann, H. Wust
"Modifizieren von Holzoberflächen mit Laserstrahlung"
 Tagung des Verbandes ak. Holzingenieure, Technische Universität Dresden, 09. November 2001
- [T75] B. Winderlich, B. Brenner, J. Standfuß, V. Fux, E. Beyer
"Steigerung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen"
 28. Tagung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, Schaffhausen, Schweiz, 17. - 18. Oktober 2001
- [T76] H. Wust, E. Beyer, H.-G. Kusch, G. Wiedemann
"Laser Cleaning Applied in the Restoration of a Medieval Wooden Panel Chamber at Pirna"
 Vortrag/Vorlesung für Studenten im Rahmen des "European Course in the Framework of Culture 2000" - Videokonferenz, Padua (Italien) / Dresden, 10. Mai 2001
- [T77] R. Zieris
"Werkstoffsysteme beim Laser-Plasma-Hybridspritzen"
 AP-Frühjahrstagung - MDS-Leitprojekt VDI-TZ, Düsseldorf, 20. - 21. Februar 2001
- [T78] R. Zieris
"Reparieren und Generieren mit Hochleistungs-Diodenlasern"
 MDS-Herbsttagung AP 5, Augsburg, 10. - 11. Oktober 2001
- [T79] R. Zieris, T. Naumann, S. Nowotny, G. Eckart, U. Füssel, E. Beyer
"Neuheiten beim Laser-Plasma-Hybridspritzen"
 9. Workshop Plasmatechnik, Technische Universität Ilmenau, 21. - 22. Juni 2001
- [T80] R. Zieris, S. Nowotny, E. Beyer
"Erzeugen dichter und flächenhafter Beschichtungen hoher Haftfestigkeit mittels Laser- und Plasmastrahl"
 4. Industriefachtagung "Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik" (OWT 01) und 4. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK), Chemnitz, 20. - 21. September 2001
- [T81] O. Zimmer
"High-Rate Sputter Cleaning for Large Area PVD Deposition"
 The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF 2001, San Diego, USA, 30. April - 04. Mai 2001
- [T82] O. Zimmer, J. Vetter
"Calculation and Measurement of the Time Dependent Erosion Rate of Electromagnetically Steered Rectangular Arc Cathodes"
 The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF 2001, San Diego, USA, 30. April - 04. Mai 2001

Wenn Sie mehr Informationen wünschen, kreuzen Sie bitte das entsprechende Feld an und senden bzw. faxen Sie eine Kopie dieser Seite an unten genannte Adresse:

Bitte senden Sie mir:

- die Broschüre "Problemlösungen aus einer Hand"
- die Broschüre "One-Stop Solutions" (in englisch)
- den Jahresbericht 1997
- den Jahresbericht 1998
- den Jahresbericht 1999
- den Jahresbericht 2000
- einen weiteren Jahresbericht 2001

Adresse:

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden
Presse und Öffentlichkeitsarbeit
Ansprechpartner: Dr. Ralf Jäckel

Winterbergstr. 28
01277 Dresden

Tel.: 0351 / 2583 444
Fax: 0351 / 2583 300
E-mail: ralf.jaeckel@iws.fraunhofer.de

Internet: www.iws.fraunhofer.de

Bitte senden Sie mir Material über folgende Verfahren und Methoden:

Bereich Röntgen- und EUV-Optik

- Multischichten für röntgenoptische Anwendungen
- Großflächen-Präzisionsbeschichtung mittels Pulsed Laser Deposition

Bereich Dünnschichttechnologie

- Diamor® - Superharte, amorphe Kohlenstoffschichten für Anwendungen "Gleiten ohne Schmierer"
- Laser-CVD zur Beschichtung von Faserbündeln für Keramikverbundwerkstoffe
- Laserakustisches Prüfgerät für Schichten und Werkstoffoberflächen
- FTIR-Spektroskopie zur CVD-Diagnostik
- Optische Spektroskopie an Oberflächen und Schichten
- Mechanisch-tribologische Schichtcharakterisierung

