IWS

Fraunhofer Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Jahresbericht 2004

Internet: www.iws.fraunhofer.de

IWS

Fraunhofer Institut
Werkstoff- und
Strahltechnik

Jahresbericht 2004

ZERTIFIKAT

DIN EN ISO 9001:2000

bescheinigt hiermit, dass das Unternehmen

Fraunhofer Institut Werkstoff- und Strahltechnik

Bereiche:
Leitung und Verwaltung, Röntgen- und EUV-Optik,
PVD-Dünnschichttechnologie, CVD-Dünnschichttechnologie,
Thermische Beschichtungen, Fügen/Randschichttechnologie, Abtragen und Trennen

Standort:
Winterbergstr. 28 * D-01277 Dresden

ein Qualitätsmanagementsystem entsprechend der oben genannten Norm (12/2000) eingeführt hat und dieses wirksam anwendet. Der Nachweis wurde im Rahmen des Zertifizierungs-Audits Bericht-Nr. A0307203 erbracht. Dieses Zertifikat ist nur in Verbindung mit der erfolgreichen Durchführung der Überwachungsaudits gültig.

Datum der Erstzertifizierung: 30.12.1997
Dieses Zertifikat ist gültig bis: 28.10.2006

Datum der letzten Rezertifizierung: 29.10.2003
Zertifikat-Registrier-Nr.: 91297819/3
Duplikat

Reg.Nr.: TGA-ZM-05-91-00

Prolog

Redaktion: Das Jahr 2004 hat den erhofften wirtschaftlichen Aufschwung noch nicht gebracht. Welche Auswirkungen hatte dies auf das IWS?

Prof. Beyer: Im Jahr 2004 sind die Mittel für öffentlich geförderte Projekte weiter zurückgegangen. Im Vorjahr konnten wir diesen Rückgang durch einen überproportionalen Anstieg der Erträge aus der Industrie mehr als kompensieren; im Jahr 2004 haben wir diesen Rückgang nicht durch eine nochmalige Steigerung der Industrieerträge auffangen können. Allerdings ist es trotz erheblicher Schwierigkeiten gelungen, das herausragende Ergebnis des Vorjahres erneut zu erreichen.

Redaktion: Welche Schwierigkeiten hatte das IWS im Jahr 2004 zu bewältigen?

Prof. Beyer: Wir haben einen Anbau mit zusätzlichen ca. 3000 m² erhalten. Da die Kapazität des alten Gebäudes bereits voll erschöpft war, werden sich hierdurch unsere Arbeitsbedingungen in Zukunft deutlich verbessern.

Außer dem monatelangen Baulärm und dem Schmutz, unter dem alle Mitarbeiter und auch Gäste leiden mussten, stellte die Bauphase insofern eine enorme zusätzliche Belastung dar, da aufgrund des kompletten Neuaufbaus vieler Labore Kundenaufträge nicht bearbeitet werden konnten. So musste viel improvisiert werden, da letztendlich alle Abteilungen durch den Umzug betroffen waren.

Aber nun sind wir wieder voll betriebsbereit und haben die Möglichkeit, weiter zu wachsen. Dem Land Sachsen, dem Bund und der Fraunhofer-Gesellschaft sind wir hierfür sehr dankbar.

Redaktion: Waren die von Ihnen genannten Schwierigkeiten denn nicht vorhersehbar?

Prof. Beyer: Selbstverständlich stellen Bauvorhaben immer eine zusätzliche Belastung dar. Aufgrund einer Reihe von baulichen Verzögerungen und Problemen bei der Labortechnik wurde der Anbau jedoch erst ein Dreivierteljahr nach dem ursprünglichen Termin fertiggestellt. Insofern war das enorme Ausmaß dieser Beeinträchtigung nicht vorhersehbar.

Redaktion: Gab es dennoch Highlights im Jahr 2004?

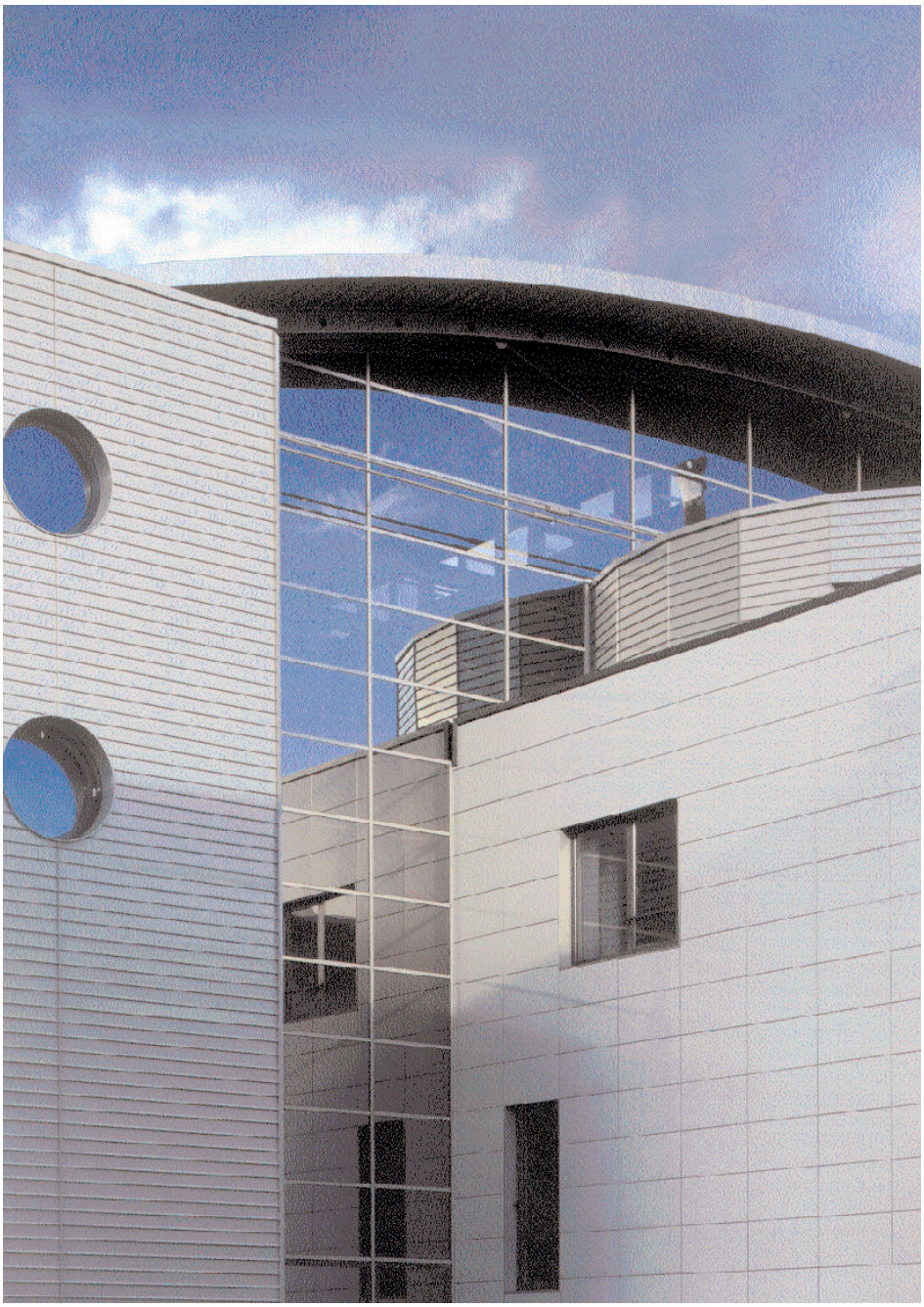
Prof. Beyer: Natürlich. Auch im Jahr 2004 konnten wieder Entwicklungen des IWS in die industrielle Fertigung überführt werden. Darüber hinaus haben wir uns mit einer Reihe von Aktivitäten und besonderen Veranstaltungen am "Jahr der Technik" beteiligt.

Redaktion: Was erwarten Sie für das Jahr 2005?

Prof. Beyer: Wir gehen davon aus, dass die öffentliche Förderung nochmals zurückgeht. Aus diesem Grund werden wir unsere Marketing-Aktivitäten weiter verstärken und eine noch engere und intensivere Zusammenarbeit mit Industriekunden anstreben. Da wir unsere Ausstattung erweitern konnten und die erhöhten Aufwendungen von 2004 wegfallen, gehen wir mit viel Optimismus in das Jahr 2005, das uns vor viele Herausforderungen stellt.

Redaktion: Vielen Dank für das Interview.

Es gibt keine Dankbarkeit vor der Technik.
Es hat erfunden zu werden.
Karl Kraus



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

Inhalt

Prolog 3

Inhalt 5

Highlights im Jahr 2004 6

Das Institut im Profil 8

- Kurzporträt 8
- Organisation und Ansprechpartner 10
- Anbindung an die TU Dresden 11
- Zentren und externe Projektgruppen 12
- Ausstattung 16

Das Institut in Zahlen 18

Kuratorium und Gremien 20

Die Fraunhofer-Gesellschaft auf einen Blick 21

Fraunhofer-Verbund Oberflächentechnik und Photonik VOP 22

FuE-Angebot 24

- Füge- und Randschichttechnologien 24
- Laserabtragen und -trennen, Systemtechnik 40
- Thermische Beschichtungsverfahren 52
- CVD-Dünnschichttechnologie 64
- PVD-Dünnschichttechnologie 74
- Röntgen- und EUV-Optik 88
- Klebtechnik 98
- Multimedia und Simulation 101

Namen, Daten und Ereignisse 105

- Diplomarbeiten und Dissertationen 105
- Vorlesungen und Mitarbeit in Gremien 106
- Preise des IWS 2004 107
- Besondere Ereignisse 108
- Messebeteiligungen 109

Patente und Marken 112

Veröffentlichungen 113

Tagungsvorträge 117

Informationsservice 122

Kontaktadressen und Anfahrt 123

Einweihung der zweiten Ausbaustufe des Fraunhofer-Institutszentrums Dresden

Edelgard Bulmahn, Bundesministerin für Bildung und Forschung, auf dem Festakt zur Eröffnung der Institutsanbauten

Die vier Fraunhofer-Institute in der Dresdner Winterbergstraße eröffneten am 3. Juni 2004 ihre Erweiterungsbauten. An dem Festakt nahmen die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Edelgard Bulmahn, und der Ministerpräsident des Freistaates Sachsen, Professor Dr. Georg Milbradt, teil. Mit Abschluss der Erweiterungsbauten am Fraunhofer-Institutszentrum Dresden IZD stehen den Wissenschaftlern für ihre Forschung 10 200 m² zusätzliche Nutzfläche zur Verfügung.

Prof. Dr. Georg Milbradt, Ministerpräsident des Freistaates Sachsen, auf dem Festakt zur Eröffnung der Institutsanbauten

Bundespräsident Horst Köhler, der Ministerpräsident des Landes Nordrhein-Westfalen Peer Steinbrück und der Vorstandsvorsitzende der ThyssenKrupp AG Prof. Dr. Ekkehard Schulz gemeinsam am Stand des Fraunhofer IWS im Gespräch mit Dr. Axel Zwick

IWS-Beteiligung am Ideenpark von ThyssenKrupp

Als wichtiger Partner von ThyssenKrupp im Bereich Forschung und Entwicklung war auch das IWS im Ideenpark vertreten. Bundespräsident Horst Köhler ließ sich, gemeinsam mit dem Ministerpräsidenten des Landes Nordrhein-Westfalen Peer Steinbrück und dem Vorstandsvorsitzenden der ThyssenKrupp AG, Prof. Dr. Ekkehard Schulz, von Dr. Axel Zwick, IWS, über die zunehmende Bedeutung der Oberflächentechnik informieren.

Vortrag von Herrn Thomas Pearsall vom European Photonics Industry Consortium zum International Open House im Fraunhofer IWS Dresden

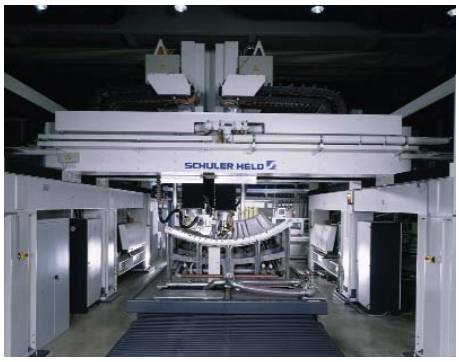
International Open House im Fraunhofer IWS Dresden

Nach Abschluss der Bauarbeiten und im Zusammenhang mit der Einweihung der neuen Labore fand am 20. und 21. September 2004 ein International Open House im Fraunhofer IWS Dresden statt. Zahlreiche internationale Gäste aus den europäischen Nachbarländern konnten sich von den technischen Möglichkeiten in den Bereichen Lasermaterialbearbeitung und Oberflächentechnik überzeugen.

Herr Brenneis (Airbus Deutschland), Prof. Beyer (Fraunhofer IWS) und MDgt Geiger (SMWK) (v. l. n. r.) beim Durchschneiden des Bandes

Inbetriebnahme der 3D-Laserstrahlschweißanlage zum Schweißen von Flugzeug-Rumpfstrukturen

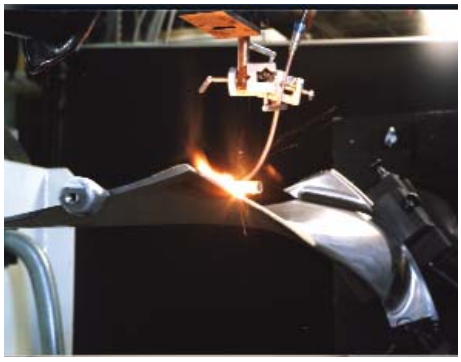
Am 25. Juni 2004 wurde im Beisein der Vertreter von Airbus Deutschland, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit sowie der zwei Sächsischen Ministerien für Wissenschaft und Kunst bzw. Wirtschaft und Arbeit eine neue Laserstrahlschweißanlage für das Fügen großer 3D-Teile für die Luft- und Raumfahrt eingeweiht. Damit ist am Fraunhofer IWS in Dresden die Entwicklung hochproduktiver Fertigungstechnologien für neue Passagierflugzeuge möglich.



3D-Laserstrahlschweißanlage zum Schweißen von Flugzeug-Rumpfstrukturen

Industrieüberführung eines neuen Randschichtveredlungsverfahrens zur Lebensdauerverlängerung von Turbinenschaufeln

Im Rahmen eines Projektes mit Siemens Power Generation Mülheim wurde als Weltneuheit eine Technologie zur Randschichthärtung von großen Niederdruck-Endstufen-Laufschaufeln aus ausscheidungshärtbaren Stählen entwickelt und in einer Turbine für das Kraftwerk Incheon (Südkorea) eingesetzt. Damit steht erstmalig auch für sehr hoch belastete Turbinenschaufeln aus ausscheidungshärtbaren Stählen ein passives Schutzverfahren vor Tropfenschlagverschleiß zur Verfügung, das die zyklische Belastbarkeit der Schaufeln nicht reduziert.



Prozess der Randschichthärtung einer Turbinenschaufel

Prüfstand für TMF-Tests an Triebwerkskomponenten

Im Auftrag der Firma EADS Space Transportation wurden Lebensdauertests an Komponenten von Raketentriebwerken durchgeführt. Durch die Nutzung von Hochleistungslasern als Wärmequelle und die gleichzeitige Kühlung der Teststrukturen mit tiefkaltem Stickstoff wurden die extremen thermischen Einsatzbedingungen simuliert. Mit dem aufgebauten Prüfstand konnte durch Thermo-Mechanical-Fatigue-Tests die Lebensdauer für ausgewählte Triebwerkskomponenten experimentell ermittelt werden.

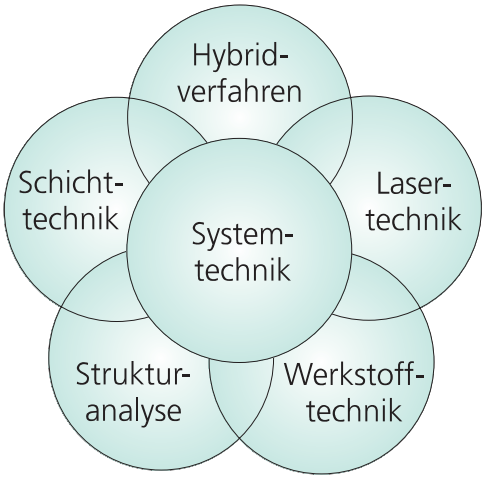
Stickstoffversorgung mit Förder-, Misch- und Regelungssystem

Um klar zu sehen, genügt oft ein Wechsel der Blickrichtung.
Antoine de Saint-Exupery

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, Ihr Problem mit modernster Anlagentechnik zu bearbeiten. Darüber hinaus ist es uns möglich, Pilotanlagen zu installieren und die erarbeiteten Problemlösungen an Nullserien 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 strahltechnologisch 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

Außenstellen IWS

CCL - USA
Prof. Asmussen
Tel.: 1 (0) 517 355 4620

DOC
Dr. Zwick
Tel.: 0231/ 84 43 512

Institutsleiter Prof. Dr. Beyer

Stellvertreter Dr. Leson
Assistentin Frau Weinberg
Tel.: 0351 / 2583-420

Infrastruktur

Verwaltung
Dr. Wilhelm
Tel.: 312

Marketing / PR
Dr. Krautz / Dr. Jäckel
Tel.: 332 / 444

Oberflächen- / Schichttechnik

Röntgen- und EUV-Optik
Dr. Leson
Tel.: 317

- **Beschichtung** – Dr. Braun, Tel.: 432
- **Metrologie / Applikation** – Dr. van Loyen, Tel.: 422

PVD-Dünnschichttechnologie
Prof. Schultrich
Tel.: 403

- **Kohlenstoff-Schichten** – Prof. Schultrich, Tel.: 403
- **PVD-Schichten** – Dr. Zimmer, Tel.: 257

CVD-Dünnschichttechnologie
Dr. Hopfe
Tel.: 402

- **Atmosphärendruck-CVD** – Dr. Dani, Tel.: 405
- **Prozess-Monitoring** – Dr. Grählert, Tel.: 406

Laser-Materialbearbeitung

Thermische Beschichtungsverfahren
Dr. Nowotny
Tel.: 241

- **Thermisches Spritzen** – Dr. Berger, Tel.: 330
- **Auftragschweißen** – Dr. Techel, Tel.: 255

Füge- und Randschichttechnologien
Prof. Brenner
Tel.: 207

- **Schweißen** – Dr. Standfuß, Tel.: 212
- **Randschichtverfahren** – Dr. Bonß, Tel.: 201

Laserabtragen und -trennen
Dr. Morgenthal
Tel.: 322

- **Schneiden** – Dr. Morgenthal, Tel.: 322
- **Mikrobearbeiten/ Reinigen** – Herr Klotzbach, Tel.: 252

Werkstofftechnik / Werkstoffcharakterisierung
Prof. Brenner / Dr. Winderlich, Tel.: 207 / 224

Systemtechnik / Fertigungstechnik
Dr. Morgenthal / Dr. Pollack, Tel.: 322 / 239

Nanotechnologie
Dr. Leson
Tel.: 317

DD-OT
Prof. Schultrich
Tel.: 403

Kleben
Dr. Jansen
Tel.: 0351/ 46 33 5210

Simulation / VR
Dr. Lepski / Dr. Völlmar
Tel.: 222 / 434

Diodenlaser-Anwendungszentrum
Dr. Bonß
Tel.: 201

Rapid Prototyping / Tooling
Dr. Techel
Tel.: 255

Produktionstechnik
Prof. Günther
Tel.: 0351/ 46 33 3343

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik
Prof. Dr. Beyer
Stellvertreter Prof. Dr. Günther
Sekretariat Frau Petermann
Tel.: 0351 / 46 33 1993

TU Dresden

Gastfirmen im Fraunhofer IWS:

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

Anbindung an die TU Dresden

Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik

2004 waren am Lehrstuhl 34 Mitarbeiter beschäftigt. Die Drittmittelerträge lagen über 1,3 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
- Prof. Beyer: Lasergrundlagen / Lasersystemtechnik
- Prof. Beyer: Laser und Plasmen in der Oberflächen- und Mikrotechnik
- Prof. Beyer: Plasmen in der Fertigungstechnik
- Prof. Beyer: Rapid Protocoating
- Dr. Leson / Prof. Beyer: Oberflächentechnik / Nanotechnologie
- Prof. Schultrich: Dünnschichttechnologie

Kooperation Fraunhofer IWS - TU Dresden

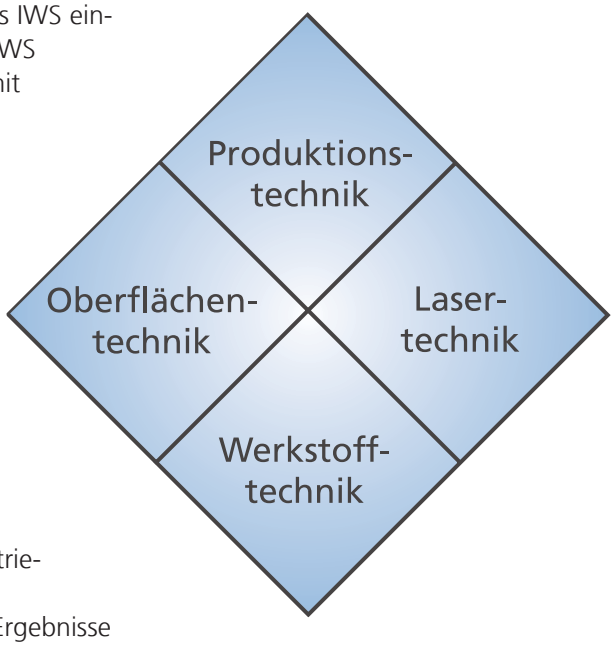
Durch eine Kooperationsvereinbarung ist die Zusammenarbeit zwischen dem IWS und der TU Dresden geregelt. Auf Basis einer gemeinsamen Berufung ist der Lehrstuhlinhaber, Prof. Beyer, gleichzeitig Leiter des Fraunhofer IWS. Hierbei gilt folgende Aufgabenteilung: Forschung und Lehre werden schwerpunktmäßig 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

We need men
who can dream of things
that never were.
John F. Kennedy

TU Dresden



CD zur Vorlesung Fertigungstechnik 2

CD zur Vorlesung Lasersicherheit

CD zur Vorlesung Lasertechnik

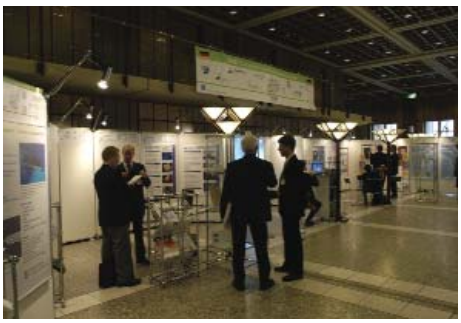
Zentren und externe Projektgruppen

Dinge zu bezweifeln,
die ganz ohne weitere Untersuchung
jetzt geglaubt werden,
das ist die Hauptsache überall.
Georg Christoph Lichtenberg

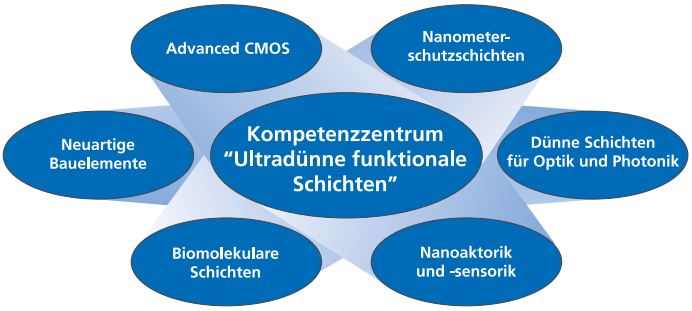
Nanotechnologie-Kompetenzzentrum "Ultradünne funktionale Schichten"

Die Nanotechnologie gehört zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Bereits heute gibt es marktreife Produkte: Festplatten und Leseköpfe für die Datenspeicherung, die mit wenige 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 Schlüsselelement 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 2004 war die Durchführung des Internationalen Nanotechnologie-Symposiums "Nanofair 2004" in Karlsruhe, das 380 Teilnehmer aus Industrie und Wissenschaft zusammenführte und vom Kompetenzzentrum bzw. vom IWS mitgestaltet wurde.



Ausstellung der deutschen Nanotechnologie-Kompetenzzentren im Rahmen der Nanofair 2004



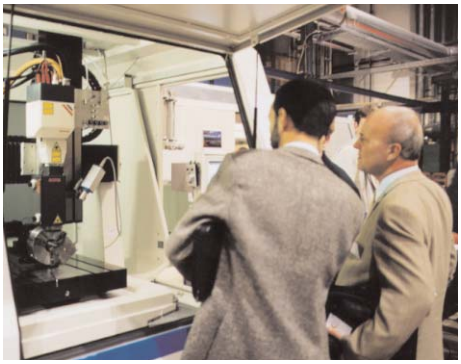
Arbeitskreise des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums

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 sowie Laserstrahlformungs-Systeme, die die Anwendung der Hochleistungs-Diodenlaser für die Oberflächentechnik und Randschichtveredelung vereinfacht und prozesssicher gestalten.

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



Anlage zum Härten mit integriertem Hochleistungs-Diodenlaser 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:

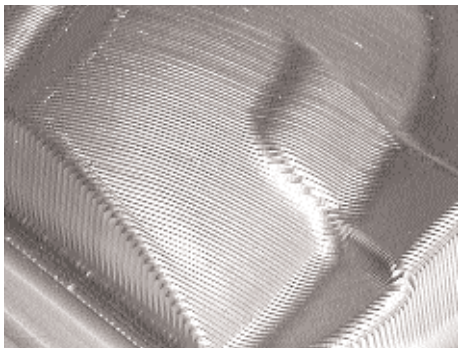
- Verfahrensentwicklungen im konventionellen und Hochgeschwindigkeitsbereich sowie Entwicklung von Hybridverfahren
- Machbarkeits- und Betriebsanalysen, Studien (Produkte, Fertigungsverfahren, Fertigungsprozesse, technologische und logistische Prozessketten)
- Materialfluss- und Produktionssimulation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

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.

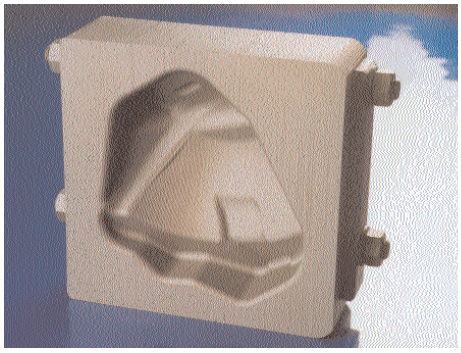
Mit Hilfe des MELATO®-Verfahrens (**Me**tal **La**minated **To**oling) können Werkzeuge in einem Bruchteil der bisher benötigten Zeit hergestellt werden.



Oberfläche eines durch MELATO® hergestellten Werkzeugs

Laserintegriertes CNC-Fräszentrum

Anlage zum Rapid-Prototyping durch direktes Laser-Flüssigphasen-Sintern



Lamellierter Aufbau eines Prägewerkzeugs (MELATO®)

Es ist gut, vieles für unbedeutend
und alles für bedeutend zu halten.
Karl Kraus

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

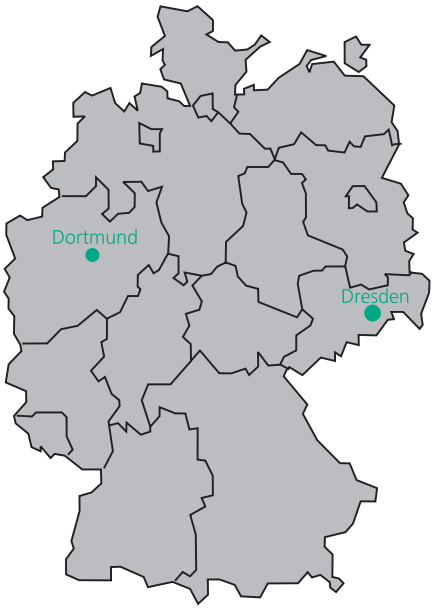
Mit der Gründung des Dortmunder OberflächenCentrums unter Beteiligung der Fraunhofer-Gesellschaft bündelte die ThyssenKrupp Stahl AG (TKS) ihre Kapazitäten und Kompetenzen auf dem Gebiet der Oberflächentechnik.

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 Laserschweißeignung zeigen konnte.

Darüber hinaus bietet die Fraunhofer-Projektgruppe auf 1100 m^2 Neubaufläche eine Reihe sich ergänzender Verfahren zur Oberflächenveredelung an. Mit modernster Anlagentechnik lassen sich nahezu porenfreie und äußerst haftfeste Plasmaspritzschichten herstellen oder 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, bietet 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 wird in Lansing ein Kohlenstoffcenter aufgebaut.

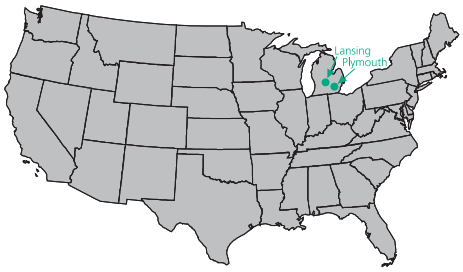
Das CCL hat 2 Divisions, die "Coating Technology Division" an der Michigan State University in East Lansing unter Leitung von Dr. Thomas Schülke und die "Laser Applications Division" im Gebäude des Headquarters von Fraunhofer USA unter Leitung von Eric Stiles.

Laser Applications Division
2004 war ein weiteres sehr ereignisreiches Jahr für die Lasergruppe des CCL in Plymouth, Michigan. Anfang des Jahres übernahm Herr Eric Stiles, der seit 2002 im Fraunhofer IWS arbeitet, die Aufgaben des Division Managers. Die räumliche Nähe zu Detroit führte zu einer engen Zusammenarbeit mit der amerikanischen Autoindustrie. In diesem Jahr hatte die Gruppe einen beachtlichen Zuwachs an Projekten speziell für das Laserstrahlschweißen von Bauteilen aus dem Antriebsstrang zu verzeichnen, insbesondere für die Behandlung von Differentialen, Getrieben und Antriebswellen. Weiterhin bearbeitete sie Projekte zum Laserhärten von Kurbelwellen und zum Auftragschweißen.

Außerhalb der Autoindustrie konnte ein weiterer Kunde aus der Mineralölindustrie gewonnen werden. Es bestand hier die anspruchsvolle Aufgabe, das Auftragschweißen für übergroße Bohrbauteile zu nutzen. Die Anwendung des Laserstrahlschweißens zum Fügen von Aluminiumbauteilen für einen Hersteller von Leichtbautransportgehäusen war ein weiterer Schwerpunkt.

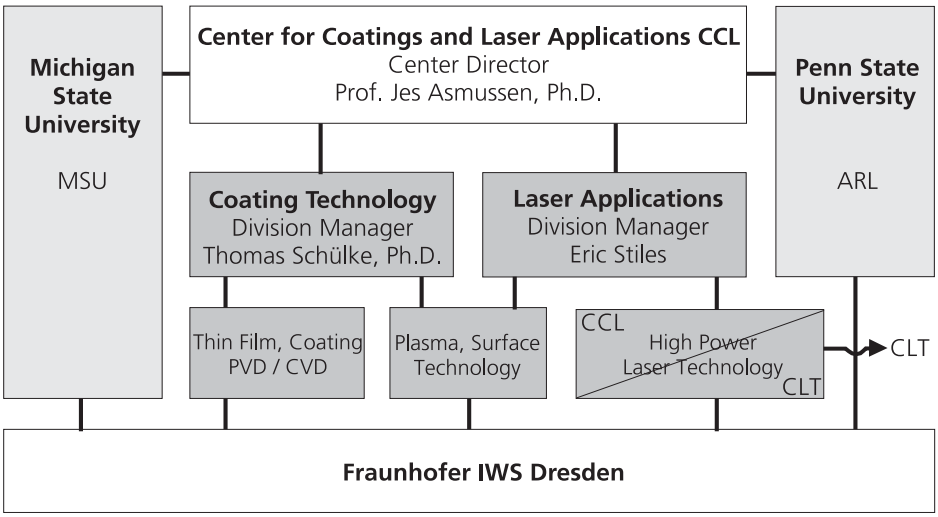
Coating Technology Division
Die Dünnschichtgruppe des CCL ist in East Lansing, Michigan zu Hause. Durch die Zusammenarbeit mit der Michigan State University wurde das Technologiespektrum der Gruppe erheblich erweitert. Neben den bereits zuvor angebotenen PVD-Technologien gehören jetzt auch mikrowellen-basierte 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.

Betriebshaushalt 2004	3,38 Mio. $
Personalaufwendungen	1,15 Mio. $
Sachaufwendungen	2,23 Mio. $



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

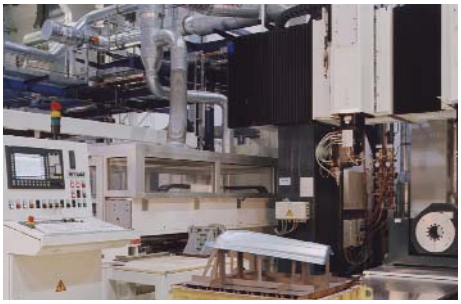
Gebäude des CCL in East Lansing, Michigan



Ausstattung

Plötzlich findet man
während man noch zu suchen glaubt.
Das eben macht die Übung.
Kurt Schwitters

Blick in die Technikumshalle des IWS



Hochgeschwindigkeits-3D-Laser-Schneidanlage mit Linearantrieben

Laserstrahlschweißanlage mit 6 kW-CO_2-Hochleistungslaser

Laserstrahlquellen

mehrere CO_2-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-CO_2-Laser

Excimerlaser (193 nm und 248 nm)

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

gepulster Nd:YAG-Laser mit OPO

Handlingsysteme

3D-Doppelgantry-Anlage, 22 Achsen mit zwei 3D-beweglichen Bearbeitungsköpfen, Geschwindigkeit bis 40 m min^{-1}, Arbeitsraum 10 x 3 x 1,5 m^3, zwei 4,5 kW-CO_2-Laser

mehrere CNC-Laser-Bearbeitungsanlagen mit bis zu 8 Achsen, Geschwindigkeiten bis 20 m min^{-1}, Arbeitsraum 2,4 x 1,8 x 0,6 m^3 bzw. 4 x 3 x 1,5 m^3, CO_2-Laserstrahlquellen 2,5 bis 6 kW

Laserinduktions-Hybridanlage mit 5 Achsen (6 kW-CO_2-Laser, 80 kW-MF-Induktionsgenerator)

Präzisionsanlagen (Genauigkeitsklasse 5 µm) mit 5 bzw. 4 CNC-Achsen, mit CO_2-Laserstrahlquelle bis 6 kW

CO_2-Nd:YAG-Kombinationsanlage (2 bzw. 3 kW) mit 4 CNC-Achsen für Präzisionsbeschichtung

Schneidmaschine mit Linearantrieben bis 300 m min^{-1} Vorschub und CO_2-Laserstrahlquelle bis 3,5 kW

universelle Excimer-Laser-Mikrostrukturierungsanlage

Beschichtungsanlagen

Laser-PVD-Beschichtungsanlagen (Nd:YAG-, Excimer-, TEA-CO_2-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 (auch mit Laserunterstützung) und zum Vakuum-Plasmaspritzen mit Roboterhandling (APS, LAAPS, VPS)

Anlage zum Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF)

Anlage zum Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA, 6 kW)

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)

modulares Pulverdüsensystem COAXn zum Laserstrahl-Präzisionsauftragschweißen

Prozessüberwachungssysteme für das Thermische Spritzen, Laserstrahl-Auftragschweißen und Laserschweißen

Softwarepaket zur DCAM off line-Programmierung von Robotern und CNC-Maschinen für alle thermischen Beschichtungsverfahren

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

Strahldiagnosesysteme für CO_2- 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 $5 \cdot 10^7$ 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 CO_2-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 Präparationstechnik:
- Metallographie
- Transmissionselektronenmikroskopie
- Rasterelektronenmikroskopie

Ausrüstung zur Werkstoffprüfung:
- servohydraulische Prüfmaschinen,
- mechanische Zug- / Druck-Prüfmaschine
- Kerbschlagpendel
- rechnergestütztes Mikrohärteprüfsystem, Härteprüfautomat
- Resonanzermüdungsapparatur
- Flachbiege-Torsions-Maschine
- verschiedene Verschleißprüfsysteme (Abrasiv-, Kavitations-, Oszillationsgleitverschleiß)

Laserakustik-Messsysteme zur Bestimmung des E-Moduls von Schichten

Laserschock-Messsystem mit Hochgeschwindigkeitspyrometer

Ausrüstung zur Oberflächen- und Schichtanalyse:
- vollautomatisches Spektralellipsometer (270 - 1700 nm)
- UV-VIS-Spektrometer
- Raman-Mikrospektrometer
- FTIR-NIR-Spektrometer
- FTIR-Spektrometer, FTIR-Mikroskop
- registrierendes Eindruckmessgerät
- Scratchtester
- Rauheitsmessgerät
- Tribometer
- Eigenspannungsmessgerät

Röntgendiffraktometer (CuKα)
Röntgendiffraktometer (MoKα)

optisches 3D-Koordinatenmesssystem

Vakuum-Plasmaspritzanlage

Anlage zur Abscheidung von Nanometermultischichten auf Großflächen

Anlage zur Abscheidung von nitridischen Hartstoffschichten

Wer es einmal soweit gebracht hat,
dass er nicht mehr irrt,
der hat auch zu arbeiten aufgehört.
Max Planck

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 Mitarbeiter teilen sich 2004 wie folgt auf:

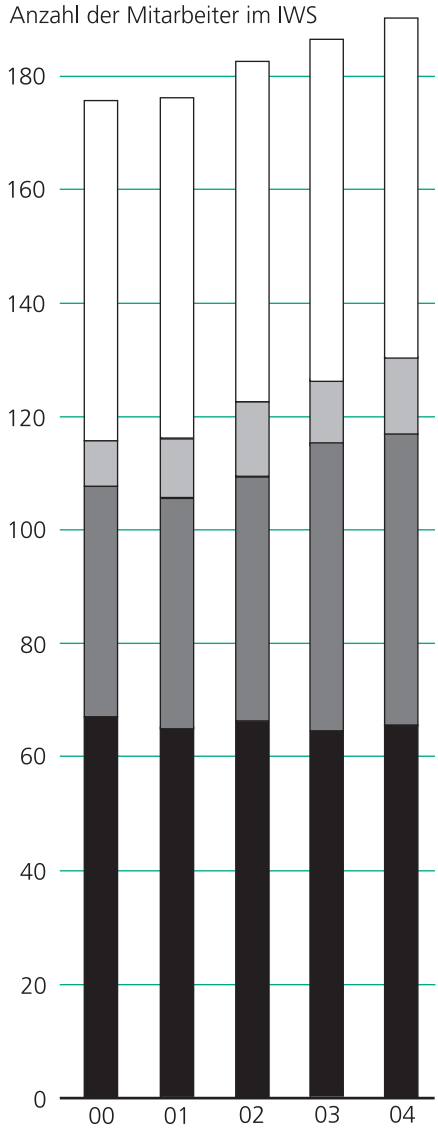
Mitarbeiter im Fraunhofer IWS

	Anzahl
Personal	**116**
- Wissenschaftler	65
- Technische Angestellte	42
- Verwaltungsangestellte	9
Lehrlinge	**14**
Wissenschaftliche Hilfskräfte	**60**
Gesamt	**190**

Mitarbeiter am Lehrstuhl für Laser- und Oberflächentechnik der TU Dresden

	Anzahl
Personal	**34**
- Wissenschaftler	20
- Technische Angestellte	13
- Verwaltungsangestellte	1
Studentische Hilfskräfte	**8**
Gesamt	**42**

Anzahl der Mitarbeiter im IWS



	Altbau	Neubau
Gebäude	**5050 m²**	**2950 m²**
- Technikumshalle	1200 m²	400 m²
- Laborräume	1760 m²	1310 m²
- Büroräume	1550 m²	1080 m²
- Infrastrukturräume	540 m²	160 m²
Technikum im DOC (Dortmund)	**1100 m²**	

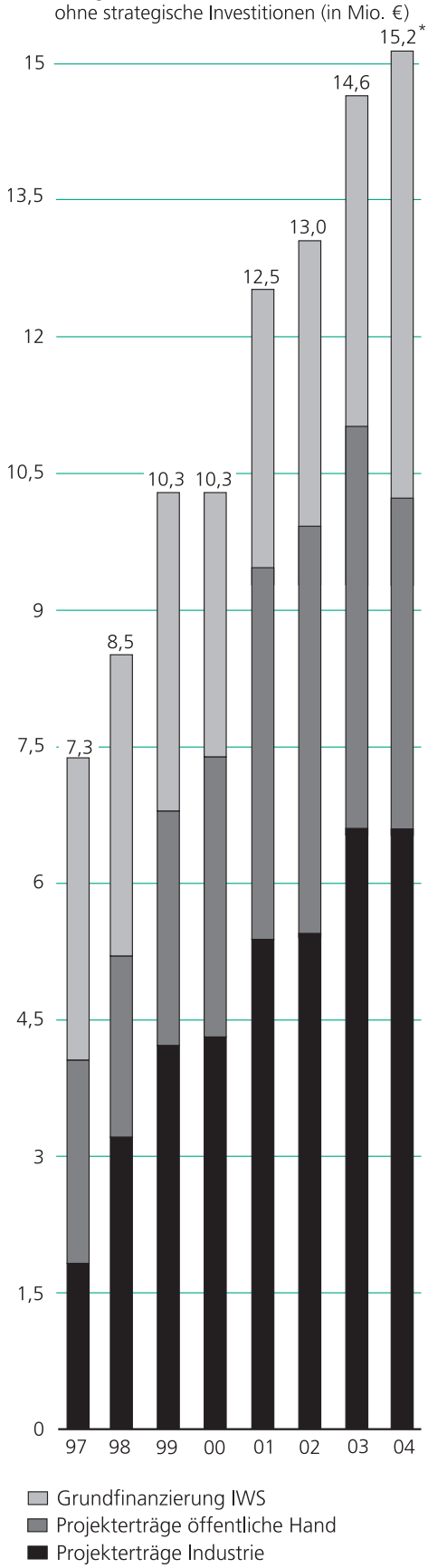
Aufwendungen und Erträge 2004 (vorläufiges Ergebnis*)

* Nachkalkulation noch nicht erfolgt

	Mio. €
Aufwendungen Betrieb und Investitionen 2004	**15,2**
Betriebshaushalt	**13,9**
- Personalaufwendungen	6,2
- Sachaufwendungen	7,7
Investitionshaushalt	**1,3**

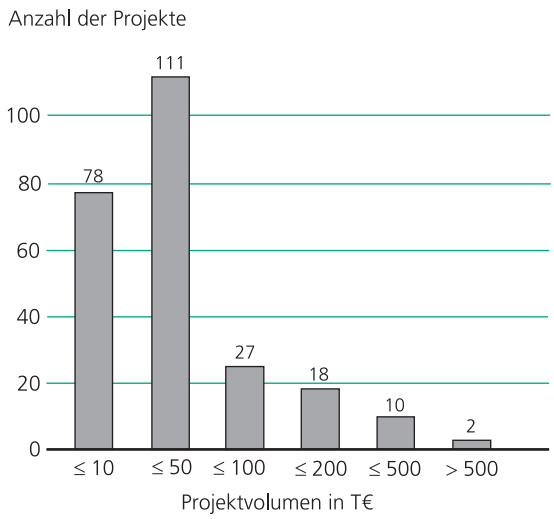
	Mio. €	%
Erträge 2004	**15,2**	
Betrieb	**13,9**	
- Projekterträge aus der Industrie	6,4	46
- Projekterträge durch Bund, Land und EU	3,1	22
- Grundfinanzierung IWS	4,4	32
Investitionen	**1,3**	
- Projekterträge aus der Industrie	0,2	
- Projekterträge durch Bund, Land und EU	0,4	
- Grundfinanzierung IWS	0,7	

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



Projekte

Im Jahr 2004 wurden am IWS 246 Projekte durchgeführt. Die Aufteilung der Projekte nach ihrem finanziellen Volumen ist in der folgenden Grafik dargestellt. So wurden beispielsweise 111 Projekte mit einem finanziellen Volumen von 10 ... 50 T€ bearbeitet.



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

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.

H. Ennen, MR Dr.
Sachsenbüro Brüssel
(bis Juni 2004)

D. Fischer
Geschäftsführer EMAG Leipzig Maschinenfabrik GmbH

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.
Institut für Organische Chemie der TU Dresden

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

W. Pompe, Prof. Dr.
Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden

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

R. Zimmermann, MR Dr.
Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst

S. Clobes, RD'in
Bundesministerium für Bildung und Forschung
(Gast)

U. Jaroni, Dr.
ThyssenKrupp Stahl AG
(Gast)

Die 14. Zusammenkunft des Kuratoriums fand am 25. / 26. Februar 2004 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
Prof. 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

Fraunhofer-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

Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt anwendungsorientierte Forschung zum direkten 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 die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, in anderen Bereichen der Wissenschaft, in Wirtschaft und Gesellschaft.

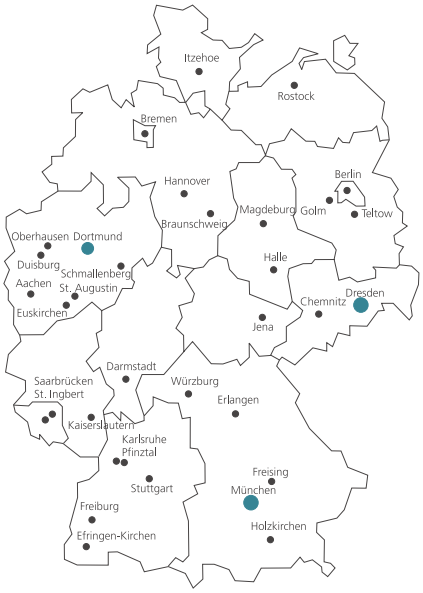
Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt derzeit rund 80 Forschungseinrichtungen, davon 57 Institute, an über 40 Standorten in ganz Deutschland. Rund 12 700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von über 1 Milliarde €. Davon fallen mehr als 900 Millionen € auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Ein Drittel wird von Bund und Ländern beigesteuert, auch 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.

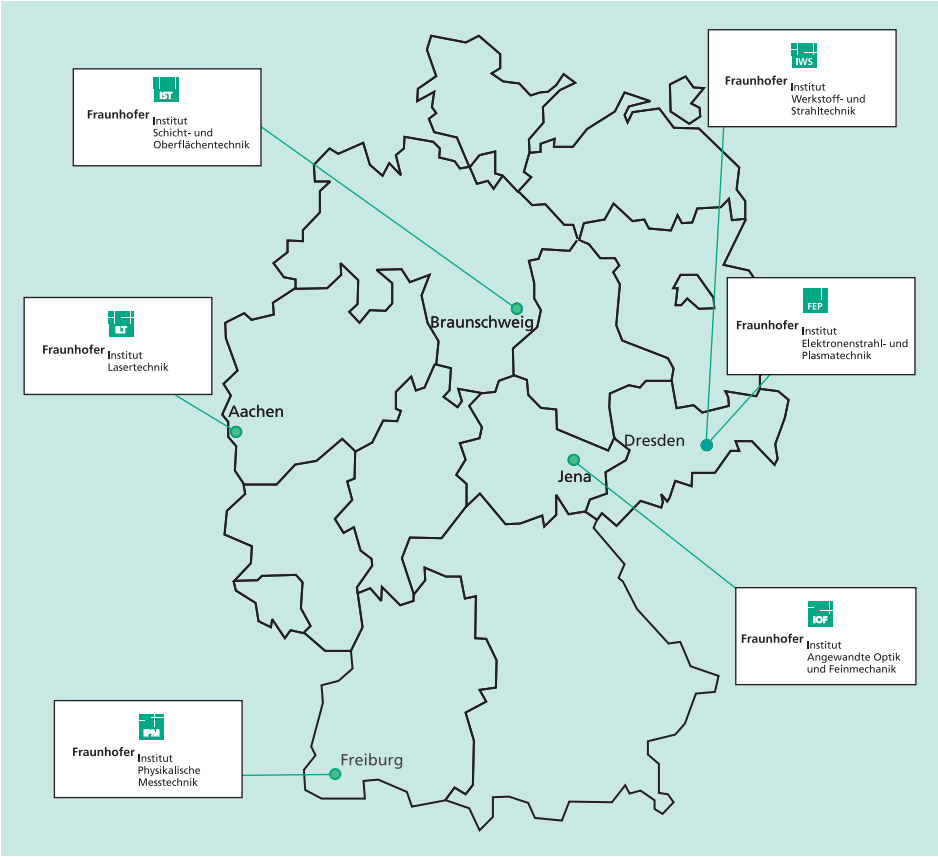
Mitglieder der 1949 gegründeten und als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft sind namhafte Unternehmen und private Förderer. Von ihnen wird die bedarfsorientierte Entwicklung der Fraunhofer-Gesellschaft mitgestaltet.

Namensgeber der Gesellschaft ist der als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreiche Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787-1826).

Etwas wirklich Neues
findet man immer nur
aus zunächst unklaren Entdeckungen,
die nicht ins Schema passen.
Volker Braun



Fraunhofer Verbund Oberflächentechnik und Photonik



Kompetenz durch Vernetzung

Sechs Fraunhofer-Institute kooperieren im Verbund Oberflächentechnik und Photonik.

Aufeinander abgestimmte Kompetenzen gewährleisten eine permanente, schnelle und flexible Anpassung der Forschungsarbeiten an den raschen technologischen Fortschritt in allen industriellen Anwendungsbereichen.

Koordinierte, auf die aktuellen Bedürfnisse des Marktes ausgerichtete Strategien führen zu Synergieeffekten.

Es wird ein breiteres Leistungsangebot zum Nutzen des Kunden erzielt.

Kernkompetenzen	FEP Dresden	ILT Aachen	IOF Jena	IPM Freiburg	IST Braunschweig	IWS Dresden
Schicht- und Oberflächentechnologie	●	●	●	●	●	●
Strahlquellen	●	●	●	●		
Mikro- und Nanotechnologie	●	●	●	●	●	●
Materialbearbeitung	●	●			●	●
Optische Messtechnik		●	●	●	●	●

Kontakt / Koordination

Sprecher des Verbundes:
Prof. Dr. Eckhard Beyer

Koordination:
Udo Klotzbach
Telefon: 0351 / 2583 252
E-Mail:
udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de

Internet: www.vop.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP

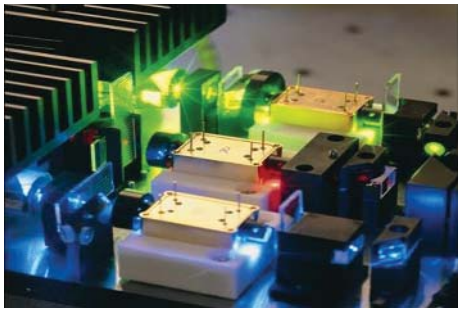
Ziel des FEP ist die Erforschung und Entwicklung innovativer Verfahren zur Nutzung von Elektronenstrahlen hoher Leistung und dichter Plasmen in Produktionsprozessen für die Oberflächentechnik. Dabei stehen praktische Fragestellungen wie Prozessmonitoring, Qualitätskontrolle, Reproduzierbarkeit, Aufskalierung und Wirtschaftlichkeit im Vordergrund.
www.fep.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Im Bereich der Lasertechnik ist das Zusammenspiel zwischen Laserentwicklung und Laseranwendung von herausragender Bedeutung. Neue Laser erlauben neue Anwendungen und neue Anwendungen geben Anregungen für neue Lasersysteme. Deshalb erweitert das Fraunhofer ILT durch die enge Kooperation mit führenden Laserherstellern und innovativen Laseranwendern ständig seine Kernkompetenzen.
www.ilt.fraunhofer.de

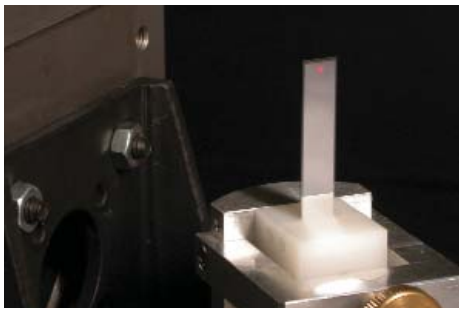
Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Hauptgegenstand der Forschungstätigkeit des Fraunhofer IOF ist die optische Systemtechnik mit dem Ziel der immer besseren Kontrolle von Licht. Schwerpunkte sind multifunktionale optische Schichtsysteme, mikro-optische Systeme, optische Messsysteme und Systeme zur Optik-Charakterisierung, feinmechanische Präzisionssysteme sowie die Mikromontage.
www.iof.fraunhofer.de



Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Das Fraunhofer IPM entwickelt optische Systeme für die Spektroskopie und Laserbelichtungstechnik. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Verwirklichung hochdynamischer Systeme. Neben der schnellen Laseransteuerung sind dafür besondere Kompetenzen bei der Signalverarbeitung gefragt. So wurden für die Infrastrukturüberwachung von Hochgeschwindigkeitsstrecken robuste, wartungsarme Messgeräte realisiert.
www.ipm.fraunhofer.de

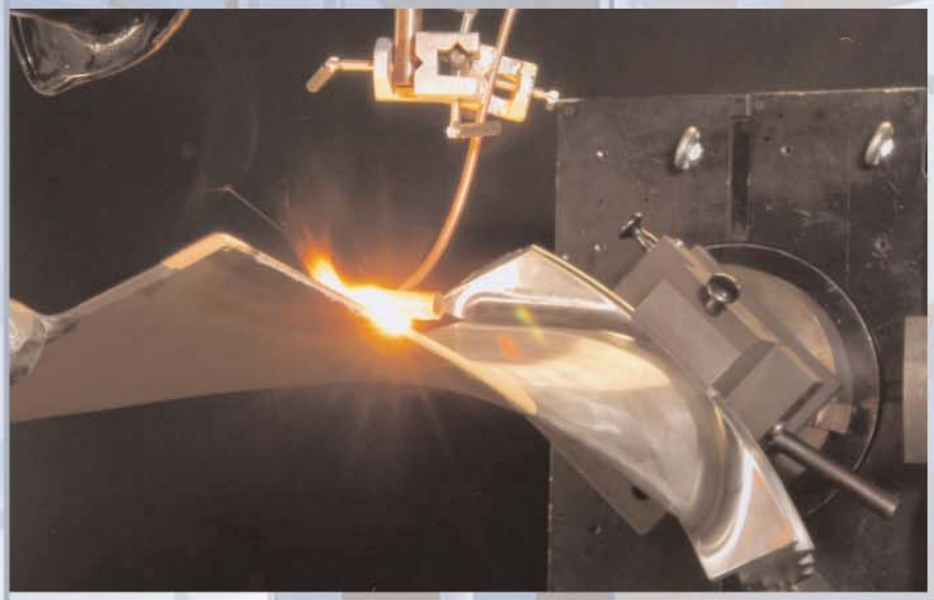


Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST

Das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST bündelt als industrienahes FuE-Dienstleistungszentrum Kompetenzen auf den Gebieten Schichtherstellung, Schichtanwendung und Schichtcharakterisierung. Zurzeit ist das Institut in folgenden Geschäftsfeldern tätig: Maschinenbau und Fahrzeugtechnik; Werkzeuge; Energie, Glas und Fassade; Optik, Information und Kommunikation; Mensch und Umwelt.
www.ist.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Das Fraunhofer IWS forscht auf den Gebieten der Lasertechnik (z. B. Laserschweißen, Laserschneiden, Laserhärten), der Oberflächentechnik (z. B. Auftragschweißen), der Mikrobearbeitung sowie der Dünnschicht- und Nanotechnologie. Die in die Forschung und Entwicklung integrierte Werkstoffprüfung und -charakterisierung fundiert und erweitert das Spektrum des IWS.
www.iws.fraunhofer.de



arnold
arnold

Redaktion: Im Interview zum vorletzten Jahresbericht kündigten Sie hinsichtlich der Zusammenarbeit mit der Firma Airbus neue Projekte zur Entwicklung von Laserstrahlschweißverfahren für Flugzeugrumpfstrukturen an. Was ist daraus geworden?

