



Fraunhofer Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Jahresbericht 2003



Internet: www.iws.fraunhofer.de



Fraunhofer Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Jahresbericht 2003





Prolog

Redaktion: 2003 war für die deutsche Wirtschaft und für die Fraunhofer-Gesellschaft ein sehr schwieriges Jahr. Wie hat sich das IWS behaupten können?

Prof. Beyer: Wir konnten 2003 gegen den Trend schwimmen und haben ein zweistelliges Wachstum erreicht. Dabei stiegen unsere Erträge aus der Industrie um über zwanzig Prozent.

Redaktion: Das ist ja wirklich bemerkenswert. Und wie haben Sie diese hervorragenden Ergebnisse erzielt?

Prof. Beyer: Uns war von Anfang an klar, dass es von der öffentlichen Hand weniger Geld geben wird. Deswegen haben wir verstärkt in PR investiert und uns noch intensiver an Messen, Workshops, Tagungen beteiligt als bisher. Wir sind ein hohes Risiko eingegangen, haben aber dank des großen Engagements aller Mitarbeiter Erfolg gehabt.

Redaktion: Gibt es einige herausragende Projekte zu nennen?

Prof. Beyer: Ein ganz besonderes Highlight ist es, wenn es uns gelingt, eine Entwicklung aus dem IWS in die Produktion zu überführen. In den letzten Jahren waren wir stolz darauf, zwei bis drei solcher Highlights vorweisen zu können. 2003 können wir nun dreizehn derartige Highlights vorweisen. Dies ist eine unglaublich hohe Zahl. Einige sind noch vertraulich, andere dürfen wir Ihnen auf den folgenden Seiten vorstellen.

Redaktion: Die Förderung der Forschung durch Bund und Länder wird 2004 weiter zurückgehen. Wie positioniert sich das IWS unter den immer schwieriger werdenden FuE-Bedingungen?

Prof. Beyer: Das Jahr 2003 war für das IWS ein außergewöhnlich gutes Jahr. Um dieses Ergebnis bei rückläufiger Forschungsförderung halten zu können, müssen wir die Erträge aus der Industrie nochmals deutlich steigern. Zusätzlich wird das kommende Jahr durch Ausfallzeiten aufgrund des geplanten Umzugs verschiedener Arbeitsgruppen und Labore in unseren Anbau geprägt sein. 2004 wird für uns in jeder Hinsicht ein sehr sportliches Jahr. "Schauen wir mal."

Redaktion: Vielen Dank für das Interview.

Vergangenheit bewerten
Gegenwart gestalten
in die Zukunft führen



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

Prolog	3
Inhalt	5
Highlights des IWS im Jahr 2003	6
Das Institut im Profil	10
Kurzporträt	10
Organisation und Ansprechpartner	12
Anbindung an die TU Dresden	13
Zentren und externe Projektgruppen	14
Ausstattung des Institutes	18
Das Institut in Zahlen	20
Kuratorium und Gremien	22
FuE-Angebot	23
Röntgen- und EUV-Optik	23
PVD-Dünnschichttechnologie	35
CVD-Dünnschichttechnologie	49
Thermische Beschichtungsverfahren	59
Füge- und Randschichttechnologien	75
Lasertrennen und -abtragen, Systemtechnik	93
Klebtechnik	106
Multimedia / Simulation	108
Die Fraunhofer-Gesellschaft auf einen Blick	114
Namen, Daten und Ereignisse	115
Diplomarbeiten und Dissertationen	115
Vorlesungen und Mitarbeit in Gremien	116
Besondere Ereignisse	117
Preise des IWS 2003	117
Messebeteiligungen	118
Veröffentlichungen	121
Tagungsvorträge	125
Patente und Marken	129
Informationsservice	130
Kontaktadressen und Anfahrt	131



IWS organisiert Nanofair 2003 - Internationales Nanotechnologie-Symposium in Dresden

Unter dem Motto "Neue Ideen für die Industrie" fand am 20. und 21. November 2003 das zweite gemeinsame internationale Nanotechnologie-Symposium der Städte Dresden, Karlsruhe und Strasbourg mit Unterstützung des Vereins Deutscher Ingenieure in Dresden statt. Die wissenschaftliche Leitung der Tagung sowie die Gestaltung des Programmes lag in den Händen des IWS. Attraktiver Veranstaltungsort war der Plenarsaal des Sächsischen Landtages unmittelbar in der Altstadt. Im Mittelpunkt des Symposiums standen Forschungsergebnisse und neue Anwendungen der Nanotechnologie in den Bereichen Elektronik, Automotive, Werkstoffe, Optik und Life Sciences. 300 Teilnehmer aus 14 Ländern, darunter 100 Vertreter aus der Industrie, sorgten für interessante und lebhaft Diskussionen während der Tagung, die durch eine begleitende Fachausstellung ergänzt wurde.

Neues EUV-Reflektometer im IWS entwickelt und aufgebaut

Erstmals in Europa wurde ein kompaktes Reflektometer mit der Arbeitswellenlänge im Bereich des extremen Ultraviolett (EUV) bei 10 - 16 nm entwickelt und aufgebaut. Dieses EUV-Reflektometer entstand in einem vom BMBF geförderten Projekt unter Federführung des Fraunhofer IWS Dresden, der Beteiligung der Carl Zeiss SMT AG Oberkochen und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Berlin sowie dem Max-Born-Institut Berlin, der Bestec GmbH Berlin und der AIS Automation Dresden GmbH. Mit diesem Reflektometer wird eine effektivere Entwicklung von EUV-Optiken möglich.



Eröffnung der Nanofair 2003 im Sächsischen Landtag



Edelgard Bulmahn, Bundesministerin für Bildung und Forschung, während der Eröffnung der Nanofair 2003 im Sächsischen Landtag



Pressekonferenz zur Eröffnung der Nanofair 2003



Blick in den Plenarsaal des Sächsischen Landtages zur Eröffnung der Nanofair 2003



Probenkammer des EUV-Reflektometers



Laserstrahlschweißanlage zum Fügen von Differentialgetrieben (Systemintegrator Arnold)



Bauteilzuführung der Laserstrahlschweißanlage

Laserschweißen und Laserinduktionsschweißen: IWS-Verfahrensentwicklungen für die industrielle Fertigung

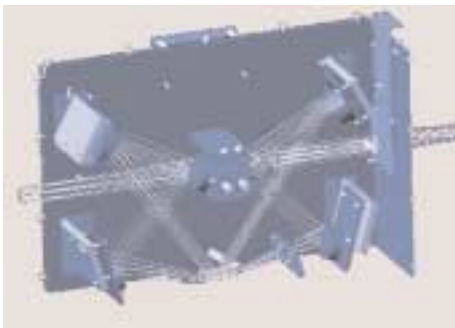
Mit den Anlagenbetriebnahmen bei DaimlerChrysler in Stuttgart und der dritten Anlage bei Visteon in Düren ist es im vergangenen Jahr gelungen, weitere nach der Technologie des induktiv unterstützten Laserstrahlschweißens gefügte Bauteile in die industrielle Anwendung zu überführen. Damit befinden sich jetzt bereits acht Laser-Induktionsanlagen im Serieneinsatz. Gleichzeitig wurden Laserschweißanlagen bei Winkelmann Palsis in Ahlen und ZF in die industrielle Produktion überführt. Die letztere Anlage verschweißt erstmalig Gusseisen mit ein-satzgehärtetem Stahl nach prozess-integrierter Laserreinigung und ist zur Qualitätssicherung mit einer Sensorik ausgerüstet, die die Aufmischung in der Schweißnaht kontrolliert.



Anlage zum induktiv unterstützten Laserstrahlschweißen von PKW-Antriebswellen bei Visteon in Düren (Systemintegratoren Arnold und EMAG)

FTIR-Qualitätskontrolle von 300 mm-Wafern

Für die Qualitätskontrolle von 300 mm-Wafern oder auch von anderen Halbzeugen und ausgedehnten Bauteilen wurde ein Messgerät aufgebaut, das auf der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) beruht. Damit können auf einfache Art und Weise die optischen Eigenschaften und deren laterale Verteilung sowie die Wafertopologie (Schichtdicken, Rauheiten) ermittelt werden. Die Ergebnisse des IWS stellen einen wichtigen Schritt zur Qualitätssicherung bei der Beschichtung großer Wafer in der Halbleiterindustrie dar und sind u. a. für die Dresdner Halbleiterfirmen sehr interessant.



Optische Simulation zur Konstruktion des FTIR-Reflexionsmessgerätes



Neues Messgerät zur FTIR-Qualitätskontrolle von Wafern



Laserhärten: IWS-Verfahrensentwicklungen für die industrielle Fertigung

Im Bereich des Laserstrahlhärtens konnten im Jahr 2003 gleich drei Anlagen zum Härten von Turboladerwellen bei BorgWarner in Kirchheimbolanden (Rheinland-Pfalz) in die industrielle Produktion überführt werden. Die Herausforderung bestand im geometrisch präzisen Härten von ca. 90 verschiedenen Wellentypen. Dies ist insbesondere durch die herausragenden Eigenschaften der im IWS entwickelten temperaturgeführten Laserleistungsregelung lasertronic® LompocPro optimal möglich.

Die gehärteten Turboladerwellen werden in Abgasturboladern von Nutzfahrzeugen fast aller Hersteller (z.B. DaimlerChrysler, MAN, Volvo, DAF, IVECO) eingesetzt.



Laserhärteanlage im Serieneinsatz bei BorgWarner in Kirchheimbolanden



Prozessentwicklung zum Laserstrahlhärten von Teilen für Einspritzsysteme unter Schutzgas

Laserhärten: IWS-Verfahrensentwicklungen für die industrielle Fertigung

Für Siemens VDO Automotive im sächsischen Limbach-Oberfrohna wurde das Laserstrahlhärten von Einspritzsystemen entwickelt und bei der Fa. Sitec Industrietechnologie Chemnitz in die Serie überführt. In das Anlagenkonzept der Fa. Sitec wurde die im IWS entwickelte temperaturgeführte Laserleistungsregelung lasertronic® LompocPro integriert. Die Prozessentwicklung erfolgte ebenfalls im Fraunhofer IWS Dresden.



Laserstrahlhärteanlage bei der Fa. Sitec Industrietechnologie Chemnitz

Industrieüberführung modularer Pulverdüsensysteme COAXn

Seit dem Jahr 2000 wurden 35 Pulverdüsensysteme für das Laser-Pulver-Auftragschweißen weltweit installiert. Allein im vergangenen Jahr konnten wieder 6 solcher Systeme mit den zugehörigen Technologien in die Industrie für das Reparieren von Umformwerkzeugen, Flugzeugtriebwerken und stationären Gasturbinen überführt werden. Die Auftraggeber kamen aus Deutschland, Finnland, Japan und den USA.



Laser-Pulver-Auftragschweißen des Verschleißringes eines Ölbohrwerkzeugs im Industrieinsatz



Industrieüberführung eines robotergeführten Remote-Welding-Systems für Nd:YAG-Laser

Im Rahmen des europäischen Remo-weld-Projektes wurde eine robotergeführte Strahlablenkoptik entwickelt und beim italienischen Projektpartner, der Fa. Salvagnini in Sarego, in die industrielle Fertigung überführt. Geschweißt werden Metallschubkästen für Werkzeugschränke.



Anlage zum Remote-Laserschweißen bei Salvagnini (Italien)



Anlage zum Schweißen von Edelstahlrohren in der Fa. Albrecht Zwick GmbH in Hagen

Industrieüberführung einer Laseranlage für das Verschweißen von Rohrenden

Das Laserstrahlschweißen ist ein modernes Schweißverfahren, das einen breitgefächerten industriellen Einsatz gefunden hat, insbesondere in der Massenfertigung. Mit Hilfe einer im IWS entwickelten Technologie werden seit dem Sommer 2003 nun auch Edelstahlrohre (Vierkantrohre der Werkstoffe 1.4301, 1.4571 und 1.4003) in der Fa. Albrecht Zwick GmbH im nordrhein-westfälischen Hagen geschweißt.

Erfolgreiche Rezertifizierung nach ISO 9001:2000

Im Oktober 2003 wurde das Qualitätsmanagementsystem des IWS einem Zertifizierungsaudit nach der Norm ISO 9001:2000 unterzogen. Das Fraunhofer IWS Dresden war 1997 das erste Institut in der Fraunhofer-Gesellschaft, welches ein Qualitätsmanagementsystem in allen seinen Bereichen aufbauen und nach ISO 9001 erfolgreich zertifizieren lassen konnte.



Im IWS Dresden sind alle Bereiche nach der Norm ISO 9001:2000 zertifiziert



Das Geheimnis aller Erfinder ist es,
nichts für unmöglich zu halten.

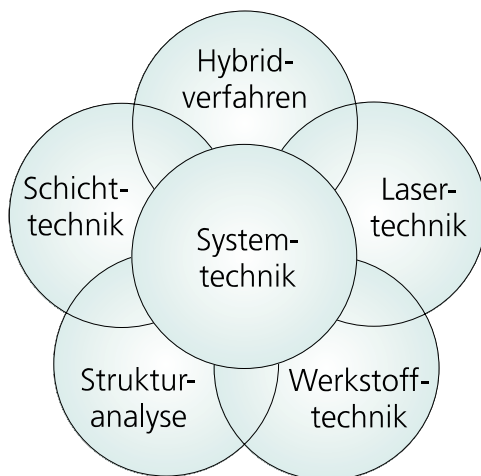
Justus von Liebig

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

- Laserstrahlschweißen und -löten
- Laserstrahlhärten, -umschmelzen und -auftragschweißen
- Laseroberflächenveredelung mit Zusatzwerkstoffen (Legieren, Dispergieren)
- Reparaturbeschichten
- Rapid-Prototyping-Verfahren
- 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 amorphem Kohlenstoff
- Nanometer-Multischichten für röntgenoptische Komponenten
- Atmosphärendruck-Plasma-CVD
- Plasmaspritzen



Hybridverfahren

- Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen
- 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
- Beschichtungsmodule für Atmosphärendruck-Plasma-CVD- und PVD-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

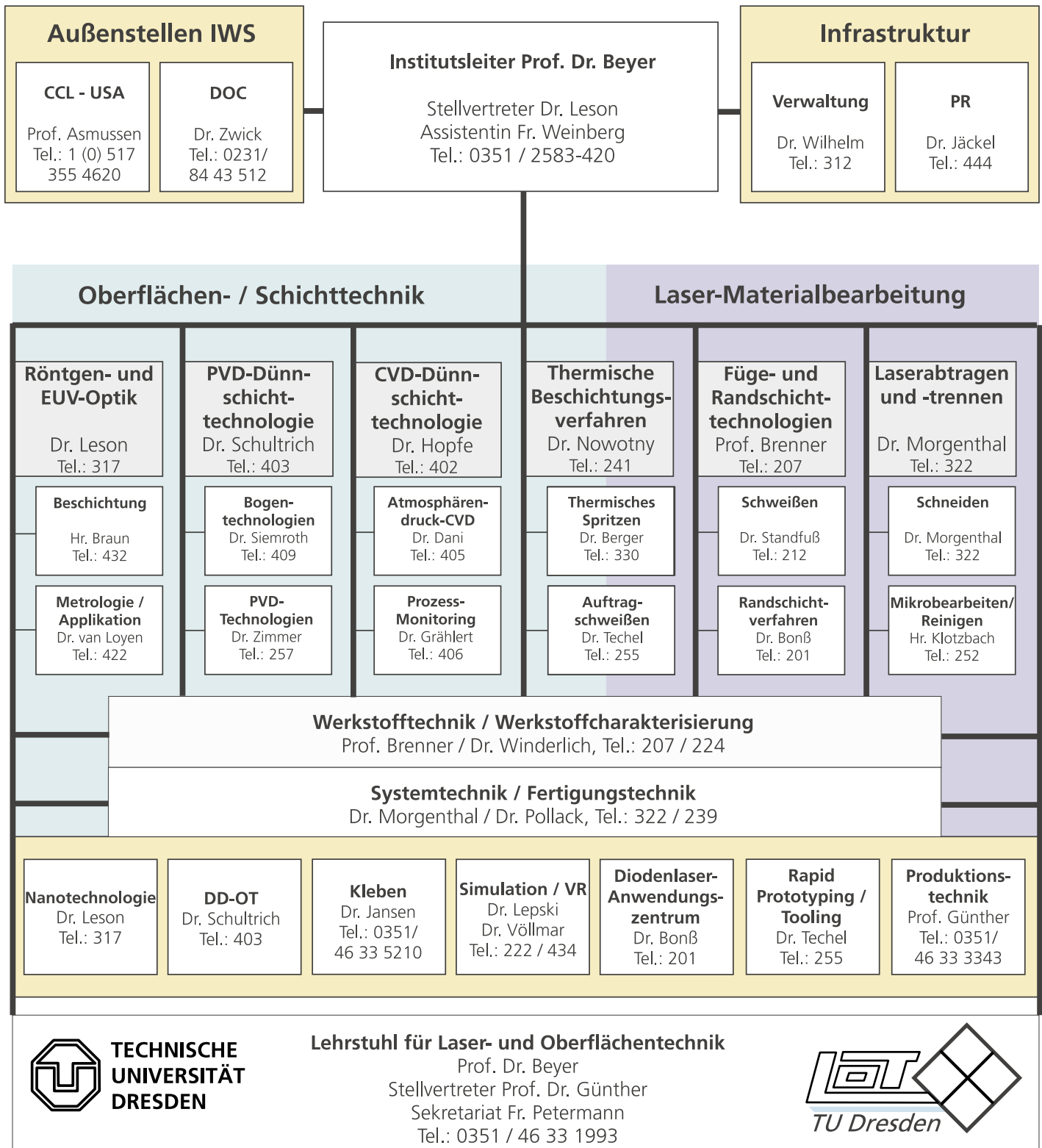
Das Fraunhofer IWS bietet Ihnen Dienstleistungs- sowie Werkverträge an und garantiert Ihnen bei Bedarf strikte Vertraulichkeit.

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

Internet: www.iws.fraunhofer.de



Organisation und Ansprechpartner



Gastfirmen im Fraunhofer IWS:

- EFD Induction GmbH Freiburg, Außenstelle Dresden
- ALOtec Angewandte Laser- und Oberflächensystemtechnik GmbH Dresden
- AXO Dresden GmbH



Anbindung an die TU Dresden

Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik

2003 waren am Lehrstuhl 35 Mitarbeiter beschäftigt. Die Drittmittelträge lagen über 1,5 Mio. €.

Der Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik ist tragende Säule des Institutes für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik, welches am 1. Juli 2003 in der Fakultät Maschinenwesen neu gegründet wurde. Die durchgeführten Projekte sind stärker grundlagenorientiert und ergänzend zu den Arbeiten des IWS angelegt. Die Arbeitsgruppen behandeln folgende Themen:

- Fertigungsgestaltung
- Lasertechnik
- Oberflächentechnik
- Schichttechnik
- Klebtechnik

Folgende Vorlesungen wurden angeboten:

- Prof. Beyer: Fertigungstechnik II (Oberflächen- und Beschichtungstechnik)
- Dr. Schultrich, Prof. Beyer: Schichttechnologie
- Dr. Leson, Prof. Beyer: Oberflächentechnik / Nanotechnologie
- Prof. Beyer: Lasergrundlagen / Lasersystemtechnik
- Prof. Beyer: Laser und Plasmen in der Fertigungstechnik (Mechatronik)



CD zur Vorlesung Fertigungstechnik 2

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:

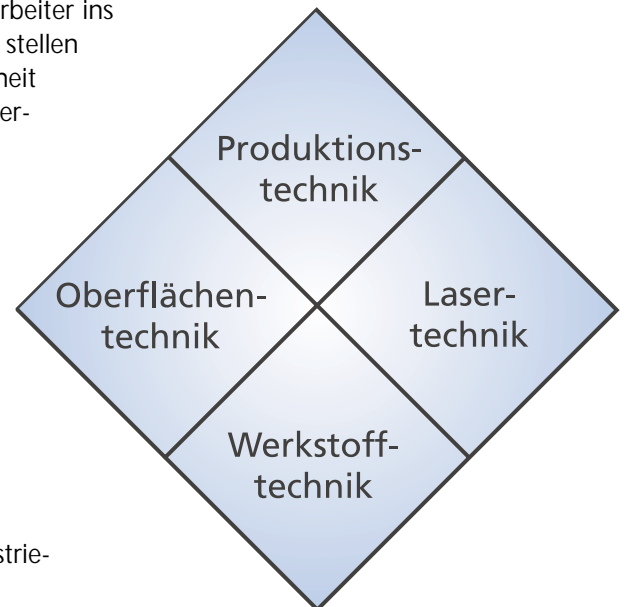
- F&E - Einbindung in Industrieprojekte
- Integration neuester F&E-Ergebnisse in die Lehre
- Ausbildung von Studenten an modernstem Equipment



CD Laserlexikon (Informationen auch unter www.laserlexikon.de)

Wissenschaft braucht Zusammenarbeit, in der sich das Wissen des einen durch die Entdeckung des anderen bereichert.

Jose Ortega y Gasset



CD zur Vorlesung Lasertechnik



Zentren und externe Projektgruppen des Fraunhofer IWS

*Innovationen sind Pfeiler,
die die Zukunft tragen.*

Norbert Stoffel

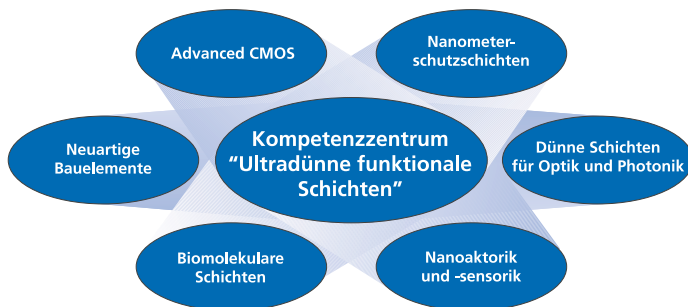
Nanotechnologie-Kompetenz- zentrum "Ultradünne funktionale Schichten"

Die Nanotechnologie gehört zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Bereits heute gibt es marktreife Produkte: Festplatten und Leseköpfe 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.

Zur konsequenten Erschließung dieser industriellen Anwendungsmöglichkeiten haben 51 Unternehmen, 10 Hochschulinstitute, 22 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. Ein Höhepunkt im Jahr 2003 war die Durchführung des europäischen Nanotechnologie-Symposiums "Nanofair 2003" in Dresden, das 300 Teilnehmer aus Industrie und Wissenschaft zusammenführte und maßgeblich vom Kompetenzzentrum und vom IWS mitgestaltet wurde.



Eröffnung der Nanofair 2003 im Plenarsaal des Sächsischen Landtages



Arbeitskreise des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums

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 Diodenlaser-Systemen zu lösen.



Anlage zum Härten mit integriertem HLHL in der Laserhalle des IWS



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



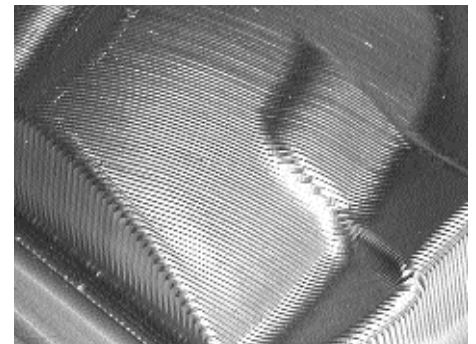
Strahltechnologie:
Wasserstrahl-Abrasiv-Schneidanlage

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 MELATO®-Verfahrens (Metal Laminated Tooling) können Werkzeuge in einem Bruchteil der bisher benötigten Zeit hergestellt werden.



Oberfläche eines durch Metall-LOM hergestellten Werkzeugs



Laserintegriertes CNC-Fräszentrum



Lamellierter Rohling eines Prägewerkzeugs



*Nichts ist so mächtig wie eine Idee,
deren Zeit gekommen ist.*

Viktor Hugo

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



Dr. Axel Zwick
Leiter der Projektgruppe
am DOC in Dortmund
Tel.: 0231 / 844 3512



Gebäude des Dortmunder OberflächenCentrums

Mit der Gründung des Dortmunder OberflächenCentrums unter Beteiligung der Fraunhofer-Gesellschaft bündelte die ThyssenKrupp Stahl AG (TKS) ihre Kapazitäten und Kompetenzen auf dem Gebiet der Oberflächentechnik.

In diesem größten Forschungs- und Entwicklungszentrum Europas zur Oberflächenveredelung von Flachstahl, das im Dezember 2000 auf dem Gelände der Dortmunder Westfalenhütte eingeweiht wurde, arbeiten TKS-Mitarbeiter und Mitarbeiter des Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden in einer neuen Form der "Public Private Partnership" zusammen. Gemeinsames Ziel ist es, innovative Verfahren der Oberflächentechnik zu entwickeln und in die industrielle Fertigung zu überführen.

Ein erstes, herausragendes Ergebnis dieser Zusammenarbeit sind neuartige Zink-Legierungsüberzüge (ZE-Mg). Sie vereinen bei einer Halbierung der Überzugsdicke die sehr gute Korrosionsbeständigkeit bewährter Zinküberzüge mit einer wesentlich verbesserten Bearbeitbarkeit, wie die Fraunhofer-Projektgruppe für die Laserschweißung zeigen konnte.

Darüber hinaus bietet die Fraunhofer-Projektgruppe auf 1100 m² Neubaufläche eine Reihe sich ergänzender Verfahren zur Oberflächenveredelung an. Mit modernster Anlagentechnik lassen sich nahezu porenfreie und äußerst haftfeste Plasmaspritzschichten herstellen, hoch beanspruchte Bereiche von Bauteilen und Werkzeugen mit dem Laserauftragschweißen gezielt mit millimeterdicken Verschleißschutzschichten panzern. Aber auch im Vakuum lassen sich metergroße und tonnenschwere Teile mit nano- bis mikrometerdicken Höchstleistungsschichten, z. B. mit Diamor[®]-Schichtsystemen, versehen, die eine überragende Härte mit exzellenten Gleiteigenschaften verbinden.

Die breite Palette dieser Verfahren, die sich teilweise untereinander kombinieren lassen, bieten zusammen mit dem Know-how der beteiligten Fraunhofer-Institute die Gewähr, dass der Kunde, sei es TKS, ein TKS-Kunde oder ein anderes Unternehmen, die technisch und wirtschaftlich optimale Problemlösung bekommt. Mit Hilfe eines weltweit einmaligen, mobilen 4 kW-Nd:YAG-Lasers ist es sogar möglich, Verfahrensentwicklungen aber auch "Trouble shooting" direkt beim Industriekunden zu realisieren und mit Hilfe von bis zu 75 m langen Lichtleitkabeln produktionsnah umzusetzen.





Fraunhofer Center for Coatings and Laser Applications (CCL)



Prof. Jes Asmussen
Center Director
CCL / USA
Tel. 1-517-355 4620

Die USA-Aktivitäten des Fraunhofer IWS Dresden sind im "Fraunhofer Center for Coatings and Laser Applications CCL" zusammengefasst. Das CCL wird von Prof. Dr. Jes Asmussen (Michigan State University) geleitet. Prof. Asmussen ist Experte für Diamantbeschichtungen. Seine bisherigen Arbeiten ergänzen in idealer Weise das Know-how des IWS auf dem Gebiet der DLC-Beschichtungen. Unter Leitung von Prof. Asmussen soll in Lansing ein Kohlenstoffcenter aufgebaut werden.

Das CCL hat 2 Divisions, die "Coating Technology Division" an der Michigan State University in East Lansing unter Leitung von Dr. Thomas Schülke, und die "Laser Applications Division" im Gebäude des Headquarters von Fraunhofer USA unter der Leitung von Christian Walz.

Laser Applications Division

Das erste Jahr im Fraunhofer-Gebäude an der Port Street liegt hinter der Lasergruppe des CCL. Neben umfangreichen Umbaumaßnahmen wurde diverse neue Anlagentechnik installiert. So wurden auf der Laserseite ein diodengepumpter 4 kW-Nd:YAG-Laser und ein 8 kW-CO₂-Laser in Betrieb genommen. Zu der bestehenden Anlagentechnik wurde ein 5-Achs-Knickarmroboter und eine Universal-Laserhärteanlage hinzugefügt. Die installierten Anlagen erweitern die bereits vor-

handene umfangreiche Ausstattung des Centers.

Aus der Projektliste ist die Entwicklung des Laserstrahlschweißens von Bauteilen unter Druck in einer Hydroform hervorzuheben. Die für das Laserstrahlhärten entwickelte temperaturgeregelte Laserleistungsregelung konnte auch für das Laseranlassen von Getriebebauteilen erfolgreich eingesetzt werden. 2003 wuchsen sowohl die Mitarbeiteranzahl als auch der Umsatz.

Coating Technology Division

Seit Januar 2003 ist die Dünnschichtgruppe des CCL in East Lansing, Michigan zu Hause. Die Gruppe bezog ca. 500 m² Labor- und Bürofläche an der Michigan State University. Durch die Zusammenarbeit mit der Universität wurde das Technologiespektrum der Gruppe erheblich erweitert. Neben den bereits zuvor angebotenen PVD-Technologien gehören jetzt auch mikrowellen-basierte CVD- und Materialbearbeitungstechnologien zum Arbeitsbereich des CCL in East Lansing. Darüber hinaus wird als Folge der engen Einbindung der Gruppe in die Universitätsinfrastruktur ein erweiterter Charakterisierungsservice (Materialzusammensetzung, Elektronenmikroskopie, Nanoindenter, AFM) sowie die Entwicklung von Prozessen zur Fertigung von mikro-elektro-mechanischen Systemen (MEMS) angeboten.

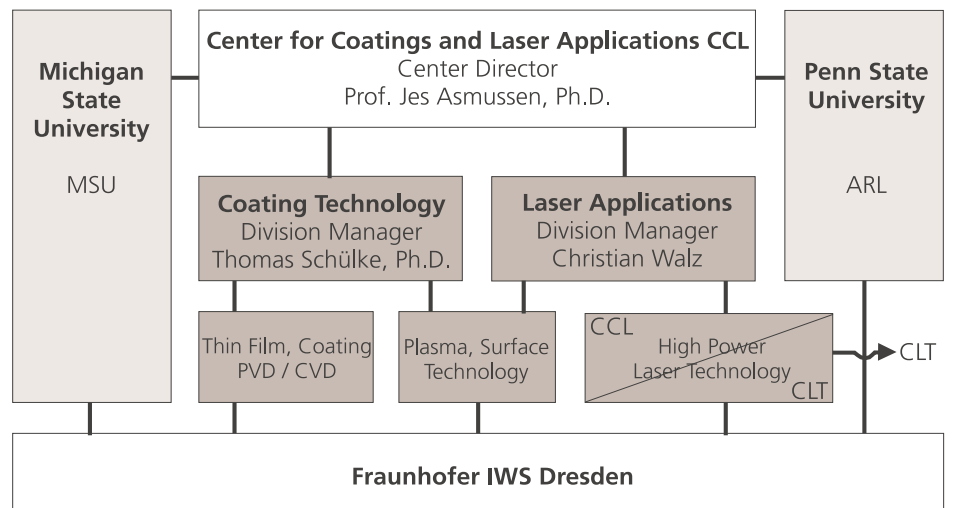
Herausragende Projekte in diesem Jahr waren die Entwicklung von freistehenden mikrometer-dicken Diamantfolien, die im Hochenergieionenbeschleuniger der Universität zum Einsatz kommen, sowie die Entwicklung eines MEMS-basierten Augendrucksensoren.



Gebäude des CCL, CLT und Headquarters von Fraunhofer USA in Plymouth



Gebäude des CCL in East Lansing, Michigan





Ausstattung des Institutes

*Die Technik spart uns keine Zeit,
aber sie verteilt sie anders.*

Helmar Nahr



Blick in die Technikumshalle des IWS



Hochgeschwindigkeits-Laserschneidmaschine



Atmosphärische Plasmaspritzeanlage mit Laserkopplung

Laserstrahlquellen

mehrere CO₂-Laser, 2 bis 6 kW (HF-angeregt)

mehrere Nd:YAG-Laser bis 4,4 kW-cw (lampen- und diodengepumpt) und 1 kW-pm

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

mehrere Hochleistungs-Diodenlaser, 1,4 bis 4,0 kW

TEA-CO₂-Laser

Excimerlaser (248 nm)

frequenzvervielfachte Nd:YAG-Laser (532 und 355 nm)

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 6 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-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 300 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)

Anlagen zur plasmagestützten CVD-Beschichtung bei Atmosphärendruck (6 kW Mikrowelle, 30 kW dc-Arc)

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

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

Anlagen zum atmosphärischen und zum Vakuum-Plasmaspritzen mit Roboterhandlung (APS, VPS)

Anlage zum laserunterstützten atmosphärischen Plasmaspritzen (LAAPS)

Spezielle Komponenten

statische und flexible dynamische Strahlformungssysteme für Laserleistungen bis 10 kW

CNC- bzw. sensorgesteuerte Drahtförderer für das Laserschweißen

mobile MF- und HF-Induktionsquellen (4 - 20 kHz, 100 - 400 kHz)



Pulverförderer und Spezialausrüstungen zum richtungsunabhängigen Laserstrahlbeschichten sowie Temperatursystem zur geregelten Prozessführung

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 -plasmen

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 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

CNC-Bearbeitungszentrum zum 5-Achs-Fräsen und Laser- sowie Plasma-Auftragschweißen

laserintegriertes CNC-Fräszentrum zum Generieren und Reparieren

mobile Anlage zur rutschhemmenden Ausrüstung verlegter Böden (mit diodengepumptem Nd:YAG-Laser)

Messgeräte

Ausrüstung zur Gefügeanalyse einschließlich:

- Metallographie
- analytischer Transmissionselektronenmikroskopie
- analytischer Rasterelektronenmikroskopie
- entsprechender Präparationstechnik

Ausrüstung zur Werkstoffprüfung:

- servohydraulische Prüfmaschinen,
- mechanische Zug- / Druck-Prüfmaschine
- Kerbschlagpendel
- Härteprüfautomat
- rechnergestütztes Mikrohärteprüfsystem
- Resonanzermüdungsapparatur
- Flachbiege-Torsions-Maschine
- verschiedene Verschleißprüfsysteme (Abrasive-, Kavitations-, Oszillationsgleitverschleiß)

Laserakustik-Messsysteme zur Bestimmung des E-Moduls von Schichten

Laserschock-Messsystem mit Hochgeschwindigkeitspyrometer

Ausrüstung zur Oberflächen- und Schichtanalyse:

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

Röntgendiffraktometer (CuK α)

Röntgendiffraktometer (MoK α)

optisches 3D-Koordinatenmesssystem



Vakuum-Plasmaspritzanlage



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®

*Das Telefonbuch ist voller Fakten,
aber es enthält nicht eine einzige Idee.*
Mortimer J. Adler

Gesamtmitarbeiter

Aufgrund einer Kooperationsvereinbarung zwischen der TU Dresden und dem Fraunhofer IWS sind der Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik (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 230 Mitarbeiter teilen sich 2003 wie folgt auf:

Mitarbeiter im Fraunhofer IWS

	Anzahl
Personal	115
- Wissenschaftler	64
- Technische Angestellte	42
- Verwaltungsangestellte	9
Lehrlinge	12
Wissenschaftliche Hilfskräfte	60
Gesamt	187

Mitarbeiter am Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik der TU Dresden

	Anzahl
Personal	35
- Wissenschaftler	27
- Technische Angestellte	6
- Verwaltungsangestellte	2
Wissenschaftliche Hilfskräfte	8
Gesamt	43

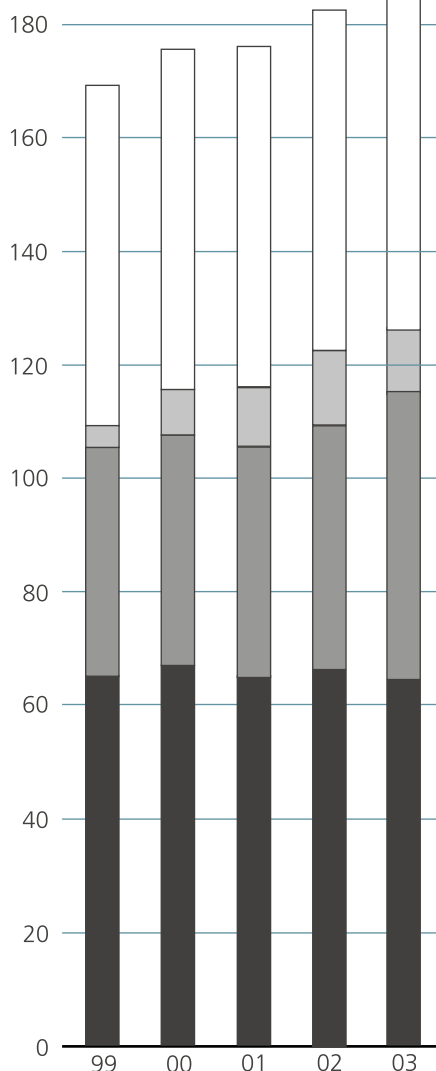
Gebäude

- Technikumshalle	1200 m ²
- Laborräume	1760 m ²
- Büroräume	1550 m ²
- Infrastrukturräume	540 m ²

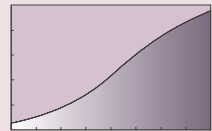
Technikum im DOC (Dortmund)

1100 m²

Anzahl der Mitarbeiter im IWS



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



Aufwendungen und Erträge 2003 (vorläufiges Ergebnis*)

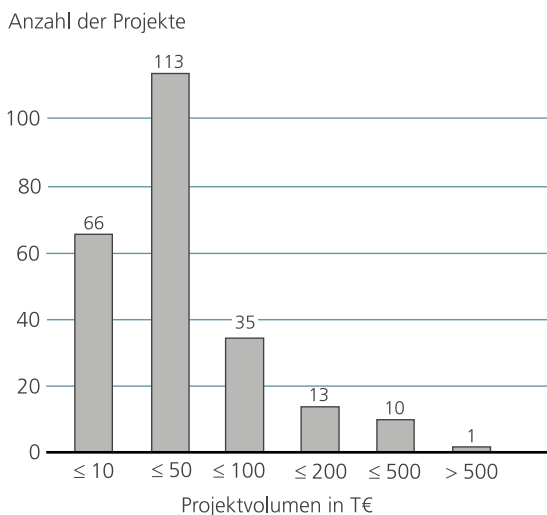
* Nachkalkulation noch nicht erfolgt

	Mio. €		
Aufwendungen Betrieb und Investitionen 2003	14,6		
Betriebshaushalt	12,4		
- Personalaufwendungen	6,0		
- Sachaufwendungen	6,4		
Investitionshaushalt	2,2		
Erträge 2003	14,6	%	
Betrieb	12,4		
- Projekterträge aus der Industrie	6,6	53	
- Projekterträge durch Bund, Land und EU	3,3	27	
- Grundfinanzierung IWS	2,5	20	
Investitionen	2,2		
- Projekterträge aus der Industrie	0,1		
- Projekterträge durch Bund, Land und EU	1,1		
- Grundfinanzierung IWS	1,0		

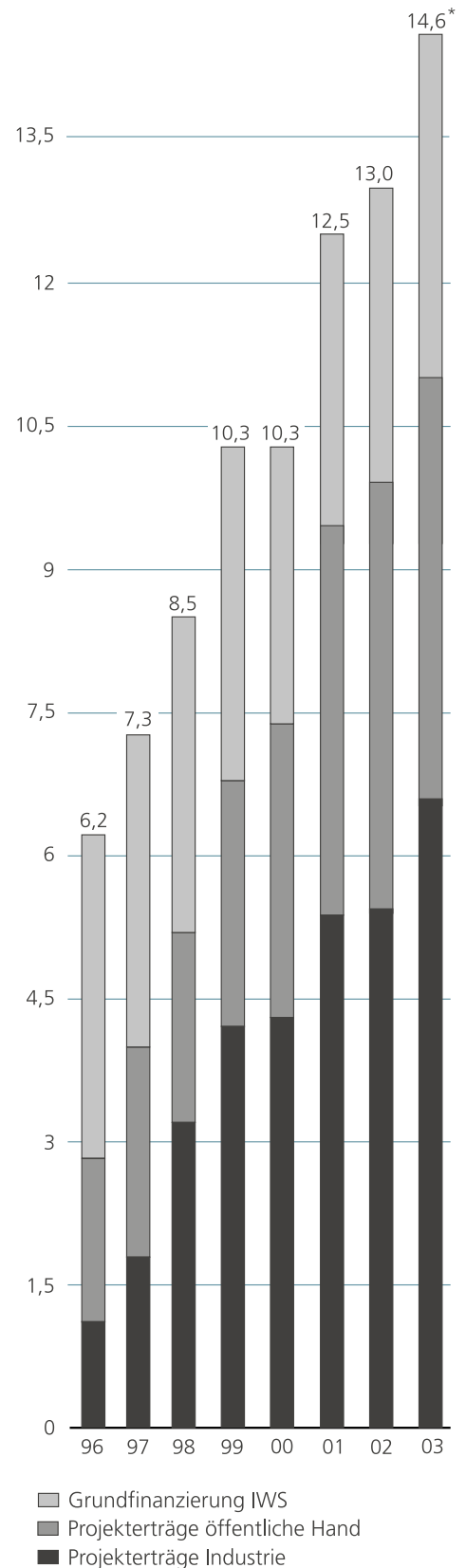
Im Jahr 2003 wurden dem IWS von der Fraunhofer-Gesellschaft zusätzlich strategische Investitionen in Höhe von 1,0 Mio. € zur Verfügung gestellt.

Projekte

Im Jahr 2003 wurden am IWS 238 Projekte durchgeführt. Die Aufteilung der Projekte nach ihrem finanziellen Volumen ist in der folgenden Grafik dargestellt. So wurden beispielsweise 113 Projekte mit einem finanziellen Volumen von 10 ... 50 T€ bearbeitet.



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



Kuratorium

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

P. Wirth, Dr.
Vorsitzender der Geschäftsführung der Rofin-Sinar Laser GmbH,
Vorsitzender des Kuratoriums
(ab März 2003)

O. Voigt, Prof.
Vorstandsvorsitzender der Windsolar AG,
Vorsitzender des Kuratoriums
(bis Februar 2003)

K. Arnold, Prof. Dr.
Geschäftsführer der Niles-Simmons Industrieanlagen GmbH
(bis Juni 2003)

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

I. Bey, Dr.
Leiter Projektträger Produktion und Fertigungstechnologien der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

H. Bücher, Dr.
Koordinator Innovationsmanagement und Technologiemarketing im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

E.-J. Drewes, Dr.
Leiter Forschung, Zentrales Qualitäts- und Prüfwesen der ThyssenKrupp Stahl AG
(bis März 2003)

H. Ennen, MinR. Dr.
Sachsenbüro Brüssel

F. Junker, Dr.
Mitglied im Aufsichtsrat der Koenig & Bauer AG, Planeta-Bogenoffset

J. Klenner, Dr.
Leader Centre of Competence Engineering Structure, Airbus

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

P. Linden, Dr.
Leiter Betriebsmittel Presswerk der DaimlerChrysler AG

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

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

W. Pompe, Prof. Dr.
Professur für Materialwissenschaft und Nanotechnologie an der Technischen Universität Dresden

F. Schmidt, MinDir. Dr.
Staatssekretär im Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst

J. von Schaeuwen, MinR.
Bundesministerium für Bildung und Forschung
(Gast)

R. Zimmermann, MDgt. Dr.
Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst
(Gast)

Die 13. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 26. Februar 2003 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. V. Hopfe	Abteilungsleiter
Dr. L. Morgenthal	Abteilungsleiter
Dr. S. Nowotny	Abteilungsleiter
Dr. B. Schultrich	Abteilungsleiter

Gäste sind:

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

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:

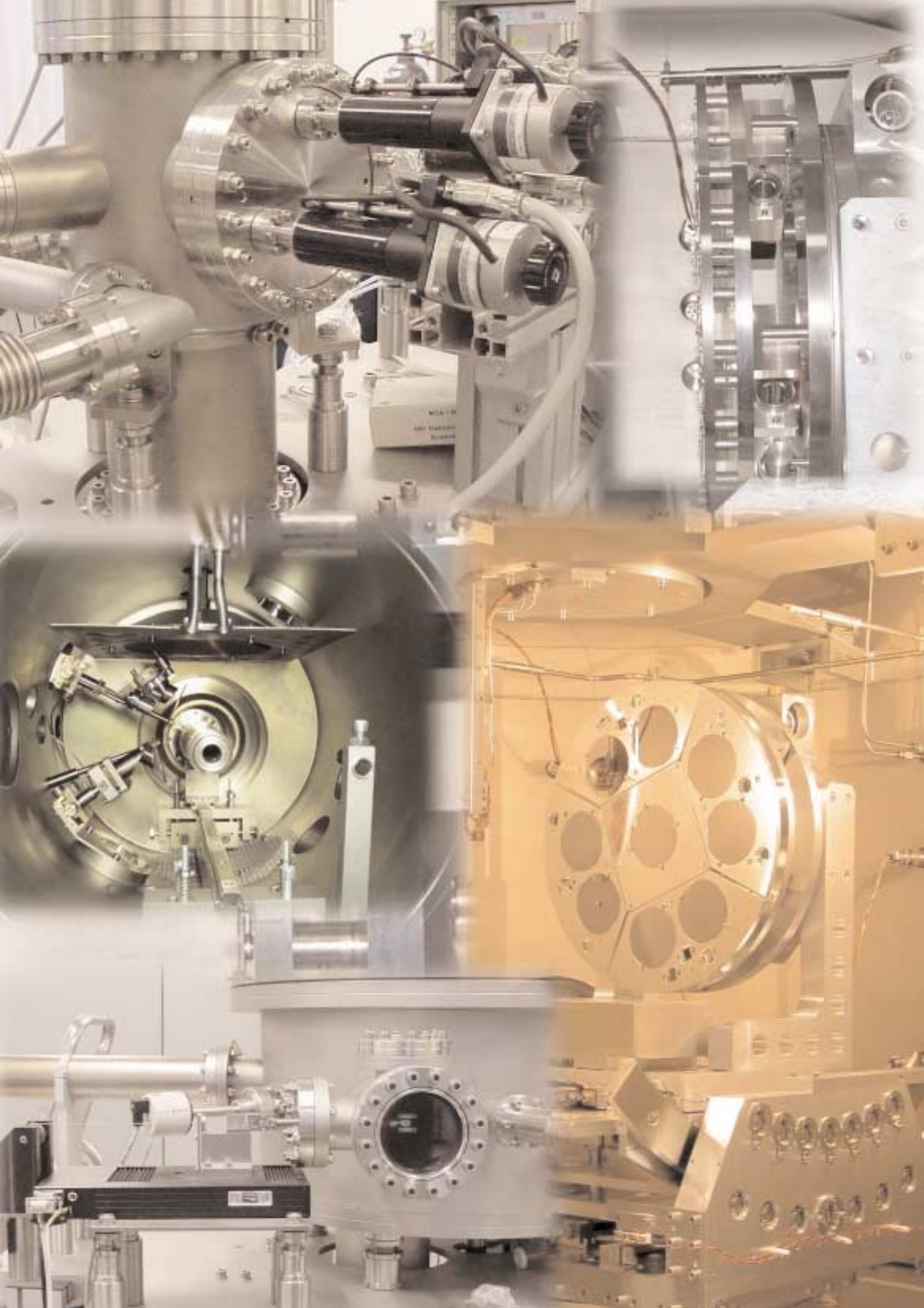
- Prof. Dr. E. Beyer
- Dr. S. Bonß

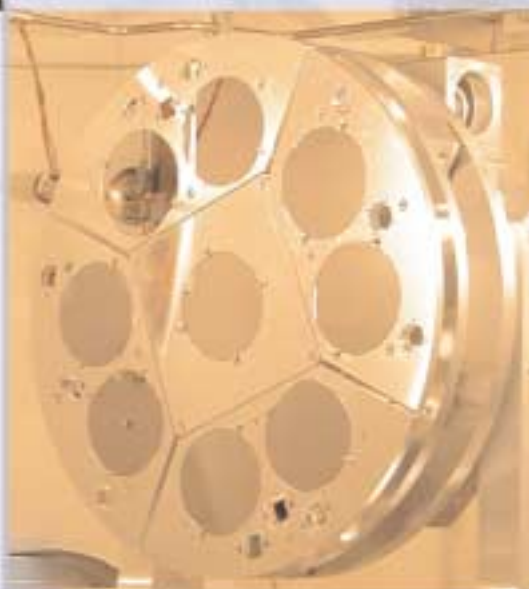
Verbund Oberflächentechnik und Photonik (VOP)

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





FuE-Angebot: Röntgen- und EUV-Optik

Redaktion: Im Jahr 2003 wurde in einem großen Projekt mit der Fa. Carl Zeiss SMT AG Oberkochen ein EUV-Reflektometer aufgebaut. Wie ist dort der aktuelle Stand?


Dr. Leson: Das Projekt wurde im Oktober 2003 mit der Überführung des Gerätes nach Oberkochen und der Wiederinbetriebnahme erfolgreich abgeschlossen. Damit steht erstmals in Europa ein kompaktes Reflektometer mit der Arbeitswellenlänge im Bereich des extremen Ultraviolett (EUV) bei 10 - 16 nm zur Verfügung. Dieses EUV-Reflektometer entstand in einem vom BMBF geförderten Projekt unter Federführung des Fraunhofer-Institutes für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden sowie der Beteiligung der Carl Zeiss SMT AG Oberkochen, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Berlin (PTB) sowie dem Max-Born-Institut Berlin (MBI), der Bestec GmbH Berlin und der AIS Automation Dresden GmbH. Mit diesem Reflektometer wird eine effektivere Entwicklung von EUV-Optiken möglich; bisher musste man dafür immer die teure Strahlenquelle Bessy II in Berlin benutzen. Zeitverlust war die Folge.

Redaktion: Ihre Abteilung engagiert sich auch erfolgreich im Bereich der EUV-Optiken. Worin bestehen die Erfolge?

Dr. Leson: Im vergangenen Jahr wurden erste Kollektoroptiken und ein Schwarzschildobjektiv aufgebaut. Dabei müssen stark gekrümmte Substratoberflächen mit präzisen Gradienten beschichtet werden. Dies erfordert den hochpräzisen Einsatz spezieller Masken mit lateral variierender Transmission beim Beschichtungsprozess, der vom IWS hierfür entwickelt wurde. Ende 2003 wurden erste Bilder mit hoher Auflösung aufgenommen.

Redaktion: Im Bereich der Nanotechnologie sind viele Fraunhofer-Institute tätig. Wie arbeiten Sie mit diesen zusammen?

Dr. Leson: Die WISA (wissenschaftlich-strategische Allianz, d. Red.) mit dem Dresdner Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS ist nur ein Beispiel einer Zusammenarbeit. In dieser WISA wurden erste erfolgreiche Versuche zur Substratoberflächen-glättung durchgeführt mit dem Ziel der optischen Vergütung von Mikrosiegeln für kurze Wellenlängen. Gleichzeitig koordinieren wir weiter das Nanotechnologie-Kompetenzzentrum "Ultradünne funktionale Schichten", welches im Oktober 2003 bereits auf ein fünfjähriges Bestehen zurückblicken konnte. Mittlerweile haben wir 81 Mitglieder im Zentrum; davon sind drei Mitglieder im Jahr 2003 beigetreten.



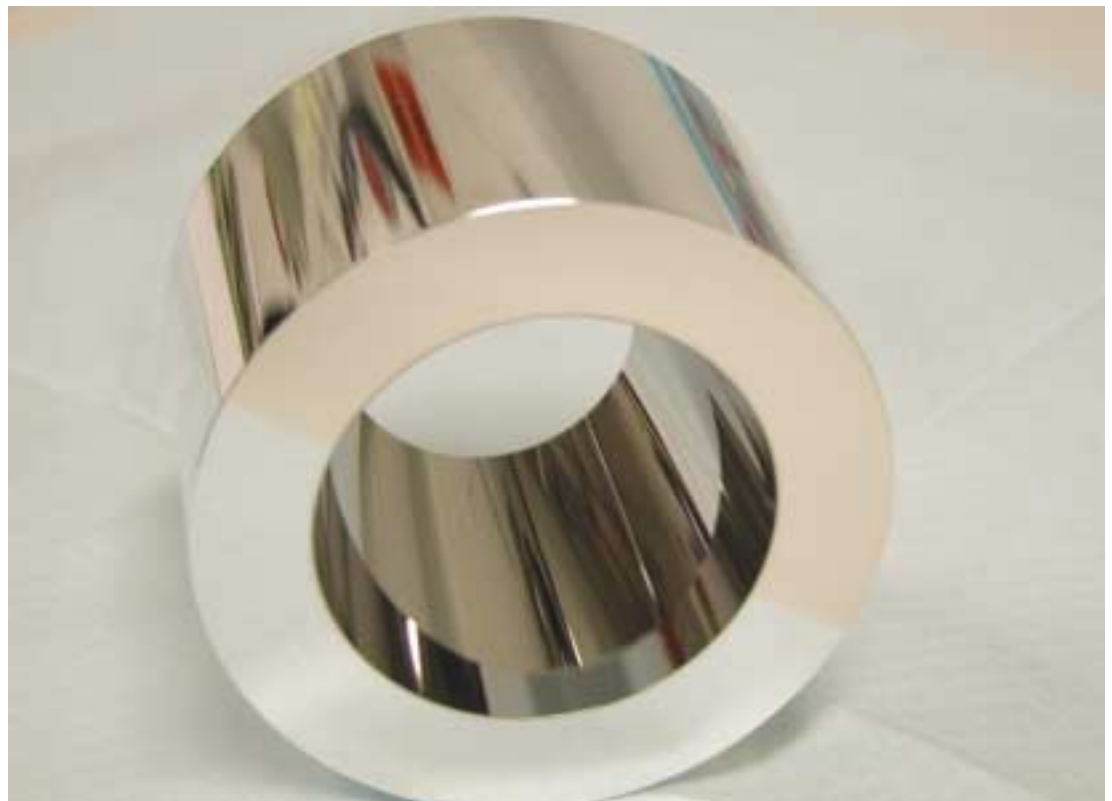
Der größte Feind der Kreativität ist nicht der Irrtum sondern die Trägheit.
Henry T. Buckle



Dr. Andreas Leson
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 317,
andreas.leson@iws.fraunhofer.de)

Beispiele aus den Arbeiten 2003

1. Qualitätskontrolle von EUV-Optiken bei der Arbeitswellenlänge mittels Labor-Reflektrometer 28
2. PLD-Innenbeschichtung mit superhartem Kohlenstoff für Verschleiß- und Korrosionsschutz 30
3. Innenbeschichtung von EUV-Kollektoroptiken 31
4. Reduzierung und Kompensation von inneren Spannungen in grenzflächen-optimierten Mo / Si-Multischichten 32
5. Röntgenoptische Multischichten für den Photonenenergiebereich 900 - 1800 eV 34





Dipl.-Phys. Stefan Braun
Gruppenleiter Beschichtung
(Tel. 2583 432,
stefan.braun@iws.fraunhofer.de)

Multischichten für EUV- und röntgenoptische Anwendungen

Einfach- und Multischichtsysteme, die mittels Puls-Laser- und Magnetron-Sputter-Deposition hergestellt werden, zeichnen sich aus durch:

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

Schichtsysteme unterschiedlicher Materialkombinationen können auf ebenen oder gekrümmten Substraten mit bis zu 150 mm Durchmesser mit und ohne Gradient der Periodendicke abgeschieden werden.