Bereich Thermische Beschichtungsverfahren

- Laserunterstütztes Plasmaspritzen
- Laserstrahl-Auftragschweißen mit Hochleistungs-Diodenlasern
- 3D-Laser-Pulver-Auftragschweißen mit dem Koaxial-Beschichtungskopf
- Laser-Rapid-Prototyping - Ein Verfahren zur schnellen Fertigung von Funktionsmustern
- Verschleißschutz durch Laserstrahlbeschichten mit hartstoffhaltigen Legierungen
- Rapid-Prototyping von metallischen Bauteilen durch Laser-Flüssigphasen-Sintern von Verbundpulvern

Bereich Füge- und Randschichttechnologien

- Laserstrahlschweißen und Hybrid-schweißverfahren
- Laserstrahlschweißen mit Hochleistungs-Diodenlasern
- Induktiv unterstützte Laser-Materialbearbeitung
- Laserstrahlhärten - ein modernes Verfahren zur Verbesserung der Schwingfestigkeit von Bauteilen
- Werkstoffprüfung sichert Produktqualität
- GEOPT - Software zum Laserstrahlhärten

Bereich Systemtechnik / Laserabtragen und -trennen

- lasertronic® -Systeme aus dem Fraunhofer IWS Dresden
- High-Speed-Strahlbewegung für das Laserstrahlschweißen
- Formgenaues Hochgeschwindigkeits-Laserschneiden
- Laserstrahlabtragen dünner Deckschichten
- Laserbearbeitung von Naturstein
- Patinafreilegungen mit dem Laserstrahl
- Mikroschneiden und -bohren mit ultraviolettem Laserlicht
- Laser-Mikrobeschriftung von Glas
- Mikrostrukturierung von Keramiken mit Excimerlasern
- Dekorative Glasgestaltung mittels Laser-Innengravur
- Rutschhemmende Ausrüstung polierter Natursteinoberflächen

Post-Adresse:

Fraunhofer-Institut für Werkstoff-
und Strahltechnik Dresden

Winterbergstr. 28

01277 Dresden

Internet-Adresse:

<http://www.iws.fraunhofer.de>

Tel.: (0351) 2583 324

Fax: (0351) 2583 300

E-mail: info@iws.fraunhofer.de

Anfahrtsweg:

Mit dem Auto (ab Autobahn):

- Autobahn A4 oder A13, Ausfahrt Dresden-Altstadt,
- Bundesstraße B6, Hamburger Straße in Richtung Stadtmitte,
- weiter über Wilsdruffer Straße, Stübelallee,
- am Ende des "Großen Gartens" rechts in die Karcherallee,
- an der folgenden Ampel links in die Winterbergstraße.

Mit der Straßenbahn (ab Dresden-Hauptbahnhof):

- Straßenbahnlinie 10 zum Straßburger Platz,
- mit den Linien 1 oder 2 stadtauswärts (Richtung Kleinzschachwitz bzw. Prohlis) bis Haltestelle Zwinglistraße,
- 10 min zu Fuß (Richtung Grunaer Weg).



Impressum

Redaktion: Prof. Dr. Eckhard Beyer
Dr. Ralf Jäckel

Koordination / Gestaltung: Dipl.-Ing. Karin Juch
Dr. Ralf Jäckel

Bildnachweis: S. 23, S. 24 (Abb. 2): Rolf Günther
S. 29 (Abb. 4): Arianespace
S. 76: Deutsche Messe AG Hannover
S. 78 (mittl. Abb.): Aloys Reminghorst
(Ruhr Nachrichten)
alle anderen Abb.: Fraunhofer IWS Dresden

Titelfotos

oben: Geschweißtes Flugzeug-Testpanel

Mitte: Mittels Metall-LOM hergestelltes Prägwerkzeug

unten: Dreidimensionales Härten einer Schnittleiste

© Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2001

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