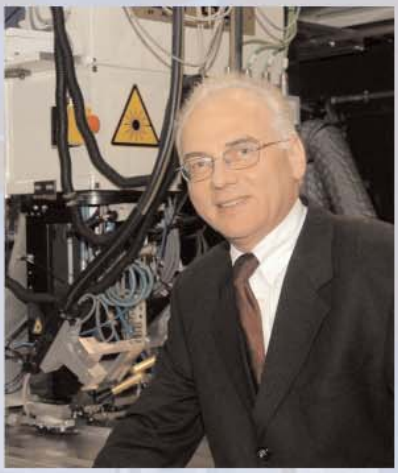
Prof. Brenner: Kernstück des vom Sächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst geförderten und mit Unterstützung der Firma Airbus Deutschland GmbH durchgeführten Projektes war die Konzipierung, Beschaffung und Inbetriebnahme einer neuartigen Laserstrahlschweißanlage für das simultane 3D-Schweißen von Versteifungselementen auf Flugzeugstrukturen von bis zu 10 m Länge und 3 m Breite. Im Jahr 2004 konnte die Anlage erfolgreich in Betrieb genommen und Technologieentwicklungen für das Schweißen von ersten Bauteilen für die Firma Airbus begonnen werden.

Damit steht dem IWS eine derzeit unikale Anlage zur Verfügung, mit der es uns zukünftig möglich ist, große, bisher schweißtechnisch nicht herstellbare und geometrisch komplizierte Strukturen mit großer Genauigkeit, minimalem Wärmeeintrag und Verzug sowie hoher Schweißgeschwindigkeit zu fügen. Wir hoffen mit dieser, in unseren anlagentechnischen Ausrüstungen einen qualitativen Sprung darstellenden Anlage, bisher im Flugzeugbau schweißtechnisch nicht realisierbare Bauweisen entwickeln und umsetzen zu können. Darüber hinaus sind wir mit der Inbetriebnahme der Anlage auch in der Lage, deren schweißtechnologische Möglichkeiten auch zum Schweißen von großen räumlichen Strukturen aus anderen Industriebereichen wie dem Schienenfahrzeug-, Waggon-, Nutzfahrzeug-, Schiffs- oder auch Gasturbinen- und Stahlbau einzusetzen.

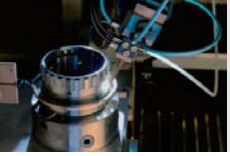
Redaktion: Das andere verfahrenstechnisch orientierte Standbein Ihrer Abteilung ist die Randschichtveredlung. Welche Fortschritte konnten Sie im letzten Jahr erreichen?

Prof. Brenner: Die Entwicklungsstrategie der Gruppe Randschichtveredlung zielt in zweierlei Richtungen: Erstens die der Neu- und Weiterentwicklung von effektiven Randschichtveredlungs-Technologien mit verbesserten Nutzeigenschaften und zweitens die der Entwicklung, Einsatzerprobung und Überführung der dazugehörigen verfahrensspezifischen Anlagenkomponenten zur Strahlformung, Einstellung kontrollierter Atmosphären, Temperaturmessung und -regelung sowie der dazugehörigen Software. Auf beiden Feldern konnten wir im letzten Jahr wesentliche Fortschritte erzielen: Mit der Entwicklung des Verfahrens der Randschichtaushärtung an Bauteilen aus ausscheidungshärtbaren Stählen wollen wir uns ein weiteres Standbein auf dem Gebiet des Verschleißschutzes bisher nicht randschichthärtbarer Werkstoffe erarbeiten. Mit der Überführung einer neuartigen Technologie für die Lebensdauerverlängerung von Endstufen-Laufschaufeln aus ausscheidungshärtbaren Stählen für große Dampfturbinen haben wir einen ersten wichtigen Meilenstein erreicht.

Auf dem zweiten Feld gelang es uns, mit der Entwicklung eines sehr preiswerten ortsauflösend messenden Temperaturerfassungssystems, der dazugehörigen Software sowie deren Integration in Laserstrahlhärteanlagen günstigere Bedingungen für die reproduzierbare Randschichthärtung von kompliziert geformten Bauteilen zu schaffen. Seine Stärken kann das neue System insbesondere dann ausspielen, wenn sehr teuere Bauteile, wie z. B. Großwerkzeuge, in geringen Stückzahlen oder in Einzelstücken ohne aufwändige Probehärtungen beanspruchungsgerecht gehärtet werden sollen.



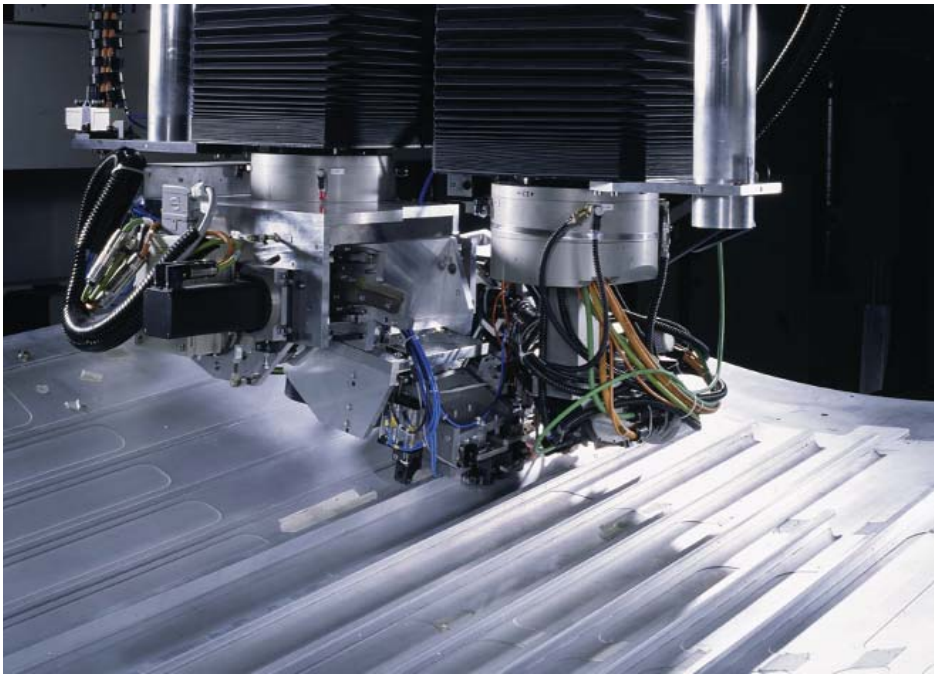
Wer aufhört besser zu werden,
hat aufgehört gut zu sein.
Philipp Rosenthal

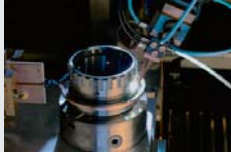


Prof. Berndt Brenner
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 207,
berndt.brenner@iws.fraunhofer.de)

Beispiele aus den Arbeiten 2004

1. Ortsauflösend messendes Temperaturerfassungssystem zur Lasermaterialbearbeitung 28
2. Laserstrahlscanning erweitert das Anwendungspotenzial von Hochleistungsdiodenlasern 29
3. Lebensdauersteigerung von Dampfturbinenschaufeln aus ausscheidungshärtbaren Stählen 30
4. Schweißtechnische Lösungen zur Anwendung von Magnesiumblech im Karosseriebau 31
5. XXL-Anlage zum Laserstrahlschweißen von großformatigen 3D-Strukturen 32
6. Laserstrahlschweißen von Axialrundnähten mit Zusatzwerkstoff an rotationssymmetrischen Bauteilen mit hoher Steifigkeit 33
7. Verbesserte Umformbarkeit von hochfesten Feinblechen aus Mehrphasenstählen durch Laserinduktionsschweißen 34
8. Verbesserung der mechanischen Eigenschaften lasergasnitrierter Randschichten an Titanwerkstoffen 35
9. Effiziente Produktentwicklung durch begleitende Versagensanalyse 36
10. Prüfstand für Thermozykliertests an hochbeanspruchten Triebwerkskomponenten 38





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 Hochleistungs-Diodenlasern, CO_2-Lasern, Nd:YAG-Lasern und / oder Induktion,
- Randschichtveredelung von Entwicklungs- und Prototypmustern.

Laserstrahlgehärtete Turboladerwellen

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 Schweißeignung 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.

Laserstrahlgeschweißtes Getriebebauteil

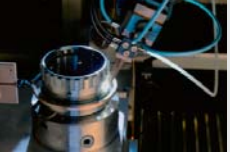
Dr. Bernd Winderlich
Gruppenleiter Werkstofftechnik / Werkstoffcharakterisierung
(Tel. 2583 224,
bernd.winderlich@iws.fraunhofer.de)

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.

Neue Testeinrichtung für Kopfzugversuche



Ortsauflösend messendes Temperaturerfassungssystem zur Lasermaterialbearbeitung

Aufgabenstellung

Eine Reihe von Prozessen der Lasermaterialbearbeitung kann kontrolliert und geregelt werden, indem man berührungslos die Temperatur an der Bearbeitungsstelle misst. Das geschieht üblicherweise mit Pyrometern. Pyrometer haben jedoch den entscheidenden Nachteil, dass die Maximaltemperaturen von inhomogenen und instationären Temperaturfeldern, wie sie zum Beispiel beim Laserstrahlhärten auftreten, nicht sicher gemessen werden können. Thermografiesysteme können diese Nachteile überwinden, sind jedoch so preisintensiv, dass ein Anwender nur selten bereit ist, diese für einfache Kontroll- und Regelprozesse einzusetzen. Die Aufgabe bestand darin, ein ortsauflösend messendes und zugleich preiswertes System zu schaffen, das den Anforderungen der Lasermaterialbearbeitung genügt.

Abb. 1: Temperaturerfassungssystem angeflanscht an die Optik eines Hochleistungsdiodenlasers, koaxiale Prozessbeobachtung

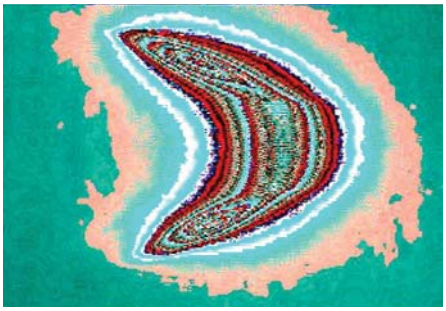


Abb. 2: Falschfarbendarstellung beim Simultanhärten einer Bauteilkante mit zwei Laserspots

Lösungsweg

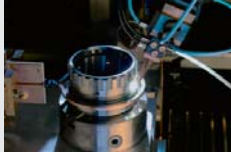
Die Lösung besteht in der Verwendung einer preiswerten CCD-Kamera, die auch noch eine geringe Empfindlichkeit im nahen Infrarotbereich unterhalb 800 nm hat. Diese wird kombiniert mit einem schmalbandigen Filter. Das damit aufgenommene Graubild kann, wenn keine prozessbegleitenden Emissionslinien störend wirken, mit der Temperaturverteilung auf der beobachteten Fläche korreliert werden. Mit einem schwarzen Strahler kann man ein solches System kalibrieren. Damit das System für den industriellen Einsatz tauglich ist, kann es in ein Gehäuse eingebaut werden, welches ständig mit sauberer Druckluft gespült werden kann, um das Eindringen von Staub und Feuchtigkeit zu vermeiden. In dieses Gehäuse kann ein pneumatischer Filterschieber eingebaut werden, damit man neben der Anwendung der Kamera zur Temperaturmessung diese auch im Tageslichtbetrieb zur Justage der Prozesse verwenden kann.

Ergebnisse

Erste Systeme befinden sich bereits im industriellen Einsatz. Es sind zur Zeit zwei Varianten der Signalauswertung möglich. Das System gestattet die Ermittlung der Maximaltemperatur, wobei der Anwender festlegen kann, wie viele Bildpunkte diese repräsentieren müssen, damit das Signal als sinnvoll angesehen wird. Eine zweite Variante ist die Erfassung der Größe einer Fläche, deren Temperatur oberhalb einer vom Anwender festgelegten Schwelltemperatur liegt. Damit lassen sich andere Prozessinformationen gewinnen, die zum Beispiel für das Schweißen und Auftragschweißen sinnvoll als Regelgröße verwendet werden können. Das System wird in der Regel in Verbindung mit dem Regelsystem LompocPro eingesetzt.

Ansprechpartner

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



Laserstrahlscanning erweitert das Anwendungspotenzial von Hochleistungsdiodenlasern

Aufgabenstellung

Das temperaturgeregelte Härten mit Hochleistungsdiodenlasern hat in den letzten Jahren zunehmend Einzug in die industrielle Fertigung gefunden. Das ist nicht zuletzt begründet durch die vielen Vorteile des Verfahrens, wie die präzise und reproduzierbare Prozessführung, die gute Automatisierbarkeit, die vielfältigen Möglichkeiten zum lokalen Härten komplexer 3D-Bauteile und der geringe Verzug aufgrund des geringen Wärmeeintrags.

Trotz der guten Möglichkeiten zur Laserstrahlformung mittels Diodenstapelung und durch Verwendung von Linsensystemen ist es im Einzelfall oft schwierig, die für das Bauteil optimale Laserspotgeometrie und Intensitätsverteilung einzustellen. Die Entwicklung von Sondersystemen kann zudem sehr kostenintensiv und zeitaufwändig sein, eine flexible Anpassung des Laserspots an sich verändernde Bedingungen ist meist nicht möglich. Deshalb war es das Ziel, die bekannten Vorteile von flexiblen Scanneroptiken auch für Hochleistungsdiodenlaser im Multi-Kilowatt-Bereich nutzbar zu machen.

Lösungsweg

Dazu mussten folgende Probleme gelöst werden: Findung geeigneter Schichtsysteme mit Reflektivitäten > 99 % bei mehreren Wellenlängen, Auslegung von Spiegel, Spiegelhalterung und Scannerantrieb, Konstruktion und Erprobung einer effektiven Spiegelkühlung. Das damit entstandene Gesamtsystem (Abb. 1) kann als externe Optik für Standard-Hochleistungsdiodenlaser mit langer Brennweite verwendet werden.

Optional lassen sich verschiedene Geräte zur Temperaturmessung (Pyrometer, Kamerasysteme, u. ä.) integrieren. Die Steuerung erfolgt mit einer speziellen Software, die nicht nur die optimalen Scanparameter berechnet, sondern auch über verschiedene Möglichkeiten zur temperaturgeführten Prozessregelung verfügt. Alle relevanten Prozessparameter werden automatisch überwacht, aufgezeichnet und stehen für die Qualitätssicherung zur Verfügung.

Ergebnisse

Das Scanningsystem wurde mit Laserleistungen bis 4 kW erfolgreich getestet. An Bauteilen verschiedenster härtbarer Stahlwerkstoffe konnten Härtezonen mit einer Breite von bis zu 50 mm generiert werden (Abb. 2) bzw. die Härtespurbreite gezielt und programmierbar geändert werden (Abb. 3). Dadurch ergeben sich sowohl neue Möglichkeiten einer beanspruchungsgerechten und bauteilangepassten Härtezonengeometrie ohne weiche Gebiete als auch die Einsparung von Laserenergie. Ein neu entwickelter Bearbeitungskopf ist zur Zeit in der industriellen Erprobung.

Abb. 1: Modulares Scanningsystem an 4 kW-Hochleistungsdiodenlaser

Abb. 2: Härtezone auf C45, 27 mm breit, gehärtet mit 2,5 kW-Hochleistungsdiodenlaser und Scanningsystem

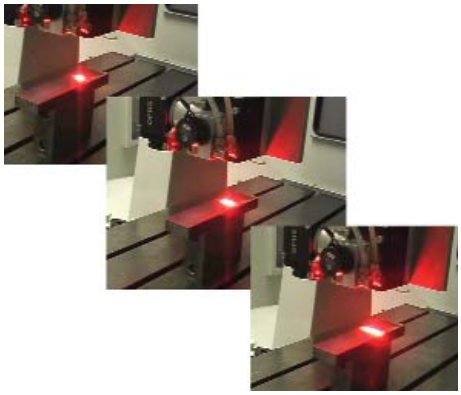
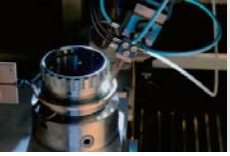


Abb. 3: Laserstrahlhärten von Werkzeugstahl mit Variation der Härtezonenbreite während des Prozesses

Ansprechpartner

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



Lebensdauersteigerung von Dampfturbinenschaufeln aus ausscheidungshärtbaren Stählen

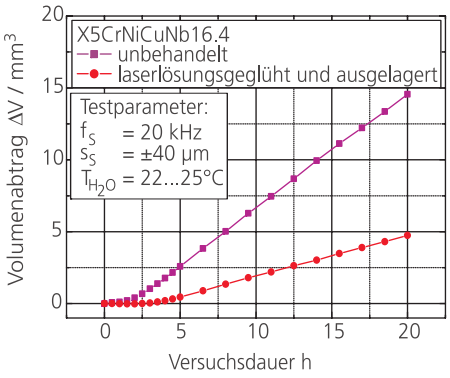


Abb. 1: Verbesserung des Verschleißwiderstandes gegenüber kavitativer Belastung

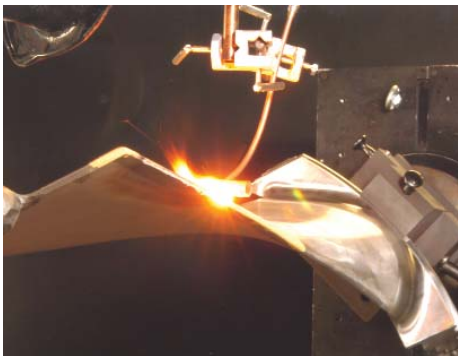


Abb. 2: Laser-Randschichtlösungsglühen der Eintrittskante einer Turbinenschaufel

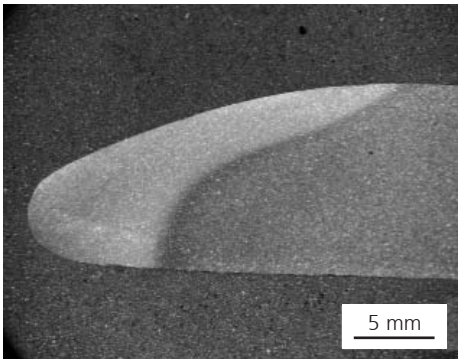


Abb. 3: Metallographischer Querschliff der ausgehärteten Randschicht

Ansprechpartner

Prof. Berndt Brenner
Tel.: 0351 / 2583 207
berndt.brenner@iws.fraunhofer.de

Aufgabenstellung

Endstufen-Laufschaufeln von großen Dampfturbinen unterliegen während ihres Betriebes einer sehr hohen Verschleißbelastung durch Tropfenschlag, gepaart mit einer hohen zyklischen und Fliehkraft-Beanspruchung. Um den hohen zyklischen Belastungen zu entsprechen, werden bei hochbelasteten, großen Dampfturbinen zunehmend ausscheidungshärtbare Cr-Ni-Stähle eingesetzt, die höheren mechanischen Belastungen als die konventionellen martensitischen Turbinenschaufelstähle ausgesetzt werden können.

Einsatzbegrenzend wirkte sich bisher aus, dass es kein Verschleißschutzverfahren gab, das in der Lage ist, den spezifischen Anforderungen an Turbinenschaufeln hinsichtlich Beständigkeit gegenüber Tropfenschlag-, zyklischer und Spannungsrisskorrosions-Belastung zu entsprechen.

Lösungsweg

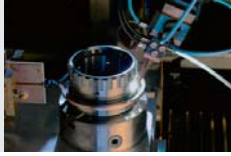
Zur Lösung dieser Aufgabenstellung wurde in einem gemeinsamen Projekt mit Siemens Power Generation Mülheim ein neuartiges Randschicht-Veredlungsverfahren entwickelt [1]. Dazu wird mit einem oszillierenden Laserstrahl eine Zone, deren Geometrie der Geometrie der zu schützenden Zone entspricht, in einem spezifischen Temperatur-Zeit-Zyklus randschichtlösungsgeglüht (siehe Abb. 2). Anschließend wird die gesamte Turbinenschaufel einer erneuten Auslagerungswärmebehandlung bei unüblich niedrigen Temperaturen unterworfen.

Ergebnisse

Im Ergebnis der Behandlung entsteht eine der lokalen Verschleißbelastung der Turbinenschaufel geometrisch angepasste Härtezone um die Eintrittskante, deren Breite größer ist als die Breite intensiver Verschleißbelastung (siehe Abb. 3). Diese Schicht weist eine um bis zu 150 HV höhere Härte auf. Im Kavitationsverschleißtest sinkt die Verschleißrate etwa auf ein Drittel (siehe Abb. 1). In Ermüdungstests konnte nachgewiesen werden, dass bei derart randschichtveredelten Proben kein Abfall der zyklischen Dauerfestigkeit auftritt.

Die Eignung des Verfahrens zum industriellen Einsatz in hochbelasteten Turbinenschaufeln wurde beim Auftraggeber Siemens Power Generation in Spannungsrisskorrosions-Tests und einer Reihe von anderen Prüfungen nachgewiesen. Derzeit bewähren sich so behandelte Turbinenschaufeln in einem ersten Anwendungsfall in einer Grundlastturbine.

[1] Patent DE 10030433C2 "Verfahren zur Erzeugung verschleißbeständiger Randschichten an ausscheidungshärtbaren Werkstoffen"



Schweißtechnische Lösungen zur Anwendung von Magnesiumblech im Karosseriebau

Aufgabenstellung

Die automobile Zukunft wird immer mehr durch Komfort- und Sicherheitsansprüche geprägt, die das Fahrzeuggewicht tendenziell erhöhen. Um dennoch eine Gewichtsreduzierung zu erreichen, sind Karosserie-Anbauteile wie Klappen und Türen zu entwickeln, die aus Werkstoffen mit geringer Dichte bei gleichzeitig guten Materialkennwerten bestehen. Das soll mit dem Bau einer zweiteiligen Modellmotorhaube aus Magnesiumwalzprodukten gezeigt werden. Dabei soll die Schweißbarkeit der verwendeten Mg-Knetlegierung an einem komplexen Bauteil untersucht werden.

Lösungsweg

Die Realisierung des Demonstrators erfolgt in Zusammenarbeit mit den Fraunhofer-Instituten IWU und IFAM durch die Entwicklung einer Fertigungskette, die vom Umformprozess bis zum Fügen der Blechteile reicht. Die Formgebung des Innenteils geschieht durch einen neuartigen temperaturgeregelten Innenhochdruckumformprozess, bei dem eine Versteifungsstruktur im Mg-Blech integriert wird. Das Außenblech wird konventionell temperiert tiefgezogen. Nachdem Innen- und Außenblech durch eine flächige Klebung verbunden wurden, wird die randseitige Verbindung durch Laserstrahlschweißen der Blechflansche erzeugt. Die geklebten Mg-Bleche werden in einer Vakuumspannvorrichtung zum Laserstrahlschweißen arretiert (Abb. 2). Die 3D-Kehlnahtschweißung erfolgt über einen robotergeführten Nd:YAG-Laserschweißprozess.

Ergebnisse

Die erzeugte zweiteilige Magnesium-Modellmotorhaube weist trotz ihres extrem geringen Gewichts eine sehr hohe Steifigkeit auf (Abb. 1). So kann im Bereich des Vorderwagens eine deutliche Gewichtsreduzierung realisiert werden. Außerdem wird bei diesem Konzept die Versteifungseinheit für das Außenblech durch einen einzelnen Arbeitsschritt hergestellt, so dass die Fertigungskette verkürzt werden kann.

Walzprodukte aus Magnesium besitzen eine hervorragende Schweißbarkeit. Für die Modellmotorhaube ist eine Kehlnahtschweißverbindung so ausführbar, dass keine thermische Abzeichnung auf der Außenhaut sichtbar wird (Abb. 3). Der Prozess ist hervorragend automatisierbar, da zur Nahterkennung ein optischer Sensor eingesetzt werden kann. Die notwendige Prozesszeit bewegt sich im Bereich weniger Sekunden. Sie ist damit konventionellen Punktschweiß- oder Clinch-Verfahren deutlich überlegen.

Abb. 1: Magnesium-Demonstrator-Modellmotorhaube

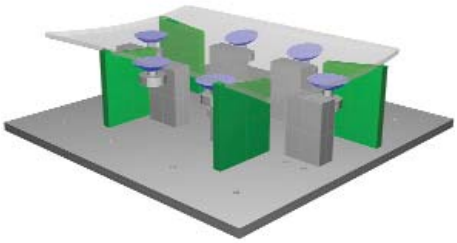


Abb. 2: Spannvorrichtung für eine Magnesium-Modellmotorhaube zum 3D-Laserstrahlschweißen

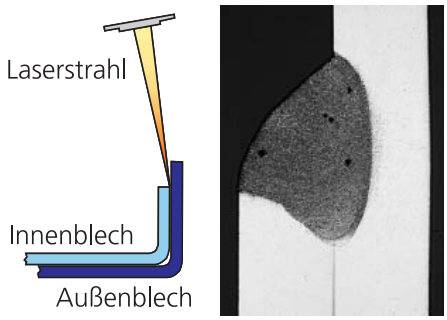
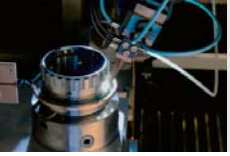


Abb. 3: Prinzipskizze der Prozessanordnung (links), Querschliff der Kehlnahtschweißung (rechts)

Ansprechpartner

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



XXL-Anlage zum Laserstrahlschweißen von großformatigen 3D-Strukturen

Abb. 1: XXL-Laserschweißanlage

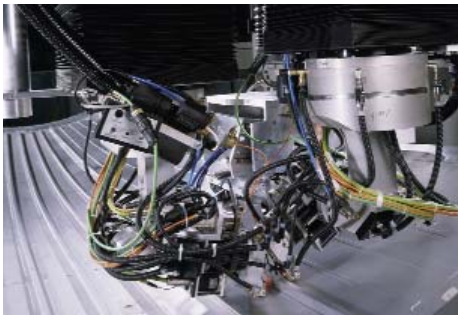


Abb. 2: Beidseitig-gleichzeitiges Schweißen von Stringer-Hautfeld-Verbindungen

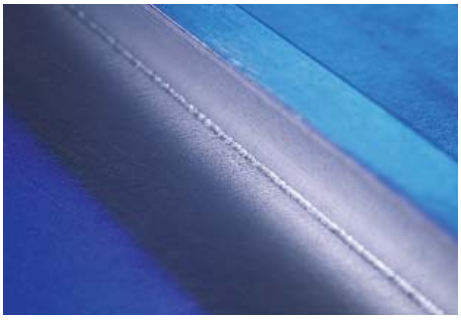


Abb. 3: Stringer-Hautfeld-Verbindung

Ansprechpartner

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

Aufgabenstellung

Das beidseitig-gleichzeitige Schweißen von großen, sphärisch gekrümmten 3D-Bauteilen in beliebigen Raumrichtungen mit gleichzeitiger Bauteilspannung erfordert neue Maschinenkonzepte. Dazu wurde ein neuartiges Prinzip für eine Laserstrahlschweißanlage realisiert. Für die Nutzung der Anlage sowohl mit CO_2-Lasern als auch mit Festkörperlasern wurde die Anlage in kartesischer Bauart ausgeführt.

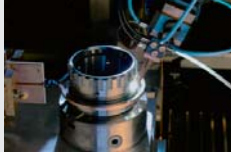
Lösungsweg

Das Grundkonzept der Anlage besteht in einer Gantry-Anlage mit zwei unabhängig verfahrbaren Y-Brücken. Die zwei daran befestigten Z-Achsen mit unabhängig voneinander dreh- und schwenkbaren Einheiten tragen die beiden Schweißköpfe einschließlich der optischen Sensoren zur online-Detektion der Nahtlage. Eine dritte, zusätzliche Z-Achse, die eine auch im Raum dreh- und schwenkbare Plattform enthält, übernimmt eine mit dem Schweißprozess mitlaufende Spannfunktion. Für eine verbesserte Maschinendynamik und die Minimierung des Bauraums wurde ein hybrides Bewegungskonzept für die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Bauteil gewählt. Für annähernd gleiche Strahlparameter im gesamten Arbeitsbereich von 1 m x 3 m x 10 m werden speziell auf die eingesetzten Laser abgestimmte Teleskope genutzt.

Ergebnisse

Für höchstmögliche Flexibilität wurden für die Bewegung in Maschinenlängsachse mechanisch entkoppelte Parallelachsen realisiert. Dies ermöglicht eine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Bauteil durch die Bewegung der Y-Brücken in X-Richtung, der alleinigen Bewegung des Tisches in X-Richtung, oder der gleichzeitigen entgegengesetzten Bewegung von Y-Brücken und X-Tisch in X-Richtung.

Neben einer besonders großen Flexibilität bietet die entwickelte Lösung als Kombination einer Gantry-Maschine mit fliegender Optik und einem zusätzlichen Bewegungstisch für die Baueile insbesondere noch die Vorteile deutlich verbesserter Beschleunigungswerte für die Bauteil-Relativbewegung, eines verringerten Platzbedarfes und einer geringeren Änderung der Strahlweglänge beim Schweißen mittels CO_2-Laser. Der Bearbeitungsraum misst 10 m x 3 m x 1 m. Es können gleichzeitig zwei Bearbeitungsoptiken und eine flexible Spanntechnik auf praktisch beliebigen 3D-Bahnen im Arbeitsraum einzeln oder synchron mit Positionstoleranzen von kleiner 0,05 mm im Raum bewegt werden. Dabei ist auch eine Koordinatentransformation für je 6 Bewegungen möglich.



Laserstrahlschweißen von Axialrundnähten mit Zusatzwerkstoff an rotationssymmetrischen Bauteilen mit hoher Steifigkeit

Aufgabenstellung

Das Fügen fertig bearbeiteter Zahnräder und Wellen für Fahrzeuggetriebe wird in der Automobilbranche zunehmend interessant. Dabei werden vorzugsweise CO_2-Laser mit hoher Strahlqualität eingesetzt, die ein verzugsarmes Schweißen erlauben. Die Zunahme der zu übertragenden Drehmomente und der Anforderungen an die Kompaktheit der Getriebebauteile ist mit einem Anstieg der Steifigkeit der Komponenten verbunden. Dadurch wird ein rissfreies Schweißen extrem erschwert. Die schweißtechnische Aufgabe besteht in der Herstellung der Schweißverbindung trotz der Kombination erschwerender Umstände für die Schweißbarkeit:

- sehr steifes Bauteil,
- Axialrundnaht,
- Vergütungsstahl,
- fertig bearbeiteter Zustand.

Lösungsweg

Eine erfolgreiche und effektive Lösung wurde durch das Laserstrahlschweißen mit werkstoffangepassten Zusatzwerkstoffen erarbeitet, das sich durch folgende Spezifika auszeichnet:

- Die Entstehung eines harten, vergleichsweise spröden Martensits in der Schweißzone wird verhindert.

- Die sich bei der Abkühlung aufbauenden transienten Spannungen in der Schweißnaht werden durch gezielte plastische Verformung im duktilen Schweißgut abgebaut.

- Heißrissfördernde Elemente wie z. B. Schwefel können durch Legierungsbestandteile des Zusatzwerkstoffes gebunden werden.

Ergebnisse

An einsatzgehärteten, fertig bearbeiteten Bauteilen sind keine zur Rissvermeidung ausreichend hohen Vorwärmtemperaturen möglich. Rissfreie Schweißungen konnten dagegen mit einem werkstoffangepassten Zusatzwerkstoff erreicht werden (Abb. 1). Die Prozessstabilität ist gut im Vergleich zu anderen Verfahren (Abb. 2).

Die Technologie des prozesssicheren Fügens einer Hauptgetriebewelle aus dem Vergütungsstahl 42CrMo4 für einen Radlader wurde in Zusammenarbeit mit einem Baumaschinenhersteller erfolgreich im Prüfstand getestet (Abb. 3).

Neben dem im IWS entwickelten Verfahren des induktiv unterstützten Laserstrahlschweißens ergänzt die Variante des Laserstrahlschweißens mit werkstoffangepassten Zusatzwerkstoffen damit die Fügemöglichkeiten des Laserstrahlschweißens im Bereich Powertrain. Sie zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

- Die thermischen Belastungen des Bauteils sind niedriger als bei der konventionellen Ofenvorwärmung oder beim induktiv unterstützten Laserstrahlschweißen.

- Die Investitionskosten für eine Zusatzwerkstoffördereinrichtung sind vergleichsweise gering.

Abb. 3: Antriebswelle eines Radlader-Getriebes aus 42CrMo4

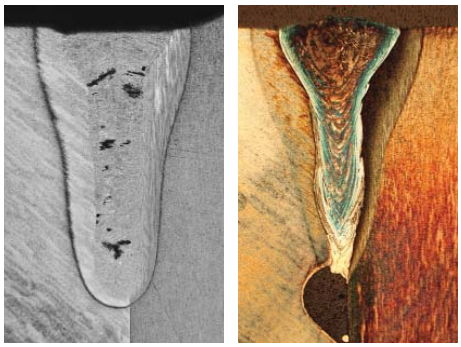


Abb. 1: Vergleich von Axialrundnähten, die nur mit Vorwärmung (links) oder nur mit Zusatzwerkstoff (rechts) geschweißt wurden

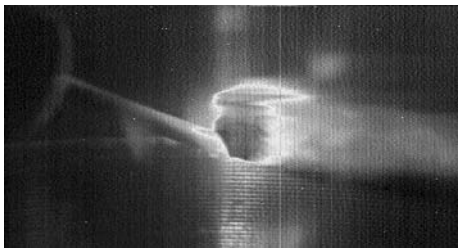
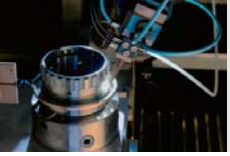


Abb. 2: Schweißprozess mit Zusatzwerkstoff, Aufnahme mit High-speed-Kamera

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Uwe Stamm
Tel.: 0351 / 2583 152
uwe.stamm@iws.fraunhofer.de



Verbesserte Umformbarkeit von hochfesten Feinblechen aus Mehrphasenstählen durch Laserinduktionsschweißen

Aufgabenstellung

Hochfeste mehrphasige Feinbleche finden verstärkten Einsatz in der Karosseriefertigung. Diese Werkstoffe erreichen ihre hohe Festigkeit erst in Abhängigkeit von der Verfestigung während der Umformung zum Bauteil. An Schweißverbindungen aus diesen Werkstoffen sind deshalb hohe Anforderungen hinsichtlich ihrer Verformbarkeit im Fertigungsprozess gestellt. Geschweißte Bauteile sollen darüber hinaus eine möglichst hohe Restverformung ertragen können. Ziel war daher die Entwicklung eines Schweißverfahrens, mit dem ohne Verlust der Vorteile des Laserstrahlschweißens die Umformeigenschaften der Schweißnaht verbessert werden können. Auf Grund der komplexen Werkstoffbeanspruchung im Umformprozess müssen dabei die Schweißnahteigenschaften gezielt eingestellt und somit die Fügeparameter beanspruchungsangepasst ausgewählt werden können.

Lösungsweg

Durch das Laserstrahlschweißen mit prozessintegrierter induktiver Kurzzeit-Wärmebehandlung (Abb. 2) kann die Nahthärte nach dem Schweißen drastisch reduziert werden. Über die gezielte Wahl der Prozessparameter sind spezifische Temperatur-Zeit-Regime realisierbar. Dadurch können die lokalen Eigenschaften im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone entsprechend der Beanspruchung verändert werden.

Über die Erstellung von Grenzformänderungsschaubildern von Schweißverbindungen kann die maximale Verformbarkeit in Abhängigkeit vom Beanspruchungszustand bestimmt 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 zum induktiv unterstützten Laserstrahlschweißen von Stumpfnähten und Überlappverbindungen entwickelt (Abb. 3). Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass sich diese Technologie auch für die Überlappverbindung, die im Karosseriebau wichtigste Nahtform, eignet. Hier ist nach einer Parameteroptimierung im Unterblech die gleiche Härteabsenkung wie im Oberblech oder im Stumpfstoß erzielbar. Mittels Grenzformänderungsschaubildern konnte eine deutliche Verbesserung der Umformbarkeit für karosseriebautypische Umformungen nachgewiesen werden (Abb. 1). Bei Lage der großen Formänderung φ_1 parallel zur Schweißnaht zeichnet sich im gesamten Umformbereich eine Steigerung der Verformbarkeit infolge der induktiven Wärmebehandlung ab. Für φ_1 quer zur Schweißnaht sind Vorteile im Streckziehbereich zu erwarten.

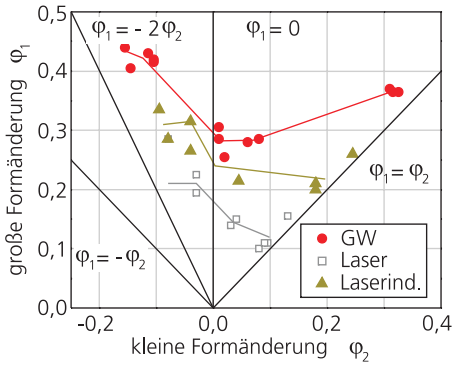


Abb. 1: Grenzformänderungsschaubild für RA-K40/70 (1,5 mm), φ_1 parallel zur Schweißnaht

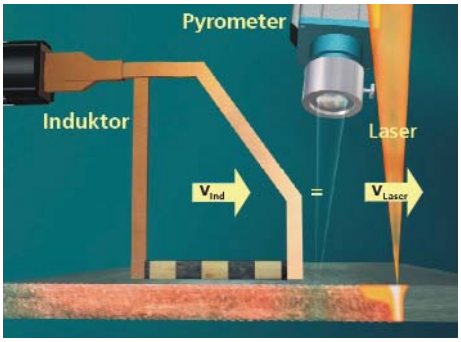


Abb. 2: Versuchsanordnung zum Laserstrahlschweißen mit induktiver Nachwärmung

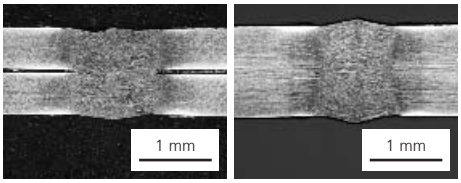
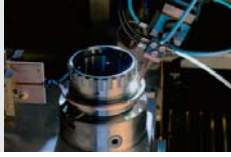


Abb. 3: Laserinduktionsgeschweißte Überlappnaht und Stumpfnaht

Ansprechpartner

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



Verbesserung der mechanischen Eigenschaften lasergasnitrierter Randschichten an Titanwerkstoffen

Aufgabenstellung

Die Titanlegierung Ti-6Al-4V eignet sich aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit und guten Korrosionsbeständigkeit bestens für den Einsatz hochbeanspruchter Bauteile in Luft- und Raumfahrt, in der Medizin, in der Energieerzeugung und im Off-Shore-Bereich. Das Lasergasnitrieren bietet die Möglichkeit, die im Allgemeinen unzureichende Beständigkeit dieser Legierung gegen abrasiven, erosiven oder kavitativen Verschleiß zu verbessern. Die industrielle Anwendbarkeit dieses Verfahrens wird jedoch erschwert oder gar verhindert, weil es infolge des Lasergasnitrierens zur Rissbildung kommen kann und die zyklische Belastbarkeit beeinträchtigt wird.

Durch Aufklärung der Struktur- und Eigenschaftsbeziehungen sollten deshalb Prozessbedingungen gefunden werden, die eine deutliche Verbesserung der Verschleißbeständigkeit der Titanlegierungen ermöglichen, ohne ihre ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften wesentlich zu beeinträchtigen.

Lösungsweg

Zur Erzielung einer hohen Reproduzierbarkeit und Kontrollierbarkeit des Bearbeitungsprozesses wurden zum Lasergasnitrieren eine im IWS entwickelte Schutzgasglocke und ein 6 kW CO_2-Laser eingesetzt. Dabei wurde das Stickstoffangebot ausgehend von reiner Inertgasatmosphäre in feinen Stufen variiert und die Struktur, die mechanischen Eigenschaften und das Verschleißverhalten der entstandenen lasergasnitrierten Randzonen ermittelt.

Ergebnisse

Nach dem Lasergasnitrieren entstehen harte und verschleißbeständige Randschichten mit Dicken im Bereich zwischen 0,1 mm und 1,0 mm. Am Beispiel des Kavitationsverschleißtests ist zu erkennen, dass sich die Verschleißbeständigkeit von Ti6-Al-4V durch das Lasergasnitrieren schon bei Nutzung geringer Stickstoffgehalte im Prozessgas erheblich verbessert (Abb. 1). Gleichzeitig steigt auch die Härte der erzeugten Randschichten im Bereich geringer Stickstoffgehalte (0 % bis etwa 13 %) mit Zunahme des Stickstoffangebotes bis auf etwa 570 HV 0,1 an, bevor sie für höhere Stickstoffgehalte ein Plateau durchläuft.

Wie die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse zeigen, verschlechtert sich die mechanische Belastbarkeit der lasergasnitrierten Proben beim Lasergasnitrieren mit geringen Stickstoffgehalten zunächst nur unwesentlich, obwohl die Härte in den Schichten deutlich zunimmt (Abb. 2). Erst oberhalb von 13 % Stickstoffgehalt nimmt die Rissbildungsspannung signifikant ab. Es wurde gefunden, dass die Rissbildung durch große und spröde Titannitridphasen, die sich für Stickstoffgehalte oberhalb von 13 % in der lasergasnitrierten Randzone bilden, gefördert wird (Abb. 3).

Die überraschende Eigenschaftskombination optimalen Verschleißverhaltens gepaart mit hoher mechanischer Belastbarkeit durch interstitiell gelösten Stickstoff eröffnet neue Wege zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit einsinnig oder zyklisch hochbelasteter Bauteile aus Titanlegierungen.

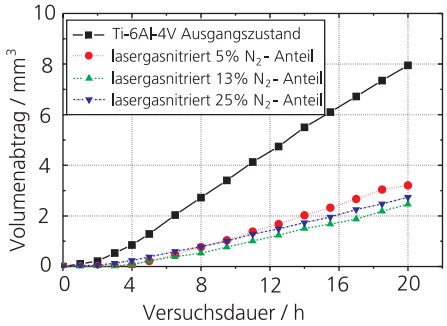


Abb. 1: Verbesserung der Verschleißbeständigkeit (Kavitationsbeanspruchung) durch Lasergasnitrieren

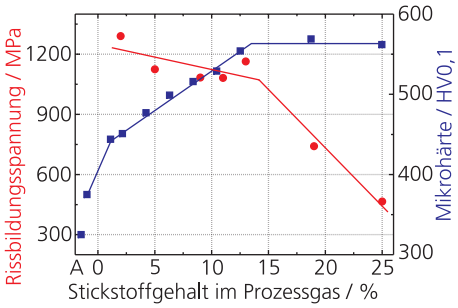


Abb. 2: Rissbildungsspannung und mittlere Mikrohärte der lasergasnitrierten Randschichten in Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt im Prozessgas

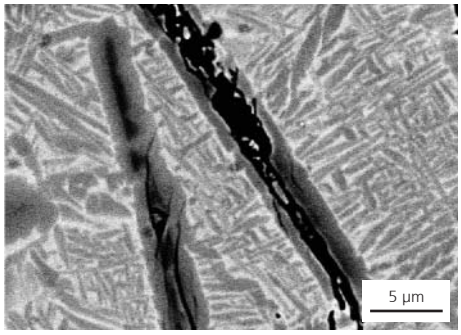
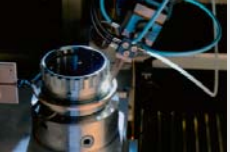


Abb. 3: REM-Detailaufnahme einer mit 25 % Stickstoffgehalt lasergasnitrierten Probe nach 4-Punkt-Biegung und Schallemissionsanalyse. Man beachte die bevorzugte Rissbildung in den Titannitridphasen.

Ansprechpartner

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



Effiziente Produktentwicklung durch begleitende Versagensanalyse

Aufgabenstellung

Nicht nur die Fertigung, sondern auch die Entwicklung von Produkten, welche sich auf den globalisierten Märkten behaupten können, stehen unter enorm hohem Zeit- und Kostendruck. Dies verlangt zwangsläufig fließende und sich überlappende Übergänge von Entwicklung, Erprobung und Serieneinführung eines Produktes.

Schwachstellen, Schädigungen an Bauteilen und Bauteilversagen sind in der Entwicklungsphase prinzipiell nicht auszuschließen. Durch richtigen Werkstoffeinsatz kann das Risiko für technische Schadensfälle jedoch erheblich verringert werden. Werkstofftechnische Aspekte sind besonders dann wichtig, wenn der Werkstoff im Produktfertigungszyklus gravierende Veränderungen durch Prozesse wie Umformung, Wärmebehandlung, Schweißen oder Randschichtbehandlung erfährt.

Das Ziel der entwicklungsbegleitenden Versagensanalyse besteht darin, durch umfassende Aufklärung von Schwachstellen und Versagensursachen sowie einer daraus resultierenden gezielten Rückwirkung auf Werkstoffauswahl, Konstruktion, Fertigung und Bauteilprüfung einen Beitrag zur Verbesserung der Produktqualität, Optimierung des Fertigungsprozesses und Senkung der Entwicklungskosten zu leisten.

Abb. 1: Rasterelektronenmikroskop

Abb. 2: Servohydraulische Prüfmaschinen

Ansprechpartner

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

Abb. 3: Härtemessplatz

Lösungsweg

Das Fraunhofer IWS verfügt über langjährige Erfahrungen zur Durchführung von Schadensanalysen. Dies betrifft sowohl die Bewertung der aus den Betriebsbedingungen resultierenden Beanspruchungen:
- mechanische Beanspruchung,
- Verschleißbeanspruchung,
- korrosiver Angriff,
- thermische Beanspruchung sowie
- deren Kombinationen

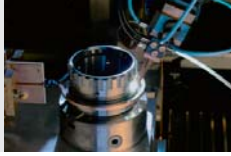
als auch die Bewertung der von Werkstoff und Bauteil ertragbaren Beanspruchungen.

Die Bewertung erfolgt jeweils analytisch, experimentell oder rechnerisch. Besondere Kompetenzen liegen im Fraunhofer IWS auf den Gebieten
- Werkstoffauswahl und -einsatz,
- Schweißverbindungen,
- Randschichten und
- Beschichtungen

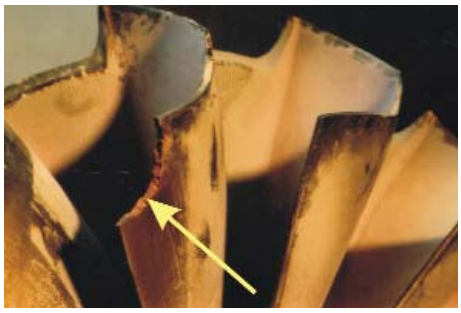
vor.

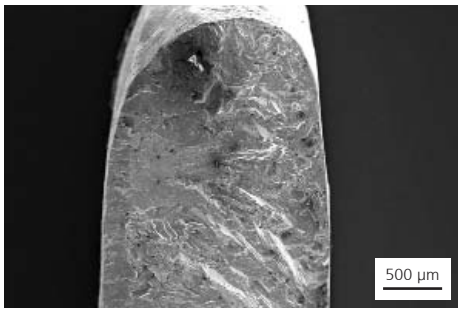
Für die Untersuchungen stehen moderne Geräte und Methoden zur Verfügung:
- Metallographie,
- spezielle Präparationsmethoden,
- licht- und rasterelektronenmikroskopische Bruchflächenanalyse,
- lokale Elementanalyse mittels EDX,
- Härtemessungen,
- mechanisch-technologische Prüfungen und
- Verschleißprüfstände.

Aus den durchgeführten Schwachstellen- und Versagensanalysen werden Strategien für die Werkstoffauswahl, die beanspruchungsgerechte Bauteilauslegung, die Beseitigung von Schwachstellen im Fertigungsprozess und die Qualitätssicherung abgeleitet.

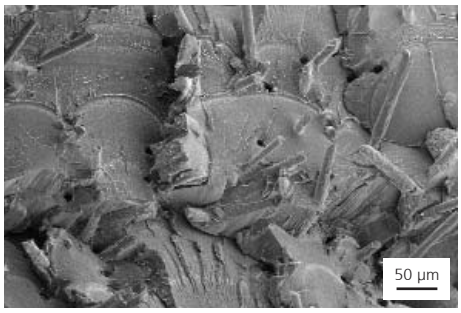


Im folgenden sind einige ausgewählte Beispiele von Versagensanalysen für unterschiedliche Beanspruchungsfälle und daraus abgeleitete Problemlösungen dargestellt, welche das Leistungspotenzial des Fraunhofer IWS auf diesem Gebiet demonstrieren.