Das Hauptanwendungsgebiet solcher Multischichten ist der Einsatz als röntgenoptisches Bauelement zur Strahlformung und Monochromatisierung. Neben der Synthese von Einfach- und Multischichten nach Kundenwunsch bieten wir unsere langjährigen Erfahrungen auf dem Gebiet der Präparation, Charakterisierung und Simulation röntgenoptischer Bauelemente an.



Substratbestückung an einer UHV-Präzisionsbeschichtungsanlage zur Herstellung von nm-Multischichten



Dr. Ludwig van Loyen
Gruppenleiter Metrologie / Applikation
(Tel. 2583 422,
ludwig.vanloeyen@iws.fraunhofer.de)

Metrologie und Applikation

Arbeitsschwerpunkte sind die Reflektometrie, die Diffraktometrie sowie die Weiterentwicklung von Optiksystemen und Messverfahren.

Mit Standard-Röntgenanalysegeräten werden unter Einsatz von Cu-K α - bzw. Mo-K α -Strahlung zerstörungsfreie Messungen zur Bestimmung von Schichtdicken, Schichtrauheiten und Dichten sowie zur qualitativen Phasenanalyse, vornehmlich an dünnen und / oder Multilagenschichten und / oder an Pulvern durchgeführt.

Zur Optimierung der Analyseverfahren wurden spezielle strahlformende Optiken, wie Beamkollimator und Beamkompressor entwickelt.

Zur Charakterisierung und Optimierung von Optiken für EUV-Anwendungen wurde ein Labor-Reflektometer mit der Arbeitswellenlänge von 10 bis 16 nm aufgebaut.



Gesamtansicht des EUV-Reflektometers

Qualitätskontrolle von EUV-Optiken bei der Arbeitswellenlänge mittels Labor-Reflektrometer

Aufgabenstellung

Multischichten für EUV-Optiken, wie sie z. B. für Lithographieanlagen der nächsten Generation zum Einsatz kommen sollen, müssen höchsten Anforderungen hinsichtlich Reflektivität, Reproduzierbarkeit, Homogenität bzw. Präzision der Schichtdickenverteilung, Auflösungsvermögen und Temperaturstabilität genügen. Insbesondere müssen diese Eigenschaften auch auf gekrümmten Optikoberflächen realisiert und kontrolliert werden können.

Für den Schichtentwickler und -produzenten stellt deshalb die Kontrolle der erzielten Schichtparameter bei der Arbeitswellenlänge einen wesentlichen Zeitfaktor für die Optimierung der Schichtsysteme dar. Die Kontrolle derartiger Multischichten geschieht vornehmlich durch Auswertung von Reflektometrie-Messungen. Bisher war man für derartige Messungen im EUV-Bereich auf die Nutzung von Synchrotronstrahlung (z.B. am BESSY II in Berlin) angewiesen, was infolge räumlicher Ferne jedoch immer mit einer gewissen Verzögerung im Entwicklungs- und Fertigungsprozess verbunden war.

Lösungsweg

Die Entwicklung eines Labor-Reflektometers mit der Arbeitswellenlänge im EUV-Bereich war deshalb auch ein erklärtes Ziel weltweiter Bemühungen auf dem Wege der EUV-Anwendungen. Aufbauend auf den internationalen Erfahrungen, sowie in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-technischen Bundesanstalt (PTB), dem Max-Born-Institut (MBI), der Fa. Bestec, der Fa. AIS Automation und der Carl Zeiss SMT AG wurde im Fraunhofer IWS Dresden in einem vom BMBF geförderten Projekt ein solches Labor-Reflektometer aufgebaut. Es gab dabei vier Schwerpunktaufgaben zu lösen:

- die Bereitstellung einer geeigneten Strahlungsquelle, die im EUV-Bereich zeitlich und örtlich stabil einen hohen Photonenfluss gewährleistet,
- die Monochromatisierung der erzeugten EUV-Strahlung,
- die Realisierung einer geeigneten Proben- und Detektormanipulation für Reflektometrie-Messungen an Spiegeln und Masken, die in ihren Dimensionen auch den Erfordernissen der Halbleiterindustrie gerecht werden sowie
- eine Steuer- und Messtechnik, die die erforderlichen Prozessabläufe realisiert.



Abb. 1: Gesamtansicht des EUV-Reflektometers

Ansprechpartner

Dr. Ludwig van Loyen
Tel.: 0351 / 2583 422
ludwig.vanloyen@iws.fraunhofer.de



Ergebnisse

Eine Gesamtansicht des IWS-Labor-EUV-Reflektometers wird in Abb. 1 gezeigt. Wegen der Absorption der EUV-Strahlung an Luft muss das Reflektometer vollständig unter Vakuum arbeiten.

Die EUV-Quelle arbeitet auf der Basis eines kommerziellen Nd:YAG Lasers mit nachgeschalteter Laserstrahlfokussierung (Laserwellenlänge: 532 nm, Takt: 10 Hz, Pulslänge: 10 ns, Laserstrahlfokus: 10 μm). Der fokussierte Laserstrahl generiert auf einer Goldtargetoberfläche ein Plasma, das im EUV-Bereich ein quasikontinuierliches Spektrum liefert (je Schuss eine frische Targetoberfläche, Quelpunktdurchmesser: ca. 50 μm). Bei einer Laserleistung von 650 mJ beträgt der spektrale Photonenfluss in der EUV-Quelle $11 \cdot 10^{13}$ Photonen / (s sr 0,1 nm bw) bei einer Wellenlänge von 13,4 nm.

Der Monochromator, zusammengesetzt aus Eintrittsblende, plan-elliptischem Vorspiegel, sphärischem Gitter mit 1200 Linien / mm, Austrittsspalt, sphärischem Refokussierspiegel, 2 Streulichtblenden und Strahlteiler zur Strahlmonitorierung liefert die gewünschte EUV-Strahlung, einstellbar im Bereich von 10 nm bis 16 nm mit einer Bandbreite von typischerweise 0,03 nm. Bei einer Laserleistung von 250 mJ wird am Monochromatorausgang eine Photonenzahl von $3 \cdot 10^6$ Photonen / Schuss registriert, was für den Routinemessbetrieb ausreichend ist. Der Messfleck auf der Probe beträgt im Durchmesser ca. 2 mm.

Die Goniometerkammer birgt das Probenmanipulationssystem des Reflektometers, das die zu vermessenden Spiegel oder Masken mit einem Durchmesser bis zu 50 cm und einer Dicke bis zu 20 cm sowie einem Gewicht bis zu 30 kg aufnehmen kann (Abb. 2). Der Einfallswinkel des EUV-Strahles kann standardmäßig zwischen 3° und 60° variiert werden.

Eine Gesamtsteuerung gewährleistet und überwacht den Betrieb des Reflektometers.

Mit dem Labor-Reflektometer können nun sowohl ebene als auch gekrümmte Proben vermessen werden. Dabei liegen die Schwankungen der Reflektivitätswerte unterhalb 0,5 % RMS und die der Wellenlänge unterhalb 0,013 % RMS. Bei einem Langzeittest über 3 Monate zeigte sich für die Peak-Reflektivität sogar eine Schwankungsbreite von nur 0,13 % RMS. Die Schwankungsbreite der Wellenlänge blieb dabei unverändert.

Mit einem solchen guten Messgerät kann dann auch die Beschichtung von konvex oder konkav gekrümmten Spiegeln optimiert werden. Insbesondere gilt es dabei die Arbeitswellenlänge entsprechend den Designvorgaben auf der gekrümmten Spiegeloberfläche richtig zu positionieren. Bei unmittelbarer Verfügbarkeit der Charakterisierung bei der Arbeitswellenlänge ist so eine sehr effektive Optimierung dieser Spiegel möglich.

Außerhalb des Standardmessbetriebes bietet das Labor-Reflektometer für kleinere Proben die Möglichkeit, mit streifendem Einfall des EUV-Strahles zu arbeiten. Auf diese Weise können dann Schichteigenschaften z.B. über die Vermessung der Breite der Totalreflektionskante bestimmt werden.



Abb. 2: Probenmanipulationssystem innerhalb der Goniometerkammer



Abb. 3: Präzisionsantrieb für die Gitterbewegung zur Wellenlängeneinstellung am Monochromatorausgang

PLD-Innenbeschichtung mit superhartem Kohlenstoff für Verschleiß- und Korrosionsschutz

Aufgabenstellung

Die Herstellung superharter, diamantartiger Kohlenstoffschichten ist wegen ihrer genau einzuhaltenden Prozessparameter eine anspruchsvolle Aufgabe für alle industriell verfügbaren Beschichtungstechnologien. Daher stellt die Innenbeschichtung von Bauteilen mit diesem Schichtsystem wegen der zusätzlich ungünstigen geometrischen Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar.

Ein wichtiger Aspekt bei der Schichtentwicklung der diamantartigen Kohlenstoffschichten ist die Reduktion der Eigenspannungen, die sich durch den Beschuss der wachsenden Schicht mit hochenergetischen Ionen zwangsläufig einstellen. Insbesondere die Schichthaftung auf dem Substrat wird dadurch empfindlich beeinflusst. Ziel der Arbeiten war es, mittels des am Fraunhofer IWS entwickelten Verfahrens der Innenbeschichtung mit Pulsed Laser Deposition (PLD) diamantartige Kohlenstoffschichten herzustellen und diese mit optimalen Parametern auf Bauteile mit kleinstmöglichem Innendurchmesser abzuschneiden.

Lösungsweg

Aufgrund der geringen Abmessungen von Laserstrahl und Target ist es möglich, mit Hilfe der PLD Innenflächen von Bauteilen mit einem großen Aspektverhältnis (Tiefe zu Durchmesser) zu beschichten (Abb. 1). Grundsätzliche Variationsparameter zur Erzielung optimaler Schichteigenschaften sind dabei neben der Laserwellenlänge vor allem die Laserpulsenergie und die Leistungsdichte im Laserspot auf der Targetoberfläche.

Zur Charakterisierung der so abgeschiedenen diamantartigen Kohlenstoffschichten speziell hinsichtlich ihrer Härte, Eigenspannungen und tribologischen Eigenschaften sowie ihrer Einordnung in das System Diamant - Graphit kamen u. a. Röntgenreflektometrie, Laser-Akustik sowie Reibetests zum Einsatz.

Ergebnisse

Bei den Schichtabscheidungen mittels PLD zeigte sich erwartungsgemäß eine deutliche Abhängigkeit der Eigenschaften der diamantartigen Kohlenstoffschichten von den verwendeten Laserbedingungen. Mit zunehmender Leistungsdichte steigen sowohl der E-Modul als auch die Eigenspannung der abgeschiedenen Schicht. Die höchsten erzielten E-Modulwerte lagen bei rund 500 GPa, was im Vergleich zu üblichen Bogentechnologien zur Beschichtung von Außenkonturen (500 ... 600 GPa) durchaus beachtlich erscheint (Abb. 2). Durch die rotierende Substratanordnung und die damit entstehende Multischicht-Struktur höherer und geringerer Materialdichte können die Eigenspannungen der Kohlenstoffschichten relativ moderat gehalten werden. Typische Werte für das Verfahren liegen hier zwischen -0,5 GPa und -2,0 GPa (Druckspannungen). Für mechanische Spannelemente konnten damit Innenbeschichtungen mit superharten, diamantartigen Kohlenstoffschichten bei Innendurchmessern von nur 10 mm aufgebracht werden (Abb. 3).

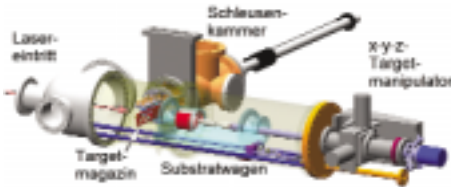


Abb. 1: Schema der UHV-Anlage zur Innenbeschichtung mittels PLD

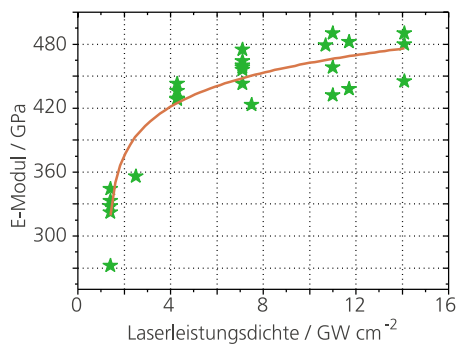


Abb. 2: Abhängigkeit des E-Moduls der mit PLD hergestellten diamantartigen Kohlenstoffschichten von der verwendeten Laserleistungsdichte

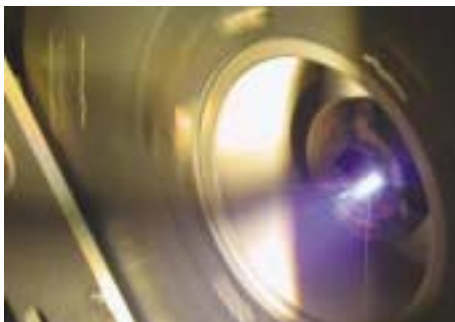


Abb. 3: Prozessfoto der DLC-Innenbeschichtung ($d_i = 10$ mm) (in Kooperation mit Fa. TechnologiePartner / Fa. J. B. S.)

Ansprechpartner

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



Innenbeschichtung von EUV-Kollektoroptiken

Aufgabenstellung

Entsprechend der Roadmap der internationalen Halbleiterbranche wird in wenigen Jahren der Einsatz von extrem ultraviolettem Licht (EUV) mit einer Photonenwellenlänge von $\lambda = 13,5$ nm notwendig, um Schaltkreisstrukturen mit Abmessungen deutlich unterhalb von 50 nm auf Siliziumwafern abbilden zu können. Die momentan laufenden Forschungsarbeiten zur EUV-Lithographie zeigen sehr deutlich, dass insbesondere eine Erhöhung der für die Schaltkreisbelichtung verfügbaren Photonenintensität notwendig ist. Neben der Steigerung der von der Quelle emittierten Strahlungsleistung muss die nutzbare Intensität auch durch die geeignete Konfektionierung der Kollektoroptiken verbessert werden. Ein Ansatz besteht dabei darin, auf Totalreflexion basierende Rotationsellipsoide einzusetzen, die einen vergleichsweise großen Anteil der in alle Raumrichtungen emittierten Quellenstrahlung sammeln und für die Belichtung nutzbar machen (Abb. 1).

Lösungsweg

Zur Erfassung eines möglichst großen Raumwinkelbereichs muss die Innenfläche der Kollektoroptik mit einem Material beschichtet sein, welches die Totalreflexion der EUV-Strahlung bis zu hohen Glanzwinkeln erlaubt. Zusätzliche Anforderungen an das Beschichtungsverfahren bestehen in hoher Präzision hinsichtlich der Schichtdickenverteilung und der optischen Eigenschaften der Beschichtung sowie insbesondere hinsichtlich der geringstmöglichen Oberflächenrauheit. Mit dem am Fraunhofer IWS entwickelten Verfahren der Innenbeschichtung mittels Pulsed Laser Deposition (PLD) können diese Anforderungen erfüllt

werden. Zur Beschichtung der mit aufwändigen Dreh- und Polierverfahren gefertigten Präzisionsoptik (Grundmaterial Aluminium) wird Molybdän verwendet, welches durch eine zusätzliche, wenige Nanometer dicke Deckschicht aus amorphem Kohlenstoff (a-C) vor Oxidation geschützt wird.

Ergebnisse

Die realisierten Beschichtungen der Kollektoroptiken (Abb. 2) weisen eine für das Reflexionsvermögen wichtige hohe Materialdichte nahe dem theoretischen Wert für Molybdän ($\rho = 10,2$ g cm⁻³) auf. Die erzielte Oberflächenrauheit der Optik von $\sigma_{\text{rms}} \cong 5$ nm wird im Wesentlichen schon durch die Politur bei der Herstellung des Substrates bestimmt. So zeigten Testbeschichtungen unter ähnlichen geometrischen Verhältnissen, jedoch auf polierten (ebenen) Si-Waferstücken, bei einer 60 nm dicken Molybdänschicht eine Zunahme der mittels AFM gemessenen Rauheit σ_{rms} von etwa 0,19 nm (reines Si-Substrat) auf nur 0,27 nm.

Das PLD-Verfahren bietet sich wegen seiner hohen Präzision weiterhin für die Abscheidung der möglichst gleichmäßig dünnen, aber geschlossenen Deckschicht aus amorphem Kohlenstoff an. Über die gesamte Innenfläche der Optik wurde eine 3 nm dicke Beschichtung aufgebracht, wobei die maximalen Dickenabweichungen bei ca. 5 % liegen.

Erste Ergebnisse von Einsatztests mit EUV-Strahlung zeigen, dass die so beschichteten Kollektoroptiken eine sehr hohe Effizienz und Qualität der optischen Abbildung nahe dem theoretischen Limit aufweisen.

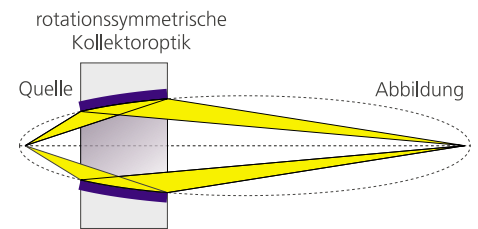


Abb. 1: Prinzipskizze der optischen Abbildung einer rotationselliptischen Kollektoroptik



Abb. 2: Mittels PLD innenbeschichtete EUV-Kollektoroptik (Beschichtung: Molybdän + amorpher Kohlenstoff)

Ansprechpartner

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

Reduzierung und Kompensation von inneren Spannungen in grenzflächen-optimierten Mo / Si-Multischichten

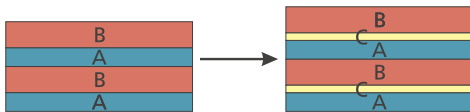
Aufgabenstellung

Entsprechend der Technologie-Roadmap der Halbleiterindustrie verdoppelt sich die Speicherdichte von Computer-Chips etwa aller 18 Monate (Moore'sches Gesetz). Um diesem Gesetz auch in Zukunft folgen zu können, ist die Entwicklung von Lithographie-Verfahren mit kürzeren Arbeitswellenlängen erforderlich. So sollen Strukturbreiten von < 50 nm künftig mit sogenannter extrem ultravioletter Strahlung (EUV) mit einer Wellenlänge von 13,5 nm belichtet werden. Die Einführung dieser Technologie bedingt auch die Umstellung von transmittierenden zu reflektierenden Optiken, da EUV-Strahlung von nahezu allen Materialien

stark absorbiert wird. Diese reflektierenden Elemente bestehen aus einem extrem glatten und präzise gefertigten Spiegelträger und den darauf aufgebracht Reflexionsschichten, die aus einem Vielfachstapel von Molybdän- und Siliziumlagen mit jeweils wenigen Nanometern Dicke bestehen.

In den vergangenen Jahren wurden im IWS erfolgreich hochreflektierende Mo/Si-Multischichten entwickelt. Durch den Einbau von dünnsten Diffusions- und Reaktionsbarrierschichten zwischen den Molybdän- und Silizium-einzelschichten ist es gelungen, den Reflexionsgrad der Schichten auf 70,1 % ($\lambda = 13,3$ nm, $\alpha = 1,5^\circ$) bzw. 71,4 % ($\lambda = 12,5$ nm, $\alpha = 22,5^\circ$) zu erhöhen und damit Weltspitzenwerte zu erzielen. Neben dem möglichst hohen Reflexionsgrad gibt es für EUV-Spiegelbeschichtungen jedoch eine Reihe weiterer Anforderungen. So muss gesichert sein, dass die hochpräzise und oft asphärische Oberflächenkontur des Spiegelsubstrates auch nach der Beschichtung erhalten bleibt. Aus diesem Grunde müssen die inneren Spannungen der Reflexionsschichten minimiert werden. Dies muss erfolgen, ohne dass der Reflexionsgrad verringert wird.

1.) Einbau von zusätzlichen Schichten



Problem: Abbau der Spannungen ist bei gleichbleibender Reflexion i. A. nicht bis auf Null möglich

2.) Kompensationsschichten



Problem: Rauigkeit der Kompensationsschicht

3.) Temperung



Problem: Verminderung der Reflexion durch Interdiffusion an den Grenzflächen der Multischicht

Abb. 1: Möglichkeiten zur Reduzierung und Kompensation von inneren Spannungen in nm-Multischichten

Kombination aller Maßnahmen
=> spannungsfreie und hochreflektierende Multischichten

Ansprechpartner

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



Abb. 2: Blick in die Beschichtungskammer mit zwei aktiven Magnetronsputterquellen der Targetmaterialien Molybdän (rechts) und Silizium (links). Über den Quellen bewegt sich das rotierende Substrat.



Lösungsweg

Die in Nanometer-Multschichten im Allgemeinen auftretenden inneren Spannungen können durch folgende Maßnahmen kompensiert oder reduziert werden:

- Einbau von weiteren Schichten zur Spannungsrelaxation
- Hinzufügen von Schichten oder Schichtstapeln mit entgegengesetztem Spannungszustand zur Spannungskompensation
- Temperaturbehandlung der Schichten zur Spannungsrelaxation.

Jede dieser Einzelmaßnahmen allein führt bei der Anwendung auf Mo/Si-Multschichten jedoch zu einem nicht tolerierbaren EUV-Reflexionsverlust. Daher wurde im IWS der Ansatz gewählt, alle drei Maßnahmen miteinander zu kombinieren (Abb. 1). Dabei zeigte sich, dass Kohlenstoffschichten besonders geeignet sind, innere Spannungen in Mo/Si-Multschichten bei sogar gesteigertem Reflexionsgrad abzubauen. Der Einbau anderer Materialien führt entweder zur Spannungserhöhung (z. B. Borkarbid) oder zur Verringerung des Reflexionsgrades (z. B. Ruthenium).

Zur Kompensation der Spannungen entsprechend der zweiten Option in Abb. 1 kamen Mo/Si/C-Multschichten mit veränderten Schichtdickenverhältnissen zum Einsatz. Durch die Änderung der Schichtdicken kann der Spannungszustand von den typischerweise auftretenden Druckspannungen in den Zugspannungsbereich überführt werden, ohne dass die Rauigkeit der Kompensationsschicht ansteigt.

Ergebnisse

Der Einbau von Kohlenstoff-Zwischenschichten an den Grenzflächen Mo-auf-Si innerhalb der Multischicht wirkt in dreifacher Hinsicht positiv:

- Reduzierung der inneren Spannungen von typischerweise -420 MPa im reinen Mo/Si-Multschichtstapel auf typischerweise -350 MPa,
- Verringerung der Interdiffusion von Molybdän und Silizium und einem daraus folgenden höheren EUV-Reflexionsgrad,
- Erhöhung der Temperaturstabilität der Multschichten.

Durch den Zusatz von dünnen Kohlenstoffschichten konnten die inneren Spannungen bereits um rund 15 % reduziert werden. Die weitere Reduzierung der Spannungen erfolgte schließlich durch geeignete Kompensationsschichten und Temperung des gesamten Stapels bei $T = 150\text{ °C}$. Damit konnten Spannungswerte von $|\sigma| < 20\text{ MPa}$ reproduzierbar erreicht werden, wobei die Größe dieses Wertes vorrangig durch die verfügbare Messgenauigkeit bestimmt ist. Der EUV-Reflexionsgrad der spannungsreduzierten Multschichten liegt typischerweise nur 0,1 % niedriger als bei vergleichbaren Spiegeln ohne Spannungskompensation (Abb. 4).



Abb. 3: Sphärischer Spiegel, beschichtet mit einer Mo/Si-Multischicht

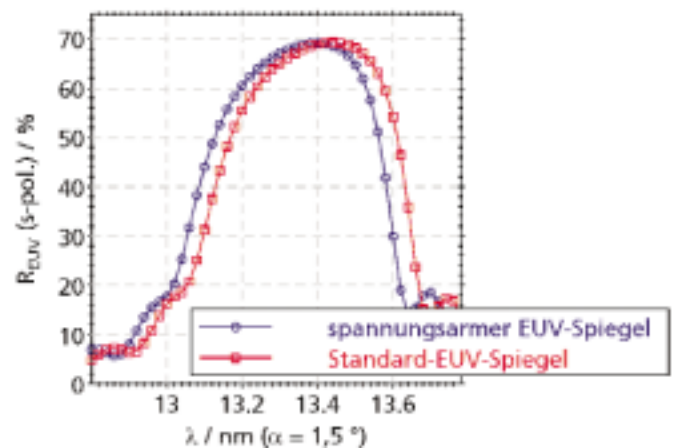


Abb. 4: EUV-Reflexionsgrad von spannungsarmen Mo/Si-Multschichten im Vergleich zu hochreflektierenden Standardspiegeln

Röntgenoptische Multischichten für den Photonenenergiebereich 900 - 1800 eV

Aufgabenstellung

Der Einsatz von röntgenoptischen Multischichten als Reflektoren und Monochromatoren ist besonders bei solchen Anwendungen vielversprechend, bei denen hohe Reflexionsgrade gefordert sind. Der besondere Vorteil von derartigen Multischichten ist, dass sie den jeweiligen Aufgabenstellungen exakt angepasst werden können. So wird in Abhängigkeit von Photonenwellenlänge und Einfallswinkel der verwendeten Strahlung ein geeignetes Multischichtsystem ausgewählt und entsprechend der für diese "eindimensionalen synthetischen Kristalle" geltenden Bragg'schen Reflexionsbedingung hinsichtlich der Einzelschichtdicken dimensioniert. Im hier aufgeführten speziellen Fall bestand die Aufgabe darin, Multischichtreflektoren für Synchrotronstrahlungsanwendungen für die PTB bei BESSY2 im Photonenenergiebereich von 900 - 1800 eV zu entwickeln. Als besondere Qualität dieses Spiegels war gefordert, dass ein und derselbe Spiegelträger mit zwei verschiedenen Schichtsystemen belegt werden soll, wobei sich die erste Multischicht durch besonders hohe Reflexion und die zweite durch gutes Auflösungsvermögen auszeichnet.

Lösungsweg

Zunächst musste für den speziellen Photonenenergiebereich zwischen 900 und 1800 eV ermittelt werden, welche Materialkombination optimal ist, um hohe Reflexionsgrade zu erreichen. Die Schichtmaterialien müssen dabei so ausgewählt werden, dass ein möglichst hoher röntgenoptischer Kontrast bei gleichzeitig geringer Absorption erzielt wird. Die Analyse der röntgenoptischen Parameter zeigt, dass als Material mit der geringen Elektronen-

dichte besonders Silizium geeignet ist, da die für diese Anwendungen interessanten Energien unmittelbar unterhalb der Röntgenabsorptionskante von Silizium liegen. Entsprechend den konkreten Anforderungen muss dieses Element mit Molybdän oder Borkarbid kombiniert werden, um hohe Reflexion oder ein hohes Auflösungsvermögen zu erzielen.

Ergebnisse

Beschichtungsexperimente mit Ni/C-, Mo/Si- und B₄C/Si-Multischichten bestätigen die theoretischen Vorhersagen, dass das Mo/Si-Multischichtsystem die höchsten Reflexionsgrade aufweist (Abb. 1). Direkt unterhalb der Silizium-Absorptionskante bei E = 1800 eV wird ein Wert von 65 % erreicht, wenn die erste Reflexionsordnung zur Monochromatisierung benutzt wird. Das Auflösungsvermögen $E / \Delta E$ beträgt in diesem Fall 31. Bei Verwendung der zweiten Reflexionsordnung desselben Spiegels verringert sich die Reflexion auf 49 % bei gleichzeitig höherem Auflösungsvermögen von 89. Die weitere Verbesserung des Auflösungsvermögens auf Werte von $E / \Delta E = 203$ bzw. 492 gelingt durch den Einsatz von B₄C/Si-Multischichten mit Periodendicken von $d_p = 4$ nm bzw. 2 nm bei Reflexionsgraden von $R = 24$ % bzw. 4 %.

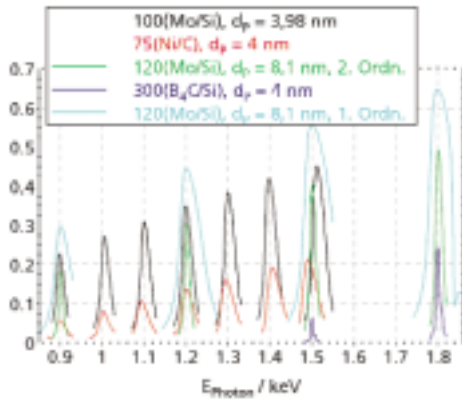


Abb. 1: Reflexion von B₄C/Si- und Mo/Si-Multischichten im Photonenenergiebereich von 900 - 1800 eV

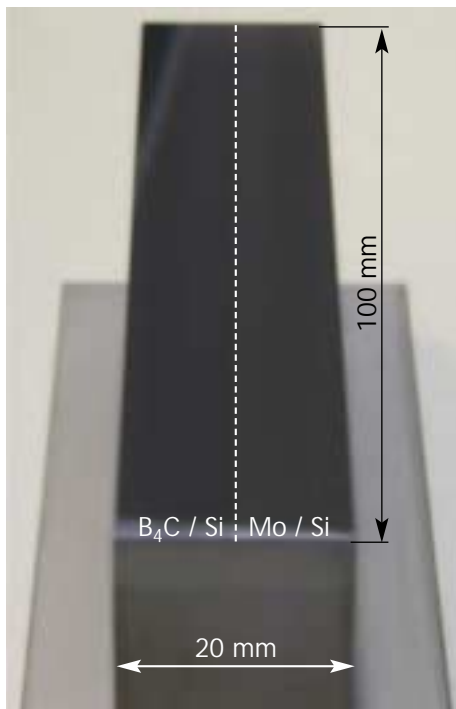


Abb. 2: Fotografie des mit B₄C/Si- und Mo/Si-Multischichten vergüteten Spiegelträgers

Ansprechpartner

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





FuE-Angebot: PVD-Dünnschichttechnologie

Redaktion: Im Rahmen des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums "Ultradünne funktionale Schichten" wurde eine neue Technologie zur Beschichtung von Festplatten entwickelt und in die Prototypenfertigung überführt. Was einst so hoffnungsvoll stimmte, wurde durch Entscheidungen des IBM-Konzerns zunichte gemacht. Wie ist der aktuelle Stand?

Dr. Schultrich: Leider. Die in den vergangenen Jahren im Fraunhofer IWS Dresden entwickelte Hochstrombogenquelle wurde zu einer modularen Plasmaquelle weiterentwickelt und in eine industrielle Festplatten-Beschichtungsanlage des Partners IBM Deutschland integriert. Damit konnten superharte Kohlenstoffschichten mit 2 bis 3 nm Dicke auf Festplatten in der vorgegebenen Zykluszeit von weniger als einer Sekunde abgeschieden werden. Trotz der geringen Schichtdicke, die zur Erreichung der angestrebten Speicherdichten $> 100 \text{ GB} / \text{in}^2$ erforderlich ist, gewährleisten sie den erforderlichen Korrosions- und Kratzschutz. Durch konzerninterne Entscheidungen wurde die Festplattenproduktion aus dem IBM-Konzern ausgegliedert, so dass es nicht zum Einsatz dieser Technologie in Deutschland kommen wird. Dies war ein harter Schlag für die Arbeitsrichtung meiner Abteilung.

Redaktion: Und trotzdem gab es am Jahresende noch einen Lichtblick. Worin bestand dieser?

Dr. Schultrich: Es war schwierig; wir haben alles nur Erdenkbare versucht, neue Mittel für die weitere Qualifizierung dieser Technologie zu erschließen. Da die öffentlichen "Töpfe" aber alle leer sind ... Dann haben sich die beteiligten Kollegen, allen voran Dr. Peter Siemroth, entschlossen, zusammen mit einem sächsischen Unternehmen ein neues Unternehmen zu

gründen und mit Mitteln des Future-Programmes die Technologie bis zur Einsatzreife zu entwickeln. Die Fa. Arc Precision Dresden GmbH i.G. wurde am 18.12.2003 notariell gegründet. Das war eine sehr mutige Entscheidung! Wir unterstützen das junge Unternehmen insbesondere durch die gemeinsame Erschließung weiterer Anwendungsfelder, z.B. als Schutzschichten in der Mikrosystemtechnik oder als ultradünne Barrieren.

Redaktion: Auch bei der Schichtentwicklung der superharten Diamor®-Schichten liegen neue Ergebnisse vor. Vor 2 ... 3 Jahren war die Abscheidung hafter Schichten auf etwa $1 \mu\text{m}$ beschränkt, Ende 2003 wurden mehr als $50 \mu\text{m}$ erreicht. Wozu braucht man so dicke Schichten?

Dr. Schultrich: Dazu findet man in diesem Jahresbericht verschiedene Beiträge. Derartig dicke Schichten sind eine Sonderentwicklung für spezielle röntgenoptische Anwendungen. Für die Hauptanwendungen als Verschleißschutz- und Gleitschicht bevorzugen wir (schon aus ökonomischen Gründen) Diamor®-Schichten im Dickenbereich von $1 - 5 \mu\text{m}$. Das Ergebnis demonstriert aber, dass wir durch gezielte Entwicklung der haftvermittelnden Grenzschicht auch diesen Bereich nun sicher beherrschen.

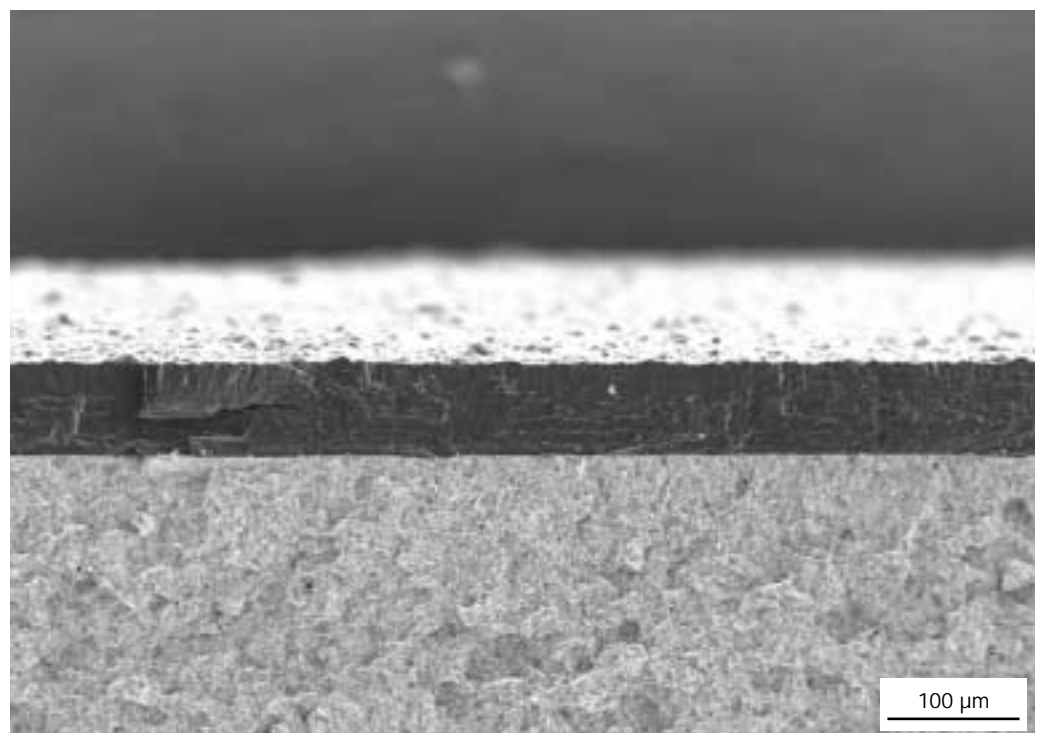
*Wer nicht handelt,
dem wird auch der Himmel nicht helfen.*
Sophokles



Dr. Bernd Schultrich
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 403,
bernd.schultrich@iws.fraunhofer.de)

Beispiele aus den Arbeiten 2003

1. Reibungsminderung und Verschleißschutz durch superharte amorphe Kohlenstoffschichten 40
2. Laser-Arc-Modul zur Abscheidung von superharten amorphen Kohlenstoffschichten 42
3. Aufskalierung der Laser-Arco®-Technologie für die ta-C-Beschichtung großer Bauteile und Werkzeuge 43
4. Filter-Arc-Technik zur Abscheidung von ultradünnen Schutz- und Barrierschichten 44
5. LAwave®-Prüfung poröser Schichten 46
6. Maßgeschneiderte Beschichtungen für Formwerkzeuge in der Glasherstellung 48



"Ultra"-dicke Diamor®-Schicht auf einem Stahlsubstrat
Querschnitt der gebrochenen Probe im Rasterelektronenmikroskop



Dr. Peter Siemroth
Gruppenleiter Pulsbogen
(Tel. 2583 409,
peter.siemroth@iws.fraunhofer.de)

Beschichtung und Oberflächenmodifizierung mittels Bogen-technologien

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.



Dr. Otmar Zimmer
Gruppenleiter PVD
(Tel. 2583 257,
otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de)

Beschichtung mittels aktivierter Hochrateverfahren

PVD (Physical Vapor Deposition) - Verfahren werden zur Herstellung von Schichten mit Dicken im Bereich von einigen Nanometern bis zu einigen zehn Mikrometern verwendet. Dazu stehen Verfahren von der Hochrate-Bedampfung bis hin zu hochaktivierten Plasmaverfahren sowie deren Kombinationen zur Verfügung. Auf der Grundlage dieser Technologien bieten wir an:

- Musterbeschichtungen
- mechanische und tribologische Schichtcharakterisierung
- Entwicklung von Beschichtungsverfahren
- Entwicklung von Schichtsystemen
- Wirtschaftlichkeits- und Machbarkeitsstudien
- Entwicklung und Fertigung angepasster Anlagenkomponenten.



Vorbereitung Diamor[®]-beschichteter Proben für die Mikroanalyse



Arc-Beschichtung von temperaturempfindlichen Fasern

Reibungsminderung und Verschleißschutz durch superharte amorphe Kohlenstoffschichten

Aufgabenstellung

Mit der Möglichkeit, superharte amorphe Kohlenstoffschichten (Diamor®) im Mikrometerbereich haftfest abscheiden zu können, eröffnet sich ein breites Spektrum potentieller Anwendungen. Das betrifft insbesondere ihren Einsatz als Verschleißschutzschicht für extreme Belastungsbedingungen, wo bisher eingesetzte Hartstoffschichten (TiN, CrN, ZrN, TiAlN u. a.) oder deren Kombination mit klassischen DLC-Schichten (a-C:H) den Anforderungen nicht mehr genügen. Extreme Beanspruchungen treten dann auf, wenn die Schmierung bei Reib- und Gleitpaarungen ausfällt (Notlauf). Dann muss eine hohe Verschleißbeständigkeit bei einem geringen Reibkoeffizienten im direkten Kontakt der entsprechenden Bauteiloberflächen z.B. bei Lagern gewährleistet werden. Diese tribologischen Eigenschaften sollten mittels aussagekräftiger Standardtests für die superharten Mikrometerschichten nachgewiesen werden.



Abb. 1: Diamor® (Schichtdicke ca. 4 µm) auf Stahlrunde für Untersuchung des Reib- und Gleitverschleißes (Fretting-Tribometer)



Abb. 2: Diamor®-beschichtete Stahlscheiben für Untersuchung des Wälzverschleißes mit Zweischeiben-Tribometer

Lösungsweg

Die tribologischen Eigenschaften der mittels gepulster Vakuumbogentechnologie abgeschiedenen superharten amorphen Kohlenstoffschichten wurden mit einem Schwingverschleiß- und einem Zwei-Scheiben-Tribometer ermittelt. Die Tests wurden bei normaler Laboratmosphäre (ca. 45% rel. Luftfeuchtigkeit) und ohne Verwendung von Schmiermitteln ausgeführt. Mit dem Schwingverschleißtest, auch Frettingtest genannt, wird das Reibverhalten bestimmt. Dabei wird eine fixierte Stahlkugel (100Cr6) mit einem Durchmesser von 10 mm mit einer konstanten Last von 5 N auf die ebene

Oberfläche einer beschichteten Stahlrunde (Abb. 1) aufgesetzt. Die Probe wird mit einer konstanten Frequenz von 5 Hz und einer maximalen Auslenkung von $\Delta x = 1$ mm bewegt, wodurch ein kleiner Oberflächenbereich maximal beansprucht wird. Mit dem Zwei-Scheiben-Tribometer (Typ UTM2000 von Wazau) wurden im Fraunhofer IKTS Dresden Wälzverschleißuntersuchungen durchgeführt. Damit können Belastungen getestet und Reibverhältnisse bestimmt werden, wie sie z. B. in Wälzlagern oder bei Zahnradpaarungen auftreten. Bei diesem Test werden eine zylindrische und eine ballige Stahlscheibe (Abb. 2) mit einem Durchmesser von 75 mm und einer Dicke von 15 mm mit einer praxisnahen Hertz'schen Flächenpressung auf ihren beschichteten Mantelflächen beansprucht. Dabei drehen sich die Scheiben mit konstanter Geschwindigkeit von ca. 200 Umdrehungen pro Minute. Durch Variation des Schlupfes zwischen 1 und 30% können Veränderungen des Reibverhaltens erfasst werden, die durch Maßveränderungen infolge von Verschleiß der Oberflächen entstehen.

Ansprechpartner

Dr. Volker Wehnacht
Tel.: 0351 / 2583 247
volker.wehnacht@iws.fraunhofer.de



Ergebnisse

Diamor®-Schichten mit einer Dicke von 2 bis 4 μm wurden unter Nutzung eines nanotechnologischen Schichtdesigns sowohl auf ebenen als auch zylindrischen Stahloberflächen für die oben skizzierten Verschleißuntersuchungen abgeschieden. Der E-Modul der Schichten war stets $> 400 \text{ GPa}$, die mittels Rockwell-Test ermittelte Schichthaftung entsprach den Haftfestigkeitsklassen I - II gemäß DIN. Die ausgezeichnete Haftung der Schichten wird auch dadurch bestätigt, dass weder bei den durchgeführten Tribotests noch beim Kalottenschliff zur Bestimmung der Schichtdicke oder bei Laserstrukturierungen Anzeichen für Schichtabplatzungen gefunden werden konnten.

Die Untersuchungen mittels Schwingverschleißtest demonstrieren, dass sich die Diamor®-Schichten nach kurzer Einlaufzeit bei einem sehr niedrigen Reibkoeffizienten von ca. 0,1 stabilisieren (Abb. 3). Im Vergleich dazu haben die klassischen Hartstoffschichten und galvanisch abgeschiedenes Hartchrom mit 0,6 bis 0,7 bereits zu Beginn des Tests einen deutlich höheren Reibkoeffizienten, der mit zunehmendem Reibweg weiter ansteigt. Die einsetzenden Oszillationen nach etwa 10 m Reibweg sind ein Zeichen dafür, dass diese Schichten bereits bis auf das Substrat durchgerieben wurden. Dies wurde durch die Analyse der Verschleißspur bestätigt. Dagegen zeigen die Diamor®-Schichten lediglich einen marginalen Materialabtrag von etwa 0,1 μm Tiefe.

Bei den Untersuchungen mit dem Zwei-Scheiben-Tribometer wurde zunächst die Hertz'sche Flächenpres-

sung von 600 MPa über 1325 MPa auf 1800 MPa bei konstantem Schlupf von 1% gesteigert und der Reibkoeffizient Diamor® gegen Diamor® bei einem Laufweg von etwa 2,5 km bestimmt. Diese Paarungen zeigen ein ausgezeichnetes Laufverhalten mit sehr niedrigem Reibkoeffizient, der sich bei zunehmender Belastung von 0,06 bei 600 MPa auf 0,11 bei 1800 MPa erhöht. Die Analyse der Verschleißspur ergab, dass außer einem Glättungseffekt kaum Verschleiß nachweisbar war. Bei den weiteren Tests wurde die Belastung konstant bei 1325 MPa gehalten und der Schlupf von anfänglich 1% über 10% bis auf 30% gesteigert. Der entsprechende Verlauf des Reibkoeffizienten in Abhängigkeit vom Laufweg ist in Abb. 4 dargestellt. Wiederum zeigen die Paarungen Diamor® gegen Diamor® ein ausgezeichnetes, stabiles Laufverhalten. Auch bei Steigerung des Schlupfes kommt es im Verlaufe des Laufweges von 2,5 km nur zu einer geringfügigen Erhöhung des Reibkoeffizienten von 0,08 bei 1% Schlupf auf 0,12 bei 30% Schlupf. Die vorgestellten Ergebnisse belegen das ausgezeichnete Reib- und Gleitverhalten und die hohe Verschleißbeständigkeit der Diamor®-Schichten bei extremen tribologischen Beanspruchungen. Eine weitere Verbesserung des Trockenlauf-Verhaltens kann durch Diamor-Beschichtung beider Partner erreicht werden.

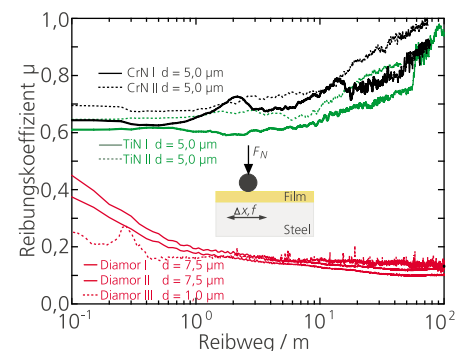


Abb. 3: Reibungskoeffizient von 7 μm bzw. 1 μm dicken Diamor®-Schichten im Vergleich zu TiN- und CrN-Schichten

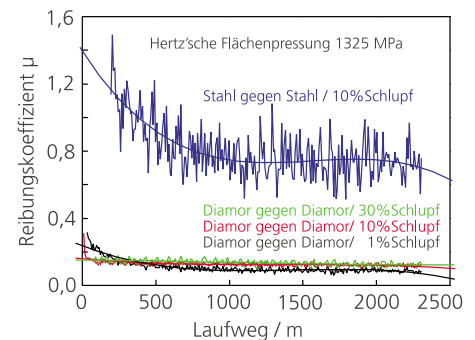


Abb. 4: Ergebnis der Wälzverschleißuntersuchungen (Zwei-Scheiben-Tribometer) von ca. 2,5 μm dicken Schichten Diamor® gegen Diamor® mit zunehmenden Schlupf

Laser-Arc-Modul zur Abscheidung von superharten amorphen Kohlenstoffschichten

Aufgabenstellung

Die am Fraunhofer IWS Dresden entwickelten superharten amorphen Kohlenstoffschichten (Diamor®) besitzen ausgezeichnete Reib- und Gleiteigenschaften. Durch Entwicklung einer optimalen Schichtenbindung gelang es, mechanisch stabile Schichten im tribologisch besonders interessanten Bereich von mehreren Mikrometern abzuscheiden. Derartige Schichten wurden erfolgreich als Verschleißschutzschichten für Werkzeuge und Bauteile getestet. Besondere Vorteile ergaben sich bei reduzierter Schmiermittelwirkung oder bei vollständigem Verzicht auf Schmierung. Es besteht nun die Aufgabe, ein Anlagenkonzept zu entwickeln, mit dem konventionell eingesetzte Beschichtungstechnik nachgerüstet werden kann, um kostengünstig den wachsenden Bedarf an serienmäßigen Diamor®-Beschichtungen befriedigen zu können.

Lösungsweg

Mit dem laser-gesteuerten Vakuumbogen (Laser-Arco®) steht im IWS Dresden eine erprobte Abscheidetechnologie für superharte amorphe Kohlenstoffschichten (Diamor®) zur Verfügung. Neben dem Einsatz in verschiedenen Laboranlagen wurde diese Technologie bisher in eine industrielle PVD-Anlage zur Großflächenbeschichtung integriert. Das dabei realisierte Modulkonzept besteht darin, dass die aus einer rotierenden Graphitwalze (Kathode) bestehende Kohlenstoffquelle in einer separaten Quellenkammer angeordnet wurde, die durch einen Rechteckflansch mit der konventionellen Beschichtungskammer verbunden wird. Auf der Basis der mit dieser Großanlage gesammelten Erfahrungen wurde das Modul-Konzept so überarbeitet, dass es für die in der Lohnbeschichtung vielfach eingesetzten Batch-Coater mit einer Arbeitshöhe von ca. 500 mm eingesetzt werden

kann. Durch Kombination mehrerer Module kann dieses Konzept leicht auf größere Anlagentypen übertragen werden. Dieser Lösungsweg bietet den Vorteil, dass alle Komponenten des Bauteilhandlings (Planetary) und technologischen Standardprozesse der Basisanlage (Vakuumerzeugung, Plasmareinigung bzw. Oberflächenaktivierung, klassische Hartstoffbeschichtung u. a.) mit den Modulkomponenten ergänzt und mit dem Diamor®-Beschichtungsprozess kombiniert werden können.

Ergebnisse

Das Laser-Arc-Modul (LAM) besteht aus den Komponenten Quellenkammer (Abb. 1), Bogenstromquelle, Laser mit Scanner und Optik und einer Steuerung (Abb. 2) zur Realisierung eines automatisierten Beschichtungszyklus. Die Kommunikation der LAM-Steuerung mit der Basisanlage erfolgt über eine Profibus-Schnittstelle. Die Adaption der Quellenkammer an die Beschichtungskammer wird über einen Rechteckflansch mit einer Höhe von 600 mm und einer Breite von 255 mm realisiert. Die Quellenkammer enthält eine motorische Blende zum Bedampfungsschutz der Graphitkathode während der Prozessabläufe der Basisanlage. Weiterhin ist ein motorischer Folienzug integriert, der das Einkoppelfenster des Zündlasers vor Bedampfung schützt und den zuverlässigen Dauerbetrieb der Quelle gewährleistet. Durch die Bogenstromquelle, die mit einem Spitzenstrom von 2 kA bei einer Pulsdauer von 100 µs und einer Folgefrequenz von 1 kHz arbeitet, wird ein mittlerer Strom von 150 A im Dauerbetrieb erreicht. Die Kathodenlänge von 400 mm gewährleistet eine homogene Beschichtung bei einer Arbeitshöhe bis zu 500 mm in der Basiskammer.

Das LAM kann, sofern ein entsprechender Rechteckflansch zur Verfügung steht, in beliebige PVD-Anlagentechnik integriert werden.



Abb. 1: Quellenkammer des Laser-Arc-Moduls, Blick durch den Rechteckflansch auf Kathodenwalze und Rundanode



Abb. 2: Laser-Arc-Prinzip auf dem Bildschirm der LAM-Steuerung

Ansprechpartner

Dr. Carl-Friedrich Meyer
Tel.: 0351 / 2583 351
carlfriedrich.meyer@iws.fraunhofer.de



Aufskalierung der Laser-Arco®-Technologie für die ta-C-Beschichtung großer Bauteile und Werkzeuge

Aufgabenstellung

Diamor®-Schichten haben sich in vielen Anwendungen als Verschleißschutz hervorragend bewährt. Die wachsende Nachfrage führt zur Frage der technologischen Anschlussfähigkeit, also zur Möglichkeit, viele kleine oder große, komplex geformte Bauteile und Werkzeuge haftfest, prozesssicher und nicht zuletzt wirtschaftlich zu beschichten. Um dies umzusetzen, müssen folgende verfahrens- und anlagentechnische Teilziele erreicht werden:

- Übertragung der Verfahrenstechnik zur reproduzierbaren Abscheidung qualitativ hochwertiger Diamor®-Schichten hoher Haftfestigkeit,
- Optimierung von Abscheiderate und Schichtdickenhomogenität auf komplex geformten, großen Teilen,
- Optimierung einzelner Komponenten des Moduls zur Steigerung von Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit,
- Minimierung des Wartungs- und Justageaufwands im Hinblick auf die industrielle Nutzung.

Lösungsweg

Zur Erreichung dieser Ziele wurde am Fraunhofer IWS ein Laser-Arco-Beschichtungsmodul entwickelt, der gegenüber den vorhandenen Laboranlagen des IWS um einen Faktor 4 hochskaliert wurde. Dieser Modul wurde an eine PVD-Anlage (MZR 373 der Firma Metaplas Ionon) angeflanscht, deren Nutzhöhe von 1200 mm den Möglichkeiten des Moduls entspricht. Mit einem Nutzdurchmesser von ebenfalls 1200 mm und einer Tragfähigkeit von 2 t erlaubt die Anlage die Beschichtung auch größerer Werkzeuge. Das modulare Konzept ermöglicht die problemlose Nachrüstung bestehender Beschichtungsanlagen und eine einfache Integration der Modulsteuerung in übergeordnete Steuerungen.

Ergebnisse

Eine Reihe von Detailverbesserungen einzelner Komponenten des Moduls führte zu einem deutlich verringerten Wartungs- und Justageaufwand und zu einer Steigerung der Abscheiderate (Abb. 1). Diese Verbesserungen flossen in die Konstruktion neuer Moduln, deren erster z. Zt. in Übersee installiert wird. Die erfolgreiche Übertragung eines am IWS entwickelten Vorbehandlungsverfahrens ermöglicht die Abscheidung dicker Schichten > 5 µm bei höchster Haftfestigkeit (Abb. 2). An beschichteten großformatigen und an komplex umgeformten Blechen wurde die Schichtdickenhomogenität bestimmt. Mit den Ergebnissen wurde der Abscheideprozess und die Chargierung von Bauteilen optimiert. Dies ermöglichte die erfolgreiche Beschichtung größerer Werkzeuge und Bauteile (Abb. 3). Damit steht im Dortmunder OberflächenCentrum eine Anlage zur Beschichtung großer Teile mit hochwertigen Diamor®-Schichten zur Verfügung, welche das Mengen- und Größengerüst der IWS-Beschichtungskapazitäten erweitert. Darüber hinaus besitzt die Anlage das Potenzial für eine weitere Steigerung der Abscheiderate und die Möglichkeit, Diamor® als Topcoat mit anderen Hartstoffschichten zu kombinieren.



Abb. 1: Kalottenschliff zur Schichtdickenbestimmung einer 6,4 µm dicken Diamor®-Schicht



Abb. 2: Rockwell-Eindruck in einer 6,4 µm dicken Diamor®-Schicht. Die lichtmikroskopische Aufnahme lässt keine Risse oder Abplatzungen erkennen, daher Haftfestigkeitsklasse HF 1



Abb. 3: Beschichtete Segmente eines achteiligen Umformwerkzeuges von TKS für die Umformung höherfester Stähle
Größe der Segmente:
125 mm · 105 mm · 35 mm

Ansprechpartner

Dr. Thomas Stucky
Tel.: 0231 / 844 3888
thomas.stucky@iws.fraunhofer.de

Filter-Arc-Technik zur Abscheidung von ultradünnen Schutz- und Barrierschichten

Aufgabenstellung

Mit Hilfe der Vakuumbogenbeschichtung lassen sich außerordentliche Schicht- und Oberflächeneigenschaften erzielen, z. B. feinkristalline oder amorphe Strukturen, dichte Schichten ohne Mikroporosität und feste Haftung bei niedrigen Abscheidetemperaturen. Demzufolge wird dieses Verfahren für die Hartstoffbeschichtung (TiN, CrN, TiAlN sowie viele andere Schichtsysteme) von Werkzeugen bereits umfassend genutzt. In anderen aussichtsreichen Anwendungsfeldern wie in der Mikrosystemtechnik und Mikroelektronik oder anderen hochtechnologischen Anwendungen konnte sich die Bogentechnologie aber noch nicht ihren Möglichkeiten entsprechend etablieren, insbesondere wegen der bei der Verdampfung unausweichlich entstehenden mikroskopischen Tröpfchen, der sog. Droplets. Die Größe der Aufgabe wird offensichtlich, wenn man bedenkt, dass ein üblicher Bogenverdampfer mehr als 10^9 Tröpfchen größer als 100 nm pro Sekunde emittiert, von denen möglichst kein einziges das Substrat erreichen darf. Das seit langem bekannte Grundprinzip der Plasmafilterung beruht darauf, dass ein axial gekrümmtes Magnetfeld das Plasma im Bogen führt und von den neutralen Tröpfchen separiert, die den Feldlinien nicht folgen können (Abb. 1). Im Labormaßstab hat dieses Verfahren sein großes Potential für viele Anwendungen bereits bewiesen, seine technische Realisierung steht aber noch aus. Hauptursache dafür ist, dass bisher die Filterung für viele hochtechnologische Anwendungen noch nicht ausreichend, die Abscheiderate für Massengüter aber zu niedrig war. Den internationalen Spitzenstand verkörpern bisher die Plasmafilter der Firma Nanofilm Technologies International (NTI) aus Singapur, deren Schichten

immerhin nur noch etwa 1 Droplet größer 300 nm pro cm^2 bei einer Schichtdicke von 3 nm enthalten. Dieses Plasmafilter reduziert die Dropletanzahl gegenüber einer herkömmlichen Gleichstromquelle etwa um 6 Größenordnungen. Für anspruchsvolle Anwendungen wie die der Festplattenproduktion ist es aber erforderlich, die Dropletanzahl nochmals um mindestens fünf weitere Größenordnungen zu verringern.

Ein hochaktuelles Problem der Mikroelektronik besteht darin, möglichst dünne aber gleichzeitig extrem dichte Barrierschichten in Strukturen kleiner 100 nm abzuscheiden. Diese Schichten müssen die Diffusion des Leitbahnmaterials Kupfer in den Wafer verhindern, den nutzbaren Querschnitt der Leitbahn aber nicht unnötig verkleinern. Auch hierfür sollte der Vakuumbogen mit seinen außerordentlichen Plasmaeigenschaften Fortschritte ermöglichen.

Lösungsweg

Ein vielversprechender Lösungsweg für die dropletfreie Hochratebeschichtung ist die Kombination des im IWS entwickelten gepulsten Hochstrombogens mit einem ausgefeilten Plasmafilter. Die gepulste Arbeitsweise erhöht nicht nur die Abscheiderate, sondern vermindert schon allein die Partikelemission im relevanten Bereich um zwei Größenordnungen. Zusammen mit dem IWS-Plasmafilter entstehen Beschichtungsquellen, die allerhöchsten Ansprüchen an die Oberflächengüte gerecht werden, aber auch hinsichtlich der Abscheiderate industriellen Anforderungen genügen. Die Leistungsfähigkeit derartiger Filtermodule konnte an verschiedenen anspruchsvollen Aufgaben der Mikroelektronik und der Mikrosystemtechnik demonstriert werden.

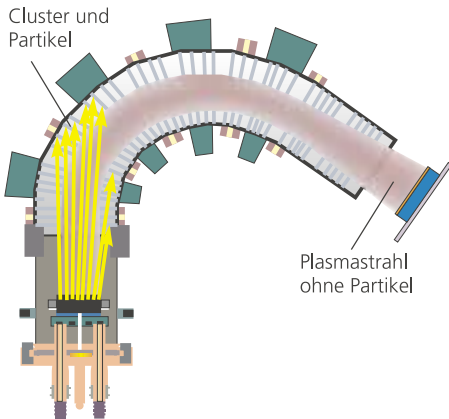


Abb. 1: Prinzipbild der magnetischen Plasmafilterung

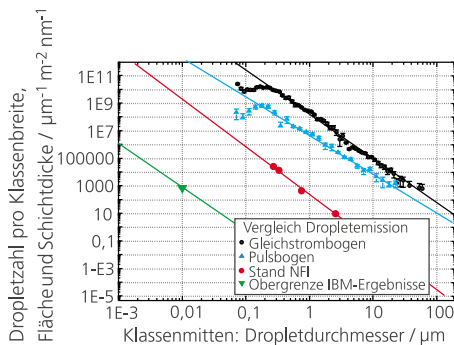


Abb. 2: Dropletzahl bezogen auf die abgeschiedene Schichtdicke im Vergleich ungefilterter und verschiedener Entwicklungsstufen gefilterter Bogenquellen:

- ungefilterte Gleichstrombogenquellen
- ungefilterter gepulster Hochstromverdampfer
- veröffentlichte Daten der NTI-Quelle
- Obergrenze der Dropletzahl, abgeleitet aus Einsatzergebnissen des IWS-Moduls

Ansprechpartner

Dipl.-Phys. Jan Berthold
Tel.: 0351 / 2583 258
jan.berthold@iws.fraunhofer.de



Die Auswertung von Einsatztests beschichteter Festplatten zeigte, dass auf etwa 90% der Platten kein einziges Teilchen größer als 10 nm zu finden war. Abb. 2 zeigt die auf die abgeschiedene Schichtdicke bezogene Dropletzahl für ungefilterte Gleichstrombogenquellen bzw. gepulste Hochstromverdampfer zusammen mit den Daten der NTI-Quelle und des IWS-Moduls.

In Laborversuchen konnte überzeugend demonstriert werden, dass mit der gefilterten Bogenbeschichtung sehr dünne Barrierschichten gleichmäßig abgeschieden werden können. Im Vergleich zur Magnetronbeschichtung haben die Schichten eine wesentlich feinere Kristallstruktur, sind schon bei geringeren Dicken dicht und haben dementsprechend eine bessere Barriere Wirkung.

Ergebnisse

Nachdem in Laborversuchen gezeigt werden konnte, dass mit der gefilterten Bogenbeschichtung dünne und gleichzeitig sehr dichte Barrierschichten strukturkonform abgeschieden werden können, wurde zur Übertragung in den industriell relevanten Maßstab in Zusammenarbeit mit der Firma FHR, Ottendorf-Okrilla eine Cluster-Tool-Beschichtungsanlage entwickelt und gebaut, die für die Abscheidung der Barrierschicht und des Seed-Layers geeignet ist. Die Ergebnisse zur strukturkonformen Abscheidung von Tantal sind in Abb. 4 dargestellt. Bis zu einem Aspektverhältnis von 3 konnte eine ausgezeichnete bis gute Strukturkonformität nachgewiesen werden.

Eine aussichtsreiche Anwendung in der Mikrosystemtechnik ist die Abscheidung extrem dünner, superharter und ultraglatte Kohlenstoffschichten. In Abb. 3 wird das Filterbogenmodul gezeigt, das in eine Festplattenbeschichtungsanlage bei der Firma IBM Deutschland integriert wurde. Diese Filtermodule sind für vielfältige Aufgaben auch außerhalb der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik, wie z. B. für die Beschichtung von Präzisionswerkzeugen, einsetzbar.



Abb. 3: Filtermodul zur Kohlenstoffbeschichtung von Festplatten

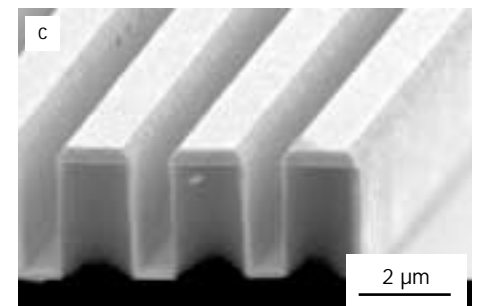
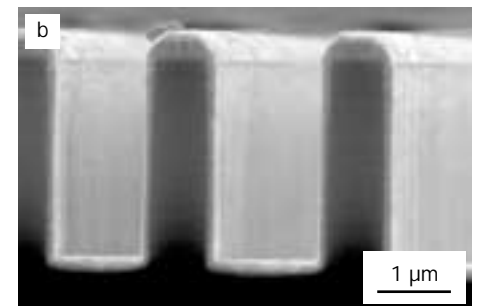
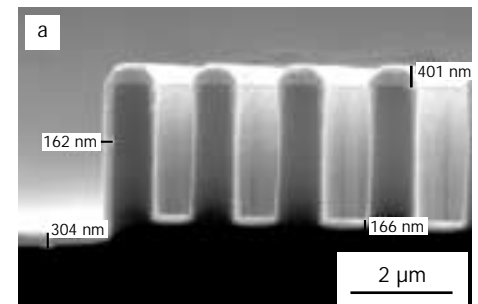


Abb. 4: Strukturkonforme Abscheidung von Tantal als Barrierschicht
a) Aspektverhältnis 3
b) Aspektverhältnis 1,75
c) Aspektverhältnis 2,25

LAwave®-Prüfung poröser Schichten

Aufgabenstellung

Dünne Oberflächenschichten können porös sein. Mit steigender Abscheiderate nimmt die Wahrscheinlichkeit von Mikro- und Nanoporen in den Schichten zu. Für Schichten zum Verschleiß- und Korrosionsschutz ist diese Porosität nicht erwünscht. Sie verringert die Festigkeit des Filmmaterials, die Schichthaftung und kann Pfade für den korrosiven Angriff des zu schützenden Grundmaterials bilden.

Für den Verschleiß- und Korrosionsschutz ist die Abscheidung vollständig dichter Schichten wünschenswert. Dafür ist eine sorgfältige Optimierung des Beschichtungsprozesse notwendig, die auch den Nachweis der Schichtintegrität einschließt.

Ein schneller, zerstörungsfreier Nachweis erhöhter Porosität in dünnen Schichten mit den herkömmlichen Methoden ist kaum möglich, da die Porenabmessungen deutlich unter der Nachweisgrenze der Verfahren liegen. Bei Schichtdicken von wenigen Mikrometern liegen die Poren- und Defektabmessungen im Bereich von weniger als 100 nm. Leistungsfähige elektronenmikroskopische Verfahren sind nötig, um eine solche Porosität nachzuweisen.

Lösungsweg

Es ist bekannt, dass Porosität den Elastizitätsmodul von dünnen Schichten deutlich reduzieren kann. Das hängt nicht von der Größe der einzelnen Poren ab, sondern vom Gesamtvolumen aller Poren bezogen auf die Volumeneinheit. Weiterhin hat auch die Form der Poren einen deutlichen Einfluss. Kugelförmige Poren verringern den E-Modul nur kaum mehr als proportional zu ihrem Volumenanteil. Poren in Form eines scheibenförmigen Rotationsellipsoiden haben hingegen einen erheblich stärkeren Einfluss. Können sich solche Poren zu einem Netzwerk vereinen, welches das gesamte Material durchsetzt, kann die Steifigkeit des Materials, die der E-Modul quantitativ beschreibt, gegen Null gehen. Damit ergibt sich die Möglichkeit, aus der Messung des Elastizitätsmoduls auf erhöhte Porosität im Werkstoff zu schließen.

Voraussetzung ist, den Elastizitätsmodul von dünnen Schichten genau genug messen zu können. Dafür ist die laserakustische Prüfung ein geeignetes Verfahren. Es beruht auf akustischen Oberflächenwellen, die mit Laserimpulsen angeregt werden. Die Phasengeschwindigkeit dieser Wellen hängt in beschichteten Medien von der Frequenz ab, was als Dispersion bezeichnet wird. Mit der Prüfmethode wird diese Abhängigkeit gemessen. Sie wird als Dispersionskurve bezeichnet. Eine solche Kurve kann auch aus der Theorie der Oberflächenwellenausbreitung berechnet werden. Durch nichtlineare Ausgleichsrechnung wird die beste Übereinstimmung zwischen Theorie und Messkurve gesucht. Daraus ergibt sich der Elastizitätsmodul der Schicht und des Substrates.

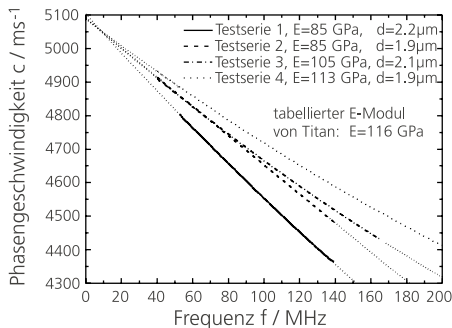


Abb. 1: Laserakustische Messkurven für Titanschichten, abgeschieden mit unterschiedlichen Beschichtungsparametern auf Silizium

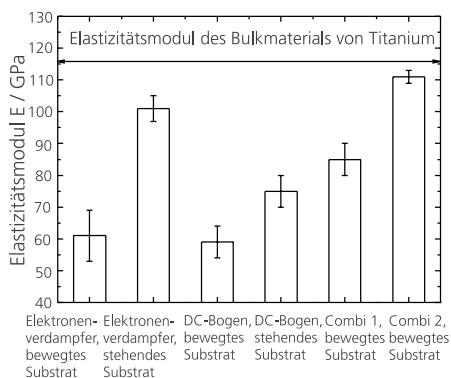


Abb. 2: Werte des Elastizitätsmoduls von Titanschichten, abgeschieden mit verschiedenen Technologien

Ansprechpartner

Dr. Dieter Schneider
Tel.: 0351 / 2583 451
dieter.schneider@iws.fraunhofer.de



Ergebnisse

Es wurden Titanschichten mit einer Dicke von etwa $2\ \mu\text{m}$ auf Siliziumsubstrat untersucht. Die Schichten besaßen unterschiedliche Porengehalte. Beschichtet wurde mit der Technologie der Elektronenstrahlverdampfung. Mittels diffuser kathodischer Vakuumbogenentladung wurde der Teilchendampf zusätzlich aktiviert. Dadurch gelang es, die Porosität dieser Schichten zu verringern. Unterschiedliche Aktivierungsgrade konnten erreicht werden durch Optimierung der Elektrodenanordnung, die für diese Aktivierung erforderlich ist. Damit war es möglich, Schichten mit unterschiedlichem Porengehalt abzuscheiden. Es wurden vier Testserien hergestellt, wobei die Elektronenstrahlverdampfung ohne Aktivierung und mit drei unterschiedlich starken Aktivierungen zur Anwendung kam. Die unterschiedliche Aktivierung wurde durch Messung des Elektrodenstromes festgestellt.

Messkurven der laserakustischen Prüfung an jeweils einer Probe jeder Testserie sind in Abb. 1 dargestellt. Die Schichtdicken lagen im Bereich von $d = 1,9$ bis $2,2\ \mu\text{m}$.

Aus den Kurven ergeben sich deutlich unterschiedliche Werte für den Elastizitätsmodul E der Schichten. Sie sind bis zu 40 % niedriger als der für das Bulkmaterial von Titan bekannte Wert $E = 116\ \text{GPa}$.

Die metallographischen Aufnahmen (Abb. 3a bis d) zeigen die Porenstruktur dieser Schichten. Die Schichten mit dem niedrigsten E -Modul $E = 68\ \text{GPa}$ (Abb. 3a) weisen die höchste Porosität auf. Mit abnehmender Porosität nimmt

der Schichtmodul zu. Die nahezu völlig dichte Schicht der Testserie 4 (Abb. 3d) weist mit $E = 110\ \text{GPa}$ einen Modul nahe dem des Tabellenwertes $E = 116\ \text{GPa}$ für Titan auf.

Die Ergebnisse belegen, dass durch Messung des E -Moduls dünner Schichten nachgewiesen werden kann, ob sie einen erhöhten Gehalt an Porosität enthalten. Die einzelnen Poren können deutlich kleiner sein als die Schichtdicke und Abmessungen im Submikrometerbereich aufweisen (siehe insbesondere Abb. 3c).

Damit kann die laserakustische Prüfmethode verwendet werden, um mit geringem Aufwand und in kurzer Zeit nachzuweisen, ob dichte Schichten abgeschieden worden sind. Dies konnte für umfangreiche Untersuchungen an Schichten genutzt werden, die mit den unterschiedlichen Verfahren, der Elektronenstrahlverdampfung und des Gleichstrombogens sowie zweier daraus kombinierter Techniken auf stehende und bewegte Substrate abgeschieden wurden (Abb. 2). Die Darstellung lässt eindeutig erkennen, dass das Combi2-Verfahren am geeignetsten ist, um auch auf einem bewegten Substrat, wie es bei Bandbeschichtung auftritt, Schichten mit einem E -Modul nahe dem des Bulkmaterials abzuscheiden, die nach den dargelegten Untersuchungen eine geringe Porosität erwarten lassen.

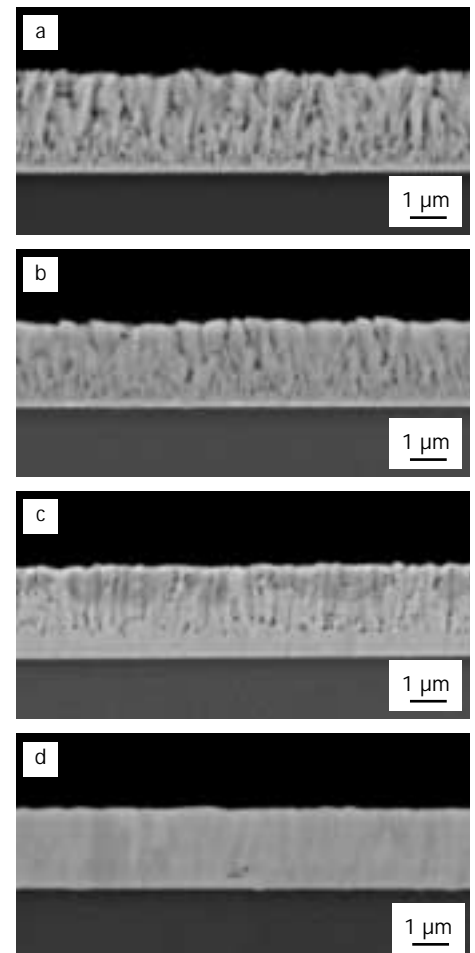


Abb. 3: Metallographische Aufnahmen der Titanschichten

- a) Serie 1, Schichtmodul $E = 68\ \text{GPa}$
- b) Serie 2, Schichtmodul $E = 85\ \text{GPa}$
- c) Serie 3, Schichtmodul $E = 105\ \text{GPa}$
- d) Serie 4, Schichtmodul $E = 110\ \text{GPa}$

Maßgeschneiderte Beschichtungen für Formwerkzeuge in der Glasherstellung

Aufgabenstellung

Die Herstellung feinst strukturierter Glasoberflächen durch Heißprägen ist eine kostengünstige Alternative zu aufwändigem Schleifen der Glasoberfläche. Zur Erzielung hoher Standzeiten werden die Abformwerkzeuge zumeist aus hochwarmfesten Stahl-, Nickel-, oder Kobaltbasislegierungen hergestellt. Nur wenige Strukturierungsverfahren sind für die Bearbeitung dieser Materialien geeignet (z.B. Ultrapräzisionsschleifen, Funken-erosion). Zusätzlich zur Strukturierung müssen die Werkzeuge mit einer entsprechenden Beschichtung versehen werden, um einerseits eine möglichst hohe Standzeit und andererseits beste Qualität der Endprodukte zu erreichen. Dabei ist insbesondere eine hohe Oberflächengüte der Werkzeugoberfläche gefordert. Auf Grund der besonderen thermischen und chemischen Belastungen dieser Oberflächen sind Standard-Hartstoffbeschichtungen für diese Anwendungen in der Regel nicht geeignet.

Lösungsweg

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojektes wurde für die bei den Projektpartnern strukturierten Werkzeuge eine angepasste Beschichtung auf Basis einer Platin / Gold - Legierung (PtAu5) entwickelt. Für die Beschichtungen wurde die Vakuumbogentechnologie gewählt, die sich bereits millionenfach für die Beschichtung von Werkzeugen bewährt hat.

Zur Einhaltung der geforderten Schichttrauheiten ($R_a < 30 \text{ nm}$) war es notwendig, die während der Beschichtung zwangsläufig auftretenden Mikropartikel aus dem Beschichtungsplasma herauszufiltern. Dazu wurde auf der Grundlage eines elektromagnetisch wirkenden Lamellenfilters ein Filtermodul entwickelt, optimiert und erprobt, das an industriellen Bogenbeschichtungsanlagen nachgerüstet werden kann.

Mit den beschichteten Formwerkzeugen waren anschließend von den Projektpartnern Abformversuche im Glas durchzuführen, um das Kontaktverhalten und die Formtreue der Abformung zu untersuchen.

Ergebnisse

Abb. 1 zeigt das Prinzip des Filtermoduls für eine Vakuumbogen-Beschichtungsanlage. Mit diesem Filter konnte eine erhebliche Reduzierung der Tropfbelastung der Schichten und somit die Einhaltung der geforderten Schichttraueit erreicht werden. In Abb. 2 sind beschichtete Teststrukturen dargestellt, die unter Nutzung der Filtertechnologie beschichtet wurden (Schichtmaterial PtAu5). Mit Hilfe derart strukturierter und beschichteter Werkzeuge wurden u. a. beim Projektpartner Fraunhofer IWU Abformversuche an Glas durchgeführt. Abb. 3 zeigt Strukturen in Glas, die durch Heißabformung hergestellt wurden. Mit dem entwickelten Schichtsystem und der zu dessen Abscheidung entwickelten Filtertechnik steht eine industriell einsatzfähige Technologie zur Beschichtung strukturierter Werkzeuge zur Verfügung.

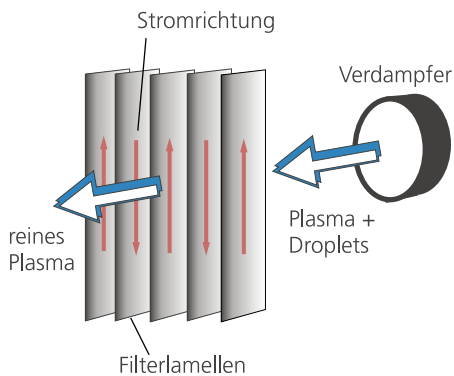


Abb. 1: Aufbau des Lamellenfilters

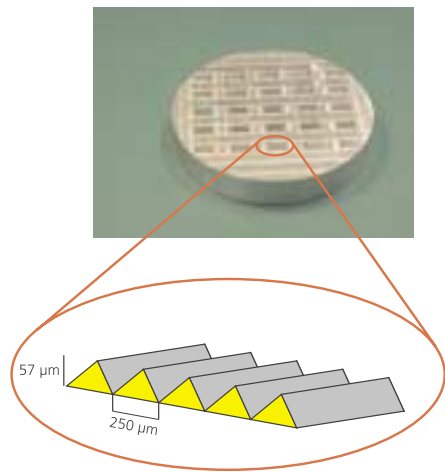


Abb. 2: Testwerkzeug mit in die Oberfläche eingebrachten Mikrostrukturen

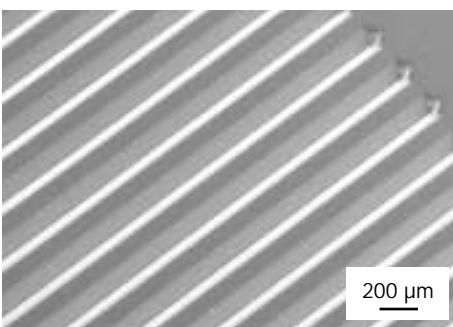


Abb. 3: Mikrostrukturiertes Glas, hergestellt durch Heißprägen mittels strukturiertem und beschichtetem Werkzeug

Ansprechpartner

Dr. Otmar Zimmer
Tel.: 0351 / 2583 257
otmar.zimmer@iws.fraunhofer.de





FuE-Angebot: CVD-Dünnschichttechnologie

Redaktion: Ihre Abteilung "CVD-Dünnschichttechnologie" wurde im Januar 2003 gegründet. Was waren die wesentlichsten Ergebnisse in diesem ersten Jahr?

Dr. Hopfe: Zunächst ist das dynamische Wachstum unserer beiden Hauptkompetenzfelder Atmosphärendruck-CVD und Prozess-Monitoring zu erwähnen. Dieses führte zur Gründung von zwei neuen Arbeitsgruppen im IWS. Katalysiert wurde diese Entwicklung durch unsere weitverzweigte europäische Kooperation, die uns und unsere Kooperationspartner inzwischen in eine Frontposition gebracht hat. Unsere gewachsene Expertise qualifiziert uns zunehmend als Partner für die Dresdner HighTech-Industrie, besonders für die Halbleiterfirmen AMD und Infineon. Und das Potenzial für eine weitere Zusammenarbeit wird durch die kürzlich getroffene Entscheidung von AMD, in Dresden ein weiteres Werk zu errichten, noch erhöht. Ermöglicht wurde das alles durch unseren Stamm an hochmotivierten, flexibel handlungsfähigen Mitarbeitern, die die Vorteile zweckgebundener Teamarbeit konsequent zu nutzen verstehen.


Redaktion: In Ihren Laboren entstand in letzter Zeit Equipment zur plasma-gestützten CVD bei Atmosphärendruck. Gibt es neben ersten Ergebnissen bereits Anwendungen?

Dr. Hopfe: Damit wurde die für eine neue Arbeitsrichtung notwendige "kritische Masse" kurzfristig etabliert. In einem größeren, vom IWS koordinierten EU-Industrieverbundprojekt konnten die dafür notwendigen Grundlagen erarbeitet werden. Das Reaktor-design erfolgt auf Basis thermofluidynamischer Rechnungen und nicht mehr

in der traditionellen, intuitiv-empirischen Arbeitsweise. Die im IWS aufgebauten Anlagen sind Atmosphärendruck-Durchlaufreaktoren mit Prototypcharakter, die sich für die effektive Großflächenbeschichtung von beispielsweise Stahl, Glas oder Halbleiter-Wafern eignen. Die Arbeiten erfolgen im Direktauftrag mittelständischer Unternehmen. Man muss aber realistisch einschätzen, dass es noch ein Stück Weg ist bis zu den ersten konkreten Anwendungen. Diese werden wir im Jahr 2004 angehen.

Redaktion: Im Bereich des Prozess-Monitoring ist es Ihnen gelungen, ein spektroskopisches Sensor-Verfahren in den Produktionsbereich von Infineon im Dresdner Norden zu übertragen. Herzlichen Glückwunsch zu diesem Erfolg.

Dr. Hopfe: Gratulieren sollte man erst, nachdem diese innovative Technologie längerfristig ihren Nutzen und ihre Stabilität nachgewiesen hat, da ist es wohl noch zu früh. Qualität und Durchsatz von Halbleiter-Wafern hängt wegen der Komplexität der Fertigungsverfahren mit hunderten Einzelschritten von der engtolerierten Funktion jeder Produktionsmaschine ab. Zusammen mit einem mittelständischen Unternehmen haben wir einen FTIR-spektroskopischen Sensor zur Überwachung von Beschichtungs- und Ätzanlagen entwickelt. Nach umfangreichen Tests im IWS konnten wir die Messtechnik Ende 2003 erfolgreich installieren.



A pessimist sees the difficulty of every opportunity, an optimist sees the opportunity of every difficulty.

Sir Winston Churchill



Dr. Volkmar Hopfe
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 402,
volkmar.hopfe@iws.fraunhofer.de)

Beispiele aus den Arbeiten 2003

1. Plasmagestützte Atmosphärendruck-CVD-Verfahren zur Großflächenbeschichtung 54
2. Monitorierung von Halbleiterprozessen mit FTIR-spektroskopischer Sensorik 56
3. Mit Infrarotlicht funktionelle Oberflächen an Bauteilen zerstörungsfrei charakterisieren 57
4. Komplexe Steuerungen für CVD-Beschichtungsanlagen und Gasdosiersysteme 58





Dr. Ines Dani
Gruppenleiterin Atmosphärendruck-
CVD
(Tel. 2583 405,
ines.dani@iws.fraunhofer.de)

Plasmagestützte CVD-Verfahren bei Atmosphärendruck

Atmosphärendruck-Plasma-CVD-Prozesse (AP-PECVD) erlauben die großflächige Abscheidung von qualitativ hochwertigen Funktionsschichten ohne den Einsatz von kostenintensiven Vakuumanlagen. Damit sind kontinuierliche Beschichtungsprozesse mit hohen Raten auf temperaturempfindlichen Materialien (wie Sonderstählen, Leichtmetallen, Gläsern und Kunststoffen sowie leicht gekrümmten Substraten unterschiedlicher Dicke) realisierbar.

Am IWS werden Prototypen von AP-PECVD-Durchlaufreaktoren mit Gaschleusen zur Herstellung von oxidischen und nichtoxidischen Schichten bei Normaldruck entwickelt. Die Optimierung des Reaktordesigns basiert auf experimentellen Ergebnissen und thermofluidodynamischen Simulationen. Das modulare Reaktordesign sorgt für eine kostengünstige Adaption des Prozesses an neue Anwendungsgebiete und Schichtmaterialien.



Blick in den Beschichtungsraum der ArcJet-PECVD-Anlage



Dr. Wulf Grählert
Gruppenleiter Prozess-Monitoring
(Tel. 2583 406,
wulf.graehlert@iws.fraunhofer.de)

Prozess-Monitoring

Die optimale Funktion von Industrieanlagen und die Qualität der gefertigten Produkte steht oftmals im direkten Zusammenhang mit der in der Anlage befindlichen Gasatmosphäre, deren Zusammensetzung in engen Grenzen überwacht werden muss. Eine industrietaugliche kontinuierliche in-situ-Gasanalytik ist beispielsweise essentiell bei der Qualitätssicherung von chemischen Beschichtungs-, Ätz- oder Sinterprozessen sowie bei der Überwachung von Emissionen aus Industrieanlagen. Für kundenspezifische Lösungen zur kontinuierlichen Überwachung der chemischen Zusammensetzung und Konzentration von Gasgemischen nutzt das IWS Sensoren, die wahlweise auf der NIR-Diodenlaser- oder FTIR-Spektroskopie beruhen.

Weiterhin werden Bauteiloberflächen und Schichtsysteme mit spektroskopischen Methoden wie FTIR-Spektroskopie, Spektro-Ellipsometrie oder Raman-Mikroskopie charakterisiert.



FTIR-Monitoring von Hochtemperaturprozessen

Plasmagestützte Atmosphärendruck-CVD-Verfahren zur Großflächenbeschichtung

Härte	11 GPa
E-Modul	90 GPa
Reibkoeffizient	0,2
Tape-Test	bestanden
Mikro-Ritztest	
erste Risse	5 N
vollständiges Schichtversagen	19 N

Tab. 1: Mechanische Eigenschaften einer mittels AP-PECVD hergestellten SiN-Schicht

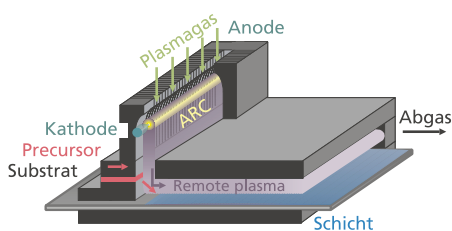


Abb. 1: Schematische Darstellung des ArcJet-PECVD-Reaktors

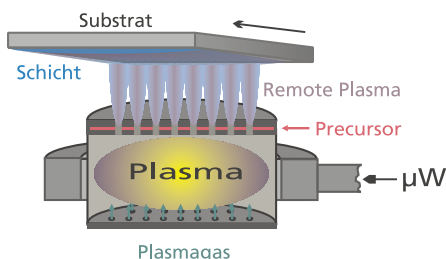


Abb. 2: Schematische Darstellung des Mikrowellen-AP-PECVD-Reaktors



Abb. 3: Mikrowellen-AP-PECVD-Laboranlage im IWS

Aufgabenstellung

Wirtschaftliche Technologien zur Oberflächenveredlung und -funktionalisierung von Halbzeugen und Bauteilen aus Stahl, Leichtmetallen, Glas oder Kunststoffen zeigen eine steigende Nachfrage. Komplexe Dünnschichtsysteme eignen sich hervorragend zur Erfüllung steigender Anforderungen hinsichtlich Korrosions- und Verschleißschutz, zur Adhäsionsverbesserung für Lack- oder Klebstoffauftrag, zur Gebrauchswertsteigerung von Produkten durch Erzeugen dekorativer, selbstreinigender und antibakterieller Oberflächen, um nur einige potentielle Anwendungen zu erwähnen. Die Beschichtungstechnologie ist dabei in allen Fällen in eine komplexe Produktionskette eingegliedert und muss zur Kostenminimierung möglichst optimal mit den vor- und nachgelagerten Prozessen zusammenwirken. Stand der Technik bilden kontinuierliche PVD- und LP-PECVD-Anlagen, die aber prinzipbedingt aufwändige Vakuumanlagen zum Betrieb der Schleusensysteme und zum Aufrechterhalten des Unterdrucks in der Beschichtungskammer benötigen.

Ziel der Arbeiten im IWS ist es, durchsatzstarke, an kontinuierliche Produktionsketten optimal angepasste Atmosphärendruck-Plasma-CVD (Chemical Vapour Deposition)-Prozesse zu entwickeln und diese bis zur industriellen Prototyp-Phase zu führen. Konventionelle, bei Atmosphärendruck betriebene CVD-Prozesse sind wegen zu hoher Temperaturbelastung für viele Materialien nicht einsetzbar. Zur Absenkung der Substrattemperatur muss die für die Schichtbildungsreaktion benötigte Energie substratfern eingekoppelt werden, beispielsweise durch Plasmaanregung. Die technische Herausforderung besteht derzeit in der Übertragung dieses Prinzips in den Atmosphärendruck-Bereich.

Eine weitere Zielstellung betrifft die Abscheidung nicht-oxidischer Schichtsysteme. Durch Beschichtung mit Nitrid-, Carbid- oder Borid-Keramiken werden Oberflächen gegen chemischen Angriff oder mechanischen Verschleiß wirkungsvoll geschützt.

Lösungsweg

Für Hochrate-Beschichtungen werden leistungsfähige, skalierbare Plasmaquellen benötigt, um damit großflächige CVD-Reaktoren speisen zu können. Im IWS kommen derzeit zwei komplementäre Typen von Plasmaquellen zum Einsatz, eine auf einer DC-Bogenentladung beruhende ArcJet-Linearquelle ("LARGE", Universität der Bundeswehr) und eine Mikrowellen-Volumenquelle (CYRANNUS®, Iplas GmbH). Beide Quellen wurden schrittweise auf eine Arbeitsbreite von ca. 350 mm skaliert, wobei an der weiteren Maßstabsvergrößerung und Anpassung an AP-PECVD-Reaktoren in Kooperation mit den Quellenherstellern intensiv gearbeitet wird.

Im IWS wurden Laboranlagen zur kontinuierlichen plasmachemischen Atmosphärendruck-Beschichtung entwickelt. Wesentliche Grundlage des Reaktor-Designs bildeten fluiddynamische Simulationsrechnungen der Gasdynamik, der Temperatur- und Konzentrationsverteilungen sowie der Schicht- und Pulverbildungs-Kinetik. Damit konnten Skalierungen und Weiterentwicklungen an AP-PECVD-Reaktoren effektiv realisiert und die Depositionsraten gesteigert werden. Die am IWS entwickelten PECVD-Beschichtungsanlagen arbeiten nach dem Prinzip der sogenannten Remote-Anregung, das eine räumliche Trennung von Plasmaerzeugung und Beschichtung beinhaltet. Damit wird die für kontinuierliche Beschichtungsprozesse erforderliche Langzeitstabilität des Reaktors gesichert und die Gefahr einer Substratschädigung durch Ionen-

Ansprechpartner

Dr. Ines Dani
Tel.: 0351 / 2583 405
ines.dani@iws.fraunhofer.de



beschuss aus dem Plasma ausgeschlossen. Mit typischen Substrattemperaturen von 100 °C - 200 °C (ungekühltes Stahlblech) ist die thermische Belastung für viele Anwendungen ebenfalls unkritisch.

In umfangreichen Vorversuchen konnte die Robustheit beider Quellen nachgewiesen werden. Neben Edelgasen können auch Gemische mit unterschiedlichsten Prozessgasen (wie N₂, O₂, H₂, CO₂) als Plasmagase eingesetzt werden. Die ArcJet-Quelle (Abb. 1) zeichnet sich durch eine sehr hohe Leistungsdichte und Gastemperaturen von über 10 000 K aus. Die Mikrowellen-Plasmaquelle (Abb. 2, 3) erzeugt ein typisch nicht-thermisches (relativ kaltes) Plasma. Die hohen Anregungsenergien ermöglichen, trotz der vergleichsweise niedrigen Gastemperaturen, die Fragmentierung von chemisch sehr stabilen und damit meist preiswerten und einfach zu handhabenden Precursoren. Eine Herausforderung bei der Abscheidung oxidfreier Schichten in kontinuierlichen Atmosphärendruck-PECVD-Anlagen mit Luft-zu-Luft-Substrattransport ist die Abschirmung des Reaktorinneren von jeglichem Sauerstoff- und Feuchtigkeitseintrag. Mit Hilfe von geregelten Gasschleusen, die für den jeweiligen Beschichtungsprozess optimiert sind, wird eine Inertisierung des Beschichtungsraums erreicht.

Ergebnisse

Siliziumnitrid - Schichten

Die Möglichkeit zur Abscheidung oxidfreier Schichtsysteme in den oben beschriebenen "offenen" Atmosphärendruck Plasma-CVD-Reaktoren wurde am Beispiel der Abscheidung von Siliziumnitrid-Schichten auf Edelstahl demonstriert. Die Abscheidung von 1 - 2 µm dicken Schichten erfolgte im N₂-Remote-Plasma der ArcJet-CVD-Anlage. Zur Elementanalyse der SiN-

Schichten wurde die ERD-Analyse (Elastic Recoil Detection) herangezogen, vgl. Abb. 4. Es handelt sich um überstöchiometrisches Si₃N_{4,7} mit sehr geringen C/H/O-Gehalten im Schichtinneren. Der erhöhte Sauerstoffgehalt an der Oberfläche der Schicht ist durch Adsorption von Wasserdampf bedingt. Im Schichtinneren liegt eine typisch "keramische Zusammensetzung" vor, im Einklang mit den gemessenen mechanischen Eigenschaften der Schicht (Tab. 1).

Siliziumdioxid - Charakterisierung der optischen Eigenschaften

Schichten aus Siliziumdioxid wurden aus elementorganischen Precursoren im Mikrowellen-AP-CVD-Reaktor abgeschieden. Der Brechungs- und Absorptionsindex von SiO₂-Beschichtungen auf Silizium-Wafern ist weitgehend identisch mit dem des kompakten Quarzglas. FTIR-spektroskopische Untersuchungen zeigen die bekannte Si-O-Netzwerkstruktur sowie wechselnde Anteile an Si-OH-Gruppen, geben aber keine Hinweise auf weitere denkbare Strukturgruppen, wie C-H, Si-H oder Si-N (Abb. 5). Bestätigt werden diese Ergebnisse durch XPS- und SNMS-Tiefenprofilmessungen, die ein stöchiometrisches Si/O-Verhältnis über den gesamten Schichtquerschnitt ausweisen und ebenfalls keine weiteren Elemente detektieren.

AFM-Aufnahmen von beschichteten Si-Wafern zeigen defektfreie, flächendeckende Beschichtungen, selbst bei Schichtdicken unterhalb 40 nm (Abb. 6). AFM-Rauheitsanalysen ergaben für Schichtdicken im Bereich zwischen 40 und 120 nm R_a-Werte ≤ 2,5 nm. Zusammenfassend handelt es sich bei den mittels AP-Plasma-CVD hergestellte Schichten um "Quarzglasschichten", die aufgrund ihrer guten optischen Eigenschaften und der erzielbaren geringen Rauheiten potentiell für den Einsatz in der Optik geeignet sind.

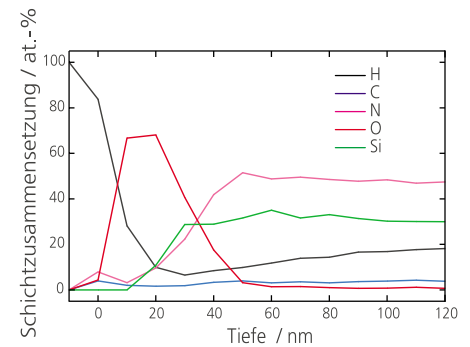


Abb. 4: ERD-Tiefenprofilanalyse einer SiN-Schicht

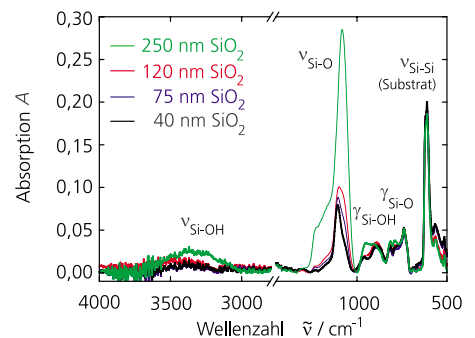


Abb. 5: FTIR-Spektrum einer SiO₂-Schicht auf Silizium-Wafer mit unterschiedlicher Schichtdicke

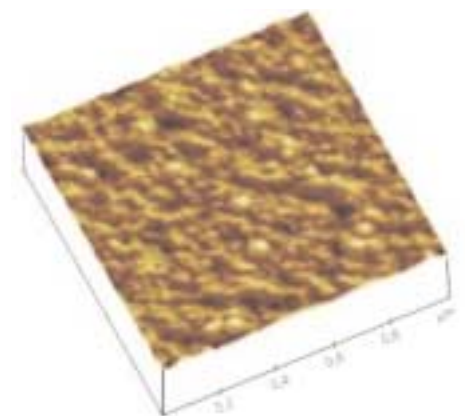


Abb. 6: AFM-Aufnahmen von SiO₂-Schichten auf Silizium-Wafern, 3D-Darstellung der Waferoberfläche

Monitorierung von Halbleiterprozessen mit FTIR-spektroskopischer Sensorik

Aufgabenstellung

Eine Vielzahl der in der Halbleiterindustrie eingesetzten Basistechnologien beruhen auf chemischen Gasphasenprozessen, wie z. B. die Schichtabscheidung mittels CVD (Chemical Vapour Deposition) oder plasmachemische Ätzverfahren. Der extreme Wettbewerbsdruck in der Halbleiterindustrie erfordert eine ständige Optimierung aller Prozessschritte mit dem Ziel, zu einer Kostenreduzierung bei gleichzeitiger Erhöhung der Ausbeute zu gelangen. Insbesondere gilt das für neue Technologien, wie beispielsweise die sich etablierende 300 mm-Wafertechnologie, die ein signifikantes Kostensenkungspotenzial beinhaltet.

Die Basis jeder Optimierung ist die Kenntniss der Wirkung des Prozess- und Anlagenzustandes auf die Produktqualität. Zur Prozess-Monitorierung sind angepasste Sensoren einschließlich intelligenter Signalauswertung notwendig. Bisherige industrielle Sensorik wird den sprungartig gewachsenen Bedürfnissen hinsichtlich Nachweisvermögen, Selektivität, Ansprechzeit und Langzeitstabilität nicht gerecht. Für einige essentielle Prozessschritte in der modernen Halbleiterfertigung gibt es bisher keine industrietauglichen Sensoren.

Ziel der Arbeiten am IWS ist es, für einen Halbleiter-Standardprozess die Möglichkeit einer Prozesscharakterisierung sowie -monitorierung auf Basis der Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR) zu untersuchen. In Kooperation mit potenziellen Endnutzern wurde die CVD-Abscheidung von SiO_2 -Schichten ausgewählt.

Lösungsweg

Um grundlegende Prozessuntersuchungen durchführen zu können, wurde ein Versuchstand entwickelt, der

die Abscheidung von SiO_2 durch Reaktion von Tetraethylorthosilikat (TEOS) mit Ozon (O_3) unter industrienahen Bedingungen ermöglicht (Abb. 2). Im Abgasbereich - unmittelbar dem Beschichtungsreaktor nachgeschaltet - ist ein industrietauglicher FTIR-Sensor an die CVD-Anlage adaptiert. Über spezielle Viewports wird der Messstrahl des FTIR-Sensors direkt durch den Abgasstrom geleitet und dabei von der vorhandenen Gasatmosphäre selektiv absorbiert. Aus dem erhaltenen IR-Absorptionsspektrum können Informationen über die enthaltenen Gase, deren Konzentration und die zeitliche Änderungen gewonnen werden. Das Messprinzip ermöglicht auch die Erfassung transients Gasspezies, die oft Schlüsselkomponenten für den Prozess- und Anlagenzustand darstellen.

Ergebnisse

Die in die SiO_2 -CVD-Beschichtungsanlage integrierte FTIR-Sensoreinheit ermöglicht die spektral und zeitlich aufgelöste in-situ-Überwachung der Abgasatmosphäre in Abhängigkeit von den Prozessbedingungen, z. B. von Temperatur und Gesamtdruck sowie von den Flussraten der Precursor- und Inertgasströme. Es wurden prozessrelevante Reaktionsprodukte wie Essigsäure und Kohlenmonoxid detektiert, deren Konzentration mit den gleichzeitig bestimmten Umsatzgraden der eingesetzten Precursoren korreliert wurde. Exemplarisch zeigt Abb. 1 die Abhängigkeiten des Absorptionssignals von der Menge der eingesetzten Precursoren (TEOS, Ozon). Im Ergebnis dessen konnte das FTIR-Sensorsignal kalibriert und erste Korrelationen mit den Prozess- und Anlagenzuständen gewonnen werden. Derzeit ist ein Prototyp-Sensor im Aufbau, der künftig in ein industrielles Prozess-Tool integriert wird.

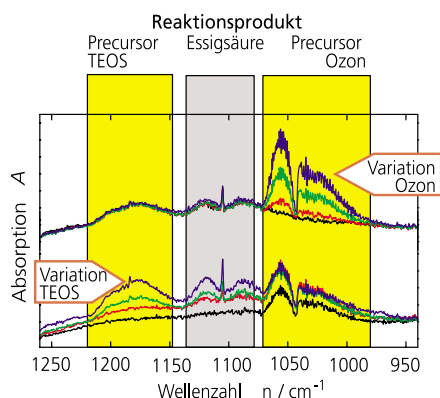


Abb. 1: Beispiel für die Änderung des FTIR-Absorptionssignals aufgrund von Variationen der Prozessparameter (oben: Variation des Ozon-Flusses; unten: Variation des TEOS-Flusses)



Abb. 2: Versuchsaufbau zur SiO_2 -CVD-Beschichtung mit integriertem FTIR-Gassensor

Ansprechpartner

Dr. Wulf Grählert
Tel.: 0351 / 2583 406
wulf.graehlert@iws.fraunhofer.de



Mit Infrarotlicht funktionelle Oberflächen an Bauteilen zerstörungsfrei charakterisieren

Aufgabenstellung

Die Bestimmung der Struktur und Zusammensetzung von Schichten und Oberflächen ist ein wichtiges Werkzeug zur Qualitätssicherung und zur Optimierung von Oberflächentechnologien. Kohlenstoffschichten zeichnen sich durch Biokompatibilität und gute Haftung auf verschiedensten Substraten aus - günstige Eigenschaften zur Fixierung biochemisch aktiver Molekülgruppen. Um Proteine an Kohlenstoffschichten zu binden, sollten diese mit primären Aminogruppen (-NH₂) funktionalisiert werden. Die Abscheidung der Schicht erfolgte mit der Laser-Arc-Technik (lasergesteuerte gepulste Vakuumbogenabscheidung) in einer reaktiven Ammoniak-Atmosphäre. Die Aufgabe bestand nun darin, festzustellen, ob an die Kohlenstoffschicht die gewünschten primären Aminogruppen gebunden wurden.

Lösungsweg

Die FTIR-Spektroskopie (1,3 µm - 200 µm) ist eine exzellente Methode zur Untersuchung der Struktur und Zusammensetzung von Schichten. FTIR-Spektren liefern Informationen zur Molekülstruktur, zu den Bindungsverhältnissen und zur Zusammensetzung der Probe. Die Methode der abgeschwächten Totalreflexion (ATR) ist dabei für die Untersuchung von oberflächennahen Bereichen besonders geeignet. Zur Messung wird die Probe an einen hochbrechenden Kristall (z. B. ZnSe, Ge, Diamant) gepresst (Abb. 3), wobei die Infrarotstrahlung aufgrund der Totalreflexion ein- oder mehrfach innerhalb des Kristalls reflektiert wird. Dabei dringt die aus dem Kristall austretende evanescente Welle in den Oberflächenbereich der Probe ein und wird spektral-selektiv durch Anregung bestimmter Molekülgruppen absorbiert. (Abb. 2).

Ergebnisse

Unter Verwendung eines Diamantkristalls wurden mittels FTIR-ATR verschieden dicke Kohlenstoffschichten auf Topas® (Cycloolefincopolymer; COC) hinsichtlich des Vorhandenseins primärer Aminogruppen (-NH₂) untersucht. Nach geeigneter Spektrenverarbeitung konnten Differenzspektren der beschichteten Proben mit dem Spektrum des unbeschichteten Substrates verglichen werden (Abb. 1). Die breite Bande bei 1615 cm⁻¹ wird der -N-H-Deformationsschwingung von primären Aminen zugeordnet. Sekundäre Amine (-NH-) absorbieren in diesem Spektralbereich nicht. Außerdem wurde die C-N-Bande von aliphatischen Aminen nachgewiesen (1100 cm⁻¹).

Mittels ATR konnte in den Kohlenstoffschichten das Vorhandensein von primären Aminogruppen, die für die Anbindung von Proteinen notwendig sind, eindeutig nachgewiesen und semiquantitativ bewertet werden. Mit der abgeschwächten Totalreflexion, die auch bei Flüssigkeiten, Pasten, Elasten und kompakten Festkörpern eingesetzt werden kann, werden schnell und zuverlässig Informationen zu Struktur und Zusammensetzung in oberflächennahen Bereichen erhalten.

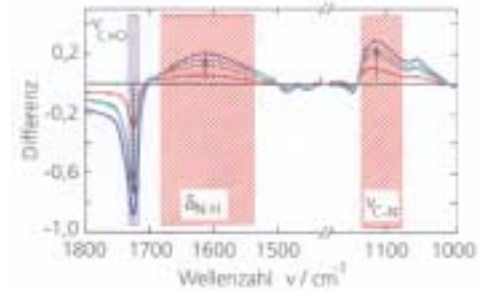


Abb. 1: Differenz-ATR-Spektren von verschiedenen dicken amorphen Kohlenstoffschichten

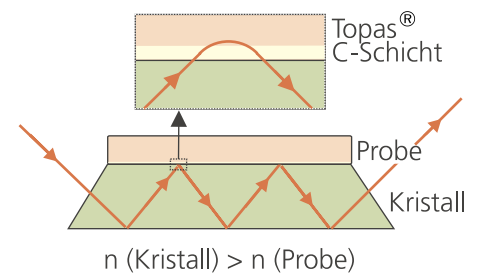


Abb. 2: Prinzip der ATR-Messung



Abb. 3: ATR-Reflexionseinheit mit Diamantkristall

Ansprechpartner

Dipl.-Chem. Beate Leupolt
Tel.: 0351 / 2583 234
beate.leupolt@iws.fraunhofer.de

Komplexe Steuerungen für CVD-Beschichtungsanlagen und Gasdosiersysteme

Aufgabenstellung

Eine vielversprechende Technologie für preisgünstige Beschichtungen von Bauteilen oder bandförmigen Halbzeugen mit dünnen funktionellen Schichten ist die plasma-aktivierte chemische Dampfphasenabscheidung bei Atmosphärendruck, kurz AP-Plasma-CVD (Chemical Vapor Deposition). Die Entwicklung und Anpassung dieser Technologie erfordert die Kontrolle und Beherrschung einer Vielzahl von Prozessparametern, die eine aufwendige Anlagentechnik voraussetzt.

Im Unterschied zu Produktionsanlagen erfolgt bei der Technologie-Entwicklung - aufgrund einer Arbeitsweise, die gerade neuartige Kombinationen von Parametersätzen und Abläufen erfordert - eine ständige Anpassung an neue Entwicklungsergebnisse. Dies betrifft neben den Anlagen selbst auch Steuerung, Anlagenüberwachung und autonome Sicherheitsmechanismen.