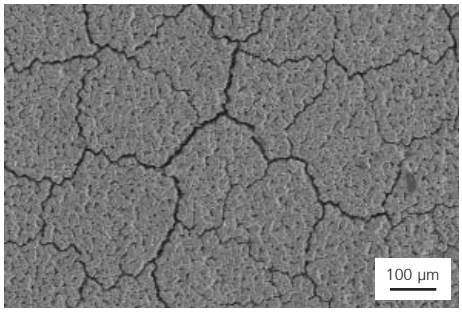


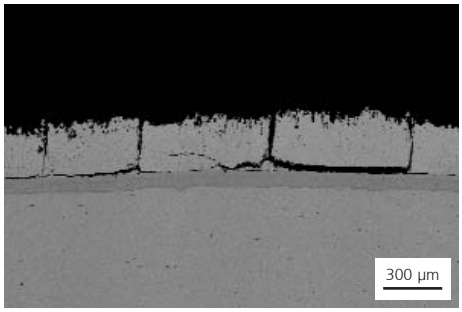


Schaden: Schaufelabriss an einem Radialturbinenrad aus Inconel (oben)
Ursache: Ermüdungsbruch infolge unzureichender Oberflächenqualität bei hoher Randhärte (unten)
Lösung: Verbesserung der Oberflächenqualität, Verringerung der Beanspruchung bei Durchlauf der Resonanzfrequenz durch optimierte Konstruktion



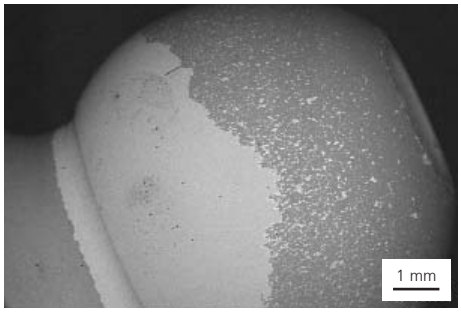
Schaden: Bruch eines Bauteils aus einem glasfaserverstärkten thermoplastischen Werkstoff
Ursache: Statische mechanische Überlastung (kein Werkstofffehler)
Lösung: Vermeidung von Überlastung des Bauteils bei der Montage

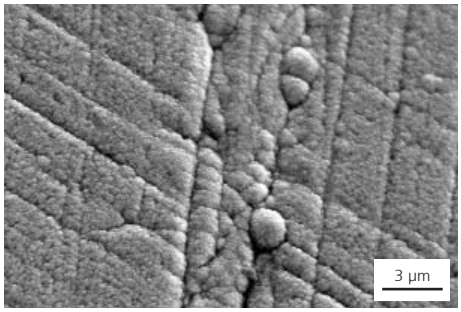




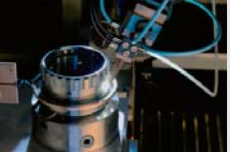
Schaden: Abplatzen einer Wärmedämmschicht aus ZrO_2 an einer Gasturbinenschaufel (oben), Rissnetzwerk (Mitte) und Delamination (unten)
Ursache: Zu hohe mechanische Schichtbelastung durch extreme Temperaturwechsel im Einsatz
Lösung: Experimentelle Beanspruchungssimulation durch zyklische Oberflächenbestrahlung mittels Hochleistungslaser zur quantitativen Bewertung der Thermozyklierbarkeit der Schicht als Basis für ein verbessertes Schichtdesign

Schaden: Schweißnahtversagen an einem Scheibenwischergestänge aus Aluminium (oben)
Ursache: Steifigkeitssprünge in hochbelasteten Nahtbereichen
Lösung: Veränderung der Konstruktion - beanspruchungsgerechte Nahtauslegung (Bauteil versagt nicht in der Schweißnaht, unten)





Schaden: Abplatzen einer Hartstoffschicht von einer Stahlkugel (oben)
Ursache: Störende Auswirkungen des Oberflächenreliefs des Substrats auf die Morphologie (unten) und damit die Verschleißbeständigkeit der Schicht
Lösung: Verbesserung der Oberflächenqualität des Substrats vor dem Beschichten



Prüfstand für Thermozykliertests an hochbeanspruchten Triebwerkskomponenten

Aufgabenstellung

Die in Triebwerken eingesetzten Werkstoffe sind extremen thermischen und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Insbesondere für Belastungen oberhalb der Warmkriechfestigkeit sind bei sehr hohen Einsatztemperaturen die verfügbaren Werkstoffdaten unvollständig bzw. mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Die aus diesen Daten theoretisch abgeleiteten Lebensdauervorhersagen bedürfen daher einer kritischen Überprüfung. Brennkammern bzw. komplette Triebwerke werden zwar auf speziellen Prüfständen getestet, wegen der enormen Kosten ist der Umfang derartiger Tests jedoch stark eingeschränkt.

Zur Überprüfung der Ergebnisse von Lebensdauermodellen wurde daher im Auftrag der Firma EADS Space Transportation ein Thermo-Mechanical-Fatigue-Prüfstand (TMF-Prüfstand) konzipiert und aufgebaut, der im Labor wohldefinierte und realitätsnahe Thermozykliertests an relevanten Triebwerkskomponenten ermöglicht.

Um die jeweiligen Testbedingungen genau zu erfassen und zu dokumentieren, war eine umfangreiche messtechnische Ausstattung des Prüfstandes vorzunehmen. Mit diesem TMF-Prüfstand waren systematische Lebensdauertests an bauteilrelevanten Teststrukturen durchzuführen.

Lösungsweg

Ausgehend von der Situation bei Raketentriebwerken für Flüssigtreibstoff, bei denen der tiefkalte Treibstoff (meist flüssiger Wasserstoff) gleichzeitig zur Kühlung der Brennkammer- bzw. Düsenstruktur dient, wurde ein Prüfstand konzipiert und realisiert, bei dem die jeweils zu testende Struktur über ihre Kühlkanäle wahlweise durch tiefkalten gasförmigen oder flüssigen Stickstoff gekühlt und mittels zweier Hochleistungslaser auf einem relativ großen Bereich der Oberfläche (> 10 cm^2) mit einem möglichst homogenen Wärmestrom von bis zu 500 W / cm^2 beaufschlagt wird.

Abb. 1: Stickstoffversorgung mit Förder-, Misch- und Regelungssystem

Ansprechpartner

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

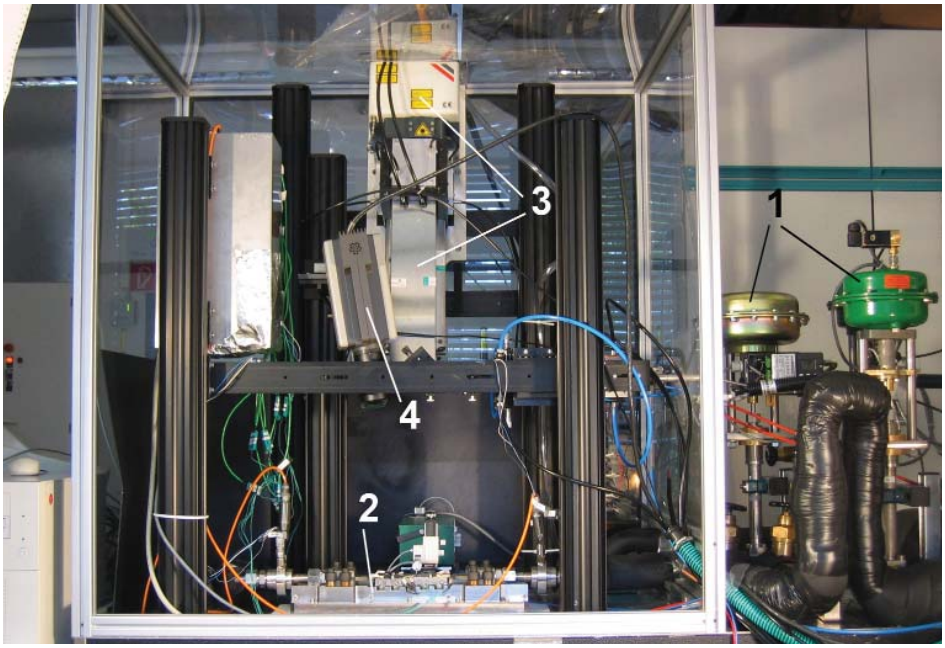
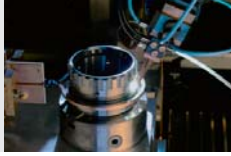


Abb. 2: TMF-Prüfstand (1 - Ventile zur Steuerung des Kühlkreislaufes, 2 - Halterung zur Aufnahme der Prüflinge, 3 - Diodenlaser mit Spezialoptik, 4 - Thermographiekamera)



Die Hauptkomponenten des Prüfstandes bestehen in einer Stickstoffversorgung, einem Förder-, Misch- und Regelsystem für die Erzeugung tiefkalten gasförmigen Stickstoffs (Abb. 1), einer unter Inertgas arbeitenden Prüfkammer (Abb. 2), die die Komponenten Hochleistungsdiodenlaser mit spezieller Strahlformungsoptik, Strahlformungssystem des Nd:YAG-Lasers, Thermographiekamera, Temperaturmesssystem, Testpanel mit Instrumentierung usw. enthält, und einem Steuerrechner. Um den benötigten Prüfstand unter Einhaltung der vom Auftraggeber geforderten Testbedingungen möglichst schnell aufzubauen, wurden Installation und Inbetriebnahme der Stickstoff-Kühltechnik als Unterauftrag an die Linde AG und die Krytem GmbH vergeben. Für die kurzfristige Entwicklung und Fertigung einer Spezialoptik für den eingesetzten Hochleistungsdiodenlaser DL060H konnte das ILT Aachen gewonnen werden.

Ergebnisse

Mit dem aufgebauten TMF-Prüfstand und der erfolgreich absolvierten ersten Messkampagne konnte der Funktionsnachweis für das realisierte Testkonzept erbracht werden. Es steht damit ein derzeit unikaler Prüfplatz zum realitätsnahen Test der thermisch-mechanischen Belastbarkeit von Triebwerksstrukturen zur Verfügung. Durch eine entsprechend ausgelegte Prüflingsgeometrie und -einspannung, den einstellbaren Stickstoffdurchfluß und -druck sowie die Parameter der Temperaturbeaufschlagung (Heizzonengröße, Temperaturgradient, Aufheiz- und Abkühlraten, Maximaltemperaturen und deren Haltezeit) lassen sich die Bedingungen, die in Raketentriebwerken unter realen Bedingungen herrschen, ausreichend genau und reproduzierbar nachbilden (Abb. 3). Die implementierte Messtechnik und Datenerfassung erlaubte ein detailliertes Monitoring der Testabläufe. Beispielsweise kann aus den aufgezeichneten Thermographiedaten die während der Heizphasen vorliegende Temperaturverteilung auf der Prüflingsoberfläche extrahiert werden (Abb. 4).

In einer ersten Testkampagne wurde eine Serie von Teststrukturen erfolgreich getestet, indem bei unterschiedlich gewählten Temperaturen die Anzahl der Heizzyklen bis zum Bauteilversagen ermittelt wurde. Außerdem wurde durch Anwendung zweier verschiedener Zyklierregime mit unterschiedlich langer Haltezeit der Einfluss von Kriechprozessen auf die Bauteillebensdauer untersucht.

Abb. 3: Fotoaufnahme eines Prüflings während der Heizphase eines Thermozykliertests

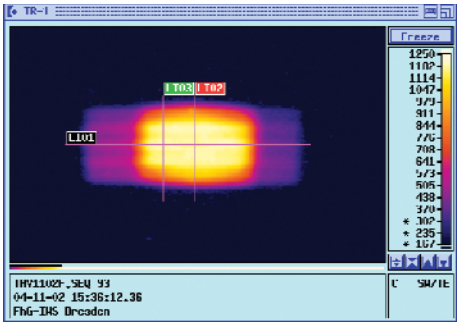
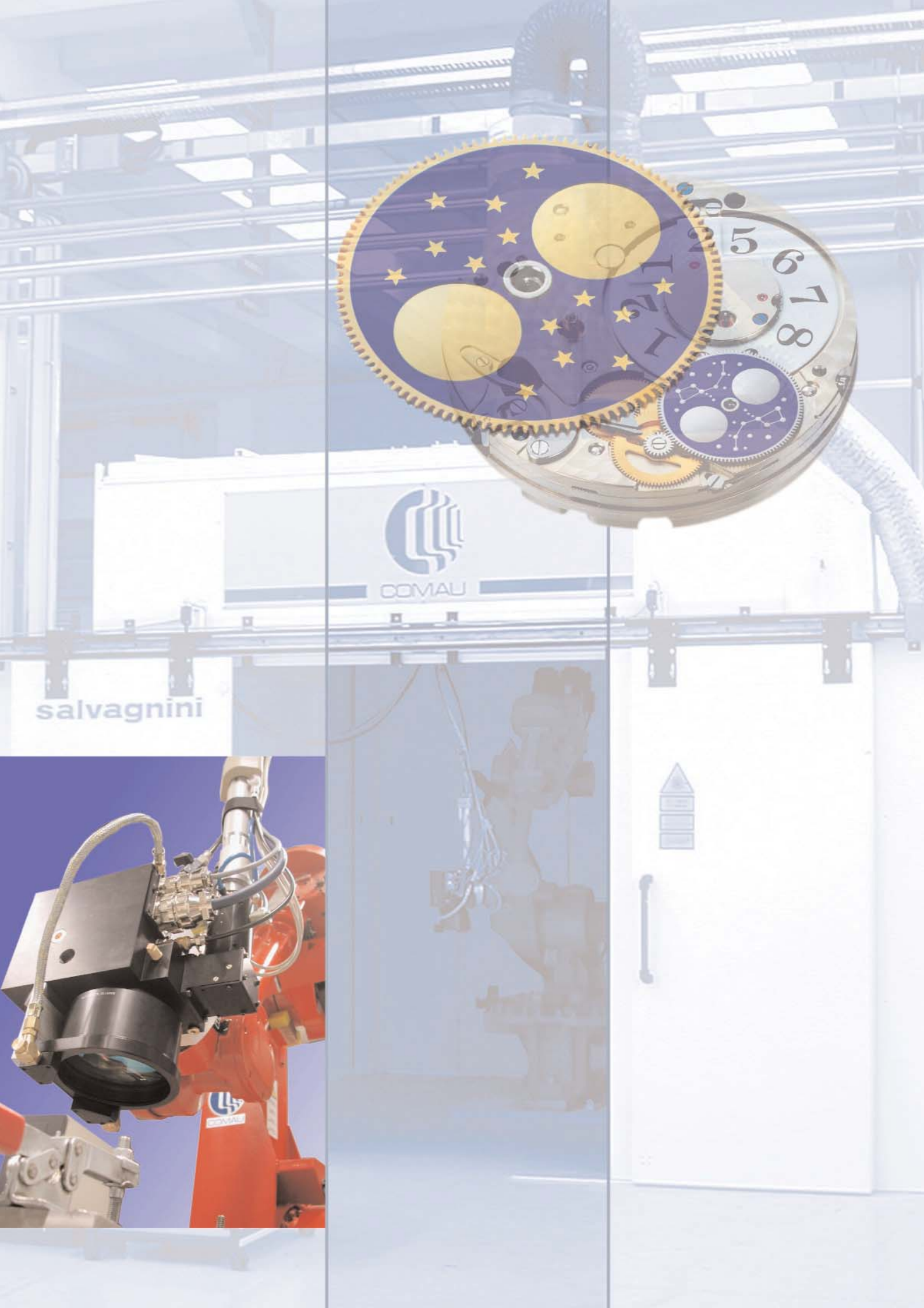


Abb. 4: Während eines Lebensdauertests mittels Thermographiekamera erfasstes Wärmebild (mit Auswertelinien) von der Oberfläche eines Testpanels


COMAU
salvagnini

FuE-Angebot: Laserabtragen und -trennen, Systemtechnik

Redaktion: Mit Fertigstellung des erweiterten Lasertechnikums im Herbst 2004 steht auch Ihrer Abteilung neue Anlagentechnik zur Verfügung. Welche neuen Anlagen sind das?

Dr. Morgenthal: In Zukunft wollen wir uns dem schnellen und präzisen Teilezuschnitt mit dem Laser im 3D-Arbeitsraum zuwenden. Ab 2005 steht uns dazu im Lasertechnikum des IWS eine neue 3D-Schneidmaschine zur Verfügung. Angesichts der im Automobilbau wachsenden Verwendung von umgeformten Blechbauteilen, die aufgrund der Materialdicke oder Materialfestigkeit nicht mehr stanztechnisch bearbeitet werden können, sind hier Entwicklungsleistungen für wirtschaftliche und technische Verbesserungen des Standes der 3D-Schneidbearbeitung gefragt. Einbezogen in diese Untersuchungen wird natürlich auch das Potenzial an neuartigen Laserquellen wie der Scheiben- und Faserlaser.

Redaktion: Das Fraunhofer IWS Dresden beschäftigt sich seit einigen Jahren zunehmend mit Fragestellungen, die aus dem Bereich der Biotechnologie und der Medizintechnik herrühren. Welche Ergebnisse konnten Sie da im vergangenen Jahr erreichen?

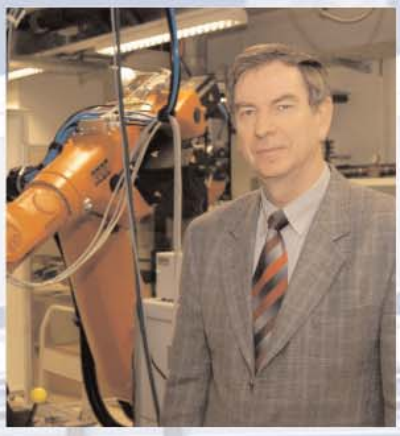
Dr. Morgenthal: Die Biotechnologie und Medizintechnik verlangen zunehmend nach Strukturen im Submillimeterbereich sowie nach Oberflächen mit bestimmten Eigenschaften. Das Werkzeug "Laser" bietet aufgrund der breiten Wellenlängenauswahl, der schnellen Steuerbarkeit und der berührungslosen Arbeitsweise die Möglichkeit, fast alle Werkstoffe weitgehend schädigungsfrei und mit hoher Genauigkeit zu bearbeiten.

Festkörperlaser mit Wellenlängen zwischen 355 nm (UV) und 1064 nm (IR) sind in der Lage, mittels fein fokussiertem Laserstrahl höchster Intensität selbst härteste Materialien wie Stahl, Keramik oder Diamant innerhalb kurzer Zeit in Form zu bringen. Mikrofluidische Elemente, Instrumente für die minimalinvasive Chirurgie, Stents zur Behebung von Arterienverschlüssen, Dialysatoren zur Blutreinigung, endoskopische Bauteile können so endkonturnah und mit minimalem Nachbearbeitungsaufwand gefertigt werden.

Excimerlaser mit Wellenlängen zwischen 157 nm und 351 nm (UV) kommen vor allem zur flächigen Bearbeitung und Funktionalisierung von Oberflächen zum Einsatz. Hier wird die hohe Energie der Laserstrahlung ausgenutzt, die Bindungen direkt aufbrechen und so die Oberfläche anregen kann. So lassen sich beispielsweise gezielt hydrophile und hydrophobe Bereiche erzeugen.

Redaktion: Das robotergeführte Remote-Schweißen mit der "on the fly"-Bearbeitung großer Bauteile steht unmittelbar vor der Einführung in industrielle Anwendungen. Wodurch waren in diesem Bereich neue Ergebnisse möglich?

Dr. Morgenthal: Die im IWS in den letzten Jahren dafür entwickelten system- und verfahrenstechnischen Bausteine wie kompakte, hochdynamische 3D-Srahlablenksysteme, Software für eine korrespondierende Laser- und Scanneransteuerung und Bahnplanungstools für die effektive Offline-Programmierung des komplexen vielachsigen Bearbeitungssystems versetzen uns hier in die Lage, gemeinsam mit Partnern Gesamtlösungen anzubieten. Außerdem gehen wir auch davon aus, dass die jetzt an der Schwelle der industriellen Einführung stehenden neuartigen Festkörperlaserstrahlquellen mit deutlich verbesserter Strahlqualität, die Scheiben- und Faserlaser, diesen Prozess befördern werden.

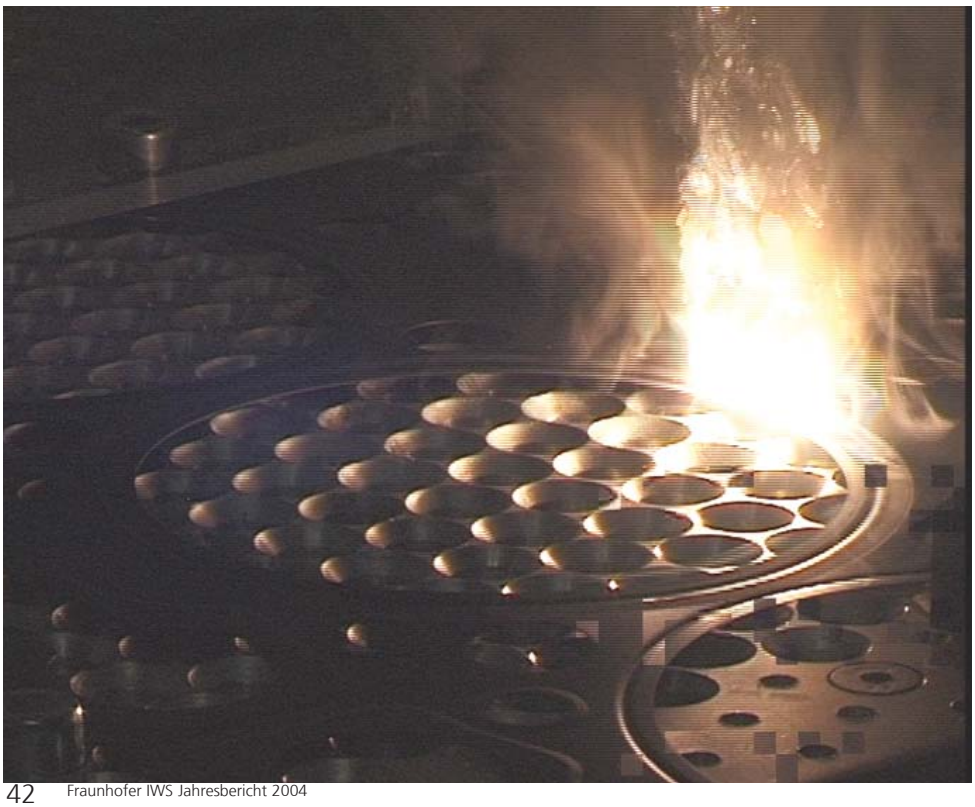


Die ungelösten Probleme halten einen Geist lebendig, nicht die gelösten.
Erwin Guido Kolbenheyer

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

Beispiele aus den Arbeiten 2004

1. Rapid-Prototyping von Lab-on-a-Chip-Komponenten 44
2. Strukturierung von Designelementen für hochwertige mechanische Uhren 46
3. Mikroschneiden von Ionenfallen - Der Weg zum Quantencomputer 47
4. Yb:YAG-Scheibenlaser - eine ideale Strahlquelle für das 3D-Remote-Schweißen 48
5. Remote-Schweißen wird flexibel durch Positionssensorik 49
6. Dekontamination biozidbelasteter Kunstgüter aus Holz 50
7. Restaurierung eines Schmuckkästchens durch Laserstrahlschweißen 51



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

Dipl.-Ing. Udo Klotzbach
Gruppenleiter Mikrobearbeiten und
Reinigen
(Tel. 2583 252,
udo.klotzbach@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 Strahlablenkung. Für die Qualitätssicherung steht ein Flat Part Measurement & Digitizing Scanner System für Teilegrößen bis 1800 mm x 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.

Systemtechnik / Fertigungstechnik

Die Abteilungen des IWS bieten die serienreife Realisierung verfahrensangepasster Systemlösungen zu folgenden Arbeitsgebieten an:

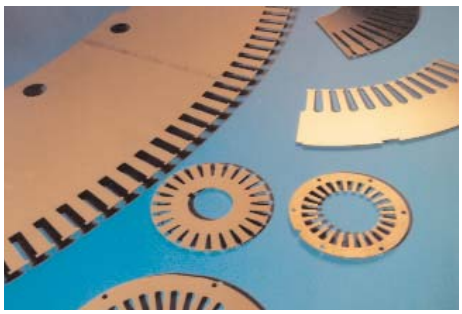
- Bearbeitungsoptiken, Strahlablenksysteme für die Hochgeschwindigkeits- und Präzisionsbearbeitung sowie Prozesskontrolle und -regelung,
- Handlingsysteme, Prozesskontrolle und -regelung für den industriellen Einsatz von Hochleistungs-Diodenlasern zur Oberflächenveredlung,
- Prototypentwicklung von Beschichtungsanlagen 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. zerstörungsfreien Bauteilprüfung mittels laserakustischer und spektroskopischer Methoden.

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 quarzitischen und biokompatiblen Werkstoffen.

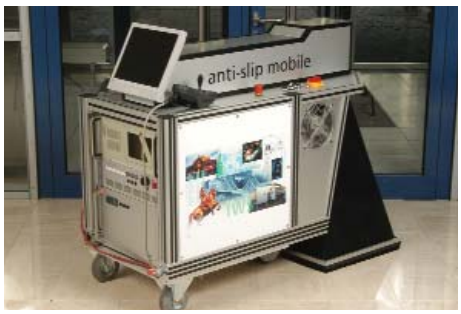
Wir bieten an:

- Mikrostrukturierung unterschiedlicher Werkstoffe mit Excimer- und Nd:YAG-Lasern
- Mikrobohren mit hohen Aspektverhältnissen und unterschiedlichen Bohrungsgeometrien,
- Reinigen mit Lasertechnik.



Laserstrahlgeschnittene Elektrobleche

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



Mobile Anlage zur rutschhemmenden Ausrüstung von Natursteinen

Rapid-Prototyping von Lab-on-a-Chip-Komponenten

Aufgabenstellung

Lab-on-a-Chip - das miniaturisierte Labor - ist zukünftig aus den Anwendungsbereichen Diagnostik, Analytik, Wirkstoffforschung, Biotechnologie, Medizintechnik und Chemie nicht mehr wegzudenken. Wesentlicher Bestandteil solcher Systeme sind mikrofluidische Komponenten, mit deren Hilfe Medien durch den Chip transportiert, gereinigt, gemischt dosiert und zur Reaktion gebracht werden. An diese häufig als Einwegartikel ausgelegten Systeme werden hohe Anforderungen gestellt, was Reproduzierbarkeit, Toleranzen und Funktionalität betrifft, wie beispielsweise den automatischen Transport der Medien ohne Fremdenergie durch Ausnutzung von Schwerkraft oder Kapillareffekt.

Aufgaben aus dem medizinisch-diagnostischen Bereich stellen zusätzliche Anforderungen an die Systeme. Für einen Bluttest beispielsweise, mit dem der Notarzt vor Ort automatisiert einen Herzinfarkt diagnostizieren kann, muss die Probe, möglicherweise hochinfektiöses Blut (HIV, Hepatitis), nach Eingabe in den Chip selbständig mit einer definierten Geschwindigkeit das Diagnosesystem durchlaufen. Dabei passiert die Probe mehrere Vorverarbeitungs- und Analyseschritte, wie Blut-Serum-Separation, Filterung und Antigen-Antikörper-Nachweise. Im Anschluss verbleibt die Probe im Chip, um die Infektionsgefahr für den Anwender zu minimieren.

Die Entwicklungen im Bereich der Lab-on-a-Chip-Systeme gehen zu immer kleineren Volumina, was eine ständig fortschreitende Miniaturisierung der Strukturen zur Folge hat. Anwendungen aus dem Bereich der Humandiagnostik-Proteinchips zum Nachweis geringster Konzentrationen von Tumormarkern erfordern bereits jetzt für eine sichere Detektion Kanalgeometrien kleiner 20 µm.

Lab-on-a-Chip-Systeme zur einmaligen Verwendung werden hauptsächlich aus Kunststoff oder Silizium hergestellt. Die Strukturierung erfolgt bei Kunststoff durch Spritzguss oder Spritzprägen und bei Silizium lithographisch. Beide Verfahren benötigen teure Werkzeuge oder Masken. Bei der Entwicklung von Mikrofluidik kann trotz hoch entwickelter Simulationssysteme nicht auf die Herstellung von Prototypen und Mustern verzichtet werden. Es ist notwendig, die am Computer entworfenen Mikrofluidikstrukturen für die Erprobung schnell und preiswert in Prototypen umzusetzen. Da aus wirtschaftlichen Gründen nicht für jeden Prototyp ein Werkzeug oder Maskensatz hergestellt werden kann und sehr kleine Strukturen gefordert sind, kommt für das Rapid-Prototyping der Excimerlaser zum Einsatz.

Lösungsweg

Die Entwicklung von Lab-on-a-Chip-Systemen erfolgt computergestützt. Im Anschluss an die Simulation generieren die Entwickler ein dreidimensionales CAD-Modell des herzustellenden Mikrofluidiksystems.

Für die Fertigung solcher Mikrofluidiksysteme wurde am IWS eine CAM-Lösung entwickelt, welche die dreidimensionalen Modelle in Abschnitte

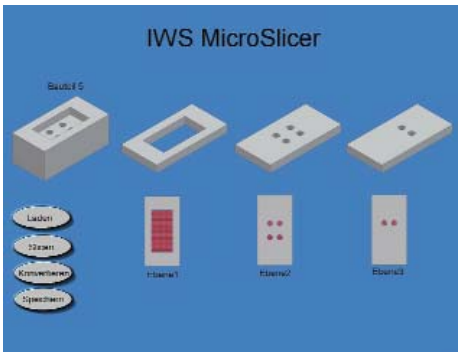


Abb. 1: Screenshot der am IWS entwickelten Software MicroSlicer

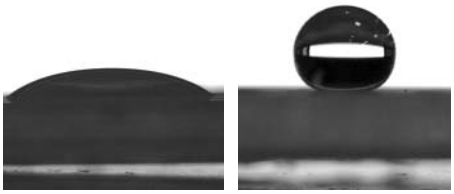


Abb. 2: Hydrophilierte und hydrophobierte Oberflächenareale eines Mikrofluidiksystems aus Polycarbonat

Ansprechpartner

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

zweidimensionaler Strukturen gleicher Tiefe zerlegt (slices). Diese Abschnitte werden in zweidimensionale CAD-Zeichnungen und eine Tiefeninformation (für den Abtrag notwendige Pulse pro Fläche) umgewandelt und in ein für Scanneransteuerungssoftware kompatibles Format exportiert.

Durch Kopplung eines Excimerlasers mit einem Scannersystem können zweidimensionale Mikrostrukturen schnell, flexibel und ohne zusätzlichen Programmieraufwand realisiert werden. Die vom CAM-System exportierten Daten können von der Scannersoftware direkt eingelesen und verarbeitet werden.

Ergebnisse

PDMS-Mikrofluidiksystem für Proteinchipentwicklung

Für die Entwicklung eines Proteinchips, der über Botenstoffe den Wellnesszustand bestimmter Mikroorganismen detektieren soll, wurde ein Mikrofluidiksystem hergestellt, mit dessen Hilfe die Probe mit einer definierten, sehr geringen Geschwindigkeit nahe an den Nachweismolekülen vorbeigeleitet werden kann. Die in einer gegossenen PDMS-Platte realisierten Kanäle sind 15 mm lang, 40 µm breit und 25 µm tief.

Masterherstellung für Mikrokontaktdrucken

Zur Funktionalisierung eines DNA-Chips mittels Mikrokontaktdrucken wurde ein Master hergestellt, von welchem Stempel abgeformt werden können. Der Master besteht aus Silizium, in das ein Array von 20 mal 20 quadratischen Vertiefungen eingebracht wurde. Deren Abmessungen betragen 50 x 50 µm^2 bei einer Tiefe von 20 µm.

Ortselektive Hydrophilierung von Mikrofluidikstrukturen

Mikrofluidiksysteme setzen für bestimmte Funktionalitäten Areale unterschiedlicher Benetzbarkeit voraus, welche durch Modifikation der Oberflächentopographie und / oder der Oberflächenchemie gezielt hergestellt werden können. Um die selbständige Befüllung bestimmter Kanalabschnitte eines Mikrofluidiksystems aus Polystyrol zu verbessern, wurden diese durch Bestrahlung in Sauerstoffatmosphäre hydrophiliert. Die Laserstrahlung wird von Sauerstoff und Polystyrol absorbiert. Das führt zur Bildung aktiver Spezies, die miteinander reagieren. Die dabei entstehenden Carboxylgruppen verbessern die Benetzbarkeit des Polystyrols und somit die Funktionalität des Mikrofluidiksystems signifikant.

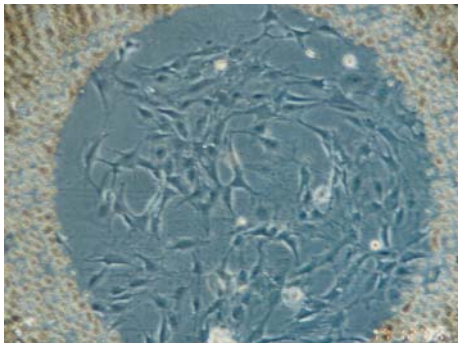


Abb. 3: Mit Zellen besiedelte Oberfläche eines laserstrukturierten Biochips aus **P**oly**dim**ethyl**s**iloxan (PDMS)

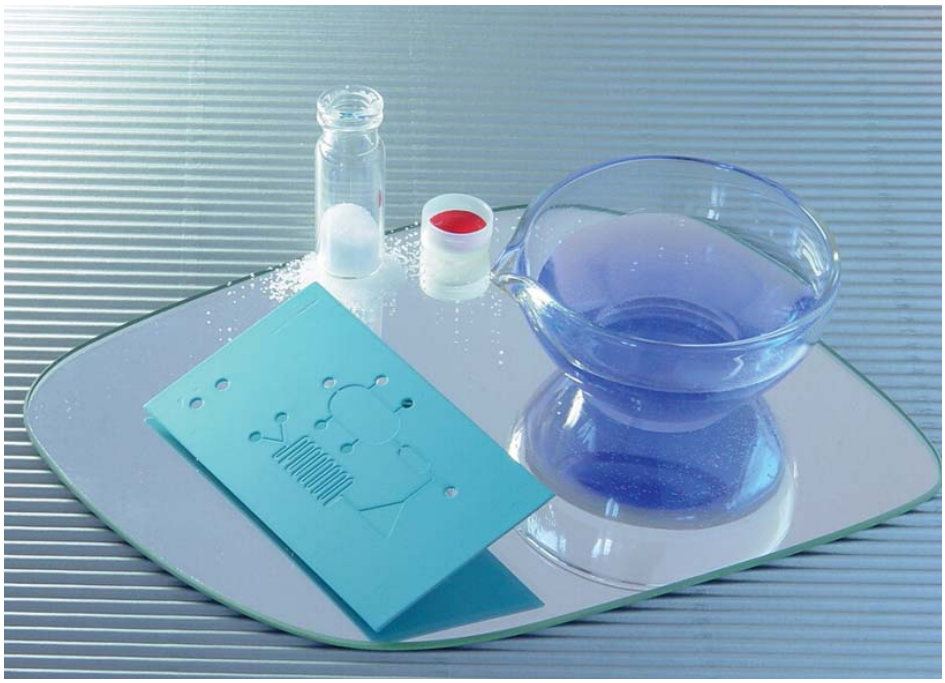


Abb. 4: Mikrofluidiksystem eines Biochips aus **L**ow **T**emperature **C**ofired **C**eramic (LTCC)

Strukturierung von Designelementen für hochwertige mechanische Uhren

Aufgabenstellung

In hochwertigen mechanischen Uhren wird eine Mondphasenanzeige durch ein sich drehendes Zahnrad, die Mondscheibe, realisiert. Diese enthält zwei Monde, die je nach Stand der Scheibe in einer Aussparung des Ziffernblattes die jeweilige Mondphase anzeigen (Abb. 1). Neben den Monden wird die Scheibe mit verschiedenen Strukturen verziert. Ziel der technologischen Untersuchungen am IWS war

- die Realisierung einer Beschichtung, die die visuellen Ansprüche hinsichtlich der Farbbrillanz erfüllt, sowie
- die Herstellung der Verzierungsstrukturen mittels Lasermikrostrukturierung.

Abb. 1: Die LANGE 1 MONDPHASE von A. Lange und Söhne

Lösungsweg

Mit dem Verfahren des lasergesteuerten gepulsten Vakuumbogens (Laser-Arc) wurden am IWS superharte amorphe Kohlenstoffschichten auf den aus Gold bestehenden Mondscheiben abgeschieden. Die gewünschte Haftfestigkeit und Rauheit der Oberflächen wurde durch ein nm-Zwischenschichtdesign und eine Plasmavorbehandlung realisiert. Durch Einstellung der optischen Eigenschaften und der Dicke der Schicht entsteht durch Interferenzeffekte ein tiefblauer Farbeindruck, der den Nachthimmel repräsentiert.

Mit dem Verfahren der Excimerlaser-Maskenprojektion wurden durch Ablation der Kohlenstoffschicht bis auf den Goldgrundkörper Strukturen in Form von Sternen und Sternbildern eingebracht.

Ergebnisse

Superharte amorphe Kohlenstoffschichten können mit dem Laser-Arc-Verfahren im industriellen Maßstab abgeschieden werden. Durch die Ausbildung einer Linienquelle in Kombination mit der genauen Registrierung der Pulszahl kann die Schichtdicke sehr genau eingestellt werden, wobei eine sehr gute Schichtdickenhomogenität erreicht wird. Durch den hohen Anteil an diamantartigen Bindungen in den Schichten wird ein geringer Extinktionskoeffizient mit einer sehr hohen Härte gepaart. So können je nach Schichtdicke verschiedene Farbtöne bei einer gleichzeitig sehr hohen Verschleißfestigkeit eingestellt werden.

Das Excimerlaser-Maskenprojektionsverfahren bietet hier im Gegensatz zu den direkt schreibenden Verfahren den Vorteil, dass die Strukturen in einem Arbeitsschritt gleichmäßig eingesenkt werden können, so dass ebene Strukturböden entstehen. Der Einsatz kurzer Pulse und UV-Wellenlängen ermöglicht eine hohe Strukturtreue ohne dem Auftreten von Randzonen mit Schmelzablagerungen oder anderen thermisch bedingten Effekten (Abb. 2).

Die am Fraunhofer IWS vorhandene Strukturierungstechnik erlaubt auch die Herstellung komplexer Strukturen, wie beispielsweise das Sternbild des großen Wagens (Abb. 3).

Abb. 2: Mondscheibe nach der Laserstrukturierung

Abb. 3: Die zwei Uhrwerke der GROSSEN LANGE 1 "Luna Mundi", deren Mondscheiben am IWS beschichtet und strukturiert wurden

Ansprechpartner

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

Mikroschneiden von Ionenfallen - Der Weg zum Quantencomputer

Aufgabenstellung

Die Forschung im Bereich atomarer und molekularer Größenordnungen erfordert technische Möglichkeiten, die zu untersuchenden Substanzen zum Beispiel in Form einzelner Ionen frei im Raum zu immobilisieren, gezielt zu manipulieren und zu spektroskopieren. Fernziel ist die Entwicklung eines Quantencomputers.

Für das Institut für Experimentalphysik der Universität Innsbruck sollte eine Ionenfalle auf Basis eines goldbeschichteten Aluminiumoxydkeramik-Substrates strukturiert werden. Die Herausforderung bestand in der Notwendigkeit, sowohl Durchbrüche unterschiedlicher Geometrien als auch oberflächliche Gravuren mit minimalen Strukturbreiten von nur 20 µm zur elektrischen Trennung bestimmter Funktionsbereiche einzubringen.

Lösungsweg

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Lagetoleranz der Ausschnitte und Gravuren zueinander wurde die Bearbeitung mit nur einem Lasersystem durchgeführt. Zum Einsatz kam ein scannergekoppelter, frequenzverdreifachter kurzgepulster Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 355 nm, einer Pulsdauer von 15 ns und einer Repetitionsrate von 15 kHz. Zur Minimierung des an sich bereits geringen thermischen Einflusses erfolgte die Bearbeitung mit Scangeschwindigkeiten von 100 mm / s. Das vorgegebene Layout wurde in einem vorgeschalteten Bearbeitungsschritt optimiert, um die Zahl der kritischen An- und Absetzpunkte des fokussierten Laserstrahls zu vermindern. Die Gravur der Goldschicht wurde mit geringer mittlerer Leistung von ca. 1,5 W und wenigen Überfahrten realisiert, wobei bei breiteren Trennlinien ein der eigentlichen Vorschubbewegung überlagerter Wobble-Effekt genutzt wurde. Das Ausschneiden verschiedener Strukturen erfolgte mit höherer mittlerer Leistung von ca. 8 W und einer größeren Anzahl von Überfahrten. Mit dieser Strategie war es möglich, den kompletten Chip maßhaltig innerhalb von ca. 1,5 Stunden fertigzustellen. Eine Nachbehandlung in einer Acetonlösung im Ultraschallbad erzielte den gewünschten Reinigungseffekt von Prozessrückständen.

Ergebnisse

Mit der erarbeiteten Technologie war es möglich, mit einem Laserprozess Chips zu strukturieren, die mit den erzeugten, elektrisch getrennten Funktionsbereichen als Ionenfalle eingesetzt werden können. Das vorgegebene Schaltungslayout wurde nach einer Optimierung am Computer mit einem UV-Festkörperlaser so umgesetzt, dass die erforderlichen minimalen Gravurbreiten von 20 µm erreicht werden konnten. Breitere Gravuren erforderten den Einsatz einer speziellen Wobble-Technik. Durch eine Nachbehandlung konnte der gelaserte Chip von Bearbeitungsrückständen gesäubert werden.

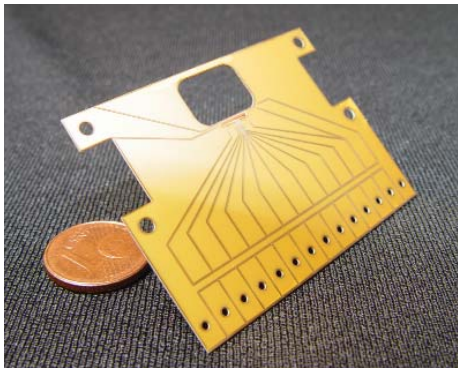


Abb. 1: Laserstrukturierte Ionenfalle im Vergleich zu einer Ein-Cent-Münze

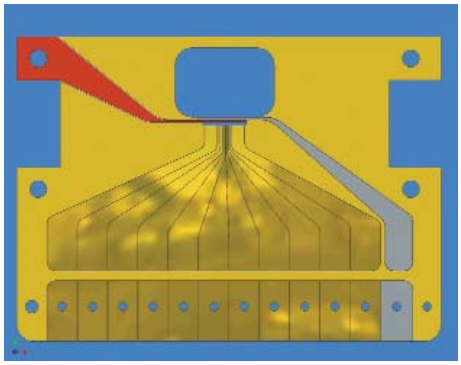


Abb. 2: Chiplayout für eine lineare Ionenfalle

Ansprechpartner

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

Yb:YAG-Scheibenlaser - eine ideale Strahlquelle für das 3D-Remote-Schweißen

Abb. 1: Strahlablenkung und Strahlfokussierung in der Remote-Optik SAO1.06SL

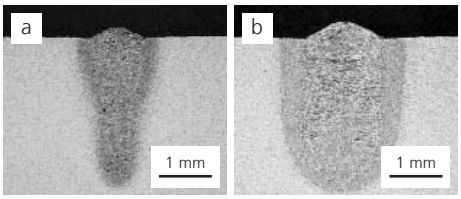


Abb. 2: Vergleichende Einschweißungen in Baustahl;
Brennweite: f = 163 mm;
Vorschub: v = 2,5 m / min
a) P_l = 2 kW (diodengepumpter Scheibenlaser)
b) P_l = 4 kW (diodengepumpter Nd:YAG-Stablaser)

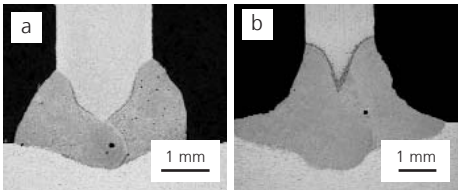


Abb. 3: Doppelkehlnaht an einer Aluminiumlegierung
Brennweite: f = 163 mm;
a) P_l = 2,5 kW; v = 4,8 m / min (diodengepumpter Scheibenlaser)
b) P_l = 4 kW; v = 3 m / min (diodengepumpter Nd:YAG-Stablaser)

Ansprechpartner

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

Aufgabenstellung

Für das prozesszeitoptimierte Steppnahtschweißen in großen Arbeitsräumen ist das roboterbasierte Remote-Schweißen eine technisch und wirtschaftlich attraktive Lösung.

Dabei wird das Achssystem eines konventionellen Industrieroboters und einer 3D-Strahlablenkoptik steuerungsseitig so miteinander gekoppelt, dass das Schweißen "on the fly", d. h. bei überlagerter Bewegung von Schweißoptik und Laserstrahlspot, stattfindet.

Die Strahlqualität der bisher den Markt dominierenden lampen- und diodengepumpten Stab-Festkörperlaser begrenzt das Arbeitsfeld bisher eingesetzter Remote-Strahlablenkoptiken (SAO1.06) mit nicht zu großer Strahlapertur und damit guter Strahldynamik auf eine Größenordnung von etwa 100 mm x 100 mm.

Um die Schweißfolge und damit die Teiletaktzeit für Bauteile mit vielen unterschiedlichen Steppschweißungen noch besser optimieren zu können, ist ein größeres Arbeitsfeld der Strahlablenkung ohne Einbuße an Strahldynamik und Fokussierbarkeit wünschenswert.

Lösungsweg

YAG-Scheibenlaser haben gegenüber den bisher genutzten Nd:YAG-Stablasern eine deutlich höhere Strahlqualität bei vergleichbarer Leistung. Das ermöglicht die Auslegung einer neuen 3D-Strahlablenkoptik für das roboterbasierte Remote-Schweißen mit verbesserter Fokussierbarkeit und vergrößertem Arbeitsfeld unter Beibehaltung der Strahlapertur und damit der Größe und Dynamik der Strahlablenkoptik.

Ergebnisse

Für das roboterbasierte Remote-Schweißen mit YAG-Scheibenlasern im Leistungsbereich von 3 bis 4 kW wurde eine neue 3D-Strahlablenkoptik (SAO1.06SL) entwickelt, deren Arbeitsfeld und Arbeitsabstand gegenüber der Bearbeitungsoptik für YAG-Stablaser verdoppelt werden konnte (Abb. 1). Da die Strahlapertur und damit die Größe und Dynamik der Strahlablenkoptik beibehalten wurden, kann auf diese Weise die Effizienz von Remote-Schweißprozessen verbessert werden (Abb. 2).

Alternativ kann bei Einsatz der bisher üblichen Fokussierbrennweiten und Arbeitsfeldgrößen die Strahlspotintensität um den Faktor 4 erhöht werden. Das gestattet neue Einsatzmöglichkeiten des Remote-Schweißens, z. B. für Aluminium- und Magnesiumlegierungen (Abb. 3).

Dekontamination biozidbelasteter Kunstgüter aus Holz

Aufgabenstellung

In zahlreichen Museen und anderen Sammlungen befinden sich Kunstobjekte aus Holz, die in der Vergangenheit mit Holzschutzmitteln behandelt worden sind. Nach heutigem Kenntnisstand werden verschiedene der damals als Holzschutzmittel gebrauchten Substanzen als extrem gesundheitsgefährdend eingestuft.

Gegenwärtig werden zur Dekontamination belasteter Holzkunstwerke sehr unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Dabei sind oft Kompromisse einzugehen. Wegen seiner Einfachheit wird das Bürstenverfahren viel genutzt. Dabei werden Ausblühungen (Kristallite) der betreffenden Substanz mechanisch von der Oberfläche entfernt. Ein Teil der zu entfernenden Schadstoffe wird so aber auch in die raue Holzoberfläche eingerieben. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass penetrierte Anteile des Holzschutzmittels nicht entfernt werden können.

In dieser Hinsicht günstiger ist das Vakuumwaschverfahren und die Dekontamination durch überkritisches CO_2. Dabei wird das Holzschutzmittel ausgewaschen und abgesaugt bzw. in CO_2 gelöst. Diese Verfahren sind jedoch sehr aufwändig. Bei letzterem muss das gesamte Objekt in entsprechende Druckbehälter gebracht werden. Dadurch ist auch die Größe der behandelbaren Objekte beschränkt.

Aus diesem Grund wurde dringend ein neuer Ansatz für eine vielfältig einsetzbare Dekontamination belasteter Kunstobjekte aus Holz gesucht.

Lösungsweg

Im Rahmen eines DBU-Projektes hat das IWS ein Laserverfahren zur Dekontamination biozidbelasteter Kunstgüter aus Holz entwickelt. Um besonders objektschonend zu arbeiten, wurde ein Nd:YAG-Reinigungslaser mit Pulsdauern im Bereich von Nanosekunden eingesetzt.

Ergebnisse

Die entwickelte Verfahrensweise wurde an verschiedensten Kunstobjekten aus Holz erfolgreich zum Abtrag der Biozide angewendet. Abb. 1 zeigt als Beispiel einen Teil eines historischen Musikinstrumentes, das Ablagerungen von Bioziden in Form eines weißen Belages aus Einzelkristalliten aufweist. Mit einem ns-Nd:YAG-Reinigungslasersystem konnten die Ausblühungen von Bioziden zusammen mit vorhandenen Schmutzschichten problemlos von der Oberfläche entfernt werden (Abb. 2).

Die abgetragenen Schadstoffe werden bei diesem berührungslosen Verfahren über eine Absaugung in Spezialfiltern deponiert. Dadurch gelingt eine Dekontamination ohne Verunreinigung von Werkzeugen oder der Umgebung mit der abgetragenen Substanz. Von besonderem Vorteil ist die flexible lokale Arbeitsweise mit dem Laser, die auch einen Abtrag in Fugen, Nischen und Hinterschneidungen, beispielsweise an Schnitzereien, ermöglicht. Eine Begrenzung hinsichtlich der Größe der Objekte existiert nicht.

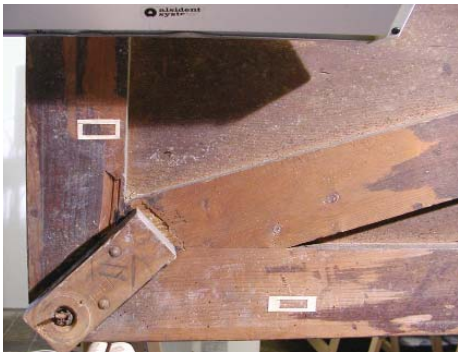


Abb. 1: Ablagerungen der Biozide in Form eines weißlichen Belags der aus Einzelkristalliten besteht

Abb. 2: Ansicht nach Laserabtrag der Biozidbeläge

Ansprechpartner

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

Restaurierung eines Schmuckkästchens durch Laserstrahlschweißen

Aufgabenstellung

Das Grüne Gewölbe ist das prächtigste Schatzkammermuseum Europas. Es versammelt Meisterwerke der Juwelier- und Goldschmiedekunst sowie Kostbarkeiten aus Bernstein, Elfenbein, Edelsteingefäße und kunstvolle Bronzestatuetten, die es zu erhalten gilt. Für die Restaurierung eines Schmuckkästchens (Abb. 1) des 16. Jahrhunderts aus einer unbekannten Silberlegierung stand die Aufgabe, eine abgebrochene Verzierung an der ursprünglichen Position (Abb. 2) wieder anzubringen. Konventionelle Fügeverfahren (Löten, Kleben) wurden von den Restauratoren ausgeschlossen. Gründe waren die hohen Ansprüche an die Optik der Fügestelle (makroskopisch unsichtbar) sowie die Notwendigkeit, eine Wärmebelastung der Fügestellenumgebung zu vermeiden, da sich auf den Ornamenten eine sogenannte Kaltbemalung befindet.

Lösungsweg

Das berührungslose Laserstrahlpunktschweißen als Restaurationsmethode wurde favorisiert, weil die filigrane Struktur des Kunstwerkes und die Forderung nach lokal auf die unmittelbare Fügestelle begrenztem Wärmeeintrag wegen der Kaltbemalung eine exakte Steuerbarkeit des Energie- und Zeitregimes für den Wärmeeintrag erforderte.

Auf Grund des Wertes des Schmuckkästchens und der nicht bekannten Silberlegierung wurden zunächst Schweißuntersuchungen an Probekörpern aus unterschiedlichen Silberlegierungen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit den Originalbereich abdecken, durchgeführt. Damit wurden folgende Fragen geklärt:

- Nachweis der prinzipiellen Schweißbarkeit der Legierungen,
- Ermittlung der günstigsten Schweißposition,
- Erarbeitung optimaler Schweißparameter wie z. B. Energie, Pulslänge, Strahldurchmesser im Wirkfleck, Zusatzwerkstoff.

Ergebnisse

Die Schweißergebnisse an den Materialproben erfüllten alle an die Restaurierung des Schmuckkästchens gestellten Erwartungen und rechtfertigten somit die Anwendung am Original. Das Resultat zeigt Abb. 3.

Dieses Beispiel demonstriert exemplarisch sowohl das Potenzial des Laserstrahlschweißens für die Restaurierung von wertvollem Kunst- und Kulturgut als auch die Möglichkeit der Beherrschung des Risikos bei der Anwendung dieser Methode an Unikaten.

Abb. 1: Schmuckkästchen, Gesamtansicht nach der Restaurierung

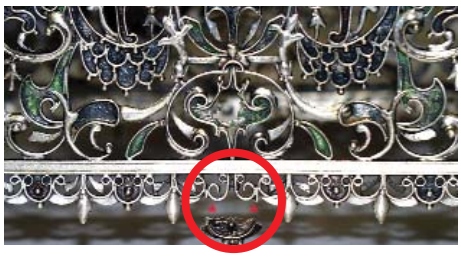


Abb. 2: Schmuckkästchen, abgebrochene Verzierung

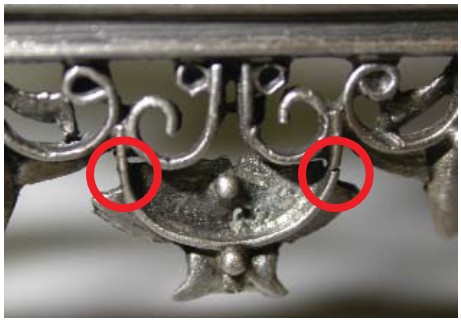


Abb. 3: Detail der Fügestelle am Original nach dem Laserstrahlschweißen

Ansprechpartner

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

HERMLE
C 800 U

Redaktion: Im Rahmen des IWS-Erweiterungsbaus haben Sie die Anlagentechnik zum Thermischen Spritzen in einem deutlich vergrößerten Technikumsraum neu installieren können. War damit auch eine Erweiterung der technologischen Möglichkeiten verbunden?

Dr. Nowotny: In der Tat. Auf der auf 100 m^2 vergrößerten Laborfläche sind nunmehr die wichtigsten von den Anwendern nachgefragten Spritzverfahren vorhanden. Neben dem Atmosphärischen Plasmaspritzen (APS) und dem Vakuum-Plasmaspritzen (VPS) steht im Neubau jetzt auch das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF) zur Verfügung. Wahlweise mit Kerosin oder mit gasförmigem Brennstoff betrieben, können mit diesem Verfahren insbesondere Hartmetallschichten mit den besten heute erreichbaren Eigenschaften hinsichtlich Dichte, Haftfestigkeit und höchster mechanischer Belastbarkeit hergestellt werden. Für eine ganze Reihe von Bauteilen, wie zum Beispiel hochbeanspruchte Motorkomponenten von Kraftfahrzeugen, sind damit erstmals Beschichtungen realisierbar, die neue Leichtbaulösungen, Kraftstoffeinsparung oder verlängerte Lebensdauern ermöglichen. Ein perspektivischer Entwicklungsschwerpunkt soll die Entwicklung oxidischer Funktionsschichten durch HVOF mit hoher Auftragsrate für weitere Anwendungen werden.

Redaktion: In den letzten Jahren haben sich Ihre Forschungsaktivitäten auf Anwendungen des Laserstrahl-Auftragschweißens für Reparaturaufgaben, vor allem in der Triebwerkinstandsetzung konzentriert. Welche Fortschritte konnten hier im Jahre 2004 erzielt werden?

Dr. Nowotny: Aufgrund der hohen Präzision hat sich das Auftragschweißen mit Laserstrahlung schon seit Jahren in diesem Sektor fest etabliert. Die im Bereich der Luftfahrtindustrie üblichen Titan-, Aluminium- oder auch Nickellegierungen sind unter normalen Atmosphärenbedingungen jedoch oft nicht fehlerfrei zu verarbeiten. Es kommt zu unzulässigen Aufhärtungen, und die geforderte Eigenschaftsprägung wird nicht erreicht. Für diese Metallegierungen ist deshalb die gesamte Systemtechnik einschließlich der notwendigen Schweißstrategien zum Auftragschweißen in kontrollierter Atmosphäre entwickelt worden. Reale Bauteile können in einer Argon-Schutzgaskammer mit einem Arbeitsraum von etwa 1,5 m^3 sowie im Kessel der VPS-Anlage bearbeitet werden. Neue Pulverdüsen und Bearbeitungsköpfe ermöglichen das Auftragschweißen von 3D-Strukturen im Genauigkeitsbereich von wenigen Zehntel Millimetern.

Redaktion: Zwei große BMBF-Verbundprojekte zum Themenkomplex des Reparierens und Generierens sowie des Rapid Tooling mit laserbasierten Fertigungsverfahren wurden mit einer vielbeachteten öffentlichen Präsentationsveranstaltung abgeschlossen. Welche konkreten Ergebnisse wurden in diesen Verbundprojekten erreicht?

Dr. Nowotny: Im Ergebnis des ersten dieser beiden Projekte, FAVOR, steht die geschlossene Prozesskette für das Präzisionsauftragschweißen mit Laser und Plasma (PTA) sowie die Hybridtechnologie des induktiv unterstützten Laserstrahl-Auftragschweißens zur Verfügung. Die Anwender ziehen Nutzen aus dieser Verfahrensentwicklung in Form verkürzter Fertigungszeiten und der rissfreien Verarbeitbarkeit besonders harter und verschleißfester Werkstoffe.

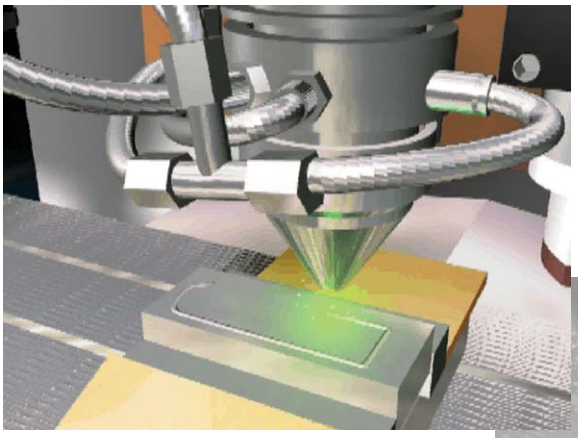
Die Arbeiten zur MELATO®-Technologie konnten ebenfalls mit einem anwendungsbereiten Stand dieses Verfahrens abgeschlossen werden. Erste Musterwerkzeuge befinden sich im industriellen Einsatz, und die Resonanz potenzieller Nutzer verspricht dieser neuen Fertigungstechnologie gute Wachstumsaussichten für die nahe Perspektive.

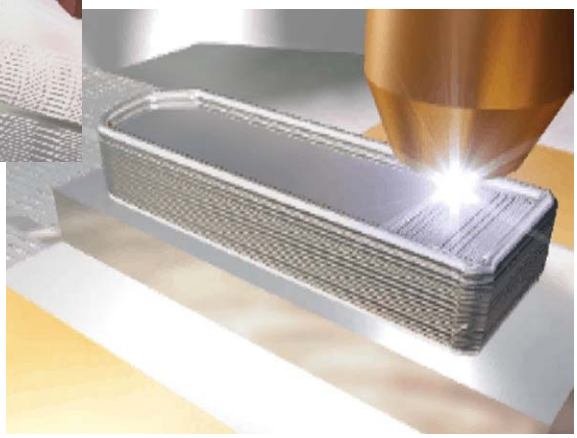
Kreativität ist die Eintrittskarte für die Zukunft.
Norbert Stoffel

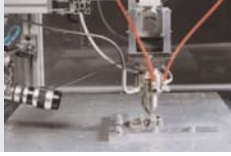
Dr. Steffen Nowotny
Abteilungsleiter
(Tel. 2583 241,
steffen.nowotny@iws.fraunhofer.de)

Beispiele aus den Arbeiten 2004

1. Hochgenaues Rapid-Prototyping für Gussteile: precise cast prototyping pc_{Pro}® 56
2. Durchgängige Automatisierung des MELATO®-Prozesses 58
3. Reparatur von Triebwerkskomponenten aus Titan-Legierungen 60
4. Geschlossene Prozessketten für das Laserstrahl-Auftragschweißen und Schweißverfahrenskombinationen 61
5. Hochgeschwindigkeitsflammspritzen als neues Beschichtungsverfahren im IWS 62
6. Tribologische Untersuchungen an thermisch gespritzten Schichten 63







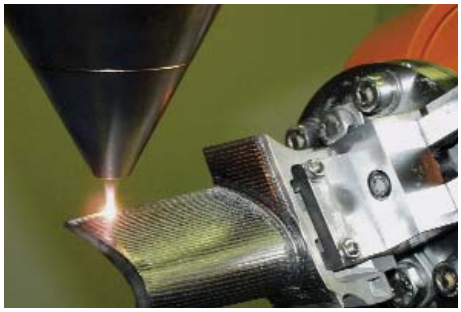
Dr. Lutz-Michael Berger
Gruppenleiter Thermisches Spritzen
(Tel. 2583 330,
lutzmichael.berger@iws.fraunhofer.de)

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- und Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF) zur Verfügung. Die Hybridtechnologie des laserunterstützen atmosphärischen Plasmaspritzens (LAAPS) ergänzt das Verfahrensspektrum.

In Kooperation mit weiteren Instituten des Fraunhofer-Institutszentrums 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.

Reparatur von Gasturbinenschaufeln durch Auftragschweißen mit Hochleistungs-Diodenlaser

Hochgenaues Rapid-Prototyping für Gussteile
precise cast prototyping pc_{Pro}®

Aufgabenstellung

Generierende Fertigungsverfahren zur Herstellung von Prototyp-Bauteilen oder Werkzeugen haben sich in den letzten Jahren einen festen Platz im Entwicklungsprozess erobert. Zahlreiche Verfahren haben Eingang in die industrielle Praxis gefunden oder werden von RP-Dienstleistern angeboten. Im Hinblick auf eine schnelle und kostengünstige Fertigung von Prototypen werden zuweilen hohe Kosten für die Anlagentechnik und den teilweise erheblichen manuellen Aufwand beklagt. Durch die Kombination von generierenden und zerspanenden Verfahren kann eine kostengünstige Automatisierungslösung für die Herstellung von Kunststoffprototypen erreicht werden.

Lösungsweg

Das patentierte Verfahren pcPro® (Patentinhaber Fraunhofer IWS) ist gekennzeichnet durch die Kombination der Verfahren Gießen und Fräsen in einer Fräsmaschine. Aus den in die Maschine eingelesenen 3D-CAD-Daten des zu fertigenden Bauteiles wird eine Werkzeughälfte abgeleitet und unter Umständen mit Entformungsschrägen versehen. Die entsprechenden Fräsbearbeitungsprogramme werden generiert und mit dem Fräsen einer Werkzeughälfte kann begonnen werden.

Im Anschluss daran wird in die gefräste Form 2K-Gießharz eingefüllt, in welches nach dem Aushärten die Innenkontur des Bauteiles gefräst wird. Nach dem Entformen des Bauteiles können beliebig viele weitere Bauteile durch Gießen, Aushärten und Fräsen hergestellt werden. Bei Verwendung von mehrteiligen Formen und Schnellgießharzen, die nach etwa 15 Minuten ausgehärtet sind, können mehrere Teile pro Stunde hergestellt werden.

Das Fraunhofer IWS hat den Prototyp einer derartigen Kombinationsanlage entwickelt, gefertigt und getestet. Dazu wurden die für den Gießprozess notwendigen Hard- und Softwarekomponenten in eine CNC-Fräsmaschine integriert. Das System ermöglicht eine vollständig automatisierte Fertigung von Bauteilen. Lediglich die Entformung der Bauteile erfolgt zum jetzigen Zeitpunkt noch manuell.

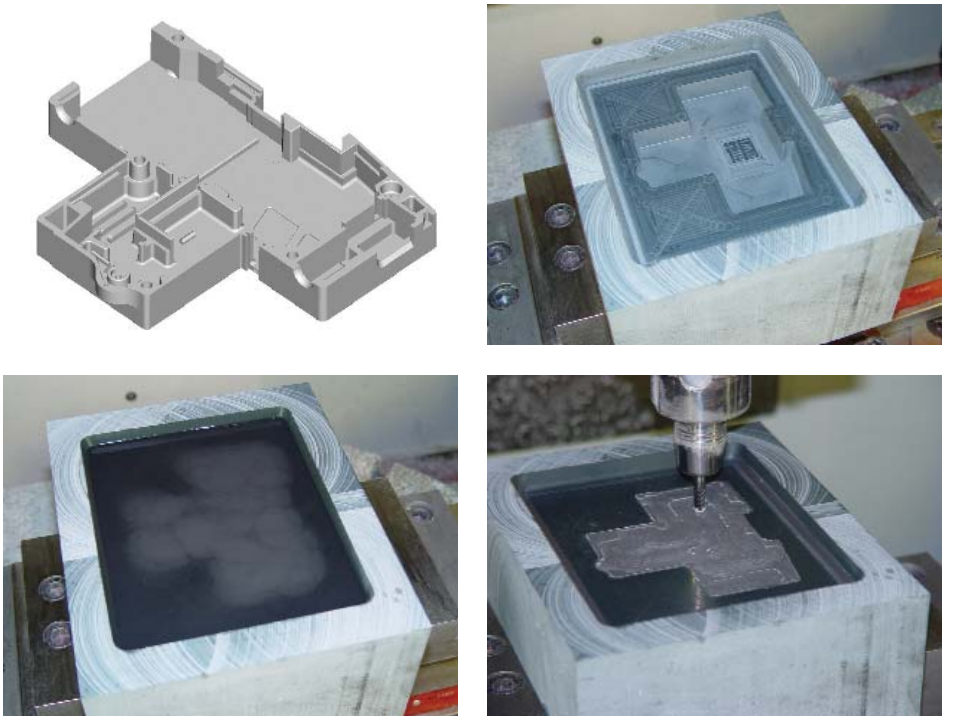
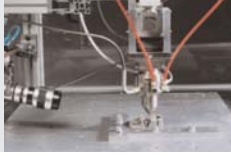


Abb. 1: Patentierte Prozesskette pc_{Pro}®:
- 3D-CAD-Datenbearbeitung
- Fräsen einer Werkzeughälfte
- Ausgießen der Werkzeughälfte
- Fräsen der Innenkontur
- Entformen (nicht dargestellt)

Ansprechpartner

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



Ergebnisse

Die neue Prozesskombination bietet zahlreiche Vorteile. So entfällt der aufwändige Prozessschritt der Modellherstellung, da ein physisches Urmodell nicht notwendig ist. Der Aufwand für den Formenbau wird verringert, da nur eine Formhälfte hergestellt wird. Auch der Aufwand für die 3D-CAD-Datenbearbeitung verringert sich, da Ausformschrägen und Verrundungen für die Innenkontur nicht konstruiert werden müssen. Die zweite Formhälfte existiert nur virtuell in Form der Fräsprogramme. Das bedeutet, sie kann sehr schnell durch Änderungen in der CAD / CAM-Prozesskette modifiziert werden. Die Fertigung der zweiten Formhälfte mit Anguss, Steiger, Entlüftung und Formenteilung entfällt. Somit ist kein großer Erfahrungsschatz als Formenbauer notwendig. Auch bei der Vorbereitung der Gießform und bei der Nachbearbeitung der Teile können Zeit und Kosten eingespart werden.

Durch die Integration des Gießverfahrens in die Fräsmaschine ist die Fertigung der Werkzeughälfte und unmittelbar im Anschluss die Komplettbearbeitung des Bauteiles in einer Aufspannung möglich. Ein Umspannen oder Neuaufspannen zur Nachbearbeitung wird vermieden. Somit entstehen keine Ungenauigkeiten zwischen Innen- und Außenkontur, und es gibt keinen Versatz zwischen unterer und oberer Formhälfte. Auch das Einbringen von Gewinden ist möglich.

Da die spanende Bearbeitung nach Aushärtung der Gießmaterialien erfolgt, d. h. nachdem Schrumpfprozesse bereits abgeschlossen sind, wird eine wesentlich höhere Genauigkeit der Gussteile erzielt. Dies ermöglicht die Einhaltung engerer Toleranzen.

Die Dichte der Bauteile genügt höchsten Ansprüchen. Da keine zweite Formhälfte existiert, können Luftblasen frei nach oben entweichen und die auf diese Weise hergestellten Bauteile sind völlig lunkerfrei.

Die Erprobung der Maschine erfolgte an einem Gehäuseteil. Der hohe Automatisierungsgrad ermöglicht eine erhebliche Produktivität bei hoher Flexibilität und Bauteilqualität. Anwendungspotenzial für die neue Verfahrenskombination wird in allen Bereichen gesehen, in denen Kunststoffteile zum Einsatz kommen.

Abb. 2: Bauteile, gefertigt mittels pc_{Pro}®

Abb. 3: pc_{Pro}®-Anlage zum Gießen und Fräsen von Kunststoffteilen

Durchgängige Automatisierung des MELATO®-Prozesses

Abb. 1: Laserstrahl-Schneidmaschine (rechts) mit Handhabungssystem (links)

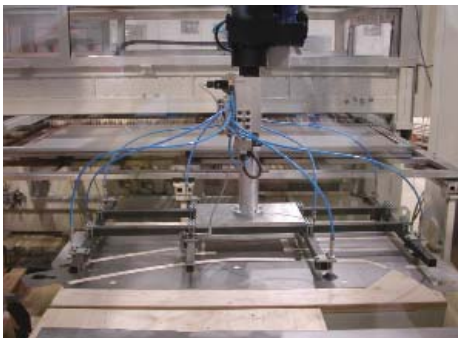


Abb. 2: Vakuumgreifsystem zum Be- und Entladen des Schneidtisches

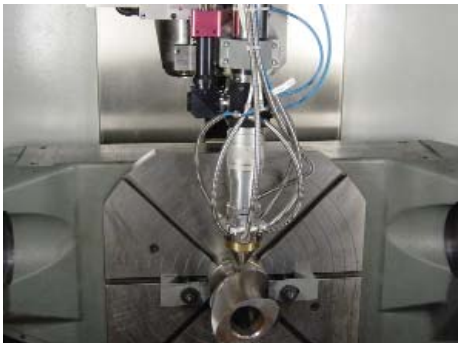


Abb. 3: Komponenten zum geregelten Laserauftragschweißen an Hermle C800

Ansprechpartner

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

Aufgabenstellung

Auf dem Gebiet der Werkzeugfertigung durch Blechpaketieren wurden im Rahmen des durch das BMBF geförderten Forschungsprojektes "MELATO" in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt. Insbesondere im Bereich der Arbeitsvorbereitung durch CAD / CAM-Systeme und auf dem Gebiet der Verbindungstechnologien stehen heute Lösungen zur Verfügung, die eine schnelle Fertigung von Prototypwerkzeugen ermöglichen.

Ein weiterer wesentlicher Schwerpunkt des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines Anlagenkonzeptes zur durchgängigen Automatisierung der Prozesskette. Damit soll vor allem die Fertigung von komplex geformten Werkzeugen mit Kantenlängen größer 1000 mm schneller und kostengünstiger erfolgen. Ziel der Automatisierungslösung ist es, die Fertigungszeit der großen Werkzeuge von derzeit etwa 12 Wochen auf eine Woche zu verkürzen.

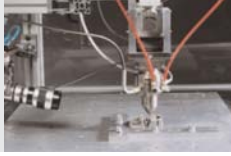
Lösungsweg

Im Hinblick auf die schnelle Fertigung großer Werkzeuge mit vielen Blechzuschnitten wurde beispielhaft eine Automatisierungslösung für das Schneiden, Paketieren, Verbinden, Oberflächenveredeln und Endbearbeiten der Bleche entwickelt. Es entstand ein Fertigungszentrum aus mehreren Bearbeitungsstationen. Für die Einführung der Technologie in der Industrie ist das von Vorteil, da die dafür notwendige technische Ausrüstung, wie z. B. Fräsmaschinen oder eine Laserstrahlschneidanlage, in den Unternehmen in der Regel vorhanden ist.

Ergebnisse

Für das Schneiden, Paketieren und Fügen von Stahlblech-Zuschnitten hat die Maschinenfabrik Arnold GmbH & Co. KG eine Schneidmaschine mit Handhabungssystem gefertigt und am Fraunhofer IWS in Betrieb genommen. Die Laserstrahl-Schneidmaschine ist in Gantry-Bauweise ausgeführt, d. h. die Bewegung in der Ebene wird durch zwei parallel angeordnete X-Achsen und eine senkrecht dazu fahrbare Y-Achse realisiert. Diese Achsen sind mit Linearantrieben ausgestattet. Der Vorteil der Linearantriebe gegenüber konventionellen Spindelantrieben besteht in den hohen Achsbeschleunigungen und -geschwindigkeiten. Die dadurch erzielbare hohe Bahnbeschleunigung ist für formgenaue Konturschnitte bei hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit von besonderer Bedeutung und ermöglicht bei der Fertigung der Blechzuschnitte deutliche Zeiteinsparungen. In die Z-Achse ist ein Laserschneidkopf mit kapazitiver Abstandsregelung integriert.

An die Laserschneidmaschine ist ein Handhabungssystem in Form einer Flächenportalanlage angeschlossen. Das Handlingsystem mit Vakuumgreifern übernimmt das automatische Beladen der Schneidmaschine mit Blechtafeln sowie die Entnahme und das Paketieren der Blechzuschnitte. Sind weitere Zwischenschritte wie das



Entgraten oder Reinigen vorgesehen, können die dafür notwendigen Bearbeitungsstationen im Arbeitsbereich des Handlingsystems angeordnet und von diesem auch bedient werden.

Für das Verbinden mittels Laserstrahlschweißen, das partielle Oberflächenveredeln durch Laser-Auftragschweißen und das Endbearbeiten durch Fräsen wird eine 5-Achs-Fräsmaschine vom Typ Hermle C800U genutzt. Durch die Integration eines Festkörperlasers und der Hardware zum Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen verfügt die Fräsmaschine über die notwendigen Systemkomponenten zum Verbindungs- und Auftragschweißen der Blechpakete mit und ohne Zusatzwerkstoff. Darüber hinaus wurde ein Kamerasystem für die Überwachung und Regelung der laserbasierten Prozesse und ein 3D-Scanner für die optische Vermessung der Bauteil-Ist-Kontur in die Fräsmaschine integriert.

Mit der im IWS vorhandenen Anlagentechnik kann nunmehr eine durchgängig automatisierte Prozesskette zur Herstellung von Blechpaketwerkzeugen demonstriert werden. Die Prozesskette beginnt mit dem Einladen der 3D-Daten des zu fertigenden Werkzeuges. An die 3D-CAD-Datenbearbeitung sowie das Zerlegen des zu fertigenden Werkzeuges in Schichten schließt sich das Anordnen der Zuschnitte auf einer Blechtafel beliebiger Größe und das automatische Erstellen des Schneidprogramms an. Mit Hilfe des Handhabungssystems wird die Schneidmaschine mit den ausgewählten Blechtafeln beladen. Das Laserschneiden der Blechsegmente beginnt. Die Zuschnitte werden durch das Handlingsystem zur weiteren Verarbeitung auf diversen Bearbeitungsstationen abgelegt oder in definierter Reihenfolge in die Stapelvorrichtung gestapelt. In Abhängigkeit von den Beanspruchungen am Bauteil wird das entstandene Blechpaket anschließend verspannt, geschweißt oder gelötet und in nachfolgenden Bearbeitungszentren oberflächenveredelt oder endbearbeitet.

Um bei allen Prozessen eine durchgängig einheitliche Datenbasis zu gewährleisten, wurden in Zusammenarbeit mit der Fa. NCSoft Wagner spezielle Softwaremodule entwickelt und für den Praxiseinsatz qualifiziert. Die Erprobung der automatisierten Prozesskette erfolgte an einem Doppelstempel zum Tiefziehen der C-Säulen-Versteifung für eine PKW-Karosse. Das 1500 mm lange und bis zu 500 mm breite Werkzeug wurde aus 1500 Blechzuschnitten zusammengesetzt, mechanisch verspannt und konturfolgend verschweißt. Die Erprobung des Werkzeuges ist Gegenstand nachfolgender Untersuchungen beim Projektpartner.

Abb. 4: CAD-Model des Doppelstempels zum Tiefziehen von Karosserieteilen

Abb. 5: Teilstück des Doppelstempels in MELATO®-Bauweise

Reparatur von Triebwerkskomponenten aus Titan-Legierungen

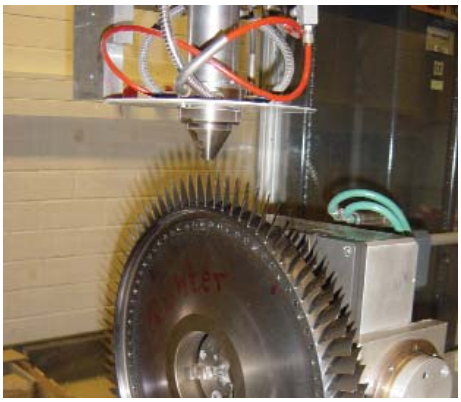


Abb. 1: Schweißaufbau zur Instandsetzung beschädigter Titan-Blisks durch Laserstrahl-Auftragschweißen

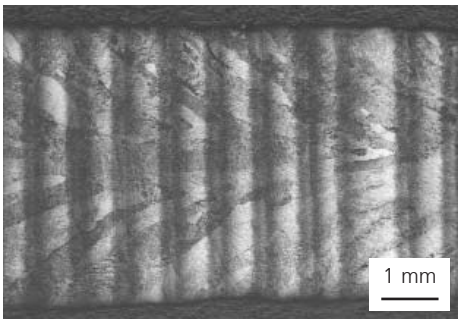


Abb. 2: Querschliff einer Mehrlagen-Auftragschweißung aus Ti6242

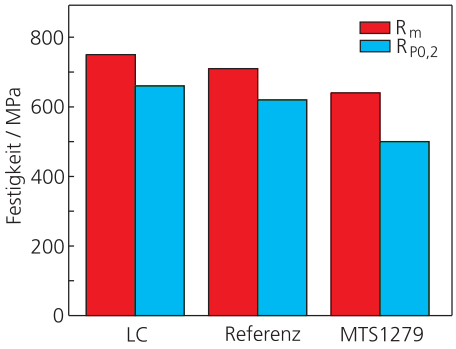


Abb. 3: Ergebnisse der Warmzugversuche: Zugfestigkeit R_m und Streckgrenze $R_{P0,2}$ der lasergenerierten Proben (LC) im Vergleich zum klassisch hergestellten Material (Referenz) und den Minimalwerten der MTU-Spezifikation

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Sven Orban
Tel.: 0351 / 2583 358
sven.orban@iws.fraunhofer.de

Aufgabenstellung

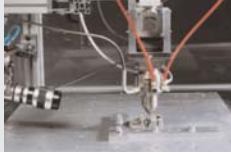
Das Laserstrahl-Auftragschweißen hat sich als Präzisions-Fertigungsverfahren zur schnellen und effizienten Reparatur von beschädigten Flugzeugtriebwerksteilen etabliert. Das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten bestand darin, die Eignung des Verfahrens zur Reparatur von Kompressor-Blisks, Abb. 1, aus einer Titan-Luftfahrtlegierung zu untersuchen. Der besondere Anspruch ergab sich aus den Forderungen nach einem fehlerfreien, aufhärtungsarmen Gefüge des in Multilagen frei aufgeschweißten Materials sowie einer hohen Konturtreue. Insbesondere aber hatten die Festigkeitseigenschaften denen des klassisch hergestellten Referenzwerkstoffs und vom Triebwerkshersteller vorgegebenen Minimalwerten zu entsprechen.

Lösungsweg

In Zusammenarbeit mit MTU Aero Engines GmbH wurden im Rahmen des von der EU geförderten Verbundprojekts "AWFORS" umfangreiche Untersuchungen zur Fertigung von 3D-Strukturen aus Ti6242 durchgeführt. Die Auftragschweißversuche erfolgten mit einem 3 kW Nd:YAG-Laser und einer Koaxial-Pulverdüse aus dem System COAXn. Zur Sicherung der erforderlichen inerten Schweißumgebung wurde der Prozeß in einer geschlossenen Kammer in Ar-Atmosphäre mit einem Restsauerstoffgehalt von unter 10 ppm realisiert.

Ergebnisse

Für die Untersuchungen sind Proben mit einer den Kompressorschaufeln ähnlichen Geometrie endkonturnah aufgebaut worden. Die Oberfläche des aufgetragenen Materials ist metallisch blank und zeigt keine Hinweise auf Oxydation. In Abb. 2 ist das charakteristische Gefüge des durch übereinandergeschweißte Einzellagen generierten Werkstoffvolumens dargestellt. Die Struktur ist vollständig dicht und feinkristallin. Durch epitaktisches Aufwachsen des Materials von Schweißlage zu Schweißlage ergibt sich die erkennbare grobe Überstruktur. Gegenüber dem unbeeinflußten Grundmaterial steigt die Härte in den lasergenerierten Bereichen um etwa 20 Prozent von 340 auf 400 HV0,5. Dieser Effekt ist durch die feine Erstarrungsstruktur zu erklären und unterstreicht die Aussage, dass Oxydationsprozesse unter den eingestellten Schweißbedingungen sicher vermieden werden. Zur Untersuchung der statischen Festigkeit sind durch MTU Aero Engines Zugversuche unter Standard-Bedingungen bei einer Temperatur von 500 °C durchgeführt worden. Sowohl die R_m- als auch die $R_{P0,2}$-Werte der lasergenerierten Proben liegen oberhalb der Festigkeit des Referenzwerkstoffs. Die Minimalwerte entsprechend MTU-Spezifikation werden ebenfalls in jedem Falle überschritten. Im Ergebnis weiterer Festigkeitsuntersuchungen konnten auch die für die Ermüdungsfestigkeit geforderten Werte nachgewiesen werden. Hierdurch und unter Berücksichtigung des nahezu porenfreien, homogenen und geometrisch präzisen Materialaufbaus wird das Laserstrahl-Auftragschweißen als geeignetes Verfahren auch für diesen speziellen Fall der Triebwerkinstandsetzung bewertet.



Geschlossene Prozessketten für das Laserstrahl-Auftragschweißen und Schweißverfahrenskombinationen

Aufgabenstellung

Das Laserstrahl-Auftragschweißen wird zur schnellen Formänderung, zur Reparatur, zum Oberflächenschutz von Werkzeugen und Bauteilen sowie für das direkte Generieren (DMD) komplex geformter Bauteile in der Produktion angewendet. Dabei werden von der Industrie geschlossene Prozessketten, vom 3D-Modell bis zur CNC-Ansteuerung der Bearbeitungszentren, gefordert. Es kommen 3-Achs- / 5-Achs-CNC-Maschinen sowie preiswerte Roboter-Handlingsysteme zum Einsatz. Für die unterschiedlichsten Maschinenkonzepte sollen Lösungen für die Integration der Verfahren Laser-Pulver-Auftragschweißen, Plasma-Pulver-Auftragschweißen sowie die induktive Erwärmung gefunden werden. Zusätzlich sollen durch Kombination der Verfahren neue Anwendungsfelder erschlossen und die Prozesszeiten verkürzt werden.

Lösungsweg

Die Lösung für die Verfahrenskombination besteht in der Integration eines zusätzlichen Geräteträgers in bestehende CNC-Fräsmaschinen. Dazu müssen alle neuen Komponenten so in das vorhandene Maschinenkonzept eingebunden werden, dass ein CNC-gesteuerter wechselseitiger Betrieb der unterschiedlichen Verfahren erfolgen kann.

Eine Grundvoraussetzung zur Realisierung einer geschlossenen Prozesskette stellt dabei das CAM-Programmiersystem DCAM5 dar. Dieses umfasst mehrere Tools, die, ausgehend von 3D-CAD-Modellen, eine verfahrensgerechte Datenbearbeitung durchführen, eine optimale Bearbeitungsstrategie festlegen und die Werkzeugbahnen für die eingesetzten Verfahren generieren. Schließlich erstellen diese Tools über eigens geschriebene Postprozessoren die CNC-Programme für das Laser- und Plasma-Pulver-Auftragschweißen, für die Wärmeführung mittels Induktion wie auch für die Endbearbeitung.

Ergebnisse

An einer 3-Achs-Fräsmaschine konnten die Grundlagen zur Integration der oben genannten Verfahren praktiziert werden. Abb. 1 zeigt den an der Z-Achse der Frässpindel angebrachten Geräteträger, der über einen pneumatischen Zylinder in die Arbeitsposition abgesenkt werden kann. Der Flansch eines Triebwerk-Gehäuses wurde mit Hilfe der Kombination Laser / Induktion beschichtet. Damit konnte die Prozesszeit um 50 Prozent reduziert werden. Weiterhin ist die Beschichtung von rissgefährdeten hochfesten Werkstoffen mittels dieser Kombination möglich.

Der direkte Anbau einer Einheit zum Laser-Pulver-Auftragschweißen an einen Reis-Roboter ist in Abb. 2 dargestellt. Der verwendete 4 kW-Diodenlaser mit Optik und Koaxialdüse wurde an der Roboterhand montiert. Damit können nahezu beliebige Beschichtungen im dreidimensionalen Raum durchgeführt werden. An dieser Anlage, die von der Firma ALOtec angeboten wird, erfolgt die Kombination mit dem Laserhärten. Der Anwender kann somit die Anlage besser auslasten.

Für die vorgestellten Maschinenkonzepte erfolgt die Erstellung der Werkzeugbahnen für die zum Einsatz kommenden Verfahren mit dem CAM- und Offline Programmiersystem DCAM5. Die vorhandenen Tools können jederzeit weiterentwickelt oder in andere CAM-Systeme als Plug In integriert werden. Damit kann je nach Anwendung ein für den Kunden maßgeschneidertes Paket angeboten werden.

Abb. 1: 3-Achs-Fräsmaschine, Beispiel: Laser-Beschichtung eines Triebwerkflansches mit Induktionsunterstützung

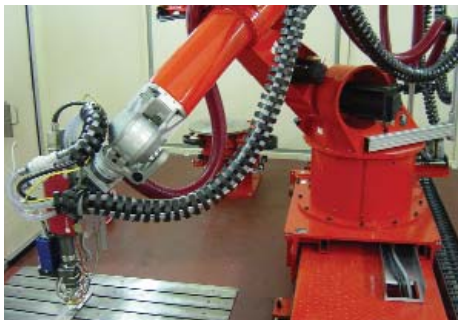


Abb. 2: Reis-Roboter, direkt angebauter 4 kW-Diodenlaser, Optik mit Prozessüberwachung und Koaxialdüse

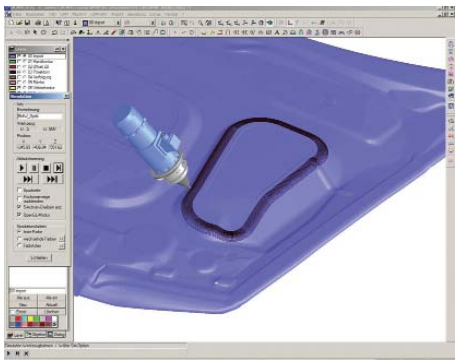


Abb. 3: CAM-Programmiersystem DCAM5, Simulation von Laserbahnen mit Beschichtungseinheit

Ansprechpartner

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

Hochgeschwindigkeitsflammspritzen als neues Beschichtungsverfahren im IWS

Aufgabenstellung

Das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF) hat in den letzten Jahren bedeutende Marktanteile in der Verfahrensgruppe des Thermischen Spritzens erobert. Dies ist begründet durch die besonders dichten Schichten hoher Haftfestigkeit, die mit diesem Verfahren hergestellt werden können. Dabei wurde die HVOF-Spritztechnik selbst und die Peripherie der Beschichtungsanlagen ständig weiterentwickelt. Für einige Werkstoffgruppen, wie das Beschichten mit Hartmetallen, ist es mittlerweile das Standardverfahren.

Lösungsweg

Mit der Integration von zwei neuen HVOF-Brennern der neuesten Generation in die vorhandene Infrastruktur ist jetzt im IWS das gesamte Spektrum an industriell weit verbreiteter Spritztechnik vorhanden. Die neuen HVOF-Brenner werden mit flüssigen (Paraffin) bzw. gasförmigen (Ethen, Ethin) Brennstoffen betrieben. Dabei zeichnet sich die mit Flüssigbrennstoff betriebene Anlage im Vergleich mit anderen HVOF-Anlagen durch besonders niedrige Flammtemperatur und hohe Partikelgeschwindigkeiten aus. Vorrangiges Anwendungsgebiet dieser mit Flüssigbrennstoff betriebenen Anlage ist die Herstellung besonders dichter und oxidarmer Hartmetall- und metallischer Schichten. Im Gegensatz dazu erreicht die mit gasförmigen Brennstoffen betriebene Anlage höhere Flammtemperaturen. Schwerpunkt für die Verwendung dieser Anlage wird die Entwicklung dichter und kostengünstiger oxidischer Schichten für neue Anwendungen sein.

Die Brenner werden mit einem 6-Achs-Roboter geführt. Dies gewährleistet die Einhaltung der Spritzparameter und die Reproduzierbarkeit der erreichten Schichtqualitäten.

Ergänzt wird die Erweiterung der Beschichtungstechnik durch ein On-line-Diagnosegerät (SprayWatch®), welches für alle vorhandenen Spritzverfahren einsetzbar ist. Dadurch ist es möglich, den Strom der schichtbildenden Pulverpartikel im heißen Gasstrahl direkt zu erfassen und sowohl deren Temperatur als auch Geschwindigkeit zu bestimmen. Durch metallographische Präparation und Untersuchung der Schichten kann die optimale Struktur mit den Spritzparametern korreliert werden. Bei weiteren Beschichtungen wird die Einhaltung dieser optimierten Parameter durch das Diagnostiksystem garantiert.

Ergebnisse

Abb. 1 zeigt den mit Flüssigbrennstoff betriebenen Brenner zusammen mit dem On-line-Diagnosesystem. In Abb. 2 ist als Beispiel für eine optimierte Hartmetallschicht die Struktur einer WC-Co-Schicht dargestellt. Diese Schichten zeichnen sich durch geringe Zersetzung der Carbide aus und weisen damit eine Kombination von Härte und Zähigkeit auf, die denen von Sinterhartmetall bereits nahekommt.

Abb. 1: An das Handhabungssystem montierter HVOF-Brenner und On-line-Diagnosesystem

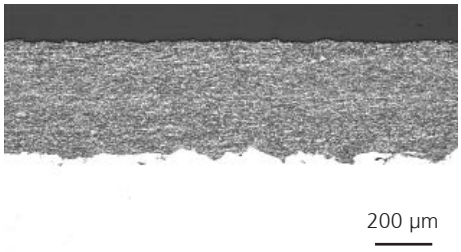
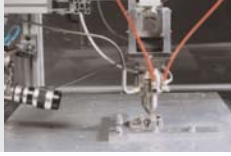


Abb. 2: Struktur einer HVOF-gespritzten WC-17%Co Schicht

Ansprechpartner

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



Tribologische Untersuchungen an thermisch gespritzten Schichten

Aufgabenstellung

Die Anforderungen an das Belastungsprofil von thermisch gespritzten Schichten sind in den letzten Jahren immer weiter gestiegen. Der Einsatz von Spritzschichten bei Linien- und Punktbelastungen mit hohen Hertz´schen Pressungen rückt dabei immer mehr in den Vordergrund. Durch einen Vergleich von verschiedenen Werkstoffsystemen sollte ein Überblick über Einsatzmöglichkeiten unter diesen Bedingungen geschaffen werden.

Lösungsweg

Der Einsatz von oxidkeramischen Werkstoffen wird in einer Vielzahl von Anwendungen auf Grund ihrer geringen Masse und guten Verschleißbeständigkeit immer wieder angestrebt. Hartmetallschichten mit einer vielfach noch höheren Verschleißbeständigkeit haben sich durch den Einsatz des Hochgeschwindigkeitsflammspritzens (HVOF) ebenfalls in vielen Anwendungsfällen etabliert. Die hier untersuchten oxidkeramischen Schichten wurden durch Plasmaspritzen und die Hartmetallschichten mittels HVOF-Spritzen aufgebracht. Die für die Schichtprüfung notwendige Rauheit von $R_z \leq 1$ µm wurde durch eine Nachbearbeitung der Schichten erreicht.

Zur vergleichenden Prüfung wurde der oszillierende Gleitverschleiß gewählt. Alle eingesetzten Schichtwerkstoffe wurden gegen den Stahl 100Cr6 getestet. Zusätzlich wurden die keramischen Schichtwerkstoffe gegen gesintertes Si_3N_4 und die Hartmetallschichten gegen gesintertes WC-Co getestet.

Ergebnisse

Alle Untersuchungen wurden mit einer Last von 10 N, über eine Wegstrecke von 216 m, bei einer Schwingfrequenz von 10 Hz durchgeführt. Bei allen Untersuchungen gegen 100Cr6 wies der Gegenkörper einen vielfach höheren Verschleiß als die Schicht auf. Die Untersuchungen der keramischen Schichten gegen den SiN-Gegenkörper waren durch einen geringeren Verschleiß des Gegenkörpers und der Schicht gekennzeichnet.

Die Ergebnisse für die Hartmetallschichten gegen WC-Co in Abb. 1 zeigen die Verschleißspurtiefe der Schicht sowie die Verschleißhöhe des Gegenkörpers. Die Harmetallschichten weisen im Vergleich zu den keramischen Schichten einen geringeren Verschleiß auf. Der Gegenkörper unterliegt bei allen Untersuchungen einem stärkeren Verschleiß als die Schicht selber. Die Hartmetallschichten auf der Basis von Titancarbid zeigten hier ein ähnliches Verschleißverhalten wie die klassischen Wolframcarbid-Hartmetalle. Auf Grund des erheblichen Dichteunterschiedes steht für dieses Belastungsprofil mit Titancarbid-Basis-Werkstoffen eine interessante Alternative zu WC-Basis-Hartmetallen zur Verfügung. In Abb. 2 ist ein Querschliff einer solchen Titancarbid-Hochleistungsschicht dargestellt.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Europäischen Forschungsvorhabens "Oil-free powertrain" durchgeführt.

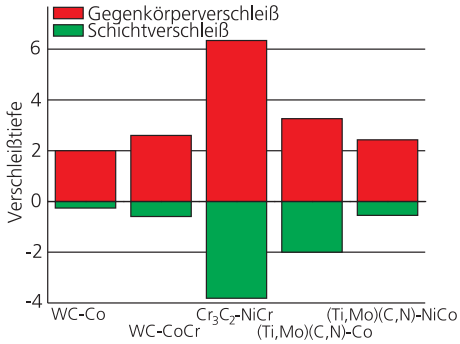


Abb. 1: Schicht- und Gegenkörperverschleiß beim Einsatz von Hartmetallschichten

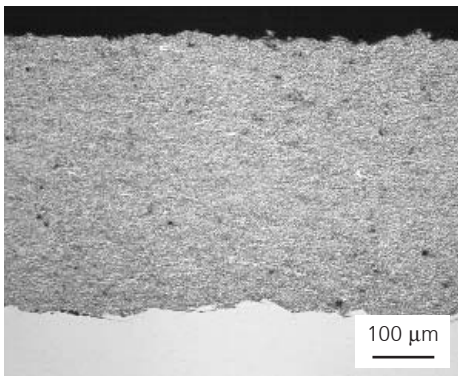
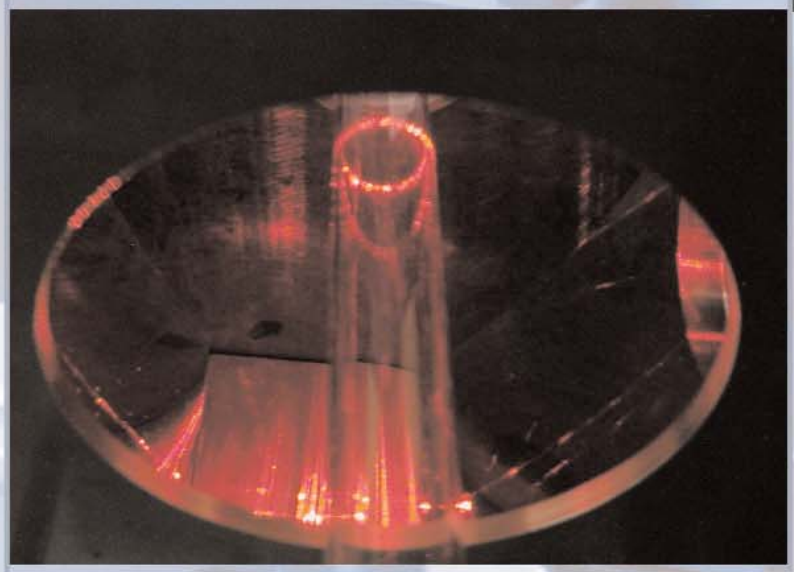


Abb. 2: Querschliff einer TiC-Basis-Hartmetallschicht für den Einsatz bei hohen Hertz´schen Pressungen

Ansprechpartner

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



FuE-Angebot: CVD-Dünnschichttechnologie

Redaktion: Wie entwickelte sich Ihre relativ junge Abteilung "CVD-Dünnschichttechnologie" im vergangenen Jahr?

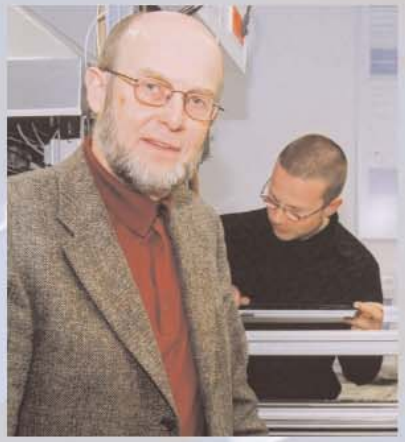
Dr. Hopfe: In einer Dynamik, die bisweilen zwar an die Grenzen ging, uns aber eine ausgezeichnete Plattform für die weitere Entwicklung bietet. Das betrifft sowohl neue komplexe Projekte als auch eine Vielzahl von Anfragen aus der Industrie, die das sprungartig gewachsene Interesse an unseren Forschungsergebnissen zeigen. Trotz Zuwachs sind beide Arbeitsgruppen am Jahresende wiederum an Grenzen hinsichtlich Personal- und Anlagenkapazität angelangt. Diesem an sich erfreulichen Trend wollen wir 2005 durch weiteres Wachstum, besonders aber durch Effektivitätssteigerung und Ausbau der experimentellen Basis Rechnung tragen. Das schafft einen Motivationsschub, der sich deutlich in dem erzielten Kompetenzzuwachs in den beiden noch jungen Arbeitsgruppen ablesen läßt und letztlich unseren Partnern zugute kommt.

Redaktion: In Ihren Labors wurde im vergangenen Jahr extrem viel Equipment neu aufgebaut. Welche Anwendungen stehen dahinter?

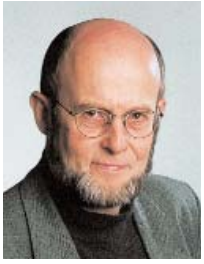
Dr. Hopfe: Tatsächlich war in den Laborräumen zu Beginn des Jahres 2004 keine "freie Ecke" mehr zu finden. Durch die Fertigstellung des IWS-Erweiterungsbaus konnten insbesondere im 4. Quartal 2004 die dringend benötigten Erweiterungsmöglichkeiten geschaffen werden. Bei dem genannten Equipment handelt es sich um Prototypanlagen zum Beschichten und Trockenätzen von Halbzeugen mit plasmachemischen Verfahren bei Atmosphärendruck. Sie wurden im direkten Kundenauftrag entwickelt, gefertigt und sind derzeit in der Inbetriebnahmephase. Inzwischen arbeitet mehr als die Hälfte der Abteilung an der Entwicklung und Testung von Prototypanlagen sowie an der dazugehörigen Prozessentwicklung. Für die ingenieurtechnischen Arbeiten haben wir die notwendige "kritische Masse" kurzfristig etablieren können. Die im IWS aufgebauten Beschichtungs- und Ätzanlagen sind Atmosphärendruck-Plasma-Durchlaufreaktoren, deren Reaktordesign auf Basis thermofluiddynamischer Rechnungen erfolgt. Gegenüber der herkömmlichen intuitiv-empirischen Arbeitsweise ist damit eine wesentliche Zeit- und Kostenersparnis verbunden.

Redaktion: Im Bereich des Prozess-Monitoring ist es Ihnen gelungen, spektroskopische Gassensorik zu entwickeln und in den Produktionsbereichen namhafter Unternehmen zu testen. Wie sind die Ergebnisse zu bewerten?

Dr. Hopfe: Zusammen mit mittelständischen Unternehmen haben wir inzwischen mehrere Prototypen von Gassensoren zur Überwachung und Regelung von Industrieanlagen entwickelt. Ein auf FTIR-Spektroskopie beruhender Sensor befindet sich seit einigen Monaten bei Infineon an einer Produktionsmaschine für 300 mm-Wafer im Dauertest. Sofort nach Inbetriebnahme hat er hochinteressante - teilweise unerwartete - Einsichten in das "Maschinenleben" gebracht. Das Prinzip wird derzeit in die Keramikindustrie überführt. Erste hoffnungsvolle Ergebnisse demonstrieren erneut die multivalente Anwendbarkeit der entwickelten innovativen Gassensorik.



Wenn eine Idee
nicht zuerst absurd erscheint,
taugt sie nichts.
Albert Einstein



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

Beispiele aus den Arbeiten 2004

1. Atmosphärendruck-Plasma-CVD zur Abscheidung transparenter Kratzschutzschichten 68

2. Fluiddynamische Simulationen - ein effektives Werkzeug zum Design und zur Optimierung von Plasma-CVD-Reaktoren 70

3. IRspecXL - ein neues Werkzeug zur Oberflächenanalyse und Qualitätssicherung großer Bauteile mittels FTIR-Reflexionsspektroskopie 72

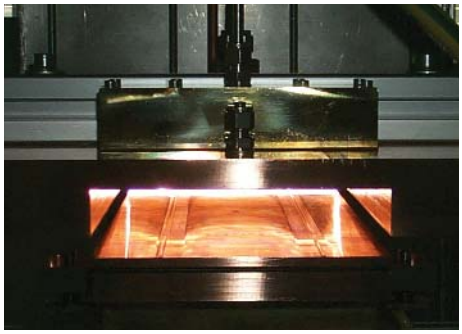
4. Prozessüberwachung an Entbinderöfen zur Herstellung von Keramik-Formteilen 73

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 qualitativ hochwertiger Funktionsschichten ohne Einsatz kostenintensiver 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 Gasschleusen zur Herstellung von oxidischen und nichtoxidischen Schichten bei Normaldruck entwickelt. Die Optimierung des Reaktordesigns basiert auf experimentellen Ergebnissen und thermofluiddynamischen Simulationen. Das modulare Reaktordesign sorgt für eine kostengünstige Adaption des Prozesses an neue Anwendungsgebiete und Schichtmaterialien.



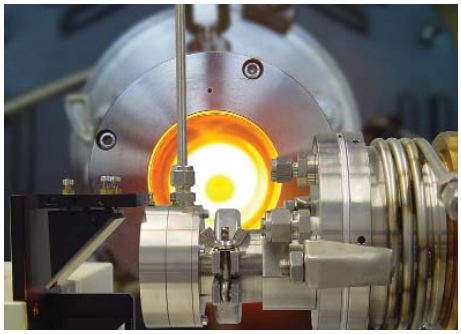
Blick in den Beschichtungsraum der ArcJet-PECVD-Anlage

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 sich in der Anlage befindenden 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

Atmosphärendruck Plasma-CVD zur Abscheidung transparenter Kratzschutzschichten

Aufgabenstellung

Die Oberflächenveredlung von Halbzeugen oder Bauteilen mittels keramischer Beschichtungen wie Silizium- oder Aluminiumoxid durch Gasphasenprozesse bei Atmosphärendruck bietet kostengünstige Lösungen für eine zunehmende Anzahl von Anwendungen. Beispiele dafür sind kratzfeste, transparente Beschichtungen auf Kunststoff- oder Edelstahloberflächen, die beispielsweise als Arbeitsflächen im Küchenbereich zum Einsatz gelangen, sowie Diffusionsbarriereschichten auf Lebensmittel-Verpackungsfolien oder für den Korrosionsschutz. Kommerziell verfügbare Verfahren versagen oft bei speziellen Anforderungen wie z. B. bei der kontinuierlichen Beschichtung von temperaturempfindlichen Substraten. Auch die kostengünstige Integration herkömmlicher Beschichtungsprozesse in bestehende Produktionsanlagen ist oft aus Gründen des Materialflusses oder des Platzbedarfs nicht möglich.

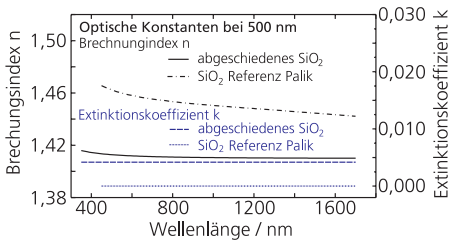


Abb. 1: Bestimmung von Brechungsindex und Extinktionskoeffizient einer SiO_2-Schicht auf Edelstahl (R_a = 40 nm) mittels UV-VIS-Spektroellipsometrie

Im Fraunhofer IWS werden skalierbare, kontinuierliche plasmagestützte CVD-Verfahren für den Einsatz bei Atmosphärendruck (AP-PECVD) bis zur industriellen Prototyp-Phase entwickelt. Diese flexiblen Verfahren eignen sich zur Beschichtung temperaturempfindlicher Materialien, wie Sonderstähle, Leichtmetalle, Gläser oder Kunststoffe.

Spezielle Zielstellung der im IWS begonnenen Arbeiten ist die Abscheidung µm-dicker SiO_2-Schichten zum Schutz von Oberflächen durch mechanische Einwirkungen sowie deren Kombination mit anderen Materialsystemen zur Erweiterung des Eigenschaftsprofils.

Lösungsweg

Bei AP-PECVD-Prozessen wird die schichtbildende Substanz, der Precursor, durch das Plasma aktiviert, d. h. in reaktive Spezies umgewandelt, die durch Gasströme zum Substrat getragen und dort als Schichtmaterial abgeschieden werden. Für die Precursoraktivierung wird ein durch Mikrowellenstrahlung (2,45 GHz) erzeugtes Niedertemperatur-Volumenplasma genutzt, das auch unter Atmosphärendruckbedingungen homogen und stabil brennt. Die Quelle weist in der am IWS entwickelten Laboranlage eine Arbeitsbreite von 150 mm auf, eine Skalierung der Quelle bis zu 400 mm wurde bereits demonstriert. Fluiddynamische Simulationsrechnungen der Gasdynamik, der Temperatur- und Konzentrationsverteilungen sowie der Schicht- und Pulverbildungskinetik bildeten die Basis für das Design der kontinuierlich arbeitenden AP-PECVD-Reaktoren sowie der Optimierung der Beschichtungsprozesse.