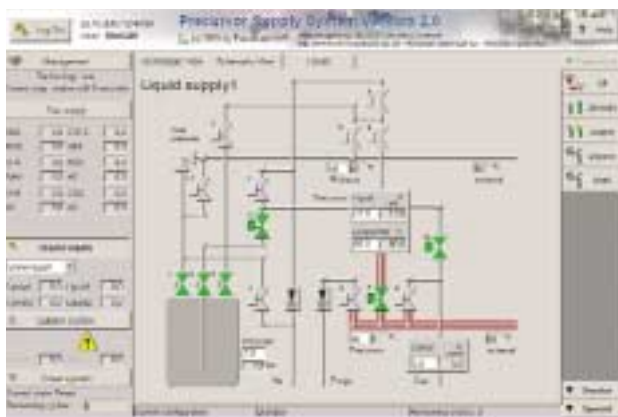
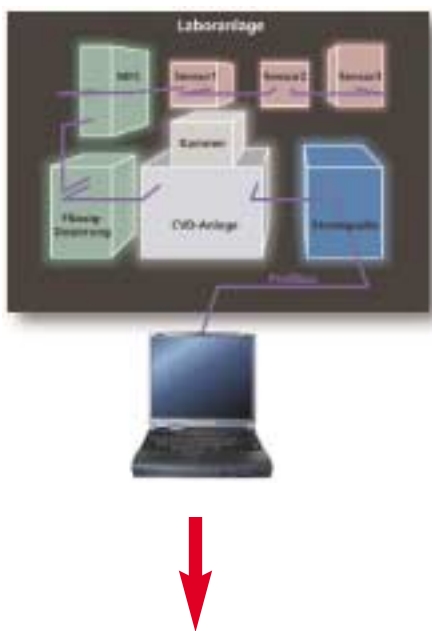


Abb. 1: Bedienoberfläche der Steuerung und Schema der zugehörigen Komponenten der Anlage

Lösungsweg

Die Anlagensteuerung ist unter Verwendung eines objektorientierten Automatisierungssystems (VAC-NT/32 der Fa. AIS Automation) auf Industrie-PC-Basis realisiert worden. Dieses System erlaubt die formalisierte Steuerungsbeschreibung in einem grafischem Entwicklungssystem. Aus dieser

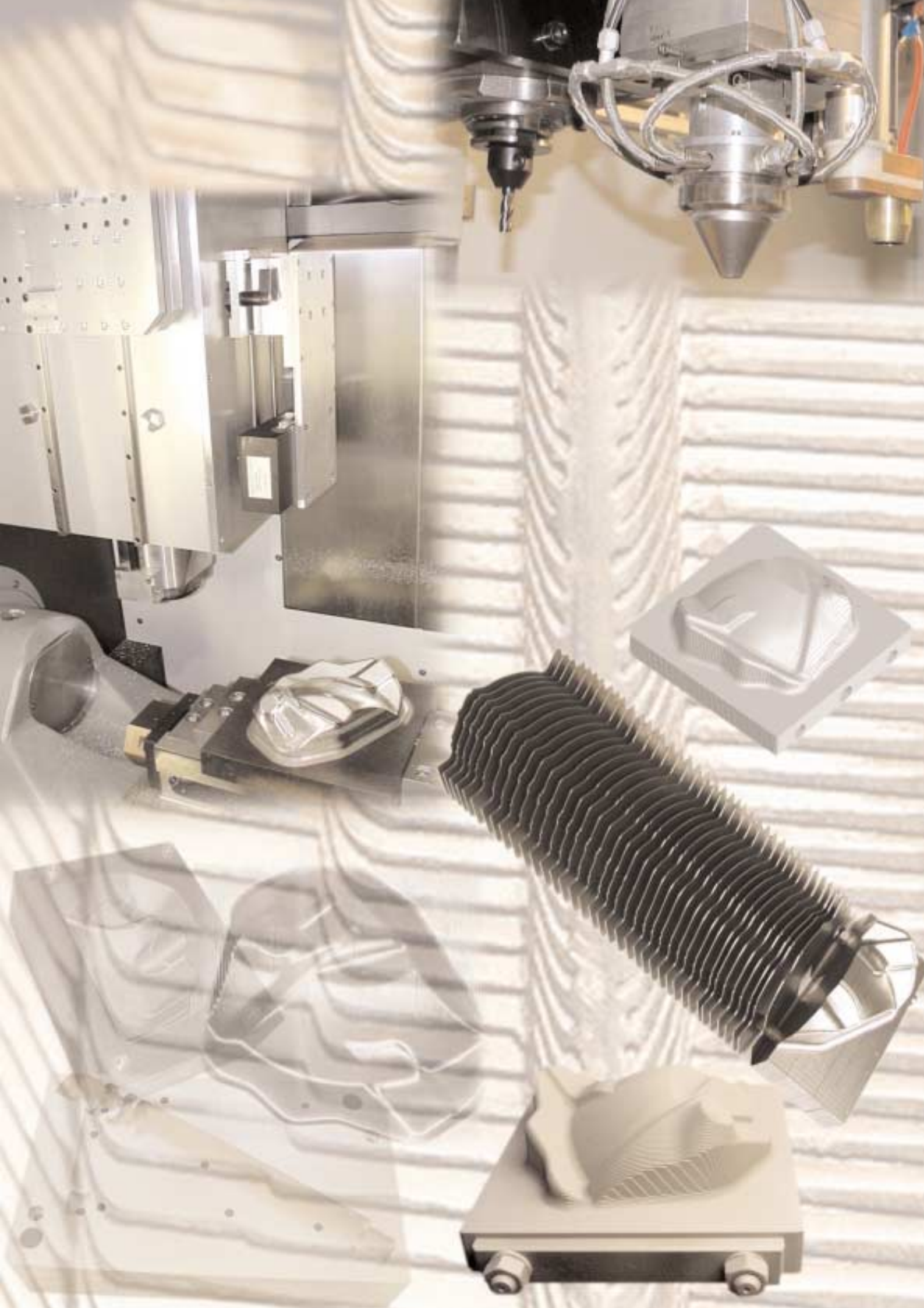
projektierten Beschreibungsform werden automatisch die ereignisgetriggerten Steuerabläufe generiert, wodurch eine Vielzahl typischer Fehlerquellen bei der Software-Entwicklung vermieden wird. Intern ist die Rechnersteuerung als System von aufeinander aufbauenden Funktionsebenen mit definierten Schnittstellen realisiert. Die Funktionen umfassen unter anderem: Hardware-Ansteuerung, Signalanpassung, Sicherheitsverriegelung, Überwachung, Protokollierung, Ablaufsteuerung, Automatik-/Handsteuerung und Visualisierung. Durch die Beschreibung der Teilsysteme als Zustandsautomat mit definierten und überwachten Zustandsübergängen (in Form von Ablaufprogrammen) sind die Reaktionen auf Systemfehler formalisierbar und es kann geeignet interveniert werden. In die Projektierung der komplexen Steuerungssoftware flossen langjährige Erfahrungen aus dem Betrieb von CVD-Anlagen und das Know-How von Technologie-Entwicklern direkt mit ein. Der Forderung nach einfacher Erweiterbarkeit wurde durch Verwendung dezentraler Peripherie-Komponenten mit Profibus-Ankopplung Rechnung getragen. Aufgrund der häufigen Notwendigkeit von Anlagenmodifikationen erfolgt die Visualisierung nicht anlagenbezogen, sondern signalbezogen, da dies eine relativ unveränderte, jedoch parametrierbare, Bedienmöglichkeit darstellt.

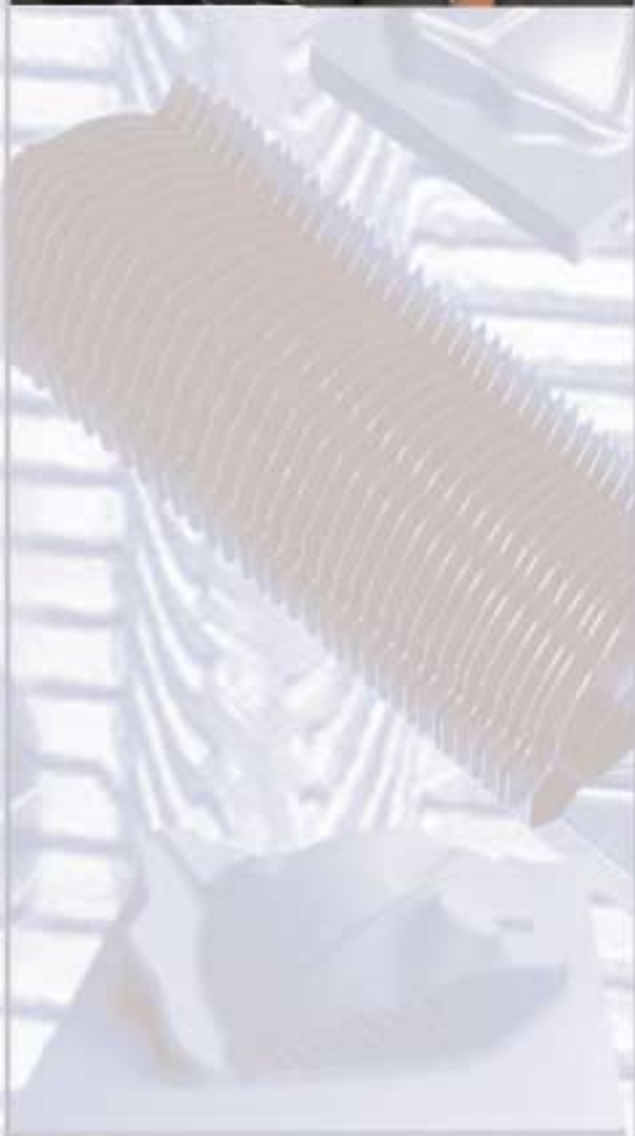
Ergebnisse

Die CVD-spezifischen Anforderungen - im Zusammenhang mit dem Korrosionspotential bzw. dem allgemeinen Gefährdungspotential der eingesetzten Precursorgase - werden automatisch berücksichtigt. Technologie-Entwickler werden von Routineaufgaben bei der Anlagenbedienung entlastet. Die Erweiterung und laufende Anpassung der Anlagen an die Erfordernisse des Technologie-Entwicklungsprozesses ist mit beherrschbarem Aufwand möglich.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Oliver Throl
Tel.: 0351 / 2583 446
oliver.throl@iws.fraunhofer.de





FuE-Angebot: Thermische Beschichtungsverfahren

Redaktion: Die Pulverdüsen zum Präzisions-Auftragschweißen mit Lasern haben einen neuen Namen - COAXn und wurden auch im vergangenen Jahr wieder in deutschen und internationalen Unternehmen in die Produktion überführt. Was konnte 2003 erreicht werden?

Dr. Nowotny: Das Laserstrahl-Präzisionsauftragschweißen hat sich in den letzten Jahren in der industriellen Fertigung etabliert. Unsere Bearbeitungsköpfe haben als robuste und nutzerfreundliche Systemtechnik einen Teil mit dazu beigetragen, dass die Lasertechnologie heute als leistungsfähige, hochpräzise Verfahrensvariante für anspruchsvolle Beschichtungsaufgaben zum Reparieren, Generieren und Beschichten zur Verfügung steht.

Mittlerweile existiert ein modular aufgebautes Pulverdüsensystem, das aus Grundbestandteilen besteht, die zu einer Vielzahl von anwenderangepassten Lösungen kombiniert werden können. Dabei zeigt eines der Titelbilder dieses Jahresberichtes eine Düse, die Auftragschweißungen auch in extremen Schweißlagen ermöglicht. So sind auch bei drehender und schwenkender Bewegung stabile Schweißbedingungen gewährleistet, und selbst Überkopf-Schweißungen können ausgeführt werden.

Allein im vergangenen Jahr konnten wieder 6 solcher Systeme mit den zugehörigen Technologien in die Praxis des Reparierens von Umformwerkzeugen, Flugzeugtriebwerken und stationären Gasturbinen überführt werden. Die Auftraggeber kamen aus Deutschland, Finnland, Japan und den USA. Damit wurden seit dem Jahr 2000 etwa 35 COAXn-Pulverdüsen in industrielle Lösungen umgesetzt, weltweit.

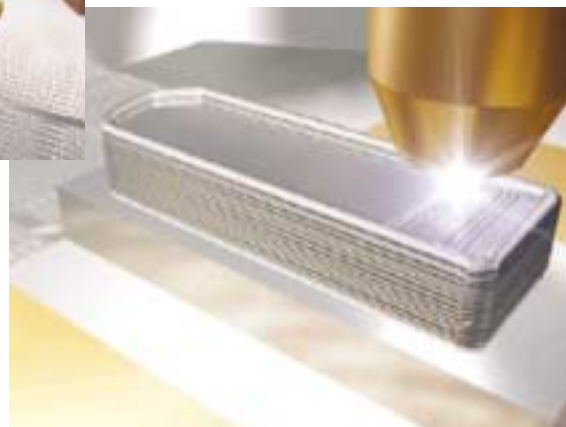
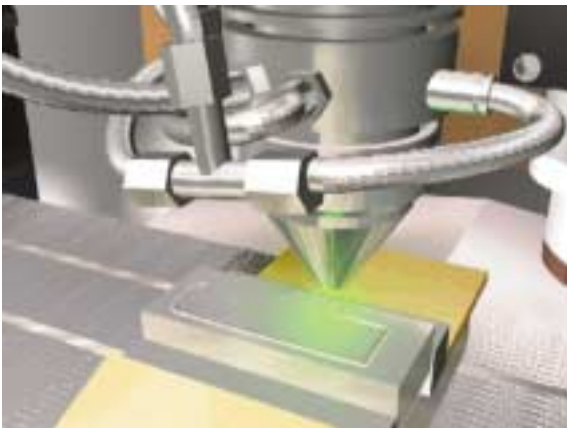
Redaktion: Parallel dazu macht das Melato®-Verfahren Schlagzeilen. Welche Erfolge konnten da erzielt werden?

Dr. Nowotny: Bei der MELATO®-Technologie (Metal Laminated Tooling) handelt es sich um ein neues Verfahren zur schnellen Herstellung größerer Werkzeuge und Formen aus Stahl. Die CAD-Modelle der Werkzeuge werden in parallele Schnittebenen zerlegt, die dann auf Blechtafeln übertragen und mit dem Laser ausgeschnitten werden. Diese Ausschnitte werden anschließend gestapelt, gefügt und stellen so, Blech um Blech, das Werkzeug dar. Beispielsweise lassen sich auf diese Weise voll funktionsfähige Prägewerkzeuge in nur 10 % der bisher benötigten Zeit herstellen. Die Technologie wird in einem vom BMBF geförderten Verbundprojekt qualifiziert, das im Sommer 2004 endet. Gegenwärtig können reale Werkzeuge gefertigt werden, die sich auch bereits im Praxistest bei Industriepartnern bewährt haben. Die aktuellen Fortschritte betreffen zunächst die Fügetechnologie der Blechlamellen. Entsprechend des Werkzeugtyps stehen jetzt das Löten, Kleben, Laserschweißen und eine mechanische Fügevariante zur Verfügung. Des Weiteren können Bleche unterschiedlicher Dicke und unterschiedlicher Materialien kombiniert werden, wodurch eine noch gezieltere Eigenschaftsprägung und weiter verbesserte Konturtreue erreicht werden. Schließlich können nunmehr auch Spritzguss-Formen mit der von den Anwendern bereits seit langem erwarteten integrierten konturnahen Kühlung schnell gefertigt werden.

*Eine Investition in Wissen
bringt immer noch die besten Zinsen.
Benjamin Franklin*



Dr. Steffen Nowotny
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 241,
steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de)



Beispiele aus den Arbeiten 2003

1. Verbindungstechnologien für MELATO® - Werkzeuge 64
2. DCAMnc zur Programmierung von Robotern und CNC-Maschinen 66
3. Präzisionsauftragschweißen mit laserbasierten, hybriden Fertigungsverfahren 68
4. Auftragschweißen von Titan-karbid-Verbundpulvern 70
5. Thermisch gespritzte Hartmetallschichten für höchste mechanische Belastungen 71
6. Thermisches Spritzen - vom Pulver zur Beschichtungslösung 72
7. Vakuumplasmaspritzen als formgebendes Fertigungsverfahren 73
8. Fortschritte beim laserunterstützten atmosphärischen Plasmaspritzen 74



Dr. Lutz-Michael Berger
Gruppenleiter Thermisches Spritzen
(Tel. 2583 330,
lutzmichael.berger@iws.fraunhofer.de)

Verschleißschutz und funktionale Beschichtungen

Zum Beschichten von Bauteilen aus Stahl, Leichtmetallen oder anderen Werkstoffen mit Metallen, Hartmetallen und Keramik stehen im IWS das atmosphärische (APS) und Vakuumplasmaspritzen (VPS) sowie das Flamm-spritzen zur Verfügung. Die Hybridtechnologie des laserunterstützten atmosphärischen Plasmaspritzens (LAAPS) ergänzt das Verfahrensspektrum.

Auf der Grundlage modernster Spritztechnik und in Kooperation mit weiteren Instituten des Fraunhofer-Instituts-zentrums in Dresden umfaßt das Angebotsspektrum:

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



Plasmaspritzen einer Welle



Dr. Anja Techel
Gruppenleiterin Auftragschweißen
(Tel. 2583 255,
anja.techel@iws.fraunhofer.de)

Reparieren und Generieren

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

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



Verschiedene im IWS entwickelte Pulverdüsen

Verbindungstechnologien für MELATO® - Werkzeuge

Aufgabenstellung

Schwerpunkt des vom BMBF geförderten Verbundprojektes zur schnellen Fertigung von komplex geformten Werkzeugen aus Blechlamellen (MELATO - Metal Laminated Tooling) ist die Entwicklung und Qualifizierung von Verbindungstechnologien für verschiedene Einsatzbereiche. Mit der MELATO®-Technologie können Tiefzieh-, Präge- und Spritzgusswerkzeuge aus verschiedenen Blechmaterialien gefertigt werden.

Die unterschiedlichen Beanspruchungsarten wie Druck, Temperatur oder Verschleiß erfordern angepasste Verbindungstechnologien für die einzelnen Bleche.

Lösungsweg

Die Auswahl der Verbindungstechnologien erfolgt nach Analyse der Anforderungen an Qualität, Oberflächengüte und die zu erwartenden Fertigungskosten. So ist für Spritzgusswerkzeuge eine temperaturbeständige Verbindung der Blechlamellen notwendig, die den Einspritzdrücken widerstehen kann. Weiterhin darf der flüssige Kunststoff während des Einspritzvorganges nicht zwischen die Blechlamellen gedrückt werden, da sonst eine Entformung des Bauteils nicht möglich ist.

Soll in das Werkzeug ein Kühlsystem integriert werden, müssen die Dichtigkeit und Wärmeleitfähigkeit des Lamellenwerkzeuges sehr hoch sein. Geeignete Verfahren zur Verbindung der Blechlamellen sind beispielsweise Hartlöten und Hochtemperaturlöten. Weichlöten kommt aufgrund mangelnder Festigkeit der Verbindung bei erhöhten Temperaturen nur eine untergeordnete Bedeutung zu.

Prägewerkzeuge bzw. Tiefziehwerkzeuge erfordern keine flächige Verbindung der Einzelbleche, hier steht eine schnelle und kostengünstige Verbindung im Vordergrund. Auf Grund der einfachen Automatisierung bietet sich als Fügeverfahren das Laserstrahlschweißen an.

Ergebnisse

Löten

Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen von Werkstoffen. Durch das Aufschmelzen des Lotes (Schmelzlöten) oder durch Grenzflächendiffusion (Diffusionslöten), kommt es zu einer Verbindung zwischen Grundwerkstoff und Lotmaterial. Der Schmelzbereich des Grundwerkstoffes wird beim Löten nicht erreicht.

Hartlote und Hochtemperaturlote besitzen bei erhöhten Temperaturen eine ausreichende Festigkeit. Das flächige und stoffschlüssige Fügen der Blechschichten eines lamellierten Werkzeuges entspricht den Anforderungen für Spritzgusswerkzeuge. MELATO®-Werkzeuge die mittels Hochtemperaturlöten gefertigt werden, sind dicht und besitzen eine gute Wärmeableitung (Abb 1).

Spritzgusswerkzeug mit integrierter konturnaher Kühlung

Die MELATO®-Technologie erlaubt das "Einbauen" von komplexen Kühlsystemen in Spritzgusswerkzeuge (Abb. 2 und 3). Die Optimierung einer Spritzgussform kann durch FEM-Analyse oder mit einer Wärmebildkamera erfolgen. Die Vorteile einer optimierten Kühlung sind:

- Reduzierung der Zykluszeit durch optimale Wärmeabfuhr,



Abb. 1: Schliffbild Lötverbindung



Abb. 2: Düsenseite Spritzgusswerkzeug



Abb. 3: Konturnahes Kühlsystem

Ansprechpartner

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



- homogene Temperierung der Werkzeugwand und somit geringere Spannungen und Verzug im Bauteil,
- gezielte Kühlung von "Hot-Spots".

Nachdem das Spritzgusswerkzeug im Ofen verlötet wurde, erfolgt die Endbearbeitung mittels 3 bis 5-Achs-Fräsen (Abb. 4). In Abbildung 5 ist das bearbeitete Werkzeug dargestellt und Abbildung 6 zeigt in einer Schnittdarstellung das konturnahe Kühlsystem.

Laserstrahlschweißen

Der schichtweise Aufbau von MELATO-Bauteilen und die Forderung der Integrierbarkeit der Schweißoperationen in den Bauprozess (Automatisierung) bestimmen die Auswahl geeigneter Schweißverfahren. Der Wärmeeintrag in das Bauteil ist beim Laserstrahlschweißen relativ gering (kleine Wärmeeinflusszone). Durch die Parameter Laserleistung und Schweißzeit bzw. Schweißgeschwindigkeit kann gezielt Einfluss auf den Energieeintrag genommen werden. Die Schweißoperationen sind durch die Nutzung geeigneter CAD/CAM Software automatisierbar und in Bearbeitungszentren integrierbar. Dazu wurde im Rahmen des MELATO-Projekts eine Software entwickelt, die es ermöglicht, 3D-CAD-Modelle in Schichten zu zerlegen, die Position der Schweißpunkte automatisch zu berechnen und Schweißfehler wie Schweißnahtüberhöhung zu kompensieren. Abbildung 7 zeigt ein durch Laserstrahlpunktschweißen hergestelltes Tiefziehwerkzeug. Die Schweißpunkte liegen im Inneren des Bauteils.

Der Aufbau von Werkzeugen kann durch die Integration von Laserstrahlschweißtechnik direkt in Bearbeitungszentren erfolgen. Dafür wird in ein 5-Achsbearbeitungszentrum (Abb. 4) ein fasergekoppelter Nd-YAG-Laser und die entsprechende Schnittstelle installiert. Ziel ist die Komplettbearbeitung (Laserstrahlschweißen, Fräsen, Auftragschweißen) von Werkzeugen und Bauteilen in einer Aufspannung.

Weitere Anwendungen und Informationen finden Sie unter:
www.iws.fraunhofer.de/~melato/



Abb. 4: Bearbeitung durch 5-Achsfräsen



Abb. 5: Lamellenwerkzeug gefräst



Abb. 6: Schnittdarstellung Kühlsystem



Abb. 7: Lamelliertes Tiefziehwerkzeug

DCAMnc zur Programmierung von Robotern und CNC-Maschinen

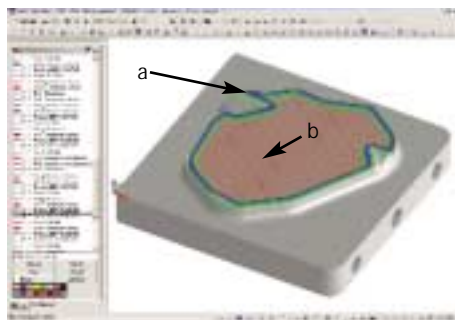


Abb. 1: Automatische Bahnberechnung in DCAMnc

- a) LPA - Bahnen für Randbereiche
- b) PTA - Bahnen für innere Bereiche

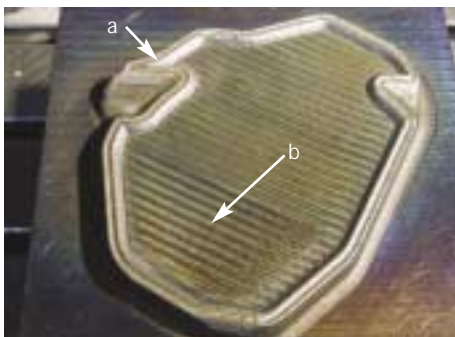


Abb. 2: Zwischenstand des Bauprozesses mittels der Verfahrenskombination LPA+PTA (Tiefziehstempel, Stellite 21)

- a) Randbereiche generiert mittels LPA
- b) Innere Bereiche mittels PTA ausgefüllt



Abb. 3: Lokale 3D-Auftragschweißung mit Gelenkarm-Roboter auf ein Tiefziehwerkzeug

Aufgabenstellung

Das Laserstrahl-Auftragschweißen hat sich überall dort etabliert, wo es um die Reparatur, den Oberflächenschutz oder das direkte Generieren komplex geformter Bauteile und Werkzeuge geht. Insbesondere auf den Gebieten der Triebwerk- und Turbineninstandsetzung sowie des Werkzeug- und Formenbaus wird das Auftragschweißen in leistungsfähigen 5-Achs-CNC-Maschinen und Gelenkarmrobotern durchgeführt. Im Sinne einer hohen Wirtschaftlichkeit und Flexibilität wird hierfür von den industriellen Anwendern die durchgängige Realisierung der CAD/CAM-Prozesskette im Sinne eines "Closed Loop Manufacturing" gefordert. Die CNC-seitige Umsetzung benötigt anspruchsvolle Programmier- und Steuerungssysteme, die die einzelnen Prozessschritte verknüpfen und das Generieren effizienter Bearbeitungsstrategien unterstützen.

Lösungsweg

Die Lösung besteht in dem CAM-System DCAMnc, das in mehrjähriger Zusammenarbeit mit dem Software-Hersteller NCSOFT Wagner entwickelt worden ist. Dieses umfasst mehrere Tools, die ausgehend von 3D-CAD-Modellen eine verfahrensgerechte Datenbearbeitung durchführen, eine optimale Bearbeitungsstrategie festlegen, die Laserbahnen für das Multilagenauftragschweißen generieren und schließlich über eigens geschriebene Postprozessoren die CNC-Programme sowohl für das Auftragschweißen als auch für die Endbearbeitung erstellen. Das Programmpaket ist so ausgelegt, dass es zur Prozesssteuerung unterschiedlichster Maschinenkonzepte, wie zum Beispiel Fräszentren, Laseranlagen

in Gantry-Bauart und Industrierobotern, eingesetzt werden kann. Es ist außerdem in dem Sinne offen ausgelegt, daß aktuelle FuE-Ergebnisse in entsprechende Berechnungsalgorithmen umgesetzt und in das System eingefügt werden können.

Ergebnisse

Zum Reparieren und Generieren komplex geformter 3D-Bauteile stehen das Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) und das Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA) von Kobalt- und Nickelbasispulvern sowie anderen Metalllegierungen und Hartstoffen zur Verfügung. Die Systemtechnik der unterschiedlichen Verfahren (auch Kombinationen von z. B. LPA, PTA, Induktion) und Prozessschritte wurden vollständig in CNC-Bearbeitungszentren integriert. Die Reparatur und das Generieren von Bauteilen können auf diesen Maschinen vollautomatisch durchgeführt werden. Die dafür erforderlichen NC-Programme werden durch spezielle Algorithmen in DCAMnc berechnet.

Grundlage der Berechnungen sind in der Regel importierte 3D-CAD-Modelle (stl, iges, dxf, sat, vdafs usw.) oder Digitalisierdaten. Auf Grundlage dieser Daten werden je nach Strategiewahl in DCAMnc 2D- oder 3D-Bahnen zum Laserauftragschweißen abgeleitet und als Steuerprogramm für CNC-Maschinen oder Roboter zur Verfügung gestellt.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Siegfried Scharek
Tel.: 0351 / 2583 244
siegfried.scharek@iws.fraunhofer.de



Eine besondere Herausforderung stellte die Bahnberechnung für die Verfahrenskombination LPA + PTA zur wirtschaftlichen Herstellung von 3D-Strukturen dar. Diese Technologie nutzt in oberflächennahen Bereichen die Präzision des LPA, das minimale Abweichungen von der originalen Bauteilgeometrie erlaubt (etwa 0,3 - 0,5 mm Übermaß) und somit den Nachbearbeitungsaufwand minimiert. Das bedeutend wirtschaftlichere PTA mit seinen höheren Auftragsraten kommt für das Füllen der innenliegenden Bereiche zum Einsatz. Durch spezielle Technologiemakros werden die Bauteile bezüglich ihrer geometrischen Struktur über mehrere Schichten vorausschauend betrachtet und daraus resultierend optimierte Bahnen zum LPA und PTA eines kompletten Bauteils generiert (Abb. 1, 2, und 4). Hierbei fließen Geometrie- und Prozessparameter ein, die in zahlreichen Versuchsreihen optimiert wurden und in Datenbanken zur Verfügung stehen.

Ein anderes Anwendungsbeispiel ist die Herstellung von Werkzeugen aus Blechlamellen (MELATO® - Metal Laminated Tooling). Hierbei werden mit DCAMnc wiederum ausgehend von 3D-CAD-Modellen alle NC-Programme vom Laserschneiden der Einzelbleche bis zum Laser-Verbindungsschweißen berechnet. Ausgangspunkt sind vom Slicegenerator erzeugte Schichten, die von einem Verschachtelungsmodul auf Rohbleche plaziert werden. Gleichzeitig werden die benötigten Schneid- sowie Signaturbahnen zur Verfügung gestellt, wobei letztere zur Identifikation der Bauteile während des Montageprozesses dienen (Abb. 5).

Für das Thermische Spritzen, Schweißen oder Auftragschweißen werden für viele Anwendungsgebiete bevorzugt Industrieroboter verwendet. Diese werden herkömmlich durch On-line-Teachen programmiert, was jedoch wesentliche Nachteile mit sich bringt. Hierzu zählt vor allem die verringerte Verfügbarkeit der Anlagen, da diese während des zeitaufwendigen Teachens nicht zur Produktion zur Verfügung stehen. Vor diesem Hintergrund kann nunmehr DCAMnc auch als komfortables off-line Programmiersystem verwendet werden. Für die 3D-Bearbeitung von Bauteilen (Abb. 6) werden die Bahnen zum Beschichten oder Schweißen erstellt und als direkt ausführbare Roboterprogramme ausgegeben. Für gute Beschichtungsergebnisse müssen dabei räumlich gleichmäßige Abstände der Einzelspuren auf 3D-Flächen sowie konstante Bahngeschwindigkeiten eingehalten werden, was DCAMnc ebenfalls gewährleistet.

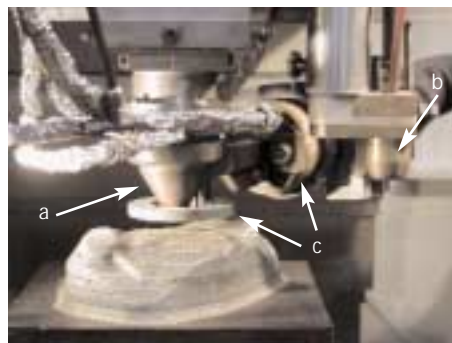


Abb. 4: Generativ aufgebauter Tiefziehstempel auf 3achs-CNC-Fräszentrum mit:
 a) Koaxial-Pulverdüse zum LPA
 b) Plasmabrenner
 c) Induktor zur zusätzlichen Wärme-führung



Abb. 5: Verteilung der Schnittebenen eines 3D-Modells auf eine 2D-Blechtafel und Ergebnis in Form eines aus Lammellen bestehenden Tiefziehwerkzeugs

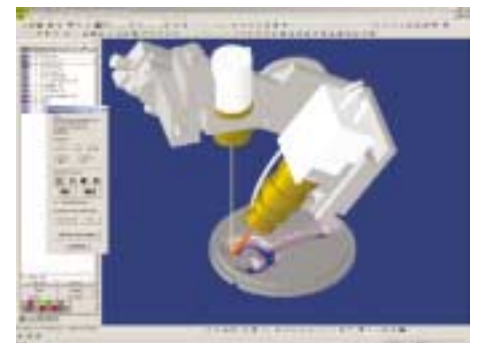


Abb. 6: Simulation einer Bahn zum Plasmaspritzen mit seitlich angeordnetem Bearbeitungskopf für Gelenkarmroboter

Präzisionsauftragschweißen mit laserbasierten, hybriden Fertigungsverfahren

Aufgabenstellung

Das Laserstrahl-Auftragschweißen hat sich in den letzten Jahren als hochpräzises Verfahren in der industriellen Fertigung etabliert. Die Anwendungsgebiete erstrecken sich vom Oberflächenschutz über Reparaturaufgaben bis hin zum direkten Generieren komplex geformter dreidimensionaler Strukturen. Die besondere Genauigkeit des Materialauftrags, die ausgezeichnete Steuerbarkeit des Prozesses und die geringe thermische und mechanische Belastung der Bauteile lassen die Lasertechnologie in wachsendem Maße zu einem Standardverfahren im Werkzeug- und Formenbau sowie in der Luft- und Raumfahrtindustrie werden. Allerdings sind die Auftragsraten gering und die Verfahrenskosten hoch, so daß eine Vielzahl potentieller Anwendungsgebiete allein aus Kostengründen unerschlossen bleibt. Vor diesem Hintergrund zielen innovative Verfahrensentwicklungen auf eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und eine Erweiterung der Verfahrensgrenzen.

Lösungsweg

Auf der Grundlage ausgereifter und kommerziell verfügbarer Systemtechnik stellt die Kombination des Laserstrahl-Auftragschweißens mit anderen Schweiß- und Erwärmungsmethoden

zu leistungsfähigen, hybriden Fertigungsverfahren eine besonders attraktive fertigungstechnische Lösungsvariante dar. Hybridverfahren ermöglichen die Verknüpfung von Vorteilen der Einzelverfahren sowie eine erhebliche Verkürzung von Fertigungszeiten und Verringerung der Verfahrenskosten. Der Integration von verschiedenen Teilprozessen und Verfahrensschritten in Werkzeugmaschinen kommt hierbei eine Schlüsselfunktion für die produktionstechnische Umsetzung der neuen Technologien zu.

Ergebnisse

Kombination von Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen

Die übliche Strategie des Reparierens und Generierens besteht in der Erzeugung von 3D-Strukturen durch spurweise Herstellung der filigranen und komplex geformten äußeren Kontur und Volumenfüllung durch einfache Füllspuren, Abb. 3. Hierbei erfordern die Konturspuren die höchste Präzision des Materialauftrags, und geringe Auftragsraten werden akzeptiert. Im Unterschied dazu ist für die Volumenfüllung eine weitaus geringere Präzision erforderlich, aber die Auftragsrate sollte hoch sein. Zur Kombination beider Zielgrößen, Präzision und Produktivität, ist die sequentielle Kombination von Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen eine attraktive technische Lösung. Abb. 1 zeigt den hierfür entwickelten Schweißaufbau in Form eines Laser-Bearbeitungskopfes mit Koaxialpulverdüse und einem 6 kW Plasmabrenner, integriert in ein Fräszentrum. Auf der Grundlage der geschlossenen CAD/CAM-Prozesskette erfolgt der Bauprozess entsprechend



Abb. 1: Schweißaufbau zum Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen: Laser-Bearbeitungskopf und Plasma-brenner an Z-Achse einer Fräsmaschine



Abb. 2: Anwendungsbeispiel: Spritzgußformeneinsatz aus Stellite 21, direkt generiert durch Laser- und Plasmaauftragschweißen, teilbearbeitet

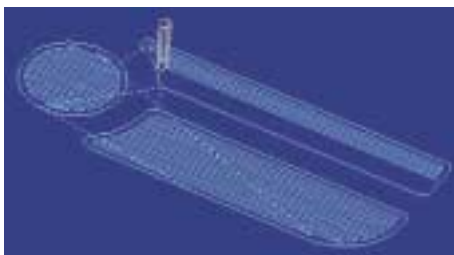


Abb. 3: Strategie des Laser-/Plasma-Volumenaufbaus durch Kombination von Kontur- und Füllspuren

Ansprechpartner

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



einer vordefinierten Baustrategie im Wechsel von Laser- und Plasmaauftragschweißen im automatischen, CNC-gesteuerten Betrieb. Ein Anwendungsbeispiel ist der in Abb. 2 gezeigte Spritzguß-Formeneinsatz aus der Kobalt-Hartlegierung STELLIT 21. Die Abmessungen betragen etwa 200 mm · 200 mm · 50 mm. Aufgrund der schlechten Zerspanbarkeit dieses Werkstoffs wurde vom Anwender ein möglichst geringes Bearbeitungsaufmaß von +0,3 bis +0,5 mm erwartet. Durch Kombination von Laser (1 kW) und Plasma (6 kW) konnten dieses erreicht und die Fertigungszeit von 70 Stunden (Laser) auf 12 Stunden reduziert werden.

Induktiv unterstütztes Laserstrahl-Auftragschweißen

Bei dieser einstufigen Hybridtechnologie wird ein definierter Anteil der Prozesswärme auf induktivem Wege besonders effizient zur Verfügung gestellt. Außerdem können die Aufheiz- und Abkühlvorgänge in wesentlich weiteren Grenzen geführt werden, als das beim Laserstrahl-Auftragschweißen allein möglich ist. Den Schweißaufbau für das induktiv unterstützte Auftragschweißen zeigt Abb. 4 am Beispiel des Panzers von Ventilringen für Chemieanlagen mit einer harten und rißempfindlichen NiCrBSi-Legierung. Die Zusatzenergie wird durch einen Induktionsgenerator mit einer Leistung von 15 kW bereitgestellt. Für das Auftragschweißen werden bei diesem Beispiel ein 3kW-Nd:YAG-Laser und eine Koaxial-Pulverdüse aus dem System COAXn verwendet. Für das Beschichten der Ventilringe konnten durch die Induktionsunterstützung die Fertigungszeit um etwa 80 % verringert und Rißfreiheit auch bei einer Schichthärte von 61 HRC garantiert werden. Bei dem in Abb. 5 gezeigten Schweißaufbau ist der Induktor konzentrisch zur Koax-Düse

angeordnet, wodurch vorteilhaft die Funktion des richtungsunabhängigen Schweißens aufrechterhalten wird. Laserspezifische Vorteile, wie geringe Grundwerkstoffanschmelzung, metallurgische Bindung zwischen Schicht und Substrat sowie hohe Präzision der aufgetragenen Schichten, bleiben in jedem Falle bestehen.

Systemintegration

Die zur produktionstechnischen Umsetzung der Hybridtechnologien erforderlichen Komponenten (Optiken, Brenner, Bearbeitungsköpfe, Sensoren...) stehen als kombinierbare Module zur Verfügung und werden üblicherweise in Werkzeugmaschinen integriert, die bei den industriellen Nutzern vorhanden sind. Abb. 6 zeigt beispielhaft eine solche Lösung in Form eines preiswerten 3achs-CNC-Fräszentrums. Diese Maschine ist mit der Bearbeitungsoptik eines 3 kW-Nd:YAG-Lasers, einem 6 kW-Plasmabrenner (PTA), verschiedenen Induktoren und Technik zur Prozeßüberwachung ausgerüstet. Die DCAM5-Software ist das Werkzeug für die 3D-CAD-Modellierung, Schweißstrategieberechnung und CNC-Programmierung. Indem sowohl die CNC-Programme für das Auftragschweißen wie auch für das Fräsen generiert werden, können vorteilhafterweise sowohl das Schweißen als auch das Endbearbeiten in einer Aufspannung und ohne zusätzlichen Aufwand für Programmierung und Justage erfolgen.



Abb. 4: Schweißaufbau zum induktiv unterstützten Laserstrahl-Auftragschweißen: Ring-Induktor und Koaxialpulverdüse am Beispiel eines Ventilrings



Abb. 5: Richtungsunabhängiges Auftragschweißen mit Induktor und Pulverdüse in konzentrischer Anordnung



Abb. 6: CNC-Fräszentrum als Beispiel für die Integration von Laser-, Plasma- und Induktionstechnik in Werkzeugmaschinen

Auftragschweißen von Titankarbid-Verbundpulvern

Aufgabenstellung

Das Fraunhofer IWS begleitet seit mehreren Jahren die Entwicklung von Verbund-Pulvern zum Thermischen Spritzen verschleißbeständiger Schichten durch das Fraunhofer IKTS. In den letzten Jahren wurden auf der Basis von TiC hochlegierte Beschichtungswerkstoffe entwickelt. Deren charakteristisches Merkmal ist das Auftreten zweier kubischer Hartstoffphasen mit Kern-Hülle-Struktur, eingebettet in einer metallischen Bindermatrix. Ziel der vorgestellten Arbeit war es, die Verarbeitbarkeit der Pulver durch Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen zu testen.

Lösungsweg

Das hier verwendete molybdänlegierte Titankarbid-Verbundpulver (Ti,Mo)C- bzw. (Ti,Mo)(C,N)-NiCo wird durch Agglomerieren und Sintern von feinkörnigen Titankarbidpartikeln (ca. 3 µm) mit einem Nickel/Kobaltbinder hergestellt. Das Pulver bietet gute Voraussetzungen für die Herstellung von Hartstoffschichten mit einem hohen Anteil an feinkörnigen homogen verteilten kubischen Hartstoffen. Auflösungsvorgänge führen nicht zu Phasenänderungen, wie z. B. in den Systemen WC-Co oder Cr₃C₂-NiCr, sondern zur Wiederausscheidung von kubischen Hartstoffphasen. Die Existenz von Molybdän in der Hartstoffphase der Hülle verbessert die Benetzung mit der metallischen Matrix, die Existenz von Stickstoff bewirkt besonders feinkörnige TiC-Ausscheidungen. Das Pulver wurde durch Laser- (LPA) und durch Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA) verarbeitet. Zur besseren Verarbeitbarkeit wurde in begrenztem Umfang Nickellegierungspulver zugegeben.

Ergebnisse

Durch LPA mit kontinuierlicher Pulverzufuhr werden Einzelspuren mit einer Breite von 3 bis 5 mm und einer Höhe von 0,5 bis 2 mm erzeugt. Durch PTA mit Pendelraupen sind Einzelspurbreiten von 20 mm und Schichthöhen von 4 mm möglich. Für großflächige Beschichtungen ist das PTA-Verfahren dem LPA vorzuziehen.

Einen Querschliff des beim Auftragschweißen von (TiMo)C-28NiCo mit einem zusätzlichen Binderanteil von ca. 15 % NiCrobor erzeugten Schichtgefüges zeigt Abb. 1. Die Schichten sind porenfrei und weisen eine fehlerfreie Bindung zum Substrat auf. In Abhängigkeit vom lokal realisierten Hartstoffanteil werden in den Schichten Härtewerte zwischen 500 und 850 HVO,3 gemessen.

Erstmals wurde das Schichtsystem bei der Beschichtung von Großmotorenventilen eingesetzt (Abb. 2). Darüber hinaus sind mit dieser Legierung beschichtete Bauteile aus der Chemieindustrie (Abb. 3) derzeit im Einsatz-test.

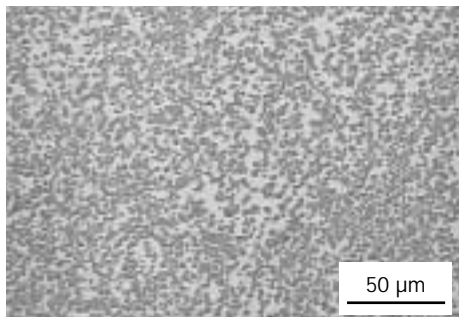


Abb. 1: Querschliff des durch PTA erzeugten Schichtgefüges (Werkstoff: (Ti,Mo)C-28NiCo + NiCrB 85:15)



Abb. 2: Beschichtung von Großmotorenventilen durch PTA



Abb. 3: Bauteile aus der Chemieindustrie mit Innenring aus (Ti,Mo)C-28NiCo + Inconel 625 70:30

Ansprechpartner

Dr. Anja Techel
Tel.: 0351 / 2583 255
anja.techel@iws.fraunhofer.de



Thermisch gespritzte Hartmetallschichten für höchste mechanische Belastungen

Aufgabenstellung

Zu den traditionellen Regeln des Einsatzes thermisch gespritzter Schichten gehört, dass diese nicht für Anwendungen mit Punktbelastungen und beim Auftreten hoher Hertz'scher Pressungen geeignet sind. Diese Anwendungsgrenzen sollen mit neuen Entwicklungen überwunden werden.

Lösungsweg

Durch die intensive Entwicklung des Hochgeschwindigkeitsflammspritzens (HVOF) in den letzten fünfzehn Jahren ist es gelungen, die Qualität thermisch gespritzter Hartmetallschichten wesentlich zu verbessern. Durch die relativ niedrigen Prozesstemperaturen wird der für die Eigenschaften wichtige Kohlenstoffhaushalt wenig beeinflusst, gleichzeitig wird durch die hohe kinetische Energie der Beschichtungspulverpartikel die Dichte der Schicht gegenüber anderen Verfahren wesentlich erhöht. Damit können Schichten gespritzt werden, deren Eigenschaften denen gesinterter Hartmetalle sehr nahe kommen und somit die traditionellen Regeln für den Einsatz thermisch gespritzter Schichten durchbrechen.

Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die einem gesinteren Hartmetall weitgehend entsprechende Mikrostruktur einer HVOF-gespritzten Hartmetallschicht der Zusammensetzung WC-17%Co. Die hell erscheinenden WC-Körner sind gleichmäßig in der Bindermatrix eingebettet. Schichten dieser Zusammensetzung weisen eine Härte von rund 1200 HV_{0,3} auf.

Nockenwellen gehören zu den mechanisch hoch belasteten Bauteilen, bei denen die Anwendung thermisch gespritzter Schichten vor rund zehn Jahren noch nicht denkbar war. Die oben genannte Zusammensetzung ist ein Beispiel für eine Auswahl von Hartmetallen, die innerhalb eines Verbundprojektes mit dem Fraunhofer IWU Chemnitz und der Fa. HTM, Chemnitz, als HVOF-gespritzte Schicht auf Innenhochdruck-umgeformten Bauteilen mit dem Ziel des Einsatzes auf Nockenwellen erfolgreich getestet wurden. In Abbildung 2 ist ein Teil einer Modellnockenwelle aus St 34 dargestellt, bei der die auf die vorgeformten Nocken aufgebraute Schicht geschliffen wurde. Mit diesen Untersuchungen wurde belegt, dass sich die Einsatzgrenzen thermisch gespritzter Hartmetallschichten durch geeignete Werkstoffe und moderne Spritztechnik erfolgreich erweitern lassen.

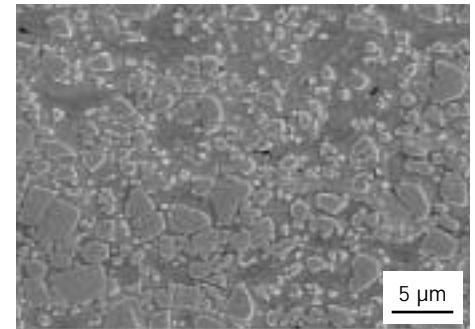


Abb. 1: Mikrostruktur einer HVOF-gespritzten Schicht der Zusammensetzung WC-17%Co



Abb. 2: Modellnockenwelle mit beschichteten und geschliffenen Nocken (Teilansicht)

Ansprechpartner

Dr. Lutz-Michael Berger
Tel.: 0351 / 2583 330
lutzmichael.berger@iws.fraunhofer.de

Thermisches Spritzen - vom Pulver zur Beschichtungslösung

Aufgabenstellung

Thermisch gespritzte Schichten finden bereits in vielen Bereichen der Technik eine breite Anwendung. Die Erschließung neuer Anwendungen erfordert die Weiterentwicklung bereits bekannter Werkstoffe, aber auch die Entwicklung vollständig neuer Beschichtungslösungen. Solche Entwicklungen umfassen alle Stadien der Prozesskette - Werkstoffforschung, Beschichtungspulver-Entwicklung, Weiterentwicklung der Spritztechnik, Prozesskontrolle, Schichtoptimierung und -charakterisierung, sowie die Erprobung in den Applikationen.

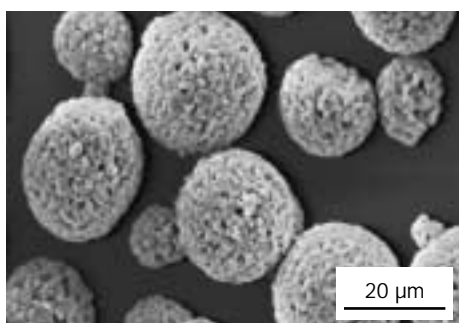


Abb. 1: Titansuboxid-Beschichtungspulver, agglomeriert und gesintert

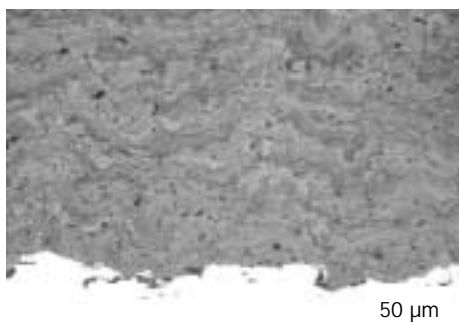


Abb. 2: Thermisch gespritzte Schicht, hergestellt mittels APS-Verfahren

Lösungsweg

Die enge Kooperation zwischen den Fraunhofer-Instituten IWS und IKTS - beide in unmittelbarer Nachbarschaft im Fraunhofer-Institutszentrum Dresden gelegen - beinhaltet die Entwicklung neuer thermisch gespritzter Beschichtungslösungen beginnend mit dem Pulver aus oxidischen und nichtoxidischen Werkstoffen, sowie Hartmetallen. Die im IWS bestehende Technik zum Plasmaspritzen in der Atmosphäre (APS) und im Vakuum (VPS) wird 2004 durch das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF) erweitert. Damit kann das gesamte Werkstoffspektrum mit den jeweils optimalen Technologien spritztechnisch verarbeitet werden. Die gleichzeitige Erweiterung der Beschichtungspulverherstellung im IKTS ermöglicht in verkürzten Zeiträumen auch Entwicklungen für größere Bauteile und Kleinstserien.

Ergebnisse

In den letzten Jahren wurden umfangreiche gemeinsame Entwicklungsarbeiten, zum Teil mit Partnern aus der Industrie, initiiert und durchgeführt. Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung von neuen Beschichtungslösungen mit Hartmetallen auf der Basis von (Ti,Mo)(C,N)-Ni(Co). Diese Werkstoffe sind charakterisiert durch die Existenz von Kern-Hülle-Strukturen der Hartstoffphasen, eingebettet in einer duktilen Bindermatrix aus Nickel und / oder Cobalt. Neben einer geringen Dichte zeichnet sich dieses Schichtsystem durch ein günstiges tribologisches Verhalten aus.

Ein weiterer Schwerpunkt der gemeinsamen Entwicklungen sind Schichten auf der Basis von Titansuboxiden, die durch ihre elektrische Leitfähigkeit, hohe chemische Korrosionsbeständigkeit, Festkörperschmierstoff- und photokatalytischen Eigenschaften, gekoppelt mit einer guten Verschleißbeständigkeit ein hohes Potential für eine Vielzahl von neuen Anwendungen besitzen. Abbildung 1 zeigt ein agglomeriert und gesintertes Titansuboxid-Beschichtungspulver; Abbildung 2 eine mittels atmosphärischem Plasmaspritzen (APS) aus diesem Pulver hergestellte Schicht. Eine neue Entwicklung sind oxidationsstabile Werkstoffe gleicher Struktur im System $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$.

Ansprechpartner

Fraunhofer IWS:
Dr. Lutz-Michael Berger
Tel.: 0351 / 2583 330
lutzmichael.berger@iws.fraunhofer.de

Fraunhofer IKTS:
Dr. Manfred Nebelung
Tel.: 0351 / 2553 540
manfred.nebelung@ikts.fraunhofer.de



Vakuumplasmaspritzen als formgebendes Fertigungsverfahren

Aufgabenstellung

Vakuumplasmaspritzen (VPS) ist vorrangig als Technologie zur Herstellung von Schichten für oxidationsanfällige Werkstoffe, wie z. B. Titan, bekannt. Damit sind die Möglichkeiten dieser Technologie aber noch nicht ausgeschöpft. So können auf einen später zu entfernenden Dorn über die übliche Beschichtungsdicke hinaus Deposite aufgetragen werden um auf diese Weise zu Formkörpern zu gelangen. Im Rahmen von Projekten wurden die Möglichkeiten dieser Technologie mit unterschiedlichen Werkstoffen getestet.

Lösungsweg

Die Formkörperherstellung wurde in der VPS-Spritzanlage des IWS durchgeführt (Abb. 1). Drehtisch und Roboterhandling der Spritzpistole in der Kammer erlauben die Herstellung von Formkörpern mit maximalen Abmessungen von 600 mm Durchmesser und 800 mm Höhe. Durch die langen Spritzzeiten bestehen bei der Herstellung dicker Deposite besonders hohe Anforderungen an die Konstanz des Spritzprozesses, die nur durch die Verwendung guter Pulverqualitäten sichergestellt werden kann. Hohe Aufmerksamkeit muss außerdem einer umfangreichen Prozesskontrolle, und dabei insbesondere der Regelung des Wärmeeintrags in den Formkörper beigegeben werden.

Ergebnisse

Der Prozess der Herstellung eines zylindrischen Werkstückes mit konischer Endung ist in Abb. 2 dargestellt. Bei niedrig schmelzenden metallischen Legierungen kommt es durch den Wärmeeintrag zur Verdichtung durch Sinterprozesse. Damit verbunden ist eine weitere Abnahme der für das Vakuumplasmaspritzen typischen geringen Porosität. Dies führt zur Verbesserung der Gefügestruktur und, in Folge dessen, zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften.

Durch dieses Verfahren können leicht entformbare rotationssymmetrische Bauteile oder flächige Geometrien ohne Hinterschnitte hergestellt werden. Gleichzeitig eignet es sich zur Herstellung von Multilayer-Formkörpern und gradierten Strukturen.