Der für das kontinuierliche AP-PECVD-Verfahren von flachen Substraten entwickelte Reaktor wird im sogenannten Remote-Plasma-Mode betrieben. Um

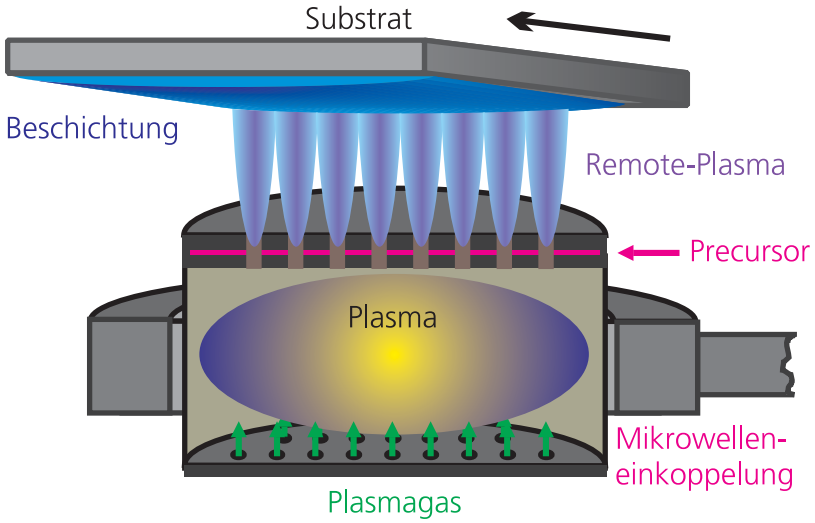


Abb. 2: Schematische Darstellung des Mikrowellen-AP-PECVD-Reaktors; Plasmaquelle: CYRANNUS®, Iplas GmbH

Ansprechpartner

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

eine hohe Langzeitstabilität der Beschichtungsanlage zu sichern und die Temperaturbelastung des Substrates zu senken, ist die Beschichtungszone räumlich von der Plasmaquelle getrennt (Abb. 2). Die Plasmaquelle wird von einem Gasgemisch (Ar mit N_2, O_2 und / oder H_2) schnell durchströmt. Die im Plasmavolumen erzeugten aktivierten Spezies verlassen die Quelle durch eine Düsenplatte, an deren Ausgang der Precursor zugemischt wird. Das Substrat wird kontinuierlich über den Reaktorkopf bewegt und dabei gleichmäßig beschichtet.

Ergebnisse

Zur Optimierung des Atmosphärendruck-PECVD-Prozesses zur kontinuierlichen SiO_2-Abscheidung wurden flache Substrate aus Edelstahl (1.4301) mit zwei unterschiedlichen Oberflächenrauheiten genutzt: kaltgewalztes Material mit einem Mittelrauwert von 120 nm sowie elektropoliertes Material (R_a = 40 nm). Vor der Beschichtung wurden die Substrate chemisch gereinigt und einer in-situ-Mikrowellenplasma-Behandlung ausgesetzt, um die Oberflächenenergie und damit die Schichthaftung zu erhöhen. Die Siliziumdioxid-Abscheidung erfolgte aus einer in das Ar/N_2-Remoteplasma eingespeisten TEOS-O_2-Gasmischung. Die dynamische Abscheiderate liegt derzeit bei 0,3 nm m s^{-1} bei Substrattemperaturen unterhalb 250 °C.

Mittels REM wurde die Morphologie der abgeschiedenen Schichten untersucht. In Abhängigkeit von Schichtdicke und Substratrauheit wurde dabei eine kompakte Schicht mit einem aufliegenden relativ grobkörnigen Oberflächenprofil gefunden (Abb. 5), das typisch für Edelstahlbeschichtungen zu sein scheint. Die mittels ERD-Analyse ermittelte Elementzusammensetzung weist auf nahezu stöchiometrisches SiO_2 hin (62 at.% O, 29 at.% Si, 9 at.% H). Geringe Kohlenstoff-Verunreinigungen (< 0,1 at.%) zeigen, dass der verwendete metallorganische Precursor im Remote-Mikrowellenplasma effektiv fragmentiert wird und dadurch rein anorganische Schichten abgeschieden werden.

Die optische Charakterisierung der Schichten erfolgte durch UV-VIS-NIR-Spektroellipsometrie und FTIR-Reflexionsspektroskopie im Wellenlängenbereich 0,25 - 25 µm. Schichten mit hoher Transparenz im VIS-Bereich und ohne sichtbare Trübung können bis zu Schichtdicken von ca. 500 nm erzeugt werden. Die Schicht besteht zu 75 Prozent aus einer dichten Unterschicht, deren optische Funktionen gut mit denen von reinem Quarzglas übereinstimmen (siehe Abb. 1). Das spektroellipsometrisch ermittelte laterale Schichtdickenprofil zeigt Abweichungen von unter 5 Prozent (Abb. 3). Die Schichthärte wurde mittels Nanoindenter an 450 nm dicken Schichten bestimmt. Die ermittelten Härten lagen bei ca. 2 GPa.

Zur Strukturuntersuchung wurden die Schichten FTIR-reflexionsspektroskopisch bei unterschiedlichen Einfallswinkeln unter Einsatz polarisierter Strahlung untersucht. Da Reflexionsspektren derartig dicker Schichten nicht direkt auswertbar sind, erfolgte durch Simulationsrechnungen eine Transformation in die IR-optischen Funktionen (Brechungsindizes und Extinktionskoeffizient, vgl. Abb. 4). Zur optischen Simulation wurde ein 3-Medienmodell (Stahlsubstrat - dichte SiO_2-Schicht - raue Oberflächenschicht) verwendet. Die erhaltenen IR-optischen Funktionen entsprechen weitgehend denen des Quarzglases, wobei die geringere Halbwertsbreite der Si-O-Phononenbanden auf Nanokristallinität in der Schicht hinweist. Die SiO_2-Schichten enthalten außer geringen Mengen an Si-OH-Gruppen keine weiteren Strukturgruppen.

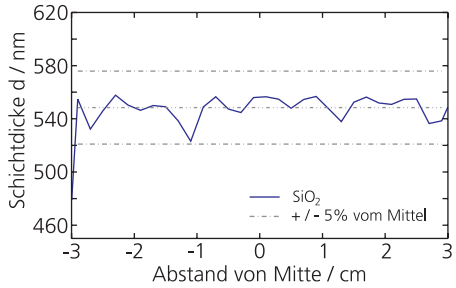


Abb. 3: Schichtdickenprofil einer 500 nm dicken SiO_2-Schicht auf Edelstahl, UV-VIS-NIR-Spektroellipsometrie, Linienscan über 60 mm

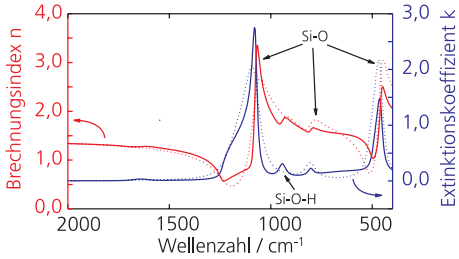


Abb. 4: Brechungsindex und Extinktionskoeffizient einer SiO_2-Schicht (durchgezogene Linie) im Vergleich zu Literaturwerten (gepunktete Linie) - zusätzlich zu den typischen Si-O-Phononenbanden des Quarzglases werden Absorptionen von Si-OH-Gruppen beobachtet

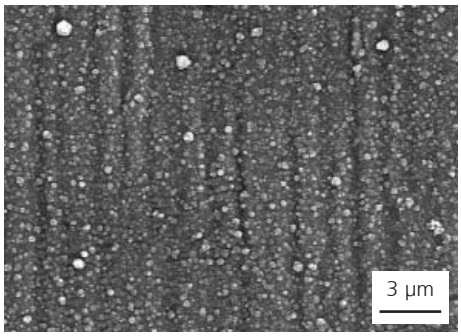


Abb. 5: REM Aufnahme einer 500 nm dicken SiO_2-Schicht auf Edelstahl mit aufliegender körniger Deckschicht

Fluiddynamische Simulationen - ein effektives Werkzeug zum Design und zur Optimierung von Plasma-CVD-Reaktoren

Aufgabenstellung

Zur kontinuierlichen Beschichtung großflächiger Halbzeuge und Bauteile werden im Fraunhofer IWS derzeit mehrere Atmosphärendruck Plasma-CVD-Prozesse (AP-PECVD) entwickelt. Eine besondere Herausforderung bildet dabei die strömungsdynamische Auslegung und Optimierung der AP-PECVD-Reaktoren. Empirische Ansätze sind zeit- und kostenintensiv und sind deshalb besonders für die Skalierung der Prozesse und für den Entwurf von Prototypanlagen ungeeignet.

Im folgenden wird über fluiddynamische Simulationen als effektives Werkzeug zum Reaktordesign am Beispiel einer Mikrowellen-Plasmaquelle (Cyrannus® Iplas GmbH) für den Aufbau von AP-PECVD-Reaktoren berichtet. Wesentliches Kriterium für eine effektive (Remote) Plasma-CVD-Beschichtung ist die Bereitstellung einer möglichst hohen Konzentration angeregter Plasmagas-Spezies außerhalb des Plasmagenerators, sowie die Möglichkeit zu deren großflächiger, homogener Extraktion aus der Plasmaquelle. Bedingt durch die hohen Rekombinationsraten aktivierter Plasmagaszustände bei Atmosphärendruck erfordert dies minimale Verweilzeiten der Spezies beim Ausströmen aus der Plasmaquelle zur Substratoberfläche. Um gleichzeitig hohe Depositionsraten (Minimierung der ruhenden Gasschicht) und größere Arbeitsabstände zwischen Beschichtungskopf und Substrat (ca. 30 - 40 mm) realisieren zu können, ergibt sich die Notwendigkeit, sehr hohe Gasflüsse von 50 - 100 slm durch die Plasmaquelle einzustellen.

Ziel der Arbeiten am IWS war es, die Thermofluid-Dynamik innerhalb der Plasmaquelle zu verstehen und anhand dieser Erkenntnisse eine Plasmagas-Einspeisung mit folgenden Eigenschaften zu entwerfen:

- homogene Gasaktivierung über das gesamte Volumen der Plasmaquelle,
- stabile Arbeitsweise bei hohen Gasflüssen sowie
- effiziente Nutzung der Mikrowellenenergie.

Eine weitere Zielstellung betraf das Erarbeiten von AP-PECVD-Prozessmodellen, mit denen die Konzentration der schichtbildenden Intermediate und daraus die Depositionsrate berechnet werden kann. Berücksichtigung fand weiterhin die bei Atmosphärendruck als Konkurrenzprozess stark ausgeprägte Homogennukleation des Precursors, die als potentielle Quelle von Pulverablagerungen bei hochwertigen Beschichtungen meist unerwünscht ist.

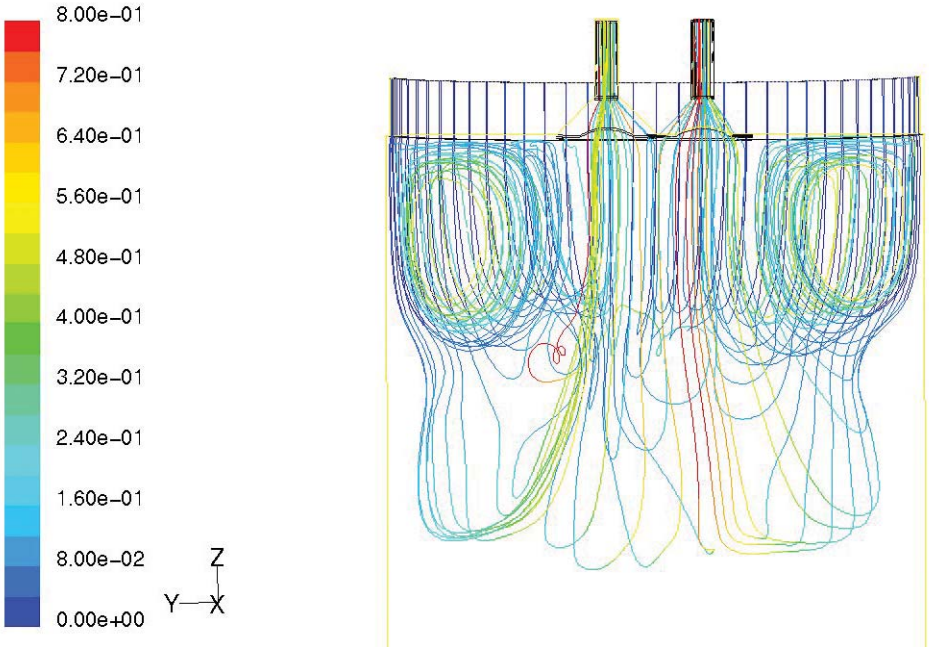


Abb. 1: Plasmagaseinspeisung von der oberen Kammerseite, Gasfluss: 15 slm N_2 + 35 slm Ar, Mikrowellenleistung 3,6 kW

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Gerrit Mäder
Tel.: 0351 / 2583 262
gerrit.maeder@iws.fraunhofer.de

Lösungsweg

Den strömungsdynamisch relevanten Teil der Mikrowellen-Plasmaquelle bildet ein Zylinder mit ca. 150 mm Durchmesser und 150 mm Höhe. Für diesen Zylinder wurde ein 3-D-Modell mit unterschiedlichen Plasmagaseinspeisungen (durch die Bodenplatte bzw. ringförmig von oben bzw. unten, Abb. 1) und Geometrien für den Auslass der aktivierten Spezies über eine im Deckel angeordnete Düsenplatte (shower head) erstellt. Die Mikrowelleneinkopplung in die Plasmaquelle wurde durch ein diffuses, durchströmbares Energiefeld mit den gleichen geometrischen Abmessungen wie das Mikrowellenfeld nachempfunden. Mit Hilfe eines kommerziellen Programmpakets und ergänzt durch am IWS für die Schichtabscheidung entwickelte Zusatzmodelle wurden die Temperatur- und Konzentrationsfelder der Plasmaspezies innerhalb der Plasmaquelle sowie in der (Remote-) Beschichtungszone simuliert. Auf diese Weise konnten Designvorschläge direkt am Computer bewertet und optimiert werden.

Ergebnisse

Unabhängig von der Lage der Plasmagaseinspeisung kommt es zu gravitationsbedingten Gaszirkulationen im oberen Bereich des Plasmavolumens mit typischen Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 - 1 m s^{-1}. In mehreren Entwicklungsschritten wurden verschiedene Plasmagaseinspeisungen (durch die Bodenplatte, ringförmig von oben bzw. unten und auch Kombinationen davon) bzgl. ihrer Auswirkungen auf das Strömungsverhalten untersucht. Überraschenderweise ergeben sich die günstigsten fluiddynamischen Eigenschaften für eine Plasmagaseinspeisung, bei der das Plasmagas in Form einer Ringeinspeisung am äußeren Kammerrand entgegen der Auslassrichtung eingeleitet wird. Unter Verwendung dieser Gaszufuhr werden die durch die Schwerkraft auftretenden Gaszirkulationen im Kammerinneren zwar verstärkt, gleichzeitig aber die zusätzliche Ausbildung weiterer undefinierter Gaszirkulationen wirkungsvoll unterdrückt. Daraus resultiert eine enge Verweilzeitfunktion der aktivierten Spezies bei gleichzeitiger Steigerung des Plasmagasflusses auf Werte von 150 slm, ohne die homogene und stabile Funktion der Mikrowellen-Plasmaquelle zu beeinträchtigen (Abb. 3).

Durch diese signifikante Erhöhung des Plasmagasflusses ist es gelungen, eine ausreichende Konzentration von aktivierten Plasmagasspezies für den Remote-Plasma-CVD-Prozess zur Verfügung zu stellen und (statische) Depositionsraten von bis zu 100 nm s^{-1} zu erzielen. Durch diese Designänderung wird die für Oberflächenprozesse an sich ungünstige Volumen-Plasmaquelle zu einer sehr günstigen quasi-Flächenquelle. Ein weiterer Vorteil der gewählten Plasmagaseinspeisung ist eine zusätzliche Wandkühlung des als Umrandung der Plasmakammer eingesetzten Quarzglaszylinders, wodurch die eingekoppelte Mikrowellenleistung wesentlich effizienter und verlustärmer in das Plasma eingekoppelt wird.

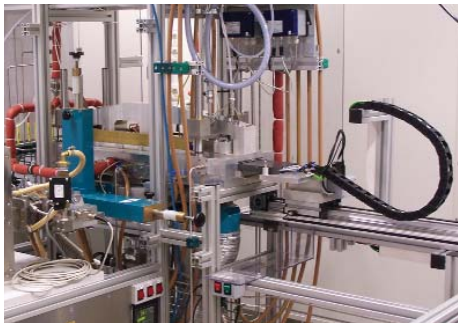


Abb. 2: Mikrowellen-Anlage

Abb. 3: Homogene Plasmagasextraktion über ein Düsenfeld bei Atmosphärendruck

IRspecXL - ein neues Werkzeug zur Oberflächenanalyse und Qualitätssicherung großer Bauteile mittels FTIR-Reflexionsspektroskopie

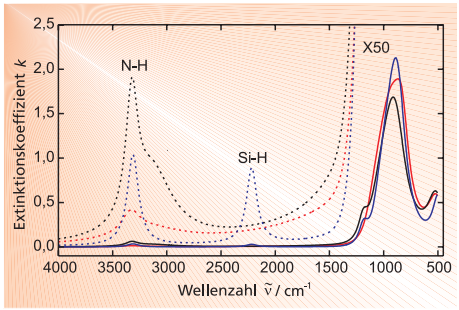


Abb. 1: Berechnete Extinktionskoeffizienten für verschieden hergestellte Si_3N_4-Schichten, ein direkter Vergleich des Wasserstoffgehaltes ist möglich, der Wasserstoff ist je nach Herstellung am Silizium oder Stickstoff gebunden

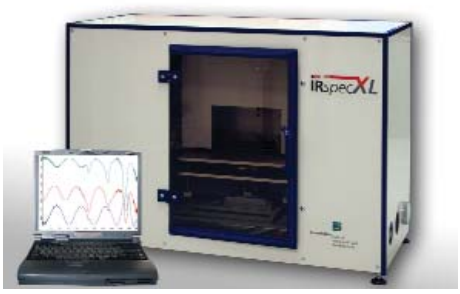


Abb. 2: IRspecXL - FTIR-spektroskopische Charakterisierung von Oberflächen

Ansprechpartner

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

Aufgabenstellung

Qualitätssichernde Maßnahmen wie die großflächige Kontrolle von Beschichtungen oder von Reinigungsprozessen hinsichtlich verbleibender chemischer Rückstände erfordern den Einsatz von empfindlichen, zerstörungsfrei arbeitenden Analysenmethoden über das gesamte - z.T. sehr ausgedehnte - Bauteil hinweg.

Lösungsweg

Die bewährten Vorzüge der Fourier-Transform-Infrarot-(FTIR-)Spektroskopie - berührungslose, zerstörungsfreie und schnelle Messung - sind mit dem am Fraunhofer IWS entwickelten IRspecXL (Abb. 2) nunmehr auch für große Bauteile verfügbar. Die verwendete FTIR-Reflexionsspektroskopie mit polarisierter Strahlung bei streifendem Einfall ist eine exzellente Methode zur Untersuchung der Struktur und der Zusammensetzung von Oberflächen und Bauteilbeschichtungen. So können z. B. Dicke und wellenlängenabhängige optische Eigenschaften von Schichten und kompakten Festkörpern bestimmt oder Verunreinigungen hinsichtlich Art und Menge charakterisiert werden.

Ergebnisse

Beispielhaft werden zwei Einsatzmöglichkeiten des IRspecXL gezeigt. Im ersten Beispiel wurde das Laserreinigen eines ölbeladenen Bleches (40 cm x 20 cm) mit dem Nd:YAG-Laser (1064 nm) bei unterschiedlicher Energie untersucht. Mit steigender Laserenergie wurden erwartungsgemäß bessere Reinigungseffekte erzielt. Dennoch verblieben selbst bei den höchsten eingesetzten Laserenergien noch Öl-Rückstände von ca. 18 nm Dicke. Trotz ihrer relativ geringen "Dicke" können diese Öl-Rückstände nachfolgende Oberflächenprozesse wie Beschichten oder Kleben erheblich beeinflussen.

Im zweiten Beispiel sollte ermittelt werden, inwieweit sich mit verschiedenen Beschichtungsverfahren abgeschiedene Silizumnitrid-Schichten auf Si-Wafern chemisch unterscheiden (Abb. 1). Dazu wurden die gemessenen Reflexionsspektren einer Spektrensimulation unterzogen und daraus die optischen Funktionen und Schichtdicken der Si_3N_4-Schichten ermittelt. Aus dem spektralen Verlauf des Extinktionskoeffizienten konnten die N-H- und Si-H-Anteile in der Schicht ermittelt werden, die empfindlich von den Herstellungsbedingungen abhängig sind. Aus den Reflexionsspektren ist diese Information dagegen nicht direkt ableitbar.

Mit den vorliegenden Beispielen konnte eindrucksvoll das Potenzial der Methode als Werkzeug zur Prozessentwicklung und Qualitätskontrolle gezeigt werden. Mit dem IRspecXL können nm- bis µm-dicke Schichten (z. B. Öle, Fette, Oxide, keramische Schichten) auf verschiedensten Werkstoffen auch auf großen Bauteilen (Bleche, Gläser, diverse Formteile etc.; 400 mm x 400 mm, Höhe bis 50 mm) untersucht werden. Das IRspecXL ist hervorragend als Analysengerät für die Wareneingangskontrolle, für die online Kontrolle der Oberflächenvorbehandlung und Schichtabscheidung in der laufenden Produktion (z. B. Bandbeschichtung) geeignet.

Prozessüberwachung an Entbinderöfen zur Herstellung von Keramik-Formteilen

Aufgabenstellung

Die Herstellung von Formteilen aus Hochleistungskeramiken ist ein Prozess, zu dessen Beherrschung auch heute noch sehr viel Erfahrung notwendig ist. Werkstücke durchlaufen die Schritte Formgebung, Entbindern und Sintern. Einen für die mechanischen Eigenschaften der Sinterkeramik entscheidenden Schritt in dieser Prozesskette stellt das Entbindern dar. Ein im Urformprozess für den temporären Zusammenhalt der Keramikpartikel notwendiges Bindemittel muss dem Formteil vor dem Sintern wieder entzogen werden. Die Prozeßführung beim Entbindern entscheidet über die Homogenität und Restporosität der Hochleistungskeramik. Die zum Entbindern am häufigsten eingesetzte thermische Pyrolyse ist jedoch kritisch bezüglich Dauer und Geschwindigkeit der Wärmebehandlung. Je nach Zusammensetzung des Binders - insbesondere der Schmelzpunkte seiner Bestandteile - und dessen Volumenanteil im Rohmaterial kann die Entstehung gasförmiger Abbauprodukte zu Rissen und Fehlstellen führen.

Lösungsweg

Bei der thermischen Zersetzung der Bindemittel entstehen gasförmige bzw. leicht flüchtige organische Substanzen, deren Moleküle in der Regel Infrarotstrahlung spezifischer Wellenlängen selektiv absorbieren. Durch den Einsatz der Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR-Spektroskopie) kann daher die Zusammensetzung der Abgase des Entbinderofens präzise bestimmt werden.

Dazu wurde an einem industriellen Entbinderofen eine beheizbare Messzelle installiert. Diese ermöglicht - durch spezielle Viewports - die störungsfreie und nahezu rückwirkungsfreie simultane Messung der Gaskomponenten mit einem portablen industrietauglichen Prozess-Spektrometer. Damit können zeit- und temperaturabhängig die Art und Konzentration der ausgasenden Komponenten verfolgt werden. Die zeitaufgelösten Messungen ermöglichen es schließlich anzugeben, bei welchen Ofentemperaturen welche Binderbestandteile entweichen (Abb. 1).

Ergebnisse

Die an einem industriellen Entbinderofen durchgeführten Untersuchungen an einer Zinkoxid-Keramik (Abb. 2) zeigen, dass sich die FTIR-Spektroskopie als Werkzeug zur Prozeß-Optimierung der Keramikentbinderung hinsichtlich Produktqualität und minimalem Zeitbedarf verwenden lässt. Es konnten eine Vielzahl thermischer Abbauprodukte des Bindermaterials nachgewiesen werden (u. a. Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Ethylen, Methan, Methanol, Formaldehyd, Ameisensäure) und mit der jeweiligen Temperatur korreliert werden. Der zeitliche Verlauf der Gaskonzentrationen ist charakteristisch für die Phasen des Entbinderprozesses und somit ein für die Prozeß- und Qualitätskontrolle geeigneter "Fingerabdruck".

Auf diesen Ergebnissen aufbauend ist geplant, die in Echtzeit vorliegenden Messwerte als Eingangs-Signal eines Advanced-Process-Control-Frameworks (APC-Frameworks) zur qualitätsstabilisierenden Regelung des Entbinderprozesses zu nutzen.

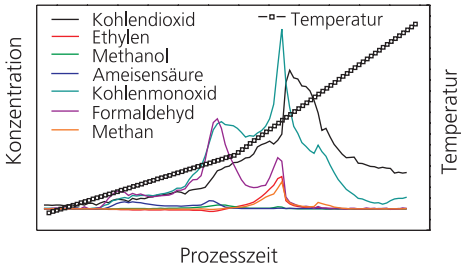


Abb. 1: Gegenüberstellung der Zeitverläufe der gemessenen Gaskonzentrationen über der Prozessdauer in Korrelation zur Temperatur

Abb. 2: FTIR-spektroskopische Untersuchungen an einem industriellen Sinterofen zur Herstellung von Keramik-Formteilen

Ansprechpartner

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

Redaktion: In Ihrer Abteilung konnten Sie 2004 auf 15 Jahre Entwicklung von Kohlenstoffschichten auf der Basis von Pulsbogenverfahren zurückblicken. Ist das nicht eine recht lange Zeit auf dem Wege zur industriellen Umsetzung?

Prof. Schultrich: In der Tat. Dieser Weg reicht sogar noch länger in die Vergangenheit zurück. Wir starteten sogar einige Jahre zuvor mit der Kohlenstoffabscheidung durch Puls-Laser-Deposition (PLD). Es zeigte sich aber, dass die PLD wegen der begrenzten mittleren Leistung der Pulslaser nicht auf die erforderlichen Abscheideraten skalierbar ist. Gleichzeitig erkannten wir aber die enge Verwandtschaft der Laser- und der Bogenplasmen. Es lag deshalb nahe, die mit der Lasertechnik gewonnenen Erfahrungen mit den sehr vielversprechenden Kohlenstoffschichten auf die wesentlich effektivere Vakuumbogentechnologie zu übertragen.

Redaktion: Worauf begründete sich zu diesem frühen Zeitpunkt Ihre Zuversicht auf die Realisierung eines herausragenden Schichtsystems?

Prof. Schultrich: In erster Linie auf die bereits damals von uns, aber auch von anderen Gruppen nachgewiesenen extremen Härtewerte, die in ihren Spitzenwerten nur vom Diamant übertroffen werden. In der Zwischenzeit haben wir gesehen, dass diese tetrahedral gebundenen amorphen Kohlenstoffschichten (ta-C) eine ganze Reihe weiterer attraktiver Eigenschaften aufweisen.

Redaktion: Um welche Eigenschaften handelt es sich dabei?

Prof. Schultrich: Selbst wenn man sich schon so lange mit den Besonderheiten der Kohlenstoffsysteme auseinandersetzt ist die Vielgestaltigkeit exzellenter Eigenschaftskombinationen immer wieder überraschend. Für tribologische Anwendungen ist die geringe Adhäsionsneigung zu Metallen von Bedeutung, die ihren Einsatz bei der Trockenbearbeitung, bei kritischen Umformprozessen oder als schmiermittelfreie Gleitkomponenten in der Textil- oder Lebensmittelindustrie favorisieren. Japanische Untersuchungen zeigten in jüngster Zeit, dass ta-C-Schichten selbst im geschmierten Reibkontakt zu weiteren wesentlichen Reduzierungen der Reibkräfte führen und insbesondere den Einsatz umweltfreundlicher, da additivarmer Schmiermittel ermöglichen. Vom Paul-Scherrer-Institut in der Schweiz wurde festgestellt, dass die IWS-Schichten hervorragende Neutronenreflektoren darstellen und geeignet sind, das bisher in Speichergefäßen für ultrakalte Neutronen verwendete Beryllium zu ersetzen. Die Liste ließe sich fortsetzen. Es sei nur darauf hingewiesen, dass sich weitere Variationsräume durch die (Nano-) Strukturierung und die Dotierung der Kohlenstoffschichten ergeben, wie sie in Beiträgen des Jahresberichtes vorgestellt werden.

Redaktion: Wenn diese ta-C-Schichten so hervorragende Eigenschaften haben, warum sind sie dann nicht längst in breitem Umfang auf dem Markt?

Prof. Schultrich: Zum einen wurde von den potenziellen Anwendern zunächst einmal das tribologische Potenzial der über Plasma-CVD-Verfahren hergestellten wasserstoffhaltigen a-C:H und a-C:H:W-Schichten, die seit den neunziger Jahren zunehmende Verwendung fanden, ausgeschöpft und zum anderen gibt es für die ta-C-Schichten ein grundlegendes Problem: Die für die ta-C-Abscheidung unabdingbare Kombination von hoher Teilchenenergie und niedriger Abscheidetemperatur begünstigt die Schichtablösung, so dass die Schichtdicken gewöhnlich auf Dicken unterhalb von 1 µm beschränkt sind. Durch ein optimiertes Schichtdesign hat das IWS diese Hürde überwunden. Die unter dem Markennamen Diamor® angebotenen Kohlenstoff-Schichten werden in Schichtdicken bis über 10 µm hergestellt.

Man kann dem Leben nicht mehr Tage geben, aber dem Tage mehr Leben.
amerikanische Managerregel

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

Beispiele aus den Arbeiten 2004

1. PVD-Beschichtung von temperaturbeständigen Filtermedien zur effektiveren Reinigung von Prozessgasen 78

2. Nanostrukturierte Kohlenstoff-Schichten als ultradichte Speichermedien 79

3. Tribologisches Verhalten superharter amorpher Kohlenstoffschichten 80

4. Amorphe Kohlenstoffschichten für superhydrophobe Oberflächen 82

6. Laserakustische Prüfung unterstützt Optimierung der Beschichtungstechnologie 84

7. Beschichtung dreidimensionaler Bauteile mit dem Programmsystem SimCoat - Simulation der industriellen Vakuumbogenbeschichtung 86

Prof. Bernd Schultrich
Gruppenleiter Kohlenstoffschichten
(Tel. 2583 403,
bernd.schultrich@iws.fraunhofer.de)

Beschichtung mit superhartem amorphem Kohlenstoff

Amorphe Kohlenstoffschichten mit tetraedrischen Diamantbindungen (ta-C) vereinen sehr hohe Härte, niedrige Reibung und chemische Inertheit. Sie sind deshalb in hervorragendem Maße als Schutzschichten einsetzbar. Die vom IWS entwickelten ta-C-Schichtsysteme (Diamor®) können mit sehr guter Haftung im Schichtdickenbereich von wenigen Nanometern bis zu einigen zehn Mikrometern abgeschieden werden. Die Abscheidung erfolgt bei niedrigen Temperaturen im Vakuum mit speziell entwickelten Puls-Bogen-Verfahren. Für die industrielle Einführung der Diamor®-Schichten liefert das IWS zusammen mit Partner-Unternehmen neben der Technologie auch die erforderlichen Beschichtungsquellen und Beschichtungsanlagen. Das Angebot wird ergänzt durch die laserakustische Prüftechnik Lawave® zur Qualitätssicherung und Schichtoptimierung.

Anlage zur Abscheidung von superharten diamantähnlichen Kohlenstoffschichten (Diamor®) nach dem Laser-Arc-Verfahren

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

Beschichtung mittels aktivierter Hochrateverfahren

Verfahren der Physikalischen Dampfphasenabscheidung (PVD = Physical Vapor Deposition) erlauben die Abscheidung hochwertiger tribologischer und funktioneller Schichten im Dickenbereich von wenigen Nanometern bis zu einigen zehn Mikrometern. Dazu stehen im IWS Verfahren von der Hochrate-Bedampfung bis hin zu hochaktivierten Plasmaverfahren sowie deren Kombination zur Verfügung. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die umfassende Nutzung von Bogenentladungen als der effektivsten Quelle energiereicher Dampfstrahlen. Auf der Grundlage dieser Technologien bieten wir an:

- Musterbeschichtungen,
- Schichtcharakterisierung,
- Entwicklung von Schichtsystemen,
- kundenspezifische Anpassung von Beschichtungsverfahren,
- Wirtschaftlichkeits- und Machbarkeitsstudien,
- Entwicklung und Fertigung angepasster Anlagenkomponenten.

Metallverdampfung mittels Elektronenstrahltechnologie

PVD-Beschichtung von temperaturbeständigen Filtermedien zur effektiveren Reinigung von Prozessgasen

Aufgabenstellung

Die Abscheidung von Stäuben aus Prozessgasen wird gegenwärtig vorrangig durch abreinigbare filternde Abscheider realisiert. Für Einsatzbereiche bis 150 °C sind zahlreiche Materialien verfügbar. Für den Temperaturbereich > 150 °C werden für gefaltete Filterelemente überwiegend feinporige Metallgewebe eingesetzt, die jedoch relativ teuer sind. Die Einsatzbereiche bis 300 °C können aber auch durch Vliesstoffe aus hochtemperaturbeständigen Stapelfasern abgedeckt werden. Durch geeignete Nachbehandlungsprozesse lassen sich die Standzeit, der Filterkuchenaufbau, das Abreinigungsverhalten und das Filtrationsergebnis entscheidend verbessern. Eine Möglichkeit dazu ist die Beschichtung der Vliesstoffe mit Metallen oder anderen leitfähigen Materialien.

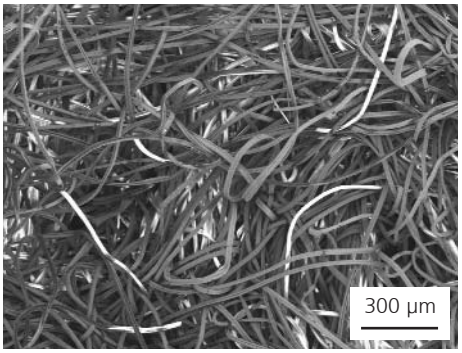


Abb. 1: REM-Aufnahme eines metallisierten Vliesstoffes

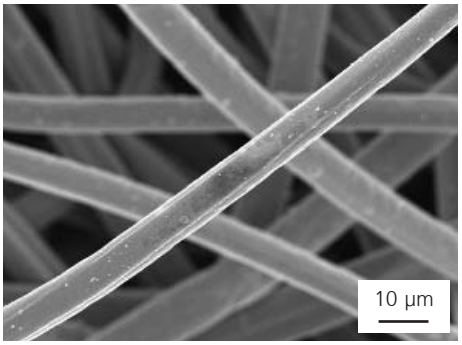


Abb. 2: REM-Aufnahme von Einzelfasern eines metallisierten Vliesstoffes

Lösungsweg

Im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Verbundprojektes wurden derartige beschichtete Filtermedien entwickelt. Dabei wurden vom Sächsischen Textilforschungsinstitut Chemnitz (STFI) unterschiedliche Vliesstoffe hergestellt und anschließend mit dem Vakuumbogenverfahren metallisiert. Dieses Verfahren wird industriell zur Abscheidung von Verschleißschutzschichten auf Werkzeugen, zur Metallisierung oder auch für dekorative Beschichtungen genutzt. Die spezielle Herausforderung bestand darin, dass einerseits die Filtermedien in ihrer Temperaturbelastbarkeit eingeschränkt sind, andererseits eine ausreichende Haftfestigkeit der Beschichtung auf dem Vliesstoff gewährleitstet werden muss. Dies konnte durch moderate Abscheideraten und einen speziell angepassten Plasma-Vorbehandlungsprozess erreicht werden.

Ergebnisse

Abb. 1 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit Metall beschichteten Vliesstoffes. Deutlich ist zu erkennen, dass im oberflächennahen Bereich eine intensivere Beschichtung als in den unteren Schichten des Stoffes stattfand. Abb. 2 zeigt beschichtete Einzelfasern im Vliesstoffverbund.

Mit dem verwendeten Verfahren konnte auf verschiedenen Vliesstoffen eine ausgezeichnete Schichthaftung hergestellt werden. Auch eine Weiterverarbeitung der Textilien nach der Beschichtung ist möglich, ohne die Schichten zu beschädigen.

Durch die Beschichtung wird das Filtermedium an der Oberfläche elektrisch leitfähig, wodurch elektrostatische Aufladungen vermieden werden können. Ein weiterer angestrebter Effekt ist die Verbesserung des Abreinigungsverhaltens des Filters. Die Untersuchungen dazu sind gegenwärtig in Arbeit. Es wird erwartet, dass sich mit derartigen Filtermedien die Kosten für Filterpatronen für Industriefilteranlagen drastisch reduzieren lassen.

Ansprechpartner

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

Nanostrukturierte Kohlenstoff-Schichten als ultradichte Speichermedien

Aufgabenstellung

Ein Grundproblem der Informationsverarbeitung besteht in der zuverlässigen Langzeitspeicherung der anfallenden gewaltigen Datenmengen. Dies erfordert irreversible Strukturänderungen in Bereichen unterhalb von 100 nm zur Sicherung der Langzeitstabilität und zur Realisierung von Speicherdichten im Bereich > 1 Tbit/in^2. (Zum Vergleich: Die magnetischen Festplattensysteme streben für die nächsten Jahre Speicherdichten von 0,1 Tbit/in^2 an.)

Lösungsweg

Irreversible Strukturänderungen können aus metastabilen Zuständen erzeugt werden, die durch lokale Aktivierung in eine energetisch günstigere Struktur überführt werden. Amorphe Kohlenstoffschichten mit dominierenden sp^3-Bindungen (tetrahedral gebundener amorpher Kohlenstoff, ta-C) stellen ein derartiges metastabiles System dar. Zur Abscheidung hochwertiger ta-C-Schichten wurden im Fraunhofer IWS verschiedene Verfahren auf der Basis gepulster Hochstrombogenentladungen entwickelt. Die lokalen Bindungsverhältnisse entsprechen der Diamantstruktur, der kristallinen Hochdruckmodifikation des Kohlenstoffs. Durch intensive Anregung können sie in die stabileren graphitischen sp^2-Bindungen umgewandelt werden. Auf diese Weise können lokale graphitische Strukturen erzeugt werden, die sich von ihrer diamantähnlichen Umgebung durch ihre wesentlich höhere elektrische Leitfähigkeit, ihre geringere Dichte und ihre höhere chemische Reaktivität unterscheiden. In Mikrobereichen können derartige Strukturierungen durch Laser- oder Elektronenstrahlen vorgenommen werden. In Zusammenarbeit mit dem Hahn-Meitner-Institut Berlin und der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt konnte gezeigt werden, dass auch Nanostrukturierungen von ta-C-Schichten möglich sind. Beim Beschuss dieser Schichten mit schweren Hochenergie-Ionen mit Energien um 1 GeV entstehen graphitische Kanäle mit Abmessungen unterhalb von 10 nm. Sie besitzen eine um mehrere Größenordnungen gesteigerte Leitfähigkeit und markieren sich wegen des größeren von ihnen eingenommenen Volumens als kleine Nanometer-Hügel. In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW) wurden nun ähnliche lokale Strukturen durch Elektronen-Injektion von STM-Spitzen in genau positionierbarer Weise hergestellt (STM = Scanning Tunnel Microscope, Rastertunnelmikroskop).

Ergebnisse

Abb. 1 zeigt eine derartige mittels STM erzeugte graphitische Struktur, die durch den Topographiekontrast im STM sichtbar gemacht wurde. Sie ist durch Überlagerung vieler Nanobereiche entstanden, die jeweils Abmessungen von etwa 10 nm besitzen. Das durch die hohe Speicherdichte mögliche Potenzial zur hochkomprimierten Analogspeicherung wird mit Abb. 2 demonstriert. Zehn Milliarden derartiger Bilder fänden auf einer Fläche von der Größe einer Postkarte Platz. Aktuelle Arbeiten sind auf eine Verstärkung der Kontraste, auf eine Erhöhung der Schreib- und Lesegeschwindigkeit sowie auf die Nutzung für weitere Einsatzbereiche gerichtet. Weitere Möglichkeiten ergeben sich durch die Nutzung elektroneninduzierter Ätzprozesse sowie durch die gezielte Einstellung der elektrischen Leitfähigkeit des Nanokanals.

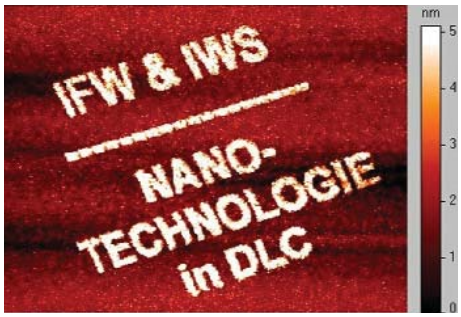


Abb. 1: Mittels STM in eine diamantartige Kohlenstoffschicht (ta-C) eingeschriebene graphitische Struktur, mittels STM sichtbar gemacht über die lokalen Erhöhungen der weniger dichten graphitischen Bereiche

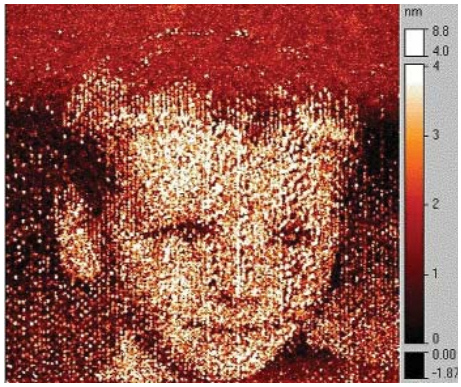


Abb. 2: Mittels der STM-Technik (s. Abb. 1) um einen Faktor 10^5 auf Nanoabmessungen verkleinertes Bild, eingeschrieben in eine ta-C-Schicht

Ansprechpartner

Fraunhofer IWS:
Prof. Bernd Schultrich
Tel.: 0351 / 2583 403
bernd.schultrich@iws.fraunhofer.de

IFW Dresden:
Dr. Thomas Mühl
Tel.: 0351 / 4659 496
thomas.muehl@ifw-dresden.de

Tribologisches Verhalten superharter amorpher Kohlenstoffschichten

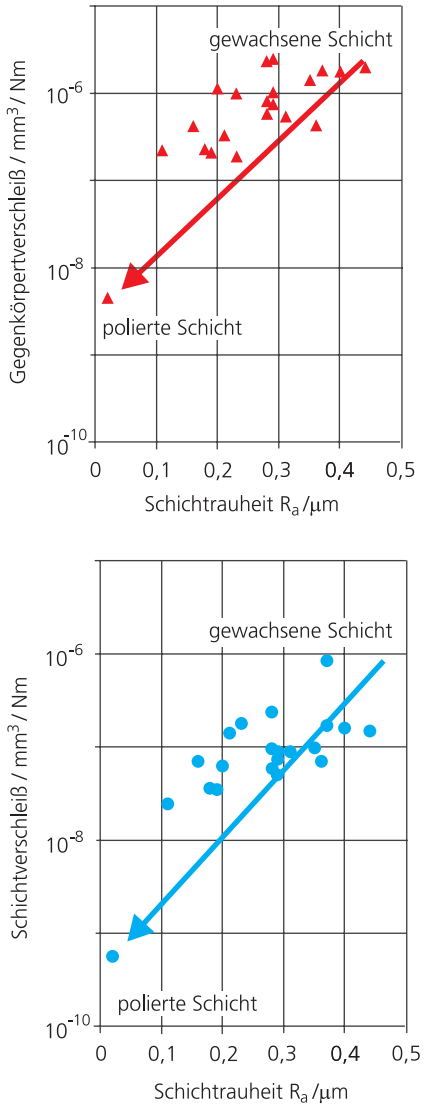


Abb. 1: Einfluß der Rauheit einer Diamor®-Schicht auf den trockenen Schwingverschleiß gegen Stahl (100Cr6)

Ansprechpartner

Fraunhofer IWS:
Prof. Bernd Schultrich
Tel.: 0351 / 2583 403
bernd.schultrich@iws.fraunhofer.de

BAM Berlin
Dr. Dieter Klaffke
Tel.: 030 / 8104 1812
klaffke@bam.de

Aufgabenstellung

Amorphe wasserstofffreie Kohlenstoffschichten mit überwiegend tetraedrischer, d.h. diamantartiger Konfiguration (ta-C-Schichten) haben durch die Kombination von extremer Härte und geringer Adhäsionsneigung ein höheres Anwendungspotenzial als tribologische Schutzschichten. Die im Fraunhofer IWS auf der Basis von Pulsbogentechnologien entwickelten superharten amorphen Kohlenstoffschichten (Diamor®) mit Härten oberhalb von 40 GPa (entsprechend Vickershärten > HV 4000) werden bei niedrigen Temperaturen (unter 100 °C) abgeschieden. Sie sind damit auch für die Beschichtung temperaturempfindlicher Materialien geeignet und sind bis zu Temperaturen um 400 °C einsetzbar. Durch einen geeigneten Grenzflächen- und Schichtaufbau besitzen die Diamor®-Schichten auch bei größeren Schichtstärken von einigen Mikrometern eine sehr gute Haftfestigkeit.

Der gegenüber den konventionellen nitridischen oder karbidischen Hartstoffen erreichbare Fortschritt wird beim Vergleich des Reibungsverhaltens beider Schichtsysteme deutlich. Die Kohlenstoffschichten besitzen einen wesentlich niedrigeren Reibungskoeffizienten von 0,10 - 0,15 gegen Stahl gegenüber Hartstoffschichten, die einen Reibungskoeffizienten von 0,5 - 0,7 aufweisen. Wenn die Hartstoffschichten bereits wesentlichen (durch den Anstieg des Reibungskoeffizienten ausgewiesenen) Verschleiß zeigen, nähert sich das Kohlenstoffsystem nach dem Einlaufverschleiß erst seinem niedrigen stationären Reibungskoeffizienten. Das Einlaufverhalten ist allerdings mit einem merklichen Verschleiß des Gegenkörpers verbunden. Daraus ergeben sich die folgenden Fragestellungen:

- Wie lassen sich der Einlaufprozess verkürzen und der Gegenkörperverschleiß reduzieren?
- Welchen Einfluss hat die Schichtrauheit?
- Wie beeinflussen das Umgebungsmedium und das Material des Gegenkörpers das Reibungsverhalten?

Lösungsweg

Das Reibungs- und Verschleißverhalten ist grundsätzlich eine Systemeigenschaft, die in komplexer Weise von mehreren ineinandergreifenden Prozessen bestimmt wird. Von besonderer Bedeutung sind dabei oszillierende Belastungen, die in realen Baugruppen sowohl durch den Bewegungsablauf (z.B. in Lagern) als auch durch das Rauheitsprofil bedingt sind.

Als repräsentative Verschleißbeanspruchung wurde deshalb der von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM) entwickelte Schwingverschleiß gewählt. Dabei wird eine Kugel mit einem Durchmesser von 10 mm bei einer Belastung von 5 N in oszillierender Gleitbewegung (Amplitude 1 mm, Frequenz 5 Hz) über die beschichtete ebene Probe geführt. Die Untersuchungen unter Standardbedingungen [100Cr6 - Stahlkugel, trocken, Raumluft (ca. 22 °C, 50 Prozent Luftfeuchtigkeit)] wurden im Fraunhofer IWS vorgenommen, der Einfluss abweichender Bedingungen (Luftfeuchtigkeit, Gegenkörper, Schmiermittel, Temperatur) wird in der BAM untersucht. Zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten wird die Tangentialkraft kontinuierlich in Abhängigkeit vom Verschleißweg aufgezeichnet. Der Schicht- und der Gegenkörperverschleiß werden durch profilometrische Vermessung der Verschleißfurche bzw. der abgeschliffenen Kugelkalotte bestimmt.

Ergebnisse

Als entscheidender Einflussfaktor wurde die Schichtrauheit identifiziert. Die mit dem Pulsvakuumbogen hergestellten Schichten weisen gewöhnlich eine mit der Schichtdicke d anwachsende Rauheit auf (näherungsweise gilt $R_a \approx 0{,}1$ d). Abb. 1 zeigt, dass der Schichtverschleiß und der Gegenkörperverschleiß mit geringerer Rauheit (infolge geringerer Schichtdicke) absinken. Wird durch nachträgliches Polieren die durch das Schichtwachstum bedingte Rauheit von $R_a \geq 0{,}2$ µm auf $R_a \approx 0{,}02$ µm vermindert, so sinken Schicht- und Gegenkörperverschleiß um einen Faktor 100: von $6 \cdot 10^{-8}$ mm³ / Nm auf $6 \cdot 10^{-10}$ mm³ / Nm (Schichtverschleiß) bzw. von $9 \cdot 10^{-7}$ mm³ / Nm auf $4 \cdot 10^{-9}$ mm³ / Nm (Gegenkörperverschleiß). Gleichzeitig sinkt der an sich schon niedrige Reibungskoeffizient von 0,15 - 0,18 auf 0,06 - 0,10, ein Einlaufvorgang wird nicht beobachtet.

Bei der Verwendung von keramischen Gegenkörpern (Al_2O_3, Si_3N_4) ist dieser Rauheitseinfluss gar nicht oder wesentlich schwächer als bei den Stahlkugeln ausgeprägt (Abb. 2). Die Reibungs- und Verschleißwerte mit den gewachsenen Schichten ($R_a \geq 0{,}2$ µm) liegen deutlich unter denen für Stahl als Gegenkörper. Für die nachpolierten Schichten ($R_a \approx 0{,}02$ µm) zeigt dagegen der Reibungskoeffizient mit Werten von 0,06 - 0,10 keinen Einfluss des Gegenkörpers (Stahl oder Keramik). Der Schichtverschleiß mit den Keramikkugeln sinkt durch die Schichtpolitur (im Unterschied zum Stahl) nur wenig ab, so dass er jetzt deutlich höher als für die Stahlkugeln ist.

Von entscheidender Bedeutung für das Tribosystem ist das Umgebungsmedium. Bei wasserstofffreien Kohlenstoffschichten müssen freie Bindungen an der Oberfläche durch Wasserstoff oder OH-Gruppen abgesättigt werden. Dazu genügt schon die übliche Luftfeuchtigkeit. Bei fast völliger Trockenheit verschlechtert sich das Reibungsverhalten deutlich (Abb. 3), während eine erhöhte Feuchte sich günstig auf Reibung und Verschleiß auswirken. Im Grenzfall des Ultrahochvakuums (UHV) steigt der Reibungskoeffizient bis auf Werte nahe 1. Für Anwendungen im UHV, wie sie z. B. für die Raumfahrt und bestimmte Mikroelektronik-Anlagen von Interesse sind, eröffnen kohlenstoffbasierte Nanokomposite anstelle der reinen Kohlenstoffschichten einen vielversprechenden Lösungsweg. Mit entsprechenden Entwicklungen wurde im IWS begonnen.

Erste Ergebnisse zeigen, dass die für die Trockenreibung ungünstigen Oberflächen-Bindungen der ta-C-Schichten gezielt für die Wechselwirkung mit Schmiermitteln genutzt werden können. Insbesondere eröffnen diese wasserstofffreien Kohlenstoff-Schichten die Möglichkeit zu einer starken Reduzierung der umweltproblematischen Schmiermitteladditive. Die Erschließung dieses Potenzials wird gegenwärtig im Fraunhofer IWS intensiv bearbeitet.

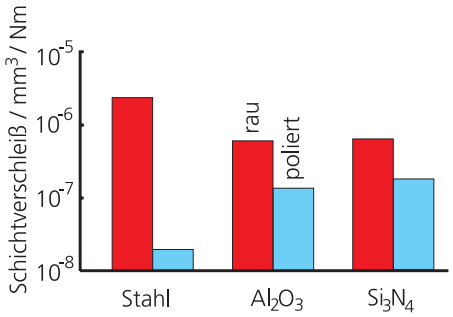


Abb. 2: Einfluss des Gegenkörper-Materials auf den Verschleiß einer unbehandelten bzw. nachpolierten Diamor®-Schicht bei 50 % Luftfeuchtigkeit

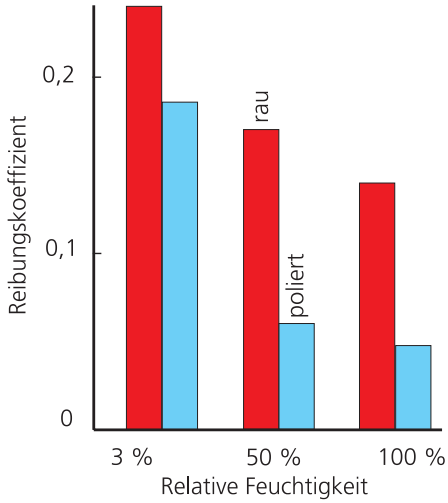


Abb. 3: Einfluss der Feuchtigkeit auf den Reibungskoeffizienten einer unbehandelten bzw. einer nachpolierten Diamor®-Schicht gegen Stahl

Amorphe Kohlenstoffschichten für superhydrophobe Oberflächen

Aufgabenstellung

Das komplexe Anforderungsprofil von Werkstoffen wird in der heutigen Zeit zunehmend über die Wechselwirkungen der Oberfläche mit der Umwelt definiert. So können unter anderem die Korrosionsbeständigkeit oder die Reibungs- und Verschleißfestigkeit aber auch die optischen und elektrischen Eigenschaften über die Oberfläche eingestellt werden.