Abb. 1: VPS-Anlage

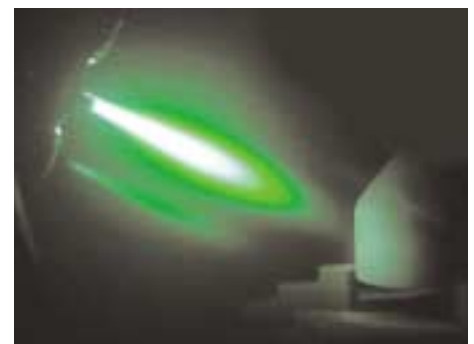


Abb. 2: Formgebendes Spritzen eines zylindrischen Werkstückes mit konischer Endung

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Tobias Naumann
Tel.: 0351 / 2583 338
tobias.naumann@iws.fraunhofer.de

Fortschritte beim laserunterstützten atmosphärischen Plasmaspritzen

Aufgabenstellung

Die Entwicklungen in der Automobilindustrie, in der Luft- und Raumfahrt, bei Schienenfahrzeugen, aber auch anderen Bereichen des Maschinenbaus sind durch verstärkten Bedarf nach Gewichtsreduzierung gekennzeichnet. Die Verringerung des Gewichtes darf sich aber nicht nachteilig auf die Bauteileigenschaften wie Festigkeit, tribologische Eigenschaften, Korrosionsfestigkeit etc. auswirken. Speziell in der Automobilindustrie nimmt der Leichtbau im Antriebsstrang seit Jahren eine zentrale Stelle ein. Durch die Senkung der Fahrzeugmasse soll eine höhere Wirtschaftlichkeit, Leistungsfähigkeit und Umweltverträglichkeit erzielt werden. Mit dem im IWS entwickelten Innenbeschichtungskopf sollten einige für den Verschleiß- und Korrosionsschutz interessante Werkstoffe hinsichtlich Ihrer Einsatztauglichkeit untersucht werden.

Lösungsweg

Motorenentwickler setzen heute auf Verbesserung des Verbrennungsprozesses, auf eine erhebliche Steigerung der spezifischen Leistung und auf den Leichtbau. Dies wird durch moderne und angepasste Konstruktionen erreicht, speziell im Motorenbau durch den Einsatz des Werkstoffes Aluminium. Ein Lösungsansatz ist die Fertigung des gesamten Motorblockes aus einer untereutektischen AISi-Legierung. Anschließend werden die beanspruchten Bereiche, wie zum Beispiel die Zylinderlaufflächen, modifiziert. Eine Lösungsmöglichkeit besteht in der Beschichtung mit einer übereutektischen AISi-Legierung. Mit dem im IWS entwickelten Innenbeschichtungskopf für das laserunterstützte atmosphärische Plasmaspritzen (LAAPS) wurden

Beschichtungsversuche an Zylinderlaufbuchsen durchgeführt. Der verwendete Beschichtungskopf ist in Abb. 1 zu sehen. Die spritztechnische Basis ist ein modifizierter Plasmabrenner vom Typ F1 mit einer Leistung von maximal 25 kW. Die Laseroptik wurde speziell für diesen Anwendungsfall entworfen und ist für eine maximale Nd:YAG-Laserleistung von 4 kW ausgelegt.

Ergebnisse

Mit dem neuen Innenspritzbrenner konnte die Zylinderlauffläche auf einer Länge von 120 mm beschichtet werden. In der Abb. 2 ist der Querschnitt durch eine beschichtete Zylinderlaufbuchse dargestellt. Im Makroschliff (Abb. 3) ist ein porenfreies und homogenes Gefüge über den gesamten Schichtbereich zu sehen. Die Beschichtung wurde einlagig ausgeführt und erreichte eine Schichtdicke von ca. 0,4 mm vor der Endbearbeitung. Die Prozessgeschwindigkeit bei dem hier vorgestellten Beispiel lag bei 4 m / min. Die beim LAAPS eingestellten Schichteigenschaften sind mit denen des Laser-Pulver-Auftragschweißens bzw. des Laserlegierens zu vergleichen. Wird beim Laser-Pulver-Auftragschweißen und beim Laserlegieren mit einer Spurbreite von 4 mm gearbeitet, erreicht man in Abhängigkeit von der Laserleistung eine max. Bearbeitungsgeschwindigkeit von 0,5 m / min bis 1,5 m / min. Beim LAAPS können dagegen Geschwindigkeiten von bis zu 8 m / min erreicht werden.



Abb. 1: An das Handhabungssystem montierter Hybrid-Innenbeschichtungskopf



Abb. 2: Zylinderlaufbuchsen, links LAAPS beschichtet (Schichtdicke 400 µm), rechts unbeschichtet

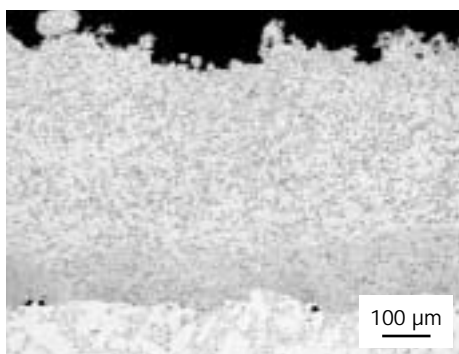
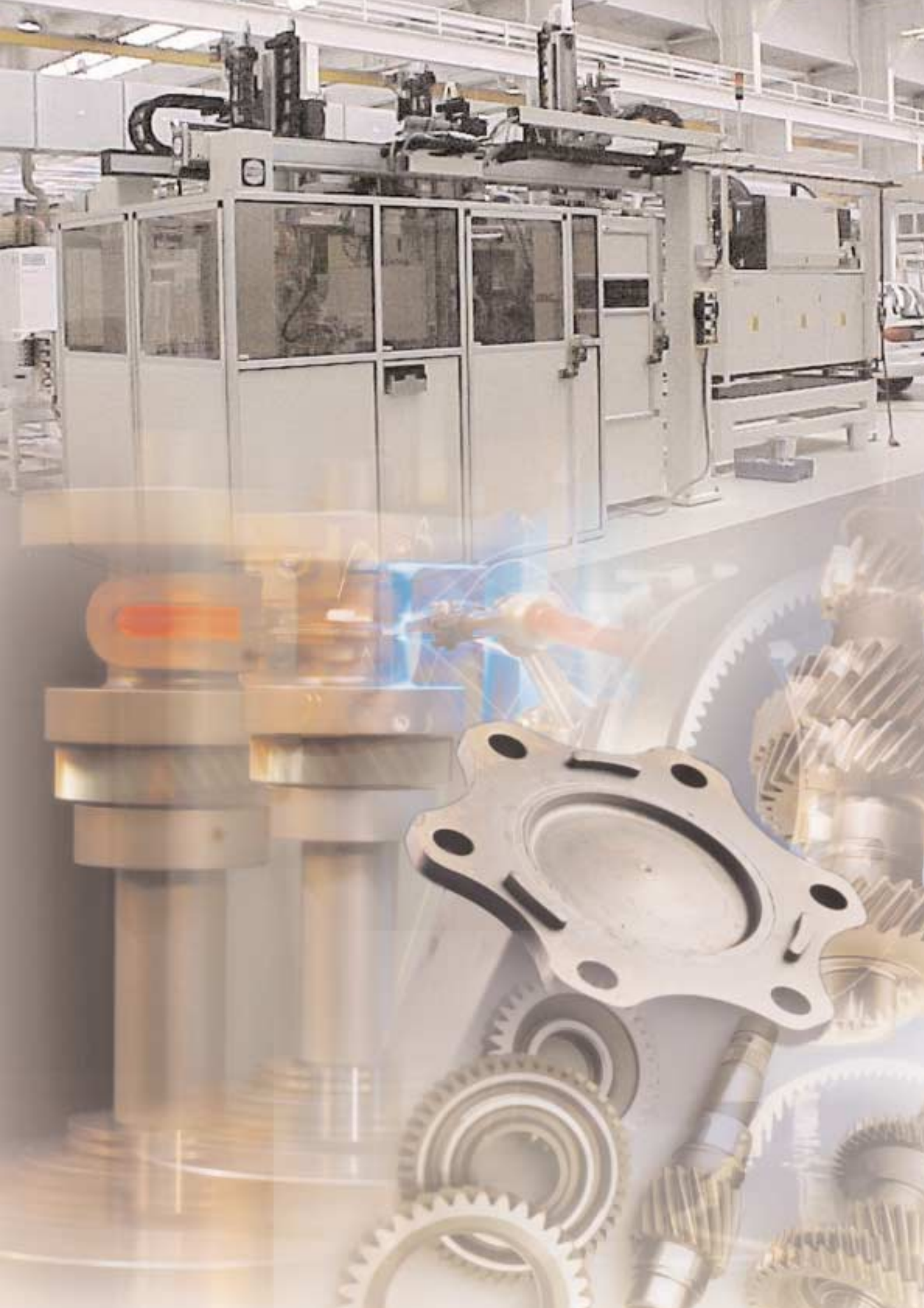


Abb. 3: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Querschliffes der LAAPS-gespritzten Zylinderlaufbuchse

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Roman Zieris
Tel.: 0351 / 2583 245
roman.zieris@iws.fraunhofer.de





FuE-Angebot: Füge- und Randschichttechnologien

Redaktion: Auch im vergangenen Jahr gelangen Ihren Mitarbeitern weitere erfolgreiche Überführungen von im IWS entwickelten Schweißtechnologien in die industrielle Großserienproduktion. Welchen Trend erkennen Sie darin?

Prof. Brenner: Wir bemerken insbesondere im Bereich PKW-Powertrain, dass der Trend zum Einsatz von hochfesteren, bisher mit dem "konventionellen" Laserstrahlschweißen nicht seriensicher schweißbaren Werkstoffen und der Drang zur Einsparung von Fertigungsschritten, wie z. B. dem Hartdrehen, nicht nur ungebrochen weitergeht, sondern durch erfolgreiche Überführungen weiter verstärkt wird. Um diesen Herausforderungen in Zukunft weiterhin gewachsen zu sein, haben wir uns neben der Weiterentwicklung des Laserinduktionsschweißens insbesondere darauf konzentriert, das Laserstrahlschweißen mit werkstoffangepassten Schweißzusatzwerkstoffen weiter zu entwickeln und für die Werkstoffkombinationen Gusseisen/Vergütungs- bzw. Einsatzstahl industrietauglich zu machen. Ein schöner Erfolg auf diesem Wege war die im vergangenen Jahr erfolgte Überführung einer Technologie zum Laserstrahlfügen von gusseisernen Ausgleichsgehäusen mit Zahnrädern für Differentialgetriebe bei ZF.

Die sehr positive und interessierte Resonanz der Industrie zeigt sich auch darin, dass wir derzeit für eine Reihe von weiteren Automobilherstellern bzw. für deren Zulieferer ähnliche Schweißtechnologieprojekte bearbeiten, die sicher in näherer Zukunft in weiteren Überführungen münden werden. Das Überführungsbeispiel ZF erwähne ich besonders gern, weil sich darin ein zweiter Trend widerspiegelt - das Drängen der Industrie nach komplexen Lösungen, die auch eine deutlich verbesserte Prozesssicherheit und

prozessintegrierte Qualitätsüberwachung garantieren. Diesem Trend konnten wir durch das abteilungsübergreifende Zusammenführen weiterer Kernkompetenzen des IWS und des Sondermaschinenherstellers Arnold begegnen, indem in die Anlage erstmalig eine Laserreinigung der Fügestelle und eine spektroskopische Überwachung der Nahtqualität integriert wurde.

Redaktion: LompocPro ist ein System aus der lasertronic®-Systemfamilie des IWS. Hier konnten im vergangenen Jahr 4 Systeme verkauft werden. Was lässt sich damit verbessern?

Prof. Brenner: Mit der im IWS Dresden entwickelten temperaturgeführten Laserleistungsregelung lasertronic® LompocPro können die Möglichkeiten des Laserstrahlhärtens optimal ausgeschöpft werden. Neben der extrem schnellen und sehr präzisen Temperaturregelung für eine optimale Temperaturführung auch an geometrisch komplizierten 3D-Bauteilen bietet das System eine Qualitätssicherungs- und -überwachungsfunktion. Durch letztere kann optional ständig überprüft und dokumentiert werden, ob der gesamte Prozess im Rahmen von definierten Grenzwerten dem ursprünglich eingestellten Verlauf entspricht.

Bereits in den letzten Jahren wurden mehrere Systeme in die industrielle Produktion überführt. Die 4 Überführungen im Jahr 2003 haben uns aber besonders gefreut, weil hier das System im direkten Vergleich mit anderen Lösungsvarianten am besten abschnitt und sich bei der Härtung von Teilen und Teilefamilien bewährt, deren jährliche Stückzahlen in die Millionen gehen.

Das Entscheidende am Wissen ist, dass man es beherzigt und anwendet.
Konfuzius



Prof. Berndt Brenner
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 207,
berndt.brenner@iws.fraunhofer.de)



Beispiele aus den Arbeiten 2003

1. Lasermodul zur integrierten Wärmebehandlung 80
2. Laserleistungsregelung "Lom-pocPro" garantiert reproduzierbare Härtungsergebnisse 81
3. Neuartiges Wärmebehandlungsverfahren verbessert Verschleißbeständigkeit ausscheidungs-härtbarer Stähle 82
4. Kerbempfindlichkeit von Laserstrahlschweißverbindungen aus Mg-Strangpressprofilen 83
5. Prozessintegriertes Anlassen erhöht Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter höchstfester Feibleche 84
6. Verbesserung der Schweißbarkeit schwefelhaltiger Vergütungsstähle durch Laserinduktionsschweißen 85
7. Erhöhte Dauerschwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch Laserstrahl-Hybridschweißen mit integrierter Wurzellagenschweißung 86
8. Laserstrahl-Hybridschweißen sichert hohe Belastbarkeit von Leichtbaukonstruktionen 87
9. Verbesserte Laserschweißbeignung durch neuartige Zink-Magnesium-Überzüge 88
10. Elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Schnellerstarrung in Aluminium-Legierungen 89
11. Strukturanalytische Charakterisierung von Laser-Mikrobohrungen 90
12. Laserstrukturierung erhöht Festigkeit von Metall-Keramik-Verbindungen 92



Dr. Steffen Bonß
Gruppenleiter Randschichtverfahren
(Tel. 2583 201,
steffen.bonss@iws.fraunhofer.de)

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. Das trifft insbesondere zu auf die selektive Härtung von Bauteilen mit mehrdimensional gekrümmten, innenliegenden oder schwer zugänglichen Flächen, Bohrungen oder Kerben sowie auf stark verzugsgefährdete Bauteile. Gestützt auf langjährige umfangreiche Erfahrungen, fachübergreifendes Know-how von der Analyse des Verschleißfalles bis zur optimalen technologischen Realisierung von Härteaufgaben bieten wir an:

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



Teil der Hauptantriebswelle einer Drehmaschine, gehärtet mit Hochleistungsdiodenlaser



Dr. Jens Standfuß
Gruppenleiter Schweißen
(Tel. 2583 212,
jens.standfuss@iws.fraunhofer.de)

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 allgemein guter Schweißbeignung verarbeitet. Einen neuen Zugang zur Herstellung rissfreier Schweißverbindungen aus härtbaren und hochfesten Stählen, Gusseisen, Al- und Sonderlegierungen sowie Bauteilen mit hoher Steifigkeit ermöglichen Laserstrahlschweißverfahren mit integrierter Kurzzeitwärmebehandlung sowie werkstoffangepassten Zusatzwerkstoffen. Auf der Basis eines umfangreichen metallphysikalischen und anlagentechnischen Hintergrundwissens bieten wir Ihnen an:

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



Laserstrahlschweißen eines Schaltrades für Pkw-Handschaltgetriebe, 16MnCr5 einsetzgehärtet



Dr. Bernd Winderlich
Gruppenleiter Werkstofftechnik /
Werkstoffcharakterisierung
(Tel. 2583 224,
bernd.winderlich@iws.fraunhofer.de)

Komplexe Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung

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

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



Schwingfestigkeitsprüfung von Laserhybridschweißverbindungen für den Stahlleichtbau



Lasermodul zur integrierten Wärmebehandlung



Abb. 1: Konstruktionsmodell, Vorderansicht Lasermodul ohne Verkleidung

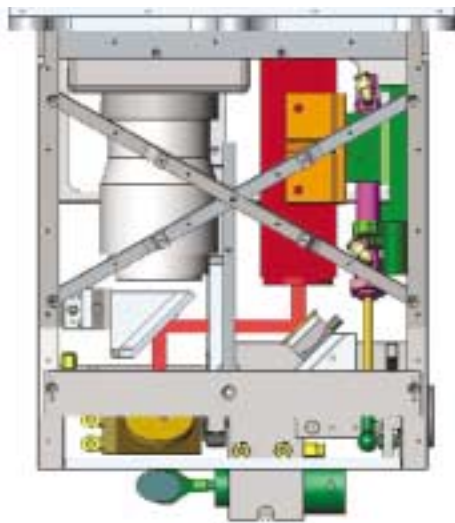


Abb. 2: Strahlformungsbaugruppe mit Pyrometerstrahlengang

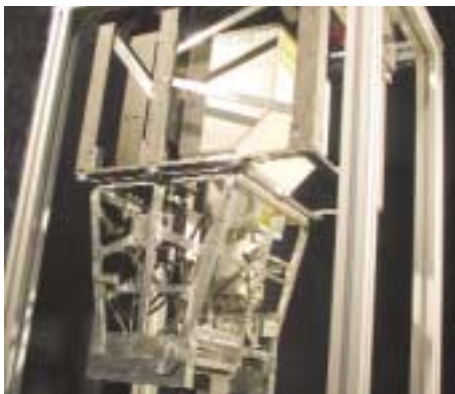


Abb. 3: Prototyp des Lasermoduls

Aufgabenstellung

Bisher werden Großwerkzeuge für die Karosserieherstellung vorwiegend mit klassischen Verfahren im Ofen wärmebehandelt, obwohl häufig nur bestimmte Kanten und Konturen im Einsatz verschleißbelastet sind. Von einigen Lohndienstleistern wird das Laserstrahlhärten bereits angewendet. Die in das gesamte Bauteil eingebrachte Wärme ist dabei sehr gering. Damit ist der nach dem Härten resultierende Verzug minimal. Aufwändige Nacharbeiten können reduziert werden oder sogar entfallen.

Besonders effizient wird das Laserstrahlhärten von Einzelstücken und Kleinserien jedoch, wenn man den Laser in die Bearbeitungsmaschine zur spanenden Fertigung integrieren kann. Man kann dann auf eine zusätzliche Laserhärteanlage verzichten. Weiterhin verkürzen sich Rüst- und Transportzeiten, wenn die Bauteile die Maschine oder gar den Produktionsstandort während der Bearbeitung nicht wechseln müssen.

Um dies zu ermöglichen, sollte ein universelles Wärmebehandlungsmodul entwickelt werden, welches in große Fräszentren als Werkzeug eingewechselt werden kann.

Lösungsweg

Die Basis des Lasermoduls ist eine Baureihe handelsüblicher Hochleistungsdiodenlaser von Rofin. Um universell auf die Anforderungen an die Härtezonengeometrie reagieren zu können, wird eine Brennweite von 300 mm

sowie, erstmalig für Hochleistungsdiodenlaser, eine Schwingspiegeloptik verwendet. Damit wird der wirksame Laserstrahl dynamisch auf die notwendige Breite aufgeweitet. Um den Strahlfleck immer optimal zur Bahnbewegungsrichtung auszurichten, wurde das Lasermodul mit einer Drehachse ausgerüstet, die in üblichen 5-Achs-Fräszentren als 6. Achse angesteuert werden kann. Die Schwingspiegeloptik ist um 90 Grad schwenkbar. Damit kann die Zugänglichkeit zu den zu härtenden Konturen besser ermöglicht werden.

Die Prozesskontrolle erfolgt mit dem adaptierten Laserleistungsregler "LompocPro". Zur Erfassung der Bauteiltemperatur im Laserspot wurde ein Pyrometer in das Lasermodul integriert. Die Medienversorgung des Moduls erfolgt über ein separates Schlauchpaket.

Ergebnisse

Der Prototyp des Lasermoduls wurde erstmals in ein 5-Achs-Fräszentrum erfolgreich integriert. Durch Bearbeitung von Musterteilen wurde die Funktionalität überprüft. Damit steht zukünftig ein vielseitig einsetzbares Härtemodul für Bearbeitungszentren zur Verfügung.

Ansprechpartner

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



Laserleistungsregelung "LompocPro" garantiert reproduzierbare Härtungsergebnisse

Aufgabenstellung

Die Regelung der Laserleistung beim Laserstrahlhärten ist eine wesentliche Voraussetzung für eine reproduzierbare und sichere Prozessführung. Eine zunehmende Zahl von Anwendern wünscht zudem eine Speicherung der relevanten Prozessdaten über gewisse Zeiträume als Mittel der Qualitätssicherung. Das Fraunhofer IWS hat zu diesem Zweck das sehr leistungsfähige System "LompocPro" (laser online monitoring power control program) entwickelt. Ein Pyrometer wird zur Messung der Bauteiloberflächentemperatur im Laserstrahlfleck verwendet. Die Regelung generiert den optimierten Laserleistungswert in Abhängigkeit von den eingestellten Regelparametern. Bisher benötigten Hard- und Software dieses Systems bei den bisher realisierten industriellen Anwendungen einen separaten PC. Die Aufgabe bestand darin, das System so weiterzuentwickeln, dass es in eine CNC-Maschinensteuerung direkt integriert werden kann.

Lösungsweg

Als Maschinensteuerung wurde eine Siemens Sinumerik 840D ausgewählt. Der Steuerungs-PC ist eine PCU 50 mit Pentium-II-Prozessor, Festplatte, ISA-Bus-Steckplatz und dem Betriebssystem Windows NT4.0. Als Bedientafel kommt ein OP010 zum Einsatz. Die Regelungshardware mit einem separaten Pentium-Prozessor und analogen sowie digitalen Ein- und Ausgabeschnittstellen benötigt einen ISA-Steckplatz. Die Kommunikation mit der CNC wird über ein Datenfile mit frei programmierbarem Befehlssatz gelöst. Über definierte Steuerbefehle können

vom CNC-Programm Aktionen des Regelsystems ausgelöst werden. Die Einbindung in die Bedienoberfläche der CNC erfolgt über ein eigenes Anwenderbild. Die Bedienoberfläche von "LompocPro" ist für den Einsatz von Touch-screens bzw. Mauseingabe optimiert. Im Automatikbetrieb sind allen Bedienfunktionen des "LompocPro" gesperrt und es wird ausschließlich vom CNC-Programm und in Abhängigkeit vom Inhalt hinterlegter Parameterfiles gesteuert.

Ergebnisse

Die Laserleistungsregelung kann durch die Verwendung eines separaten Prozessors unabhängig vom Takt des Steuerrechners arbeiten. Damit lassen sich minimale Zykluszeiten von ca. 30 μ s erreichen. Durch eine Vielzahl von Parametern kann das Regelverhalten optimal an die Laserbearbeitungsprozesse angepasst werden. In vielen Anwendungsfällen lässt sich eine Temperaturkonstanz von ca. ± 10 K realisieren. Beim Laserstrahlhärten können so auch in schwierigen Anwendungsfällen z. B. Anschmelzungen sicher verhindert werden. Durch eine frei dem Verlauf von Laserleistung und Temperatur anpassbare Überwachungsfunktion kann optional ständig überprüft werden, ob der Prozess dem ursprünglich optimierten Verlauf entspricht. "LompocPro" als steuerungsintegriertes System wird bereits bei drei industriellen Laserhärteanlagen erfolgreich eingesetzt (Bild 3).

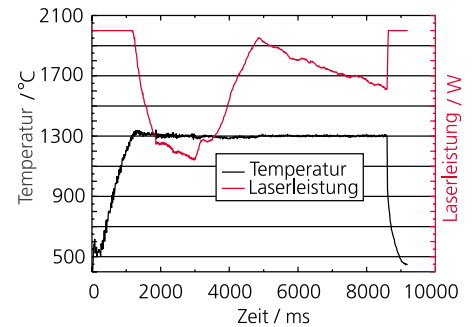


Abb. 1: Temperatur-Zeit- bzw. Laserleistungs-Zeit-Verlauf eines typischen, von "LompocPro" geregelten Härteprozesses



Abb. 2: Bedientafel OP010 einer Laserstrahlhärteanlage mit steuerungsintegriertem "LompocPro"



Abb. 3: Industrielle Laserstrahlhärteanlage des Herstellers EFD Induction GmbH Freiburg mit steuerungsintegriertem "LompocPro"

Ansprechpartner

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



Neuartiges Wärmebehandlungsverfahren verbessert Verschleißbeständigkeit ausscheidungshärtbarer Stähle

Aufgabenstellung

Ausscheidungshärtbare Cr-Ni-Stähle sind Vertreter einer Werkstoffklasse, die sich durch eine besonders günstige Kombination von Festigkeit und Zähigkeit auszeichnen. Sie werden für sehr hochbeanspruchte Bauteile in Luft- und Raumfahrt, in der Energieerzeugung und der chemischen Industrie eingesetzt.

Ihre günstigen Eigenschaften erhalten sie durch feine ausgeschiedene Kupferpartikel, die über eine Auslagerungsbehandlung bei relativ hohen Temperaturen (500 - 560 °C) entstehen. Bei diesen Auslagerungstemperaturen, die durch die Zähigkeitsanforderungen an das Bauteil bestimmt werden, sind jedoch Härte und Verschleißbeständigkeit relativ gering. Erschwerend kommt hinzu, dass konventionelle Randschichtveredlungsverfahren wie z. B. Randschichthärtungen, Einsatzhärtungen o. ä. nicht einsetzbar sind.

Lösungsweg

Zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit bei Beibehaltung der sehr günstigen Eigenschaften hinsichtlich einsinniger, zyklischer, schlagartiger oder Spannungsrissskorrosions-Belastung wurde eine neue Technologie [1] entwickelt: An den verschleißbeanspruchten Flächen eines Bauteiles wird eine lokale Randschicht-Laserlösungsglühung durchgeführt, bevor das gesamte Bauteil einer erneuten Auslagerungswärmebehandlung bei unkonventionell niedrigen Temperaturen unterworfen wird. Durch das lokale Laserlösungsglühen mit einer unüblich

hohen Lösungsglüh-temperatur und einer hohen Abschreckgeschwindigkeit entsteht ein stärker aufhärterbarer Gefügezustand.

Ergebnisse

Im Ergebnis der Behandlung entsteht eine harte, 0,3 bis 10 mm dicke Randschicht (s. Abb. 3) in einem in seinen übrigen mechanischen Eigenschaften nicht beeinflussten Bauteil. Die Härtesteigerung gegenüber dem Grundwerkstoff beträgt bis zu 150 HV (s. Abb. 1) und beruht auf zwei Effekten: Zum Einen wird durch die Kurzzeitlösungsglühung und nachfolgende Abschreckung ein Martensit mit vollständig in Lösung befindlichen Cu-Atomen erzeugt und zum Anderen ermöglichen die niedrigen Anlasstemperaturen feinstdisperse kohärente Cu-Ausscheidungen in hoher Anzahl. Mit dieser Behandlung lassen sich überzeugende Verbesserungen der Verschleißbeständigkeit bei kavitativer, erosiver, Tropfenschlag- oder Ermüdungsver-schleißbelastung erzielen. So kann z. B. bei kavitativer Belastung die Verschleißrate um den Faktor 3 verringert werden (s. Abb. 2).

Mögliche Anwendungen dieses neuen Verfahrens sind z. B. Landeklappenführungen oder Fahrwerksteile von Flugzeugen, Eintrittskanten von hochbelasteten Turbinenschaufeln, Bauteile von Hochleistungsmotoren oder aus dem chemischen Apparatebau.

[1] Patent DE 100 30 433 C2
"Verfahren zur Erzeugung verschleißbeständiger Randschichten an ausscheidungshärtbaren Werkstoffen"

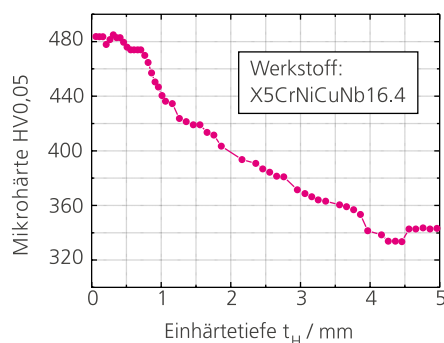


Abb. 1: Härte-Tiefen-Verlauf nach Laser-Randschicht-Lösungsglühung und Auslagerung

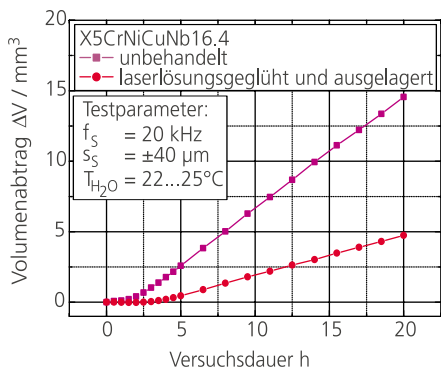


Abb. 2: Verbesserung des Kavitations-Verschleißverhaltens

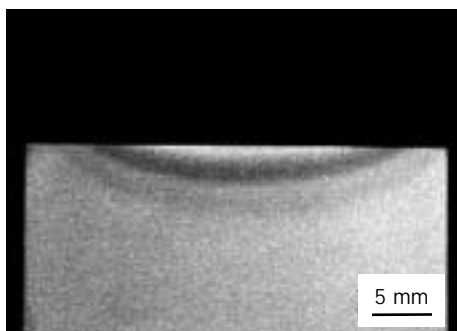


Abb. 3: Metallographischer Querschliff einer Härtezone im ausscheidungshärtbaren Stahl X5CrNiCuNb16.4

Ansprechpartner

Prof. Berndt Brenner
Tel.: 0351 / 2582 207
berndt.brenner@iws.fraunhofer.de



Kerbempfindlichkeit von Laserstrahlschweißverbindungen aus Mg-Strangpressprofilen

Aufgabenstellung

Magnesium eignet sich als leichtester metallischer Konstruktionswerkstoff sehr gut zum konsequenten Automobil-Leichtbau. Für stranggepresste Mg-Legierungen bietet deren hervorragende Schweißbarkeit dafür einen weiteren Vorteil. Ungeklärt ist, ob und in welchem Maße die durch die hexagonale Gitterstruktur des Magnesiums eingeschränkte Umformbarkeit bei Raumtemperatur auch andere mechanische Eigenschaften der Schweißverbindungen nachteilig beeinflusst. Von besonderem Interesse sind schwingend belastete Baugruppen im Automobil. Ziel war es deshalb, die Kerbwirkung, welche unter schwingender Belastung von Laserstrahlschweißnähten der stranggepressten Mg-Legierung AZ 31 ausgeht, experimentell zu ermitteln und einer Bewertung zu unterziehen.

Lösungsweg

Die Schweißverbindungen wurden mit einem diodengepumpten Nd:YAG-Laser unter Zugabe des Schutzgases Helium als I-Nähte hergestellt. Zur Ermittlung der Kerbwirkungszahl des Schweißgutes wurden sowohl Proben mit einer beidseitig abgeschliffenen Schweißnaht als auch Proben mit einer in das überschlifene Schweißgut eingebrachten Bohrung der Kerbformzahl $\alpha_k = 2,3$ (Abb. 1) im Wöhlerversuch unter Biegewechselbelastung ($R = -1$) mit einer Frequenz von 50 Hz bis zu $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen geprüft. Der Einfluss von tatsächlich an der Schweißnaht auftretenden Kerben wurde an unbearbeiteten Schweißnähten mit und ohne Schweißzusatzwerkstoff getestet.

Ergebnisse

An den Schweißnähten wurden die Härteverteilung und die Gefügeausbildung untersucht. Eine typische Wärmeinflusszone mit Unterschieden im Gefüge gegenüber dem Grundwerkstoff wurde nicht beobachtet. Die Härteverteilung quer zur Naht zeigte einen konstanten Verlauf auf dem Niveau des Grundwerkstoffes. Der Einfluss der Kerben im überschlifenen Schweißgut bzw. am Nahtübergang und an der Wurzel der unbearbeiteten Schweißnähte auf die Schwingfestigkeit ist in Abb. 2 dargestellt. Das Verhältnis der Dauerfestigkeit ($N = 2 \cdot 10^6$) des überschlifenen ungekerbten Schweißgutes zur Dauerfestigkeit des definiert gekerbten Schweißgutes ($\alpha_k = 2,3$) ergibt die Kerbwirkungszahl $\beta_k = 1,4$. Dies bedeutet, dass die Kerbempfindlichkeit des Schweißgutes $\eta_k = (1 - \beta_k) / (1 - \alpha_k) = 0,3$ sehr gering ist. Für die ohne Zusatzwerkstoff geschweißte Naht wurde $\beta_k = 1,8$ und für die mit Zusatzwerkstoff geschweißte $\beta_k = 2,2$ ermittelt. Daraus lässt sich schließen, dass die Randkerben der beiden Nahtvarianten bei vergleichbarer Kerbempfindlichkeit Kerbformzahlen α_k deutlich höher als 2,3 aufweisen. Im Querschliff (Abb. 3) sind die Anrisse und der Bruchverlauf, beginnend von den Randkerben, durch den Grundwerkstoff hindurch, aufgezeigt.

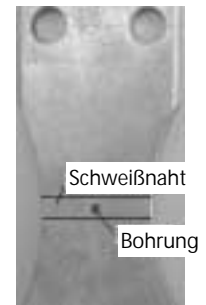


Abb. 1: Im Schweißgut gekerbte Dauerschwingprobe aus Magnesium AZ 31 (Nennquerschnitt 20 x 4 mm²)

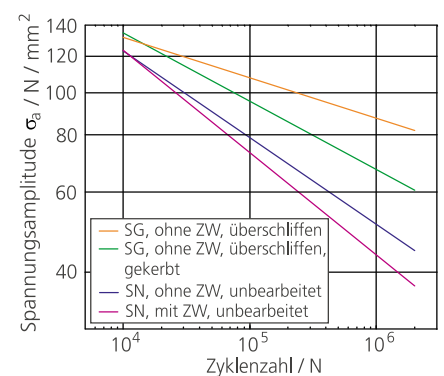


Abb. 2: Wöhlerschaubild - stranggepresste Magnesiumlegierung AZ 31 (SG - Schweißgut, SN - Schweißnaht, ZW - Schweißzusatzwerkstoff)

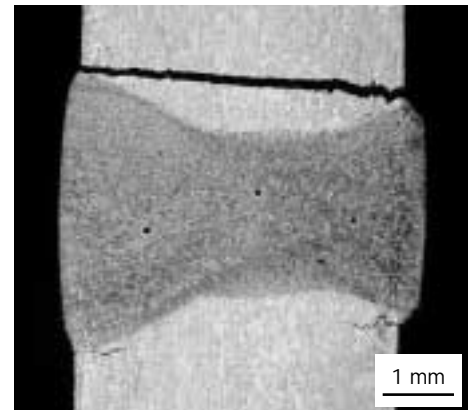


Abb. 3: Querschliff - Anrisse an einer unbearbeiteten Schweißnaht, ausgehend von Einbrandkerben

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Dirk Dittrich
Tel.: 0351 / 2583 228
dirk.dittrich@iws.fraunhofer.de



Prozessintegriertes Anlassen erhöht Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter höchstfester Feibleche

Aufgabenstellung

Die Umsetzung von Leichtbaukonzepten im Karosseriebau erfordert den zunehmenden Einsatz von höherfesten Feiblechen. Die dazu zur Anwendung kommenden Dual- oder Mehrphasenstähle weisen ein sehr feinkörniges Gemisch verschiedener Phasen auf, das bei einer erhöhten Festigkeit sehr gute Umformbarkeit gestattet. Beim Schmelzschweißen kommt es infolge der Legierungselementgehalte in Kombination mit höheren Kohlenstoffgehalten zu einer unzulässigen Aufhärtung, die die Umformbarkeit und Zähigkeit geschweißter Feibleche drastisch verschlechtert. Deshalb soll ein Verfahren entwickelt werden, mit dem es gelingt, ohne Verlust der Vorteile des Laserschweißens die Aufhärtung der Schweißnaht prozessintegriert abzusenken.

Lösungsweg

Eine elegante Methode zur Erreichung der Zielstellung stellt die prozessintegrierte induktive Kurzzeit-Wärmebehandlung dar. Dazu wird ein speziell gestalteter Induktor dem Laserstrahl mit gleicher Geschwindigkeit nachgeführt (Abb. 3). Über die Wahl der Schweiß- und Wärmebehandlungsparameter sowie ihre zeitliche Abfolge sind werkstoffspezifische Temperatur-Zeit-Regime realisierbar. Dadurch können das Gefüge und damit die lokalen Eigenschaften im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone entsprechend der Beanspruchung verändert werden.

Ergebnisse

Für die Dualphasenstähle DP-K30/50 und DP-K34/60 sowie den Restaustenitstahl RA-K40/70 wurden für die Blechdicken 0,6 mm und 1,5 mm Parametersätze zur Verbesserung der Verformungseigenschaften der Verbindung entwickelt. Insbesondere wurde der Einfluss von Nachwärmtemperatur und -dauer sowie der Abstand zwischen Lasereinwirkung und Beginn der induktiven Erwärmung bei Schweißgeschwindigkeiten bis 12 m min^{-1} untersucht. Im komplexen Parameterfeld wurde ein Optimum ermittelt, in dem, bei akzeptabler Schädigung der Zinkschicht, die Härte minimiert wird. Induktionsgeschweißte Nähte erreichen so im Erichsenversuch bis zu 84 % des Tiefungswertes des unbeeinflussten Grundwerkstoffes (Abb. 1 und Abb. 2). Damit steht ein Verfahren zur Verfügung, das das Verschweißen höchstfester Feibleche vor dem fertigungstechnischen Umformen (Tailored Blanks) als auch das Fügen bereits verformter Strukturen (crashrelevante Bereiche) vorteilhaft ermöglicht.

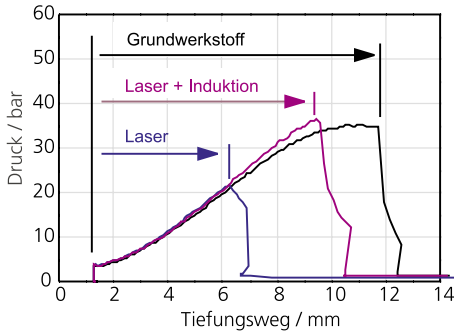


Abb. 1: Vergleich der Verformungskurven von laser- bzw. laserinduktionsgeschweißten Proben im Vergleich zum Grundwerkstoff

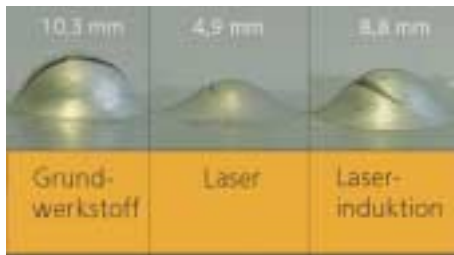


Abb. 2: Vergleich der Verformungskörper beim Erichsenversuch



Abb. 3: Versuchsanordnung zum Laserstrahl-schweißen mit induktiver Nachwärmung

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Axel Jahn
Tel.: 0351 / 2583 237
axel.jahn@iws.fraunhofer.de



Verbesserung der Schweißbarkeit schwefelhaltiger Vergütungsstähle durch Laserinduktionsschweißen

Aufgabenstellung

Zur Erhöhung der Produktivität ist in der Industrie neben der Verbesserung der eingesetzten Verfahren auch ein deutlicher Trend zum Einsatz von Materialien zu beobachten, die eine einfachere und schnellere Verarbeitung zulassen. Diese Entwicklung ist auch bei den Vergütungsstählen zu beobachten, die für eine verbesserte Zerspanbarkeit mit einem gezielt eingestellten erhöhten Schwefelgehalt hergestellt werden. Dadurch sinkt jedoch die Schweißbarkeit: mit zunehmendem Schwefelgehalt steigt die Heißrisanfälligkeit rapide an. Dieses Phänomen, das durch niedrigschmelzende Phasen im Schweißgut verursacht wird, ist ein bisher nur ungenügend gelöstes Problem. Bisherige Ansätze beschränken sich zumeist darauf, das Problem durch nicht primär ursachenbezogene Maßnahmen (z. B. Optimierung der Schweißparameter) zu lösen. Gesucht wird daher ein Verfahrensansatz, der es gestattet, ursachenbezogen die Schweißbarkeit sicherzustellen.

Lösungsweg

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass durch induktive Vorwärmung bei nicht aufhärtenden heißrisanfälligen Werkstoffen, wie z. B. Automatenstählen mit geringem Kohlenstoffgehalt, eine Verbesserung der Schweißbarkeit erreicht werden kann (s. Jahresbericht 2001, S. 64 - 65). Dieser Ansatz kann jedoch nicht direkt auf Vergütungsstähle übertragen werden, da diese aufgrund des höheren Kohlenstoffgehaltes zusätzlich kaltrissanfällig sind. Um beide Probleme gleichzeitig zu lösen, soll daher ein Laserstrahlschweißverfahren entwickelt werden, bei dem durch prozessparallele Erwärmung mittels eines mitbewegten Induktors (Abb. 1) das Temperaturfeld im Bauteil gezielt verändert werden kann.

Ergebnisse

Die Untersuchungen wurden hauptsächlich an C45 und C35 durchgeführt, Werkstoffe, die in der industriellen Anwendung zu den am meisten verwendeten Vergütungsstählen gehören. Daher sind sie auch in verschiedenen Schwefelgehalten am Markt vertreten, was somit eine fundierte Untersuchung der Heißrisproblematik bei Vergütungsstählen möglich macht. Mit der beschriebenen prozessparallelen Erwärmung konnte gezeigt werden, dass für typische Laserstrahlschweißparameter heiß- und kaltrissfreie Nähte auch im Dickblechbereich selbst bei Schwefelgehalten von über 0,2 % erzeugt werden können (s. Abb. 2).

Eine Anwendung dieser Technologie ist grundsätzlich auch bei anderen heißrisanfälligen Werkstoffen denkbar, wie z.B. austenitischen oder etwa Aluminiumlegierungen.



Abb. 1: Laserstrahlschweißkopf mit mitlaufendem Doppel-Linien-Induktor zur Beeinflussung des Temperaturfeldes

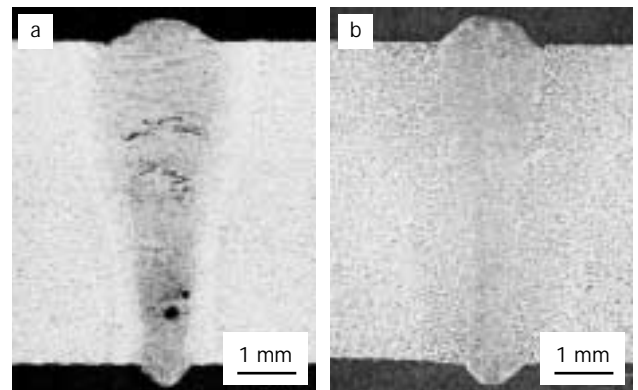


Abb. 2: Querschliff von Laserstrahlschweißnähten aus dem Werkstoff 35S20 (C=0,34%, S=0,208%, Mn=0,83%), Blechdicke: 6 mm, Schweißgeschwindigkeit: 1,5 m / min
 a) normale Laserstrahlschweißnaht: Vielzahl von querliegenden Heißrisen infolge Schrumpfdehnungen senkrecht zur Blechebene
 b) Laserstrahlschweißen mit überlagerter induktiver Wärme-führung: heißrisfreie Nahtausbildung

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Gunther Göbel
 Tel.: 0351 / 2583 211
 gunther.goebel@iws.fraunhofer.de



Erhöhte Dauerschwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch Laserstrahl-Hybridschweißen mit integrierter Wurzellagenschweißung

Aufgabenstellung

Der Einsatz des konventionellen Laserstrahlschweißens in Stahlkonstruktionen gelangt im Hinblick auf deren zyklische Belastbarkeit infolge der beschränkten Möglichkeiten zur Beeinflussung der äußeren Nahtgeometrie, insbesondere der Nahtwurzel, oft an seine Grenzen.

Ziel der Untersuchungen war es, durch Kombination des Laserstrahlschweißens mit einem herkömmlichen Lichtbogenschweißverfahren eine für schwingende Belastung optimale, beanspruchungsgerechte Nahtgeometrie zu erzeugen und die Verbesserung der Dauerschwingfestigkeit experimentell nachzuweisen.

Lösungsweg

Für die zu lösende Aufgabe wurde das Laserstrahlschweißen mit dem Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) kombiniert. Der erhöhte Freiheitsgrad in den Prozessparametern wurde dabei für die Beeinflussung der Nahtgeometrie genutzt. Neben einem 3 kW-CO₂-Laser und einem WIG-Brenner an der Nahtoberseite wurde auch wurzelseitig ein WIG-Brenner in den Prozess eingekoppelt (Abb. 1).

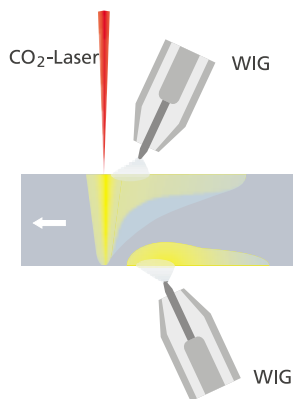


Abb. 1: Laserstrahl-Hybridschweißen (CO₂-Laser + WIG) mit integrierter Wurzellagenschweißung

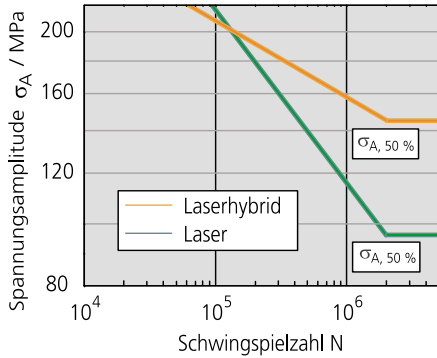


Abb. 2: Wöhlerschaubild ($\sigma_{A, 50\%}$ - Dauerfestigkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit 50 %)

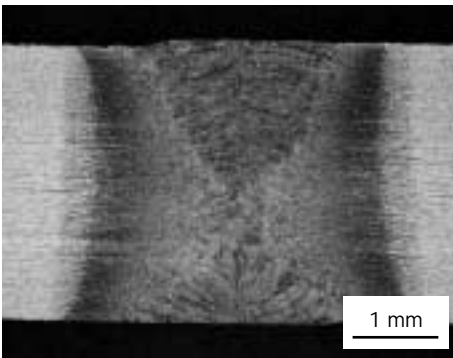


Abb. 3: Laserstrahl-Hybridschweißnaht

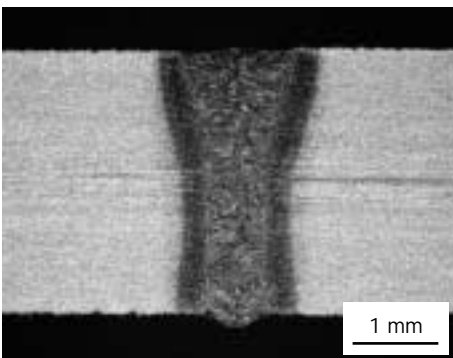


Abb. 4: Laserstrahlschweißnaht

Ansprechpartner

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

Die Schweißungen erfolgten am I-Stoß 3 mm dicker Bleche aus dem Feinkornbaustahl P 355 NL1 bei einer Schweißgeschwindigkeit von 2,0 m / min. Zum Vergleich wurden auch Proben konventionell mit einem 3kW-Nd:YAG-Laser und einer Geschwindigkeit von 2,8 m / min geschweißt.

Die Schweißverbindungen wurden im Wöhlerstest unter Zugschwellbelastung bis zu einer Grenzlastspielzahl $N_G = 2 \cdot 10^6$ geprüft.

Ergebnisse

Durch die in den Hybridschweißprozess integrierte Wurzellagenschweißung ist es gelungen, eine nahezu kerbfreie Schweißnaht zu erzeugen (Abb. 3). Der Vorteil gegenüber dem konventionellen Laserstrahlschweißen (Abb. 4) wird besonders in der Ausbildung der Nahtwurzel sichtbar.

Die Verbesserung der Schweißnahtqualität führte zu einer um mehr als 50 % höheren Dauerfestigkeit der Hybridschweißverbindung im Vergleich zum konventionellen Laserstrahlschweißen (Abb. 2).

Damit im Einklang steht auch das Versagensverhalten. Während die konventionellen Laserstrahlschweißverbindungen alle an der Nahtwurzel zu Bruch gingen, starteten die Ermüdungsbrüche der Hybridschweißverbindungen bei Belastungen im Bereich der Dauerfestigkeit von der Nahtoberseite am Übergang vom Schweißgut zum Grundwerkstoff. Bei höheren Spannungsamplituden versagte überwiegend der Grundwerkstoff. Dies bedeutet, dass im Zeitfestigkeitsgebiet die Schwingfestigkeit der Laserstrahl-Hybridschweißverbindungen der Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffes entspricht und nicht mehr durch die Schweißnaht beeinträchtigt wird.



Laserstrahl-Hybridschweißen sichert hohe Belastbarkeit von Leichtbaukonstruktionen

Aufgabenstellung

Leichtbaukonzepte im Stahlbau, insbesondere für schwingend beanspruchte Komponenten mobiler Krane und Betonpumpen, sind nur durch Einsatz höchstfester schweißbarer Stähle realisierbar. Untrennbar verknüpft mit ihrer schweißtechnischen Beherrschung ist die Gewährleistung einer hohen mechanischen Belastbarkeit der Schweißverbindungen. Von besonderem Interesse sind Schwingfestigkeit und Zähigkeit, welche durch das Schweißen gegenläufig beeinflusst werden.

Ziel war es, zu untersuchen ob Schweißverbindungen des Stahles S 1100 QL, welche mit einem im IWS entwickelten Nd:YAG-Laser-MIG-Hybridschweißverfahren hergestellt wurden, für den Einsatz in schwingend hochbelasteten Stahlbaukomponenten geeignet sind.

Lösungsweg

Eine wichtige Zielgröße für die Eigenschaftsoptimierung ist die Eindämmung des Härteeinbruchs in der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht. Der Laser-Hybridschweißprozess bietet dazu beste Voraussetzungen.

Aus im Stumpfstoß verschweißten 6 mm dicken Blechen des Stahles S 1100 QL wurden quer zur Schweißnaht 25 mm breite Zug- und Ermüdungsproben entnommen. Da es in der Praxis durchaus üblich ist, zyklisch hochbelastete Schweißnähte zu überschleifen, wurden auch die geschweißten Ermüdungsproben blecheben abgearbeitet. Die Proben wurden im

Wöhlersversuch unter Zugschwellbelastung mit einer Grenzschiwingspielzahl $N_G = 2 \cdot 10^6$ geprüft.

Für die Kerbschlagbiegeprüfung wurden ISO-V 5,0-Proben mit Kerblage senkrecht zur Blechoberfläche und Orientierung der Rissebene in der Schweißgutmitte sowie im Härteminimum und -maximum der Wärmeeinflusszone verwendet.

Ergebnisse

Der in der Laser-Hybridschweißnaht beobachtete Härteabfall (Abb. 1) ist im Vergleich mit handgeführten MSG-Schweißverfahren geringer und auf ein schmaleres Gebiet begrenzt.

Die Festigkeitskennwerte des Zugversuches erreichen über 90 % der Festigkeit des Grundwerkstoffes.

Eine konservative Abschätzung der Dauerfestigkeit der überschleiften Naht ergibt einen Wert von 226 MPa (Abb. 2), welcher etwa 15 % über dem des mit einer Walzhaut behafteten Grundwerkstoffes liegt. Während im Dauerfestigkeitsgebiet der Ermüdungsbruch von Poren im Schweißgut ausgeht, versagt im Zeitfestigkeitsgebiet auch der Grundwerkstoff fernab von der Naht.

Die Kerbschlagzähigkeitswerte (Abb. 3) liegen für alle Kerblagen und Prüftemperaturen höher als die für den Grundwerkstoff angegebene Mindestzähigkeit bei -40°C .

Das Laser-MIG-Hybridschweißverfahren ist somit in der Lage, prozesssicher zyklisch hochbelastbare Schweißverbindungen aus hoch- und höchstfesten Feinkornbaustählen herzustellen. Durch Verringerung des Porengehaltes im Schweißgut können weitere Reserven erschlossen werden.

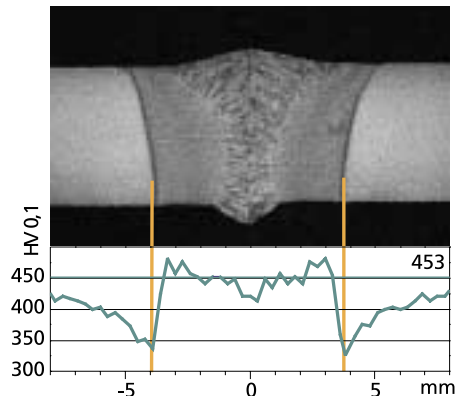


Abb. 1: Laserstrahl-Hybridschweißnaht Querschliff und Härteverteilung (Laserleistung 4 kW, Schweißgeschwindigkeit 1,4 m / min, Spaltmaß 0,5 mm)

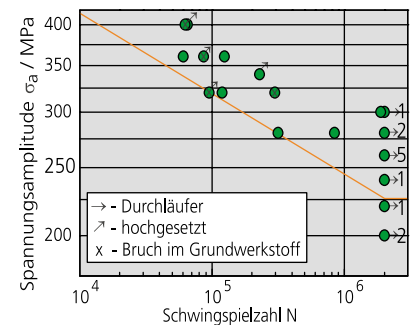


Abb. 2: Laserstrahl-Hybridschweißverbindung Wöhlerschaubild (Naht überschleifen)

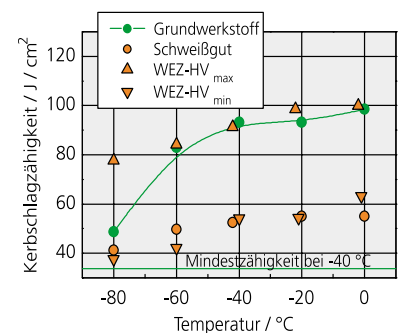


Abb. 3: Laserstrahl-Hybridschweißverbindung Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur (Mindestzähigkeit bei -40°C entspricht Schlagarbeit 27 J für ISO-V-Standardprobe)

Ansprechpartner

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



Verbesserte Laserschweißbeignung durch neuartige Zink-Magnesium-Überzüge

Aufgabenstellung

Das prozesssichere Laserstrahl-schweißen verzinkter Bleche im Überlappstoß ist eine zentrale Herausforderung bei der Umsetzung von modernen Karosseriefertigungskonzepten. Wegen der geringen Verdampfungstemperatur des Zinks bildet sich bei Fügespalten $< 0,05$ mm ein sehr hoher Dampfdruck aus, der zu einem massiven Auftreten von Auswurfkratern bzw. durchgehenden Löchern führt (s. Abb. 1). Andererseits ist in der Fertigung nicht nur ein minimaler Spalt einzuhalten, sondern Fügespalte $> 0,25$ mm führen zu starkem Nahteinfall bzw. Wurzelrückfall. Im Extremfall kommt keine Schweißverbindung zustande. Die Einhaltung eines definierten Fügespalt an umgeformten Karosserieteilen bzw. die Erkennung und Beseitigung von Schweißfehlern erfordert daher einen hohen Aufwand. Ziel muss es sein, auch bei einem Fügespalt von Null ausreichende Schweißnahtgüten zu erzielen.