Bei vielen technischen Anwendungen sind Oberflächen erwünscht, welche die Bildung von Wasserfilmen oder eine Tropfenbelegung vermindern bzw. vollständig verhindern. So ist es bei Wärmetauschern oder in der Sensortechnik erforderlich, dass das kondensierte Wasser schnellstmöglich abtransportiert wird.

Leicht zu reinigende Oberflächen spielen in der Industrie und im täglichen Leben eine wichtige Rolle. Dabei sollen Schmutzpartikel (z.B. Staub oder Ruß) vom abrollenden Wassertropfen aufgenommen und restlos von der Oberfläche entfernt werden.

Lösungsweg

Harte amorphe Kohlenstoffschichten werden wegen ihrer hohen Härte und des geringen Reibungskoeffizienten vorzugsweise als Verschleißschutzschichten eingesetzt. Im Fraunhofer IWS werden superharte, wasserstoffreie amorphe Kohlenstoffschichten (ta-C-Schichten, Diamor®) mit gepulsten Bogenverfahren abgeschieden. Durch Dotierung mit zusätzlichen Elementen lassen sich nicht nur die mechanischen Eigenschaften sondern auch die Oberflächenenergie der Schichten verändern. Teflon-ähnliche Eigenschaften können durch Zusatz von Fluor und anderen Elementen erreicht werden. Der Beschichtungsprozess beruht auf der Erzeugung eines hoch aktivierten Kohlenstoffplasmas aus einer reinen oder dotierten Graphitkathode, welches unter Vakuum- oder Reaktivgasbedingungen gebildet wird.

Um superhydrophobe Eigenschaften einer Oberfläche zu erhalten, ist die Kombination einer geringen Oberflächenenergie mit einer definierten Oberflächentopographie notwendig. Durch verschiedene Strukturierungsmethoden in Verbindung mit dotierten amorphen Kohlenstoffschichten können superhydrophobe Eigenschaften erzeugt werden.

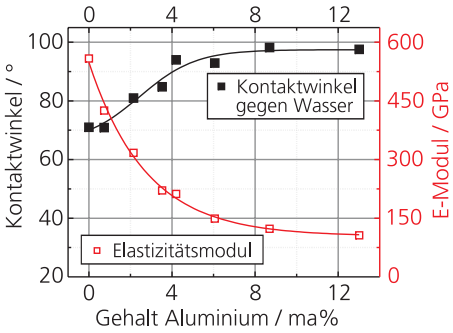


Abb. 1: Abhängigkeit des Wasser-Kontaktwinkels und des E-Moduls modifizierter Diamor®-Schichten in Abhängigkeit vom Aluminiumgehalt der Schichten

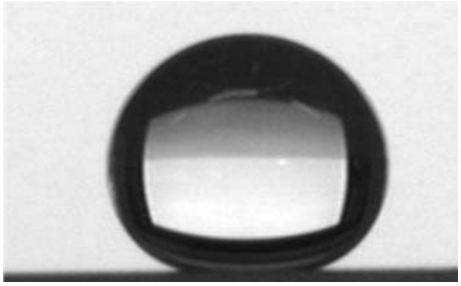


Abb. 2: Wassertropfen auf einer Oberfläche, die mittels Laser strukturiert und anschließend mit einer fluordotierten Diamor®-Schicht beschichtet wurde

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Harald Schulz
Tel.: 0351 / 2583 179
harald.schulz@iws.fraunhofer.de

Ergebnisse

Bei der Kohlenstoffabscheidung unter Reaktivgas-Atmosphäre werden neben dem E-Modul auch die Oberflächenenergie und somit das Benetzungsverhalten beeinflusst. Durch den zunehmenden Einbau von Fluor in die Schicht wird die Bildung der sp^3-Bindungen gestört und der E-Modul sinkt. Die Schichten zeigen ein polymerartiges Verhalten. Es ist aber auch zu erkennen, dass durch zunehmenden Fluoranteil in den Schichten sowohl der polare Anteil wie auch der disperse Anteil der Oberflächenenergie gesenkt und damit der Kontaktwinkel von Wasser deutlich erhöht wird. Hoch fluordotierte Diamor®-Schichten erreichen dabei eine Oberflächenspannung, die deutlich geringer als die von PTFE (Teflon) ist.

Eine weitere Möglichkeit der Beeinflussung des Benetzungsverhaltens ist die Dotierung mit Metallen. Dies kann über eine Targetdotierung oder über eine Koabscheidung von Kohlenstoff und dem Metall geschehen. In Abb. 1 ist ein Beispiel der Dotierung einer Diamor®-Schicht mit Aluminium gegeben.

Mit der Aluminiumdotierung lassen sich Kontaktwinkel von nahezu 100° einstellen. Die Alterung der Schichten spielt bei der Beurteilung der Benetzung allerdings eine bedeutende Rolle, da das Aluminium an der Oberfläche oxidiert. Mit zunehmender Zeit (also fortschreitender Oxidation) steigt der Kontaktwinkel bis zu einer Sättigung, die in Abb. 1 dargestellt ist.

Der E-Modul dieser modifizierten Schichten sinkt mit zunehmendem Aluminiumgehalt. Für die höchsten Kontaktwinkel konnte aber immer noch ein E-Modul oberhalb von 150 GPa gemessen werden. Das entspricht einer Härte von 15 GPa bzw. 1500 HV, also der Härte üblicher Hartmetalle.

Die hier vorgestellten Benetzungsuntersuchungen wurden an hoch polierten Oberflächen durchgeführt. Durch Kombination einer hydrophoben Oberfläche mit einer definierten Oberflächentopographie kann eine superhydrophobe Oberfläche erzeugt werden, d. h. ein aufgesetzter Wassertropfen rollt ohne zusätzliche Krafteinwirkung schon bei geringsten Oberflächenneigungen ab. Abb. 2 zeigt einen Wassertropfen auf einer solchen modifizierten Oberfläche. Die Abb. 3 und 4 zeigen REM-Aufnahmen von Oberflächen, die mittels Laser bzw. mittels Galvanik strukturiert und danach mit fluordotiertem Diamor® beschichtet wurden.

Die Oberflächen bewirken durch ihre Strukturgröße und ihre Regelmäßigkeit, dass der Wassertropfen eine minimale Auflagefläche besitzt. Die sehr niederenergetische fluordotierte Diamor®-Schicht verhindert zusätzlich eine Kapillarwirkung der Struktur.

Ein großes Anwendungspotenzial dieser Verbindung von strukturierter Oberflächentopografie und hydrophober Schicht liegt in der Sensortechnik. Die quantitative Detektion von Gasen setzt einen gleichmäßigen Luftstrom voraus. Dieser wird durch Kondensation von Wasser an der Oberfläche gestört und verfälscht damit das Messergebnis. Deswegen ist es notwendig, anhaftende Wassertropfen zu vermeiden.

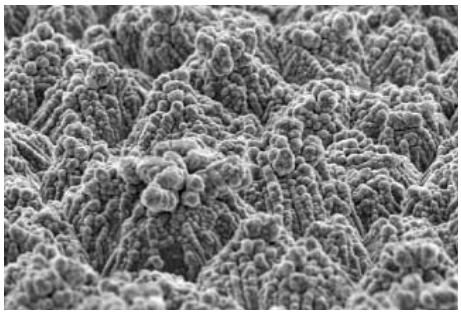


Abb. 3: REM-Aufnahme einer mittels galvanischer Abscheidung strukturierten Oberfläche (Strukturierung: Fa. Gould Electronics)

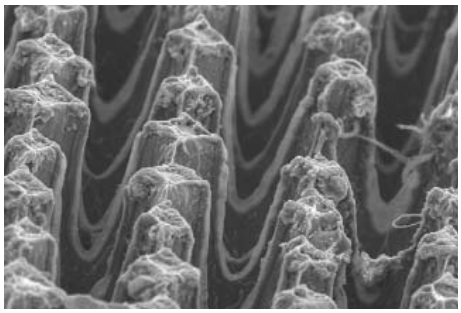


Abb. 4: REM-Aufnahme einer mittels Nd:YAG-Laser strukturierten Oberfläche (Strukturierung: Fraunhofer IWS Dresden)

Laserakustische Prüfung unterstützt Optimierung der Beschichtungstechnologie

Aufgabenstellung

Die Beschichtung mit superhartem amorphem diamantähnlichem Kohlenstoff verspricht deutliche Fortschritte in der Verbesserung des Verschleißschutzes.

Mit einem Elastizitätsmodul und einer Härte von 40 bis 75 % des Diamant übertreffen die Schichten die Leistungsparameter herkömmlicher Hartstoffschichten deutlich. Zu weiteren Vorteilen zählen ein geringer Reibkoeffizient, geringe Sprödigkeit, gute chemische Beständigkeit und biologische Verträglichkeit.

Wichtige Eigenschaften können durch gezielte Einstellung der Abscheidungsbedingungen in einem weiten Bereich variiert werden, wodurch die Schichtqualität an die Erfordernisse der Anwendung angepasst werden kann. Deshalb finden diese Schichten bereits umfangreiche Anwendung als Schutzschichten für Computerfestplatten, Werkzeuge, optische Fenster, Motor- und Getriebeteile oder als Funktionsschichten für mikromechanische Bauelemente (MEMS).

Ihre Eigenschaften werden im wesentlichen durch den Anteil an sp^3-Bindungen des Diamant im Gefüge bestimmt, deren Ausbildung sehr stark von der Beschichtungstechnologie abhängt. Deshalb ist für die unterschiedlichen Anwendungsfälle eine sorgfältige technologische Entwicklung und Prozesskontrolle erforderlich. Dafür werden Schichtmesstechniken benötigt, die rasch und zuverlässig Aussagen über die Schichteigenschaften liefern.

Lösungsweg

Die laserakustische Prüfmethode LAwave® hat sich als vorteilhaftes Verfahren für die Charakterisierung von Schichten in einem weiten Eigenschaftsspektrum bewährt. Mit der Methode kann der Elastizitätsmodul sehr unterschiedlicher Schichten bestimmt werden, die von Polymeren bis zu Diamant reichen. Auf gut schallleitendem Substrat können Schichten von wenigen Nanometern Schichtdicke geprüft werden.

Der Elastizitätsmodul korreliert für amorphe wasserstofffreie Kohlenstoffschichten (a-C-Schichten) mit dem sp^3-Gehalt. Letzterer wurde mit Elektronen-Energieverlust-Spektroskopie (EELS) ermittelt. Damit ist die Messung des Elastizitätsmoduls eine sehr geeignete Prüfmethode für die Qualifizierung der Schichteigenschaften. Der Elastizitätsmodul ist über diese Bindungsverhältnisse mit anderen wichtigen Schichteigenschaften, wie Härte oder optische Transparenz, verknüpft.

Mit dem LAwave®-Messgerät (Abb. 1) kann der Elastizitätsmodul in wenigen Minuten zuverlässig und reproduzierbar gemessen werden. Es bestehen keine besonderen Anforderungen an die Oberflächenqualität oder die Probenform. Die Methode beruht auf der Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von akustischen Oberflächenwellen, die durch kurze Laserimpulse angeregt werden.

Abb. 1: LAwave®-Messgerät

Ansprechpartner

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

Ergebnisse

Am Beispiel von a-C-Schichten, die mit dem Verfahren des lasergestützten gepulsten Hochstrombogens abgeschieden wurden, konnte demonstriert werden, wie mit Hilfe des LAwave®-Messverfahrens Aufschlüsse über wichtige Prozesseinflüsse bei der Beschichtung erlangt werden können.

Abb. 2 zeigt, wie sich der Elastizitätsmodul der Schicht mit zunehmendem Einfallswinkel der Ionen auf die Substratoberfläche verringert. Dabei wurde zusätzlich die Form der Elektrodenanordnung variiert. Die Ergebnisse erlauben Rückschlüsse darauf, in welchem Winkelbereich mit einer gleichmäßigen Schichtqualität zu rechnen ist. Das war eine wichtige Voraussetzung für die optimale Konstruktion der Bauteilbewegungseinrichtung.

Wie nachhaltig Fremdstoffe in der Beschichtungsatmosphäre die Schichteigenschaften beeinträchtigen können, ist in Abb. 3 zu sehen. Restgase, wie Argon, Stickstoff und Fluor, führen zu einer drastischen Erniedrigung des E-Moduls und damit auch der Härte des Schichtwerkstoffes. Der Einbau dieser Elemente in das Kohlenstoffgitter wirkt der Ausbildung der tetraedrischen sp^3-Bindungen des Diamant in beträchtlichem Maße entgegen, so dass die mechanischen Eigenschaften dieser im Idealzustand superharten amorphen Kohlenstoffschichten auf diejenigen von Graphit abfallen können.

Welchen Einfluss Energie und Menge der Kohlenstoffionen im Plasma auf die Schichteigenschaften ausüben, verdeutlichen die Ergebnisse in Abb. 4. Mit der Erhöhung des Pulsstromes kann der Elastizitätsmodul der Schichten bis auf E = 750 GPa angehoben werden. Zum Vergleich: Diamant hat einen Wert von E = 1142 GPa und ist damit das steifste und härteste aller Materialien.

Die Ergebnisse der laserakustischen Messungen belegen, dass mit der Puls-Bogentechnologie Kohlenstoffschichten mit außergewöhnlich guten Eigenschaften abgeschieden werden können. Das mit der Laserakustik gewonnene Datenmaterial bildet dafür die notwendige Optimierungsbasis. Ohne die Möglichkeit einer solchen Prüfung hätte sich die Technologieentwicklung für diese Schichten wesentlich aufwändiger gestaltet.

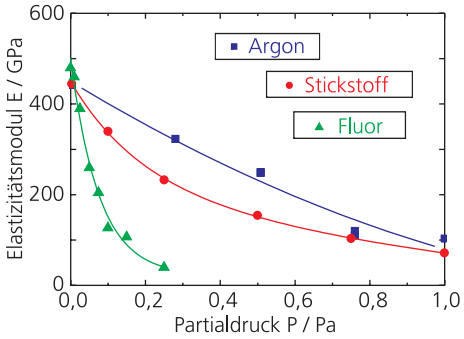


Abb. 2: Nachteiliger Einfluss von Restgas auf die Eigenschaften von amorphen Kohlenstoffschichten

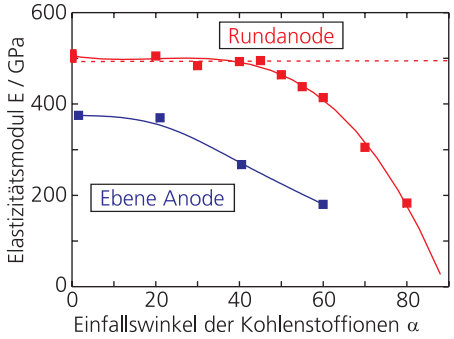


Abb. 3: Die laserakustische Messung offenbart den günstigsten Winkelbereich für den Ioneneinfall

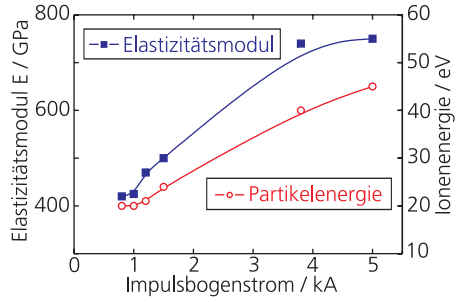


Abb. 4: Einfluss der Ionenenergie auf die mechanischen Eigenschaften der amorphen Kohlenstoffschichten

Beschichtung dreidimensionaler Bauteile mit dem Programmsystem SimCoat - Simulation der industriellen Vakuumbogenbeschichtung

Aufgabenstellung

Die Vakuumbogenbeschichtung hat sich in der industriellen Beschichtungspraxis als dominierendes Verfahren zur Verbesserung von Verschleiß- und Oxidationsschutz, Optimierung von Gleiteigenschaften und nicht zuletzt Beeinflussung von optischen Eigenschaften durchgesetzt.

In den Reaktoren werden entweder sehr viele Bauteile in einem Produktionszyklus bearbeitet oder hochwertige komplexe Bauteile müssen mit einer definierten Oberfläche beschichtet werden. Das kann bei der für dieses Verfahren typischen geradlinigen Ausbreitung der Plasmateilchen nur durch geeignete Bewegungen von Plasmaquellen und Bauteilen erreicht werden. Zwangsläufig kommt es zu Abschattungs- und Projektionseffekten und daraus resultierenden inhomogenen Beschichtungen.

Die Aufgabe besteht in der Minimierung des experimentellen Aufwandes bei der Optimierung der Beschichtungsbedingungen und in der Vermeidung von Fehlchargen. Deshalb muss der Beschichtungsprozess in einer virtuellen Anlage möglichst realistisch simuliert werden.

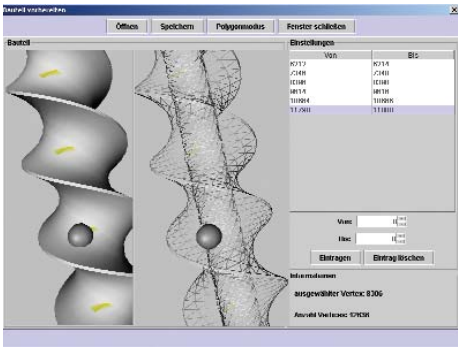


Abb. 1: Vorbereitung eines Extruders zur Simulation - Auswahl der relevanten Bereiche

Ansprechpartner:

Prof. Bernd Schultrich
Tel.: 0351 / 2583 403
bernd.schultrich@iws.fraunhofer.de

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

Lösungsweg

Die Lösung besteht in der Entwicklung eines Simulationswerkzeugs für den Gesamtprozess in einer virtuellen Anlage. Die Vorzüge des Programms SimCoat sind die Möglichkeiten der Visualisierung der Bewegung von Bauteilen und Strahlquellen im dreidimensionalen Arbeitsraum, die exakte phänomenologische Beschreibung der physikalisch-technischen Prozesse und die nutzerorientierte Bedienung mit den applikationsorientierten Schnittstellen.

Die Vorgehensweise besteht aus drei Teilschritten, die aber in einem geschlossenen Programmpaket durchgeführt werden.

1. Simulationsvorbereitung:

   Festlegung der Anlagenparameter (Geometrie und Kinematik der Bauteilaufnehmer, örtliche und zeitliche Aktivität der Plasmaquellen)

   Vorbereitung der Bauteile zur Simulation (Oberflächenvernetzung, Auswahl relevanter Bereiche)

   Abb. 1 zeigt diese Funktionen am Beispiel eines Extruders.

2. Prozesssimulation:

   Visuelle Überprüfung der Funktionalitäten der virtuellen Anlage

   Bei der Simulation bewegen sich die Bauteile mit der vorgesehenen Kinematik in den Plasmaströmen der unterschiedlichen Quellen. Zu jedem

Zeitpunkt wird die Beschichtungsrate an den interessierenden Oberflächensegmenten festgestellt und gespeichert. Abschattungs- und Hinterschneidungseffekte werden in diesem Stadium der Simulation voll berücksichtigt. Die relevante Information ist aus der jeweiligen instantanen Entfernung von Quelle und Oberflächenpunkt, der Winkelbeziehung bezüglich der Quellennormalen und dem Einfallswinkel des lokalen Plasmastromes zusammengesetzt.

3. Schichtberechnung:

Festlegung der physikalischen Parameter der Plasmaquellen (Material, Stromdichte, Winkelabhängigkeit) und des Schichtbildungsmodells (beispielsweise Subplantation)

Die Auswertung der Ergebnisse der Prozesssimulation ist mit unterschiedlichen Modellansätzen durchführbar und bietet dadurch Vergleichs- und Anpassungsmöglichkeiten. Das Ergebnis besteht in der Angabe der lokalen Schichtdicke und der lokalen Schichtstruktur. Wegen der schnell wechselnden Beschichtungsbedingungen wird sich stets eine Multischichtstruktur mit Strukturelementen in der Nanometerskala ausbilden. Die Schichtbildungsmodelle können als analytische mathematische Ausdrücke hinterlegt werden. Offene Parameter sind frei wählbar.

Ergebnisse

Das Ergebnis soll am Beispiel einer Beschichtung mit Kohlenstoff demonstriert werden. Im linken Teilbild von Abb. 2 ist die Anordnung der Bauteile im Planetary und die der Plasmaquellen (codiert mit den Farben rot, blau, grün) dargestellt. Die Kinematik der dreifachen Rotation der Bauteile kann im Zeitablauf geprüft werden. Das Beschichtungsergebnis ist die lokale Schichtdicke in Falschfarben. Für jeden Oberflächenpunkt ist die Schichtbildung nachvollziehbar dokumentiert. Beispielsweise ist für den ausgewählten Punkt auf der Mittelebene des Zylinders die obere Plasmaquelle dominant. Nur in den Zeiten größerer Entfernung des Bauteils von der Quellanordnung und bei Hinwendung des Punktes zu den Quellen kommt Plasma von den unteren Quellen zum Aufpunkt. Als physikalische Eigenschaft ist in diesem Fall die Verteilung der sp^2-sp^3-Zustände des Kohlenstoffs aufgetragen.

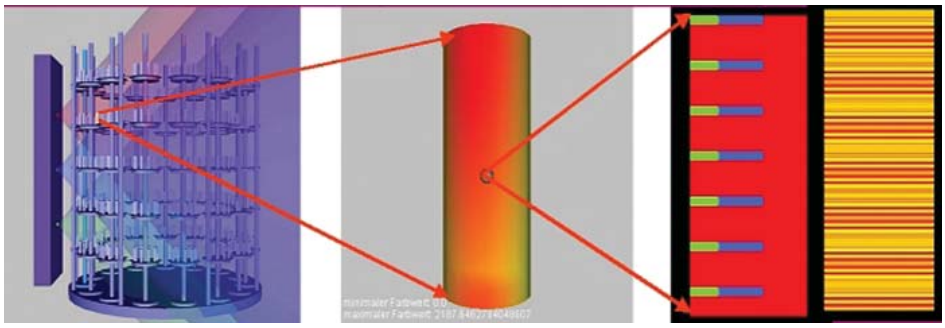
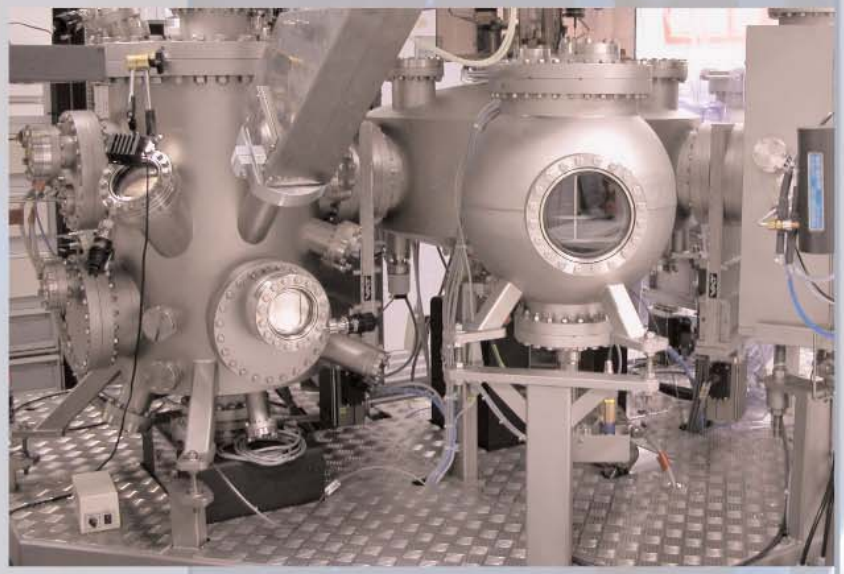


Abb. 2: Collage aus Ergebnissen des Programms:
Von links nach rechts:
- Standort des Bauteils in der Anlage
- Schichtdicke in Falschfarbendarstellung, Charakteristika eines Oberflächenpunktes
- Zuordnung der Quellen im Zeitablauf der Beschichtung von unten nach oben
- Verteilung der Kohlenstoffmodifikationen



FuE-Angebot: Röntgen- und EUV-Optik

Redaktion: Die Bedeutung optischer Komponenten für den kurzwelligen Bereich des Spektrums bis hin zum Röntgenbereich nimmt immer mehr zu. Welche neuen Entwicklungen gab es in Ihrer Abteilung im Jahr 2004?

Dr. Leson: Im Jahr 2004 haben wir verstärkt versucht, unsere herausragenden Resultate, die wir bei Beschichtungen für die EUV-Lithographie erzielt haben, auf andere Anwendungsgebiete zu übertragen. So haben wir für den EUV-Bereich ein Schwarzschild-Objektiv auf der Basis von Mo/Si-Multischichten aufgebaut, das hervorragende Abbildungseigenschaften zeigt und damit neue Beobachtungsmöglichkeiten im weichen Röntgenbereich eröffnet. Weiterhin haben wir unser im EUV-Bereich gewonnenes Know-how eingesetzt, um qualitativ hochwertige Monochromatoren für andere Wellenlängenbereiche zu entwickeln, die vor allem bei der Röntgenfluoreszenzanalyse eingesetzt werden.

Redaktion: Vor gut zwei Jahren wurde aus Ihrer Abteilung heraus die Firma Applied X-Ray Optics Dresden GmbH, kurz AXO genannt, gegründet. Wie hat sich diese seither entwickelt und wie arbeiten Sie heute mit der Firma AXO zusammen?

Dr. Leson: Die Firma AXO GmbH, die von drei Mitarbeitern unserer Abteilung gegründet wurde und an der auch die Fraunhofer-Gesellschaft beteiligt ist, hat eine erfolgreiche Entwicklungsphase durchlaufen und ist mittlerweile gut auf dem Markt bekannt. Dabei arbeiten wir auf vielen Gebieten eng zusammen, um neue Anwendungsfelder zu erschließen. So können wir unsere jeweiligen spezifischen Stärken vorteilhaft ergänzen. Ein gutes Beispiel hierfür ist der Bereich der Röntgenfluoreszenzanalytik, den wir uns im Jahr 2004 gemeinsam mit der AXO GmbH erschlossen haben.

Redaktion: Neben den Präzisionsbeschichtungen für den röntgenoptischen Bereich nutzen Sie in Ihrer Abteilung die Beschichtungskompetenz auch für andere Zwecke. Welche sind diese?

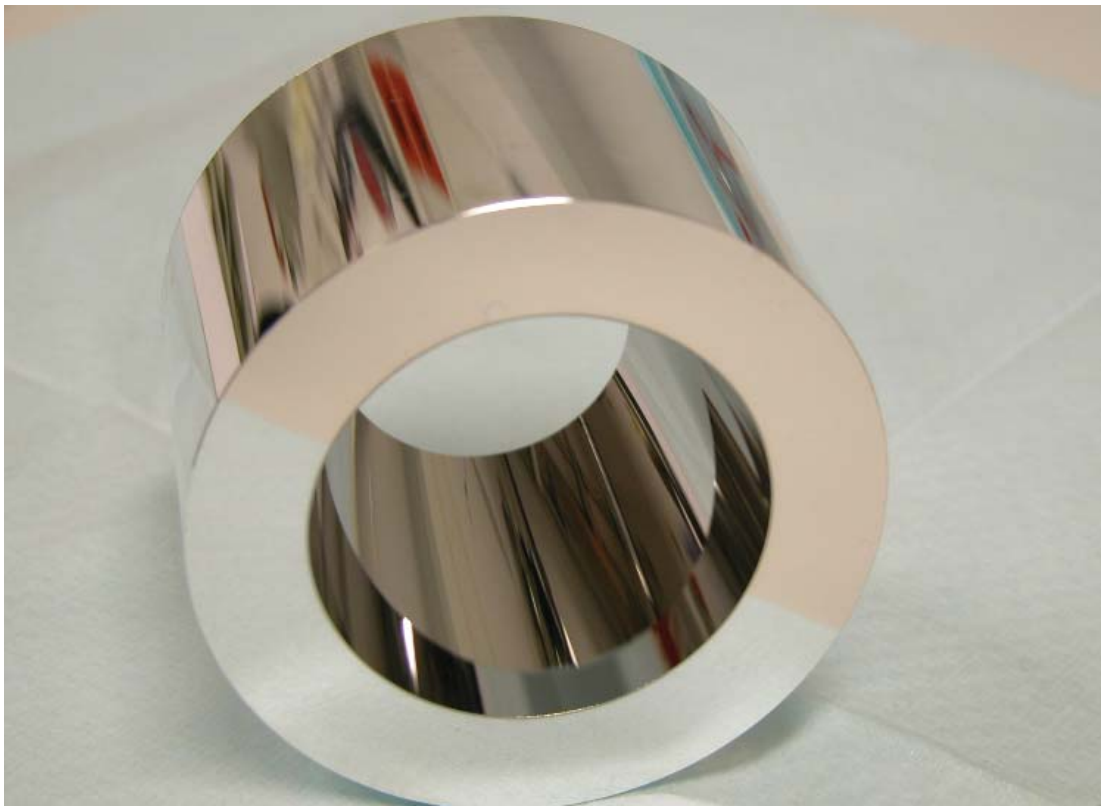
Dr. Leson: Beispielsweise setzen wir das Verfahren der Laserdeposition nicht nur zur Erzeugung von röntgenoptischen Multischichten ein, sondern erzeugen damit auch extrem belastbare Wärmedämmschichten auf innenliegenden Flächen. Auch lassen sich damit sehr harte Kohlenstoffschichten auf Rohrinnenflächen erzeugen, was mit anderen Verfahren kaum machbar ist.

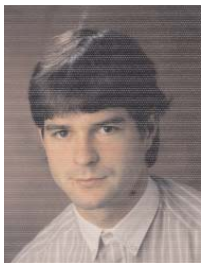
Wer nicht mehr will, als er kann, bleibt unter seinem Können.
Herbert Marcuse

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

Beispiele aus den Arbeiten 2004

1. Optische Vergütungsschichten für Mikrospiegel 92
2. PLD-Kohlenstoffschichten zur Glättung von Substratrauheiten 93
3. Maßgeschneiderte Innenbeschichtungen - Neue Möglichkeiten der PLD 94
4. Monochromatoren für die Röntgenfluoreszenzanalyse 95
5. Erweiterte Messmöglichkeiten bei der Röntgenanalytik 96
6. EUV-Reflektometer: Messaufbau und Präzision 97





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

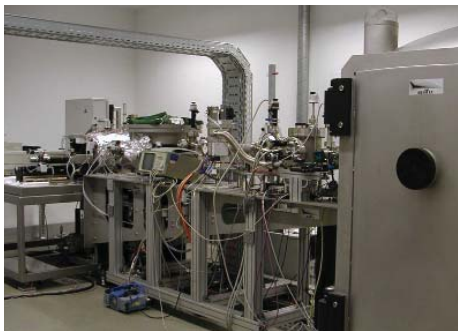
Multischichten für EUV- und röntgenoptische Anwendungen

Einfach- und Multischichtsysteme, die mittels Puls-Laser- und Magnetron-Sputter-Deposition hergestellt werden, zeichnen sich aus durch:
- höchste Schichtdickengenauigkeit,
- geringste Grenzflächenrauhigkeiten,
- 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.vanloyen@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-Kα- bzw. Mo-Kα-Strahlung zerstörungsfreie Messungen zur Bestimmung von Schichtdicken, Schichtrauheiten und Dichten sowie zur qualitativen Phasenanalyse, vornehmlich an dünnen und / oder Multilagen-Schichten 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

Optische Vergütungsschichten für Mikrospiegel

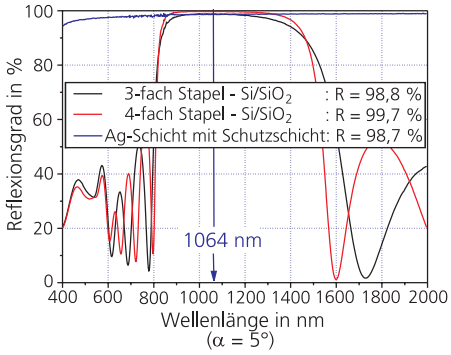


Abb. 1: Vergleich von metallischen und dielelektrischen Spiegelsystem zur Reflexion bei der Laserwellenlänge von 1064 nm

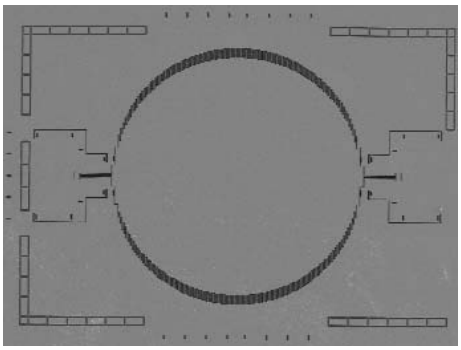


Abb. 2: REM-Aufnahme eines am Fraunhofer IPMS hergestellten Mikroscannerspiegels

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Thomas Foltyn
Tel.: 0351 / 2583 256
thomas.foltyn@iws.fraunhofer.de

Aufgabenstellung

Mikrospiegelarrays und Mikroscannerspiegel werden für verschiedene Anwendungen wie zum Beispiel Laser-Maskenbelichtungssysteme und Strichcode-Lesesysteme eingesetzt. Dabei werden zur Zeit Aluminium bzw. eine Aluminiumlegierung als Verspiegelung und Spiegelaktuator-Material verwendet. Um weitere Einsatzgebiete solcher Spiegelsysteme auch im Wellenlängenbereich vom **N**ahen **I**nfra**r**ot (NIR) bis zum **E**xtremen **U**ltra**v**iolett (EUV) und für sehr hohe Lichtleistungen zu erschließen, müssen neue, hochreflektierende optische Vergütungsschichten entwickelt und eingesetzt werden. Im Gegensatz zu konventionell hochreflektierenden Spiegeln müssen die optischen Vergütungsschichten für Mikrospiegel zusätzliche Anforderungen wie CMOS-Kompatibilität, Strukturierbarkeit, niedrige Eigenspannung und hohe Lebensdauer erfüllen.

Lösungsweg

Für den Einsatz von Mikrospiegelarrays und / oder Mikroscannerspiegeln wird eine speziell für die Arbeitswellenlänge entwickelte eigenspannungsreduzierte optische Vergütungsschicht auf den Aktuator aufgebracht. Je nach Anwendung kann diese optische Vergütungsschicht aus einem metallischen System, einem dielektrischen System oder aus einer Kombination beider Systeme bestehen. In Abb. 1 ist ein Vergleich zwischen dem gemessenen Reflexionsgrad einer Silberschicht und zwei für die Arbeitswellenlänge von λ = 1064 nm (NIR) optimierten dielektrischen Systemen dargestellt. Diese Schichten können wahlweise durch DC- oder RF-Magnetronsputtern abgeschieden werden. Durch die Wahl geeigneter Beschichtungsparameter (z. B. Sputtergasdruck, Entladungsleistung, Target-Substrat-Abstand) und Entwicklung eines passenden Schichtsystems kann die Vergütungsschicht der Mikrospiegel hinsichtlich ihrer optischen und mechanischen Eigenschaften optimiert werden.

Ergebnisse

Wie in Abb. 1 dargestellt ist, beträgt der Reflexionsgrad 98,7 Prozent für eine geschützte Silberschicht und 99,7 Prozent für einen vierfachen Si/SiO_2-Schichtstapel bei einer Arbeitswellenlänge von 1064 nm. Damit wird gewährleistet, dass im Gegensatz zu herkömmlichen Aluminiumschichten mit einem Reflexionsgrad von 96 Prozent weniger Energie absorbiert und eine Zerstörung des Spiegels bei höheren Laserleistungen vermieden wird. Bei einer Arbeitswellenlänge von 193 nm werden Aluminiumschichten als Vergütungsschichten eingesetzt. Diese Aluminiumschichten werden bei konventionellen Laserspiegeln durch Verdampfen hergestellt. Im Gegensatz dazu zeichnet sich das Sputterverfahren durch eine sehr gute Homogenität, Kontrollierbarkeit und Einbindung in den Herstellungsprozess der Mikrospiegel aus. Die Spiegel mit gesputterten Aluminiumschichten erreichen einen vergleichbaren Reflexionsgrad von 86 Prozent.

PLD-Kohlenstoffschichten zur Glättung von Substratrauheiten

Aufgabenstellung

Multischichtspiegel werden in verschiedenen EUV- und röntgenoptischen Anwendungen wie z. B. Reflektometrie, Diffraktometrie, Lithographie oder Fluoreszenzanalyse zur Strahlformung und Monochromatisierung eingesetzt. Um einen höchstmöglichen Reflexionsgrad dieser Multischichtspiegel zu erreichen, müssen präzise Abscheidungen von Schichten mit einer Dicke von wenigen Nanometern auf hochpolierten Substraten mit Oberflächenrauheiten von $\sigma_{RMS} < 0{,}2$ nm erfolgen. Die Endpolitur der Substratoberflächen erfolgt bisher durch einen sehr aufwändigen und kostenintensiven Prozess. Insbesondere die Herstellung von glatten Oberflächen großer ebener Substrate und glatter gekrümmter Oberflächen ist sehr schwierig. Aus diesem Grund werden verschiedene Konzepte verfolgt und untersucht, bei denen durch einen kostengünstigeren Herstellungsschritt die für einen spezifischen Anwendungsfall erforderliche Substratoberflächenqualität erreicht werden kann.

Lösungsweg

Durch das Aufbringen einer geeigneten dünnen Schicht auf ein Substrat geringerer Oberflächengüte ist es möglich, die Oberflächenrauheit weiter zu verringern (Abb. 2). Dabei wird auf das am Fraunhofer IWS vorhandene Puls-Laser-Deposition-Verfahren (PLD) zurückgegriffen, mit dem Substrate bis zu einem Durchmesser von 6" homogen beschichtet werden können. Durch die verfahrensbedingt hohe mittlere Energie der schichtbildenden Teilchen sind diese in der Lage, aufgrund ihrer größeren Mobilität Rauheiten über einen großen Frequenzbereich zu glätten. Als Schichtmaterial eignet sich besonders Kohlenstoff, da man durch Veränderung der Laserparameter unterschiedliche Modifikationen bzw. Eigenschaften der Schicht einstellen kann. Außerdem ist die droplet- und defektfreie Schichtabscheidung von Kohlenstoff sehr vorteilhaft.

Ergebnisse

C-Schichten mit verschiedenen Modifikationen und Dicken wurden mit dem PLD-Verfahren hergestellt und mit AFM und Cu-Kα-Reflektometrie analysiert. Dabei zeigt sich, dass die Schichtrauheit mit zunehmender C-Schichtdicke und bei Verwendung höherer Laserenergien abnimmt. Weitergehend wurde auf einem Substrat mit einer Oberflächenrauheit von $\sigma_{RMS} = 0{,}75$ nm eine C-Glättungsschicht mit einem Dickengradienten von 50 - 300 nm aufgetragen und nachfolgend eine Mo/Si- Multischicht mittels Magnetronsputtertechnik abgeschieden. Die Untersuchung des Reflexionsgrades dieser Mo/Si-Multischicht bei der Arbeitswellenlänge dieser Spiegel wurde am EUV-Labor-Reflektometer im IWS durchgeführt. Eine deutliche Steigerung des Reflexionsgrades dieser Multischicht (> 5 %) korreliert mit einer signifikanten Reduzierung der Substratrauheit schon bei einer Dicke der C-Schicht von 100 nm (Abb. 1).

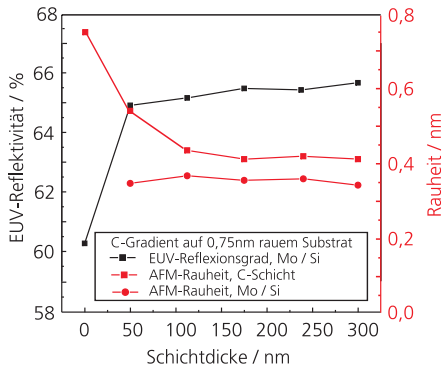


Abb. 1: Rauheit und EUV-Reflexion in Abhängigkeit von der C-Schichtdicke

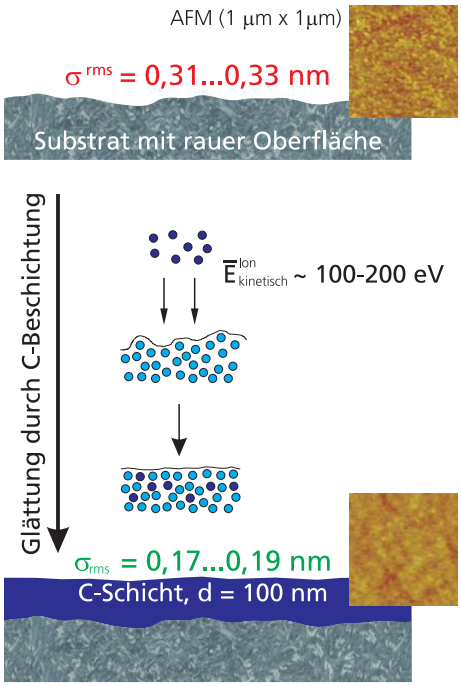


Abb. 2: Schematische Darstellung des Glättungsmechanismus und AFM-Ergebnisse vor und nach der Beschichtung

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Maik Menzel
Tel.: 0351 / 2583 334
maik.menzel@iws.fraunhofer.de

Maßgeschneiderte Innenbeschichtungen - Neue Möglichkeiten der PLD

Aufgabenstellung

Die Beschichtung von Bauteil-Innenflächen stellt für alle Beschichtungstechnologien eine Herausforderung dar. Speziell für plasmagestützte und unter Vakuum ablaufende Verfahren, z. B. zur Abscheidung von Hartstoff- und Verschleißschutzschichten, gibt es derzeit kaum industrielle Umsetzungen zur Innenbeschichtung.

Ziel der Arbeiten war es, das am Fraunhofer IWS entwickelte Verfahren der Innenbeschichtung mittels Puls-Laser-Deposition (PLD) zu erweitern, um einerseits neue, bisher auf Innenflächen nicht zu realisierende Beschichtungen abscheiden zu können und andererseits das Eigenschaftsspektrum der mit "klassischer" PLD herstellbaren Schichtsysteme zu verbreitern und auf den jeweiligen Anwendungsfall maßzuschneidern.

Lösungsweg

Das PLD-Verfahren in seiner klassischen Variante beruht auf der Erzeugung eines Teilchenplasmas mit hochenergetischem Ionenanteil (Laserablation). Die damit herstellbaren Schichten zeichnen sich durch eine dichte, nanokristalline, z. T. auch amorphe Struktur mit sehr glatter Oberfläche aus. Das PLD-Innenbeschichtungsverfahren wurde nun durch einen thermischen Verdampfungsprozess ergänzt, der ebenfalls durch einen gepulsten Laser initiiert wird. Die auf diese Weise erzeugten Beschichtungen unterscheiden sich wegen den jetzt vergleichsweise geringen Partikelenergien in ihrer Struktur grundlegend von denen der klassischen Variante. Eine geeignete Kombination von Laserablation und -verdampfung erlaubt es, synchron die verschiedenen Wachstumsmodi einzustellen und damit das Eigenschaftsspektrum der PLD-Schichten stark zu erweitern.

Ergebnisse

Die PLD-Innenbeschichtungsanlage wurde hinsichtlich Strahlführung und Target-Substrat-Handling derart ergänzt, dass ein gleichzeitiger Betrieb des Ablationslasers (gütegeschalteter Nd:YAG) und des Verdampfungslasers (gepulster 1 kW-Nd:YAG, quasi-cw) möglich ist (Abb. 2). Eine Synchronisierung der Laserpulse erlaubt die Verdampfungs- bzw. Plasmabildungsvorgänge und die zugehörige Schichtkondensation sowohl überlagert als auch unabhängig voneinander durchzuführen.

Am Beispiel keramischer ZrO_2-Wärmedämmschichten konnte exemplarisch gezeigt werden, dass der Übergang der Struktur von poröser, mit Verdampfung abgeschiedener Schicht hin zur dichten, nanokristallinen, "klassischen" PLD-Schicht nahezu kontinuierlich einstellbar ist.

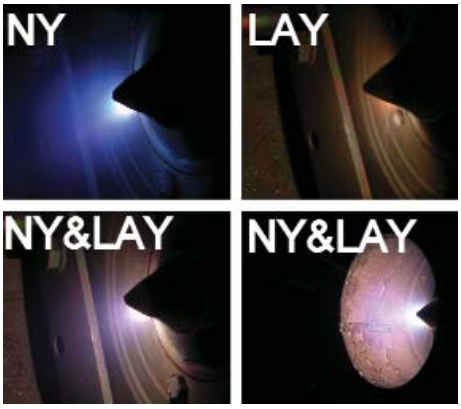


Abb. 1: Fotografische Aufnahmen der Plasma- bzw. Verdampfungswolken beim Beschuss eines ZrO_2-Targets. In den unteren Bildern erfolgte die Pulsauslösung für die Ablation (NY) und die Verdampfung (LAY) gleichzeitig auf eine gemeinsame Spotfläche

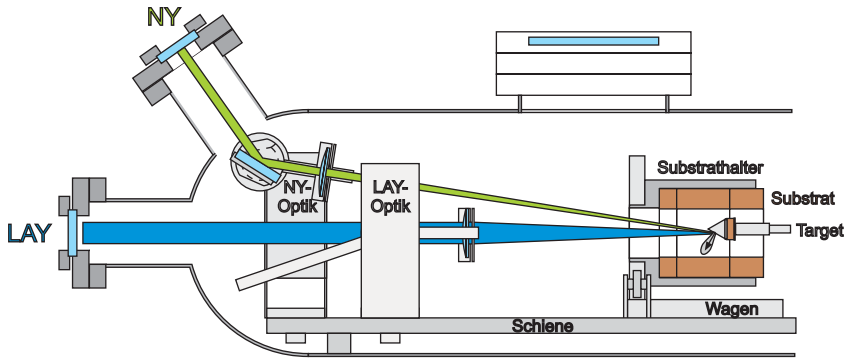


Abb. 2: Schematischer Aufbau der PLD-Innenbeschichtungsanlage bei synchronisiertem Betrieb von Laserablation (NY-Laser) und Laserverdampfung (LAY-Laser) und getrennter Strahleinkopplung

Ansprechpartner

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

Monochromatoren für die Röntgenfluoreszenzanalyse

Aufgabenstellung

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ist schon seit vielen Jahren als ein leistungsfähiges zerstörungsfreies Verfahren sowohl zur qualitativen als auch zur quantitativen Elementanalyse etabliert. Neben Einsatzfeldern in Forschung und Entwicklung kommt die RFA auch in hohem Maße in der Produktion (z. B. Zement- und pharmazeutische Industrie), der Qualitätssicherung (z. B. Nachweis von Schwefel in Kraftstoffen) und der Umwelttechnik (z. B. Überwachung von Abwässern und Reinigungsflüssigkeiten) zum Einsatz. Alle Anwendungsfälle erfordern die stetige Weiterentwicklung der RFA-Geräte, um Nachweisgrenzen zu verringern oder Messzeiten zu verkürzen. Dies kann vor allem dadurch erreicht werden, dass die bei der wellenlängendispersiven RFA (WD-RFA) zur Monochromatisierung eingesetzten Multischichten hinsichtlich Reflexionsgrad und Auflösungsvermögen verbessert werden.

Lösungsweg

Bei der WD-RFA wird die in einer Analysenprobe angeregte Fluoreszenzstrahlung mittels eines Multischichtmonochromators analysiert (Abb. 1). Die für die jeweiligen Elemente charakteristischen Linien liefern die Information über die in der Probe enthaltenen Elemente. Eine Verringerung der noch nachweisbaren Menge eines speziellen chemischen Elementes kann dadurch erreicht werden, dass das Reflexionsvermögen des Analysators bei der für das jeweilige Element charakteristischen Wellenlänge erhöht wird. Im Fraunhofer IWS wurden daher Multischichten entwickelt, die besonders für den Nachweis leichter Elemente (B, C, N, O, Na, Mg, Al, Si) des Periodensystems geeignet sind. Diese Multischichten bestehen aus bis zu 1000 Einzelschichten mit Dicken im Bereich von 0,5 bis 5 nm. Zur Synthese der Multischichten werden die im Ultrahochvakuum ablaufenden Beschichtungsverfahren der Puls-Laser- und Magnetron-Sputter-Deposition eingesetzt.

Ergebnisse

Der wesentliche Schlüssel zur Erhöhung des Reflexionsvermögens der Multischicht-Monochromatoren für die RFA liegt in der Verringerung der Grenzflächenbreite σ. Dabei setzt sich σ aus den Anteilen Grenzflächenrauheit und Grenzflächeninterdiffusion zusammen. Erstere konnte durch Optimierung der Beschichtungsparameter verringert werden, letztere wurde durch den Einsatz von ultradünnen Barriereschichten (Dicken zwischen 0,2 und 0,5 nm) zwischen den optisch aktiven Materialien reduziert. Durch Anwendung dieser Maßnahmen gelang es, die Grenzflächenbreite der Multischichtsysteme W/Si, W/B_4C und Cr/Sc bis auf Werte zwischen 0,20 bis 0,25 nm zu verringern. Für die vorrangig in der RFA eingesetzten und auf W/Si-Multischichten basierenden Monochromatoren resultiert dies in einem um rund 10 Prozent erhöhten Reflexionsgrad gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik.

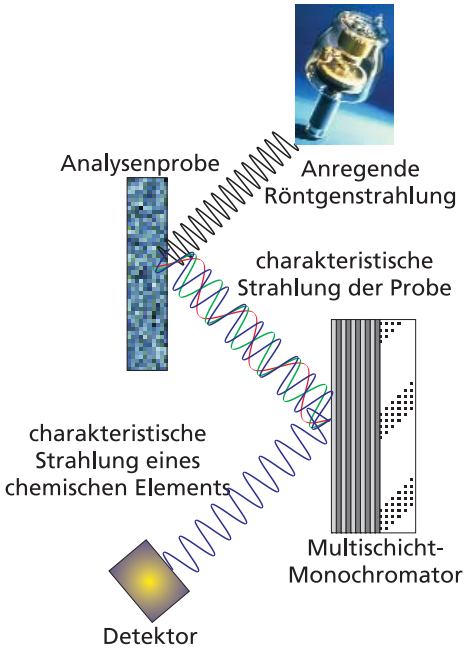


Abb. 1: Schematische Darstellung der wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse

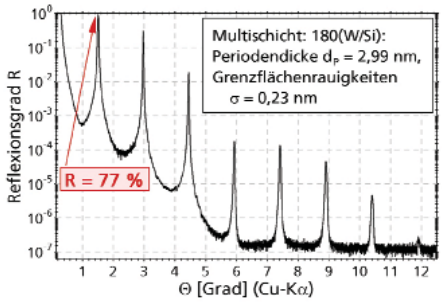


Abb. 2: Cu-Kα-Reflektogramm einer hochreflektierenden W/Si-Multischicht

Ansprechpartner

Dr. Stefan Braun
Tel.: 0351 / 2583 432
stefan.braun@iws.fraunhofer.de

Erweiterte Messmöglichkeiten bei der Röntgenanalytik

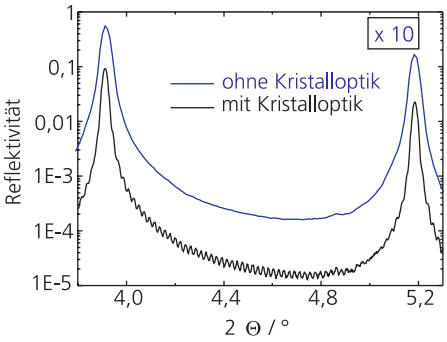


Abb. 1: Ausschnitt aus einem Cu-Kα-Reflektogramm einer Mo/Si-Multischicht mit einer Gesamtschichtdicke von 414 nm, gemessen ohne bzw. mit hochauflösender Kristalloptik

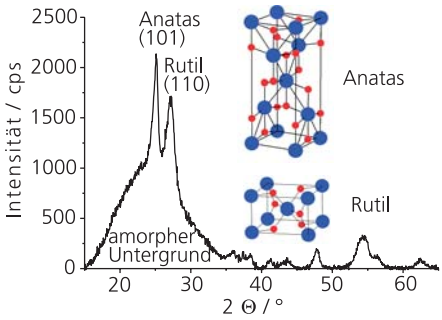


Abb. 2: XRD-Messung einer 140 nm dünnen TiO_2-Schicht mit Kennzeichnung der beiden höchsten Peaks und Darstellung der jeweiligen Elementarzelle von den TiO_2-Modifikationen Anatas und Rutil

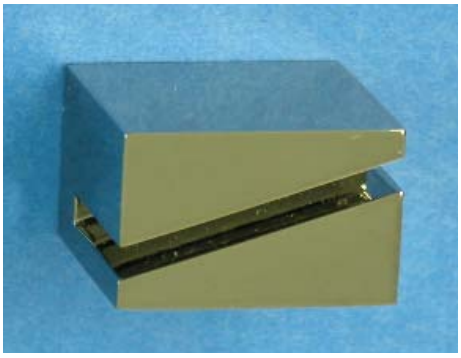


Abb. 3: Kristalloptik für Cu-Kα-Strahlung

Ansprechpartner

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

Aufgabenstellung

Die Messmethoden zur zerstörungsfreien Analyse von dünnen Schichten und Schichtsystemen mittels Röntgenstrahlung werden seit Jahren stetig weiterentwickelt. Standardmäßig wird bei der Röntgenanalytik mit zwei unterschiedlichen Messverfahren gearbeitet:

- Die Röntgenreflektometrie (X-ray reflectometry, XRR) wird zur Bestimmung der Dicken, der Dichten und der Grenz- bzw. Oberflächenrauheiten von Einzel- und Multischichtsystemen eingesetzt.
- Die Röntgendiffraktometrie (X-ray diffraction, XRD) ermöglicht die qualitative und quantitative Phasenanalyse von dünnen Schichten und Pulvern.