Abb. 1: Nahtoberraupe einer Laserschweißnaht im Überlappstoß (Überzug ZE 75/75, Nullspalt)

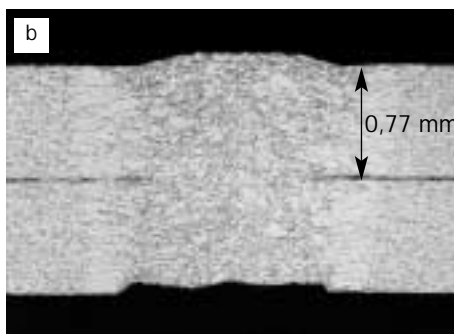
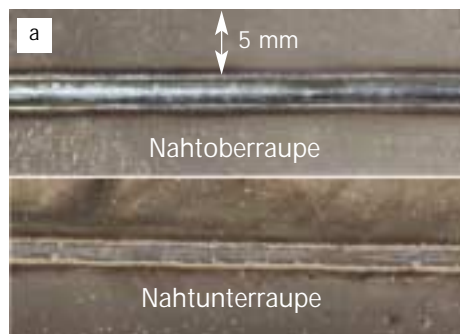


Abb. 2: Laserschweißnaht im Überlappstoß an Feinblech mit neuartigem Zink-Magnesium-Korrosionsschutz (Überzug ZE-Mg 35/35, Nullspalt)
 a) Draufsicht auf Nahtober- und -unterraupe
 b) Nahtquerschliff

Lösungsweg

Grundsätzlich kann eine Schweißung verzinkter Bleche mit Nullspalt nur erfolgreich sein, wenn das verdampfende Zink durch die beim Laserschweißen entstehende Dampfkapillare entgasen kann. Um dies produktions-sicher zu beherrschen, reichte bisher keines der entwickelten Verfahren aus. Im Dortmunder Oberflächen-Centrum von ThyssenKrupp Stahl wurden daher mit Unterstützung des IWS neuartige Zink-Magnesium Überzüge (ZE-Mg 35/35) entwickelt, bei denen bei vergleichbarem Korrosionsschutz die Überzugdicke halbiert werden kann. Hierdurch wird die Menge des verdampfenden Zinks soweit reduziert, dass die Laserschweißbeignung bei praxistypischen Parameterfenstern möglich ist.

Ergebnisse

Bei Nachbildung anwendungstypischer Blechdicken und Versuchsbedingungen (Nd:YAG-Laser, Laserleistung 4 kW, technischer Nullspalt) konnten Parameterfenster ermittelt werden, bei denen sich reproduzierbar nahezu auswurfkraterfreie Dichtnähte erzeugen lassen (s. Abb. 2). Durchgehende Löcher werden vollständig vermieden. Lediglich ein geringer Porenanteil lässt sich nicht vollständig vermeiden. Untersuchungen zur zyklischen Belastung der Schweißverbindungen zeigen eine höhere Zeitfestigkeit von mit technischem Nullspalt geschweißten Proben mit ZE-Mg Überzug gegenüber mit definiertem Fügespalt hergestellten Proben. Neuartige ZE-Mg Überzüge bieten daher nicht nur die Perspektive Schweißfehler und damit die notwendige Nacharbeit bzw. Versiegelung zu vermindern, sondern auch neue konstruktive Möglichkeiten für den Leichtbau.

Ansprechpartner

Dr. Axel Zwick
 Tel.: 0231 / 844 3512
 axel.zwick@iws.fraunhofer.de



Elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Schnellerstarrung in Aluminium-Legierungen

Aufgabenstellung

Die mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gusslegierungen lassen sich durch Gefügefeinung deutlich verbessern. Das Laserumschmelzen mit kurzen Laserpulsen hoher Energie bietet die Möglichkeit zur Herstellung solcher feindisperser Gefüge, da bei der laserinduzierten Schnellerstarrung deutlich höhere Abkühlgeschwindigkeiten als mit konventionellen Wärmebehandlungsverfahren erzielt werden können. In Zusammenarbeit mit dem Laserzentrum Hannover (LZH) wurden im Rahmen eines DFG-Projektes grundlegende Untersuchungen der schnellen Erstarrungsvorgänge von Al-Legierungen nach dem Umschmelzen mit Kurzpulslasern durchgeführt. Um den Zusammenhang zwischen den Prozessparametern, den gemessenen Abkühlkurven und den Erstarrungsvorgängen tiefer zu verstehen, wurden im IWS Dresden die Erstarrungsstrukturen, die sich in der Legierung GD- AlSi10Mg nach Einwirkung kurzer Laserpulse bildeten, eingehend durch den Einsatz metallographischer und elektronenmikroskopischer Methoden untersucht.

Lösungsweg

Die Laserumschmelzbehandlung wurde am LZH unter Verwendung eines Nd:YAG-Lasers mit Pulsdauern im Bereich zwischen 10 ms und 750 ms und Pulsleistungen zwischen 1,1 kW und 4,0 kW vorgenommen. Im IWS wurden die umgeschmolzenen Proben metallographisch, sowie mit REM und TEM charakterisiert. Die TEM-Zielpräparation erfolgte parallel zur Oberfläche der umgeschmolzenen Bleche durch schrittweises Schleifen, Polieren und Ionenstrahl-Endabdünnen.

Ergebnisse

Nach dem Laserumschmelzen entsteht ein Erstarrungsgefüge, das aus primär erstarrten Al-Mischkristallen und einem sekundär erstarrten feinkörnigen Al/Si-Eutektikum besteht (Abb. 1a). Mit abnehmender Pulsdauer und abnehmender Laserleistung und somit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit wird eine markante Gefügefeinung bewirkt. Die Abmessungen der ausgeschiedenen Si-Kristallite nehmen mit wachsender Abkühlgeschwindigkeit bis auf wenige Nanometer ab. Weiterhin tritt ein Wechsel des Erstarrungsmechanismus von einer vorwiegend dendritischen Erstarrung zu einer zellular-dendritischen Erstarrung auf. Außerdem erhöht sich der Gefügeanteil des Al-Mischkristalls auf Kosten des Al/Si-Eutektikums, so dass bei sehr hohen Abkühlgeschwindigkeiten die eutektische Erstarrung praktisch ganz unterdrückt wird und an den Zellgrenzen des Al-Mischkristalls lediglich elementares Si in Form feinverteilter Nanokristalle ausgeschieden wird (Abb. 1b).

Die Aufdeckung der mikrostrukturellen Zusammenhänge ermöglicht es, Strategien für die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Gusslegierungen abzuleiten.

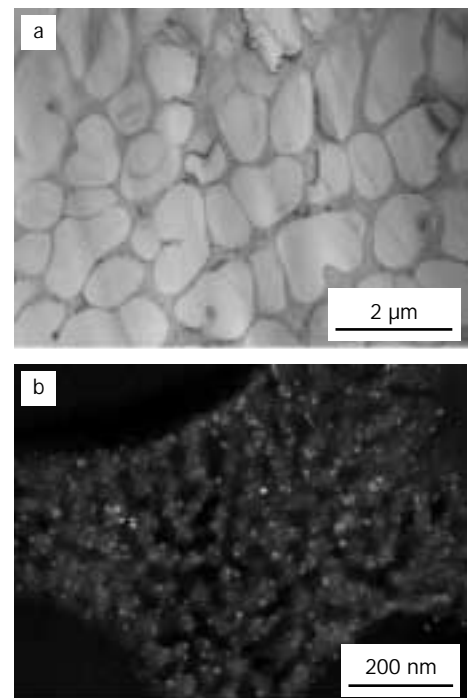


Abb. 1: TEM-Aufnahmen des Erstarrungsgefüges nach der Laserumschmelzbehandlung mit sehr hoher Abkühlgeschwindigkeit

a) Feindisperses Gefüge, bestehend aus Al-Mischkristall (hell) und sekundär erstarrtem entartetem Al/Si-Eutektikum (dunkel)

b) Detailaufnahme aus dem Al/Si-Eutektikum (Dunkelfeldaufnahme mit ausgewählten Si-Reflexen)
Si-Kristallite (hell): < 10 nm

Ansprechpartner

Dr. Jörg Kaspar
Tel.: 0351 / 2583 216
joerg.kaspar@iws.fraunhofer.de



Strukturanalytische Charakterisierung von Laser-Mikrobohrungen

Aufgabenstellung

Der industrielle Einsatz von Laserbearbeitungsverfahren zur Herstellung von Bohrungen mit kleinem Durchmesser und hohem Aspektverhältnis wird erschwert, weil die hohen Anforderungen, die an die geometrische Präzision und Qualität der Bohrungen sowie an die Effizienz und Sicherheit des Bearbeitungsprozesses gestellt werden, gegenwärtig noch nicht zu erfüllen sind. Zur Überwindung dieser bestehenden Hemmnisse soll durch Einsatz spezieller Präparationstechniken und hochauflösender strukturanalytischer Methoden ein tieferes Verständnis der die Qualität und Effektivität bestimmenden Mechanismen erlangt werden.

Lösungsweg

In Kooperation mit den Arbeitsgruppen Prof. Dausinger (IFSW Stuttgart) und Prof. Tünnermann (IAP Jena) wurden in Proben aus Silizium und Stahl (C70) Wendelbohrungen mit unterschiedlichen Kurzpulslasersystemen eingebracht. Dabei wurde einerseits die Repetitionsrate (0,5 kHz - 8 kHz) und andererseits die Pulsdauer (8 ns - 160 fs) über weite Bereiche variiert. Die hergestellten Lasermikrobohrungen wurden sowohl äußerlich durch Inspektion der Lochöffnungen als auch an Längs- und Querschliffen im REM und mittels EDX untersucht. Für ausgewählte Bearbeitungszustände wurden außerdem elektronentransparente Querschnittspräparate der Randzone von Bohrungen angefertigt und diese unter Nutzung der am TEM verfügbaren Methoden (Hell- und Dunkel-feldabbildung mit Beugungskontrast, hochauflösende Abbildung, Feinbereichs-Elektronenbeugung und EDX) detailliert analysiert.

Ergebnisse

Nach gegenwärtigem Erkenntnisstand lässt sich eine präzise, schmelz- und schädigungsarme Lasermikrobearbeitung nur mit hinreichend kurzen Laserpulsen und geringen Energiedichten, d. h. mit sehr kleinem Abtrag pro Puls, realisieren. Eine effiziente Fertigung erfordert deshalb die Bearbeitung mit hohen Repetitionsraten. Entsprechend der durch die Erhöhung der Repetitionsrate von 0,5 kHz auf 8 kHz bewirkten Steigerung der mittleren Leistung konnte beim Bohren mit 5 ps-Laserpulsen die Zeit zur Herstellung 1 mm tiefer Wendelbohrungen in Stahl um den Faktor 16 verringert werden, ohne dass sich negative Auswirkungen auf das Bearbeitungsergebnis einstellen. Insbesondere konnte auch bei 8 kHz Repetitionsrate keine strukturell veränderte Zone entlang der Bohrlochwand gefunden werden, die auf einen erhöhten Wärmeeintrag während des Bohrprozesses hindeutet. Eine weitere Erhöhung der Repetitionsrate zur weiteren Steigerung der Bohreffizienz erscheint somit als sinnvoll. Es ist deshalb vorgesehen, den Einfluss der Repetitionsrate auf die Abtragsrate, die Qualität der Bohrungen und auf die Reichweite der Wärmeeinflusszone künftig im Bereich zwischen 8 kHz und 50 kHz zu untersuchen.

Die Verwendung unterschiedlicher Pulsdauern beeinflusst außer der Effizienz der Lasermikrobearbeitung auch die Qualität und geometrische Präzision der entstehenden Bohrungen. Die Abb. 1 - 3 zeigen Beispiele aus den

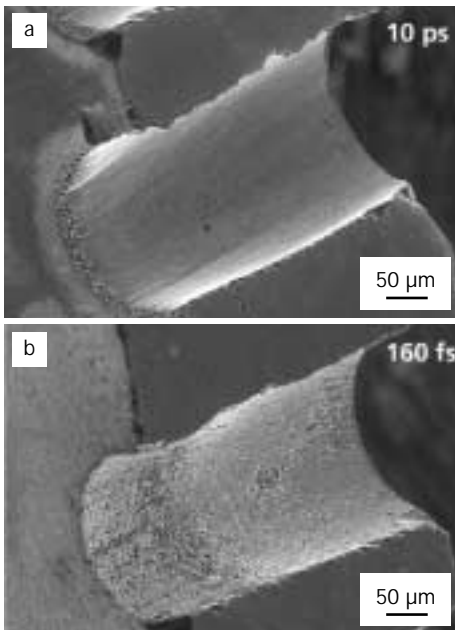


Abb. 1: REM-Aufnahmen der Längsschnitte von Lasermikrobohrungen in Si, hergestellt mit unterschiedlichen Pulsdauern

- a) 10 ps: glatte defektfreie Lochwand
- b) 160 fs: Störung der Lochwand durch Riefen und Mikroausbrüche

Ansprechpartner

Dr. Jörg Kaspar
Tel.: 0351 / 2583 216
joerg.kaspar@iws.fraunhofer.de



vergleichenden Untersuchungen zum Wendelbohren von Silizium mit Pulsdauern von 8 ns, 10 ps und 160 fs bei gleicher Pulsenergie und Energiedichte. Durch die Reduzierung der Pulsenergie auf 0,3 mJ konnte für alle Pulsdauern eine gute geometrische Präzision der zylindrischen Bohrlocher erreicht werden. Jedoch wird bei der Bearbeitung mit ns-Pulsen die erreichbare Bohrqualität durch die Entstehung und Ablagerung von Schmelze begrenzt. Durch schichtweises epitaktisches Aufwachsen feiner Schmelztröpfchen an der Lochwand bilden sich Ablagerungsschichten, die feine submikroskopische Poren enthalten und bis zu 10 nm dick sind. Die Schmelzablagerungen führen zu Abweichungen von dem angestrebten kreisrunden Lochquerschnitt. Außerdem kommt es zu einem beträchtlichen Wärmeeintrag in die Lochwand. Diese thermische Beeinflussung führt beim Abkühlen zu Zugspannungen in radialer und peripherer Richtung, die in dem spröden Werkstoff Silizium nicht durch plastische Verformung abgebaut werden können, so dass charakteristische Rissnetzwerke entstehen. Unerwünschte Schmelzablagerungen können beim Wendelbohren vermieden werden, wenn die Dauer der zur Bearbeitung eingesetzten Laserpulse unterhalb von etwa 10 ps liegt. Es ist jedoch zu beachten, dass mit abnehmender Pulsdauer die Intensität der mechanischen Beanspruchung ansteigt. So treten bei der Bearbeitung mit 1 ps- und 160 fs-Laserpulsen weitreichende Störungen der Kristallstruktur durch Gleitbänder und dichte Anordnungen prismatischer Versetzungsringe auf. Diese Defektstrukturen, die bei der Bearbeitung mit 160 fs-Pulsen besonders ausgeprägt

sind, werden als direkte Folge der laserinduzierten Druckstöße angesehen und bilden möglicherweise die Keime für die Bildung von Rissen und Abplatzungen. Bei der Laserbearbeitung mit fs-Pulsen wird die Präzision der Bohrungen außerdem durch Irregularitäten beim Materialabtrag beeinträchtigt. Dies führt dazu, dass sich mit zunehmender Bohrzeit feine Riefen und Mikroausbrüche in der Lochwand bilden. Die für die Entstehung dieser Schädigungen verantwortlichen Mechanismen sind bisher nicht bekannt und daher Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Da die thermische Werkstückbelastung mit zunehmender Pulsdauer ansteigt, die Intensität der mechanischen Belastung und des irregulären Materialabtrages jedoch mit abnehmender Pulsdauer zunehmen, sollte eine "optimale Pulsdauer", bei der die höchste Präzision und Bearbeitungsqualität beim Laserbohren zu erwarten ist, existieren. Diese betrug beim Wendelbohren von Silizium mit einer Pulsenergie von 0,3 mJ etwa 10 ps. In zukünftigen Untersuchungen sollen für weitere Werkstoffe und Lochgeometrien geeignete Parameterfenster zur effizienten Herstellung präziser und schädigungsarmer Mikrobohrungen gefunden werden.

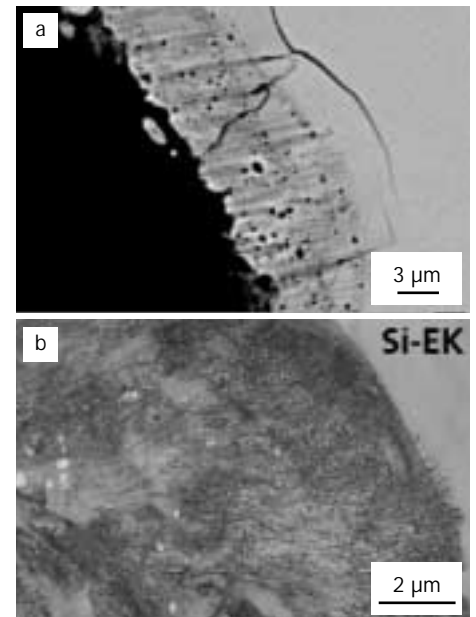


Abb. 2: Laserbohren von Si mit ns-Pulsen
 a) REM-Aufnahme eines ionenpolierten Lochquerschnittes: porenhaltige Schmelzablagerungen, radiale und periphere Risse
 b) TEM-Aufnahme: epitaktisch aufgewachsene Schmelzablagerungen mit dichter Versetzungsanordnung und submikroskopischen Poren

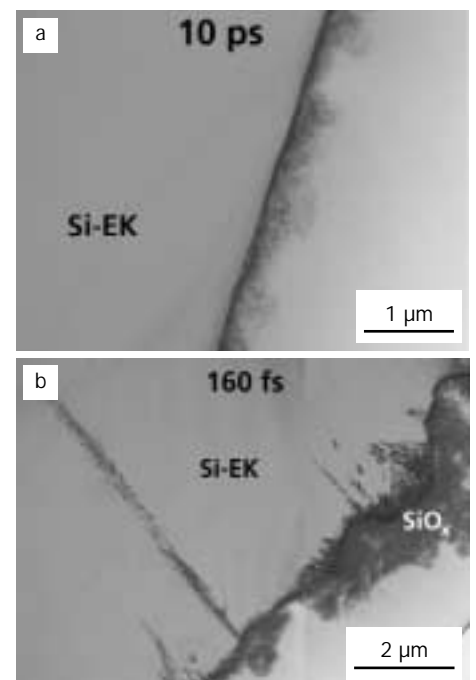


Abb. 3: TEM-Aufnahmen (Lochquerschnitte) von Laserbohrungen in Si
 a) 10 ps: eine Störung des Kristalls durch Defekte, lockere Oxidablagerungen auf der Lochwand
 b) 160 fs: durch Gleitbänder und lokale Anordnungen prismatischer Versetzungsringe gestörte Kristallstruktur



Laserstrukturierung erhöht Festigkeit von Metall-Keramik-Verbindungen

Aufgabenstellung

Leistungsfähigkeit und Einsatzdauer künftiger Raketentriebwerke sollen unter anderem durch den Einsatz faserverstärkter Keramiken erhöht werden. Dazu ist es notwendig, eine geeignete Verbindungstechnik zwischen der Keramik und den tragenden Metallkomponenten zu entwickeln.

In Zusammenarbeit mit der Fa. EADS Space Transportation wurden für die ausgewählte Materialkombination aus faserverstärkter SiC-Keramik (C/SiC) und einem geeigneten Metall Verbundproben gefertigt, wobei verschiedene Varianten der Oberflächenstrukturierung der C/SiC-Keramik zu entwickeln waren. Die Festigkeit der hergestellten Metall-Keramik-Verbindungen war anschließend durch geeignete Tests quantitativ zu ermitteln.



Abb. 1: C/SiC-Metall-Verbundprobe zur experimentellen Ermittlung der Scherfestigkeit

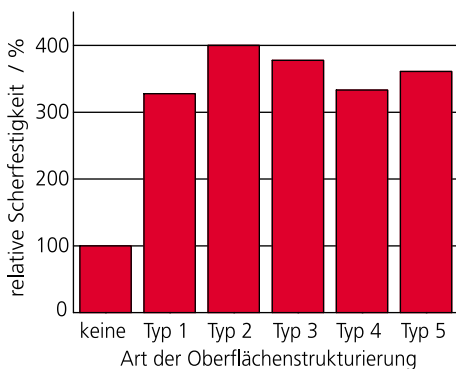


Abb. 2: Scherfestigkeit der C/SiC-Metall-Verbindung in Abhängigkeit von der Art der Oberflächenstrukturierung

An den so hergestellten Metall-Keramik-Verbundproben (vgl. Abb. 1) erfolgte unter Nutzung einer speziellen Prüfvorrichtung die Ermittlung der Verbundfestigkeit. Dazu wurde mit einer mechanischen Zug-Druck-Prüfmaschine die zwischen Metallblättchen und C/SiC-Keramik wirkende Scherkraft monoton erhöht, bis der Bruch der Verbindung eintrat.

Ergebnisse

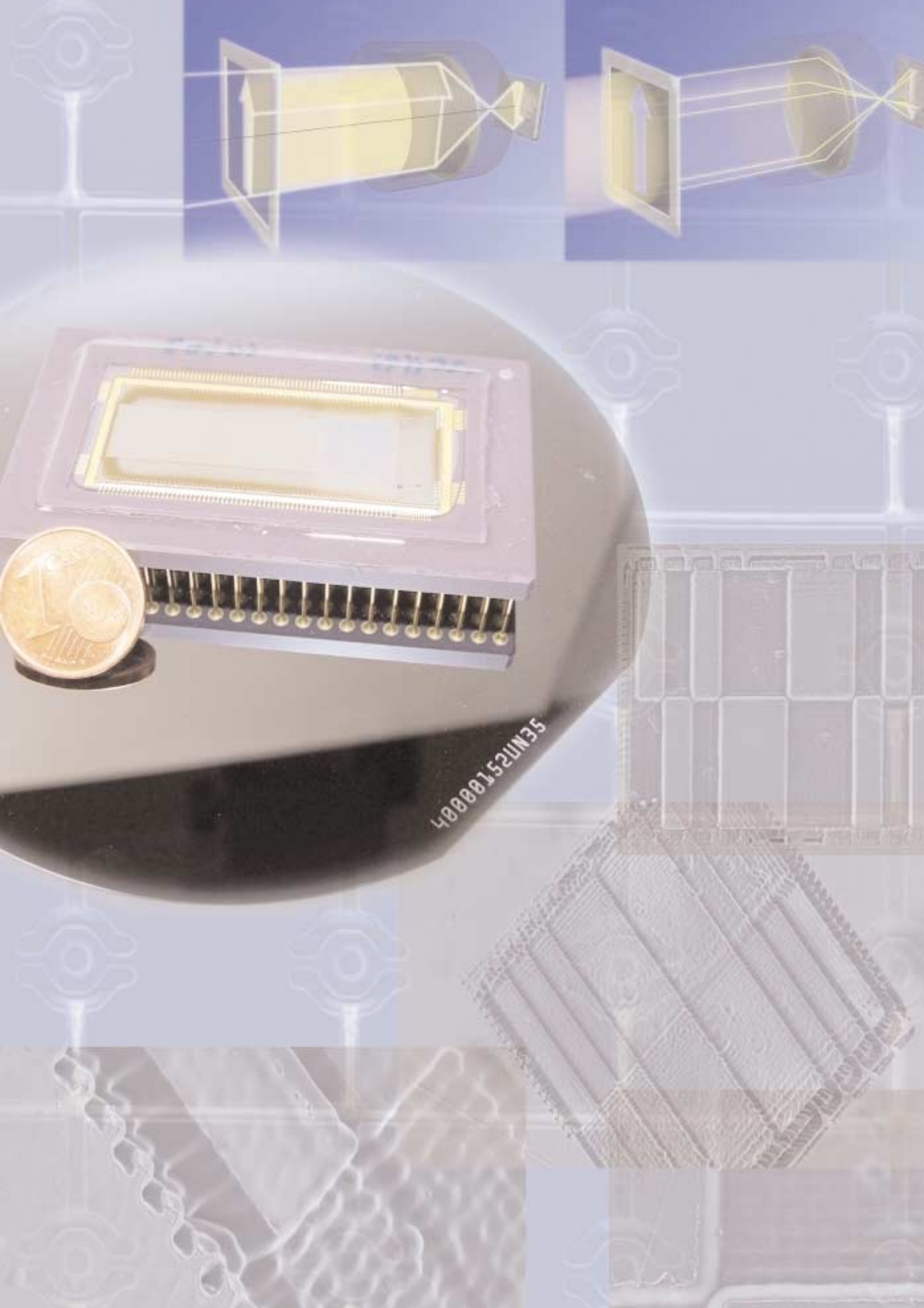
Als wesentliche Messgröße zur Bewertung der Verbundfestigkeit diente die maximale Scherkraft F_{max} . Der Quotient aus Scherkraft F_{max} und der zugehörigen Verbindungsfläche liefert als relevante Kenngröße die Scherfestigkeit der jeweiligen C/SiC-Metall-Verbindung. In Abb. 2 sind die für die verschiedenen Strukturierungsvarianten experimentell ermittelten Scherfestigkeiten grafisch aufgetragen. Wie die dargestellten Ergebnisse zeigen, konnte durch geeignete Strukturierung der C/SiC-Oberfläche eine drastische Steigerung der Scherfestigkeit um mehr als das Dreifache gegenüber der Verbindung von unstrukturierten Oberflächen erreicht werden. Als besonders vorteilhaft ist die Strukturierung der C/SiC-Oberfläche entsprechend Perforationstyp 2 zu bewerten, für die eine Steigerung der Verbundfestigkeit um den Faktor vier gegenüber einer Verbindung ohne Oberflächenstrukturierung nachgewiesen wurde.

Lösungsweg

Die Strukturierung der C/SiC-Oberfläche erfolgte mittels gepulstem Nd:YAG-Laser durch Einbringen kleiner Bohrungen in die C/SiC-Oberfläche, wobei Größe und Abstand dieser Sacklochbohrungen variiert wurde. Anschließend wurde die strukturierte Keramikoberfläche mit einem Aktivlot metallisiert und nachfolgend durch Löten mit einem Nioblättchen verbunden. Zu Vergleichszwecken wurden mit der gleichen Löttechnologie auch Verbundproben gefertigt, an denen zuvor keine Oberflächenstrukturierung der Keramik erfolgte.

Ansprechpartner

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



40000152UN35



FuE-Angebot: Laserabtragen und -trennen, Systemtechnik

Redaktion: Das Laserstrahlschneiden ist ein industriell schon umfangreich eingeführtes Fertigungsverfahren. Gibt es da eigentlich noch Bedarf für Forschung und Entwicklung?

Dr. Morgenthal: Auch wenn viele Anwendungsfälle des Lasers zum Trennen schon erschlossen sind, bleibt doch Raum für technische und wirtschaftliche Verbesserungen. Unsere Untersuchungen haben immer wieder gezeigt, dass auch mit modernen Laserschneidanlagen die Leistungsfähigkeit des Werkzeugs Laser in vielen Fällen bisher nur unvollständig umgesetzt wird. Das betrifft vor allem das Hochgeschwindigkeits- und das Präzisionsschneiden und das Schneiden von Werkstoffen, für die das Laserschneiden bisher als ungünstig galt. In diesem Zusammenhang freut es uns, dass wir mit unseren Arbeiten zum maß- und formgenauen Laser-Hochgeschwindigkeitsschneiden von Dynamo-blech für Elektromotoren in einem von der AIF geförderten gemeinsamen Forschungsprojekt mit der Firma Partzsch Elektromotoren in Döbeln zur Einführung dieser Fertigungstechnologie in dieser Firma beitragen konnten. Nach Aussagen des Firmenchefs Thomas Partzsch soll zu der seit ein paar Monaten produzierenden modernen Laserschneidanlage bald eine zweite dazukommen.

Redaktion: Das Laserabtragen wird in unterschiedlichen Verfahrensvarianten genutzt, der Mikrobearbeitung, dem Mikrostrukturieren oder dem Reinigen. Welche konkreten Anwendungen verfolgen Sie zur Zeit?

Dr. Morgenthal: Nachdem sich der Laser als präzises und selektiv wirkendes Reinigungswerkzeug im restauratorischen Bereich etablieren konnte, liegt uns jetzt der stärkere Einsatz für die technische Reinigung am Herzen. Ein Beispiel ist die lokale Reinigung der Fügebereiche von Getriebekomponenten, die mit dem Laser verschweißt werden sollen. Die in diesem Jahr eingeführten Referenzlösungen bei einem großen deutschen Automobilhersteller und einem Zulieferer in den USA belegen das Potential dieser Anwendung.

Redaktion: Und ein weiteres Highlight wurde in Italien in die Produktion überführt. Waren Ihre Mitarbeiter im vergangenen Jahr nur unterwegs?

Dr. Morgenthal: In den vergangenen Jahren wurden eine Reihe von stationären Scanner-Systemen für das Remote-Laserschweißen und für andere Laserbearbeitungsprozesse entwickelt und in die Industrie überführt, beispielsweise bei der Fa. Behr in Stuttgart. Bei Behr werden damit jährlich hunderttausende von Abgaswärmetauschern für den Auspuff von Diesel-PKW und -LKW der Marken Renault, Volvo und Mercedes geschweißt. Als konsequente Weiterentwicklung dieser Remote-Technik kam im Jahr 2003 ein robotergeführtes Remote-Welding-System für Nd:YAG-Laser dazu, welches die "on the fly"-Bearbeitung großer Bauteile ermöglicht. Das erste Industriesystem hat inzwischen seine Erprobung bei Salvagnini in Italien erfolgreich absolviert.

*Fantasie ist wichtiger als Wissen,
denn Wissen ist begrenzt.*
Albert Einstein



Dr. Lothar Morgenthal
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 322,
lothar.morgenthal@iws.fraunhofer.de)

Beispiele aus den Arbeiten 2003

1. Ortsselektive Oberflächenfunktionalisierung durch Laserbestrahlung in Reaktivgasatmosphäre 98
2. Prozesskontrolle für die Laserbearbeitung mit kurzen Pulsen und hoher Pulswiederholrate 100
3. Restaurierung eines Puttos der Herrenhäuser Gärten 101
4. Prozessüberwachung für das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff 102
5. Flexible Laser-Versuchsanlage 103
6. Laseranlage für die Präzisionsbearbeitung großformatiger Bauteile 104
7. Nd:YAG-Laser-Remote-Schweißen mit Prozessüberwachung 105





Dr. Lothar Morgenthal
Gruppenleiter Schneiden
und Systemtechnik
(Tel. 2583 322,
lothar.morgenthal@iws.fraunhofer.de)

Laserstrahlschneiden

Angeboten wird angewandte Forschung zum Laserstrahlschneiden mit Lasern unterschiedlicher Strahlleistung und Wellenlänge für Bauteile mit Abmessungen vom Millimeter- bis in den Meterbereich. Schwerpunkt ist das form- und maßgenaue Hochgeschwindigkeitsschneiden auf hochdynamischen Schneidmaschinen mit Linear-direktantrieben oder durch Strahlableitung. Für die Qualitätssicherung steht ein Flat Part Measurement & Digitizing Scanner System für Teilegrößen bis 1800 mm · 1200 mm zur Verfügung.

Dazu bieten wir an:

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



Laserstrahlgeschchnittene Elektroleche

Systemtechnik / Fertigungstechnik

Die Abteilungen des IWS bieten die serienreifen Realisierung verfahrensgepasster Systemlösungen zu folgenden Arbeitsgebieten an:

- Bearbeitungsoptiken, Strahlableitungssysteme für die Hochgeschwindigkeits- und Präzisionsbearbeitung sowie 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. zerstörungsfreier Bauteilprüfung mittels laserakustischer und spektroskopischer Methoden.



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



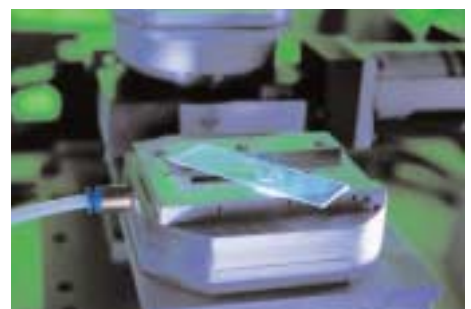
Dipl.-Ing. Udo Klotzbach
Gruppenleiter Mikrobearbeiten und Reinigen
(Tel. 2583 252,
udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de)

Mikrostrukturieren mittels Laser

Die umfangreiche und moderne Ausstattung sowie das fundierte Know-how ermöglichen angewandte Forschungen zur Mikro- und Feinbearbeitung mit Laserstrahlen für die Miniaturisierung von Funktionselementen im Maschinen-, Anlagen-, Fahrzeug- und Gerätebau und die Bio- und Medizintechnik. Beispiele sind 3D-Strukturen im Sub-mm-Bereich und Flächenstrukturen an Polymeren, Metallen, Keramiken oder quarzitären 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.



Präzisionsgravieren von Glas mit frequenzverdreifachtem Nd:YAG-Laser



Ortsselektive Oberflächenfunktionalisierung durch Laserbestrahlung in Reaktivgasatmosphäre

Aufgabenstellung

In der Proteinanalytik und der klinischen Diagnostik geht die Entwicklung von markerbasierten Nachweissystemen (Ankopplung von Fluoreszenzlabeln) mit geringem Probendurchsatz hin zu labelfreien Nachweissystemen (Surface Plasmon Resonanz, Eigenfluoreszenz, massesensitive Piezosensoren) mit sehr hohem Probendurchsatz. Bisher werden beispielsweise Proben auf Mikrotiterplatten aufgebracht und nach mehreren Vorbereitungsschritten (z. B. Dosier-, Markierungs-, Waschschriffe) im Fluoreszenzreader ausgelesen. Ziel ist es, diese Vorbereitungsschritte zu automatisieren und auf dem Biochip zu integrieren sowie eine labelfreie Detektion zu realisieren. Dazu müssen die Nachweismoleküle ortsselektiv auf dem Sensor immobilisiert werden. Die Integration der Vorbereitungsschritte erfolgt in einem vorgeschalteten Mikrofluidiksystem. Sowohl die Immobilisierung der Nachweismoleküle als auch das Mikrofluidiksystem setzen ortsselektiv bestimmte Oberflächenfunktionalisierungen (hydrophile, hydrophobe Bereiche) voraus.

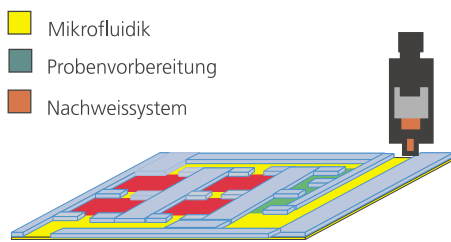


Abb. 1: Grundaufbau eines Biochips

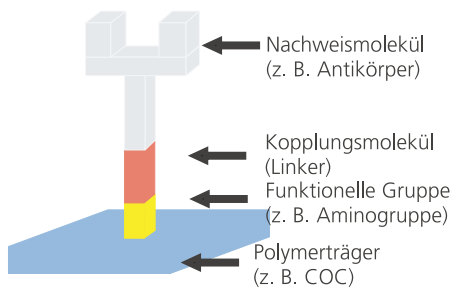


Abb. 2: Schema der Ankopplung von Biomolekülen

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Frank Sonntag
Tel.: 0351 / 2583 259
frank.sonntag@iws.fraunhofer.de

Mit direkter ortsselektiver Oberflächenfunktionalisierung z. B. durch strukturierte Beschichtung mit Kontaktmasken oder Maskenprojektion-Laserbestrahlung in einer Reaktivgasatmosphäre können aufwendige Bearbeitungsschritte entfallen. Da nur an den entsprechend funktionalisierten Flächen eine Immobilisierung erfolgen kann, vereinfacht sich auch das Aufbringen der Nachweismoleküle auf die Spots. So kann unter Umständen auf Spotten oder Mikrokontaktdruck verzichtet werden. Auch durch Kombination von Funktionalisierungen kann die Herstellung von Immunoassaysensoren verbessert werden. Beispielsweise unterbindet eine Hydrophobierung der Oberfläche um die Nachweisspots das Verlaufen der Antikörperlösung beim Spotten.

Durch die hohe technisch realisierbare Strukturauflösung kleiner 2 µm ist es möglich, Immunoassaysensoren mit sehr vielen Nachweisspots zu realisieren, was dem Entwicklungstrend hin zu labelfreien Hochdurchsatzsystemen entspricht.

Lösungsweg

In etablierten Verfahren wird eine ortsselektive Funktionalisierung der Oberfläche oft auf indirektem Wege erzeugt. So wird beispielsweise die komplette Oberfläche beschichtet und anschließend durch ortsselektiven Laserabtrag der funktionalisierten Oberschicht mikrostrukturiert. In einem anderen Verfahren wird die komplette Oberfläche nasschemisch funktionalisiert, ortsselektiv Nachweismoleküle aufgebracht (Spotten, Mikrokontakt-druck) und im Anschluss die ungebundenen funktionalisierten Bereiche chemisch abgeblockt.

Die Ankopplung der Nachweismoleküle erfolgt über Kopplungsmoleküle, so genannte Linker. Diese binden auf der einen Seite an das Nachweismolekül und koppeln auf der anderen Seite an funktionelle Gruppen auf der Oberfläche. Je nach verwendetem Linker wird nur an bestimmte funktionelle Gruppen z. B. Amino-, Epoxy-, Aldehyd- oder Hydroxylgruppen gekoppelt.

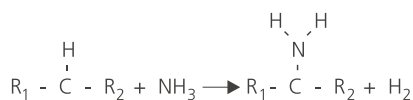


Für die Herstellung eines Immunosensorarrays muss eine große Zahl von Spots mit funktionellen Gruppen und sehr kleinen Abmessungen an der Oberfläche erzeugt werden. Als Trägermaterial eignen sich Kunststoffe, die transparent, biokompatibel und preisgünstig sind [wie z.B. PMMA (Polymethylmetacrylat) oder COC (Cyclo Olefine Copolymer)]. Für die Ankopplung von Antikörpern an Polymeroberflächen stehen Kopplungsmoleküle zur Verfügung, welche an Aminogruppen auf der Oberfläche binden.

Die ortsselektive Bereitstellung von Aminogruppen auf der Polymeroberfläche kann durch eine laserinduzierte chemische Reaktion realisiert werden. Hierfür wird das Polymer in einer Reaktivgasatmosphäre bestrahlt und durch die Photonenenergie eine chemische Reaktion ausgelöst.

Excimerlaser haben aufgrund ihrer kurzen Wellenlängen hohe Photonenenergien. Somit ist es möglich, chemische Bindungen direkt aufzubrechen. Voraussetzung ist, dass die Materialien die Wellenlänge des verwendeten Lasers gut absorbieren und die Photonenenergie größer ist als die Bindungsenergie der aufzubrechenden Bindungen.

So können beispielsweise durch Bestrahlung von COC mit einem 193 nm ArF-Laser in einer Ammoniakatmosphäre Aminogruppen an der Oberfläche erzeugt werden. Die Laserstrahlung wird vom Ammoniak und der COC-Oberfläche absorbiert und führt zur Aktivierung. Wobei folgende chemische Reaktion abläuft:



Für die strukturierte Bestrahlung kommt das Maskenprojektionsverfahren zum Einsatz.

Ergebnisse

Das entwickelte Verfahren ermöglicht die ortsselektive Oberflächenfunktionalisierung durch Laserbestrahlung in Reaktivgasatmosphäre.

Die entstandenen Aminogruppen können mit ATR-Spektroskopie nachgewiesen werden. An die erzeugten Aminogruppen können Nachweismoleküle gekoppelt und immobilisiert werden. So konnte beispielsweise fluoreszenzmarkierte DNA immobilisiert und im Fluoreszenzmikroskop nachgewiesen werden.

Neben Aminogruppen konnten durch Einsatz eines sauerstoffhaltigen Prozessgases auch Hydroxylgruppen auf Polymeroberflächen erzeugt und durch ATR-Spektroskopie nachgewiesen werden. Die Hydrophilierung der Oberfläche wurde durch Randwinkelmessung belegt.

Das entwickelte Verfahren ermöglicht eine ortsselektive Oberflächenfunktionalisierung in Form von Hydrophilierung und Ankopplung funktioneller Gruppen zur Immobilisierung von Nachweismolekülen. Mit diesem Verfahren kann die Herstellung von Immunoassaysensoren vereinfacht werden.

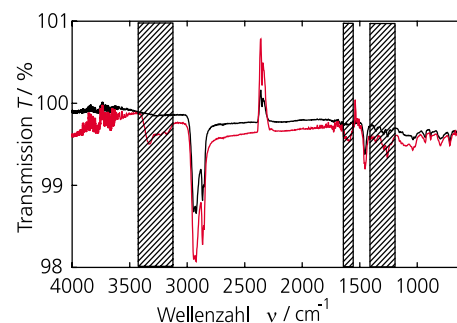


Abb. 3: Nachweis der Aminogruppen durch ATR-Spektroskopie

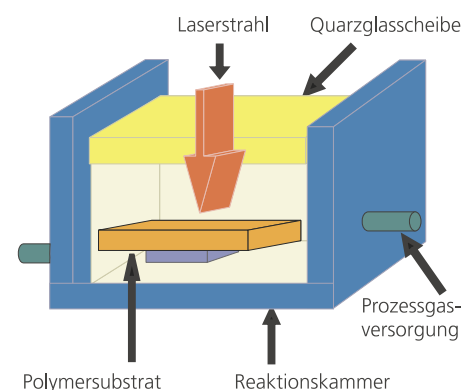


Abb. 4: Aufbau der Versuchsanlage

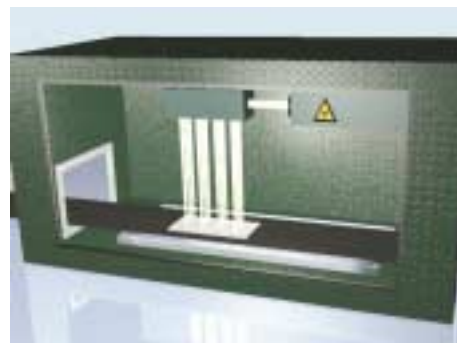


Abb. 5: Blick in die Reaktionskammer



Prozesskontrolle für die Laserbearbeitung mit kurzen Pulsen und hoher Pulsfrequenz

Aufgabenstellung

Die Kontrolle der Wechselwirkungen zwischen Laserstrahlung und bearbeitetem Material ist ein wesentlicher Beitrag zur Qualitätssicherung von Bearbeitungsprozessen. Im Unterschied zur aufwendigen Videoüberwachung des Bearbeitungsfeldes mit Hochgeschwindigkeitskameras, die im Labormaßstab oft eingesetzt wird, liefert die einfach handhabbare Messung der Energie oder Leistung des reflektierten, emittierten und transmittierten Lichtes während der Materialbearbeitung auch umfangreiche Informationen über den Energieeintrag in das Werkstück. Dafür geeignete Technik, insbesondere für den Einsatz bei hohen Pulsfrequenzen, ist jedoch bisher auf dem Markt nicht verfügbar.

Lösungsweg

Da thermische Sensoren wie Pyrometer nicht für hohe Pulsfrequenzen geeignet sind, wurde ein Messsystem auf der Basis von PIN-Fotodioden entwickelt. Durch eine modular aufgebaute Schaltung werden aus dem Fotostrom der Fotodioden die Lichtpulsenergie und Spitzenleistung berechnet. Zwei Mikrocontroller verarbeiten die entstehenden Daten und übertragen sie durch eine USB-Schnittstelle an den Prozessrechner. Mit der entwickelten Software können die Messwerte effektiv ausgewertet und für eine Archivierung komprimiert werden.

Ergebnisse

Die entwickelte Hard- und Software des Messsystems wurde in einer Referenzanwendung zum Laserbohren erfolgreich getestet. Es konnte eine optimale Zeitaufösung für Pulsfrequenzen von bis zu $f = 50 \text{ kHz}$ erreicht werden. Die dafür eingesetzte Steuer-Software erlaubt die Charakterisierung von Lichtpulsen mit einer Energie von einigen Nanojoule im Bereich von Nanosekunden. Die hohe Empfindlichkeit und Messgeschwindigkeit erlaubt die Aufnahme eines jeden einzelnen Lichtpulses. Für das Beispiel des Laserbohrens ist dies in den Diagrammen (Abb. 1 und 2) am Beispiel der Messung des Transmissionslichtes während des Trepanierbohrens gezeigt. In Abb. 2 wird durch die gedehnte Zeitaufösung jede Rotation des Laserstrahls sichtbar (300 Messungen pro Rotation, Pulsfrequenz $f = 10 \text{ kHz}$). Kleinste Änderungen der Energieaufnahme während des Bohrens werden detektiert. Zusätzlich zum Messwert der Pulsenergie kann aus den Daten die Ortsinformation gewonnen werden. Neben dem dargestellten Einsatz des Messsystems für die Prozesskontrolle in der Materialbearbeitung ist es auch für die Analyse kurzgepulster Strahlquellen mit hohen Pulsfrequenzen einsetzbar.

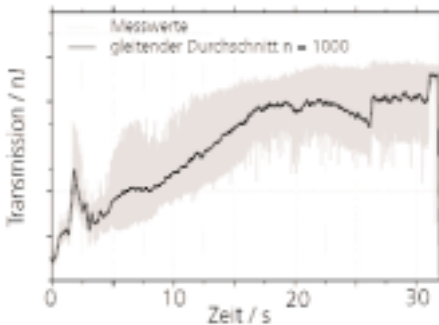


Abb. 1: Transmissionslichtmessung beim Laserbohren über einen Zeitraum von 30 s bis $T = 26 \text{ s}$ Spiralbohren bis $T = 31 \text{ s}$ Polieren (Kreis) ab $T = 31 \text{ s}$ Rotation ist beendet

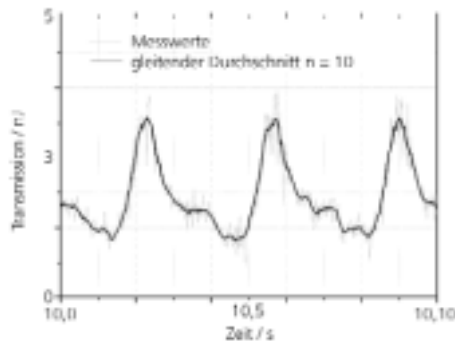


Abb. 2: Diagramm aus Abb. 1 bei gedehnter Zeitachse über einen Zeitraum von 100 ms

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Udo Klotzbach
Tel.: 0351 / 2583 252
udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de



Restaurierung eines Puttos der Herrenhäuser Gärten

Aufgabenstellung

An Kunstwerken aus Stein oder Holz wird das Laserreinigen als alternative restauratorische Reinigungsmethode bereits eingesetzt. Grundlage dafür waren auch die im IWS in mehreren Forschungsprojekten und Fallstudien ermittelten positiven Ergebnisse und Erkenntnisse zu derartigen Restaurationsaufgaben.

Gegenwärtig ist das IWS im Rahmen eines von der DBU geförderten Vorhabens "Modellhafte Anwendung der Laserstrahltechnologie zur Reinigung von umweltgeschädigtem Kulturgut aus Metall" in die Erarbeitung der Möglichkeiten und Grenzen des Laserstrahlreinigens für metallische Kunstwerke involviert. Schwerpunkte sind dabei experimentelle Untersuchungen, deren Ergebnisse grundlegend naturwissenschaftlich analysiert werden, so dass die Laborergebnisse auf konkrete Restaurierungsobjekte übertragen werden können.

Bei der Restaurierung eines Messing-Puttos aus einer Figurengruppe der Herrenhäuser Gärten bei Hannover stießen die verantwortlichen Restauratoren W. Conrad und J. Ullrich auf eine Reihe von Problemen, die mit den vorgesehenen mechanischen Reinigungsmethoden und der Mikrodampfstrahlreinigung nur mit großen Aufwand und / oder unter Qualitätsabstrichen lösbar erschienen. Insbesondere betraf das die Aufgabe "Säuberung von Teilen der grünen Naturpatina (Korrosionsschicht) ohne Substanzverlust". Die Ergebnisse des laufenden Forschungsvorhabens ließen hier eine bestmögliche Verwirklichung der gegensätzlichen Forderungen durch Laserstrahlabtrag erwarten.

Lösungsweg

An verdeckten Stellen der Figur wurden mit dem Nd:YAG-Reinigungslaser Artlight NL 102 die Schwellintensitäten für den Abtrag der störenden Schichten sowie die Reaktionsschwelle für eine Veränderung der zu erhaltenden, zum Original gehörenden Oberflächenschicht ermittelt. Diese Parametersätze wurden an briefmarkengroßen Musterflächen verifiziert (Abb. 1).

Nach vergleichender Begutachtung dieser Musterflächen mit konventionell gereinigten Mustern favorisierten die Vertreter des Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege und des Objekteigentümers den Einsatz der Laserstrahlreinigung am Putto.

Ergebnisse

Auf etwa 25 % der Figuroberfläche wurden die störenden Oberflächenschichten mit Hilfe der Laserstrahlreinigung entfernt. Die konventionelle mechanische Reinigung wurde nur auf ca. 10 % der Oberfläche, insbesondere an nachträglichen Ergänzungen von früheren Restaurierungen angewandt.

Anschließend wurde die gesamte Figur, die zu ca. 60 % noch die intakte natürliche Grün-Patina aufwies, mittels Mikrodampfstrahl behandelt. Dabei wurden auch sich teilweise bei der Laserstrahlreinigung bildende Redepositive mit entfernt.

Dieses Beispiel (Abb. 2) bestätigt die bereits an Steinobjekten gewonnene Erkenntnis, dass die Laserstrahlreinigung eine wertvolle Ergänzung in der Palette der restauratorischen Reinigungsmethoden darstellt.



Abb. 1: Musterflächen zur Verifizierung optimaler Reinigungsparameter



Abb. 2: Putto nach der Reinigung (Höhe der Figur ca. 1 m)

Ansprechpartner

Dr. Günter Wiedemann
Tel.: 0351 / 2583 251
guenter.wiedemann@iws.fraunhofer.de



Prozessüberwachung für das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff

Aufgabenstellung

Die Zugabe von Zusatzwerkstoff beim Verbinden von metallischen Bauteilen durch das Laserstrahlschweißen kann unterschiedlichen Zielen dienen. Ein Ziel kann es sein, durch den Zusatzwerkstoff die Metallurgie der Schweißnaht zur Erzielung bestimmter Eigenschaften der Bauteilverbindung zu beeinflussen. Da die Zusammensetzung und Gefügeausbildung in der Schweißzone meist nur durch zerstörende Prüfverfahren und nach der Schweißung feststellbar sind, besteht die Forderung nach einer Onlinekontrolle dieser Prozessaspekte als ein Baustein zur Qualitätssicherung von laserstrahlgeschweißten Bauteilen.

Lösungsweg

Beim Laserstrahlschweißen wird durch die hohe Strahlintensität im Bereich des metalldampfgefüllten Keyholes ein prozesstypisches Plasma erzeugt, dessen Emissionen in ihrem Spektrum und zeitlichen Auftreten die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Material charakterisieren. Mit einer zeitlich und räumlich sowie spektral aufgelösten Messung dieser Sekundärstrahlung können online umfangreiche Informationen zum Prozess gewonnen werden.

Ergebnisse

Für die Überwachung dieser Prozessführung wird eine spektroskopische Messung der Plasmaemission eingesetzt, d. h. die Intensität der Emission wird wellenlängenaufgelöst in kurzen zeitlichen Abständen gemessen und abgespeichert. Dies erfolgt für vier problemspezifisch vorausgewählte Wellenlängenbereiche im UV- und VIS-Spektralbereich. Die Auflösung der Plasmaemissionen nach der Wellenlänge der Strahlung bietet die Möglichkeit, für die Auswertung diskrete Wellenlängen heranzuziehen, die einer (oder mehreren) Emissionslinie(n) des oder der interessierenden Elemente entsprechen.

Die Bewertung der gemessenen Spektren erfolgt durch den Vergleich mit Referenzspektren. Die zeitliche Auflösung der Messung (Verlauf des Schweißprozesses) ist durch die hohe Messwiederholrate für die Aufnahme der Spektren gegeben. Damit wird auch eine Einflussnahme auf die Menge des zugeführten Zusatzwerkstoffes im Prozess möglich.



Abb. 1: Messsystem für spektroskopische Messungen

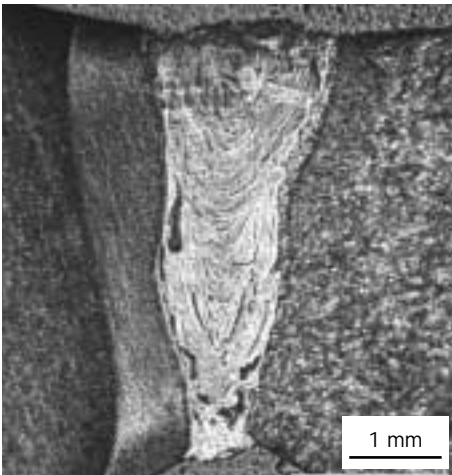


Abb. 2: Typische Schweißnaht eines Bauteils aus dem Getriebebau

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Frank Kretschmar
Tel.: 0351 / 2583 231
frank.kretschmar@iws.fraunhofer.de



Flexible Laser-Versuchsanlage

Aufgabenstellung

In der Bekleidungsindustrie ist in den letzten Jahren verstärkt die Entwicklung funktionaler Bekleidung sowie eine Zunahme des Einsatzes von polymeren Faserstoffen, Folien und Membranen zu verzeichnen. Diese funktionale Bekleidung hat definierte Funktionen, wie zum Beispiel Wasserdichtheit, Dampfdurchlässigkeit, Wärmespeicherung usw. zu erfüllen. Die konventionelle Verbindungstechnologie in der Bekleidungsindustrie ist jedoch immer noch das Nähen. Aufgrund der Durchdringung des Materials durch die Nadel wird die Funktion der Bekleidung zum Teil beeinträchtigt bzw. sogar zerstört. Daher müssen neue Verfahren zum Verbinden gesucht werden.

Lösungsweg

Das Laserstrahlschweißen von Kunststoffen hat sich als ein alternatives und flexibles Fügeverfahren erwiesen, das ohne mechanische oder weitreichende thermische Belastungen der Fügepartner auskommt. Der zunehmende Anteil von polymeren Faserstoffen, Folien und Membranen in funktionaler Bekleidung, aber auch die Einarbeitung elektronischer Bauteile in die Kleidung (Smart Clothes), ist eine gute Voraussetzung für den Einsatz der Laserstrahlschweißtechnik. Das Laserstrahlschweißen ist ein berührungsloses Verfahren und kann somit das Nähgut und die einzuarbeitenden Bauteile mechanisch nicht zerstören, wie dies beim Ultraschallschweißen möglich ist.

Ergebnisse

Um die prinzipiellen Möglichkeiten des Laserschweißens für funktionelle Bekleidung zu untersuchen, wurde eine Versuchsanlage konzipiert und aufgebaut, die flexibel für verschiedene textile Materialien und Strukturen eingesetzt werden kann. Neu ist die Umsetzung des Konzeptes eines gekoppelten Achssystems aus konventionellem 3D-Handling mit kartesischen Bewegungsachsen und fliegender Bearbeitungsoptik, die eine 2D-Strahlableitung beinhaltet. Dadurch ist es möglich, kleinteilige komplexe Strukturen auf größeren Flächen mit hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit und großer Präzision zu erzeugen. Als Laserstrahlquelle wird ein CO₂-Laser eingesetzt, dessen Strahlung am besten von vielen der zu bearbeitenden Materialien absorbiert wird.

Durch das Laserstrahlschweißen kann erreicht werden, dass der Fügeprozess der Kleidungsteile mit kaum nennenswerter Kraftübertragung abläuft. Dadurch bleiben die Oberflächenstrukturen und -eigenschaften des textilen Grundmaterials erhalten und es erfolgt keine Schädigung des Nähguts. Der Charakter einer Textiloberfläche wird nicht durch optisch sichtbare Nähte gestört. Weiterhin können zusätzliche Komponenten bzw. Funktionen in das Kleidungsstück implementiert werden, um sogenannte intelligente Bekleidung (Smart Clothes) herzustellen. Laserstrahlschweißen ermöglicht die direkte Applikation elektronischer Komponenten mit dem Textil.

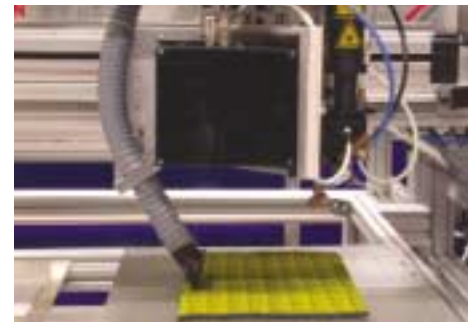


Abb. 1: Laser-Versuchsanlage im Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf (ITV), entwickelt und gebaut durch Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Ansprechpartner

Dr. Dieter Pollack
Tel.: 0351 / 2583 239
dieter.pollack@iws.fraunhofer.de



Laseranlage für die Präzisionsbearbeitung großformatiger Bauteile

Aufgabenstellung

Der Vorteil des Laserstrahles, sich auf einen sehr kleinen Arbeitsfleck mit hoher Intensität fokussieren zu lassen, wird zum Problem, wenn für die Bearbeitung großformatiger Bauteile oder Werkstücke dieser kleine Arbeitsfleck mit hoher Vorschubgeschwindigkeit sehr genau auf den Bearbeitungskonturen im Raum geführt werden muss. Besonders schwierig ist eine anlagentechnische Umsetzung für Fertigungsprozesse, die eine Simultan- oder Tandem-Bearbeitung mit mehreren Laserstrahlen gleichzeitig auf einer oder mehreren Bauteilkonturen erfordern. Ein typisches Beispiel für derartige Anforderungen ist das Laserstrahlschweißen der Stringer-Hautfeld-Verbindung für Flugzeugrumpfstrukturen.

Die Erarbeitung von Grundlagen für eine wesentlich erweiterte Anwendung des Laserstrahlschweißens für komplexe Fügegeometrien an großformatigen Bauteilen erfordert eine flexible Anlagentechnik, die die sich widerstrebenden Forderungen nach höchster Bahngenauigkeit und hohem Vorschub für die 3D-Bearbeitung in einem großen Arbeitsraum sicher erfüllt.



Abb. 1: Laseranlage für die Simultan- oder Tandem-Bearbeitung großformatiger Bauteile

Lösungsweg

Um die Laseranlage sowohl mit CO₂- als auch Nd:YAG-Lasern ausrüsten zu können, wurde das Handlingsystem als kartesisches Achssystem ausgelegt. Für höchstmögliche Flexibilität wurden für

die Simultan- oder Tandembearbeitung mechanisch entkoppelte Parallelachsen vorgesehen. Die Bewegungskopplung wird im Bedarfsfall steuerungstechnisch realisiert und wenn notwendig durch geeignete Geometriesensoren unterstützt. Um für Schweißtechnologien, die die Zufuhr eines drahtförmigen Schweißzusatzwerkstoffes erfordern, die volle 3D-Beweglichkeit der Bearbeitungsoptik zu gewährleisten, wurde anstelle des üblichen 5-Achssystems für jeden Bearbeitungskopf ein 6-Achssystem realisiert.

Ergebnisse

Neben einer besonders großen Flexibilität bietet die entwickelte Lösung als Kombination einer Gantry-Maschine mit fliegender Optik und einem zusätzlichen Bewegungstisch für die Bauteile insbesondere noch die Vorteile deutlich verbesserter Beschleunigungswerte für die Bauteil-Relativbewegung, eines verringerten Platzbedarfs und einer geringeren Änderung der Strahlweglänge (CO₂-Laser) bei der Bearbeitung. Die größtmögliche Bearbeitungslänge von 10 m ergibt sich durch die Addition der Achswege von Gantry und Maschinentisch. Es können gleichzeitig zwei Laserbearbeitungsoptiken und eine flexible Spanntechnik auf praktisch beliebigen 3D-Bahnen im Arbeitsraum einzeln oder synchron bewegt werden. Dabei ist auch eine Koordinatentransformation für je 6 Bewegungsachsen möglich. Dieses, bisher in einer derartigen Achsanordnung so noch nicht realisierte Maschinenkonzept einer Laserstrahlschweißanlage soll gleichzeitig als Erprobungs- und Demonstrationsanlage für zukünftige systemtechnische Lösungen dienen.

Ansprechpartner

Dr. Lothar Morgenthal
Tel.: 0351 / 2583 322
lothar.morgenthal@iws.fraunhofer.de



Nd:YAG-Laser-Remote-Schweißen mit Prozessüberwachung

Aufgabenstellung

Das durch Entwicklung von leistungsfähigen Strahlablensystemen möglich gewordene Remote-Schweißen findet große Resonanz in der Automobil- und Zulieferindustrie, da durch die schnelle Strahlpositionierung zwischen den einzelnen Schweißpositionen die Prozessnebenzeiten deutlich gesenkt werden können. Für Anwendungen im Karosseriebau, z. B. zur Substitution des Widerstandspunktschweißens, wird der Nd:YAG-Laser bevorzugt. Aus diesen Gründen wurde ein Bearbeitungssystem für das Remote-Schweißen mit Nd:YAG-Laserstrahlung entwickelt, welches die Vorteile der Remote-Technik und die Vorteile des Nd:YAG-Lasers verbindet. Zur Qualitätssicherung wird auch für das Remote-Schweißen eine online-Prozesskontrolle, wie vom konventionellen Laserstrahlschweißen bekannt, gefordert.

Lösungsweg

Das entwickelte Bearbeitungssystem ist ein gekoppeltes Achssystem, bestehend aus einer 3D-Strahlablenkoptik und einem konventionellen Industrieroboter. Ein Nd:YAG-Hochleistungslaser mit sehr guter Strahlqualität sowie CAD/CAM-Module zur Offline Programmierung und Bahnplanung komplettieren die Systemlösung. Die speziell entwickelte Achskopplung erweitert das durch die Laserstrahlqualität begrenzte Arbeitsfeld der Strahlablenkoptik von etwa $100 \cdot 100 \cdot 40 \text{ mm}^3$ auf den gesamten Arbeitsraum des Roboters von einigen m^3 . Während der Bauteilbearbeitung übernehmen die drei Achsen der Strahlablenkoptik die hochdynamischen Bewegungsanteile der Laser-spotbewegung. Der Industrieroboter bewegt gleichzeitig die gesamte Bearbeitungsoptik und sorgt damit für eine optimale Erreichbarkeit und

Zugänglichkeit zu den Schweißpositionen. Die exakte zeitliche und örtliche Synchronisation der Bewegungsachsen macht eine Bearbeitungsgenauigkeit im Bereich der Wiederholgenauigkeit des Industrieroboters möglich. Ein dichroitischer Spiegel im Strahlengang der Bearbeitungsoptik ermöglicht die koaxiale Beobachtung der Bearbeitungszone durch geeignete Sensorsysteme (Abb. 1).

Ergebnisse

Die beim Widerstandspunktschweißen typische große Anzahl von Verbindungspunkten kann durch das Remote-Schweißen vorteilhaft realisiert werden, da sich die Positionierzeit zwischen den Schweißpunkten aufgrund der hohen Spotdynamik auf ein Minimum reduziert. Die Teiletaktzeit wird drastisch verringert, die Lasereinschaltzeit erhöht und damit der gesamte Bearbeitungsprozess optimiert. Durch die freie Gestaltung der lokalen Geometrie der Schweißnaht kann außerdem die Festigkeit und Verformbarkeit der Fügeverbindung besser optimiert werden.

Durch die Integration der vom Fraunhofer ILT entwickelten koaxialen Prozessüberwachung kann die Wechselwirkungszone von Laserstrahl und Werkstück während der Bearbeitung mit einer Kamera orts aufgelöst beobachtet werden. Die hohe Bildrate und schnelle Bildverarbeitung ist der hochdynamischen Strahlfocusbewegung angepasst. Bei Testschweißungen mit 4 kW Laserleistung konnten Durchschweißungen eindeutig erkannt und innerhalb des Arbeitsfeldes räumlich zugeordnet werden (Abb. 2).

Das Forschungsvorhaben ist ein Verbundprojekt von ILT Aachen und IWS Dresden und wird als Mittelstandsorientiertes Eigenforschungsprojekt (MEF) durch die FhG gefördert.



Abb. 1: Remote Welding System mit integrierter Prozessüberwachung

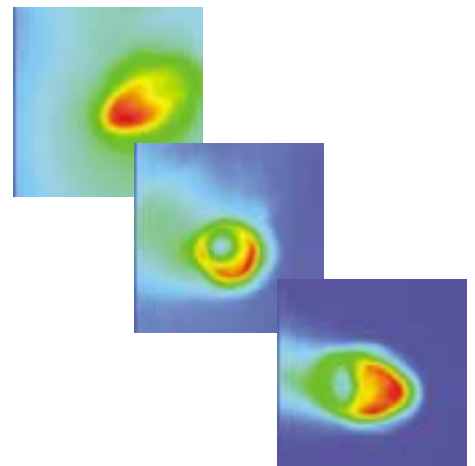


Abb. 2: Prozessaufnahmen beim Schweißen einer 30°-Ecke, $v = 6 \text{ m / min}$
Durchschweißung im Eckbereich

Ansprechpartner

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



FuE-Angebot: Klebtechnik



Dr. Irene Jansen
Gruppenleiterin Klebtechnik
(Tel. 4633 52 10,
irene.jansen@iws.fraunhofer.de)

Klebtechnik

Vor zwei Jahren wurde die Gruppe "Klebtechnik" gegründet. Seit dem Jahr 2003 steht für diese neue Arbeitsrichtung ein modern eingerichtetes Klebtechnikum, das sich am Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik der TU Dresden befindet, zur Verfügung.

Beispiel aus den Arbeiten 2003

1. Vorbehandlung und Kleben von Magnesiumbauteilen 107

Hauptarbeitsgebiete der Gruppe sind:

- Oberflächenvorbehandlung mittels Plasma- und Lasertechnik verwendet werden hierfür Nd:YAG- und gepulste Diodenlaser sowie verschiedene Plasmen im Niederdruck- und Atmosphärenbereich
- Konstruktives Kleben verschiedenster Materialien (Metalle, Kunststoffe, Glas, Holz)
- Charakterisierung der Oberfläche sowie der geklebten Verbunde mittels Kontaktwinkel-, Rauheits- und Schichtdickenmessung, REM / EDX und spektroskopischer Methoden
- Bestimmung der Klebfestigkeiten und Alterungsuntersuchungen
- Simulation und Aufbau einer Datenbank





Vorbehandlung und Kleben von Magnesiumbauteilen

Aufgabenstellung

Magnesium wird wegen seiner geringen Dichte, verbunden mit hohen Festigkeitswerten, zunehmend im Konstruktionsbau eingesetzt. In der Automobilindustrie soll durch den Leichtbau der Kraftstoffverbrauch gesenkt und dadurch die Kohlendioxidemission verringert werden. Durch Einsatz der Klebtechnik werden weitere Vorteile, wie die Möglichkeit der Materialkombination, ein ausgeglichener Kraftfluss- und Spannungsverlauf, die Erhöhung der Struktursteifigkeit sowie ein maximaler Ausnutzungsgrad der Fügeteilwerkstoffe unter schwingender als auch stoßartiger Belastung nutzbar.

Magnesium ist das unedelste Konstruktionsmaterial und muss vor dem Fügeprozess oberflächenbehandelt werden. Da bisher angewandte Chromatiervverfahren nach der Altauftoverordnung ab 2007 nicht mehr eingesetzt werden dürfen, sucht die Industrie nach inline-fähigen, möglichst nicht nasschemischen Verfahren. Ein Anwendungsbeispiel ist das Vorbehandeln und Kleben von Ober- und Unterschale eines 12-Zylinder-Motor-Ansaugmoduls (Abb. 1). Zur gezielten Vorbehandlung der Fügestellen sind vor allem physikalische Methoden geeignet.

Lösungsweg

Verschiedene alternative Vorbehandlungsverfahren wurden mit Atmosphärenplasma- oder Laserbehandlungen der Oberfläche verglichen. Das Atmosphärenplasma, erzeugt durch gepulsten Bogenentladung, führt zu einer aufgerauten, gereinigten und aktivierten Oberfläche. Aufgrund der erforderlichen elektrischen Leitfähigkeit eignet sich dieses Verfahren insbesondere für die Vorbehandlung von metallischen Materialien, während die Laserbehandlung (Abb. 2) für die Bearbeitung von Metallen und Nicht-

metallen geeignet ist. Können mit der gepulsten Bogenentladung auch größere Flächen preisgünstig vorbehandelt werden, bietet sich der Laser insbesondere für kleine oder auch kompliziert geformte Oberflächen und Bauteile an (Abb. 3).

Weiterhin wurden in einem PVD-Prozess C-Schichten (Diamor®) und durch Plasmaspritzen Al-Ti-Oxidschichten aufgebracht. Als Fügemaaterial dienten Magnesium-Druckgussbleche bzw. Bauteile aus AZ 91 HP. Die vorbehandelten Magnesiumbleche wurden einschneitig geklebt und die Zugscherfestigkeit nach DIN EN 1465 vor und nach verschiedenen Alterungstests (Pressure Cooker Test, VDA-Test) bestimmt.

Ergebnisse

Vorbehandelte und geklebte Bleche ergaben beim Zugschertest im Vergleich zum entfetteten Blech wesentlich erhöhte Klebfestigkeiten und es wurde größtenteils kohäsives Versagen beobachtet. Wurden die Gussteile mit Nd:YAG-Laser- oder Atmosphärenplasma behandelt, konnten im Vergleich zu den anderen Verfahren sehr gute Klebfestigkeiten erreicht werden.

Alle Vorbehandlungsmethoden ergaben im Vergleich zu entfettetem Material niedrigere Kontaktwinkel. Eine Ausnahme bilden die C-Schichten, die trotz erhöhtem Kontaktwinkel, d. h. schlechterer Benetzbarkeit, gute Klebfestigkeiten und kohäsives Versagen zeigten. Offenbar wirkt die Kohlenstoffschicht als Haftmittel. Nach 10 Cyclen VDA-Test trat bei Laser- und Atmosphärenplasmabehandlung nur ein geringer Festigkeitsverlust auf, etwa vergleichbar mit dem von chromatierten Blechen.

Es sollte aussichtsreich sein, inline-fähige Laser- und Plasmamethoden zur Klebstellenvorbehandlung zu entwickeln.



Abb. 1: Ansaugmodul eines 12-Zylinder-Motors aus Magnesium (AZ 91 HP)



Abb. 2: Laserbehandlung eines Magnesiumbauteiles



Abb. 3: Mit Laser vorbehandeltes und geklebtes Bauteil

Ansprechpartner

Dr. Irene Jansen
Tel.: 0351 / 4633 52 10
irene.jansen@iws.fraunhofer.de



FuE-Angebot: Multimedia / Simulation



Dr. Siegfried Völlmar
Gruppenleiter Multimedia
(Tel. 2583 434,
siegfried.voellmar@iws.fraunhofer.de)

Kompetenz-Zentrum Multimedia

Die Vermittlung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse des IWS erfordern wegen des komplexen Charakters der technologischen, werkstoffwissenschaftlichen und physikalischen Zusammenhänge häufig den Einsatz aller Möglichkeiten der modernen Kommunikationstechnik. Durch Kombination von Text, Bild, Video und Audio können auch unsichtbare oder sehr schnell ablaufende Vorgänge veranschaulicht werden. Von besonderer Bedeutung ist das bei sicherheitsrelevanten Prozessen. Folgende Dienstleistungen werden von der Gruppe angeboten:

- Photo- und Videoaufnahmen mit modernster digitaler Technik
- Herstellung von Akquisitionsmaterial zu Technologien und Produkten
- Aufzeichnung wissenschaftlicher Events und Wiedergabe als Live-Präsentation im Internet oder als permanent abrufbare Datenstreams
- Gestaltung von Präsentationen
- Umsetzung physikalisch-technischer Abläufe in 3D-Simulationen
- Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung moderner Werkzeuge der "virtual reality" und "augmented reality" für die technologische Forschung
- Aufbau eines Systems von Weiterbildungs-Veranstaltungen zur Laser- und Oberflächentechnologie



Dr. Dietrich Lepski
Gruppenleiter Simulation / Grundlagen
(Tel. 2583 222,
dietrich.lepski@iws.fraunhofer.de)

Prozess-Simulation und Softwareentwicklung für die Lasermaterialbearbeitung

"Probieren geht über Studieren", sagt der Volksmund, doch bei modernen Hochtechnologien kann Probieren sehr teuer werden. Ein möglichst tiefgehendes Verständnis der in der Prozesszone ablaufenden Vorgänge erleichtert nicht nur die Weiterentwicklung und Optimierung von Verfahren der Lasermaterialbearbeitung und Beschichtung, sondern spart auch Kosten in der Produktionsvorbereitung. Daher gehört im IWS zur Verfahrensentwicklung und -weiterentwicklung in zunehmendem Maße auch die Prozessmodellierung bis hin zur Entwicklung produktions-tauglicher Software (z. B. Laserhärten, Laser-Pulver-Auftragschweißen).

Modellgestützte Abschätzungen erleichtern oft die Prognose, ob und mit welchen Mitteln konkrete Kundenwünsche erfüllt werden können (Machbarkeitsstudien) und unterstützen die Ermittlung von geeigneten Prozessfenstern. Darüber hinaus wird im IWS Material für Lehre und Ausbildung entwickelt (z. B. Laserlexikon, Lasersicherheit).

Beispiele aus den Arbeiten 2003

1. Definierte Erwärmung von Kunststoffbeschichtungen mittels Laserstrahlung 109
2. Prozessparameterbestimmung beim Laser-Pulver-Auftragschweißen durch Simulation mit LAVA 110
3. Immersive Simulationen für komplexe dreidimensionale Prozesse 112
4. VELI - Virtuelles Europäisches Laserinstitut 113



Definierte Erwärmung von Kunststoffbeschichtungen mittels Laserstrahlung

Aufgabenstellung

Die Polyethylenbeschichtung von Verpackungsmaterial muss im Vorfeld eines Fügeprozesses bis auf Erweichungstemperatur erwärmt werden. Im Rahmen einer Prozesssimulation wird die Temperaturverteilung im Bereich der Aufheizzone für den Fall berechnet, dass die Aktivierung mit Hilfe von Laserstrahlung erfolgt. Das Verfahrensprinzip ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

Für die Wellenlängen gebräuchlicher Lasertypen im Bereich um $1 \mu\text{m}$ ist die Deckschicht aus Polyethylen weitestgehend diatherman. Daher kann die Strahlung nicht direkt innerhalb der Schicht absorbiert werden. Die Erwärmung erfolgt stattdessen, ausgehend von der strahlungsundurchlässigen Aluminiumfolie, die einen Teil der auftreffenden Strahlung absorbiert, durch Temperaturengleich infolge Wärmeleitung.

Im Rahmen einer Prozesssimulation lässt sich die Temperaturverteilung in der Wechselwirkungszone berechnen. Dies erleichtert die Auslegung der Laserquelle zur Erzielung der gewünschten Temperaturverteilungen.

Lösungsweg

Für die Simulation wird von einem dreischichtigen Materialaufbau, bestehend aus Polyethylenbeschichtung, Aluminiumfolie und Grundwerkstoff, ausgegangen. Die numerische Berechnung der Temperaturverteilung erfolgt zeitabhängig, um den Prozess auch während der Einschaltphase des Lasers simulieren zu können. Neben den Parametern der Laserquelle (Leistung, Intensitätsverteilung) können die Prozessgeschwindigkeit und die Eigenschaften des Verbundmaterials (Materialkennwerte, Schichtstärken) variiert werden.

Ergebnisse

Abb. 2 zeigt eine berechnete Temperaturverteilung nach Erreichen des quasi-stationären Zustandes für eine Vorschubgeschwindigkeit von $w = 300 \text{ m min}^{-1}$. Aufgrund der geringen Ausdehnung der Polyethylenbeschicht stellt sich schnell eine über die Schichtdicke nahezu homogene Temperaturverteilung ein, die durch die Kenngrößen der Laserquelle sowie durch die Prozessparameter bestimmt wird. In Ergänzung zum Experiment sind begleitende Variantenrechnungen möglich, die eine Bewertung frei wählbarer Größen unter gegebenen technologischen Bedingungen gestatten. Wegen der zeitabhängigen Formulierung der Modellgleichungen lassen sich in ähnlicher Weise auch Vorgänge simulieren, bei denen die Deckschicht, z. B. im Rahmen einer thermischen Behandlung zur Modifikation der Kunststoffeigenschaften, nur kurzzeitig und örtlich begrenzt bestrahlt wird.

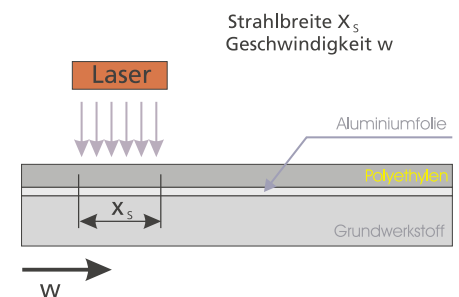


Abb. 1: Verfahrensprinzip

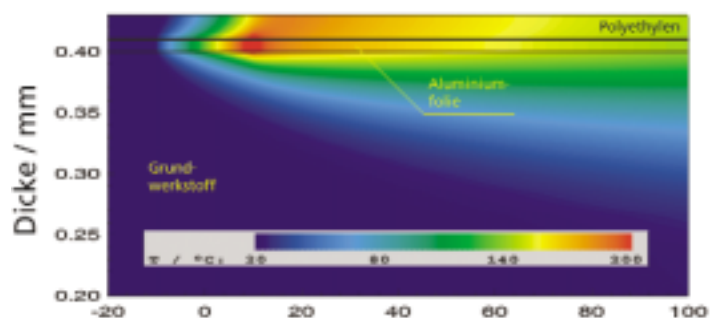


Abb. 2: Berechnete Temperaturverteilung im quasi-stationären Zustand

Ansprechpartner

Dr. Achim Mahrle
Tel.: 0351 / 2583 328
achim.mahrle@iws.fraunhofer.de



Prozessparameterbestimmung beim Laser-Pulver-Auftragschweißen durch Simulation mit LAVA

Aufgabenstellung

Das Laser-Pulver-Auftragschweißen wird hauptsächlich zur Beschichtung hochbelasteter Funktionsflächen auf Bauteilen und Werkzeugen, zur Reparatur verschlissener Turbinenbauteile und Umformwerkzeuge und zum Rapid Prototyping eingesetzt. Bei den meist relativ kleinen Stückzahlen sind die Kosten der Arbeitsvorbereitung ein wesentlicher Teil der Gesamtkosten.

Mit Hilfe einer Simulationssoftware kann das bisher notwendige zeitaufwendige Probieren bei der Suche nach geeigneten Prozessfenstern zwar nicht vermieden, aber von der teuren Produktionsanlage auf den Computer verlagert werden, was Kosten spart. Die Simulationssoftware soll für einen vorgegebenen Prozessparametersatz das zu erwartende Bearbeitungsergebnis ermitteln, mit den Anwendervorgaben vergleichen und daraus Empfehlungen für die Korrektur der Prozessparameter ableiten. Das ermöglicht die schrittweise Annäherung an einen Prozessparametersatz, der das gewünschte Bearbeitungsergebnis liefert. Dazu ist eine Serie von Simulationsrechnungen notwendig, weshalb die für einen Simulationslauf erforderliche Rechenzeit nicht zu groß sein darf.

In einer zweiten Stufe soll die Software nicht nur *einen möglichen*, sondern *den* in einem vorgebbaren Sinne *optimalen* Prozessparametersatz liefern. Das ist allerdings nur bei Kenntnis der vollständigen Lösungsmannigfaltigkeit des Problems möglich, also z. B. unter Verwendung einer mit Simulationsergebnissen gefüllten Datenbank.

Lösungsweg

Der erste Teil dieser Aufgabe wird mit der im IWS entwickelten Software LAVA gelöst, die sich derzeit in Erprobung befindet. LAVA simuliert die Wechselwirkung des als Pulverstrahl zugeführten Zusatzwerkstoffs mit dem Laserstrahl sowohl bei Verwendung einer Koaxialdüse (Abb. 1) als auch bei seitlicher Pulverzufuhr und berechnet daraus die auf das Werkstück einwirkenden Energie- und Masseströme. Unter Berücksichtigung der Einflüsse von Oberflächenspannung und Schwerkraft werden dann die Schweißbraupengeometrie und das Temperaturfeld im Werkstück so bestimmt, dass die Randbedingungen am Schweißraupenrand erfüllt werden (Abb. 2). Um Rechenzeit zu sparen, wird dabei das Temperaturfeld halb-analytisch unter Verwendung der Rosenthal-Lösung der Wärmeleitungsgleichung berechnet.

Das Programm liefert neben Temperaturverteilungen (s. z. B. Abb. 2) und Schweißraupenparametern auch Aussagen über die Effektivität des Pulver- und Energieeinsatzes, vergleicht das erhaltene Ergebnis mit den Wünschen des Anwenders und gibt ggf. Empfehlungen, wie die Prozessparameter zu korrigieren sind. Natürlich ist es auch möglich, einen oder mehrere Prozessparameter zu variieren, um die Abhängigkeit des Bearbeitungsergebnisses von diesen Parametern zu ermitteln und grafisch darzustellen (Abb. 3, 4).



Abb. 1: Wechselwirkung von Pulverteilchenstrom und Laserstrahl bei einer Koaxialdüse (schematisch)

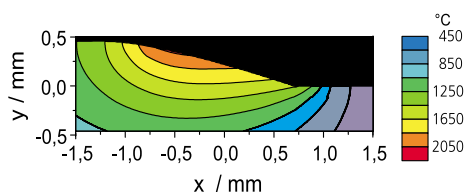


Abb. 2: Temperaturfeld in der Symmetrieebene einer Schweißraupe
(Parameter: Leistung $P = 685 \text{ W}$, Strahlradius $R = 1 \text{ mm}$, Pulvermassstrom $J = 3 \text{ g / min}$, Vorschubgeschw: $v = 500 \text{ mm / min}$, Umgebungstemperatur $T_U = 400 \text{ °C}$, Schmelztemperatur $T_M = 1450 \text{ °C}$)

Ansprechpartner

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



Für eine echte Prozessoptimierung muss der allgemeine Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Zielgrößen bekannt oder sehr schnell zu bestimmen sein, z. B. auf der Basis einer Datenbank mit Simulationsergebnissen. Die dort gespeicherten Beziehungen sind nach den jeweils gesuchten Größen aufzulösen. Das führt auf nichtlineare Gleichungssysteme, die mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus zu lösen sind, der zugleich die Berücksichtigung von Optimierungsforderungen erlaubt. Diese zweite Stufe steht noch aus, soll aber mit Hilfe von LAVA realisiert werden.

Ergebnisse

Mit LAVA kann verfolgt werden, wie sich das Bearbeitungsergebnis als Funktion der Prozessparameter verändert. Als Beispiel für ein mit LAVA erhaltenes Ergebnis betrachten wir die Abhängigkeit der Raupenquerschnittsfläche (Abb. 3) und der maximalen Schmelzbadtemperatur (Abb. 4) von der Vorschubgeschwindigkeit v , wenn gleichzeitig Laserleistung P und Pulvermassenstrom J konstant gehalten bzw. in definierter Weise variiert werden. Drei Varianten werden verglichen:

1. Laserleistung P und Pulvermassenstrom J konstant,
2. Laserleistung P und Streckenmasse J/v konstant,
3. Streckenmasse J/v konstant und Zunahme der Laserleistung P mit der Geschwindigkeit entsprechend

$$P \sim \sqrt{\frac{v R}{4 \kappa}}, \quad \kappa = \frac{\lambda}{\rho c}.$$

R : Laserstrahlradius
 λ : Wärmeleitfähigkeit
 ρ : Dichte
 c : spezifische Wärme

Der Leistungszuwachs in Variante 3 kompensiert die mit steigender Geschwindigkeit zunehmenden Wärmeleistungsverluste. So bleibt die Schweißraupengeometrie über einen relativ großen Geschwindigkeitsbereich praktisch konstant, und die Schmelzbadtemperatur fällt mit zunehmender Geschwindigkeit nur langsam ab. Diese Variante zeigt somit einen Weg zur Ausdehnung von Prozessfenstern in Richtung höherer Arbeitsgeschwindigkeiten.

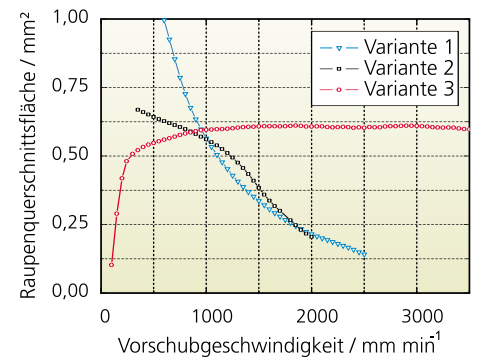


Abb. 3: Raupenquerschnittsfläche als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit für die Varianten 1 - 3

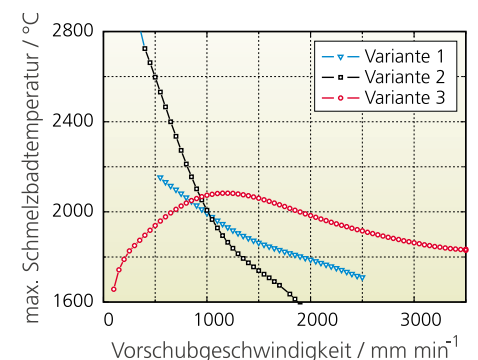


Abb. 4: Maximale Schmelzbadtemperatur als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit für die Varianten 1 - 3



Immersive Simulationen für komplexe dreidimensionale Prozesse

Aufgabenstellung

Bei vielen technischen Verfahren muss die Oberfläche dreidimensionaler Bauteile mit vordefinierten Zielstellungen und mit optimalen technischen Vorgaben modifiziert werden. Beispiele sind Beschichtungsvorgänge, Reinigungsverfahren oder Erzeugung definierter Eigenspannungszustände im Oberflächenbereich mit Strahl- und Plasmaverfahren. In Produktionsanlagen treten Abschattungs- und Projektionseffekte auf, die den Gebrauchswert der Produkte sehr mindern können. Wegen der Unübersichtlichkeit der räumlichen Situation, der Unsichtbarkeit innerer Abläufe in den Anlagen und der häufig hohen Geschwindigkeit der Vorgänge sind rein numerische Simulationen nicht zur Lösung geeignet. Zur Optimierung der Produktion muss ein hoher Aufwand an experimentellen Untersuchungen getrieben werden, meist hilft auch nur die langjährige Erfahrung der Verfahrensspezialisten.

Lösungsweg

Mit dem im Fraunhofer IWS entwickelten Programmsystem "SIMCOAT" werden komplexe dreidimensionale Abläufe rechnerisch nachvollzogen und visualisiert. Der Aufbau der Anlage und deren Betriebsparameter sind vom Nutzer festlegbar, die Bauteile können aus verschiedenen Formaten importiert und nötigenfalls nachbearbeitet werden. Mit wenigen Operationen an den Bedienmenüs ist der konkrete apparative Aufbau realisierbar, etwa die Situation in einer Beschichtungsanlage wie in Abb. 1. Die Visualisierung erfolgt entweder am PC-Bildschirm oder in Projektanlagen der Virtualen Realität (VR). Die im IWS eingesetzte Installation (Abb. 2) lässt über

die Projektion auf drei Flächen die virtuelle Anlage sichtbar werden. Am PC und noch effektiver in der VR-Anlage werden die Probleme der Unübersichtlichkeit durch interaktives Bedienen (Drehen, Zoomen, Verschieben), die der Unsichtbarkeit durch Verwendung von Falschfarben und Transparenzen behoben.

Zur mathematischen Beschreibung der unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen können angepasste physikalisch-technische Modelle aufgerufen werden. Die Simulationsergebnisse werden innerhalb des Gesamtprogramms durch ein analog zu bedienendes Tool visualisiert. Dadurch ist eine sofortige punktgenaue Analyse der erzielten Ergebnisse möglich, die Optimierung kann von diesem Ergebnis ausgehend zügig fortgesetzt werden.

Die modulare Programmstruktur ist für eine Anpassung des Programms an neue experimentelle Situationen geeignet, das betrifft sowohl den konstruktiven Aufbau der technischen Anlage als auch das zugrundeliegende technische Phänomen.

Ergebnisse

Verfügbar sind die Modelle zur Abscheidung durch das Vakuumbogenreverfahren und Anlagensimulationen für die Laser-Materialbearbeitung. Ein Ergebnis wird anhand eines Screenshots aus dem Programm in Abb. 3 gezeigt. Die Beschichtung eines Bohrers mit Kohlenstoff ist für jeden Oberflächenpunkt in ihrer mikroskopischen Struktur und der zeitlichen Abfolge des Beschichtungsvorganges in einem Bild verfügbar.

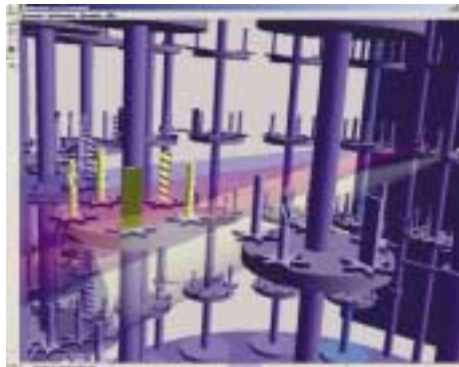


Abb. 1: Räumliche Situation einer Simulation in einer Beschichtungsanlage (Bauteile und Quellen)



Abb. 2: VR-Station für immersive Simulationen

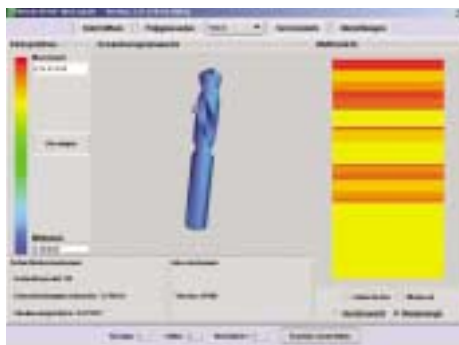


Abb. 3: Verteilung der Schichtdicken in Falschfarben und der sp^2 - sp^3 -Zustände an einem Punkt der Oberfläche

Ansprechpartner

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



VELI - Virtuelles Europäisches Laserinstitut

Aufgabenstellung

Die industrielle Umsetzung der Lasertechnologien hat mittlerweile alle Industriezweige in den weltweit entwickelten Ländern erreicht. Vorhandene Ressourcen und Kompetenzen sind über Universitäten, Forschungseinrichtungen und industrielle Applikationslabors verteilt. Es ist für potentielle Anwender, insbesondere auch für kleinere Unternehmen schwierig, den geeigneten Partner zu finden. Zur Beschleunigung der Einführung der hochproduktiven Technologien und zur Schaffung einer kompetenten Bündelung der Aktivitäten wird von der EU-Kommission ein Verbundprojekt "Virtuelles Europäisches Laserinstitut" gefördert.

Lösungsweg

In einem Konsortium aus 10 europäischen Ländern wird ein Internet-Informationssystem zur Lasertechnologie entwickelt. Das Ziel ist die Entwicklung und Implementierung einer internetbasierten Software mit umfassenden Funktionalitäten

- zur Community der Laseranwender (Personen, Ereignisse, Jobs),
- zu den Kompetenzen von Forschungseinrichtungen und Wirtschaftsunternehmen
- sowie zur Aus- und Weiterbildung.

Aktuelle Ereignisse werden weltweit in schnellster und übersichtlichster Weise bekannt gemacht. Suchfunktionen erleichtern die Arbeit mit dem Programmsystem.

Die Software gestattet es, dass sich die kooperierenden Mitglieder (Forschungseinrichtungen, Industriebetriebe und Ausrüster) in das virtuelle Institut selbst einbringen können, ohne über Spezialkenntnisse zur Software zu verfügen. Vor allem für klein- und mittelständische Betriebe kann ein sehr effektives Kosten-Leistungs-Verhältnis erzielt werden.

Das virtuelle Institut wird schrittweise von der Testphase in den regulären Betrieb gehen und ist unter <http://www.veli.net> erreichbar. Als Muster wird ein Teilaspekt des Gesamtvorhabens gezeigt. Führende Wissenschaftler werden unter dem Motto "Find an expert" vorgestellt. Dieses Tool ist als eine der ersten Möglichkeiten des Projekts europaweit offen.

Ergebnisse

Das virtuelle Institut wird ab Ende 2003 schrittweise öffentlich zugänglich sein. Die ersten Anwendungen werden Auskünfte zu den beteiligten europäischen Wissenschaftlern, die Bekanntmachung aktueller Ereignisse unter der Rubrik "News" sowie vorhandene Angebote zur Aus- und Weiterbildung sein.

Die Community wurde auf den Messen "Laser 2003" und "ICALEO 2003" informiert.



Abb. 1: Veli-Web-Auftritt "beteiligte Länder"



Abb. 2: Muster einer Seite "Find an expert"

Ansprechpartner

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



Der Staat ist für die Menschen da und nicht die Menschen für den Staat. Von der Wissenschaft kann das gleiche gesagt werden.

Albert Einstein

Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für Unternehmen und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand. 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 der Wirtschaft beitragen.

Mit technologie- und systemorientierten Innovationen für ihre Kunden tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Dabei zielen sie auf eine wirtschaftlich erfolgreiche, sozial gerechte und umweltverträgliche Entwicklung der Gesellschaft.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft eine Plattform zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, in anderen Bereichen der Wissenschaft, in Wirtschaft und Gesellschaft.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit rund 80 Forschungseinrichtungen, davon 58 Institute, an über 40 Standorten in ganz Deutschland. Rund 12 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von über 1 Milliarde €. Davon fallen mehr als 900 Millionen € auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Für rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft Erträge 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 in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Niederlassungen in Europa, in den USA und in Asien sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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).





Diplomarbeiten

F. Donner

(Westfälische Hochschule Zwickau)
"Laserstrahlreinigen von Fügestellen vor dem Laserstrahlschweißen"

M. Bieda

(Fachhochschule Merseburg)
"Untersuchungen zur Technologieentwicklung für die Herstellung durchflussbestimmter Bohrungen mittels Nd:YAG-Laser und Scannertechnik"

D. Buschmann

(Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD))
"Untersuchungen zur Herstellung von Werkzeugen aus Blechpaketen"
[2. Preis der Dr.-Rolf-Umbach-Stiftung zur Förderung innovativer Leistungen des wissenschaftlich technischen Nachwuchses auf dem Gebiet der Umformtechnik im Freistaat Sachsen](#)

S. Fischer

(Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD))
"Untersuchungen zur konstruktiven Gestaltung eines integrierten Bearbeitungskopfes für die Schweißnahtverfolgung mit Strahlablenkoptiken als hochdynamische Zusatzachsen"

M. Förster

(Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD))
"Einsatz der Verfahrenskette Laser-, Plasma-Auftragschweißen und Fräsen zur Reparatur, Oberflächenschutz und Rapid Tooling von Werkzeugen"

M. Fritsch

(Technische Universität Dresden)
"Untersuchungen zum statischen und zyklischen Festigkeitsverhalten von Laserstrahlschweißverbindungen aus Aluminium-Luftfahrtlegierungen"

K. Hohmann

(Hochschule Mittweida (FH))
"Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines gekoppelten Achssystems für das Remote-Schweißen von Nd:YAG-Laserstrahlung"

M. Ingwerth

(Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD))
"Ermittlung von Verfahrensgrundlagen zum Beschichten von Stahl-, Nickel- und Leichtmetallsubstraten durch Vakuum-Plasmaspritzen"

F. Judas

(Hochschule Mittweida (FH))
"Entwicklung und Konstruktion einer dynamischen Strahlformungseinheit für Hochleistungsdiodenlaser"

G. Langner

(Technische Universität Dresden)
"Verfahrens- und Technikentwicklung zum plasmaunterstützten Laserstrahl-Innenbeschichten"

S. Maßwig

(Westfälische Hochschule Zwickau (FH))
"Aufbau eines Bearbeitungssystems für die Strukturierung von Feinsteinzeug auf Basis eines Nd:YVO₄-Slab-Lasers"

M. Menzel

(Westfälische Hochschule Zwickau (FH))
"Untersuchungen zur Abscheidung von Kohlenstoff/Kohlenstoff-Nanometer-Multischichten mittels Pulsed Laser Deposition"

R. Niederlein

(Technische Universität Dresden)
"Zähigkeitsuntersuchungen an Laser-Hybrid- und MAG-Schweißungen des höherfesten Baustahls S1100QL"

T. Schäfer

(Hochschule Mittweida (FH))
"Laserstrahlschweißen einsatzgehärteter Getriebebauteile"

M. Scheer

(Hochschule Mittweida (FH))
"Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Laserstrahlschweißverbindungen der Magnesiumlegierung AZ31"

T. Schwabe

(Westfälische Hochschule Zwickau)
"Aufbau und Erprobung eines neuartigen Temperaturmessverfahrens für das Hochleistungs-Diodenlaserhärten"

M. Tittmann

(Hochschule Mittweida (FH))
"Untersuchung zu den prozess- und systemtechnischen Möglichkeiten und Grenzen des Hochgeschwindigkeits-Laserstrahlschweißens durch Strahlablenkung"

C. Wallenhauer

(Technische Universität Dresden)
"Entwicklung eines Messsystems zur Erfassung der Frequenz, Energie und Spitzenleistung gepulster Laserstrahlung"

Dissertationen

J. Braumöller

(Technische Universität Dresden)
"Beitrag zum flussmittelfreien Laserstrahlhartlöten von Aluminiumwerkstoffen"

J. Hackius

(Technische Universität Dresden)
"Laserstrahl-Hybridschweißen von Aluminiumlegierungen"



Vorlesungen

Vorlesungen am Institut für Produktionstechnik der TU Dresden im Wintersemester 2002 / 2003:

- Prof. Beyer: Fertigungstechnik II (Oberflächen- und Schichttechnik)
- Dr. Schultrich: Dünnschichttechnologie (Sonderwerkstoffe)
- Dr. Leson, Prof. Beyer: Oberflächen-technik / Nanotechnologie

Vorlesung am Institut für Produktionstechnik der TU Dresden im Sommersemester 2003:

- Prof. Beyer: Lasergrundlagen / Lasersystemtechnik
- Prof. Beyer: Praktikum Lasersicherheits- und Laserverfahrenstechnik

Vorlesungen am Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik der TU Dresden im Wintersemester 2003 / 2004:

- Prof. Beyer: Fertigungstechnik II (Oberflächen- und Schichttechnik)
- Dr. Schultrich: Dünnschichttechnologie (Sonderwerkstoffe)
- Dr. Leson, Prof. Beyer: Oberflächen-technik / Nanotechnologie
- Prof. Beyer: Rapid Protocoating

Vorlesung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden:

- Dr. Nowotny: Lasermaterialbearbeitung

Mitarbeit in Gremien

Prof. E. Beyer:
Mitglied des Präsidiums der Fraunhofer-Gesellschaft

Prof. E. Beyer:
Vorsitzender des Fraunhofer-Verbundes Oberflächen-technik und Photonik

Prof. E. Beyer:
Direktor des Institutes für Oberflächen-technik und Fertigungsmesstechnik IOF der TU Dresden

Prof. E. Beyer:
Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik WLT e.V.

Prof. E. Beyer:
Laser Institute of America (LIA),
Board of Directors, President Past 2003

Prof. E. Beyer:
Mitglied des Materialforschungsverbundes Dresden e.V.

Prof. E. Beyer:
Mitglied der Sachsenberg-Gesellschaft e.V.

Prof. E. Beyer:
Mitglied des Bundesverbandes mittelständische Wirtschaft e.V.

Prof. E. Beyer:
Kuratoriumsmitglied der Palucca - Hochschule Dresden

Prof. E. Beyer:
Mitglied der Europäischen Forschungsgesellschaft "Dünne Schichten" e.V.

Prof. E. Beyer:
Mitglied des Kompetenzzentrums "Luft- und Raumfahrttechnik Sachsen e.V."

Prof. B. Brenner:
Fachausschuß 9 der AWT "Randschichtbehandlung und Kurzzeitaustenitisierung"

Prof. B. Brenner:
Mitglied Gutachterausschuss der AiF

Dr. I. Jansen:
Mitglied der DECHEMA, Fachsektion "Klebtechnik"

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:
Mitglied des Arbeitskreises Zukunftstechnologien der Stadt Dresden

Dr. A. Leson:
Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats des Vereins Deutscher Ingenieure

Dr. A. Leson:
Vorsitzender des VDI-Kompetenzfeldes Nanotechnik

Dr. A. Leson:
Mitglied des International Advisory Board der Zeitschrift "Micromaterials and Nanomaterials"

Dr. S. Nowotny:
DVS-Arbeitsgruppe V9.2 / AA 15.2 "Laserstrahlschweißen und verwandte Verfahren"

Dr. S. Nowotny:
Gemeinschaft Thermisches Spritzen (GTS) e.V.

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



Besondere Ereignisse

06. - 07. Mai 2003

4. Workshop "Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern"

02. - 05. September 2003

Surface Engineering und Nanotechnologie (SENT)

Unter dieser Bezeichnung, die die Bedeutung nanotechnologischer Aspekte für die moderne Dünnschichttechnologie ausdrückt, startete das IWS in Zusammenarbeit mit der TU Dresden Weiterbildungskurse zur industriellen Dünnschichttechnologie. Sie werden sowohl als allgemeine Kurse im IWS als auch als speziell angepasste Veranstaltungen bei den Unternehmen durchgeführt.

20. - 21. November 2003

Nanofair 2003 - Internationales Nanotechnologie-Symposium Dresden. Karlsruhe. Strassbourg im Sächsischen Landtag Dresden

30. November 2003

4. Fachsymposium Oberflächentechnik im Dortmunder OberflächenCentrum der ThyssenKrupp Stahl AG

Preise des IWS 2003

1. Beste innovative Produktidee

Herr Stamm

"Legierungsschweißen von Mischverbindungen Gusseisen-Einsatzstahl im Bereich Powertrain"

2. Beste wissenschaftlich-technische Leistung

Herr Hauptmann, Frau Klotzbach, Herr Dr. Schwarz, Herr Tittmann
"Neuartiges Konzept einer laserbasierten Anlage zur kontinuierlichen Strukturierung der magnetischen Domänenstruktur an kornorientiertem Elektroblechband"

Herr Dr. van Loyen, Herr Böttger, Herr Friedrich

"Aufbau eines Labor-EUV-Reflektometers"

3. Beste wissenschaftliche Leistung eines Nachwuchswissenschaftlers

Frau Rogler, Herr Mäder

"Abscheidung nichtoxidischer Funktionsschichten mittels Atmosphärendruck-Plasma-CVD am Beispiel von Siliziumnitrid"

4. Beste wissenschaftliche studentische Leistung

Herr Wallenhauer

"Entwicklung eines Messsystems zur Erfassung der Frequenz, Energie und Spitzenleistung gepulster Laserstrahlung"

5. Sonderpreis

Herr Prof. Brenner

"Anerkennung der hervorragenden Leistungen für 9 besonders erfolgreiche Industrieüberführungen im Jahr 2003"



Auf der Nanofair werden die neuesten Forschungsergebnisse und Anwendungen der Nanotechnologie präsentiert



Freude bei unseren besten Nachwuchswissenschaftlern



Prof. Brenner erhält den Institutspreis für besonders erfolgreiche Industrieüberführungen



Messebeteiligungen

Messe Learntec 2003 Karlsruhe,
04. - 07. Februar 2003

Unter dem Motto "Fraunhofer-eQualifikation - das Wissen der Wissenschaft" präsentierten sich 15 Institute der Fraunhofer-Gesellschaft in Karlsruhe. Die Arbeitsgruppe Multimedia beteiligte sich in Zusammenarbeit mit anderen Gruppen des IWS erstmals an der Veranstaltung "12. Europäischer Kongress und Fachmesse für Bildungs- und Informationstechnologie". Vorge stellt wurden an PC-Arbeitsplätzen:

- CD-ROM's "Laserlexikon" und "Lasersicherheit",
- eLearning-Produkte: "Hybride Laserstrahlschweißverfahren" und "Beschichtungstechnik",
- Verfahren zur Direktübertragung von Veranstaltungen: "Business-TV" und "Lehrmittelsatz Reflektometrie".

Hannover-Messe Industrie 2003,
07. - 12. April 2003

Im Rahmen des Gemeinschaftsstandes "Laser Technology" präsentierte das IWS in Halle 6 - Micro Technology - auf einer 60 m² großen Fläche neueste Ergebnisse angewandter Forschung auf dem Gebiet der Lasermaterial- und Mikrobearbeitung. Bereits zum wiederholten Mal waren auf dem Stand des IWS auch Partnerfirmen vertreten; zusammen mit den Firmen ALOtec GmbH Dresden, EFD Induction GmbH Freiburg, Linde AG München und dem Ingenieurbüro Norbert Derenda wurden Ergebnisse gemeinsamer Forschungsprojekte gezeigt.

Unter dem Warenzeichen "lasertronic®" wurden schwerpunktmäßig intelligente Systeme unter Nutzung des Lasers gezeigt. Ein Roboter führte auf einer

Station das im IWS entwickelte laserunterstützte thermische Spritzen vor.

Die Richtigkeit der Entscheidung, die Präsentationen des IWS auf der Hannover-Messe 2003 zu erweitern, wurde durch ca. 165 relevante Kundenkontakte bestätigt.

Messe Simpat 2003 Nürnberg,
13. - 15. Mai 2003

Die Arbeitsgruppen "Grundlagen / Simulation" und "Multimedia" des IWS und des Lehrstuhles LOT beteiligten sich erstmals an dieser "Fachmesse für Simulation und Visualisierung von Prozessen, Anwendungen und Technologien". Vorge stellt wurden

1. die im IWS entwickelten Softwareprodukte "LAVA" zur Prozess-Simulation des Laser-Pulver-Auftragsschweißens bzw. "GEOPT" und "PROFeT" zur Simulation des Laserstrahlhärtens,
2. das im Rahmen des Verbundprojekts "SIMKOPP" entwickelte Simulationsprogramm "SimCoat" zur Optimierung von Beschichtungen dreidimensionaler Bauteile in technischen Anlagen,
3. ein multimediales Laserlexikon, das eine große Zahl technologisch wichtiger Begriffe aus dem Bereich der Lasertechnik und der Lasermaterialbearbeitung sowie die physikalischen Grundlagen dieser Technologien anhand von zahlreichen Visualisierungen und Computeranimationen veranschaulicht und erklärt sowie
4. die vom IWS angebotene CD-ROM "Lasersicherheit" mit den gesetzlichen Bestimmungen zum Arbeitsschutz beim Umgang mit der Lasertechnik und Erläuterungen zu potentiellen Schädigungen durch Laserstrahlung sowie zu Möglichkeiten, diese zu vermeiden.



Großes Besucherinteresse am Stand des Fraunhofer IWS auf der Laser-Messe 2003



Präsentation des Fraunhofer IWS auf der Laser-Messe 2003



Messe Achema 2003 Frankfurt / M.,
19. - 24. Mai 2003

Gleich zwei Arbeitsgruppen des IWS beteiligten sich an dieser Messe für chemische Technik, Umweltschutz und Biotechnologie.

Die Abteilung Thermische Beschichtungsverfahren zeigte gemeinsam mit dem Dresdner Fraunhofer IKTS die technologische Kette von der Pulverherstellung bis zum Auftragen auf das Bauteil.

Die Gruppe Mikrobearbeiten und Reinigen war im Rahmen der Fraunhofer-Allianz Proteinchips vertreten. Das IWS präsentierte ortsselektiv funktionalisierte und strukturierte Oberflächen für Biochipanwendungen, Komponenten für Mikrofluidiksysteme sowie hydrophobe DLC-Schichten für Anti-Fouling-Oberflächen.

Messe StoneTec 2003 Nürnberg,
24. Mai - 01. Juni 2003

Auf der 13. 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.