Beide Messmethoden haben Grenzen hinsichtlich ihres Nachweisvermögens. Die XRR ist nur bei dünnen Schichten einsetzbar, während bei der XRD die entstandenen kristallinen Phasen erst ab einer Mindestschichtdicke beobachtet werden können. Diese bisherigen Beschränkungen sollten überwunden werden.

Lösungsweg

Die Verwendung von herkömmlichen Parallelstrahloptiken bei der XRR erzeugt eine relativ große Strahldivergenz, so dass Schichtdicken oberhalb 250 nm nicht mehr messtechnisch erfasst werden können. Deshalb wurden diese Optiken mit verschiedenen Kristalloptiken kombiniert, um eine hochaufgelöste Röntgenreflektometrie (High-Resolution XRR, HR-XRR) mit ausreichender Intensität bei gleichzeitig sehr geringer Strahldivergenz zu ermöglichen.

Zur Analyse von polykristallinen Phasen in dünnen Schichten wurde die XRD bei streifendem Einfall (Grazing Incidence XRD, GI-XRD) erfolgreich als Messmethode etabliert. Diese Methode gestattet die qualitative und quantitative Bestimmung der Phasenanteile, insbesondere bei geringen Schichtdicken unter 100 nm.

Ergebnisse

Für eine Mo/Si-Multischicht werden beispielhaft in Abb. 1 eine XRR-Messung (mit Standardoptiken ohne Kristalloptik) und in Abb. 3 eine HR-XRR-Messung (mit Kristalloptik) vergleichend dargestellt. Die deutlich verbesserte Winkelauflösung zeigt sich durch den Nachweis der Nebenoszillationen zwischen den beiden Bragg-Maxima, so dass Gesamtschichtdicken von oberhalb 250 nm gemessen und analysiert werden können.

In Abb. 2 ist eine GI-XRD-Messung einer TiO_2-Schicht (Phasenanalyse: Rutil, Anatas sowie amorphe Anteile) und eine Illustration der atomaren Strukturen dargestellt. Die Verwendung der für die GI-XRD maßgeschneiderten Optiksysteme ermöglichte den Nachweis dieser kristallinen Phasen.

EUV-Reflektometer: Messaufbau und Präzision

Aufgabenstellung

Optikkomponenten für den Wellenlängenbereich des extremen Ultraviolett (EUV) sind ausschließlich reflektierende Optiken. Für die Entwicklung solcher EUV-Optiken kommt daher der EUV-Reflektometrie eine besondere Bedeutung zu. In der Vergangenheit wurden solche Messungen ausschließlich unter Nutzung von Synchrotronstrahlung durchgeführt, was eine enge Anbindung an einen Elektronenspeicherring, z. B. BESSY II in Berlin, bedeutete und damit auch territoriale und zeitliche Rahmenbedingungen vorgab. Für eine schnelle Entwicklung von EUV-Optiken wurde deshalb eine Vor-Ort-Messtechnik bei der Herstellung der Spiegelschicht auf diesen Optiken erforderlich.

Lösungsweg

Dieser Forderung entsprechend wurde unter Leitung des Fraunhofer IWS Dresden und 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 innerhalb eines vom BMBF geförderten Projektes ein Labor-Reflektometer aufgebaut, das

- eine eigenständige Vor-Ort-Verfügbarkeit gewährleistet,
- mit Strahlung im EUV-Bereich, speziell im Wellenlängenbereich von 10 nm bis 16 nm arbeitet,
- die Vermessung von Proben gestattet, die in ihren Dimensionen den Erfordernissen der Halbleiterindustrie gerecht werden und
- eine den Synchrotronmessungen vergleichbare hohe Messgenauigkeit und Flexibilität aufweist.

Ergebnisse

Das Optikdesign unseres Labor-EUV-Reflektometers (EUVR) ist in Abb. 1 gezeigt. Einen Blick in die Messkammer gestattet Abb. 2.

Mit diesem Reflektometer können sowohl ebene als auch gekrümmte Optiken vermessen werden. Dabei liegen die relativen Standardabweichungen der Peak-Reflektivität bei 0,2 % und die der Zentrumswellenlänge bei 0,02 %. Die EUVR- als auch die Synchrotron-Messungen führen in Peak-Reflektivität und Zentrumswellenlänge zu vergleichbaren Ergebnissen.

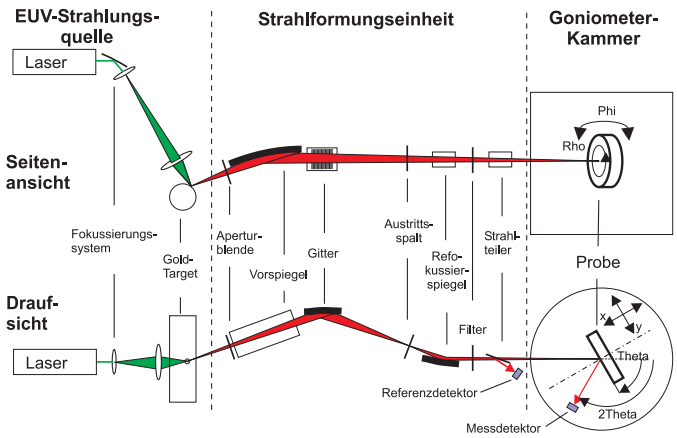


Abb. 1: Optikdesign des EUV-Reflektometers

Bei der Optimierung von EUV-Optiken gilt es durch einen geeigneten, ggf. lateral unterschiedlichen Multischichtaufbau der Spiegelschicht sowohl die Zentrumswellenlänge des Reflektivitätspeaks anforderungsgemäß einzustellen als auch die Peak-Reflektivität zu maximieren. Mit dem EUV-Reflektometer vor Ort werden diese Kenngrößen schnell verfügbar.

Außerhalb des Standardmessbetriebes gestattet unser Reflektometer kleinere Proben auch bei streifendem Einfall des EUV-Strahles zu untersuchen. Auf diese Weise können Schichteigenschaften z. B. über die Vermessung der Breite der Totalreflektionskante ermittelt werden.

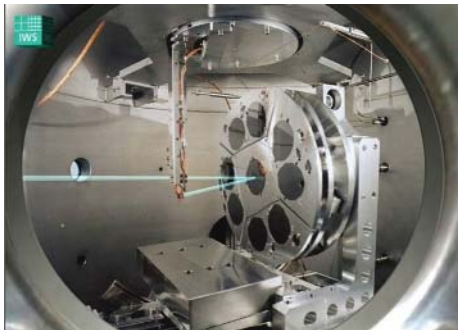


Abb. 2: Inneransicht der Goniometerkammer mit einem Halter für kleinere Proben, der Verlauf des EUV-Strahles ist schematisch dargestellt

Ansprechpartner

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

FuE-Angebot: Klebtechnik

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

Beispiele aus den Arbeiten 2004

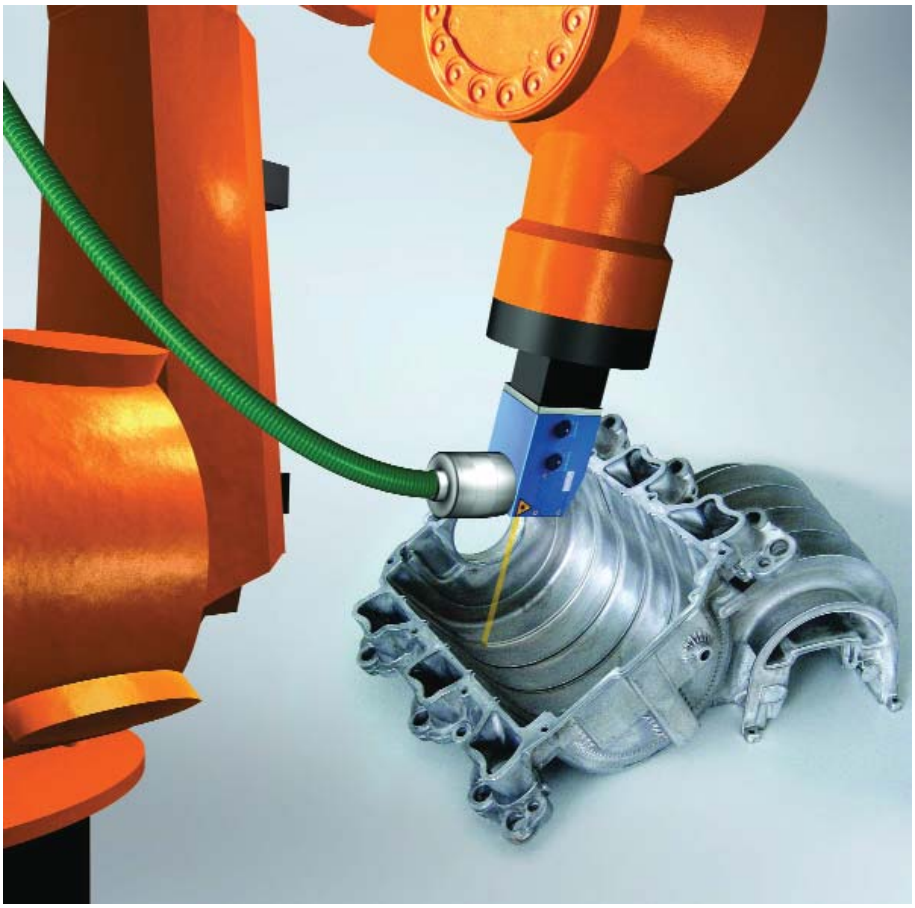
1. Vorbehandlung von faserverstärkten Kunststoffen mittels Nd:YAG-Laser 99

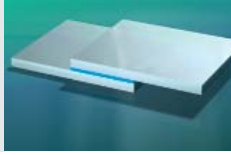
2. Untersuchung der Klebfuge mittels laserakustischer und thermoanalytischer Methoden 100

Klebtechnik

Das Klebtechnikum am Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik der TU Dresden wurde im vergangenen Jahr mit einer Nd:YAG-Reinigungslaser- und einer Atmosphärenplasmaanlage ausgestattet. Damit sind optimale Bedingungen für die Fügestellenvorbehandlung mittels physikalischer Methoden gegeben.

Hauptarbeitsgebiete der Gruppe sind:
- Oberflächenvorbehandlung mittels Plasma- und Lasertechnik sowie der Vergleich mit herkömmlichen Vorbehandlungsmethoden,
- konstruktives Kleben verschiedener Materialien (Metalle, Kunststoffe, Glas, Holz),
- Charakterisierung der Oberflächen sowie der geklebten Verbunde mittels Kontaktwinkel-, Rauheits- und Schichtdickenmessung, Lichtmikroskopie, REM / EDX und spektroskopischen Methoden,
- Bestimmung der Klebfestigkeiten und Alterungsuntersuchungen,
- Simulation und Aufbau einer Datenbank.





Vorbehandlung von faserverstärkten Kunststoffen mittels Nd:YAG-Laser

Aufgabenstellung

Faserverstärkte Kunststoffe mit Epoxidharzen als Matrixharz werden zunehmend in der Luftfahrtindustrie und im Fahrzeugbau eingesetzt. Diese Bauteile werden dabei untereinander oder mit anderen Materialien durch Kleben gefügt. Aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Harzes ist eine Aktivierung der Oberfläche vor dem Kleben in aller Regel nicht erforderlich. Herstellungs- und lagerungsbedingt können die Oberflächen jedoch kontaminiert sein, wodurch Anforderungen der meist sicherheitsrelevanten Anwendungen nicht erfüllt werden. Traditionell wird deshalb die Oberfläche mechanisch geschliffen oder ein vorher einlaminiertes Gewebe (Peel Ply) abgezogen. Oftmals kommt auch eine Kombination beider Verfahren zum Einsatz. Nachteilig wirkt sich dabei insbesondere die ungenügende Reproduzierbarkeit aus.

Eine potenzielle, bisher noch nicht auf ihre Eignung geprüfte Alternative ist die Behandlung mit einem Nd:YAG-Laser. Zu erwartende Vorteile sind wirtschaftliche Bearbeitungsgeschwindigkeiten auch für großflächige Bauteile auf Grund der Verfügbarkeit industriell einsetzbarer Systeme und die Möglichkeit der Herstellung reproduzierbarer Oberflächenzustände durch den Einsatz des Lasers.

Lösungsweg

Für die Untersuchungen wurde kohlefaserverstärkter Kunststoff verwendet. Die Vorbehandlung erfolgte mit dem Nd:YAG-Laserstrahlentschichtungssystem CLA 050, das basierend auf einer industriell verfügbaren Standardanlage speziell für das Fraunhofer IWS entwickelt wurde. Das Laserstrahlentschichtungssystem verfügt über eine Nd:YAG-Strahlquelle mit einer mittleren Leistung von 120 W (cw). Mit Pulslängen zwischen 100 ns $\leq \tau_P \leq$ 300 ns und Repetitionsraten zwischen 8 kHz $\leq$ F $\leq$ 40 kHz wird die Realisierung verschiedenartiger Aufgabenstellungen möglich. In die Anlage ist zusätzlich über eine Faserkopplung ein 1D- und ein 2D-Handscanner für die manuelle Bearbeitung integriert.

Zunächst wurden Untersuchungen zum Absorptionsverhalten der Nd:YAG-Laserstrahlung durchgeführt, die gezeigt haben, dass auf Grund der Transparenz der Deckharzschicht die Absorption der Laserstrahlung in der Grenzschicht zwischen der oberen Kohlefaserlage und dem Deckharz stattfindet. Im zweiten Schritt wurde überprüft, inwieweit die Laserstrahlung in bereits freigelegten Bereichen zur Zerstörung der Kohlefaser führt. Hier konnten keine Veränderungen beobachtet werden. Abschließend durchgeführte großflächige Abtragsuntersuchungen ermöglichten eine erste Abschätzung zur Leistungsfähigkeit des Laserstrahlabtragsverfahrens.

Ergebnisse

Der selektive Abtrag des Deckharzes mit Nd:YAG-Laser ist ohne nennenswerte Beschädigung der Kohlefaser möglich. Weiterhin lassen sich dadurch auch relativ dicke und ungleichmäßige Schichten des Deckharzes erfolgreich abtragen. Es werden reproduzierbare Oberflächenzustände ermöglicht, ohne dass ein chemischer Abbau des als Matrixharz verwendeten Epoxidharzes in Kauf genommen werden muss.

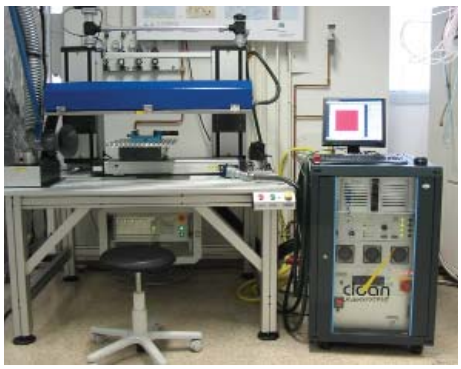


Abb. 1: Laserstrahlentschichtungssystem CLA 050 mit Nd:YAG-Laser und 4-Achsen-Bearbeitungsanlage

Abb. 2: Laserstrahlentschichtete und anschließend geklebte Stringer-Verbindung aus kohlefaserverstärktem Kunststoff

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Hendrik Wust
Tel.: 0351 / 4633 96 39
hendrik.wust@iws.fraunhofer.de

Untersuchung der Klebfuge mittels laserakustischer und thermoanalytischer Methoden

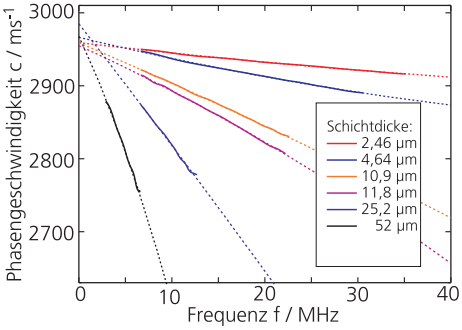


Abb. 1: Dispersionskurven von Epoxidschichten verschiedener Dicken auf AlMg3-Substraten

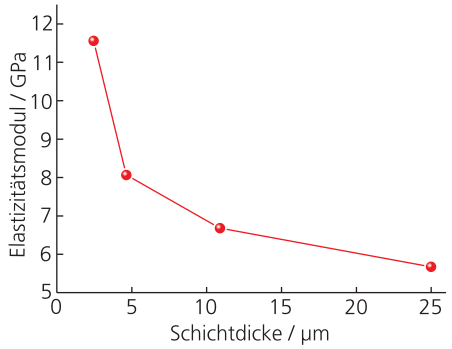


Abb. 2: Abhängigkeit der Elastizitätsmoduln (mit LAwave® gemessen) von der Schichtdicke

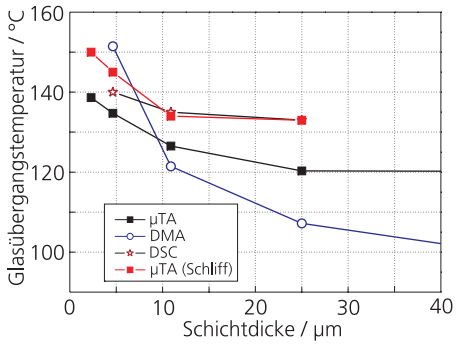


Abb. 3: Abhängigkeit der Glasübergangstemperaturen (mit verschiedenen thermoanalytischen Methoden bestimmt) von der Schichtdicke

Ansprechpartner

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

Aufgabenstellung

Zwischen Fügeteil und Klebstoff bildet sich eine Interphase mit gradierten Eigenschaften aus, die sowohl vom Substrat als auch von der Oberflächenvorbehandlung beeinflusst wird. Es wurden verschiedene Methoden herangezogen, um entweder an Schichten unterschiedlicher Dicke oder aber an der gesamten Klebfuge die vom Bulk abweichenden Eigenschaften zu bestimmen. Die genaue Kenntnis dieser Phase ist einmal für Simulationen aber auch zur Vorhersage des Bruchverhaltens von großer Wichtigkeit.

Mittels verschiedener thermoanalytischer Methoden wurden zunächst Glasübergangstemperaturen in diesem Bereich bestimmt. Ausgehend vom Metall ergaben sich absinkende Werte in Richtung Bulk.

Visko-elastische Eigenschaften von Klebungen sollen nun mit der im IWS entwickelten LAwave®-Methode bestimmt werden. LAwave® ist eine zerstörungsfreie, laserakustische Technik basierend auf hochfrequenten Ultraschalloberflächenwellen. Bisher wurde die Methode vor allem für ultradünne und superharte Schichten verwendet.

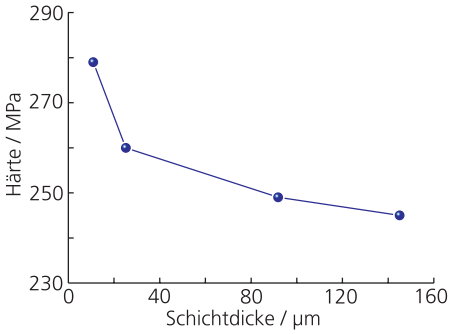


Abb. 4: Abhängigkeit der Härte (mit Nanoindentation gemessen) von der Schichtdicke

Lösungsweg

Die zu untersuchenden Klebschichten wurden durch Spincoating von gelösten Epoxid-Härter-Gemischen auf Silizium-Wafer oder AlMg3-Substrate gebracht. Neben diesen offenen Klebungen wurden für thermoanalytische Untersuchungen auch AlMg3-Substrate miteinander verklebt und der Querschliff der Klebfuge untersucht. Die Schichtdicke wurde entweder IR-spektroskopisch oder nach dem Wirbelstromverfahren bestimmt.

Aus den LAwave®-Messungen wurden die Elastizitätsmoduln von Klebschichten unterschiedlicher Dicke berechnet. Zum Vergleich wurden Glasübergangstemperaturen mit verschiedenen thermoanalytischen Methoden (µTA, DMA, DSC) bestimmt.

Ergebnisse

Mittels LAwave®-Methode wurde die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz von offenen Klebungen unterschiedlicher Dicke vermessen (Abb. 1). Polymerschichten dämpfen die Schallgeschwindigkeit. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Schichtdicke zu. Dadurch ergibt sich ein oberer Wert für die Messbarkeit dickerer Schichten. Für das hier verwendete System liegt der Wert für die Schichtdicke derzeitig bei 100 µm.
Die aus den Messkurven errechneten Elastizitätsmoduln nahmen mit zunehmender Schichtdicke ab (Abb. 2). Das steht im Einklang mit der aus thermoanalytischen Untersuchungen gefundenen Abnahme der Glasübergangstemperaturen (Abb. 3).

Bestätigt wurden die abnehmenden Glasübergangstemperaturen und Elastizitätsmoduln zusätzlich durch abnehmende Härten, die durch Nanoindentation bestimmt wurden (Abb. 4).

FuE-Angebot: Multimedia und 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 Verfahrensenswicklung und -weiterentwicklung in zunehmendem Maße auch die Prozessmodellierung bis hin zur Entwicklung produktionstauglicher 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 2004

1. Implementierung einer "Virtuellen Technologie" am Beispiel Laserauftragschweißen 102
2. Simulation des induktiven Vorwärmens beim Laserinduktionsschweißen 104

Implementierung einer "Virtuellen Technologie" am Beispiel Laserauftragschweißen

Aufgabenstellung

Die Beantwortung von Anfragen zur industriellen Umsetzung von im Institut entwickelten Verfahren muss in immer kürzeren Zeiträumen und zu immer günstigeren Kosten erfolgen. Dabei kommt es auf die korrekte Auswahl der Prozesse, die Eingrenzung der Verfahrensparameter und die optimale Anlagentechnik an. Die Simulation von Produktionsabläufen kann als Modell der Anlagen und Prozesse mit Methoden der virtuellen Realität (VR) durchgeführt werden, bevor die hohen Kosten der eigentlichen Fertigung der Anlagentechnik entstehen. Die Aufgabe besteht in der möglichst korrekten Simulation der angefragten Prozesse und dem virtuellen Erproben der durchgängigen Produktionskette. Die Entwicklungsarbeiten beinhalten die Dimensionierung der vollständigen notwendigen Anlagen als dreidimensionale Objekte mit den zugehörigen kinematischen Freiheiten und die Implementierung der werkstoffbedingten Prozesse. Die Arbeiten müssen sowohl in Installationen der virtuellen Realität vom Typ einer Cave als auch an PC-Arbeitsplätzen kostengünstig ausgeführt werden können.

Als Fallbeispiel wird eine hybride Bearbeitungsanlage ausgewählt, in der die Kombination von 4 Verfahren realisiert werden kann: Laser- und Plasma-Auftragschweißen, Induktionserwärmung zur Lösung ausgewählter Werkstoffprobleme sowie einer nachfolgenden Fräsbearbeitung auch an komplizierten dreidimensionalen Bauteilen. Die Simulation kann sowohl zur Optimierung und Kontrolle der Abläufe auf real vorhandenen Anlagen bei unterschiedlichen Bauteilen als auch zur Unterstützung der Konstruktion von Anlagenvarianten eingesetzt werden.

Lösungsweg

Ausgehend von der Abschätzung der Bearbeitungsparameter mit dem Simulationsprogramm für das Auftragschweißen LAVA und dem werkstoffwissenschaftlichen Erfahrungsschatz wird für das Bauteil die Bahn berechnet. Im Fall einer Reparatur muss das fehlende Volumen des Ist-Zustandes zum Soll-Zustand durch Schweißraupen aufgefüllt werden, bei der Generierung eines Bauteils muss durch eine Kombination des Laserpulverauftragschweißens mit dem Plasma-Auftragschweißen das Volumen aufgebaut werden. Im konkreten Fall werden die Bahnen der Schweißdüsen mit dem System DCAM berechnet.

Über die virtuelle Nachbildung des Eingabegerätes auf einem Touch-Screen wird das Bearbeitungsprogramm und die Geometrie des Bauteils eingelesen. Nach Auswahl der Anlagenkonfiguration werden die Steuerbefehle geparst und sofort als Aktionen in der virtuellen Anlage ausgeführt. Der Programmablauf kann im Eingabefeld geändert und sofort wieder getestet werden. Mit dem in Abb. 1 symbolisch dargestellten Ablauf wird eine 3D-Ansicht von Anlage und Bauteil erzeugt. Das Bild kann in dieser Variante des Programms beliebig gezoomt und gedreht werden. In der virtuellen

Abb. 1: Darstellung des zweistufigen Simulationsvorganges aus virtuellem Eingabegerät und virtueller Bearbeitungssituation

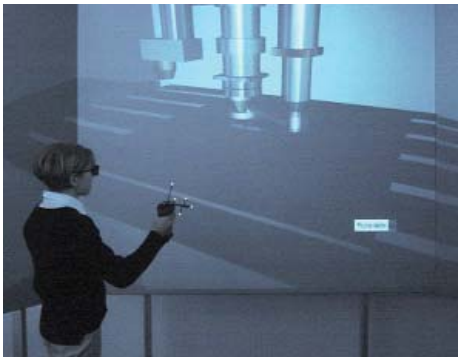


Abb. 2: Interaktionsmöglichkeit Mensch-Maschine mit einem Flystick

Ansprechpartner

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

Installation besteht darüber hinaus die Möglichkeit der interaktiven Steuerung. Der Standpunkt des Nutzers wird über ein optisches Tracking ermittelt. Die Interaktionen, etwa mit einem Flystick leicht ausführbar, werden ebenfalls durch das Tracking-System erfasst und entsprechend simuliert. Bei beiden Varianten ist der störungsfreie Ablauf des vorbereiteten Bearbeitungsprozesses aus optimaler Beobachtungsposition bewertbar und nötigenfalls korrigierbar.

In der Vorbereitungsphase der endgültigen Bearbeitung kann der Ablauf ohne Blockierung teurer Maschinenzeiten und bei Schonung von Mensch und Maschine geprüft und optimiert werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der Schaffung eines Trainingswerkzeugs, da die umgesetzten Anlagentypen und Verfahrensvarianten auch zum Erlernen der Grundfertigkeiten an realistischen Beispielen eingesetzt werden können.

Ergebnisse

Programmtechnisch ist die Kopplung der 3D-Simulation mit der Berechnung von kinematischen Prozessparametern und einer in der Simulation mitgeführten Prozesskontrolle möglich. Im Beispiel des Auftragschweißens würde diese Kontrolle beim virtuellen Aufbringen der Einzelraupen erfolgen. Als Ergebnis der Simulation sind Ausgangszustand und finaler Zustand in der Abb. 3 gegenübergestellt.

Mit dem erreichten Stand ist ein erhebliches Einsparpotenzial bei der Produktionsvorbereitung und der Planung neuer Anlagen erreicht. Damit sind alle Möglichkeiten einer frühzeitigen Fehlererkennung aufgezeigt. In Zusammenarbeit mit Anwendern werden die Funktionalitäten der Kollisionskontrolle, einer intuitiven Bedienung und die Entwicklung graphischer Werkzeuge zur Modifizierung von Anlagenparametern innerhalb der VR-Simulation voll ausgebaut. Der Parser geht auf verschiedene Varianten der CNC-Programmierung ein und muss die Vielfalt der verwendeten 3D-Formate verarbeiten können.

Die virtuelle Technologie wurde für drei Anlagen im IWS realisiert, für die FADAL-Anlage zum hybriden Laserpulverauftragschweißen, für einen Demonstrator zum Laserstrahlhärten und für die XXL-Anlage zum Laserstrahlschweißen großformatiger Bauteile.

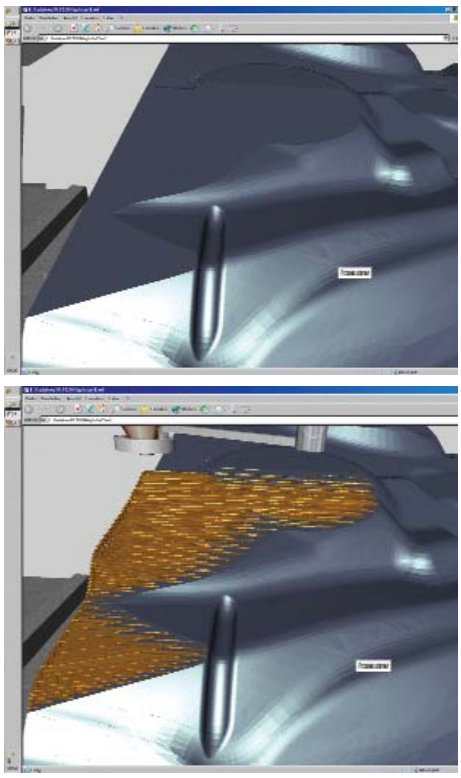


Abb. 3: Virtuelles Auftragschweißen an einem Umformwerkzeug

Simulation des induktiven Vorwärmens beim Laserinduktionsschweißen

Aufgabenstellung

Die beim Laserstrahlschweißen auftretenden hohen Temperaturgradienten können bei verschiedenen Werkstoffen zu Aufhärtungen, hohen Zugspannungen und Rissen führen. Im Fraunhofer IWS wurde daher in den vergangenen Jahren eine Hybridtechnologie entwickelt und in die Produktion eingeführt, die diese unerwünschten Begleiterscheinungen durch prozessintegriertes induktives Vorwärmen vermeidet. Der dabei zur Ermittlung geeigneter Prozessfenster nötige experimentelle Aufwand soll - zunächst für die induktive Erwärmung - mit Hilfe von Simulationsrechnungen reduziert werden.

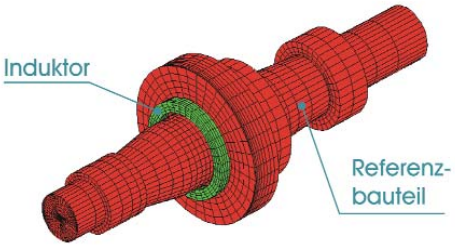


Abb. 1: Rotationssymmetrisches Referenzbauteil und Induktor

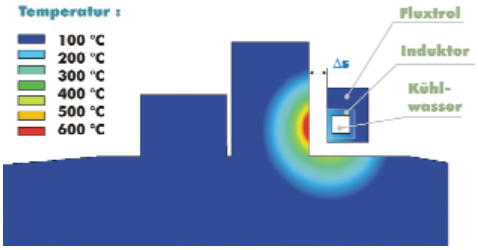


Abb. 2: Berechnete Temperaturverteilung im Bauteil (U_{eff} = 25 V, f = 20 kHz, Δs = 4 mm)

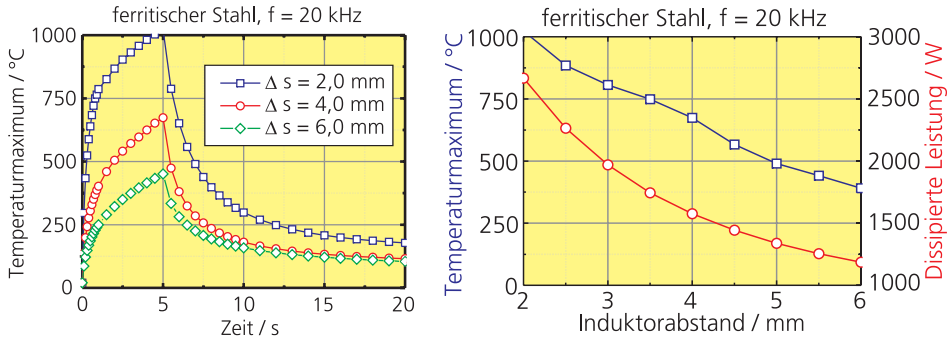


Abb. 3: Berechnete Werte von Temperaturmaximum und Energieeinkopplung in das Bauteil
- Zeitabhängigkeit der Maximaltemperatur für verschiedene Luftspaltbreiten
- Abhängigkeit der nach 5 s erreichten Maximaltemperatur und der eingekoppelten Joule'schen Leistung von der Luftspaltbreite Δs

Lösungsweg

Das durch den Induktorstrom erzeugte Magnetfeld dringt, abhängig von der Wechselstromfrequenz, in eine Randschicht des Werkstücks ein und erzeugt dort Wirbelströme, die wiederum den Induktorstrom modifizieren. Durch Lösung der Maxwell'schen Gleichungen werden das resultierende Magnetfeld, die Wirbelstromdichteverteilung und die lokale Joule'sche Wärmeleistungsdichte als Eingangsgröße für die anschließende Berechnung des zeitabhängigen Temperaturfeldes bestimmt.

Ergebnisse

Eine berechnete Temperaturverteilung für ein rotationssymmetrisches Bauteil aus Einsatzstahl (Abb. 1) ist in Abb. 2 gezeigt, wobei die maximale Vorwärmung im Bereich der Fügestelle durch partielle Abschirmung mit einem magneto-dielektrischem Spezialkunststoff erreicht wird. Bei gegebener Generatorfrequenz (f = 20 kHz) ist die Maximaltemperatur eine Funktion der angelegten Effektivspannung U_{eff} und der Luftspaltbreite Δs zwischen Induktor und Bauteil. Abb. 3 zeigt berechnete Funktionsverläufe für die nach 5 Sekunden Aufheizdauer eingekoppelte Joule'sche Leistung und für die erreichte Maximaltemperatur sowie deren zeitliche Entwicklung bei Variation der Luftspaltbreite. Man beachte die starke Abhängigkeit der Energieeinkopplung von der Induktorposition.

Ansprechpartner

Dr. Achim Mahrle
Tel.: 0351 / 2583 407
achim.mahrle@iws.fraunhofer.de

Diplomarbeiten

T. Hackel
(Technische Universität Dresden)
"*Prozessanalyse von Dünnschichttechnologien und Herstellkostenberechnung*"

C. Kiertscher
(Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD))
"*Laserschneiden und –markieren von Bahnmaterialien*"

M. Knechtel
(Berufsakademie Sachsen - Staatliche Studienakademie Dresden)
"*Entwicklung und Implementierung eines Intrusion-Detection und -Prevention Systems zur Erkennung und Abwehr von gezielten Attacken und anormalen Ereignissen im LAN*"

C. Lunow
(Westsächsische Hochschule Zwickau (FH))
"*Charakterisierung von Laserbohrprozessen in Metallen durch die zeitliche Detektion gestreuten Laserlichts mit mehreren Sensoren*"

S. Mälzer
(Westsächsische Hochschule Zwickau (FH))
"*Mikrobearbeitung von Siliziumwafern mit diodengepumptem frequenzverdreifachtem Nd:YAG-Laser*"

B. Mimler
(Technische Universität Dresden)
"*Prozessorientierte Restruktion eines Fahrzeugbauunternehmens unter marktorientierten, logistischen und fertigungstechnischen Gesichtspunkten*"

K. Strulik
(Berufsakademie Sachsen - Staatliche Studienakademie Dresden)
"*Untersuchungen und Analyse zum Einsatz von Tracking-Systemen bei der Simulation von Anlagen der Lasermaterialbearbeitung in virtuellen Räumen*"

C. Thoma
(Technische Universität Dresden)
"*Einfluss von Handlingsystemen bei nasschemischen Prozessen auf die Randfläche des Wafers*"

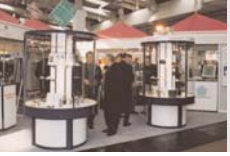
D. Weber
(Hochschule Mittweida (FH))
"*Konstruktion einer flexiblen Maschineneinhausung*"

Dissertationen

S. Braun
(Universität Bielefeld)
"*Gefüge- und Grenzflächenbeschaffenheit von Mo/Si-Multischichten synthetisiert mittels Puls-Laser- und Magnetron-Sputter-Deposition*"

F. Lupp
(Technische Universität Dresden)
"*Gratfreies Microcaving von Molybdän*"

J. Hohage
(Technische Universität Dresden)
"*Synthese von Bornitridschichten mittels PLD-Verfahren*"



Vorlesungen

Vorlesungen am Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik der TU Dresden im Wintersemester 2003 / 2004:
- Prof. Beyer: Fertigungstechnik II (Oberflächen- und Schichttechnik)
- Prof. Schultrich: Dünnschichttechnologie (Sonderwerkstoffe)
- Dr. Leson, Prof. Beyer: Oberflächentechnik / Nanotechnologie
- Prof. Beyer: Rapid Protocoating

Vorlesung am Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik der TU Dresden im Sommersemester 2004:
- Prof. Beyer: Lasergrundlagen / Lasersystemtechnik
- Prof. Beyer: Praktikum Lasersicherheits- und Laserverfahrenstechnik

Vorlesungen am Institut für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik der TU Dresden im Wintersemester 2004 / 2005:
- Prof. Beyer: Laser und Plasmen in der Oberflächen- und Mikrotechnik (Produktionstechnik und Wirtschaftsingenieure)
- Prof. Beyer: Plasmen in der Fertigungstechnik (Mechatronik)
- Prof. Schultrich: Dünnschichttechnologie (Sonderwerkstoffe)
- Dr. Leson, Prof. Beyer: Oberflächentechnik / Nanotechnologie
- Prof. Beyer: Rapid Protocoating

Vorlesung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden:
- Dr. Nowotny, Prof. Schultrich: Lasermaterialbearbeitung
- Dr. Nowotny: Oberflächenveredlungs- und Wärmebehandlungstechnik

Mitarbeit in Gremien

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

Prof. E. Beyer:
Sprecher des Fraunhofer-Verbundes Oberflächentechnik und Photonik

Prof. E. Beyer:
Direktor des Institutes für Oberflächentechnik und Fertigungsmesstechnik IOF der TU Dresden

Prof. E. Beyer:
Vorsitzender der Arbeitsgemeinschaft "Ingenieurwissenschaften" sowie Mitglied des Vorstands der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Lasertechnik WLT e.V.

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:
Kurator der Palucca Schule Dresden - Hochschule für Tanz

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

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

Prof. E. Beyer:
Mitglied des Universitären Zentrums für Luft- und Raumfahrt (UZLR) der TU Dresden

Prof. E. Beyer:
Mitglied des Advisory Board des European Laser Institute (ELI)

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

Prof. B. Brenner:
Mitglied Gutachterausschuss der AiF

Dr. I. Jansen:
Mitglied des Industriearbeitskreises "Intlaskleb" des BMBF

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:
Member of the International Expert Panel for the Nanomat-Program of Norway

Dr. A. Leson:
Mitglied des BMBF-Gutachtergremiums zum Thema Nanotechnologie und Automobilbau

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. A. Leson, Dr. H.-J. Scheibe, Prof. B. Schultrich:,
Arbeitskreis Plasmaoberflächen-technologie

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

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

Prof. 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

Preise des IWS 2004

1. Beste innovative Produktidee

   Herr Dr. Kirchhoff
   "Lebensdaueruntersuchungen an Komponenten von Raketentriebwerken"

   Herr Sonntag
   "Akquisition und Aufbau der Arbeitsrichtung Laseranwendungen in der Biotechnologie"

2. Beste wissenschaftlich-technische Leistung

   Herr Liebscher, Herr Hennig, Herr Dr. Standfuß, Herr Dr. Pollack
   "Aufbau und Inbetriebnahme der XXL-Laserstrahlschweißanlage zum beidseitig-gleichzeitigen Laserstrahlschweißen"

3. Beste wissenschaftliche Leistung eines Nachwuchswissenschaftlers

   Herr Hutsch
   "Möglichkeiten und Grenzen des Lasers bei der Reinigung von metallischem Kunst- und Kulturgut aus Kupfer und Kupferverbindungen"

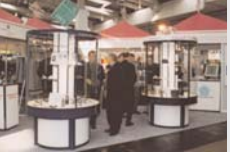
4. Sonderpreis

   Herr Dr. Wiedemann
   "Anwendung der Lasertechnologie in der Restaurierung und Denkmalpflege - insbesondere der Einsatz der Laserreinigung"

   Herr Wittig
   "Anerkennung für besondere Leistungen während der gesamten Anbauphase"

Dr. Kirchhoff erhält den Institutspreis für die beste innovative Produktidee

Herr Wittig erhält eine Anerkennung für sein besonderes Engagement beim Anbau



Demonstration des neuen Anlagenkonzeptes pc_{Pro}® in der Technikumshalle des IWS zur Abschlusspräsentation der BMBF-Projekte

Demonstration im Fraunhofer IWS zur Tagung des Internationalen Rohbauexpertenkreises

Podiumsdiskussion zum 5. Hochleistungsdiodenlaser-Workshop

Besondere Ereignisse

01. Januar 2004
Ausgründung der Arc Precision GmbH aus dem Fraunhofer IWS

03. Juni 2004
Eröffnung der Erweiterungsbauten der vier IZD-Institute

07. - 09. Juni 2004
Laser Summerschool der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Lasertechnik e.V. in Dresden (Mitorganisator: Fraunhofer IWS)

25. Juni 2004
Offizielle Inbetriebnahme der XXL-Laserstrahlschweißanlage

08. Juli 2004
Teilnahme an der Zentralveranstaltung "Leuchtzeichen - Optik & Elektronik" im Rahmen des Jahres der Technik im Internationlen Kongresszentrum Dresden

02. - 04. September 2004
Beteiligung am Ideenpark von Thyssen-Krupp

20. - 21. September 2004
International Open House

23. September 2004
Tagung des Internationalen Rohbauexpertenkreises im IWS

21. - 22. Oktober 2004
5. Workshop "Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern"

09. - 10. November 2004
"Neue Rapid-Technologien auf dem Weg in die Produktion - Erfahrungsberichte und Entwicklungstrends", Abschlusspräsentation der BMBF-Projekte

23. - 24. November 2004
3. Internationales Nanotechnologie-Symposium "Nanofair - Neue Ideen für die Industrie" in Karlsruhe

30. November 2004
5. Fachsymposium Oberflächentechnik im Dortmunder OberflächenCentrum der ThyssenKrupp Stahl AG

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.

26. - 29. Oktober 2004
"Herstellung und Anwendung dünner Schutzschichten"

23. - 24. November 2004
"Sputtern und Vakuumbogenbeschichtung"

07. - 09. Dezember 2004
"Charakterisierung dünner Schichten"

Messebeteiligungen

Messe Learntec 2004 Karlsruhe, 10. - 13. Februar 2004

Unter dem Motto "Wissen & Transfer - Fraunhofer-eQualification" präsentierten sich 11 Institute der Fraunhofer-Gesellschaft in Karlsruhe. Die Arbeitsgruppe Multimedia beteiligte sich in Zusammenarbeit mit anderen Gruppen des IWS zum zweiten Mal an dieser Messe. Vorgestellt wurden an PC-Arbeitsplätzen:

- CD-ROM "Laserlexikon" und CD-ROM "Lasersicherheit",
- eLearning-Produkte: "Hybride Laserstrahlschweißverfahren" und "Beschichtungstechnik".

Hannover-Messe Industrie 2004, 19. - 24. April 2004

Im Rahmen des Gemeinschaftsstandes "Laser Technology" präsentierte das IWS in Halle 15 - 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 und Linde AG München wurden Ergebnisse gemeinsamer Forschungsprojekte gezeigt.

Aller zwei Jahre, so auch im Jahr 2004, bildet die Oberflächentechnik einen Themenschwerpunkt der Hannover-Messe. Aus diesem Anlass präsentierte das IWS im Rahmen des VDI-Gemeinschaftsstandes "SurfPlaNet" auf einer 50 m² großen Fläche in der Halle 5 neueste Ergebnisse angewandter Forschung auf dem Gebiet der Oberflächentechnik. Gezeigt wurden diamantähnliche Kohlenstoffschichten Diamor® für Zerspanungs- und Umformwerkzeuge, der neue LaserArc®-Modul mit einer Beschichtungslänge von 400 mm, das neue Infrarot-Spektrometer für große Proben IRspecXL und die Verfahrenskombination des laserunterstützten Plasmaspritzens zur Erzeugung haftfester Schichten mit sehr hoher Produktivität. Neben dieser IWS-Präsentation zeigte das Nanotechnologie-Kompetenzzentrum "Ultradünne funktionale Schichten", welches vom IWS koordiniert wird, Anwendungen und Produkte der Nanotechnologie, die von den Mitgliedern des Zentrums zur Verfügung gestellt wurden.

Gleichzeitig beteiligte sich das Fraunhofer IWS Dresden im Rahmen der Fraunhofer-Allianz "Transparenter Kratzschutz" am Fraunhofer-Gemeinschaftsstand Oberflächentechnik in Halle 5.

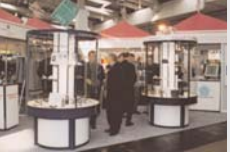
Die Richtigkeit der Entscheidung, die Präsentationen des IWS auf der Hannover-Messe 2004 zu erweitern, wurde durch ca. 240 relevante Kundenkontakte bestätigt.

Präsentation des Fraunhofer IWS auf der Hannover-Messe 2004

Internationale Luft- und Raumfahrtausstellung Berlin 2004, 10. - 16. Mai 2004

Im Rahmen des Gemeinschaftsstandes des Kompetenzzentrums Luft- und Raumfahrttechnik Sachsen / Thüringen e.V. beteiligte sich das IWS erstmals an der ILA auf dem Gelände des Schönefelder Flughafens. Vorgestellt wurden Technologieentwicklungen zum Laserstrahlschweißen von Flugzeugrumpfstrukturen, der Aufbringung hitzebeständiger Schichten sowie der Charakterisierung der mechanischen, thermischen und tribologischen Eigenschaften von laserbehandelten luftfahrtrelevanten Bauteilen.

Besuch des Bundesstaatssekretärs Staffelt am Stand des Kompetenzzentrums Luft- und Raumfahrttechnik Sachsen / Thüringen e.V. während der Internationalen Luft- und Raumfahrtmesse Berlin



Reger Gedankenaustausch am Stand des Fraunhofer IWS auf der Materialica 2004

Präsentation des Fraunhofer IWS auf der Materialica 2004

Erfahrungsaustausch auf dem Stand des Fraunhofer IWS auf der Euroblech 2004

Materialica München 2004, 21. - 23. September 2004

Im Rahmen des Gemeinschaftsstandes "Forschung für die Zukunft" präsentierte die Gruppe Klebtechnik neueste Ergebnisse zur Klebflächenvorbehandlung mittels Plasma- und Lasertechnik. Vorteile dieser Methoden sind die berührungslose und partielle Fügeteilbehandlung, eine gute Integrierbarkeit in Produktionsprozesse sowie die ökologische Unbedenklichkeit. Es wurden Exponate zur partiellen Vorbehandlung von Magnesium, Aluminium und faserverstärkten Kunststoffen aus den Bereichen der Automobil- und Luftfahrtbranche gezeigt.

Powder Metallurgy World Congress and Exhibition 2004 Wien, 17. - 21. Oktober 2004

Die Abteilung Thermische Beschichtungsverfahren präsentierte ihr Leistungsspektrum mit den Schwerpunkten Thermisches Spritzen, Lasersauftragschweißen und MELATO®-Technologie.

Euroblech 2004 Hannover, 26. - 30. Oktober 2004

Auf der Internationalen Technologiemesse für Blechbearbeitung Euroblech 2004 beteiligte sich das IWS zum zweiten Mal. Gezeigt wurden neue schweißtechnologische Lösungen für die Verwendung der Leichtbauwerkstoffe Aluminium und Magnesium (u. a. laserstrahlgeschweißter Landeklappendemonstrator für Flugzeuge, neuartige Al-Leichtbautür für PKW) sowie neue Verfahren zum Verschweißen höchstfester Karosseriefeinbleche. Zweiter Schwerpunkt war das MELATO®-Verfahren zur schnellen Herstellung von Umformwerkzeugen, wo erstmals eine durchgängige Automatisierungslösung für das Schneiden, Paketieren und Fügen von Stahlblech-Ausschnitten präsentiert wurde. Es konnten viele neue Kontakte zu Anwendern aufgebaut werden.

Parts2clean Friedrichshafen, 26. - 28. Oktober 2004

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 Lösemittel bzw. anderweitige Reinigungsmedien. Am Beispiel der Abreinigung von Kühl- und Schmierstoffresten sowie von Konservierungsmitteln im Fügestellenbereich vor dem Laserstrahlschweißen wurde die Lösung vorgestellt.

Das Fraunhofer IWS stellte außerdem eine Messmethode der FTIR-Spektroskopie vor, die berührungslos und zerstörungsfrei arbeitet und keinerlei Probenpräparation erfordert. Die Messung kann bei Bedarf in bestehende Prozesse integriert und damit auch für die Online-Qualitätskontrolle eingesetzt werden. Die FTIR-Spektroskopie ist auch an großen Bauteilen und Flächen problemlos anwendbar. Mit der Methode können sowohl organische als auch anorganische Verschmutzungen nahezu unabhängig vom Untergrund detektiert werden. Interessant ist sie für alle Branchen, in denen Bauteile gereinigt und die Ergebnisse kontrolliert werden müssen.

Denkmal 2004 Leipzig, 27. - 30. Oktober 2004

Das Laserstrahlreinigen von kulturhistorisch wertvollen Objekten aus Metall, Holz und Stein wurde auf dieser europäischen Branchenmesse für Denkmalpflege und Stadterneuerung gezeigt. Präsentiert wurde beispielsweise ein lasergereinigter Messing-Putto aus den Herrenhäuser Gärten in Hannover, eine Arbeit im Rahmen eines von der DBU geförderten Forschungsprojektes.

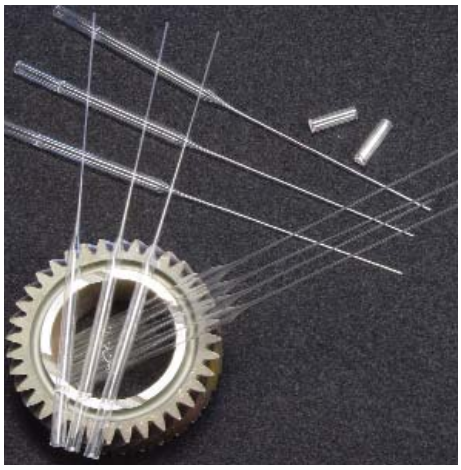
GlassTec 2004 Düsseldorf, 08. - 13. November 2004

Das Fraunhofer IWS nahm in diesem Jahr an einem Gemeinschaftsstand zusammen mit den beiden großen Laserherstellern Coherent Inc. und Lambda Physik an der Glasmesse "GlassTec" in Düsseldorf teil. Das Interesse der in diesem Jahr ca. 54 000 äußerst zahlreichen Besucher lag zu einem großen Teil auf den neuen Themengebieten "Lasertechnologie" und "Dünne Spezialgläser", zu denen auch das Fraunhofer IWS mit einer Anlage zur schädigungsfreien Markierung von Glas auf Basis eines scannergekoppelten Excimerlasers präsent war.

Darüber hinaus wurden auf dem Stand der Firma KL-Beschläge Ergebnisse der Gemeinschaftsforschung unseres Instituts mit dieser Firma, der Firma Delo und dem Institut für Baukonstruktion der TU Dresden auf dem Gebiet des konstruktiven Glasbaus gezeigt.

Euromold 2004 Frankfurt/Main, 01. - 04. Dezember 2004

An der Branchenmesse zum Formen-, Modell- und Werkzeugbau sowie zur Gießereitechnik beteiligte sich das IWS bereits zum neunten Mal. Auf dem Fraunhofer-Gemeinschaftsstand der Allianz Rapid-Prototyping 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 Präge- und Umformwerkzeuge wurden nach dem Prinzip des LOM-Verfahrens (Laminated Object Manufacturing) hergestellt. Zentrales Objekt des Fraunhofer-Standes war die kleine Anlage pc_{Pro}® für ein hochgenaues Rapid-Prototyping von Gussteilen, die erstmals der Öffentlichkeit präsentiert wurde. Durch die Integration des Gießverfahrens in eine Fräsmaschine ist die Fertigung der Werkzeughälfte und unmittelbar im Anschluss die Komplettbearbeitung des Bauteiles in einer Aufspannung möglich. Der hohe Automatisierungsgrad ermöglicht eine erhebliche Produktivitätssteigerung bei hoher Flexibilität und Bauteilqualität. Anwendungspotenzial für die neue Verfahrenskombination wird in allen Bereichen gesehen, wo Kunststoffteile zum Einsatz kommen.



Vom Fraunhofer IWS auf der GlassTec 2004 präsentiert: laserstrahlgeschnittene Blitzlampen-Rohlinge

Hannover-Messe 2004: Oberflächentechnik als Grundlage für innovative Anwendungen

Patentanmeldungen

[P1] E. Beyer, L. Morgenthal, V. Fleischer, A. Klotzbach

"Vorrichtung und Verfahren zur Bearbeitung von Werkstücken mittels Laserstrahlung"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 045 408.6

[P2] B. Brenner, S. Bonß, F. Tietz, J. Kaspar, W. David

"Verfahren zur Herstellung von verschleißbeständigen und ermüdungsresistenten Randschichten in Titan-Legierungen und damit hergestellte Bauteile"

Anmelde-Az.: 10 2004 033 342.4/24

[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.: EP 04000743.7

[P4] B. Brenner, B. Winderlich, J. Standfuß, J. Schumacher, H. Brenneis, W. Zink

"Leichtbau-Strukturbauteil insbesondere für Flugzeuge und Verfahren zu seiner Herstellung"

Anmelde-Az.: JP 2004-9796

[P5] B. Brenner, B. Winderlich, J. Standfuß, J. Schumacher, H. Brenneis, W. Zink

"Lightweight structural component in particular for aircraft and method for its production"

Anmelde-Az.: US 10/757,419

[P6] B. Brenner, B. Winderlich, J. Standfuß, J. Schumacher, H. Brenneis, W. Zink

"Lightweight structural component in particular for aircraft and method for its production"

Anmelde-Az.: CA 2,455,791

[P7] I. Dani, W. Grählert, G. Mäder, V. Hopfe

"Vorrichtung und Verfahren zur optischen Detektion von in Abgasen chemischer Prozesse enthaltenen Stoffen"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 028 420.2-52

[P8] R. Dietsch, H. Borrmann, T. Holz

"Monochromatisierende röntgenoptische Anordnung"

Anmelde-Az.: EP 044000400.4

[P9] T. Himmer, A. Techel

"A device and a method for manufacturing three-dimensional component parts"

Anmelde-Az.: US 10/794,936

[P10] G. Mäder, V. Hopfe, D. Rogler

"Modul und Verfahren für die Modifizierung von Substratoberflächen bei Atmosphärenbedingungen"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 015 216.0-45

[P11] L. Morgenthal, A. Klotzbach, T. Schwarz, J. Hauptmann, R. A. Gnann, A. van Spankeren

"Vorrichtung und Verfahren für eine Bearbeitung großflächiger Bearbeitungsbereiche von Werkstücken mittels Laserstrahlung"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 007 541.7-34

[P12] L. Morgenthal, T. Schwarz, F. Kretzschmar, D. Pollack, S. Thalheim

"Vorrichtung und Verfahren zur Bestimmung des Abstandes zwischen einer Referenzebene und einer Substratoberfläche"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 002 253.4-54

[P13] D. Rogler, G. Mäder, V. Hopfe

"Verfahren und Vorrichtung zur Ausbildung dünner Schichten aus Siliziumnitrid auf Substratoberflächen"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 015 217.9-45

[P14] A. Techel, R. A. Gnann

"Metallbauelement"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 032 084.5

[P15] A. Techel, R. A. Gnann

"Metallische Verbundbauteile"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 032 088.8

[P16] A. Techel, T. Himmer

"Verbundelement aus Metall, mit mindestens einem Temperierkanal"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 032 085.5

[P17] C. Wallenhauer

"Schaltungsanordnung zur Reduzierung von Messfehlern analoger pulsförmiger Messsignale eines Detektors"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 004 260.8-52

[P18] V. Weihnacht, B. Schultrich, P. Siemroth, T. Mühl

"Element mit strukturierter Oberfläche sowie Verfahren zu seiner Herstellung"

Anmelde-Az.: DE 10 2004 011 363.7-54

Patenterteilungen

[P19] E. Beyer, S. Nowotny, S. Scharek

"Method for producing shaped bodies or applying coatings"

Veröffentlichungs-Nr.: US 6,744,005

[P20] B. Brenner, V. Fux

"Verfahren zur Erzeugung von verschleißbeständigen Randschichten mittels Laser"

Veröffentlichungs-Nr.: EP 1285 719 B1

[P21] T. Himmer

"Verfahren zum Fügen von planaren, übereinander angeordneten Laminaten oder Laminatpaketen oder Laminarbauteilen durch Laserstrahlschweißen"

Veröffentlichungs-Nr.: DE 102 11 511 C1

[P22] T. Himmer, A. Uelze

"Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von Laminatbauteilen"

Veröffentlichungs-Nr.: DE 102 10 420 B4

[P23] L. van Loyen, T. Böttger, S. Braun, H. Mai

"Vorrichtung zur Erzeugung eines gepulsten Plasmas innerhalb einer Vakuumkammer mittels eines Festkörpertargets, mit mindestens einer Debris-Blende"

Veröffentlichungs-Nr.: DE 102 33 567 C2

[P24] H. Mai, S. Braun

"Optisches System mit einer Strahlungsquelle für elektromagnetische Strahlung im extremen ultravioletten Bereich und einem reflektierenden Element"

Veröffentlichungs-Nr.: DE 102 21 116 B3

[P25] H.-J. Scheibe, C.-F. Meyer

"Electric resistance element, which can be electromechanically regulated"

Veröffentlichungs-Nr.: US 6,788,187

Marken

[P26] *"IRspec XL"*

Anmelde-Az.: DE 3705266

[P27] *"pcPro"*

Anmelde-Az.: US 78/481,473
Veröffentlichungs-Nr.: DE 304 17 000

[P28] *"spARC"*

Veröffentlichungs-Nr.: DE 304 38 694

[L01] L.-M. Berger

"Hardmetal Coatings by Thermal Spraying - Compositions, Processes, Properties and Applications"

Euro PM2004, World Powder Metallurgy Congress (2004)

[L02] L.-M. Berger

"Titanium Oxide - New Opportunities for an Estabilished Coating Material"

Thermal Spray Solutions - ITSC 2004, Part: Photocatalytic Materials (2004)

[L03] L.-M. Berger, M. Woydt, S. Zimmermann, H. Keller, G. Schier, R. Enzl, S. Thiele

"Tribological Behavior of HVOF-Sprayed Cr_3C_2-NiCr and TiC-Based Coatings Under High-Temperature Dry Sliding Conditions"

Thermal Spray Solutions - ITSC 2004, Part: HVOF-Processes and Materials (I) (2004)

[L04] E. Beyer

"Latest Developments in Transmission Laser Welding"

Automotive Laser Application Workshop - ALAW (2004)

[L05] E. Beyer

"Latest Developments in Transmission Laser Welding"

12th Annual Automotive Laser Application Workshop - ALAW (2004)

[L06] S. Beyer, S. Ferrara, J. Hauptmann, H. Janssen, G. Kirchhoff, J. Rösing, S. Schmidt

"Metall-Keramik-Verbindungstechniken im Bereich Raumfahrt-Antriebe"

Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren (2004)

[L07] E. Beyer, H.-J. Scheibe, B. Schultrich, V. Weihnacht

"Deposition Technology, Tribological Properties and Applications of Superhard Amorphous (ta-C) Carbon Films"

THE Coatings (2004) S. 79-91

[L08] E. Beyer, H.-J. Scheibe, B. Schultrich, V. Weihnacht

"Laser-assisted deposition of superhard carbon coatings"

The Industrial Laser User, Issue 36 (2004)

[L09] S. Bonß, B. Brenner, H.-J. Scheibe, E. Beyer

"Laser Gas Alloying of Titanium - Process Technology and Wear Test Results"

10th World Conference Titanium - Ti-2003 (2004) S. 993-1000

[L10] S. Braun, B. Bendjus, T. Foltyn, M. Menzel, J. Schreiber, A. Leson

"Smoothing of Substrate Roughness by Carbon-Based Layers Prepared by Pulsed Laser Deposition (PLD)"

Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications II (Proc. of the SPIE 5533) (2004) S. 75-84

[L11] S. Braun, B. Bendjus, T. Foltyn, M. Menzel, J. Schreiber, D. Weißbach

"Carbon Buffer Lasers for Smoothing Substrates of EUV and X-Ray Multilayer Mirrors"

Testing, Reliability, and Application of Micro- and Nano-Material Systems II (Prof. of the SPIE 5392) (2004) S. 132-140

[L12] S. Braun, T. Böttger, T. Foltyn, L. van Loyen, A. Leson

"High-Reflection Optics and High-Precision Metrology for Extreme Ultraviolet (EUV) Light"

Nanofair (2004)

[L13] B. Brenner, E. Beyer, S. Nowotny

"Overview of Hybrid Technology"

1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Melbourne 19.-21. April 2004, Tagungsband

[L14] B. Brenner, J. Standfuß, A. Jahn, D. Dittrich, A. Zwick

"Neue verfahrenstechnische Lösungen zum Laserstrahlschweißen für den Karosseriebau"

22. Fachtagung "Prozesskette Karosserie", Dresden, 21.-23. September 2004, Tagungs-CD

[L15] B. Brenner, J. Standfuß, L. Morgenthal, D. Dittrich, V. Fux, B. Winderlich, H. Brenneis, W. Zink, J. Hackius, J. Held, W. Schwabe

"Neue technologische Aspekte des Laserstrahlschweißens von Flugzeugstrukturen"

Schweißen und Löten im Luft- und Raumfahrzeugbau: moderne Anwendungen und Werkstoffe in Neufertigung und Instandhaltung, DVS-Berichte, DVS-Verlag Düsseldorf 299 (2004) S. 19-24

[L16] C. Casiraghi, A. C. Ferrari, J. Robertson, R. Ohr, M. v. Gradowski, D. Schneider, H. Hilgers

"Ultra-Thin Carbon Layer for High Density Magnetic Storage Devices"

Diamond and Related Materials 13 (2004) 4-8, S. 1480-1485

[L17] D. H. C. Chua, K. B. K. Teo, T. H. Tsai, W. I. Milne, D. Sheeja, B. K. Tay, D. Schneider

"Correlation of Surface, Mechnical and Microproperties of Tetrahedral Amorphous Carbon Films Deposited under Different Magnetic Confinement Conditions"

Applied Surface Science 221 (2004) 1-4, S. 455-466

[L18] T. Chudoba, M. Griepentrog, A. Dück, D. Schneider, F. Richter

"Young's Modulus Measurements on Ultra-Thin Coatings"

Journal of Materials Research 19 (2004) 1, S. 301-304

[L19] D. Deutscher, J. Hauptmann

"Rutschhemmende Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge"

Bundesinnungsverband des Deutschen Steinmetz-, Stein- und Holzbildhauerhandwerks, Vortragsreihe, BBZ Mainz (2004)

[L20] D. Deutscher, J. Hauptmann

"Rutschhemmende Ausrüstung polierter Fußbodenbeläge"

Bundesinnungsverband des Deutschen Steinmetz-, Stein- und Holzbildhauerhandwerks, Vortragsreihe, BBZ Ingolstadt (2004)

[L21] R. Dörfler, I. Jansen, J. Müller, E. Beyer

"Adhesives for specific requirements in production of MST-components"

In: G. Köhler et. al. (eds), Production Techniques for Application specific Microsensors, Shaker Verlag, Aachen, (2004) S. 206

[L22] T. Foltyn, S. Braun, P. Gawlitza, A. Leson, K. Bergmann, W. Neff, K. Walter

"Design and Development of an Optical System for EUV-Microscopy"

Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications II (Proc. of the SPIE 5533) (2004) S. 37-46

[L23] R. Franke, B. Brenner, V. Ulbricht, W. Zinke

"Schadenstoleranzverhalten von lasergeschweißten integralen Rumpfstrukturen"

DVM-Bericht 236 "Fortschritte der Bruch- und Schädigungsmechanik", S. 11-26 (2004)

[L24] P. Gawlitza

"Innenbeschichtung von EUV-Kollektoren"

Photonik 5 (2004)

[L25] P. Gawlitza, K. Jacob, T. Sebald, S. Beyer, A. Leson

"Tailored Internal Coating of Components by PLD and Pulsed Laser Evaporation"

Applied Physics A 79 (2004) 4-6, S. 1043-1046

[L26] M. Guenther, G. Gerlach, G. Suchaneck, D. Schneider, B. Wolf, A. Deineka, L. Jastrabik

"Physical Properties and Structure of Thin Conducting Ion-Beam Modified Polymer Films"

Macromol. Symp., 212 (2004) S. 245-250

[L27] J. Hannweber, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"Integrated Laser System for Heat Treatment with High Power Diode Laser"

23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics", San Francisco, USA, 4.-7. Oktober 2004, Conference Proceedings

[L28] J. Hannweber, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"Prozesskette Integrierte Härterei - Laserstrahlhärten als Facharbeiterprozess"

5. Workshop "Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern" Dresden, 21.-22. Oktober 2004, Tagungs-CD

[L29] J. Hannweber, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"Ortsaufgelöst messendes Temperaturerfassungssystem für die Lasermaterialbearbeitung"

5. Workshop "Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern" Dresden, 21.-22. Oktober 2004, Tagungs-CD

[L30] J. Hauptmann, A. Klotzbach, U. Stamm

"Laserreinigung verbessert Laserschweißen von Getriebebauteilen"

Photonik, 3 (2004) S. 16

[L31] J. Hauptmann, C. Kündscher

"Rutschhemmende Ausrüstung vor Ort mittels mobiler Laseranlage"

Architektur, 7 (2004) S. 10 - 12

[L32] T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny

"Metal Laminated Tooling - A Quick and Flexible Tooling Concept"

Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (2004)

[L33] A. Jahn, B. Brenner, B. Winderlich

"Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen von Strukturen aus höherfesten Feinblechen"

Strahltechnik (2004) S. 46-52

[L34] A. Jahn, B. Winderlich, A. Zwick, R. Imhoff, B. Brenner

"Laserstrahlhybridschweißen schwingend belasteter Bauteile aus dem hochfesten Feinkornbaustahl S1100QL"

DVS-Berichte, DVS-Verlag Düsseldorf 232 (2004) S. 283-288

[L35] I. Jansen, D. Schneider, E. Beyer

"Laser-acoustic method for determining Young`s modulus of bondlines"

7th European Adhesion Conference, Freiburg, 5.-9. September 2004, S. 427

[L36] I. Jansen, D. Schneider, E. Beyer

"Anwendung der LAwave-Methode zur Charakterisierung von Klebschichten"

18. International Symposium, Swiss Bonding 04, 17.-19. Mai 2004, Rapperswil, Schweiz, P5

[L37] I. Jansen, H. Wust, R. Heymann, E. Beyer

"Vorbehandlung vor dem Kleben mit gepulster Bogenentladung"

18. International Symposium, Swiss Bonding 04, 17.-19. Mai 2004, Rapperswil, Schweiz, P6

[L38] 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 Titanium - Ti-2003 (2004) S. 949-956

[L39] 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 Thoughness"

Surface and Coatings Technology 179 (2004) 1, S. 39-46

[L40] D. Klaffke, H.-J. Scheibe, V. Weihnacht

"Tribological Characterisation of Carbon Coatings at Room Temperature; Effect of Counter-Body Material and Humidity"

THE Coatings (2004) S. 331-340

[L41] U. Klotzbach, S. Mälzer, T. Kuntze, M. Panzner, M. Dötschel, F. Sonntag, E. Beyer

"Influence of Gas on Cutting Silicon with Solid State Laser"

Photon Processing in Microelectronics and Photonics III (Proc. of the SPIE 5339) (2004) S. 488-493

[L42] T. Kuntze, U. Klotzbach, E. Beyer

"Excimer Laser Turning Flexible: Variable Marking with Micromirror Devices"

Photon Processing in Microelectronics and Photonics III (Proc. of the SPIE 5339) (2004) S. 518-523

[L43] M. Leonhardt, D. Schneider, J. Kaspar, S. Schenk

"Characterizing the Porosity in Thin Titanium Films by Laser-Acoustics"

Surface and Coatings Technology 185 (2004) 2-3, S. 292-302

[L44] V. A. Lopota, G. A. Turichin, E. A. Valdaitseva, E. Beyer, S. Völlmar

"Maragoni Convection in the Rear Part of Melting Pool in Keyhole Laser Welding"

Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies 2003 (Proc. of the SPIE 5399) (2004) S. 204-211

[L45] L. van Loyen, T Böttger, S. Schädlich, S. Braun, T. Foltyn, A. Leson, F. Scholze, S. Müllender

"Laboratory LPP EUV Reflectometer working with non-polarized radiation"

Applied Surface Sience (2004)

[L46] A. Mahrle, D. Lepski, E. Beyer

"Controlling Weld Geometry During Heat Conduction Mode Laser Beam Welding by Surface Active Elements"

17th Meeting on Mathematical Modelling of Materials Processing with Lasers - M4PL17 (2004)

[L47] S. Martens, C. Kleemann, V. Weihnacht, L.-M. Berger, R. Zieris, I. Schulz

"Ceramic Coatings"

COST 532 Conference, Triboscience and Tribotechnology (2004) S. 240-249,

[L48] 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"

Applied Physics A 79 (2004) 4-6, S. 1039-1042

[L49] M. Moss, T. Böttger, S. Braun, T. Foltyn, A. Leson

"Stress Compensation of a Mo/Si/C Highly Reflective Multilayer by Means of an Optimised Buffer laser and Heat Treatment"

Thin Solid Films (2004) im Druck

[L50] A. Novy, G. Wiedemann

"Entfernen von Kontaminationen - Zur Reinigung in der Lebensmittelbranche - Studie der Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik"

Fleischwirtschaft 84 (2004) 2, S. 35 - 38

[L51] S. Nowotny

"Oberflächenbeschichten und formgebendes Auftragschweißen mit laserbasierten hybriden Fertigungsverfahren"

Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004, ISBN 3-8167-6656-0

[L52] S. Nowotny

"Oberflächenschutz und Werkzeugreparaturen durch Laserstrahl-Präzisionsauftragschweißen"

Beiträge der Hochschule Pforzheim Nr. 107 (2004) S. 41-53

[L53] S. Nowotny, S. Scharek, F. Kempe, A. Schmidt

"Laserstrahl-Präzisionsauftragschweißen: industrielle Lösungen für die Reparatur und schnelle Formänderungen von Werkzeugen"

Tagungsband 3D Erfahrungsforum Formen- und Werkzeugbau (2004) S. 229-240

[L54] H. Paschke, T. Stucky

"Großflächen-Kohlenstoffbeschichtung am Dortmunder OberflächenCentrum"

Kohlenstoffschichten - tribologische Eigenschaften und Verfahren zu ihrer Herstellung (2004) Beitrag 5

[L55] L. H. Phung, H. Kleinert, I. Jansen, R. Häßler, E. Jähne

"Improvement in strength of the aluminium / epoxy bonding joint by modification of the interphase"

Macromol. Symp. "Reactive Polymers" (2004), S. 210, 349

[L56] K.-H. Richter, S. Orban, S. Nowotny

"Laser Cladding of the Titanium Alloy Ti6242 to Restore Damaged Blades"

Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO (2004)

[L57] S. Schmidt, S. Beyer, J. Hauptmann, G. Kirchhoff, S. Ferrara, H. Janssen, J. Rösing

"Metall-Keramik-Verbindungstechniken im Bereich Raumfahrt-Antriebe"

Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweissen (2004) S. 118-125

[L58] J. Schreiber, S. Braun, A. Gatto, H. Schenk

"Improved Mechanical Properties of Metallic Micro-Structures"

Testing, Reliability, and Application of Micro- and Nano-Material Systems II (Proc. of the SPIE 5392) (2004) S. 114-122

[L59] B. Schultrich, S. Völlmar, D. Römer

"Process Simulation of Industrial Vacuum Arc Deposition"

THE Coatings (2004) S. 309-318

[L60] H. Schulz, H.-J. Scheibe, P. Siemroth, B. Schultrich

"Pulsed Arc Deposition of Super-Hard Amorphous Carbon Films"

Applied Physics A 78 (2004) 5, S. 675-679

[L61] H. Schulz, V. Weihnacht, H.-J. Scheibe, B. Schultrich

"Verschleißuntersuchungen an superharten amorphen Kohlenstoffschichten"

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 35 (2004) 10, im Druck

[L62] B. Schumacher, S. Wischmann, A. Zwick

"Verbesserte Laserschweißeignung durch neuartige Zn-Mg Überzüge mit geringer Dicke"

Fügetechnologien im Fahrzeug-Rohbau (2004)

[L63] M. Seifert, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"High Power Laser Beam Scanning in Multi-Kilowatt Range"

23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, San Francisco, USA, 4.-7. Oktober 2004, Conference Proceedings

[L64] M. Seifert, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"Dynamische Strahlformung für Hochleistungs-Diodenlaser bis 4 kW"

5. Workshop "Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern" Dresden, 21.-22. Oktober 2004, Tagungs-CD

[L65] A. Skopp, N. Kelling, M. Woydt, L.-M. Berger

"Thermally Sprayed TiO_{2-x}-Coatings Under Mixed Lubrication and Unlubricated Sliding Conditions"

Tribologie-Fachtagung (2004)

[L66] J. Standfuß, A. Klotzbach, A. Jahn, A. Mahrle, B. Brenner

"Verfahrens- und systemtechnische Aspekte zum Laserstrahlschweißen für den Fahrzeugbau"

IIR-Fachforum "Fügetechnologien im Fahrzeugrohbau" (2004)

[L67] A. Techel

"Lamellierte Werkzeuge in Formen- und Werkzeugbau - Metal Laminated Tooling - Prozesskette zur schnellen Werkzeugfertigung (MELATO)"

wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 11-12, im Druck

[L68] P. Thomsen-Schmidt, K. Hasche, G. Ulm, K. Herrmann, M. Krumrey, G. Ade, J. Stümpel, I. Busch, S. Schädlich, A. Schindler, W. Frank, D. Hirsch, M. Procop, U. Beck

"Realization and Metrological Characterization of Thickness Standards below 100 nm"

Applied Physics A 78 (2004) 5, S. 645-649

[L69] F.-L. Toma, G. Bertrand, D. Klein, L.-M. Berger, S. Thiele

"Photocatalytic Properties of Coatings Sprayed from TiO_x and $Ti_{n-2}Cr_2O_{2n-1}$ powders by APS and VPS"

Thermal Spray Solutions - ITSC 2004, Part: Photocatalytic Materials (2004)

[L70] M. A. Uusitalo, R. Backman, L.-M. Berger, P. M. J. Vuoristo, T. A. Mäntylä

"Stability of Carbides in Chlorine-Containing High-Temperature Environments"

Euro Ceramics VIII, Part 1 (2004) S. 497-500

[L71] V. Weihnacht, H. Schulz, B. Schultrich

"Tetraedrisch koordinierter amorpher Kohlenstoff - Herstellung und Eigenschaften"

Kohlenstoffschichten - tribologische Eigenschaften und Verfahren zu ihrer Herstellung (2004) Beitrag 3

[L72] G. Wiedemann, M. Schulz u.a.

"Einsatz des Laserstrahlreinigens bei der Restaurierung einer mittelalterlichen Bohlenstube im Tetzelhaus zu Pirna"

Die Bohlenstube des Tetzelhauses in Pirna, Baugeschichte und Restaurierung. Herausgeber: J. Möser u. K. Milde, ISBN 80-86067-83-1

[L73] B. Wolf, A. Richter, V. Weihnacht

"Differential and Integral Hardness - New Aspects of Quantifying Load-Depth-Data in Depth-Sensing Nanoindention Experiments"

Surface and Coatings Technology 183 (2004) 2-3, S. 141-150

[L74] M. Woydt, A. Skopp, N. Kelling, L.-M. Berger

"Tribological Characterization of Titanium Suboxide Coatings Prepared by VPS Spraying"

Tribology of Surface Layers and Coatings (2004) S. 1-12

[L75] H. Wust, I. Jansen, E. Beyer

"Vorbehandlung von Magnesium mit Laserstrahlung"

18. International Symposium, Swiss Bonding 04, 17.-19. Mai 2004, Rapperswil, Schweiz, P4

[L76] R. Zieris, G. Langner, L.-M. Berger, S. Nowotny, E. Beyer

"Investigation of AlSi Coatings Prepared by Laser-Assisted Atmospheric Plasma Spraying of Internal Surfaces of Tubes"

Thermal Spray Solutions - ITSC 2004, Part: Innovative Equipment and Process Technology (V) (2004)

[L77] R. Zieris, A. Schmidt

"Off-Line Programming for Spraying and Laser Cladding of Three-Dimensional Surfaces"

Thermal Spray Solutions - ITSC 2004, Part: Economics and Quality (2004)

[T01] M. Becker, H. Beese, T. Schuelke

"Thin Film Temperature Sensor Development on Cutting Tools for in-situ Temperature Measurements"

47th Annual SVC Technical Conference and Smart Materials Symposium, Dallas / Texas (USA), 24.-29. April 2004

[T02] L.-M. Berger

"Hardmetal Coatings by Thermal Spraying - Compositions, Processes, Properties and Applications"

Powder Metallurgy World Congress & Exhibition - PM 2004, Wien (A), 17.-21. Oktober 2004

[T03] L.-M. Berger

"Titanium Oxide - New Opportunities for an Established Coating Material"

International Thermal Spray Conference & Exhibition ITSC 2004, Osaka (J), 10.-12. Mai 2004

[T04] L.-M. Berger, M. Woydt, S. Zimmermann, H. Keller, G. Schwier, R. En□l, S. Thiele

"Tribological Behavior of HVOF-Sprayed Cr_3C_2-NiCr and TiC-Based Coatings"

COST 532 Joint Working Group Meeting, Brussels (B), 19.-20. Februar 2004

[T05] L.-M. Berger, M. Woydt, S. Zimmermann, H. Keller, G. Schwier, R. En□l, S. Thiele

"Tribological Behavior of HVOF-Sprayed Cr_3C_2-NiCr and TiC-Based Coatings under High-Temperature Dry Sliding Conditions"

4th International Tribology Conference, Prag (CZ), 17.-18. Juni 2004

[T06] L.-M. Berger, R. Zieris, C. Kleemann, I. Schulz, S. Martens, R. En□l

"Evaluation of applicability of thermally sprayed hardmetal coatings for surface protection of gearwheels"

18th International Confertence on Surface Modification Technologies, SMT18 Dijon (F), 15.-17. November 2004

[T07] J. Berthold, W. Hentsch, H. Hilgers, P. Siemroth, Wenzel, Köbernick

"Industrial precision deposition for microelectronics and generation disk"

München (D), 19.-23. April 2004

[T08] J. Berthold, P. Siemroth, W. Hentsch, H. Hilgers, T. Schuelke, S. Seifried

"Industrial Precision for Microelectronics and Next Generation Hard Disk (Invited Presentation)"

47th Annual SVC Technical Conference and Smart Materials Symposium, Dallas / Texas (USA), 24.-29. April 2004

[T09] E. Beyer

"Anwendungstrends: Remote- und Hybridschweißen"

Open House Rofin-Sinar Laser GmbH, Hamburg (D), 20. April 2004

[T10] E. Beyer

"High power laser applications from the physical basics to industrial applications"

Michigan State University Seminar, Lansing / MI (USA), 23. März 2004

[T11] E. Beyer

"High power laser machining: Applications and trends in Europe"

PhAST conference, San Francisco / CA (USA), 19. Mai 2004

[T12] E. Beyer

"Lasertechnik: Zur Technischen Nutzung des Lichts in Vergangenheit und Zukunft"

Veranstaltung "Leuchtzeichen - Elektronik & Optik", anlässlich der "Tage der Technik in Dresden", Dresden (D), 08. Juli 2004

[T13] E. Beyer

"Latest Developments in Transmission Laser Welding"

Automotive Laser Application Workshop ALAW 2004, Plymouth / MI (USA), 09. März 2004

[T14] E. Beyer, S. Bonß, J. Hannweber, B. Brenner

"Integrated Laser System for Heat Treatment with High Power Diode Laser"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / CA (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T15] E. Beyer, S. Bonß, U. Karsunke, K.-H. Richter

"Monitoring of High Power Diode Laser Sheet Metal Welding"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / CA (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T16] E. Beyer, H. Scheibe, B. Schultrich, V. Weihnacht

"Deposition technology, tribological properties and application of superhard amorphous (ta-C) carbon films"

4th International Conference 'THE coatings', Erlangen (D), 05.-07. April 2004

[T17] T. Böttger

"Combination of Parallel Beam X-Ray Mirrors with Crystall Monochromators for Improved Angular Resolution"

Bruker AXS Einkristall- und Pulver-Diffraktometrie Anwendertreffen, Potsdam (D), 03.-05. November 2004

[T18] S. Bonß

"New Developments in Laser Beam Hardening"

International Open House, Dresden (D), 20.-21. September 2004

[T19] S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer, M. Seifert

"High Power Laser Beam Scanning in Multi-Kilowatt Range"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / CA (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T20] S. Bonß, B. Brenner, H.-J. Scheibe, E. Beyer

"Laser gas alloying of Titanium - Process technology and wear test results"

International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 19.-23. April 2004

[T21] S. Bonß, K.-H. Richter

"Sensorik beim Schweißen von Nickelbasislegierungen mit HLDL"

Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern, Dresden (D), 21.-22. Oktober 2004

[T22] S. Bonß, K.-H. Richter

"Laser Hybrid Welding of Advanced High Strength"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / CA (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T23] S. Braun

"High-Reflection Optics and High-Precision Metrology for Extreme Ultraviolet (EUV) Light"

Nanofair 2004, Karlsruhe (D), 23.-24. November 2004

[T24] S. Braun, B. Bendjus, T. Foltyn, M. Menzel, J. Schreiber, A. Leson

"Smoothing of Substrate Roughness by Carbon-Based Layers Prepared by Pulsed Laser Deposition (PLD)"

Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications II , (SPIE Annual Meeting 2004: Radiation Technologies), Denver / CO (USA), 02.-06. August 2004

[T25] S. Braun, R. Dietsch, T. Foltyn, T. Holz, A. Leson, M. Menzel, M. Moss, D. Weißbach

"High Resolution and High Reflectance Multilayers in the Photon Energy Range 900-1800 eV"

7th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures - PXRMS 2004, Sapporo (J), 07.-11. März 2004

[T26] B. Brenner

"Moderne Laserstrahlschweißverfahren in der Fertigung"

OTTI-Profiforum "Lasereinsatz in der Fertigung und Materialbearbeitung", Regensburg (D), 01.-02. Dez. 2004

[T27] B. Brenner

"Laserstrahlschweißen schwer schweißbarer Werkstoffe"

IWF-Kolloquium, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 09. Dezember 2004

[T28] B. Brenner

"Laserhärten - die präzise Kurzzeit-Wärmebehandlung"

4. Materialforschungstag des Materialforschungsverbundes Dresden, 05. November 2004

[T29] B. Brenner, E. Beyer, S. Nowotny

"Overview of Hybrid Technology"

1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, Melbourne (AUS), 19.-21. April 2004

[T30] B. Brenner, J. Standfuß, A. Jahn, D. Dittrich, A. Zwick

"Neue verfahrenstechnische Lösungen zum Laserstrahlschweißen für den Karosseriebau"

22. Fachtagung "Prozesskette Karosserie", Dresden (D), 21.-23. September 2004

[T31] B. Brenner, J. Standfuß, L. Morgenthal, D. Dittrich, V. Fux, B. Winderlich, H. Brenneis, W. Zink, J. Hackius, J. Held, W. Schwabe

"Neue technologische Aspekte des Laserstrahlschweißens von Flugzeugstrukturen"

Symposium "Moderne Anwendungen und Werkstoffe in Neufertigung und Instandhaltung - Schweißen und Löten im Luft- und Raumfahrzeugbau", Internationale Luft- und Raumfahrtausstellung, Berlin (D), 10.-16. Mai 2004

[T32] B. Brenner, J. Standfuß, U. Stamm, A. Jahn, G. Göbel, B. Winderlich

"Laserinduktionsschweißen in Forschung und Anwendung"

Innovationsforum "Hybridtechnologien - Fügetechnologien für die Zukunft", Halle, 23.-24. November 2004

[T33] W. Conrad, M. Panzner, A. Kempe

"Laserreinigung von Vergoldungen"

8. Forum "Laser in Restaurierung und Denkmalpflege", Fulda (D), 08. Oktober 2004

[T34] I. Dani, V. Hopfe, D. Rogler, L. Roch, G. Mäder

"Plasma Enhanced CVD of Atmospheric Pressure for Wide Area Coating on Temperature Sensitive Materials"

PSE, Garmisch Partenkirchen (D), 13.-17. September 2004

[T35] T. Foltyn, S. Braun, P. Gawlitza, A. Leson, K. Bergmann, W. Neff, K. Walter

"Design and Development of an Optical System for EUV-Microscopy"

Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications II (SPIE Annual Meeting 2004: Radiation Technologies), Denver / CO (USA), 02.-06. August 2004

[T36] P. Gawlitza

"Maßgeschneiderte Innenbeschichtungen mittels Puls-Laser-Deposition (PLD)"

Laser Summer School 2004, Dresden (D), 07.-09. Juni 2004

[T37] J. Hannweber, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"Prozesskette Integrierte Härterei - Laserstrahlhärten als Facharbeiterprozess"

Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern, Dresden (D), 21.-22. Oktober 2004

[T38] J. Hannweber, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"Ortsauflösend messendes Temperaturerfassungssystem für die Lasermaterialbearbeitung"

Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern, Dresden (D), 21.-22. Oktober 2004

[T39] J. Hannweber, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"Integrated Laser System for Heat Treatment with High Power Laser"

23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, San Francisco (USA) 04.-07. Oktober 2004

[T40] R. Häßler, I. Jansen

"Thermische Analyse dünner Schichten"

GEFTA-Jahrestagung 2004, Braunschweig (D), 04.-06. Oktober 2004

[T41] T. Himmer

"Metal Laminated Tooling - A Quick and Flexible Tooling Concept"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / CA (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T42] V. Hopfe

"Atmospheric Pressure Plasma CVD for Wide Area Coating"

16th International Vacuum Congress / International Conference Solid Surfaces, Venice, 28. Juni - 02. Juli 2004

[T43] T. Holz, D. Korytar, T. Böttger

"Impact of Coupled Parallel Beam X-Ray Mirrors and Channel Cut Monochromators on Divergence Beam Width and Monochromacy"

DPG Frühjahrstagung 2004, Regensburg (D), 08.-11. März 2004

[T44] T. Hutsch

"Naturwissenschaftliche Betrachtungen zum Laserstrahlreinigen von Kunst- und Kulturgut aus Kupfer und Kupferlegierungen"

8. Forum "Laser in Restaurierung und Denkmalpflege", Fulda (D). 08. Oktober 2004

[T45] R. Jacob, R. Sonnet, M. Wagner, G. Wiedemann

"Laserstrahlschweißen in der Restaurierung am Beispiel eines silbernen, teilvergoldeten Schmuckkästchens mit Kaltbemalung aus dem Bestand des Grünen Gewölbes"

8. Forum "Laser in Restaurierung und Denkmalpflege", Fulda (D), 08. Oktober 2004

[T46] R. Jäckel

"Nanotechnologie: Ultradünne funktionale Schichten - mit großen Auswirkungen"

VDI-Workshop Nürnberg (D), 12. Februar 2004

[T47] A. Jahn, B. Brenner, B. Winderlich

"Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen von Strukturen aus höherfesten Feinblechen"

Konferenz Strahltechnik, Halle (D), 26.-28. April 2004

[T48] A. Jahn, B. Winderlich, A. Zwick, R. Imhoff, B. Brenner

"Laserstrahlhybridschweißen schwingend belasteter Bauteile aus dem hochfesten Feinkornbaustahl S 1100 QL"

Große Schweißtechnische Tagung, Magdeburg (D), 22.-24. September 2004

[T49] I. Jansen

"Klebflächenvorbereitung von Magnesiumbauteilen"

Dresdener Fügetechnisches Kolloquium "Klebtechnik - Verfahren und Prozesse ziel- und qualitätsgerecht gestalten", Dresden (D), 25.- 26. März 2004

[T50] I. Jansen

"Vorbehandlung und Klebstoffauswahl"

Glasbau 2004, Dresden (D), 02. April 2004

[T51] I. Jansen, D. Schneider

"Anwendung der Lawave-Methode in der Klebtechnik"

Dechema-Kolloquium "Klebtechnik", Frankfurt (D), 23.-24. November 2004

[T52] E. Jelen, K. Püschner, G. Wiedemann

"Dekontamination biozidbelasteter Kunst- und Kulturgüter aus Holz"

8. Forum "Laser in Restaurierung und Denkmalpflege", Fulda (D). 08. Oktober 2004

[T53] Klaffke, H.-J. Scheibe, V. Weihnacht

"Tribological Characterisation of Amorphous Hard Carbon (ta-C) Coatings at Room Temperature; Effect of Counterbody Material and Humidity"

4th International Conference 'THE coatings', Erlangen, 05.-07. April International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 19.-23. April 2004

[T54] A. Klotzbach, V. Fleischer, L. Morgenthal, E. Beyer

"Robotergeführtes Remoteschweißen mit Hochleistungs-YAG-Lasern"

4. Jenaer Lasertagung, Jena (D), 18.-19. November 2004

[T55] U. Klotzbach

"Chances of Laser Micro Materials Processing"

International Open House, Dresden (D), 20.-21. September 2004

[T56] A. Leson

"Nanotechnologie - Vision oder Realität"

Ingenieurstammtisch des Vereins der Ingenieure, Techniker und Wirtschaftlicher in Sachsen e.V., Dresden (D), 06. Januar 2004

[T57] A. Leson

"The FhG-Thyssen Cooperation"

Nano DE 2004, Wiesbaden (D), 21.-22. Juni 2004

[T58] A. Leson

"Nanometer-Schichtsysteme für Röntgenoptiken"

Nanotechnologie in der industriellen Anwendung, Regensburg (D), 04.-05. Oktober 2004

[T59] A. Leson

"Nanotechnologie - Chancen für den Standort Deutschland?"

Berliner Republik - Innovationsdialoge: Chancen und Risiken der Nanotechnologie, Berlin (D), 30. Juni 2004

[T60] A. Leson

"XUV Optics and Applications"

Heraeus Seminar "XUV Technologies and Applications", Bad Honnef (D), 07.-09. Juni 2004

[T61] A. Leson

"Nanotechnology in Saxony"

Commercialization of Micro and Nano Systems Conference - COMS 2004 Edmonton (Kanada), 29. August - 02. September 2004

[T62] A. Leson

"Nanotechnologie - Zukunftschance oder Fiktion?"

Tag der Technik an der Landesschule Pforta, Schulpforte (D), 12.-13. Oktober 2004

[T63] A. Leson

"German Centers of Competence in Nanotechnology Present Status and Our Experiences"

International Nanotech Workshop 2004, Venedig (IT), 19. März 2004

[T64] A. Leson, S. Braun, P. Gawlitza

"Fabrication of High-Precision Tailored Materials by Pulsed Laser Deposition"

International Open House, Dresden (D), 20.-21. September 2004

[T65] A. Leson, P. Gawlitza, S. Braun, M. Menzel

"Pulsed Laser Deposition - An Indispensable Tool for the Fabrication of High-Precision Tailored Materials"

6th Symposium of European Vacuum Coaters, Anzio (IT), 27.-29. September 2004

[T66] L. van Loyen, T. Böttger, S. Schädlich, S. Braun, A. Leson

"Aufbau und Leistungsfähigkeit des IWS-EUV-Reflektometers"

13. Arbeitstagung Angewandte Oberflächenanalytik - AOFA 13, Dresden (D), 14.-17. September 2004

[T67] G. Mäder, F. Prässler, D. Rogler, V. Hopfe

"Simulation einer Lichtbogenplasmaquelle zur Nutzung einer plasmagestützten Schichtabscheidung unter Atmosphärendruck"

Fluent CFD Konferenz 2004, Bingen (D), 29.-30. September 2004

[T68] S. Martens, C. Kleemann, V. Weihnacht, L.-M. Berger, R. Zieris, I. Schulz

"Ceramic Coatings"

COST 532 Conference, Triboscience and Tribotechnology, Superior Friction and Wear Control in Engines and Transmissions, Ghent (B), 18.-19. Oktober 2004

[T69] M. Menzel

"Abscheidung von hochauflösenden Kohlenstoff/Kohlenstoff-Multischichten auf großflächigen Substraten für röntgenoptische Anwendungen mittels Pulsed Laser Deposition (PLD)"

Laser Summer School 2004, Dresden (D), 07.-09. Juni 2004

[T70] L. Morgenthal, A. Klotzbach

"Nd:YAG Laser Remote Welding System"

International Open House, Dresden (D), 20. - 21. September 2004

[T71] S. Nowotny

"Laserstrahl-Auftragschweißen: industrielle Lösungen für das Beschichten, Reparieren und Formändern von Werkzeugen, Formen und Bauteilen"

Festveranstaltung zum Firmenjubiläum der Firma LASERVORM, Mittweida (D), 26. November 2004

[T72] S. Nowotny

"Kombination von Auftragschweißverfahren für schnelle Reparaturen und Formänderungen von Werkzeugen"

Neue Rapid Technologien auf dem Weg in die Produktion, Dresden (D), 09.-10. November 2004

[T73] S. Nowotny

"New Developments for Thermal Coating Processes"

International Open House, Dresden (D), 20.-21. September 2004

[T74] S. Nowotny

"Neue systemtechnische Lösungen zum Auftragschweißen mit Diodenlasern"

Industrielle Anwendungen von Hochleistungs-Diodenlasern, Dresden (D), 21.-22. Oktober 2004

[T75] S. Nowotny, K.-H. Richter

"Laser Cladding of the Titanium Alloy Ti6242 to Restore Damaged Blades"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / CA (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T76] S. Nowotny, S. Scharek

"Fertigungsintegration von hybriden Auftragschweißverfahren zum Oberflächenschutz und zur Reparatur von Bauteilen"

Karlsruher Arbeitsgespräche, Karlsruhe (D), 11.-12. März 2004

[T77] S. Nowotny, S. Scharek, F. Kempe

"Laserstrahl-Präzisionsauftragschweißen: industrielle Lösungen für die Reparatur und schnelle Formänderungen von Werkzeugen"

3D-Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, Dresden (D), 13.-14. Mai 2004

[T78] S. Nowotny, S. Scharek, T. Naumann

"Development in HPDL Cladding with a Wide Laser Beam"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / CA (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T79] S. Nowotny, R. Zieris, E. Beyer

"Surface Protection of Light Alloys by Laser Assisted Atmospheric Plasma Spraying (LAAPS)"

International Conference on Plasma Surface Engineering (PSE), Garmisch-Partenkirchen (D), 13.-17. September 2004

[T80] K.-H. Richter, S. Orban, S. Nowotny

"Laser Cladding of the Titanium Alloy Ti6242 to Restore Damaged Blades"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / CA (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T81] H.-J. Scheibe, C.-F. Meyer, M. Leonhardt, B. Schultrich, V. Weihnacht

"Laser-Arc-Module for Deposition of Hard Amorphous Carbon (ta-C) Coatings with Industrial Batch Coaters"

4th International Conference 'THE coatings', Erlangen (D), 05.-07. April 2004
International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 19.-23. April 2004

[T82] T. Schülke

"In-situ Temperature Sensor for Cutting Tools"

International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 19.-23. April 2004

[T83] B. Schultrich

"Laser Assisted Deposition of Superhard Carbon Films"

International Open House, Dresden (D), 20.-21. September 2004

[T84] B. Schultrich, J. Berthold, H.-J. Scheibe, H. Schulz, P. Siemroth, V. Weihnacht

"Superhard Amorphous Carbon Films from 2 nm to 100 µm: Properties and Applications"

PSE, Garmisch-Partenkirchen (D), 13.-17. September 2004

[T85] B. Schultrich, C.-F. Meyer, H. Schulz, H.-J. Scheibe, V. Weihnacht

"Industrielle Anwendung und Herstellung superharter amorpher Kohlenstoffschichten"

7. Werkstofftechnisches Kolloquium, Chemnitz (D), 30.9.-01.10.2004

[T86] B. Schultrich, H.-J. Scheibe

"Laser-Arc Process and Technology for Deposition of Hard Amorphous Carbon (ta-C)"

47th Annual SVC Technical Conference and Smart Materials Symposium, Dallas / Texas (USA), 24.-29. April 2004

[T87] B. Schultrich, S. Völlmar, D. Römer

"Process Simulation of Industrial Vacuum Arc Deposition"

4th International Conference 'THE coatings', Erlangen (D), 05.-07. April 2004

[T88] B. Schultrich, D. Römer, S. Völlmar

"Influence of Planetary Kinematics and Batch Filling on Film Homogeneity and Deposition Rate in Industrial Batch Coaters- a Simulation Approach"

PSE, Garmisch-Partenkirchen (D), 13.-17. September 2004

[T89] H. Schulz

"Von Superhärte bis Superhydrophobie - amorphe Kohlenstoffschichten als ..."

Oberflächentage 2004, Dresden (D), 22.-24. September 2004

[T90] H. Schulz, M. Leonhardt, H.-J. Scheibe, B. Schultrich

"Hydrophobe Oberflächen durch modifizierte Kohlenstoffschichten"

7. Werkstofftechnisches Kolloquium, Chemnitz (D), 30.09.-01.10.2004

[T91] H. Schulz, M. Leonhardt, B. Schultrich, H.-J. Scheibe

"Ultrahydrophobic Wetting Behavior of Amorphous Carbon Films"

PSE, Garmisch-Partenkirchen (D), 13.-17. September 2004

[T92] M. Seifert, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"Dynamische Strahlformung von Hochleistungs-Diodenlasern bis 4 kW"

Industrielle Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern, Dresden (D), 21.-22. Oktober 2004

[T93] M. Seifert, S. Bonß, B. Brenner, E. Beyer

"High Power Laser Beam Scanning in Multi-Kilowatt-Range"

23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, San Francisco (USA) 04.-07. Oktober 2004

[T94] M. Seifert, S. Bonß, E. Beyer

"Advanced Manufacturing Technologies of Metallic Components with High Power Diode Lasers"

Laser System Technology and Applications for SME's, S. Asaph (GB), 12.-13. Februar 2004

[T95] P. Siemroth, J. Berthold, Petereit, H. Schneider, H. Hilgers

"A New Generation of Filtered Arc Sources for Ultra Thin Top Coats on Magnetic Hard Disks"

International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 19.-23. April 2004

[T96] A. Skopp, N. Kelling, M. Woydt, L.-M. Berger

"Thermally Sprayed TiO_{2-x}-Coatings under Mixed Lubrication and Unlubricated Sliding Conditions"

Tribologie-Fachtagung 2004, Göttingen (D), 27.-29. September 2004

[T97] J. Standfuß

"Laser Beam Welding"

International Open House, Dresden (D), 20.-21. September 2004

[T98] J. Standfuß, A. Klotzbach, A. Jahn, A. Mahrle, B. Brenner

"Verfahrens- und systemtechnische Aspekte zum Laserstrahlschweißen von Strukturen aus höherfesten Feinblechen"

IIR-Fachforum "Fügetechnologien im Fahrzeugrohbau", Dresden, 09.-10. März 2004

[T99] T. Stucky

"Kohlenstoffschichten in Theorie und Praxis"

Nanotechnologie in der industriellen Anwendung, Regensburg (D), 04.-05. Oktober 2004

[T100] A. Techel, T. Himmer, E. Beyer, T. Heptner

"Automation Solutions for Metal Laminated Tooling"

4th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering - LANE 2004, Erlangen (D), 21.-24. September 2004

[T101] F.-L. Toma, G. Bertrand, D. Klein, L.-M. Berger, S. Thiele

"Photocatalytic Properties of Coatings Sprayed from TiO_x and $Ti_{n-2}Cr_2O_{2n-1}$ Powders by APS and VPS"

International Thermal Spray Conference & Exhibition ITSC 2004, Osaka (J), 10.-12. Mai 2004

[T102] C. Walz, E. Stiles, A. Groth

"Laser Cladding and Primer Application as a One-Step-Process"

Laser Materials Processing Conference - ICALEO 2004, San Francisco / California (USA), 04.-07. Oktober 2004

[T103] M. Woydt, A. Skopp, N. Kelling, L.-M. Berger

"Tribological Characterization of Titanium Suboxide Coatings Prepared by VPS Spraying"

International Thermal Spray Conference & Exhibition ITSC 2004, Osaka (J), 10.-12. Mai 2004

[T104] M. Woydt, A. Skopp, N. Kelling, L.-M. Berger

"Tribological Characterization of Titanium Suboxide Coatings Prepared by VPS Spraying"

4th International Tribology Conference, Prag (CZ), 17.-18. Juni 2004

[T105] H. Wust, I. Jansen, E. Beyer

"Vorbehandlung von Magnesium mit Laserstrahlung"

Laser-Summerschool, Dresden (D), 07.-09. Juni 2004

[T106] R. Zieris, G. Langner, L.-M. Berger, S. Nowotny, E. Beyer

"Investigation of AlSi Coatings Prepared by Laser-Assisted Atmospheric Plasma Spraying of Internal Surfaces of Tubes"

International Thermal Spray Conference & Exhibition ITSC 2004, Osaka (J), 10.-12. Mai 2004

[T107] O. Zimmer

"Vacuum Arc Deposition by Using a Venetian Blind Particle Filter"

PSE, Garmisch-Partenkirchen (D), 13.-17. September 2004

[T108] O. Zimmer, J. Vetter, P. Siemroth, B. Schultrich

"Technical Physics of the Cathodic Vacuum Arc Evaporation"

International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films - ICMCTF, San Diego (USA), 19.-23. April 2004

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

Bitte senden Sie mir:

- ☐ die Broschüre "Problemlösungen aus einer Hand"
- ☐ die Broschüre "One-Stop Solutions" (in englisch)
- ☐ den Jahresbericht 2002
- ☐ den Jahresbericht 2003
- ☐ einen weiteren Jahresbericht 2004

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
- ☐ Laser-Arc-Modul zur Abscheidung von superharten amorphen Kohlenstoffschichten

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

Bereich Füge- und Randschichttechnologien

- ☐ Laserstrahlschweißen und Hybridschweißverfahren
- ☐ 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-Strahlablenkoptik 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:

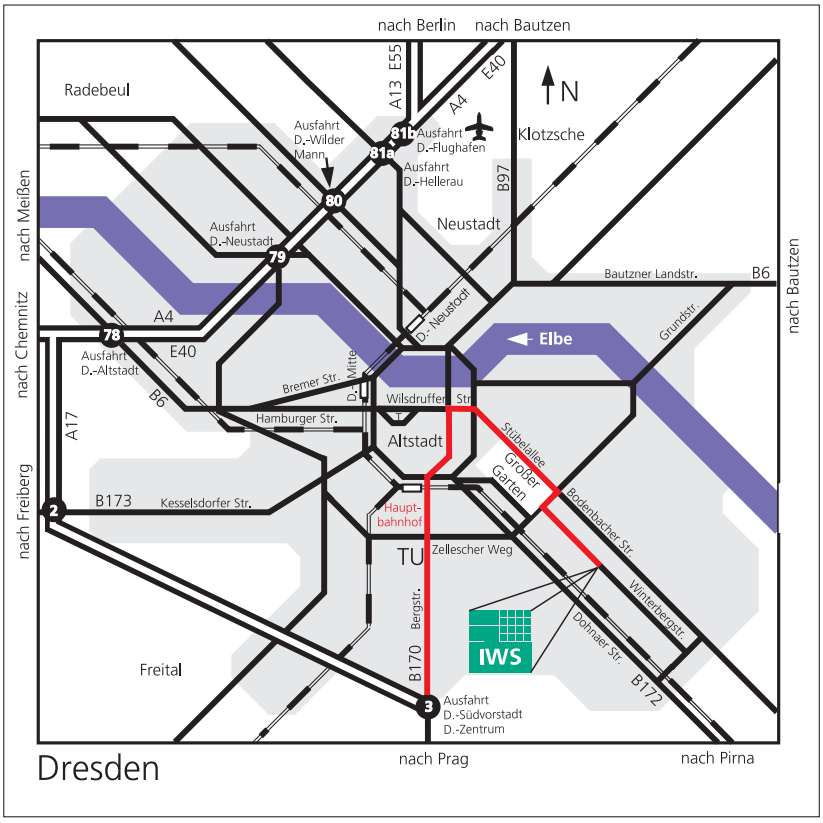
http://www.iws.fraunhofer.de

Tel.: (0351) 2583 324
Fax: (0351) 2583 300
E-mail: info@iws.fraunhofer.de

Anfahrtsweg:

Mit dem Auto (ab Autobahn):
- Autobahn A4 oder A13 bis Dreieck Dresden-West, dann über die neue Autobahn A17, Ausfahrt Südvorstadt / Zentrum,
- Bundesstraße B170 folgend Richtung Stadtzentrum bis Pirnaischer Platz (ca. 6 km),
- am Pirnaischen Platz rechts abbiegen Richtung "Gruna / VW-Manufaktur",
- geradeaus, am Ende des "Großen Gartens" rechts in die Karcherallee,
- an der folgenden Ampel links in die Winterbergstraße.

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. 46	(Abb. 1):	Lange und Söhne GmbH Glashütte
S. 51	(Abb. 1):	Staatliche Kunstsammlungen Dresden
S. 55	(Abb. u. r.):	Alstom
S. 109	(Abb. u.):	City-Press / ess.er
alle anderen Abb.:		Fraunhofer IWS Dresden

Titelfoto:
Institutsgebäude

© Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Dresden 2005

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.