Messe Thermprocess 2003 Düsseldorf,
16. - 21. Juni 2003

4 Messen (GIFA, METEC, Thermprocess, Newcast) zur gleichen Zeit, am gleichen Ort, mit dem Ziel des unmittelbaren Austausches der industriellen Anwender, Forschungseinrichtungen und industriellen Vereine. Auf der Thermprocess-Messe präsentierte das IWS in unmittelbarer Nachbarschaft zu unserem Partner EFD Induction GmbH Freiburg vor allem Laserhärte-technologien, welche besonders im Fahrzeug-Antriebsbereich und Werkzeugbau ihre Anwendungen finden. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Aussteller gab es auch Anfragen über die ausgestellten Exponate hinaus und führte so zu einem regen Erfahrungsaustausch.

Laser-Messe 2003 München,
23. - 26. Juni 2003

Zusammen mit zwei weiteren Fraunhofer-Instituten präsentierte sich das IWS auf dem 160 m² großen Gemeinschaftsstand. Gezeigt wurden neueste Entwicklungen auf dem Gebiet des laserunterstützten thermischen Spritzens, des Laserstrahlschweißens und Laserstrahlhärtens sowie der Lasermikrobearbeitung.

Ferner wurde eine neuartige mobile Anlage zur rutschhemmenden Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge mittels Lasermikrostrukturierung präsentiert. Erstmals wurde die überarbeitete und aktualisierte Version 2.0 des Laserlexikons aus dem Fraunhofer IWS Dresden einer breiten Öffentlichkeit vorgeführt.

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



Fraunhofer-Gemeinschaftsstand auf der Biotechnica 2003



Präsentation des Fraunhofer IWS auf der Euromold 2003



Messe Biotechnica 2003 Hannover,
07. - 09. Oktober 2003

Die Arbeitsgruppe Mikrobearbeiten und Reinigen des IWS beteiligte sich erstmals an dieser Internationalen Fachmesse für Biotechnologie. Vorge stellt wurden die gemeinsamen Ergebnisse, die im Rahmen der Fraunhofer-Allianz Proteinchips erarbeitet wurden. Das IWS präsentierte ortsselektiv funktionalisierte und strukturierte Oberflächen für Biochipanwendungen sowie Komponenten für Mikrofluidiksysteme.

Messe Parts2clean Friedrichshafen,
28. - 30. Oktober 2003

Das IWS präsentierte auf dieser Messe eine Lösung zur partiellen Reinigung von Bauteilen mittels Laserstrahlen. Die besonderen Merkmale sind die Integration des Reinigungsschrittes in die automatisierte Fertigung, die Realisierung kurzer Taktzeiten, die Möglichkeit der Reinigung der für den Folgearbeitsschritt notwendigen Funktionsflächen an Bauteilen im vormontierten Zustand sowie der Verzicht auf Löse mittel bzw. anderweitige Reinigungsmedien. Die Lösung wurde am Beispiel der Abreinigung von z. B. Kühl- und Schmierstoffresten sowie Konservierungsmitteln im Bereich der Fügstellen an Differentialkorb und Kegelrad vor dem Laserstrahlschweißen der Fügepartner in der Achsausgleichsgetriebefertigung vorgestellt.

Messe Euromold 2003 Frankfurt / M.,
03. - 06. Dezember 2003

An der Branchenmesse zum Formen-, Modell- und Werkzeugbau sowie zur Gießereitechnik beteiligte sich das IWS bereits zum achten Mal. Es wurden Ergebnisse aus dem Projekt "MELATO" vorgestellt, welches das Ziel verfolgt, eine neue Prozesskette zur schnellen Fertigung von komplex geformten Werkzeugen von bis zu 1,5 m Kantenlänge zu entwickeln. Die gezeigten Prägewerkzeuge 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.



Präsentation des Fraunhofer IWS auf der Messe Parts2clean 2003



Erfahrungsaustausch auf der Euromold 2003

- [L01] H.-A. Bahr, H. Balke, T. Fett, I. Hofinger, G. Kirchhoff, D. Munz, A. Neubrand, A. S. Semenov, H.-J. Weiß, Y. Y. Yang
"Cracks in Functionally Graded Materials"
 Materials Science & Engineering A 362 (2003) 1-2, S. 2-16
- [L02] L.-M. Berger, R. Lang, R. Neugebauer, S. Ortman, E. Trageser, R. Wolf, R. Zieris
"Thermische Spritzschichten zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit von innenhochdruck-umgeformten Rohren"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM 2003), im Druck
- [L03] L.-M. Berger, S. Zimmermann, H. Keller, G. Schwier, R. Scholl, S. Thiele, M. Nebelung, R. Enzl
"Microstructure and Properties of HVOF-Sprayed TiC-Based Coatings"
 International Thermal Spray Conference 1 (2003) S. 793-799
- [L04] E. Beyer
"Laser Technology for New Markets - Applications Highlights"
 6. International Laser Marketplace - Anwendung im Dialog (2003) S. 5-15
- [L05] E. Beyer, S. Bonß, S. Nowotny
"Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern"
 Jahrbuch der Oberflächentechnik 2003, Band 59 (2003) S. 137-141
- [L06] E. Beyer, B. Brenner, S. Nowotny
"Overview of Hybrid Technology"
 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (2003) S. 139-144
- [L07] E. Beyer, B. Brenner, S. Nowotny, C. Walz
"Laser Applications for Automotive Powertrain Components"
 Powertrain International 6 (2003) 1, S. 10-18
- [L08] E. Beyer, A. Klotzbach, V. Fleischer, L. Morgenthal
"Nd:YAG - Remote Welding with Robots"
 2nd Internatonaional WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (2003) S. 367-374
- [L09] E. Beyer, G. Wiedemann, J. Hauptmann
"Rutschhemmung vor Ort"
 Stone Plus (2003) 5, S. 54-55
- [L10] S. Bonß, B. Brenner, H.-J. Scheibe, E. Beyer
"Laser Gas Alloying of Titanium - Process Technology and Wear Test Results"
 10th World Conference on Titanium (Ti-2003), im Druck
- [L11] S. Bonß, G. Göbel, M. Seifer, B. Brenner, E. Beyer
"Fast and Innovative Determination of Parameters for Steel Hardening with High Power Diode Lasers"
 High-Power Laser Macroprocessing - Proc. of the SPIE 4831 (2003), S. 53-58
- [L12] S. Bonß, M. Seifert, B. Brenner, E. Beyer
"Precision Hardening with High Power Diode Lasers using Beam Shaping Mirror Optics"
 High-Power Diode Laser Technology and Applications - Proc. of the SPIE 4973 (2003) S. 86-93
- [L13] S. Bonß, M. Seifert, B. Brenner, E. Beyer
"Neue Entwicklungen zum Randschicht-härten mit Hochleistungsdiodenlasern"
 5. Industriefachtagung "Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik" (OWT '03) und 6. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) 1 (2003) S. 175-180
- [L14] T. Böttger, D. C. Meyer, P. Paufler, S. Braun, M. Moss, H. Mai, E. Beyer
"Thermal Stability of Mo/Si Multilayers with Boron Carbide Interlayers"
 Thin Solid Films 44 (2003) 1-2, S. 165-173
- [L15] S. Braun, T. Foltyn, L. van Loyen, M. Moss, A. Leson
"Multi-Component EUV Multilayer Mirrors"
 Emerging Lithographic Technologies VII - Proc. of the SPIE 5037 (2003) S. 274-285
- [L16] S. Braun, T. Foltyn, H. Mai, M. Moss, A. Leson
"Grenzflächen-optimierte Mo/Si Multischichten als Reflektoren für den EUV Spektralbereich"
 Vakuum in Forschung und Praxis 15 (2003) 2, S. 76-81
- [L17] S. Braun, L. v. Loyen, H. Mai, A. Leson
"Lichtstarke Röntgenspiegel - Interferenz-Multischichten zwingen Röntgenstrahlen in produktive Bahnen"
 Laser + Photonik (2003) 1, S. 18-21
- [L18] S. Braun, H. Mai
"Multilayer and Single-Surface Reflectors for X-Ray Optics"
 Metal Based Thin Films for Electronics (2003) Kap. 2.5, S. 93-120
- [L19] S. Braun, H. Mai
"Multilayers for X-Ray Optics Purposes"
 Metal Based Thin Films for Electronics (2003) Kap. 4.6, S. 277-316
- [L20] S. Braun, H. Mai
"X-Ray Optical Systems"
 Metal Based Thin Films for Electronics (2003) Kap. 5.4, S. 342-364
- [L21] B. Brenner, J. Standfuß, A. Zwick, B. Winderlich, A. Jahn, E. Beyer
"New Developments in Laser Hybrid Welding Technologies and Laser Welding Systems"
 Shipyard Applications for Industrial Lasers (2003)
- [L22] N. J. M. Carvalho, E. Zoestbergen, B. J. Kooi, J. Th. M. De Hosson
"Stress Analysis and Microstructure of PVD Monolayer TiN and Multilayer TiN / (Ti,Al)N Coatings"
 Thin Solid Films 429 (2003) 1-2, S. 179-189
- [L23] S. Carvalho, E. Ribeiro, L. Rebouta, F. Vaz, E. Alves, D. Schneider, A. Cavaleiro
"Effects of the Morphology and Structure on the Elastic Behavior of (Ti,Si,Al)N Nanocomposites"
 Surface & Coatings Technology 174-175 (2003) S. 984-991
- [L24] R. Dietsch, S. Braun, T. Holz, A. Leson
"High Precision PLD of nm-Single and Multilayer and Their Applications as X-Ray Optics"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM 2003) im Druck

- [L25] T. Foltyn, S. Braun, M. Moss, A. Leson
"Deposition of Multilayer Mirrors with Arbitrary Period Thickness Contributions"
 Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser and other Applications - Proc. of the SPIE 5193 (2003), S. 124-133
- [L26] P. Gawlitza, K. Jacob, T. Sebald, S. Beyer, A. Leson
"Tailored Internal Coating of Components by PLD and Pulsed Laser Evaporation"
 International Conference on Laser Ablation 2003 (COLA '03)
- [L27] J. Hauptmann, G. Wiedemann
"Laser Microstructuring of Polished Floor Tiles"
 Machining of Natural Stone Materials - Key Engineering Materials, Vol. 250 (2003) S. 262-267
- [L28] L. Herbst, J. P. Quitter, G. M. Ray, T. Kuntze, A. O. Wiessner, S. V. Govorkov, M. Heglin
"High Peak Power Solid State Laser for Micromachining of Hard Materials"
 Solid State Lasers XII - Proc. of the SPIE 4968 (2003) S. 134-142
- [L29] T. Himmer, E. Beyer
"New Developments in Surface Technology and Prototyping"
 High-Power Laser Macroprocessing - Proc. of the SPIE 4831 (2003) S. 468-474
- [L30] T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer
"Formen aus paketierte Blechzuschnitten"
 Der Stahlformenbauer 20 (2003) 4, S. 36-39
- [L31] T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer
"Werkzeuge aus paketierte Blechzuschnitten"
 Der Schnitt- & Stanzwerkzeugbau 10 (2003) 4, S. 6-9
- [L32] T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer
"New Developments in Metal Laminated"
 24th Japan Rapid Prototyping Symposium (2003) S. 97-102
- [L33] T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer
"Recent Developments in Metal Laminated Tooling by Multiple Laser Processing"
 Rapid Prototyping Journal 9 (2003) 1, S. 24-29
- [L34] V. Hopfe, D. W. Sheel, C. I. M. A. Spee, R. Tell, P. Martin, A. Beil, M. Pemble, R. Weiss, U. Vogt, W. Grähler
"In-Situ Monitoring for CVD Processes"
 Thin Solid Films 442 (2003) 1-3, S. 60-65
- [L35] R. Jäckel
"Nanotechnologie-Kompetenzzentrum "Ultradünne funktionale Schichten""
 Wirtschafts- und Wissenschaftsstandort Region Dresden (2003), S. 110-113 (Europäischer Wirtschaftsverlag GmbH Darmstadt, ISBN 3-932845-65-X)
- [L36] I. Jansen, E. Beyer
"Vergleich verschiedener Klebflächenvorbehandlungen von Magnesiumbauteilen"
 17. Internationales Symposium Swiss Bonding (2003) S. 25-39
- [L37] J. Kaspar, A. Luft, S. Bonß, B. Winderlich, B. Brenner
"A Detailed Study of the Microstructures Formed During Laser Nitriding of Ti-6Al-4V under Different Gas Atmospheres"
 10th World Conference on Titanium (Ti-2003), im Druck
- [L38] G. Kirchhoff, T. Göbel, H.-A. Bahr, H. Balke, K. Wetzig, K. Bartsch
"Damage Analysis for Thermally Cycled (Ti,Al)N Coatings-Estimation of Strength and Interface Fracture Toughness"
 Surface & Coatings Technology (2003), im Druck
- [L39] H. Kleinert, S. Bräunling, I. Jansen, R. Häßler, F. Liebrecht
"Patchworkkleben - partielle Verstärkung von Blechbauteilen für Fahrzeuge"
 17. Internationales Symposium Swiss Bonding (2003) S. 142-154
- [L40] A. Klotzbach, V. Fleischer, L. Morgenthal, E. Beyer
"Remote-Welding mit Hochleistungs-YAG-Lasern"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM 2003) im Druck
- [L41] F. Kretschmar, D. Pollack, L. Morgenthal, E. Beyer
"Temperaturkontrolliertes Randschicht-härten von 3D-Werkzeugen mit CO₂-Laser"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM 2003) im Druck
- [L42] T. Kuntze, M. Panzner, U. Klotzbach, E. Beyer
"New Excimer Laser Marking Method Using MMD"
 Laser Precision Microfabrication - Proc. of the SPIE 5063 (2003) S. 381-385
- [L43] H.-G. Kusch, T. Heinze, G. Wiedemann
"Hazardous Emissions and Health Risk During Laser Cleaning of Natural Stones"
 Journal of Cultural Heritage 4 (2003) Supp. 1, S. 38s-44s
- [L44] R. Lenk, A. Nagy, A. Techel
"Lasersintern von technischer Keramik"
 16. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM 2003) im Druck
- [L45] R. Lenk, A. Nagy, A. Techel
"Material Development for Laser Sintering of High Temperature Strength Silicon Carbide with Extrem Hardness"
 International User's Conference on Rapid Prototyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing (uRapid 2003) im Druck
- [L46] D. Lepski, H. Eichler
"Software zur Prozess-Simulation des Laser-Pulver-Auftragschweißens"
 JOT - Journal für Oberflächentechnik 43 (2003) 1, S. VI-IX
- [L47] D. Lepski, H. Eichler, S. Scharek, V. Fux, S. Nowotny, E. Beyer
"Simulation of Laser Beam Cladding by Powder Injection"
 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (2003) S. 345-350
- [L48] D. Lepski, S. Pamin
"Simulation komplexer oberflächentechnischer Produktionsprozesse"
 Journal für Oberflächentechnik (JOT) 43 (2003) 1, S. I-III

- [L49] A. Leson
"Nano: Die Technologie des 21. Jahrhunderts"
 Picture of the Future (2003) 1, S. 22
- [L50] A. Leson
"Nanometer-Schichtsysteme für Röntgenoptiken"
 Nanotechnologie in der industriellen Anwendung (2003) S. 54-86
- [L51] L. van Loyen
"Neues EUV-Reflektometer entwickelt"
 QM-Infocenter.de (2003) 09.06.2003
- [L52] L. van Loyen, T. Böttger, S. Braun, H. Mai, A. Leson, F. Scholze, J. Tümmeler, G. Ulm, H. Legall, P. Nickles, W. Sandner, H. Stiel, C. Rempel, M. Schulze, J. Brutscher, F. Macco, S. Müllender
"A New Laboratory EUV Reflectometer for Large Optics using a Laser Plasma Source"
 Metrology, Inspection and Process Control for Microlithography XVII - Proc. of the SPIE 5038 (2003) S. 12-21
- [L53] M. Menzel, D. Weißbach, P. Gawlitza, R. Dietsch, A. Leson
"Deposition of High-Resolution Carbon / Carbon Multilayers on Large Areas for X-Ray Optical Applications"
 International Conference on Laser Ablation 2003 (COLA '03), im Druck
- [L54] T. Naumann, L.-M. Berger, M. Ingwerth, P. Vuoristo
"Titanium Suboxide Coatings Prepared by VPS Spraying"
 International Thermal Spray Conference 2 (2003) S. 1441-1445
- [L55] K. Neufuss, J. Dubsy, P. Rohan, B. Kolman, P. Charska, L.-M. Berger, R. Zieris, S. Thiele, M. Nebelung
"Structure and Properties of CaZrO₃ Coatings Prepared by WSP and APS Spraying"
 International Thermal Spray Conference 2 (2003) S. 1541-1546
- [L56] S. Nowotny, T. Himmer, A. Techel, E. Beyer
"Laminated Tooling by Multiple Laser Processing"
 The Industrial Laser User (2003) 32, S. 35-37
- [L57] S. Nowotny, S. Scharek, F. Kempe, E. Beyer
"COAXn: Modular System of Powder Nozzles for Laser Beam Build-Up Welding"
 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2003), CD-ROM
- [L58] S. Nowotny, S. Scharek, T. Naumann
"Integrated Machine Tool for Laser Beam Cladding and Freeforming"
 International Thermal Spray Conference 1 (2003) S. 629-631
- [L59] S. Nowotny, S. Scharek, F. Kempe, M. Förster, A. Schmidt
"Präzisionsauftragschweißen mit laserbasierten hybriden Fertigungsverfahren"
 wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 11, S. 735-739
- [L60] B. Petereit, H.-H. Schneider, P. Siemroth, H. Hilgers
"Hochstrom-Filterbogen: eine neue Technik zur Abscheidung von Kohlenstoffschichten in der Magnet-speichertechnologie"
 Vakuum in Forschung und Praxis 15 (2003) 5, S. 246-252
- [L61] B. Petereit, P. Siemroth, H.-H. Schneider, H. Hilgers
"High Current Filtered Arc Deposition for Ultra Thin Carbon Overcoats on Magnetic Hard Disks and Read-Write Heads"
 Surface & Coatings Technology 174-175 (2003) 1-3, S. 648-650
- [L62] P. Pesch, S. Sattel, S. Woestmann, P. Masarczyk, K. Herden, T. Stucky, A. Martens, S. Ulrich, H. Holleck
"Performance of Hard Coated Steel Tools for Steel Sheet Drawing"
 Surface & Coatings Technology 163-164 (2003) 1-3, S. 739-746
- [L63] E. Pfeiffer, E. Beyer, L. Morgenthal
"Precision Laser Beam Cutting of Sheet Metal Segments"
 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2003 (2003) S. 439-442
- [L64] A. Rudolf, J. Gehrke, W.-D. Kaiser, H. Kleiner, I. Jansen
"Korrosion an geklebten Aluminiumwerkstoffen"
 Adhäsion - Kleben & Dichten 47 (2003) 3, S. 40-45
- [L65] T. Rümenapp, A. Lenk
"Laser Beam Cutting of Concrete"
 Machining of Natural Stone Materials - Key Engineering Materials, Vol. 250 (2003) S. 257-261
- [L66] H.-J. Scheibe, B. Schultrich
"Neuere Entwicklungen reib- und verschleißmindernder Schichten"
 Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (VVD 2003) (2003) S. 593-602
- [L67] F. Scholze, F. Scholz, J. Tümmeler, G. Ulm, H. Legall, P.-V. Nickles, W. Sandner, H. Stiel, L. van Loyen
"Characterization of a Laser Pulsed Plasma Source for a Laboratory EUV Reflectometer"
 Emerging Lithographic Technologies VII - Proc. of the SPIE 5037 (2003) S. 670-681
- [L68] B. Schuhmacher, C. Schwerdt, U. Seyfert, O. Zimmer
"Innovative Steel Strip Coatings by Means of PVD in a Continuous Pilot Line: Process Technology and Coating Development"
 Surface & Coatings Technology 163-164 (2003) S. 703-709
- [L69] B. Schultrich
"Neuartige Hartstoffschichten durch Nanotechnologie"
 Jahrbuch der Oberflächentechnik 2003, Band 59 (2003) S. 128-136
- [L70] B. Schultrich
"Superharte amorphe Kohlenstoffschichten"
 Vakuum in Forschung und Praxis 15 (2003) 4, S. 209-215
- [L71] B. Schultrich
"Superharte Kohlenstoffschichten durch Nanometer-Schichtdesign"
 Nanotechnologie in der industriellen Anwendung (2003) S. 121-144

- [L72] B. Schultrich, S. Völlmar
"Licht als Werkzeug - Vom Brennspiegel zum Solarofen und Leistungslaser"
 Kolloquium aus Anlass des 350. Geburtstages von E. W. von Tschirnhaus (2003) S. 17-28
- [L73] R. J. G. Sobott, T. Heinze, K. Neumeister, J. Hildenhagen
"Laser Interaction with Polychromy: Laboratory Investigations and On-Site Observations"
 Journal of Cultural Heritage 4 (2003) Suppl. 1, S. 276s-286s
- [L74] T. Stucky
"Laserunterstützte Beschichtung von Werkzeugen mit superharten Kohlenstoffschichten"
 13. Werkzeugseminar "Laser-Einsatz in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie" (2003)
- [L75] A. Techel
"Umformwerkzeuge scheinchenweise"
 Das IndustrieMagazin (MM) (2003) 22, S. 22-25
- [L76] A. Techel
"Rapid Prototyping und Rapid Tooling - Schneller von der Produktidee zum Marktangebot"
 2. Industrielles Symposium Mechatronik (2003), im Druck
- [L77] A. Techel
"Werkzeugfertigung durch Metal Laminated Tooling (MELATO)"
 13. Werkzeugseminar "Laser-Einsatz in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie" (2003)
- [L78] A. Techel, M. Förster, A. Schmidt, S. Scharek, S. Nowotny
"Einsparungspotential beim generativen Auftragschweißen"
 5. Industriefachtagung "Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik" (OWT '03) und 6. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) 2 (2003) S. 361-364
- [L79] A. Techel, T. Himmer
"Joining Techniques for Metal Laminated Tooling"
 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2003), CD-ROM
- [L80] A. Techel, T. Himmer
"Prototypwerkzeuge mit seriennahen Eigenschaften"
 Trendbarometer Technik (2003) S. 178-179
- [L81] A. Techel, T. Kretzschmar, S. Scharek, S. Nowotny, A. Uelze
"Spannungs- und Verformungsuntersuchungen beim Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen"
 5. Industriefachtagung "Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik" (OWT '03) und 6. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) 2 (2003) S. 320-325
- [L82] A. Techel, R. Lenk
"Lasersintern von SiSiC - Herstellung und Eigenschaften von Bauteilen"
 DKG-Handbuch (2003), im Druck
- [L83] A. Techel, S. Nowotny
"Oberflächenbehandlung von Leichtmetallen durch Laserauftragschweißen"
 Jahrbuch der Oberflächentechnik 2003, Band 59 (2003) S. 163-172
- [L84] A. Techel, S. Nowotny, A. Nagy, R. Lenk
"Herstellung und Eigenschaften laser-gesinterter SiSiC-Bauteile"
 Symposium Keramik im Fahrzeugbau (2003)
- [L85] A. Techel, S. Nowotny, A. Nagy, R. Lenk
"Laser Sintering of Complex-Shaped Ceramic Prototypes"
 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2003), CD-ROM
- [L86] M. Uusitalo, P. Vuoristo, T. Mäntylä, L.-M. Berger, R. Backman
"The Effect of Chlorine on Degradation Mechanism of Thermal Sprayed Coatings"
 International Thermal Spray Conference 1 (2003) S. 485-494
- [L87] V. Verges-Belmin, G. Wiedemann, L. Weber, M. Cooper, D. Crump, R. Gouverne
"A Review of Health Hazards Linked to the Use of Lasers for Stone Cleaning"
 Journal of Cultural Heritage 4 (2003) Supp. 1, S. 33s-37s
- [L88] S. Völlmar, B. Kunath, G. Arlt
"Multimediales Laserlexikon"
 wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 6, S. 476-477
- [L89] S. Völlmar, B. Schultrich, D. Römer
"Simulationsprogramm für die industrielle Vakuumbogenbeschichtung"
 Journal für Oberflächentechnik (JOT) 43 (2003) 1, S. XIV-XVI
- [L90] S. Völlmar, B. Schultrich, D. Römer, H.-J. Scheibe
"SimCoat - Ein Programmsystem zur Optimierung von Beschichtungstechnologien"
 Coating 36 (2003) 8, S. 318-322
- [L91] V. Weihnacht, W. Grimm
"Puls-Arc-Technik für die Abscheidung von harten Kohlenstoffschichten"
 5. Industriefachtagung "Oberflächen- und Wärmebehandlungstechnik" (OWT '03) und 6. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) 1 (2003) S. 259-264
- [L92] G. Wiedemann, A. Klotzbach, R. Gnann
"Fertigungsintegrierte, partielle Bauteilreinigung mittels Laser"
 Reinigungsprozesse bei der Metallbearbeitung (2003) S. 23-34
- [L93] R. Zieris
"Kundenorientiert: Neues zum laserunterstützten Plasmaspitzen"
 Photonik (2003) 2, S. 46
- [L94] R. Zieris, S. Nowotny, L.-M. Berger, L. Haubold, E. Beyer
"Characterization of Coatings Deposited by Laser-Assisted Atmospheric Plasma"
 International Thermal Spray Conference 1 (2003) S. 567-572
- [L95] O. Zimmer, P. Siemroth, J. Berthold, H. Hilgers, W. Hentsch
"Gefilterte Bogenbeschichtung - alte Probleme und neue Lösungen"
 Vakuuum in Forschung und Praxis 15 (2003) 4, S. 202-208
- [L96] J.-H. Zollondz, J. Krauser, A. Weidinger, C. Trautmann, D. Schwen, C. Ronning, H. Hofsaess, B. Schultrich
"Conductivity of Ion Tracks in Diamond-Like Carbon Films"
 Diamond and Related Materials 12 (2003) 3-7, S. 938-941

- [T01]** M. F. Becker, E. Flint, T. Schülke
"Wet Chemical Etching Process to Remove TiN from WC-CO Substrates"
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2003) San Diego (CA / USA), 28. April - 02. Mai 2003
- [T02]** L.-M. Berger, R. Lang, R. Neugebauer, S. Ortman, E. Trageser, R. Wolf, R. Zieris
"Thermische Spritzschichten zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit von innenhochdruck-umgeformten Rohren"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM), Mittweida, 06.-07. November 2003
- [T03]** L.-M. Berger, M. Nebelung
"Vom Pulver zur Schicht - Neue thermisch gespritzte Beschichtungslösungen"
 6. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) und 5. Industriefachtagung "Oberflächen und Wärmebehandlungstechnik" (OWT '03), Chemnitz, 25.-26. September 2003
- [T04]** E. Beyer
"Industrielle Lasertechnik für neue Märkte - Anwendungs-Highlights"
 6. International Laser Marketplace - Anwendung im Dialog München, 26. Juni 2003
- [T05]** E. Beyer
"Anwendungsbeispiele für geformte Lichtbündel: Produktionstechnik"
 29. DGAO-Schule Optik "Formung von Licht" (räumliche und zeitliche Modulation) Jena, 16.-19. September 2003
- [T06]** E. Beyer
"Overview of Hybrid Technology"
 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (WLT 2003) München, 24.-26. Juni 2003
- [T07]** E. Beyer, A. Klotzbach, V. Fleischer, L. Morgenthal
"Nd:YAG-Remote Welding with Robots"
 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (WLT 2003) München, 24.-26. Juni 2003
- [T08]** S. Bonß, M. Seifert, B. Brenner, E. Beyer
"Neue Entwicklungen zum Randschicht-härten mit Hochleistungsdiolenlasern"
 6. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) und 5. Industriefachtagung "Oberflächen und Wärmebehandlungstechnik" (OWT '03), Chemnitz, 25.-26. September 2003
- [T09]** S. Braun, T. Böttger, R. Dietsch, T. Foltyn, P. Gawlitza, T. Holz, H. Mai, M. Menzel, L. van Loyen, J. Schmidt, D. Weißbach, A. Leson
"Periodic Multilayers with Nanometer Thickness for EUV and X-Ray Optical Purposes"
 9th International Symposium on Microwave and Optical Technology (ISMOT 2003) Ostrava (CZ), 11.-15. Aug. 2003
- [T10]** S. Braun, T. Foltyn, H. Mai, M. Moss, A. Leson
"Multicomponent EUV Multilayer Mirrors"
 Emerging Lithographic Technologies VII (Mircolithography 2003) Santa Clara (CA / USA), 25.-27. Februar 2003
- [T11]** S. Braun, A. Leson
"Nanometer Multilayers for X-Ray Optics"
 2nd Germany-Korea Workshop on Nanostructured Materials, IKTS Dresden, 19. November 2003
- [T12]** B. Brenner
"Moderne Laserstrahlschweißverfahren in der Fertigung"
 OTT-Profiforum "Lasereinsatz in der Fertigung und Materialbearbeitung", Regensburg, 29.-30. September 2003
- [T13]** I. Dani, V. Hopfe, D. Rogler, G. Mäder, C. Schreuders, K. Landes, E. Theophile, M. Dzulko, R. Spitzl
"Influence of Plasma Source on Atmospheric Pressure PECVD Process Characteristics"
 16th International Symposium on Plasma Chemistry, Taormina (I) 22.-27. Juni 2003
- [T14]** R. Dietsch, S. Braun, T. Holz, A. Leson
"High Precision PLD of nm-Single and Multilayer and Their Application as X-Ray Optics"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM) Mittweida, 06.-07. November 2003
- [T15]** T. Foltyn, S. Braun, M. Moss, A. Leson
"Deposition of Multilayer Mirrors with Arbitrary Period Thickness Distributions"
 Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and other Applications (SPIE Annual Meeting 2003: Radiation Technologies), San Diego (CA / USA), 07.-08. August 2003
- [T16]** P. Gawlitza
"Maßgeschneiderte Innenbeschichtung von Bauteilen mittels Pulsed Laser Deposition PLD"
 DKI-Arbeitskreissitzung "Verschleiß in der Kunststoffbearbeitung", Darmstadt, 25. März 2003
- [T17]** P. Gawlitza, A. Leson
"Präzise Innenbeschichtung von Bauteilen mit der Puls Laser Deposition"
 Kooperationsforum "Materialien und mechanische Komponenten aus der Raumfahrt für industrielle Anwendungen", München, 10. Dezember 2003
- [T18]** T. A. Grotjohn, K. Hemawan, S. Zuo, J. Asmussen
"Miniature Microwave Plasma Torch Applicators"
 50th AVS International Symposium Baltimore (MD / USA), 02.-07. Nov 2003
- [T19]** K. Hansen, C. Walz, E. Beyer, M. Mason
"In-Die Laser Welding of Hydro-Form Tubes"
 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2003), Jacksonville (FL / USA), 13.-16. Oktober 2003
- [T20]** T. Himmer
"New Developments in Metal Laminated Tooling"
 24th Japan Rapid Prototyping Symposium Tokyo (J), 24. Juni 2003
- [T21]** T. Holz, S. Braun, R. Dietsch, D. Weißbach
"Ultrapräzisionsbeschichtungen mittels Magnetronspütern und Puls Laser Deposition (PLD) für röntgenoptische Anwendungen"
 DPG Frühjahrstagung des Arbeitskreises Festkörperphysik Dresden, 24.-28. März 2003

- [T22] T. Holz, R. Dietsch, S. Braun, A. Leson
"Design of Multilayer X-Ray Mirrors and Systems"
 52nd Annual Denver X-Ray Conference
 Denver (CO / USA), 04.-08. Aug. 2003
- [T23] V. Hopfe, R. Liske, D. Rogler, G. Mäder, C. Schreuders
"Atmospheric Pressure Microwave CVD for Barrier Layers on Steel Sheets"
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2003) San Diego (CA / USA),
 28. April - 02. Mai 2003
- [T24] R. Jäckel
"Ultradünne funktionale Schichten - Ein Schlüsselement der Nanotechnologie"
 Industriefachmesse IFM 2003, Dresden,
 6. November 2003
- [T25] I. Jansen, E. Beyer
"Vergleich verschiedener Klebflächenvorbehandlungen von Magnesiumbauteilen"
 17th International Symposium Swiss Bonding 2003 Rapperswil (CH),
 20.-22. Mai 2003
- [T26] H. Kleinert, S. Bräunling, F. Liebrecht, I. Jansen, R. Häbler
"Patchwork-Kleben - Partielle Verstärkung von Blechbauteilen für Fahrzeuge"
 17th International Symposium Swiss Bonding 2003 Rapperswil (CH),
 20.-22. Mai 2003
- [T27] A. Klotzbach, V. Fleischer, L. Morgenthal, E. Beyer
"Remote-Welding mit Hochleistungs-YAG-Lasern"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM)
 Mittweida, 06.-07. November 2003
- [T28] U. Klotzbach
"Mikromaterialbearbeitung mit dem Laser"
 Lasereinsatz in der Fertigung und Materialbearbeitung, Regensburg,
 29.-30. September 2003
- [T29] F. Kretzschmar, D. Pollack, L. Morgenthal, E. Beyer
"Kontrolliertes Randschichtärten mit dem CO₂-Laser"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM)
 Mittweida, 06.-07. November 2003
- [T30] T. Kuntze
"Excimerlaser werden flexibel - Markierungsverfahren mit Mikrospiegelarrays"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM)
 Mittweida, 06.-07. November 2003
- [T31] T. Kuntze, M. Panzner, U. Klotzbach, E. Beyer
"New Excimer Laser Marking Method using MMD"
 2nd International Conference on Lasers in Manufacturing (WLT 2003)
 München, 24.-26. Juni 2003
- [T32] T. Kuntze, M. Panzner, U. Klotzbach, E. Beyer
"New Excimer Laser Masking Method using MMD"
 4th International Symposium on Laser Precision Microfabrication München,
 21.-24. Juni 2003
- [T33] D. Lepski, H. Eichler, S. Scharek, V. Fux, S. Nowotny, E. Beyer
"Simulation of Laser Beam Cladding by Powder Injection"
 2nd International Conference on Lasers in Manufacturing (WLT 2003)
 München, 24.-26. Juni 2003
- [T34] A. Leson
"Licht als Werkzeug - Materialbearbeitung mit dem Laser"
 Moderne optische Technologien, Regensburg, 03.-04. Dezember 2003
- [T35] A. Leson
"Nanometer-Schichtsysteme für Röntgenoptiken"
 Nanotechnologie, Würzburg,
 04.-05. November 2003
- [T36] A. Leson
"Functionally of Ultrathin Films, Production and Characterization"
 European Vacuum Congress Berlin,
 23.-24. Juni 2003
- [T37] A. Leson
"Nanotechnologie-Kompetenzzentrum Ultradünne funktionale Schichten - Perspektiven für den Automobilbau"
 Microcar 2003 Leipzig, 26. Juni 2003
- [T38] L. van Loyen, T. Böttger, S. Braun, H. Mai, A. Leson, F. Scholze, J. Tümmeler, G. Ulm, H. Legall, P. V. Nickels, W. Sandner, H. Stiel, C. Rempel, M. Schulze, J. Brutscher, F. Macco, S. Müllender
"A New Laboratory EUV-Reflectometer for Large Optics using a Laser Plasma Source"
 Metrology, Inspection and Process Control for Microlithography XVII (Microlithography 2003), Santa Clara (CA / USA), 23.-28. Februar 2003
- [T39] G. Mäder
"Atmosphärendruck-Plasma-CVD: Einfluß verschiedener Plasmagaseinspeisungen und Düsengeometrien auf die Schichtabscheidung"
 Fluent CFD Konferenz 2003
 Bingen, 24.-25. September 2003
- [T40] A. Moon, T. A. Grotjohn, M. K. Yaran, T. Schülke, D. K. Reinhard, J. Asmussen
"Mechanical Properties of Ultrananano, Nano, and Polycrystalline Diamond Films and Membranes"
 50th AVS International Symposium Baltimore (MD / USA),
 02.-07. November 2003
- [T41] P. Mottner, G. Wiedemann, G. Haber, W. Conrad, A. Gervais
"Laser cleaning of metal surfaces - laboratory investigations"
 5th International Conference Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA V) Osnabrück,
 15.-18. September 2003
- [T42] J. Narendra, T. A. Grotjohn, J. Asmussen
"Creation and Characteristics of Miniature Microwave Plasmas"
 50th AVS International Symposium Baltimore (MD / USA),
 02.-07. November 2003

- [T43] S. Nowotny
"Laserstrahl-Präzisionsauftragschweißen: neue industrielle Lösungen zum Oberflächenschutz, Reparieren und Generieren"
 Fertigungstechnisches Kolloquium der BÜHLER-Stiftung Pforzheim, 03. Dezember 2003
- [T44] S. Nowotny, S. Scharek, F. Kempe, E. Beyer
"Laser Beam Precision Build-Up Welding: A New Industrial Solution"
 LaserAP 5 Marquay (F), 22.-26. September 2003
- [T45] E. Pfeiffer, L. Morgenthal, E. Beyer
"Precision Laser Beam Cutting of Sheet Metal Segments"
 2nd International Conference on Lasers in Manufacturing (WLT 2003) München, 24.-26. Juni 2003
- [T46] K. Rehm, H. Wust
"Neue Oberflächenbearbeitungsverfahren für Holz- und Holzwerkstoffe"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM) Mittweida, 06.-07. November 2003
- [T47] D. K. Reinhard, M. F. Becker, R. A. Booth, T. P. Höpfner, T. A. Grotjohn, J. Asmussen
"Fabrication and Properties of Ultra-Nano, Nano, and Polycrystalline Diamond Membranes and Sheets"
 50th AVS International Symposium Baltimore (MD / USA), 02.-07. November 2003
- [T48] S. Scharek
"Systemtechnik zum Laserstrahl-Auftragschweißen"
 4. Workshop Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern im Fraunhofer IWS Dresden, 06.-07. Mai 2003
- [T49] H.-J. Scheibe, B. Schultrich
"Neuere Entwicklungen reib- und verschleißmindernder Schichten"
 Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (VVD 2003) Dresden, 03.-04. April 2003
- [T50] D. Schneider
"Laserakustik"
 10. Workshop "Physikalische Akustik" Bad Honnef, 11.-13. September 2003
- [T51] D. Schneider
"Laserakustische Bewertung von Randschichten und Oberflächen"
 VDI/VDE-GMA Fachtagung Oberflächenmesstechnik Langen, 01.-02. Dez. 2003
- [T52] B. Schultrich
"Superharte Kohlenstoffschichten - Werkstoffentwicklung mit einem einzigen Element"
 3. Dresdner Materialforschungstag Dresden, 10. Oktober 2003
- [T53] B. Schultrich
"Superharte Kohlenstoffschichten durch nm-Schichtdesign"
 Nanotechnologie, Würzburg, 04.-05. November 2003
- [T54] B. Schultrich, H. U. Jäger
"Influence of the Deposition Conditions on the Structure of Tetrahedrally Bonded Amorphous Carbon Films - A Simulation Approach"
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2003) San Diego (CA / USA), 28. April - 02. Mai 2003
- [T55] B. Schultrich, S. Völlmar, D. Römer, O. Zimmer
"Process Optimisation of Industrial Vacuum Deposition by SimCoat Simulation"
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2003) San Diego (CA / USA), 28. April - 02. Mai 2003
- [T56] P. Siemroth, H. Jacoby, H. Hilgers, B. Peterleit
"Ultra-Thin Carbon Coatings for Next Generation Hard Disk - Nanotribology of Filtered Arc Films"
 4th International Conference on Tribology of Information Storage Devices (TISD) Monterey (CA / USA), 01.-03. Dez. 2003
- [T57] P. Siemroth, D. Schneider
"Non-Destructive Determination of Mechanical Properties of Ultra-Thin Films by Laser-Acoustics"
 4th International Conference on Tribology of Information Storage Devices (TISD) Monterey (CA / USA), 01.-03. Dez. 2003
- [T58] P. Siemroth, V. Weihnacht, B. Schultrich, H.-J. Scheibe
"Superharte Kohlenstoffschichten für die Präzisionstechnik"
 Workshop Innovative Oberflächen für Uhren und Präzisionstechnik Dresden, 09. Oktober 2003
- [T59] F. Sonntag
"Möglichkeiten und Potentiale der UV-Lasertechnologie in der Biomedizintechnik"
 16. Internationale wissenschaftliche Konferenz Mittweida (IWKM) Mittweida, 06.-07. November 2003
- [T60] T. Stucky, H. Paschke, A. Techel, A. Zwick
"Werkzeuge - vom Generieren bis zum Topcoat"
 4. Fachsymposium Oberflächentechnik des Dortmunder OberflächenCentrums Dortmund, 26. November 2003
- [T61] T. Stucky, H.-J. Scheibe, B. Schultrich
"Laserunterstützte Beschichtung von Werkzeugen mit superharten Kohlenstoffschichten"
 13. Werkzeugseminar "Laser-Einsatz in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie" Remscheid, 30. Sep. 2003
- [T62] A. Techel
"Rapid Prototyping and Rapid Tooling - Schneller von der Produktidee zum Marktangebot"
 2. Industrielles Symposium Mechatronik Linz (A), 15. Mai 2003
- [T63] A. Techel, T. Himmer, S. Nowotny, E. Beyer
"Joining Techniques for Metal Laminated Tooling"
 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2003) Jacksonville (FL / USA), 13.-16. Oktober 2003

- [T64] A. Techel, T. Kretzschmar, S. Scharek, S. Nowotny, A. Uelze
"Spannungs- und Verformungsuntersuchungen beim Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen"
 6. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) und 5. Industriefachtagung "Oberflächen und Wärmebehandlungstechnik" (OWT '03) Chemnitz, 25.-26. September 2003
- [T65] A. Techel, S. Nowotny, A. Nagy, R. Lenk
"Laser Sintering of Complex-Shaped Ceramic Prototypes"
 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2003) Jacksonville (FL / USA), 13.-16. Oktober 2003
- [T66] V. Weihnacht, W. Grimm
"Puls-Arc-Technik für die Abscheidung von harten Kohlenstoffschichten"
 6. Werkstofftechnisches Kolloquium (WTK) und 5. Industriefachtagung "Oberflächen und Wärmebehandlungstechnik" (OWT '03) Chemnitz, 25.-26. September 2003
- [T67] V. Weihnacht, B. Schultrich, P. Siemroth
"Preparation and Characterization of Superhard Amorphous Carbon Films up to 10 µm Thickness"
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2003) San Diego (CA / USA), 28. April - 02. Mai 2003
- [T68] G. Wiedemann
"Lasereinsatz in Restaurierung und Denkmalpflege"
 9. Internationale Sommerakademie der DBU Ostritz-St. Marienthal / Dresden, 13.-18. Juli 2003
- [T69] G. Wiedemann
"Möglichkeiten und Grenzen des Lasereinsatzes bei der Restaurierung"
 Internationale Dommeistertagung Dresden / Meissen, 24.-25. Sep. 2003
- [T70] G. Wiedemann
"Aktuelle internationale Tendenzen auf dem Gebiet der Lasertechnik"
 7. Forum Laser in Restaurierung und Denkmalpflege im Rahmen der internationalen Fachtagung Oberflächenreinigung des VDR Düsseldorf, 29. September - 04. Oktober 2003
- [T71] G. Wiedemann
"Laserstrahlreinigen"
 Workshop Reinigen in der Lebensmittelindustrie im Rahmen der Messe ANUGA Köln, 14. Oktober 2003
- [T72] G. Wiedemann, A. Klotzbach, R. Gnann
"Fertigungsintegrierte, partielle Bauteilreinigung mittels Laser"
 Reinigungsprozesse bei der Metallbearbeitung 2003 Stuttgart, 09. Dez. 2003
- [T73] H. Wust, K. Püschner, G. Wiedemann
"The Potential of Laser Application for Selectiv Cleaning and Removal of Different Layers on Wooden Artworks"
 5th International Conference Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA V) Osnabrück, 15.-18. September 2003
- [T74] R. Ziervogel, M. F. Becker, K. Yaran, T. Schülke
"Laser-Acoustic Quality Control of Wear Coatings on Cutting Tools"
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2003) San Diego (CA / USA), 28. April - 02. Mai 2003
- [T75] O. Zimmer, B. Schultrich, J. Vetter, O. Kaiser
"Maßgeschneiderte Beschichtungen zur Leistungssteigerung im Werkzeug- und Formenbau für die Kunststoffverarbeitung"
 1. Kolloquium Werkzeugbau und Kunststoffverarbeitung Dresden, 5. Mai 2003
- [T76] O. Zimmer, P. Siemroth
"Vacuum Arc Deposition by using a Venetian Blind Particle Filter"
 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2003) San Diego (CA / USA), 28. April - 02. Mai 2003
- [T77] A. Zwick
"Laserstrahl-Schweißen im Automobil-, Flugzeug- und Stahlbau"
 Symposium Lasertechnik Iserlohn, 14. Januar 2003
- [T78] A. Zwick
"Verbesserte Laserschweißbeignung durch neuartige Zink-Magnesium-Überzüge"
 ThyssenKrupp Steel Fachpresseforum Stahl-Oberflächen Schloß Landberg, 24. September 2003

Patentanmeldungen

- [P1] S. Braun, H. Mai
"A Device and a Method for the Formation of Gradient Layers on Substrates in a Vacuum Chamber"
Anmelde-Az.: US 10 / 646,543
- [P2] S. Braun, H. Mai
"Vorrichtung und Verfahren zur Ausbildung von Gradientenschichten auf Substraten in einer Vakuumkammer"
Anmelde-Az.: JP 2003-298538
- [P3] B. Brenner, B. Winderlich, J. Standfuß, J. Schumacher, H. Brenneis, W. Zink
"Leichtbau-Strukturbauteil insbesondere für Flugzeuge und Verfahren zu seiner Herstellung"
Anmelde-Az.: 103 01 445.4-22
- [P4] R. Dietsch, T. Holz
"Device for X-ray Analytical Applications"
Anmelde-Az.: PCT / DE 02 / 00572
- [P5] T. Himmer, A. Techel
"Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Bauteilen"
Anmelde-Az.: 103 10 987.0-14
- [P6] T. Holz
"X-ray Optical System"
Anmelde-Az.: US 10 / 048,873
- [P7] V. Hopfe, G. Mäder, D. Rogler, C. Schreuders
"Verfahren und Vorrichtung zur großflächigen Beschichtung von Substraten bei Atmosphärendruckbedingungen"
Anmelde-Az.: EP 03 018 084.8
- [P8] H. Mai, S. Braun
"Optisches System mit einer Strahlungsquelle für elektromagnetische Strahlung im extremen ultravioletten Bereich und einem reflektierenden Element"
Anmelde-Az.: EP 03 400006.7-1524

- [P9] M. Weihnacht, P. Siemroth, V. Weihnacht, R. Kunze
"Akustisches Oberflächenwellenbauelement"
Anmelde-Az.: PCT / DE 03 / 01172
- [P10] O. Zimmer, P. Siemroth, B. Schultrich, S. Schenk, B. Schuhmacher, U. Seifert, C. Hecht, R. Ekkehart
"Vorrichtung und Verfahren zum reaktiven Elektronenstrahlaufdampfen von reaktiv gebildeten Schichten auf Substraten"
Anmelde-Az.: PCT / DE 03 / 01524

Patenterteilungen

- [P11] J. Berthold, T. Witke, P. Siemroth
"Vakuumbogenverdampfer und Verfahren zu seinem Betrieb"
Veröffentlichungs-Nr.: DE 19924094 C2
- [P12] J. Berthold, T. Witke, P. Siemroth
"Vacuum Arc Evaporator"
Veröffentlichungs-Nr.: US 6361663
- [P13] E. Beyer, S. Nowotny, S. Scharek
"Method for Producing Shaped Bodies or Applying Coatings"
Veröffentlichungs-Nr.: EP 1230055 B1
- [P14] E. Beyer, S. Nowotny
"Verfahren zum Aufbringen einer Beschichtung mittels Plasmaspritzens"
Veröffentlichungs-Nr.: EP 0903423 B1
- [P15] B. Brenner, C. Duscheck, R. A. Gnann, D. Naunapper
"Verfahren zum Strahlschweißen von härtbaren Stählen mittels Kurzzeitwärmebehandlung"
Veröffentlichungs-Nr.: EP 0925140 B1
- [P16] B. Brenner, V. Fux
"Verfahren zur Erzeugung von verschleißbeständigen Randschichten"
Veröffentlichungs-Nr.: DE 10137776 C1

- [P17] A. Hartmann, F. Kretzschmar, A. Klotzbach, L. Morgenthal, D. Pollack, T. Schwarz
"Method and Apparatus for the Laser Machining of Workpieces"
Veröffentlichungs-Nr.: US 6545250 B2
- [P18] T. Holz
"X-ray Fluorescence Analysis Device"
Veröffentlichungs-Nr.: US 6577704 B1
- [P19] C.-F. Meyer, H.-J. Scheibe
"Device and Method for Coating Substrates in a Vacuum"
Veröffentlichungs-Nr.: US 6533908 B1
- [P20] C.-F. Meyer, H.-J. Scheibe, B. Schultrich, H. Ziegele
"Method and Device for Coating Substrates in a Vacuum"
Veröffentlichungs-Nr.: US 6558757 B1
- [P21] L. Morgenthal, D. Pollack, D. Weißbach, R. A. Gnann, A. van Spankeren
"Laseroptisches Element zur Formung eines Laserstrahles"
Veröffentlichungs-Nr.: DE 10129982 C

Marken

- [P22] "MELATO"
Anmelde-Az.: 30319 129.5 / 42

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 2001
- den Jahresbericht 2002
- einen weiteren Jahresbericht 2003

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 EUV- und röntgenoptische Anwendungen

Bereich PVD-Dünnschichttechnologie

- Diamor® - Superharte, amorphe Kohlenstoffschichten für Werkzeuge zur Bearbeitung von Leicht- und Buntmetallen sowie Kunststoffen
- Diamor® - Superharte, amorphe Kohlenstoffschichten für Maschinen der Verpackungs- und Lebensmittelindustrie
- Laserakustisches Prüfgerät LAwave® für Schichten und Werkstoffoberflächen

Bereich CVD-Dünnschichttechnologie

- FTIR-Spektroskopie zur CVD-Diagnostik
- Optische Spektroskopie an Oberflächen und Schichten

Bereich Thermische Beschichtungsverfahren

- Laserunterstütztes Plasmaspritzen
- 3D-Laser-Pulver-Auftragschweißen mit dem Koaxial-Beschichtungskopf
- Laser-Rapid-Prototyping - Ein Verfahren zur schnellen Fertigung von Funktionsmustern
- MELATO - Qualifikation innovativer Fertigungstechnologien zur flexiblen Fertigung von großformatigen Werkzeugen mit seriennahen Eigenschaften
- Rapid-Prototyping von metallischen Bauteilen durch Laser-Flüssigphasen-Sintern von Verbundpulvern

- Laserstrahl-Auftragschweißen mit Hochleistungs-Diodenlasern

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
- lasertronic® - High-Power-Strahl-ablenkoptik für das Laserstrahlschweißen
- Formgenaues Hochgeschwindigkeits-Laserschneiden
- Laserstrahlabtragen dünner Deckschichten
- Laserbearbeitung von Naturstein
- Patinafreilegungen mit dem Laserstrahl
- Mikroschneiden und -bohren mit ultraviolettem Laserlicht
- Mikrostrukturierung von Keramiken mit Excimerlasern
- Rutschhemmende Ausrüstung polierter Natursteinoberflächen mittels Lasermikrostrukturierung

Post-Adresse:

Fraunhofer-Institut für Werkstoff-
und Strahltechnik IWS 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

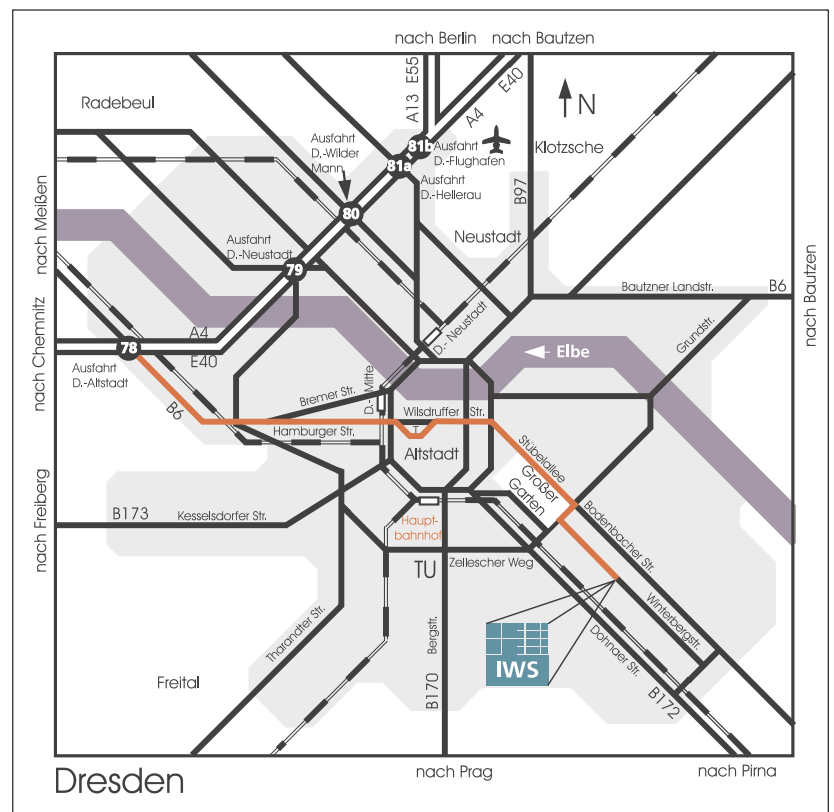
Anfahrtsweg:

Mit dem Auto (ab Autobahn):

- Autobahn A4 oder A13, Ausfahrt Dresden-Altstadt, folgen Sie der Ausschilderung "VW-Manufaktur" ab Autobahnabfahrt DD-Altstadt bis Straßburger Platz
- Bundesstraße B6, Hamburger Straße in Richtung Innenstadt, immer geradeaus,
- weiter über Wilsdruffer Straße, Stübellee,
- 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: Dr. Ralf Jäckel
Dipl.-Ing. Karin Juch

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

Bildnachweis: S. 8 (u. m.): Sitec Industrietechnologie GmbH Chemnitz
S. 48 (Abb. 3): Fraunhofer IWU Chemnitz
S. 81 (Abb. 3): EFD Induction GmbH Freiburg
alle anderen Abb.: Fraunhofer IWS Dresden

Titelfotos

oben: Probenmanipulationssystem in der Goniometerkammer des EUV-Reflektometers

Mitte: Tripode-Flansch-Verbindung, gefügt durch induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen

unten: Düsenanordnung zum Auftragschweißen mit bewegtem Bearbeitungskopf

© Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2004

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.